



ความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอลสิต HDPE และผงไม้ขี้มด

โดย

นายอวิธ ศิริสุขไพฑูรย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอลิต HDPE และผงไม้มวลี

โดย

นายอวิธ ศิริสุขไพบูลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PHOTOSTABILITY OF DYED WOOD / HDPE COMPOSITE

By

Awat Sirisukpaibul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ ความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอสิต HDPE และผงไม้ขี้อมลี ” เสนอโดย นายอวิส ศิริสุขไพบูรณ์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตังกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

...../...../.....

51402245 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : วัสดุคอมพอสิต HDPE และผงไม้/การเสื่อมสภาพจากแสงแดด/การกำจัดลิกนิน/การย้อมสี

อาวัส ศิริสุขไพบุลย์ : ความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอสิต HDPE และผงไม้ย้อมสี. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และ ผศ.ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร. 95 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอสิต HDPE และผงไม้ยางพารา ย้อมสี เพื่อการใช้งานภายนอกอาคาร โดยสีที่ใช้ในการย้อมผงไม้ในงานวิจัยได้แก่สีสังเคราะห์ (สี ไคเร็กซ์และรีแอคทีฟ) และสีธรรมชาติ (สีจากไม้ฝาง) โดยก่อนการย้อมสี ผงไม้ยางพาราจะถูกกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid chlorite treatment เพื่อเพิ่มความสามารถในการย้อมติดสีผงไม้ยางพาราที่กำจัดลิกนินจะถูกย้อมสีด้วยสัดส่วนการดูดซับสีมากกว่า 60% ของปริมาณสีย้อมเริ่มต้น วัสดุคอมพอสิตจะถูกเตรียมโดยกระบวนการหลอมผสมในสัดส่วนของผงไม้ต่อ HDPE เท่ากับ 60:40% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Twin-screw extruder และใช้ MAPE 10 phr เป็นสารประสานคู่ควบ จากนั้นขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Injection molding หลังจากนั้นนำชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต HDPE และผงไม้ย้อมสีไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน ติดตามการเปลี่ยนแปลงของวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค FTIR, Contact angle, TGA, DSC และ SEM จากนั้นวัดการเปลี่ยนแปลงสีตามระบบ CIE Lab และวัดค่าสมบัติเชิงกล จากผลการทดลองพบว่าสีที่ผิวของวัสดุคอมพอสิตที่ใช้ผงไม้เริ่มต้น (WPE) และผงไม้กำจัดลิกนินที่ย้อมด้วยสีรีแอคทีฟ (RT-WPE) จะซีดจางลงไปมาก ในขณะที่วัสดุคอมพอสิตที่ใช้ผงไม้กำจัดลิกนิน (D-WPE) ผงไม้กำจัดลิกนินที่ย้อมสีไคเร็กซ์ (DR-WPE) และสีจากฝาง (SP-WPE) จะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ความเสถียรทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของ DR-WPE และ SP-WPE สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ D-WPE แต่ RT-WPE มีค่าต่ำลง ค่า Contact angle ของชิ้นงานทดสอบทุกตัวที่มีการปรับปรุงสภาพไม้จะลดลงมาก ความเป็นผลึกของชิ้นงานทดสอบทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นและภาพจาก SEM แสดงให้เห็นถึงรอยแตกบนผงไม้และบนพื้นผิวพอลิเมอร์ข้างเคียง สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุคอมพอสิตที่ผงไม้ย้อมสีด้วยสีจากไม้ฝางมีความเสถียรต่อแสงแดดมากที่สุด

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552
ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

51402245 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : WOOD HDPE COMPOSITE/PHOTODEGRADATION/DELIGNIN/DYEING

AWAT SIRISUKPAIBUL : PHOTOSTABILITY OF DYED WOOD / HDPE COMPOSITE.

THESIS ADVISORS : ASST.PROF.NATTAKARN HONGSRIPHAN, D.ENG., AND
ASST.PROF.PAJAERA PATANATABUTR, Ph.D. 95 pp.

This research investigated the photostability of dyed rubber wood / HDPE composite for use in outdoor applications. Two types of synthetic dye (direct dye and reactive dye) and a natural dye (from sappanwood) were used to dye wood flour. Before dyeing, wood flour was bleaching and removing lignin by acid chlorite treatment in order to increase dye absorption. Delignin wood flour was dyed in upper 60% absorption ratio of original dye solution. Wood composite was prepared by melt blending of HDPE (40 wt%) and wood flour (60 %wt) using 10 phr of maleic anhydride graft HDPE (MAPE) as a coupling agent. Wood composites were injection-molded into specimen, and then placed outdoor in glass box for sunlight exposure in 3 months. Photodegradation of weathered specimens were characterized by FTIR, contact angle, TGA, DSC and SEM. Color change of weathered specimens was measured with CIE Lab system and mechanical properties of specimens were determined. It was found that color of original (WPE) and reactive dyed (RT-WPE) specimens were faded more than those of direct dyed (DR-WPE), sappan dyed (SP-WPE) and delignin specimens. Direct dyed and sappan dyed had higher thermal and mechanical properties when compared with delignin wood while reactive dyed had lower. Contact angle of specimens of treated wood was much lower than specimens of original wood. All specimens increased in crystallinity and SEM micrographs show cracks on wood and HDPE surfaces. In this research, wood composite with sappan dyed wood has the highest photostability.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถานุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะวิธีการทำงานและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประมัญญ โปธิยะราช อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากภาควิชาภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และอาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ อาจารย์จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ข้อเสนอแนะและเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เคยอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ รวมถึงการติดต่อประสานงานกับบริษัทหรือบุคคลผู้มีความรู้มาให้คำแนะนำในบางโอกาส และขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งสนับสนุนเรื่องสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ของภาควิชานี้ที่คอยให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือและสารเคมีต่างๆ ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งสุขธวัช นายช่างเทคนิคของภาควิชาที่ช่วยซ่อมบำรุงเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการทำงาน ขอขอบคุณพนักงานและเจ้าหน้าที่ของภาควิชาที่ช่วยติดต่อประสานงานเรื่องต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนงานวิจัย ทุนการศึกษาและทุนการนำเสนอผลงาน จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโทมาบัณฑิต จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์รวมถึงเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ขอขอบคุณ บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติก HDPE

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่มีน้ำใจช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ช่วยส่งเสริมและเป็นกำลังใจในการทำงานครั้งนี้จนกระทั่งสำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
2 เอกสารและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไม้อย่างพารา	8
เซลลูโลส.....	9
เฮมิเซลลูโลส	9
ลิกนิน	9
สารแทรก	11
สีและการย้อมสี	12
หลักการย้อมสีพื้นฐาน	12
แบบจำลองการย้อม.....	12
ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ในระบบการย้อม	13
สีรีแอกทีฟ (Reactive dyes).....	16
สีไดเรกซ์ (Direct dyes).....	18
สีแดงธรรมชาติจากไม้ฝาง	19
วัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก	21
สมบัติของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก	22
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23

บทที่	หน้า
3	วิธีดำเนินงานวิจัย..... 26
	วัตถุดิบ 26
	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE). 26
	Maleic anhydride graft HDPE (MAPE) 26
	ผงไม้ยางพารา 27
	สีย้อม..... 27
	สารเคมี..... 27
	เครื่องมือ..... 27
	วิธีการทดลอง..... 28
	การเตรียมผงไม้ยางพารา..... 28
	กระบวนการผสม HDPE และผงไม้ยางพารา..... 33
	ทดสอบความทนทานต่อแสงแดด..... 33
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุคอมพอสิตของไม้ยางพาราและ HDPE..... 34
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 37
	ผลการกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid Chlorite Treatment..... 37
	ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินออกจากผงไม้ยางพารา..... 37
	ปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98 37
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้ยางพาราที่กำจัดลิกนิน..... 38
	ประสิทธิภาพการย้อมสีผงไม้ยางพาราที่กำจัดลิกนิน 39
	ความเสถียรทางความร้อนของผงไม้ยางพาราและผงไม้ยางพาราที่ย้อมสี 41
	สมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน 42
	การเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุคอมพอสิต 43
	ค่าการเปียกผิวของวัสดุคอมพอสิตเมื่อผ่านการตากแดดนาน 3 เดือน..... 46
	การเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน 47
	สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน..... 50
	ค่าความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิต..... 50
	ความเสถียรทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิต 52
	สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน 54
	โครงสร้างพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน 59

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ.....	63
สรุปผลการวิจัย.....	63
ข้อเสนอแนะ.....	64
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	73
ภาคผนวก ค.....	83
ประวัติผู้วิจัย	95

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การดูดซับพลังของหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน.....	25
2	แสดงปริมาณ Sodium sulphate ที่ใช้ในการย้อมสีไคเร็กซ์เมื่อใช้ปริมาณสีที่แตกต่างกัน โดยเดิม Group x ก่อนที่เวลา 10 นาที และตามด้วย Group y ที่เวลา 50 นาที.....	30
3	แสดงปริมาณ Sodium chloride และ Sodium carbonate ที่ใช้ในการย้อมสีรีแอคทีฟที่ปริมาณสีที่แตกต่างกัน.....	31
4	แสดงเอกลักษณ์ของสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	32
5	แสดงสูตรการผสมของวัสดุคอมพอลิตของไม้อย่างพาราและ HDPE.....	33
6	แสดงร้อยละของ Klason lignin และของลิกนินที่ถูกกำจัดที่เวลาเกิดปฏิกิริยาต่างๆ.....	38
7	แสดงค่าร้อยละของการดูดซึมสีชนิดต่างๆ ของผงไม้ที่กำจัดลิกนิน.....	40
8	ค่าความเป็นผลึกของชิ้นงานทดสอบ	51
9	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด อุณหภูมิหยุดสลายตัวและเปอร์เซ็นต์การคงเหลือของแข็งที่เหลืออยู่ ของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน	53
10	ผลการวัดสีและค่า Contact angle ของวัสดุคอมพอลิตทั้งก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	76
11	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	78
12	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ MA-HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน....	78
13	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	78
14	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ D-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	79
15	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ DR-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	79

ตารางที่		หน้า
16	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ RT-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	79
17	แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ SP-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	80
18	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	80
19	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ MA-HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็น เวลา 1, 2 และ 3 เดือน	80
20	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	81
21	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ D-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	81
22	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ DR-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	81
23	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ RT-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	82
24	แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ SP-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน	82
25	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค SEM และ EDS	82

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เศษไม้ที่เหลือจากการแปรรูปไม้ยางพารา	2
2	แสดงกลไกการเกิดอนุมูลอิสระจากการเสื่อมสภาพของลิกนิน (Lignin)	3
3	แสดงหน่วยซ้ำของเซลลูโลส.....	9
4	แสดงมอนอเมอร์ของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส.....	10
5	ส่วนหนึ่งของสูตร โครงสร้าง <i>O</i> -acetyl-4- <i>O</i> -methylglucuronoxylan.....	10
6	โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (1) <i>p</i> -coumaryl alcohol, (2) coniferyl alcohol, and (3) sinapyl alcohol	11
7	โครงสร้างทางเคมีของสารแทรกในไม้ : (1) Abietic acid, (2) α -pinene, (3) Pinosylvin, (4) Pineresinol, (5) Gallic acid, (6) α -, β -, และ γ -thujaplicin....	11
8	แสดงแบบจำลองการย้อม.....	12
9	แสดงลักษณะคอลลอยด์ของสีย้อมในน้ำ	14
10	แสดงพันธะทุติยภูมิระหว่างสีและเส้นใย.....	15
11	แสดงลักษณะการเกิดพันธะไฮดรอกซิลระหว่างสีย้อมกับเส้นใย.....	16
12	แสดงลักษณะการเกิดพันธะโคเวเลนต์.....	16
13	แสดงการย้อมสีรีแอคทีฟไปยังเส้นใยเซลลูโลส	17
14	แสดงตัวอย่างโครโมฟอร์ในโครงสร้างของสีรีแอคทีฟ (C.I. Reactive Red 2) ..	17
15	แสดงโครงสร้างของ C.I. Direct Blue 78.....	19
16	แสดงใบ ดอก และฝักของฝางตามลำดับ	19
17	แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Brazilien.....	20
18	แสดงสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะมอร์แดนต์กับสีย้อมธรรมชาติและเส้นใย	21
19	แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกชนิดต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิเสื่อมสภาพ ของไม้.....	22
20	แสดงโครงสร้างทางเคมีของ HDPE.....	26
21	แสดงขั้นตอนในการหาปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98.....	29
22	แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีไดเรกต์.....	30
23	แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีรีแอคทีฟ.....	31
24	แสดงสภาวะที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีธรรมชาติของไม้ฝาง.....	32
25	แสดงกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่บรรจุชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต	34

ภาพที่		หน้า
26	แสดงลักษณะของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในแต่ละวัน ของเดือน มกราคม-เมษายน พ.ศ. 2553 ภายในกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์...	34
27	แสดงกลไกการแตกตัวของ NaClO_2 ในสารละลาย.....	37
28	แสดง FTIR spectrum ของผงไม้เริ่มต้น (Wood) และผงไม้ที่กำจัดลิกนิน (D-Wood).....	38
29	แสดงค่าดัชนีลิกนิน (Lignin index) ของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนินและ ผงไม้ที่ย้อมสีโดยที่ Wood คือผงไม้เริ่มต้น D-Wood คือผงไม้ที่กำจัด ลิกนิน DR-Wood คือ D-Wood ย้อมสีไคเร็กซ์ RT-Wood คือ D-Wood ย้อมสีรีแอกทีฟและ SP-Wood คือ D-Wood ย้อมสีจากไม้ฟาง.....	39
30	แสดงสีของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนิน และผงไม้ที่ย้อมสีชนิดต่างๆ	40
31	แสดงผลการทดสอบ TGA ของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนินและผงไม้ที่ ย้อมสี.....	41
32	แสดงภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบทั้ง ก่อนตากแดดและหลังตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน (จากซ้ายไป ขวา) โดยที่ a) HDPE, b) MA-HDPE, c) WPE, d) D-WPE, e) DR-WPE, f) RT-WPE และ g) SP-WPE	43
33	แสดงผลการตากแดดชิ้นงานคอมพอสิตเป็นเวลา 3 เดือน ต่อค่าความสว่างที่ เปลี่ยนไป (ΔL^*)	44
34	แสดงผลการตากแดดชิ้นงานคอมพอสิตเป็นเวลา 3 เดือน ต่อค่าความแตกต่าง ของสีโดยรวม (ΔE)	45
35	แสดงค่า Contact angle ของวัสดุคอมพอสิต ทั้งก่อนและหลังการตากแดดนาน 3 เดือน.....	46
36	แสดงค่า Carbonyl index ของชิ้นงานทดสอบทุกสูตร ทั้งก่อน (Before) และ หลัง (After) การตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน.....	47
37	แสดงกลไกการออกซิเดชันของพอลิเมอร์จากแสงแดด (ให้ P คือ HDPE).....	48
38	แสดงกลไกการเสื่อมสภาพจากแสงแดดแบบ Norrish type I และ type II ของ HDPE.....	49
39	แสดงกลไกการเสื่อมสภาพของไม้ในส่วนของสารประกอบ $-\text{C}-\text{O}-$ ใน เฮมิเซลลูโลสเมื่อได้รับแสงแดด.....	49

ภาพที่		หน้า
40	แสดงผลการทดสอบ FTIR ของ HDPE และ MA-HDPE ก่อน (before) และ หลังการตากแดด (after) เป็นเวลา 3 เดือน.....	49
41	แสดงผลการทดสอบ FTIR ของ WPE และ D-WPE ก่อน (before) และหลัง การตากแดด (after) เป็นเวลา 3 เดือน.....	50
42	แสดงผลการทดสอบ DSC ของ HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน.....	51
43	แสดงผลการทดสอบ TGA ของชิ้นงานทดสอบก่อนการตากแดด	52
44	แสดงผลการทดสอบ TGA ของชิ้นงานทดสอบหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน.....	52
45	แสดงผลการทดสอบ TGA ของวัสดุคอมพอสิตก่อนและหลังการตากแดดโดย ที่ a) HDPE b) MA-HDPE c) WPE d) D-WPE e) DR-WPE f) RT-WPE และ g) SP-WPE	54
46	แสดงสมบัติ Tensile ของชิ้นงานทดสอบเมื่อตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน โดยที่ a) Ultimate tensile strength, b) Young's modulus, และ c) %Strain at break	56
47	แสดงสมบัติ Flexural ของชิ้นงานทดสอบเมื่อตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน โดยที่ a) Ultimate flexural strength, b) Secant modulus, และ c) %Strain	57
48	แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของ DR-WPE ก่อนตากแดดและหลังตากแดด เป็นเวลา 3 เดือนซึ่งด้านซ้ายมือสุดคือ DR-WPE ก่อนตากแดด ไปทาง ขวามือสุดคือชิ้นงานที่ตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือนตามลำดับ โดย พิจารณาด้านที่รับแสงแดด (ชิ้นงานขวามือ) เทียบกับชิ้นงานทดสอบที่ ไม่ได้รับแสงแดด (ชิ้นงานซ้ายมือ).....	58
49	แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติการดัดโค้งที่หัก หลังจุ่มในโครเจนเหลวของวัสดุคอมพอสิตสูตรต่างๆ ก่อนตากแดด ที่ กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่ง a) WPE, b) D-WPE, c) DR-WPE, d) RT-WPE และ e) SP-WPE	59
50	แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณผลึกเกลือบนผิวด้านด้วยเทคนิค SEM-EDS	60

ภาพที่		หน้า
51	แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติการตัดโค้งที่หัก หลังจุ่มในโตรเจนเหลวของวัสดุคอมพอสิตสูตรต่างๆ หลังตากแดดเป็น เวลา 3 เดือน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่ง a) WPE, b) D-WPE, c) DR-WPE, d) RT-WPE และ e) SP-WPE	61
52	แสดงภาพ SEM บริเวณหน้าตัดที่หักชิ้นงานหลังจุ่มในโตรเจนเหลวของชิ้น งาน RT-WPE ที่กำลังขยาย 5000 เท่า	62
53	Calibration curve ของสีไคเร็กซ์	70
54	Calibration curve ของสีรีแอคทีฟ	71
55	Calibration curve ของสีจากไม้ฝาง	71
56	ตัวอย่างการหาความเข้มของพีคการดูดกลืนรังสี IR ของ WPE ก่อนตากแดดที่ wavenumber 1735 cm^{-1} และ 720 cm^{-1}	72
57	FTIR spectra ของผงไม้ D-Wood, DR-Wood, RT-Wood และ SP-Wood เรียง ลำดับจากเส้นบนลงล่าง	74
58	FTIR Spectra ของวัสดุคอมพอสิตทั้งก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน	75
59	ผลการทดสอบ DSC ของวัสดุคอมพอสิตก่อนตากแดด	77
60	ผลการทดสอบ DSC ของวัสดุคอมพอสิตก่อนหลังการตากแดด 3 เดือน	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

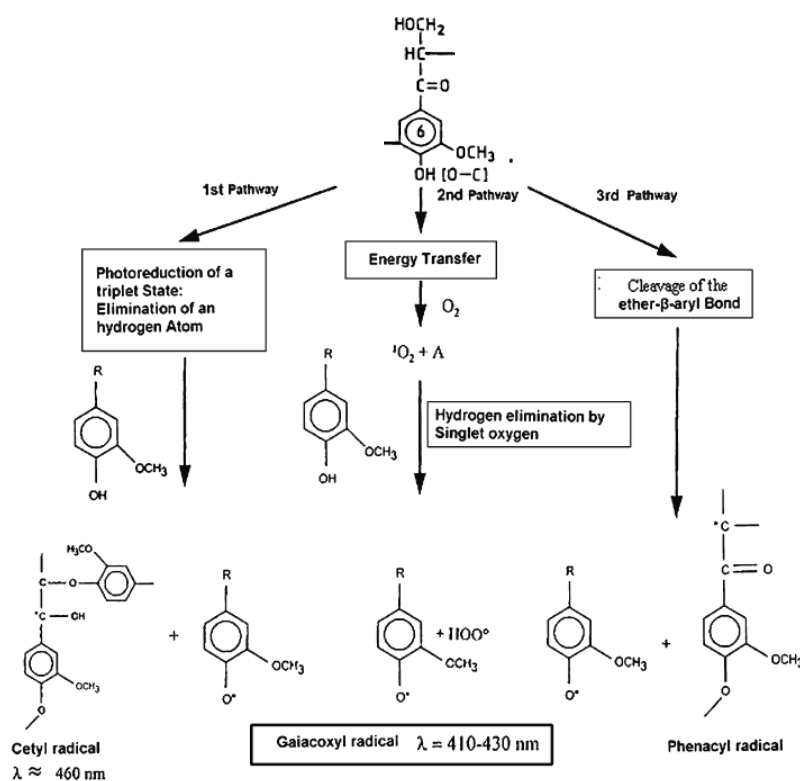
ไม้เป็นวัสดุที่มีสมบัติที่ดีต่างๆ หลากหลาย ซึ่งมนุษย์ได้ดัดแปลงแล้วนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่สมัยโบราณ ไม่ว่าจะเป็นการแปรรูปให้อยู่ในขนาดและลักษณะต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังสามารถเผาเพื่อให้พลังงานความร้อน เนื่องจากสมบัติหลากหลายของไม้จึงทำให้ไม้เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้ประโยชน์มาก ในปัจจุบันถึงแม้ว่าจะมีการปลูกป่าเพื่อเพิ่มปริมาณไม้ให้มีใช้กันมากขึ้น แต่ปัญหาเรื่องการลักลอบตัดไม้ในเขตป่าสงวนยังคงมีอยู่มาก เนื่องจากความต้องการและการตอบสนองความต้องการในแง่ของการใช้ไม้ไม่สมดุลกัน ทรัพยากรป่าไม้เป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญยิ่งของประเทศที่มีผลต่อสถานะสมดุลของระบบนิเวศ ดังนั้นหากมีการสูญเสียทรัพยากรป่าไม้มากเท่าไร ก็ย่อมทำให้เกิดความไม่สมดุลของธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากสภาวะวิกฤติจากภัยธรรมชาติในปัจจุบัน ซึ่งรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุที่สำคัญสืบเนื่องจากการลดลงอย่างรวดเร็วของพื้นที่ป่าไม้ ดังนั้น การศึกษาเพื่อพัฒนาวัสดุที่จะนำมาใช้ทดแทนไม้จึงจำเป็นอย่างยิ่งและจากการศึกษาและเก็บข้อมูลก็พบว่าจากปริมาณเนื้อไม้ที่ตัดมาจากป่ามีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เพียงแค่ 50-60% ของต้นไม้ทั้งต้นเท่านั้น การศึกษาหาแนวทางที่จะนำวัสดุไม้ที่เหลืออีก 40-50% มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุไม้ทางเลือกหนึ่งคือการพัฒนาวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกโดยสมบัติของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกสามารถที่จะพัฒนาให้มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม มีอายุการใช้งานนานขึ้นเมื่อเทียบกับไม้ตามธรรมชาติ อีกทั้งสามารถใช้งานได้ทั้งบนบกและทางทะเลโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1]

ต้นยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ยางพาราประเภทยางดิบ ผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราสามารถทำรายได้จากการส่งออกเป็นอันดับสองของประเทศ ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีคุณภาพทางกายภาพหลายประการใกล้เคียงกับไม้สัก มีลวดลายที่สวยงาม ย้อมสีได้ ตกแต่งง่าย น้ำหนักเบา อีกทั้งมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ชนิดอื่น ไม้ยางพาราที่ใช้ในอุตสาหกรรมไม้ในปัจจุบันนี้ล้วนแต่มาจากสวนยางพาราที่มนุษย์เป็นผู้ปลูกสร้างทั้งสิ้น เมื่อต้นยางพารามีอายุมากให้ผลผลิตน้ำยางต่ำไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจในการกรีดยางน้ำยางอีกต่อไป จึงต้องโค่นออกแล้วปลูกทดแทนใหม่ตามวงจรธรรมชาติในการประกอบอาชีพการทำสวนยาง ต้นยางที่ถูกโค่นจะเข้าสู่อุตสาหกรรมไม้ทดแทนไม้ป่าจากธรรมชาติได้เป็นอย่างดีและช่วยลดการทำลายสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติด้วย [2]

ในการแปรรูปไม้ยางพาราท่อนของโรงเลื่อยในประเทศจะได้ไม้แปรรูปโดยเฉลี่ยสูงสุดเพียง 40% เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นเศษไม้เหลือทิ้งถึง 60% ของปริมาตรไม้ท่อนยางพาราที่เข้าแปรรูป ในจำนวนนี้เป็นปึกไม้และปลายไม้ 27% โดยประมาณ ขี้เลื่อยและจี้กบ 22% โดยประมาณ และเปลือกไม้ 11% โดยประมาณ (ภาพที่ 1 แสดงเศษไม้ที่เหลือจากการแปรรูปไม้ยางพารา) นอกจากนี้ในจำนวนไม้แปรรูป 40% ที่ได้ เมื่อนำไปขัดไสตัดตกแต่งและคัดเกรด เพื่อต่อไม้ทำเป็นแผ่นไม้ ประสานและผลิตภัณฑ์เครื่องเรือนที่มีคุณภาพ ยังต้องเสียไม้เป็นเศษเหลือทิ้งอีกประมาณ 35% ของไม้แปรรูปจำนวน 40% ดังกล่าว หรือคิดเป็น 14% ของไม้ท่อนที่เข้าแปรรูปแรกเริ่ม ดังนั้นปริมาณเศษวัสดุไม้ลักษณะต่างๆ ที่เหลือจากการเลื่อยแปรรูปไม้ท่อนยางพาราจึงมีถึงประมาณ 74% ของปริมาตรไม้ท่อนทั้งหมด ประกอบกับในปัจจุบันปริมาณของไม้ยางพาราที่จะป้อนเข้าสู่โรงงานแปรรูปไม้มีลดน้อยลง ดังนั้นการนำเศษไม้และขี้เลื่อยที่เหลือจากการแปรรูปไม้ซึ่งเหลือทิ้งในปริมาณมากมายใช้ประโยชน์จึงเป็นทางออกหนึ่ง [3] จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่ามีการใช้ประโยชน์ปึกไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในส่วนของ Boiler ของโรงงานและขายให้กับบริษัทที่ทำปาร์ติเกิลบอร์ดจากไม้ยางพาราและขายให้กับชาวบ้านนำไปเผาถ่าน ส่วนขี้เลื่อยชาวบ้านใช้ในการเผาถ่าน ใช้เพาะเห็ดและบ่มผลไม้ เช่น ลำไย เป็นต้น การนำขี้เลื่อยไม้ยางพารามาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของไม้ยางพาราให้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแนวทางที่กำลังเป็นที่สนใจในงานวิจัยต่างๆ โดยกลุ่มนักวิจัยในประเทศไทย คือ การนำมาผสมกับเม็ดพลาสติก เพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกหรือไม้เทียม



ภาพที่ 1 เศษไม้ที่เหลือจากการแปรรูปไม้ยางพารา [4]



ภาพที่ 2 แสดงกลไกการเกิดอนุมูลอิสระจากการเสื่อมสภาพของลิกนิน (Lignin) [6]

วัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกเป็นที่ยอมรับและถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมพลาสติก มีการนำมาใช้งานในด้านต่างๆ ได้แก่ การสร้างและตกแต่งเฟอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนประกอบในรถยนต์ งานก่อสร้าง เช่น กระเบื้องหลังคา กรอบประตูหน้าต่าง ระแนงหลังคา เป็นต้น สำหรับสมบัติของ วัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกนั้น จะเป็นการรวมเอาคุณสมบัติ ทั้งข้อดีและข้อด้อยของวัสดุทั้งสอง ชนิดเข้าไว้ด้วยกัน โดยสมบัติที่โดดเด่นก็คือ ความสามารถในการทนความชื้น ด้านทานสารเคมีบาง ชนิด (ขึ้นอยู่กับพลาสติกที่ใช้) ด้านทานปลวกและมอด และสามารถนำไปใช้งานทดแทนไม้แผ่น หรือเสาที่ไม่ได้เป็นส่วนที่ดั่งรับแรงโดยตรง ส่วนข้อด้อยนั้น จะเป็นเรื่องอายุการใช้งาน ซึ่งอาจไม่ ทนทานนานเท่าไม้ปกติซึ่งโดยทั่วไปจะมีอายุใช้งานประมาณ 40-50 ปี ในขณะที่ไม้พลาสติกคาดว่า จะมีอายุประมาณ 15-25 ปี [5] เนื่องจากการใช้งานวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกนี้มักจะอยู่กลางแจ้ง ซึ่งได้รับอิทธิพลของสภาพอากาศโดยตรง โดยที่สภาพอากาศจะเป็นตัวเร่งทำให้วัสดุคอมพอสิตไม้ พลาสติกเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควรจะเป็นโดยเฉพาะแสงแดดจะเร่งการเกิดออกซิเดชันในเนื้อวัสดุ ไม้จะไม่ซีดจางลงและสมบัติเชิงกลต่างๆ จะลดลงไป รังสียูวีจะทำให้ทั้งพอลิเมอร์และองค์ประกอบ ทางเคมีของไม้เปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น High density polyethylene (HDPE) จะเสื่อมสภาพจากแสง

เพราะเกิดอนุมูลอิสระ (Free radicals) ซึ่งเมื่อหยุดปฏิกิริยาอาจเกิดการเชื่อมขวางหรือการตัดสายโซ่ก็ได้ ทั้งสองปฏิกิริยานี้เกิดแข่งกัน ถ้าหากเกิดการเชื่อมขวางสมบัติต่างๆ จะดีขึ้นกว่าเดิม แต่หากเกิดการตัดสายโซ่จะทำให้เกิดรอยแตกที่ผิวทำให้สูญเสียความแข็งแรงเป็นอย่างมาก สำหรับการเสื่อมสภาพของไม้จากแสง ปัจจัยหลักเกิดจากกลไกที่ผิวหน้าของไม้เกิดการเสื่อมสภาพจากแสง ซึ่งเกิดได้หลายเส้นทางที่ทำให้เกิด Phenoxy radicals (ดังภาพที่ 2) ส่งผลให้เกิดการแตกออกของสายโซ่และทำให้มีสีเหลือง [6] ดังนั้น การใช้งานวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกที่ได้รับแสงแดดให้สามารถใช้งานได้นานจะต้องปรับปรุงสมบัติของวัสดุ ซึ่งกระทำได้หลายวิธี เช่น การทาสีทั้งทึบและใสเพื่อเคลือบผิว การปรับปรุงผิวด้วยสารเติมแต่งประเภทต้านทานการออกซิเดชัน ปกป้องผิวด้วยสารอนินทรีย์ที่ดูดกลืนยูวี ปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีหรือทำการย้อมสีไม้ ฯลฯ

ปกติเส้นใยธรรมชาติจะมีความต้านทานต่อรังสี UV ได้น้อย ซึ่งการย้อมสีที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดกลืนรังสี UV ได้จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานผ้าและป้องกันผิวหนังของผู้สวมใส่เสื้อผ้าให้ได้รับรังสี UV น้อยลง เช่น หมู่อนุพันธ์ของ Triazene และ Diamene ซึ่งมักมีในโครงสร้างของสีรีแอคทีฟเพื่อช่วยป้องกันการซีดจางไปของสีจากแสงแดด [7] ในผลิตภัณฑ์ประเภทสิ่งทอ จะมีการปกป้องเส้นใยจากการสลายตัวด้วยรังสี UV โดยวิธีการย้อมสี ซึ่งความสามารถในการดูดกลืนรังสี UV จะขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่ดูดกลืนในสีย้อม การส่องผ่านได้ของรังสี UV จะเกิดกับเส้นใยที่มีความสว่างมากกว่าเส้นใยที่สีเข้ม คือ สีโทนมืดจะดูดกลืนรังสี UV ได้มากกว่าสีโทนสว่าง สีย้อมชนิดสีไดเรกซ์ สีรีแอคทีฟ หรือสีแวต มีค่าการป้องกันรังสี UV ที่สูง ขึ้นอยู่กับค่าการทะลุผ่านสีในช่วง UV สำหรับสีที่ได้จากธรรมชาติ ค่าการป้องกันรังสี UV จะมากหรือน้อยขึ้นกับสารช่วยยึดติด (Mordants) ที่ใช้ [8]

เนื่องจากผงไม้ยางพาราเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเส้นใยธรรมชาติบางชนิด เช่น เส้นใยจากฝ้าย เส้นใยจากป่าน แนวคิดของงานวิจัยนี้ คือ การประยุกต์ใช้วิธีการย้อมสีของเส้นใยในสิ่งทอมาใช้กับผงไม้ยางพาราก่อนที่จะนำไปผสมกับพลาสติกแล้วผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก ซึ่งจะช่วยให้มูลค่าให้แก่ขี้เลื่อยไม้ยางพารา รวมทั้งช่วยปรับปรุงสีของผงไม้ยางพาราให้น่าใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยจะเริ่มต้นจากการนำผงไม้ยางพาราไปปรับปรุงด้วย Chlorite treatment เพื่อฟอกสีและกำจัดลิกนินออกบางส่วนซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการย้อมติดสีของผงไม้ จากนั้นนำไปย้อมสีด้วยสีย้อมประเภทต่างๆ ได้แก่ สีไดเรกซ์ (Direct dye) สีรีแอคทีฟ (Reactive dye) และสีธรรมชาติที่ได้จากไม้ฝางโดยมีการใช้สารช่วยยึดติด แล้วศึกษาเปรียบเทียบความเสถียรต่อแสงแดดของสีสังเคราะห์และสีธรรมชาติที่ใช้ในการย้อมผงไม้ ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก หลังจากนำไปตากแดดเป็นระยะเวลานาน 3 เดือน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาขั้นตอนในการย้อมสีผงไม้ยางพาราด้วยสีไคเร็กซ์ สิริแอคทีฟ และสีธรรมชาติจากไม้ฝางเพื่อใช้เตรียมวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก HDPE เพื่อให้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากแสงแดดได้ดีขึ้น

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบความเสถียรต่อแสงแดดของสีสังเคราะห์และสีธรรมชาติที่ใช้ในการย้อมผงไม้ ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก หลังจากนำไปตากแดดเป็นระยะเวลา 3 เดือน

1.2.3 เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของขี้เลื่อยไม้ยางพาราจากโรงงานทำเฟอร์นิเจอร์ และเป็นการปรับปรุงสีของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกให้เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุคอมพอสิตเตรียมจากผงไม้ยางพาราขนาด 200-500 mesh ปริมาณ 60% โดยน้ำหนัก และ High density polyethylene (HDPE) ปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก โดยใช้สารประสานคู่ควบ คือ Maleic anhydride graft HDPE (MAPE) 10 % โดยน้ำหนักของผงไม้

1.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดลิกนินออกจากผงไม้ยางพารา คือ โซเดียมคลอไรท์ (NaClO_2) และกรดอะซิติก (CH_3COOH) ตามวิธีของ P.A. Ahlgren และคณะ [9]

1.3.3 สีสังเคราะห์ที่ใช้ คือ สีไคเร็กซ์ (CI Direct Red 83.1) และสีรีแอคทีฟ (CI Reactive red 281) และสีธรรมชาติที่ใช้ คือ สีแดงจากเปลือกไม้ฝาง

1.3.4 ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดจะนำไปตากแดดในกล่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เป็นเวลา 3 เดือน

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนวิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.3 ดำเนินงานวิจัย

1.4.3.1 บดขี้เลื่อยไม้ยางพาราด้วยเครื่อง Ball mill จากนั้นคัดแยกขนาดของผงไม้ยางพาราด้วยเครื่อง Sieve shaker ให้ได้ขนาด 200-500 mesh

1.4.3.2 กำจัดลิกนินออกจากผงไม้ยางพาราด้วยวิธี Acid chlorite treatment ตามวิธีของ P.A. Ahlgren และคณะ [9] จากนั้นหาปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในผงไม้ด้วยขั้นตอนตามมาตรฐานการทดสอบ TAPPI T 222 om-98, “Acid – insoluble lignin in wood and pulp”

1.4.3.3 ย้อมสีผงไม้อย่างพาราที่กำจัดลิกนินแล้ว ด้วยสียไคเร็กซ์ สีรีแอคทีฟ หรือสีธรรมชาติจากไม้ฝาง โดยกำหนดให้สัดส่วนการดูดซับสีมากกว่า 60% ของปริมาณสีย้อมเริ่มต้น

1.4.3.4 ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของผงไม้อย่างพาราเริ่มต้น ผงไม้อย่างพาราที่กำจัดลิกนินแล้ว และผงไม้ย้อมสีชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค TGA เพื่อใช้พิจารณาถึงสมบัติที่เปลี่ยนไป รวมถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้ขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก และศึกษาเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของ C=C ในช่วงเลขคลื่น $1600-1500\text{ cm}^{-1}$ ที่เปลี่ยนไปของผงไม้ที่กำจัดลิกนินและผงไม้ย้อมสี ด้วยเทคนิค FTIR

1.4.3.5 ผสมผงไม้ (เริ่มต้น กำจัดลิกนิน หรือย้อมสี) และ HDPE ในสัดส่วน 60:40 % โดยน้ำหนัก และ MAPE 10 % โดยน้ำหนักของผงไม้ ในเครื่อง Co-rotating twin-screw extruder จากนั้นนำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้ไปฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ Tensile และ Flexural test ด้วยเครื่อง Injection molding

1.4.3.6 ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตก่อนรับแสงแดด ได้แก่ Tensile test และ Flexural test ตามมาตรฐาน ASTM D638 และ D790 ตามลำดับ ศึกษาหาหมู่ฟังก์ชัน C-H stretching ของ HDPE ที่เลขคลื่น $2915-2848\text{ cm}^{-1}$ และหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ 1713 cm^{-1} ก่อนการรับแสงแดด ด้วยเทคนิค FTIR วัดสีของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่ขึ้นรูปแล้วด้วยเครื่อง Color reader ตามระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เพื่อวัดค่าความสว่าง (L^*) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและน้ำหนักของจีไธที่เหลือของวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค TGA ศึกษาสมบัติทางความร้อน (% Crystallinity) ของวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค DSC ทดสอบความสามารถในการเปียกผิวจากหยดน้ำของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตจากการวัดค่า Contact angle และศึกษาการกระจายตัวของผงไม้ในวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค SEM

1.4.3.7 ศึกษาถึงอิทธิพลของแสงแดดที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต โดยนำชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตไปรับแสงแดดในกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเวลา 3 เดือนติดต่อกัน โดยที่จะเก็บตัวอย่างมาทดสอบสมบัติเชิงกล วัดสีและวัดค่า Contact angle ทุกๆ 1 เดือน สำหรับการทดสอบ FTIR, TGA, DSC และ SEM จะทดสอบเฉพาะก่อนและหลังการรับแสงแดด โดยทุกๆ การทดสอบทำเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 1.4.3.6

1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.5 สรุปผลการวิจัย

1.4.6 รายงานผลการวิจัย

1.4.6.1 เสนอผลงานในรูปแบบรายงาน

1.4.6.2 เผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับเศษไม้ยางพาราที่เหลือจากการผลิตเฟอร์นิเจอร์ โดยนำมาสร้างเป็นวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกหรือไม้เทียม เพื่อลดปริมาณการใช้ไม้จริง อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนและได้ไม้ที่ต้านทานปลวกและความชื้นได้ดี

1.5.2 สามารถใช้งานไม้เทียมเมื่อได้รับแสงแดดได้ยาวนานยิ่งขึ้น อีกทั้งการย้อมสีไม้ก่อนทำเป็นไม้เทียม จะสามารถเลือกโทนสีให้กับไม้เทียมได้ตามต้องการ

1.5.3 ส่งเสริมให้มีการใช้สีธรรมชาติในการย้อมผงไม้เพื่อช่วยต้านทานการเสื่อมสภาพจากแสงแดดในงานด้านอื่นๆ

บทที่ 2

เอกสารและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

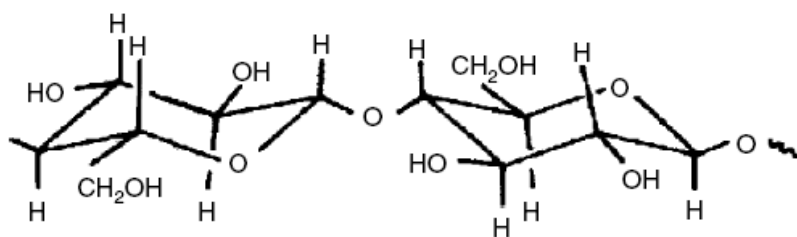
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไม้ยางพารา [10]

ต้นยางพารา เป็นต้นไม้ยืนต้นมีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอเมซอน ประเทศบราซิล และเปรู ทวีปอเมริกาใต้ โดยชาวพื้นเมืองเรียกว่า คาอูท์ชูก (Caoutchouc) แปลว่าต้นไม้ร้องไห้ เป็นไม้อยู่ในสกุล (Genus) *Hevea* และวงศ์ (Family) *Euphorbiaceae* ซึ่งวงศ์นี้มีอยู่ ไม่น้อยกว่า 10 ชนิด มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ ดังนี้ *Hevea benthamiana*, *Hevea brasiliensis*, *Hevea collina*, *Hevea quianensis*, *Hevea confuse*, *Hevea pauciflora*, *Hevea spruceana*, *Hevea microphylla*, *Hevea nilida*, *Hevea quianensis* และอื่นๆ ชนิดที่ให้น้ำยางมากและดีที่สุดคือ *Hevea brasiliensis* ซึ่งเป็นที่นิยมปลูกในประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง การปลูกยางพาราในประเทศไทยเริ่มขึ้นระหว่างปี 2442-2444 ที่จังหวัดตรัง โดย พระยารัษฎานุประดิษฐ์ มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ต่อมาได้แพร่หลายไปทั่วพื้นที่ภาคใต้ ภาคตะวันออก และล่าสุดประมาณ 7-8 ปี ที่ผ่านมาได้มีการปลูกบ้างแล้วในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ วัตถุประสงค์หลักของการปลูกยางพาราก็เพื่อกรีดน้ำยางไปทำยางแผ่นเพื่อจำหน่าย เมื่อต้นยางอายุมากขึ้น ทำให้น้ำยางน้อยลงจึงทำการตัดโค่นและเผาทิ้งเพื่อปลูกใหม่ แต่ปัจจุบันไม้จากป่ามีปริมาณลดน้อยลง และมีพระราชบัญญัติปิดป่าทำให้ไม้ยางพาราได้รับความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะการนำไปแปรรูปเพื่อทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ที่ใช้ในการส่งออก ทำใหยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างยิ่ง จากการสำรวจพบว่า ไม้ยางพารา 1 ไร่ สามารถนำมาแปรรูปได้เฉลี่ย 20.64 ลบ.เมตร ทั้งนี้แล้วแต่เทคนิคการเลื่อยและลักษณะของไม้ที่โรงงานเฟอร์นิเจอร์ต้องการ

ไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นกลม สูงปานกลาง เปลือกสีเทาดำ มองทางด้านหน้าตัดจะเห็นท่อน้ำยาง (Latex Vessel) ต่อกันเป็นวงตามแนวด้านสัมผัส (Tangential) เนื้อไม้มีสีขาวอมเหลืองเมื่อสด และจะมีสีขาวจางเมื่อแห้ง เนื้อหยาบปานกลาง เส้นตรงวงรอบปีไม่เห็นชัด มีความหนาแน่นพื้นฐาน (Basic density) 0.56-0.65 กรัม/ลบ.ซม. สำหรับที่ความชื้น 15% มีความหนาแน่นประมาณ 0.67-0.74 กรัม/ลบ.ซม. สมบัติทางเคมีของไม้ยางพาราสด คิดเป็นร้อยละของน้ำหนักอบแห้งประกอบด้วย สารแทรก (Extractives) 13.28% (สำหรับสารแทรกแบ่งเป็นสารที่สามารถละลายในน้ำรวม 10.36% และละลายได้ในสารละลายรวม 23.24%) เซลลูโลส (Cellulose) 50.63% (Holocellulose 78.72%, Alpha cellulose 49.41%) เพนโตซาน (Pentosan) 17.17% ลิกนิน (Lignin) 18.06% และเถ้า (Ash) 0.86% โดยองค์ประกอบต่างๆ มีเอกลักษณ์ดังนี้

2.1.1 เซลลูโลส [11]

เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของไม้ โดยมีหน่วยซ้ำ (Repeating unit) คือหน่วยของน้ำตาล 2 ตัว (D-glucopyranose units) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4)-glucosidic bonds โดยมีค่าเฉลี่ยของ Degree of polymerization (DP) ประมาณ 10,000 โมเลกุลของเซลลูโลสจัดเรียงตัวกันแบบสลับ โดยมีพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ความหนาแน่นของสายโซ่โมเลกุลสูง ความเป็นผลึกจึงมากประมาณ 65 %



ภาพที่ 3 แสดงหน่วยซ้ำของเซลลูโลส [11]

2.1.2 เฮมิเซลลูโลส

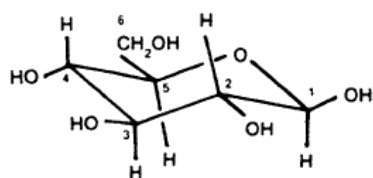
เฮมิเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลเชื่อมกันด้วยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4) และมีกิ่งที่พันธะ (1 $\rightarrow$ 2), (1 $\rightarrow$ 3) หรือ (1 $\rightarrow$ 6) มีค่า DP ต่ำประมาณ 100-200 มีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลดังนี้ D-xylopyranose, D-glucopyranose, D-galactopyranose, L-arabinofuranose, D-mannopyranose, D-glucopyranosyluronic acid และ D-galactopyranosyluronic acid สำหรับน้ำตาลชนิดอื่นๆ พบได้น้อย เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลมากกว่า 1 ชนิด หมู่แทนที่มักเป็น Acetyl- และ Methyl- ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างสูตรโครงสร้างของมอนอเมอร์น้ำตาลบางชนิดในเฮมิเซลลูโลส

ภาพที่ 5 O-methyl-glucuronoxylan เป็นเฮมิเซลลูโลสชนิดหนึ่งที่มีสายโซ่หลัก (Backbone) เป็นหมู่ของ D-xylopyranose เชื่อมต่อดัวยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4) และมีหมู่ Acetyl ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 ของ Xylose

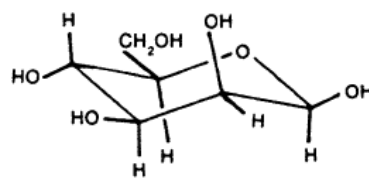
2.1.3 ลิกนิน

ลิกนินมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ มีความซับซ้อน ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติกของ Phenylpropane เป็นหลักซึ่งสามารถแทนที่ที่ตำแหน่ง α , β , หรือ γ และรวมกันอยู่ด้วยพันธะอีเทอร์ (C-O-C) และคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ลิกนินสามารถแยกประเภทได้หลายรูปแบบแต่นิยมคือแบ่งตามองค์ประกอบของโครงสร้างทางเคมี สำหรับไม้เนื้ออ่อนมักประกอบด้วย Coniferyl alcohol เรียกว่า Guaiacyl lignin ส่วนไม้เนื้อแข็งมักประกอบด้วย Coniferyl และ sinapyl

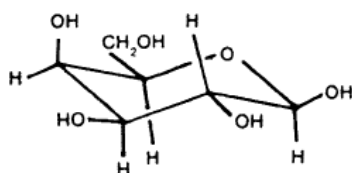
alcohols จะเรียกว่า Syringyl-Guaiacyl lignin ลิกนินมักอยู่ที่ชั้นผนังเซลล์ชั้นที่ 2 และมากที่สุดที่
กลางชั้น ภาพที่ 6 แสดงสูตรโครงสร้างทางมีของสารบางชนิดของลิกนิน



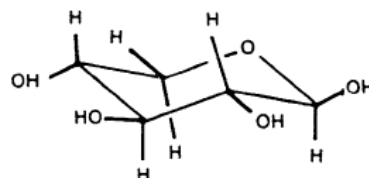
β -D-Glucose
 β -D-Glucopyranose
 β -D-Glup



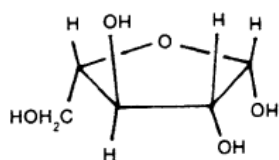
β -D-Mannose
 β -D-Mannopyranose
 β -D-Manp



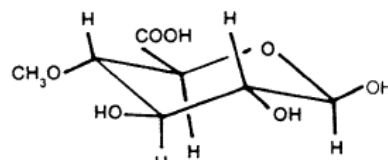
β -D-Galactose
 β -D-Galactopyranose
 β -D-Galp



β -D-Xylose
 β -D-Xylopyranose
 β -D-Xylp

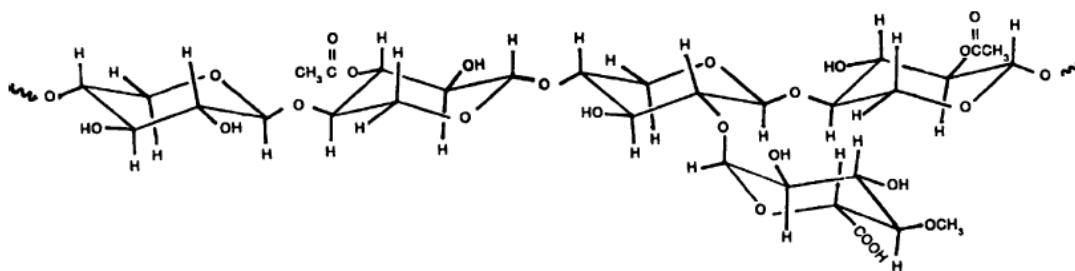


α -L-Arabinose
 α -L-Arabinofuranose
 α -L-Araf

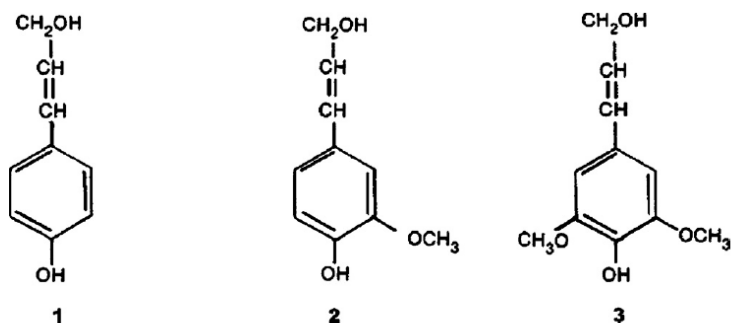


4-O-Methylglucuronic acid
4-O-Methylglucopyranosyluronic acid
4-O-Me- α -D-GlupA

ภาพที่ 4 แสดงมอนอเมอร์ของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส [11]



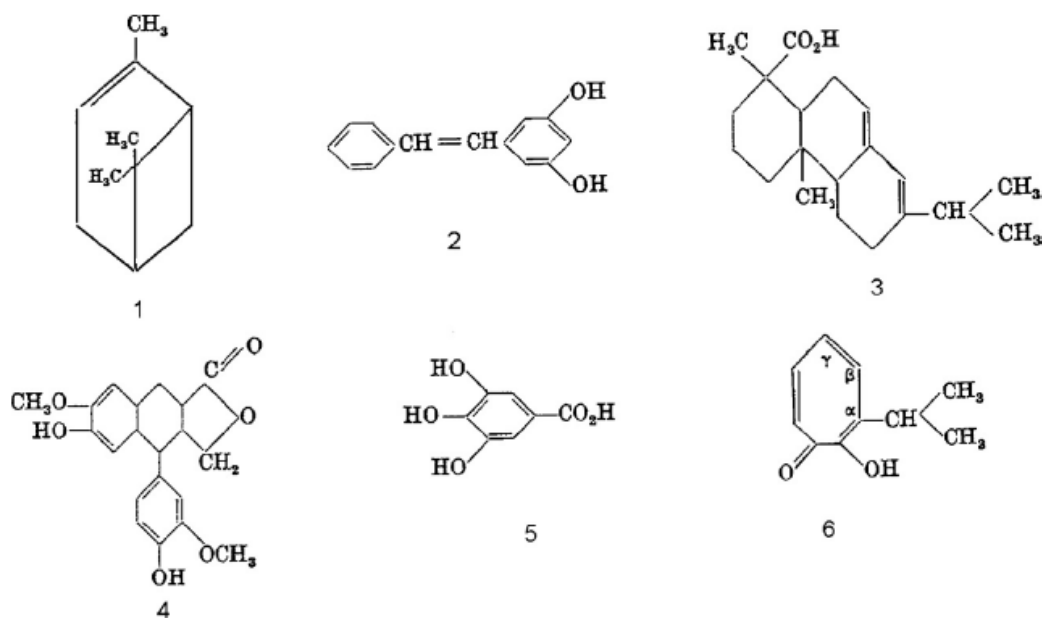
ภาพที่ 5 ส่วนหนึ่งของสูตรโครงสร้าง O-acetyl-4-O-methylglucuronoxylan [11]



ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน (1) *p*-coumaryl alcohol, (2) coniferyl alcohol, and (3) sinapyl alcohol [11]

2.1.4 สารแทรก

สารแทรกของผนังเซลล์มักประกอบด้วย ไขมัน กรดไขมัน กรดแอลกอฮอล์ phenols, terpenes, steroids, resin acids, rosin, waxes, และสารอินทรีย์อื่นๆ อีกเล็กน้อย โดยสารแทรกมีผลต่อสี กลิ่น และความทนทานของไม้ ภาพที่ 7 แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบบางชนิดของสารแทรก



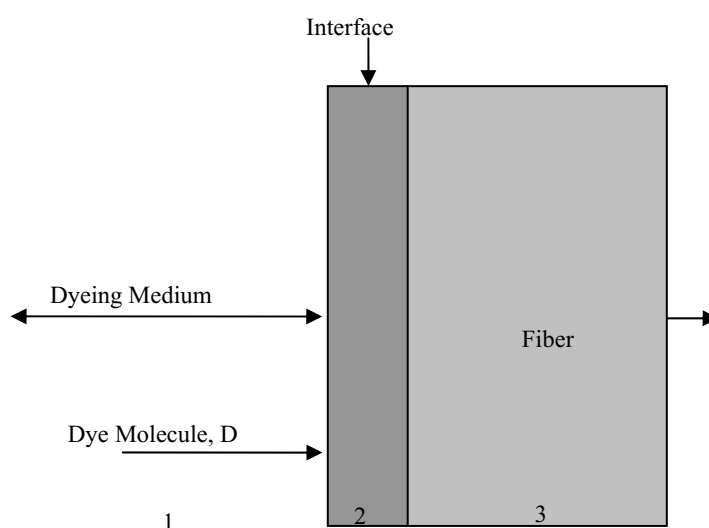
ภาพที่ 7 โครงสร้างทางเคมีของสารแทรกในไม้ : (1) Abietic acid, (2) α -pinene, (3) Pinosylvin, (4) Pineresinol, (5) Gallic acid, (6) α -, β -, และ γ -thujaplicin [11]

2.2 สีและการย้อมสี

2.2.1 หลักการย้อมสีพื้นฐาน [12]

การย้อม (Dyeing) สามารถทำในสิ่งทอได้ทุกสภาพตั้งแต่เส้นใย เส้นด้าย ผืนผ้า หรือ ย้อมหลังจากตัดเป็นเสื้อผ้าแล้ว ส่วนวิธีการย้อมสามารถแบ่งได้เป็น การย้อมแบบแช่ (Exhaust dyeing) และการย้อมแบบต่อเนื่อง (Continuous Dyeing) คำว่าการดูดซับ (Exhaustion) จึงใช้ในการแสดงระดับของการส่งถ่ายสี จากอ่างย้อมไปสู่เส้นใย ซึ่งจะแสดงในรูปของอัตราส่วนของสี หรือ สารอื่นที่ถูกดูดซับโดยวัสดุ เทียบกับปริมาณสีหรือสารที่มีอยู่เดิม ตัวอย่างเช่น ถ้า $3/4$ ของปริมาณสี ย้อมตั้งต้น ถูกส่งถ่ายไปสู่เส้นใย ระดับการดูดซับจะเท่ากับ 75% ค่าระดับการดูดซับสูงเป็นสิ่งที่ ต้องการในการย้อม ด้วยเหตุผลทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสีย้อมมีราคาแพง การที่ เหลือสีย้อม ทิ้งไว้ในอ่างย้อมจึงไม่คุ้มค่า และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดออกจากร้านทิ้ง

2.2.2 แบบจำลองการย้อม



ภาพที่ 8 แสดงแบบจำลองการย้อม [12]

ตัวอย่างแบบจำลองการย้อมสีอย่างง่าย ดังแสดงในภาพที่ 8 ในน้ำย้อมจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของสีย้อมจำนวนมากมาย เมื่อการย้อมดำเนินไป ขั้นตอนที่สีผ่านเข้าสู่เส้นใยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 สีย้อม (Dye Molecule, D) ต้องเคลื่อนที่เข้ามาติดที่ผิวของเส้นใย ธรรมชาติของแรงที่ช่วยกันยึดติดนี้ขึ้นกับชนิดของสีย้อมและชนิดเส้นใย เช่น สีย้อมแอซิดจะสร้างประจุของสีย้อมเป็นลบในน้ำย้อม และเมื่อทำการย้อมเส้นใยขนแกะหรือไนลอน ซึ่งทั้งสองชนิดจะมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงประจุบวกเมื่ออยู่ในอ่างน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด ดังนั้น จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสี

แอซิดและเส้นใยทั้งสองชนิดซึ่งจัดเป็นแรงทางไฟฟ้าสถิต นอกจากนี้ อาจมีแรงดึงดูดอื่นๆ ที่สำคัญด้วย เช่น แรงดึงดูดที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic attraction) ที่ทำให้สีย้อมชอบที่จะอยู่ติดผิวเส้นใยมากกว่าที่จะอยู่ในอ่างน้ำย้อม

ขั้นตอนที่ 2 เกิดเมื่อสีย้อมเข้ามาติดที่ผิวเส้นใยเป็นจำนวนมาก และโมเลกุลสีย้อมจะเริ่มถูกดูดซับอย่างรวดเร็วที่ระหว่างผิวเส้นใยและอ่างย้อม มีผลให้ความเข้มข้นของสีย้อมภายในเส้นใยเกิดมากขึ้น และมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมภายในเส้นใย ทำให้สีย้อมเริ่มแพร่ (Diffuse) ผ่านเข้าสู่เส้นใย

ขั้นตอนที่ 3 สีย้อมผ่านเข้าสู่เส้นใย ซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสีนั้นๆ เส้นใยที่ชอบน้ำ เช่น ฝ้าย ขนแกะ ไหม วิสโคส จะมีโครงสร้างภายในที่เป็นรู ทำให้โมเลกุลของสีย้อมแพร่เข้าสู่เส้นใยได้ง่าย ในทางกลับกันเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเอสเตอร์ (Polyester) พอลิเอไมด์ (Polyamide) อะคริลิก มีการดูดซึมน้ำต่ำและต้องสร้างพื้นที่ว่างให้โมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เข้าไป ซึ่งทำได้โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเข้าช่วย ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนไหว มีการหมุนพันธะในโครงสร้างและเกิดเป็นพื้นที่ว่างให้สีย้อม เช่น สีดิสเพิร์ส (Disperse dye) แพร่เข้าไปในเส้นใยได้

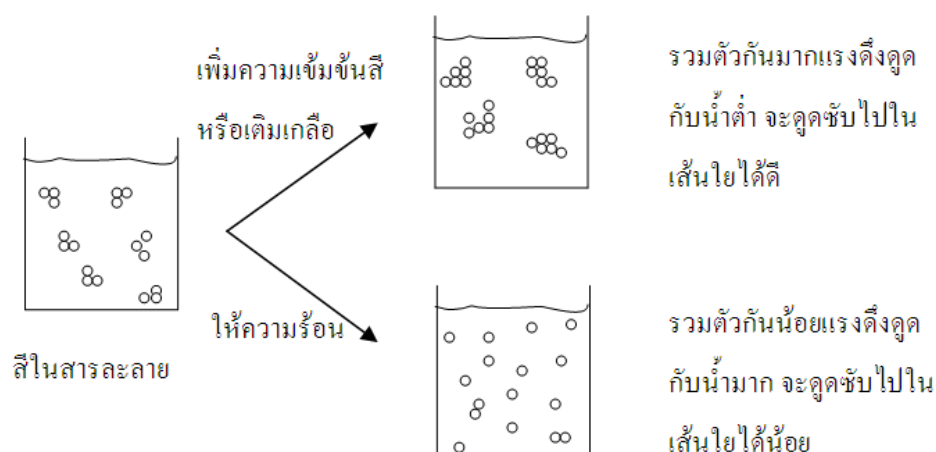
เมื่อโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เข้าไปในเส้นใย ตัวสีย้อมจะสร้างพันธะกับเส้นใยได้หลายรูปแบบ ทั้งด้วยกลไกทางเคมีและทางกายภาพ ทำให้สีย้อมติดภายในเส้นใยได้ดีขั้นตอนที่ 3 นี้เป็นขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดในระหว่างขั้นตอนทั้งหมด จึงจัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการย้อม (Rate of determination step) สีย้อมที่มีความดึงดูดกับเส้นใยสูง จะเกาะติดกับผิวเส้นใยได้ดี (เรียกว่า High substantivity) ผู้ย้อมต้องระวังระดับของการเกาะติดนี้ ส่วนการวัดคุณภาพของการย้อมติดสีในเส้นใยเรียกว่า Affinity เป็นการวัดพลังยึดเหนี่ยวของสีย้อมต่อเส้นใย คำนวณได้จากการวัดหาค่าความแตกต่างระหว่างความต่างศักย์ทางเคมีของสีย้อมในเส้นใย กับความต่างศักย์ทางเคมีของสีในน้ำย้อม โดยมีหน่วยเป็นจูลส์หรือแคลอรีต่อโมล คำว่า Liquor-to-fiber ratio หรือ Liquor ratio ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำย้อมและเส้นใย ค่า Liquor ratio หมายถึงมวลของน้ำย้อมที่ใช้ต่อมวลของวัสดุที่ถูกย้อม เช่น น้ำย้อม 1 กิโลกรัม ใช้ในการย้อมผ้า 0.1 กิโลกรัม ค่า Liquor ratio จะเท่ากับ 10 ต่อ 1 (10-1) ค่านี้มีช่วงกว้างแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของการย้อมและเครื่องมือที่ใช้

2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ในระบบการย้อม

2.2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีย้อมและน้ำ

สีย้อมสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะพฤติกรรมที่อยู่ในน้ำ คือ สีย้อมที่มีประจุและไม่มีประจุ การมีประจุแบ่งได้เป็นประจุบวกและประจุลบ ในสีย้อมที่มีประจุลบ คือ ส่วนของโมเลกุลที่แสดงสีจะมีประจุลบอยู่ ($\text{Dye}^- \text{Na}^+$) ส่วนสีย้อมที่มีประจุบวกจะแสดงในลักษณะ

Dye⁺Cl⁻ ความเข้มข้นจะมีมากขึ้นในกรณีที่ย้อมบางชนิดแสดงสภาพไม่มีประจุในหนึ่งขั้นตอนของการย้อมและแสดงสภาพไม่มีประจุในอีกขั้นตอนหนึ่ง โดยทั่วไปสีย้อมที่มีประจุจะแตกตัวในน้ำและมีสภาพเกาะกันคล้ายคอลลอยด์ ดังแสดงในภาพที่ 9 แม้ว่าน้ำย้อมที่เห็นจะใสหรือโปร่งแสง แต่โมเลกุลของสีย้อมจะเกาะรวมกันเป็นก้อน (Aggregate) ในน้ำ ระดับของการเกาะกันนี้ สามารถวัดได้และให้ค่าเป็นตัวเลขซึ่งอาจหาได้จากเอกสารประกอบของสีย้อมแต่ละชนิด โดยทั่วไปอุณหภูมิของการย้อมที่สูงขึ้นจะลดการเกาะรวมกันของสี และทำให้โมเลกุลของสีเคลื่อนที่ได้ง่ายแพร่ผ่านไปสู่เส้นใยได้ง่ายขึ้น แต่การที่โมเลกุลของสีกระจายตัวดีนั้น ก็จะทำให้โมเลกุลสีชอบที่จะอยู่ในน้ำ (เพราะมีประจุดึงดูดกัน) พบว่า ปริมาณการยึดติดของสีภายในเส้นใย (Affinity) จะต่ำการเติมเกลือ เช่น โซเดียมคลอไรด์ เชื่อว่าเป็นการเพิ่มระดับการเกาะกันของโมเลกุลของสีที่มีประจุในน้ำ การเกาะกันเป็นก้อนนี้มีผลให้สีมีการยึดติดกับน้ำน้อยลงสีจึงชอบที่จะเข้าไปสู่ภายในเส้นใย และพบว่าในบางระบบการย้อม การเติมเกลือจะช่วยเพิ่มการยึดติดของสีภายในเส้นใยด้วย



ภาพที่ 9 แสดงลักษณะคอลลอยด์ของสีย้อมในน้ำ [12]

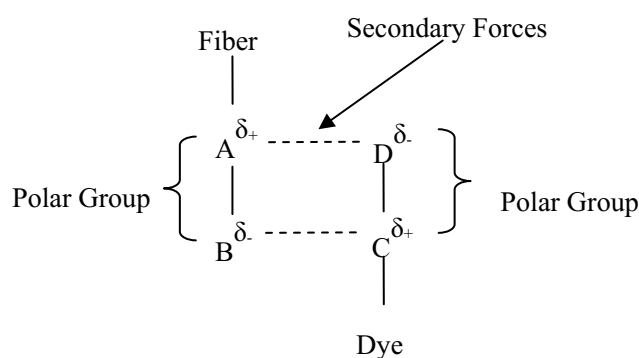
สีที่ไม่มีประจุ จะไม่มีปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ สีจะกระจายตัว (Dispersion) ในน้ำ สีประเภทนี้จะถูกผลิตให้มีขนาดอนุภาคเล็กและก่อรวมตัวกับสารซักล้าง ทำให้สีกระจายตัวในน้ำได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม สีที่ไม่มีประจุนี้อาจมีการละลายในน้ำบ้างเล็กน้อยซึ่งก็มีผลในการช่วยการเกาะติดผิวเส้นใย และแพร่เข้าสู่เส้นใยได้

2.2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นใยและน้ำ

โดยปกติน้ำจะเป็นตัวกลางในการใช้ย้อม ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำและเส้นใยมีบทบาทสำคัญในการย้อม เส้นใยที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น ฝ้าย เรยอน ขนแกะ ไม้ จะดึงดูดน้ำ โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปในส่วนออสฐานของเส้นใย ทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในแตกออก มีผลให้เส้นใยเกิดการบวมตัว (Swelling) เส้นใยสังเคราะห์บางชนิด เช่น ไนล่อนจะมีการบวมตัวในน้ำได้บ้าง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ย้อมสีได้ดี การบวมตัวจะช่วยเปิดรูภายในเส้นใยให้กว้างขึ้น เพิ่มระดับการแพร่ของสีเข้าไปในเส้นใย การบวมตัวของเส้นใยในน้ำจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการย้อมสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มระดับการย้อม เส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น พอลิเอสเตอร์ และพอลิเอไมด์บางชนิดจะไม่บวมตัวในน้ำๆ จึงไม่มีบทบาทสำคัญในการย้อม แต่ยังคงใช้น้ำเป็นตัวกลางเพื่อละลายสีและให้แพร่เข้าไปในเส้นใย น้ำยังมีบทบาทเป็นตัวกลางกระจายความร้อนในระบบการย้อมพอลิเอสเตอร์ ที่ทำการย้อมที่อุณหภูมิประมาณ 130 °C

2.2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสีย้อมและเส้นใย

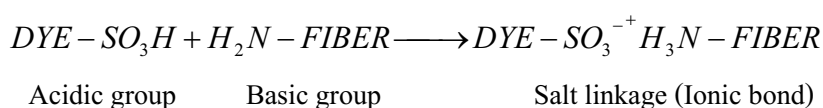
โดยธรรมชาติ สีย้อมและเส้นใยจะต้องมีการดึงดูดกัน เพื่อช่วยให้สีย้อมแพร่จากอ่างน้ำย้อมเข้าไปในเส้นใยและยังคงอยู่ภายในเส้นใย สีย้อมจะติดกับเส้นใยด้วยพันธะทางเคมี โดยอาจจะเป็นพันธะทุติยภูมิ เช่น พันธะไฮโดรเจน หรือแรงแรงแคววาลส์ (ดังภาพที่ 10)



ภาพที่ 10 แสดงพันธะทุติยภูมิระหว่างสีและเส้นใย [12]

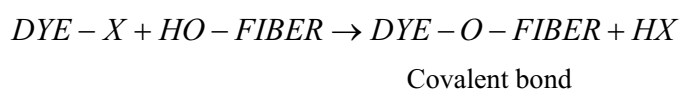
เนื่องจากพันธะทุติยภูมิเป็นพันธะที่อ่อน ดังนั้น การมีแรงชนิดนี้เป็นจำนวนมากจึงเป็นสิ่งที่ต้องการในการให้สีติดกับเส้นใยได้ดี สีที่เกิดพันธะชนิดนี้จึงมีโครงสร้างใหญ่และยาว เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกับเส้นใย แต่การแพร่ของสีที่มีโมเลกุลใหญ่ภายในเส้นใยทำได้ลำบาก ดังนั้น สีชนิดนี้จึงมีสมบัติการคงทนของสีบนเส้นใยไม่ค่อยดี สำหรับพันธะไอออนิกมีบทบาทสำคัญ ในการย้อมเส้นใยที่มีพฤติกรรมเป็นกรดหรือเบส พันธะไอออนิกจะเกิดขึ้นได้ระหว่างเส้นใยที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดกับสีย้อมที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสหรือในทางตรงกันข้าม พันธะที่เกิดขึ้นคือ สะพานเกลือ (Salt linkage) ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะทุติยภูมิ เส้นใยที่

สร้างพันธะกับสีย้อมในลักษณะนี้ จะมีขีดจำกัดในการติดสี เพราะเมื่อสีย้อมติดกับหมู่ฟังก์ชันในเส้นใยที่เรียกว่า Dyesites แล้วจะไม่มีบริเวณให้สีเข้ามาติดอีก เส้นใยที่มีหมู่ฟังก์ชันแบบนี้ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งการผลิตสามารถกำหนดจำนวนของ Dyesites ในโครงสร้างได้ สีย้อมและเส้นใยที่เกิดพันธะไอออนิก จะมีสมบัติการคงทนของสีต่อการซักล้างดีเนื่องจากความแข็งแรงของพันธะระหว่างสีและเส้นใย สีย้อมชนิดนี้จะมีขนาดเล็กกว่าสีย้อมที่ใช้พันธะทุติยภูมิในการยึดติดกับเส้นใย การที่โมเลกุลของสีมีขนาดเล็กส่งผลให้ดูดกลืนแสงในช่วงที่แคบกว่า ดังนั้น สีชนิดนี้จึงมีเฉดสีที่สว่างกว่าสีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง



ภาพที่ 11 แสดงลักษณะการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างสีย้อมกับเส้นใย [12]

พันธะชนิดที่สามระหว่างสีย้อมและเส้นใย คือพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) (ภาพที่ 12) สีย้อมที่เกิดพันธะโคเวเลนต์กับเส้นใยมักขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดทุติยภูมิที่เกิดขึ้นบนเส้นใย ในช่วงเริ่มต้น หลังจากสีย้อมถูกดูดซับบนเส้นใยแล้ว จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดพันธะทางเคมี เช่น พันธะโคเวเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง



ภาพที่ 12 แสดงลักษณะการเกิดพันธะโคเวเลนต์ [12]

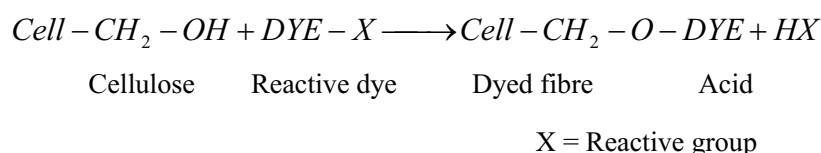
2.2.4 สีรีแอทีฟ (Reactive dyes)

นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลส โครงสร้างของสีประกอบด้วยหมู่ที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสและเกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ ปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมและเส้นใยจะเป็นแบบ Nucleophilic displacement และเกิดผลพลอยได้ออกมาเป็นกรด และเนื่องจากเบสจะเพิ่มสภาพของประจุลบบนอะตอมของออกซิเจนในเซลลูโลส ดังนั้น เบสคือตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบนี้

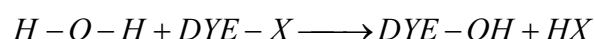
ธรรมชาติของสีรีแอทีฟจะทำปฏิกิริยากับน้ำ สีที่ทำปฏิกิริยากับเส้นใยจะเรียกว่า Fixed dyes ส่วนสีที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า Hydrolysed dyes สีที่ติดบนเส้นใยจะติดแน่น ทำให้สีรีแอทีฟมีความคงทนต่อการซักล้างได้ดี ส่วน Hydrolysed dyes ไม่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีที่แข็งแรง

กับเส้นใย แต่อาจทำปฏิกิริยาอย่างอ่อน เช่น แรงทุติยภูมิกับเส้นใยได้ ซึ่งส่วนนี้จำเป็นต้องล้างออก ก่อนที่การย้อมจะสิ้นสุด อาจนำมาด้วยปัญหาการกำจัดสีออกจากน้ำเสีย

Fixation reaction



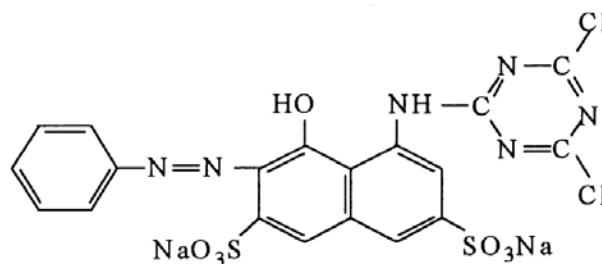
Hydrolysis reaction



ภาพที่ 13 แสดงการย้อมสีรีแอคทีฟไปยังเส้นใยเซลลูโลส [12]

2.2.4.1 โครงสร้างของสีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟประกอบด้วยโครโมฟอร์ที่ติดอยู่กับหมู่ที่ว่องไว (Reactive group) ผ่านหมู่ -NH- เนื่องจาก สีดึบบนเส้นใยด้วยพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้น โครโมฟอร์สามารถมีขนาดเล็ก และโครงสร้างไม่ซับซ้อน ซึ่งเป็นข้อดีคือสีจะละลายน้ำดี การแยกสีที่ไม่ติดบนผ้าทำได้ง่ายสีเข้าสู่เส้นใยได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำและมีสีที่สดใส แต่ก็มีข้อเสียคือ สีรีแอคทีฟจะเกาะติดกับผิวเส้นใยได้น้อย (Low substantivity) เพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ โครงสร้างของสีจะต้องประกอบไปด้วยหมู่ซัลโฟเนต เพื่อช่วยในการละลายน้ำด้วย โครโมฟอร์ในโครงสร้างของสีรีแอคทีฟ ได้แก่ Monazo Anthraquinone Phthalocyanine เป็นต้น และหมู่ที่ว่องไวในสีรีแอคทีฟมีหลายชนิด ชนิดที่สำคัญ ได้แก่ หมู่ Triazine ซึ่งเกิดจากการเชื่อมหมู่โครโมฟอร์กับ Trichlorotriazine (Cyanuric chloride) หมู่ที่หลุดไป (Leaving group) ของสีรีแอคทีฟตัวที่นิยมคือ คลอรีน ฟลูออรีน เมทิลซัลโฟนิลและควอเตอร์นารีแอมโมเนียม



ภาพที่ 14 แสดงตัวอย่างโครโมฟอร์ในโครงสร้างของสีรีแอคทีฟ (C.I. Reactive Red 2) [13]

2.2.4.2 วิธีการย้อมสีรีแอกทีฟ

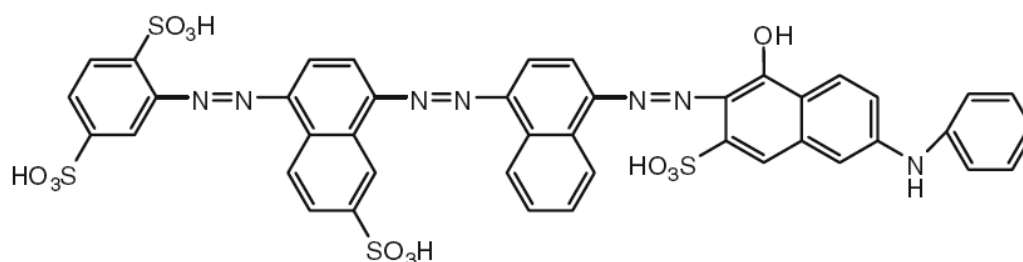
การย้อมด้วยสีรีแอกทีฟ สามารถทำได้ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการดูดแนบ (The adsorption stage) และขั้นตอนการติดสี (The fixation stage) ขั้นตอนแรกจะถูกควบคุมโดยเวลาในการย้อม อุณหภูมิ และปริมาณเกลือ ส่วนขั้นตอนที่สองจะได้ผลดีขึ้นอยู่กับค่า pH หรือการเติมเบสที่เหมาะสม เนื่องจากสีรีแอกทีฟมีหลายชนิดและแต่ละชนิดจะมีปัจจัยเรื่อง ระยะเวลาย้อม อุณหภูมิ ค่า pH ของน้ำย้อม แตกต่างกันไปเป้าหมายของวิธีการย้อมสีรีแอกทีฟคือ ต้องทำสีติดบนเส้นใยให้มากที่สุดและมีปริมาณสีที่เกิด Hydrolysis น้อยที่สุด ขั้นตอนการติดสีนั้นจะมีประสิทธิภาพหรือไม่ขึ้นกับปัจจัยดังนี้ สัดส่วนของความว่องไวของอัตราการติดสีกับการไฮโดรไลซิส ความเข้มข้นของสีที่ดูดซึมไปยังเส้นใย สัมประสิทธิ์การแพร่ของสีไปยังเส้นใย พื้นที่ผิวของเส้นใยที่จะดูดซับสี ในขั้นตอนการย้อมส่วนใหญ่ในช่วงเริ่มต้นค่า pH ของน้ำย้อมจะใกล้เคียงสภาวะเป็นกลาง เพราะสีส่วนใหญ่จะอยู่ในน้ำย้อม ความว่องไวของสีส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเบสในขั้นตอนต่อไป ทำให้สีส่วนใหญ่เข้าไปสู่ในเส้นใย ชนิดและปริมาณของเบสที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีรีแอกทีฟ เบสที่ใช้ได้แก่ Sodium bicarbonate, Sodium carbonate, Sodium hydroxide, Sodium silicate เป็นต้น สำหรับกระบวนการย้อมแบบแช่ การเติมเกลือจะช่วยให้สีย้อมเข้าไปสู่เส้นใย ปริมาณของเกลือที่ใช้ในระบบของการย้อมสีรีแอกทีฟจะมีมากกว่าในระบบของการย้อมด้วยสีไคเร็กซ์ เพราะธรรมชาติของสีรีแอกทีฟจะมีการยึดติด (Affinity) กับเส้นใยต่ำ และสุดท้ายต้องทำการล้างเพื่อเอา Hydrolysed dyes ออก การล้างจะทำหลายครั้งพร้อมกับเติมสารซักล้างและทำที่อุณหภูมิสูง

2.2.5 สีไคเร็กซ์ (Direct dyes)

สีย้อมไคเร็กซ์ถูกใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมานานกว่า 100 ปี เนื่องจากใช้งานได้ง่าย มีหลายชนิดให้เลือกใช้ ความคงทนของสีต่อการซักล้างอยู่ในขั้นปานกลาง ความคงทนของสีต่อแสงอยู่ในขั้นแย่มากขึ้นอยู่กับชนิดของสี

2.2.5.1 โครงสร้างของสีไคเร็กซ์

สีไคเร็กซ์จะเกิดพันธะกับเส้นใยด้วยพันธะทุติยภูมิ เช่น พันธะไฮโดรเจนและแรง van der Waals ซึ่งเป็นพันธะทุติยภูมิที่อ่อน ดังนั้นโครงสร้างของสีจึงมีขนาดใหญ่และยาวเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับเส้นใย น้ำหนักโมเลกุลของสีไคเร็กซ์มีค่าสูงประมาณ 400 ถึง 1,200 สีไคเร็กซ์ส่วนใหญ่มีโครงสร้างประกอบด้วยกลุ่มอะโซ โครงสร้างโดยทั่วไปอาจเขียนได้เป็น $R_1-N=N-X-N=N-R_2$ โดยนิยมเป็น ไคอะโซ หรือไทรอะโซ เพื่อให้น้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น ตัวอย่างเช่น สี C.I. Direct Blue 78



ภาพที่ 15 แสดงโครงสร้างของ C.I. Direct Blue 78 [14]

โครงสร้างของสียไคเร็กซ์จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เพื่อให้สียติดตามยาวสายโซ่เซลลูโลสได้ดี ส่วนโครงสร้างวงแหวนจะช่วยให้เกิดการเกิดไฮโดรเจนบอนด์ซึ่งมีอิทธิพลต่อสีและความคงทนต่อแสง ส่วนหมู่ซัลโฟเนตที่ปลายของโครงสร้างจะช่วยในการละลายน้ำ แต่ไม่มีอิทธิพลเพียงพอในการช่วยการดูดซับเข้าไปในเส้นใย การละลายน้ำของสีจะมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำย้อม

2.2.5.2 วิธีการย้อมสี

2.2.5.2.1 สีย้อมจะถูกละลายลงในน้ำ แล้วเติมเข้าไปในอ่างย้อมที่มีผ้าที่ต้องการย้อมอยู่

2.2.5.2.2 เพิ่มอุณหภูมิของอ่างย้อมที่ละน้อยจนใกล้ถึงจุดเดือดของน้ำและคงไว้ที่อุณหภูมินี้เป็นระยะเวลาหนึ่ง สีย้อมบางชนิดอาจมีการดูดซับบนเส้นใยได้ดีที่อุณหภูมิสูง สีย้อมบางชนิดดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ จึงต้องมีการลดอุณหภูมิลงในขั้นตอนต่อไป ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม

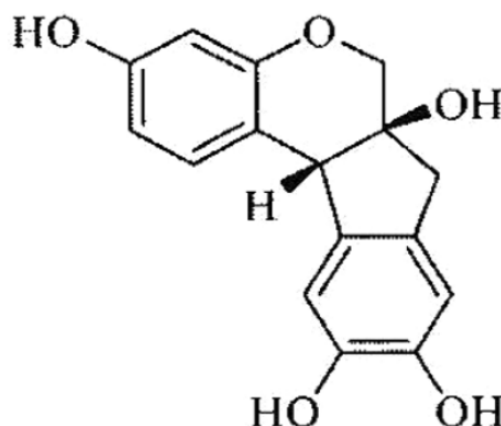
2.2.5.2.3 เติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (Common salt) หรือโซเดียมซัลเฟต (Glauber's salt) ลงในอ่างย้อมเพื่อเพิ่มการดูดซับสี ระยะเวลาเติมนี้นี้ขึ้นอยู่กับสีแต่ละชนิด

2.2.6 สีแดงธรรมชาติจากไม้ฝาง [15,16]



ภาพที่ 16 แสดงใบ ดอก และฝักของฝางตามลำดับ [15]

ไม้ฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) มีชื่อสามัญคือ Sappan wood, Indian red wood, Brazilwood พบขึ้นตามเขาหินปูนที่แห้งแล้ง ป่าเต็งรังและตามชายป่าดงดิบแล้งทั่วไปในประเทศไทยพบทุกภาค แม้กระทั่งภาคใต้ ลักษณะทั่วไปเป็นไม้พุ่มกึ่งใบเถา ไม้ผลัดใบแต่ผลิใบใหม่จะแตกขึ้นเป็นกอหรือแตกแขนงชิดหรือเกือบชิดพื้นสูง 8-10 เมตร ตามลำต้นและกิ่งมีหนามแข็งโค้งงอทั่วไป ใบประกอบแบบขนนกสองชั้น เรียงสลับกันข้อแขนงแตกออกตรงข้ามกัน 7-18 คู่ ดอกเป็นช่อไม่แยกแขนงออกใกล้กันตามปลายกิ่งและง่ามใบปลายกิ่ง ผลเป็นฝักแข็งแบนสีน้ำตาลแก่เป็นจุดๆ คล้ายฝักถั่วแปบ ปลายฝักจะมีจะงอยแหลมอยู่ด้านนอก เนื้อไม้มีสีเหลืองส้ม ถูกอากาศนานๆ จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เส้นตรงเนื้อละเอียดปานกลาง ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณ 1.16 เนื้อไม้ใช้ทำเครื่องเรือนชั้นดีเพราะสีของเนื้อไม้ออกแดงหรือน้ำตาลเข้ม คนไทยนิยมใช้ประโยชน์ไม้ฝางโดยการย้อมผ้าไหม ผ้าฝ้ายและผ้าขนสัตว์ ฝางให้สีได้เกือบทุกส่วนของต้น คือ เนื้อไม้หรือแก่นไม้ ต้มให้สีแดง เรียกว่า Sappanin ซึ่งเป็นสารให้สีประเภท Brazilien มักใช้ทำน้ำยาอูทัย กลิ่นหอมชื่นใจแก้กระหายน้ำ ผลให้สีดำและรากให้สีเหลือง

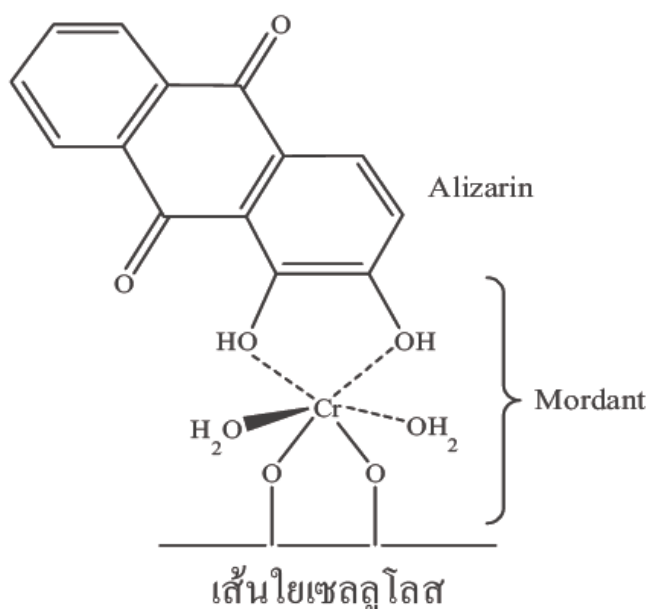


ภาพที่ 17 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ Brazilien [17]

2.2.6.1 การย้อมแบบใช้สารมอร์แดนต์ [18]

สีที่ได้จากธรรมชาติส่วนมากไม่สามารถย้อมติดวัสดุสิ่งทอได้คงทนด้วยตัวเอง เพราะตัวสีเองไม่มีแรงยึดเกาะกับเส้นใย จึงจำเป็นต้องใช้สารมอร์แดนต์ (Mordant) หรือสารช่วยยึดส่วนใหญ่เป็นโลหะที่มีประจุบวกและมักเป็นสารประกอบเกลือของโลหะ ซึ่งสามารถรวมกับโมเลกุลสีเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสี (Metal dye complexes) ทำให้สีสามารถถูกผนึกอยู่ในเส้นใยได้ดีขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่ขึ้น และเปลี่ยนรูปของโมเลกุลสีย้อมอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ สีจะไม่ตกหรือซีดจาง ความคงทนของสีมากขึ้น สารมอร์แดนต์จะทำปฏิกิริยากับสีย้อม

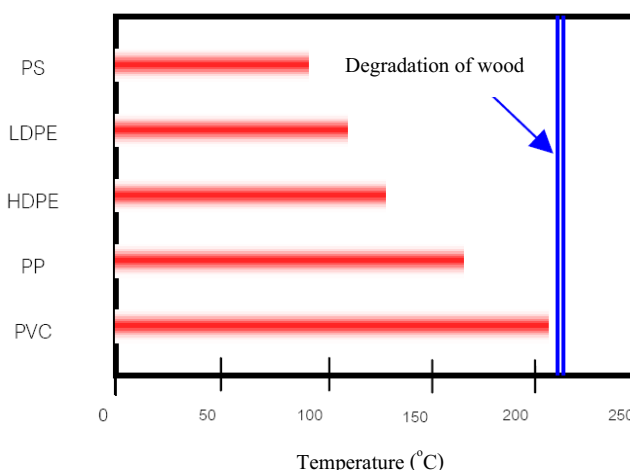
ผ่านพันธะโคเวเลนต์หรือพันธะโคออร์ดิเนตเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน “ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า สารประกอบเชิงซ้อนประเภทวงแหวน (Chelate)” สารมอร์แดนต์ที่นิยมใช้คือ สารส้ม (Alum; $\text{Al}(\text{NH}_4)(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) จุนสี (Copper Sulfate; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) สนิมเหล็กและตะกั่ว เป็นต้น ประโยชน์อีกประการหนึ่งที่ได้จากสารมอร์แดนต์คือ สีที่แตกต่างจากการใช้มอร์แดนต์ชนิดที่ต่างกัน ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการย้อมแบบนี้ คือ โลหะของสารละลายมอร์แดนต์จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่แข็งแรง (Strong complex) กับสีและเส้นใย ดังตัวอย่างการย้อมสี Alizarin กับเส้นใยเซลลูโลส โดยมี Chrome เป็นสารละลายมอร์แดนต์ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แสดงสารเชิงซ้อนระหว่างโลหะมอร์แดนต์กับสีย้อมธรรมชาติและเส้นใย [18]

2.3 วัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก [1,19]

วัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก เป็นการดึงเอาสมบัติที่เป็นทั้งข้อดีและข้อเสียของวัสดุทั้งสองชนิดเข้ามาไว้ด้วยกัน อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษไม้เลื่อยและใช้ไม้ได้อย่างคุ้มค่าที่สุด และเท่าที่ทราบว่าเป็นการสร้างวัสดุที่มีสมบัติใหม่ขึ้นมารองรับความต้องการทางวิศวกรรม พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น PE PP PS และ PVC เพราะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ไม่จะเกิดการเสื่อมสภาพประมาณ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังภาพที่ 19 จะสามารถหลอมเหลวและผสมเป็นวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกโดยไม่เปลี่ยนแปลงสี กลิ่น หรือสารระเหยง่ายไป



ภาพที่ 19 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกชนิดต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิเสื่อมสภาพของไม้ [1]

2.3.1 สมบัติของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก

เนื่องจากไม้ประกอบพลาสติกเป็นวัสดุที่เอาทั้งไม้และพลาสติกมารวมกันจึงเป็นผลทำให้สมบัติเดิมของไม้และพลาสติกเปลี่ยนไป ทั้งนี้ สัดส่วนของไม้และพลาสติกก็ยังมีผลกระทบต่อสมบัติของไม้พลาสติกด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าปริมาณของวัตถุดิบตัวใดตัวหนึ่งมาก คุณสมบัติโดยรวมของไม้พลาสติกก็จะมีแนวโน้มเอียงไปทางวัสดุที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปดังนี้

2.3.1.1 สมบัติข้อดีของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก

2.3.1.1.1 ทนทานต่อความชื้นได้ดีกว่าไม้ เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว ไม้จะชอบน้ำและดูดน้ำ ทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา แต่เนื่องจากไม้พลาสติกมีส่วนผสมของพลาสติกอยู่ด้วย จึงทำให้ลดปริมาณการดูดซึมน้ำลงไปได้มาก

2.3.1.1.2 ด้านทานต่อเชื้อราและแมลงที่เป็นศัตรูของไม้ต่างๆ ได้ดีกว่าไม้

2.3.1.1.3 สามารถผลิตให้มีรูปร่างต่างๆ ได้โดยไม่ทำให้เกิดเศษเหลือใช้เพราะเป็นการขึ้นรูปขึ้นงาน

2.3.1.1.4 สามารถนำ กลับมาใช้ใหม่หรือ recycle ได้ แต่สมบัติต่างๆ จะลดลง

2.3.1.1.5 รับแรงได้มากกว่าพลาสติกเพราะมีการเสริมแรงด้วยไม้

2.3.1.1.6 มีความทนทานต่อแสง UV ได้ดีกว่าพลาสติก เพราะไม้เข้ามาแทนที่ส่วนของพลาสติกที่เกิดการเสื่อมสภาพจากแสง UV ได้ง่าย

2.3.1.1.7 มีการหดและขยายตัวน้อยกว่าพลาสติกมาก

2.3.1.2 สมบัติข้อเสียของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก

2.3.1.2.1 สมบัติเชิงกลลดต่ำกว่าไม้

2.3.1.2.2 มีการหดและขยายตัวมากกว่าไม้

2.3.1.2.3 ขั้นตอนในการผสมจะซับซ้อนกว่า เนื่องจากการผสมไม้ในสัดส่วนต่างๆ อาจทำให้เกิดปัญหาจากการขึ้นรูป

2.3.1.2.4 อายุการใช้งานสั้นกว่าพลาสติก เพราะมีไม้ผสมอยู่ แต่ก็นับว่าเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เพราะย่อยสลายตัวได้เร็วกว่าพลาสติก

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ D. Ndiaye และคณะ [20] ศึกษาผลของแสงต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก โดยจะใช้พลาสติกหลัก 2 ชนิดคือ HDPE และ PP เส้นใยไม้ใช้ขนาด 425 ไมครอน และใช้ PPgMA เป็นสารเชื่อมประสาน ทดสอบการเสื่อมสภาพจากแสงโดยใช้เครื่องให้รังสียูวีซึ่งจำลองมาจากสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ให้ค่าความยาวคลื่นในช่วง 300 nm ในสภาวะอากาศ จากนั้นติดตามการเสื่อมสภาพจากแสงตามเวลาต่างๆ โดยพิจารณาพีคของ FTIR ที่เกิดจากหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ที่เลขคลื่น $1,713\text{ cm}^{-1}$ กับพีคการสั่นแบบยืดของ -CH จาก PP ที่ $2,722\text{ cm}^{-1}$ ที่เวลาการฉายรังสียูวีต่างๆ พบว่ายิ่งการเติมไม้มากขึ้นจะเร่งให้เกิดการออกซิเดชันมากขึ้นเพราะลิกนิน จากไม้เป็นตัวดูดกลืนยูวีซึ่งเร่งให้เกิดการออกซิเดชันและเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะได้หมู่โครโมฟอร์เช่น คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล ซึ่งทำให้สายโซ่สั้นลงและเกิดสีเหลือง แต่เมื่อพิจารณาผลของ PPgMA พบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณ PPgMA ยิ่งทนการออกซิเดชันจากแสงได้นานขึ้น เพราะ MA สามารถช่วยดูดกลืนแสงด้วยหมู่โครโมฟอร์ของ MA

งานวิจัยของ F.P. La Mantia และคณะ [21] ศึกษาผลจากสภาพอากาศต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต PP และผงไม้ขนาด 150-200 ไมครอน ในสัดส่วนไม้ 30 และ 60% โดยน้ำหนัก การทดสอบความทนทานต่อสภาพอากาศใช้เครื่อง Q-UV chamber ที่มีหลอด UV-B ทำให้ชิ้นงานเสื่อมสภาพเสมือนได้รับแสงอาทิตย์ น้ำฝน และน้ำค้าง ผลการทดสอบ Tensile testing ตามมาตรฐาน ASTM D882 พบว่าค่า Elastic modulus จะต่ำลงมากเมื่อผ่านเวลาผ่านไป 150 ชั่วโมง ค่า Tensile strength สำหรับ PP บริสุทธิ์จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตเพราะกระบวนการตัดสายโซ่จากการฉายรังสีเกิดกับวัสดุคอมพอสิตน้อยกว่า เช่นเดียวกับระยะยืดสูงสุดก่อนจะเกิดการแตกหัก พบว่า PP มีการลดลงของระยะยืดก่อนแตกหักมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิต ข้อเสียของวัสดุคอมพอสิตคือความเปราะที่มากกว่า PP บริสุทธิ์ ผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อได้ชิ้นงานรับแสงยูวีติดตามด้วยเทคนิค FTIR ในช่วง $4000\text{-}450\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจะรายงานการเกิดออกซิเดชันจากค่า Carbonyl index คือสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคในช่วง $1,800\text{-}1,680\text{ cm}^{-1}$ และพื้นที่ใต้พีคที่ $2,722\text{ cm}^{-1}$ (เกิดจากการสั่นแบบยืดของ PP) พบว่าผลจากการฉายแสงที่เวลาสั้นเกินไป ไม่เร่งให้ไม้เกิดการ

ออกซิเดชันจากแสง อีกทั้งอัตราการออกซิเดชันจากแสงของ PP ต่ำลงด้วย เป็นผลจากลิกนินและ สารแทรกบางชนิด จากนั้นทำการหาน้ำหนักโมเลกุลของ PP จากการวัด Intrinsic viscosity ซึ่งต้อง ทำการแยก PP ออกจากวัสดุคอมพอสิตด้วย Tetrahydronaphthalene (THN, 135 °C) กรองแยกไม้ ออก จากนั้นเติม Ethanol ไปยังสารละลายที่กรองแล้วจะได้ตะกอนของ PP กรองซ้ำอีกครั้งจากนั้น นำไปวัดค่า Intrinsic viscosity ด้วยเครื่อง Schott-Gerate viscometer และคำนวณค่า Intrinsic viscosity จากสมการของ Salomon-Ciuta พบว่ายิ่งเวลาผ่านไปมากทำให้ค่า Intrinsic viscosity ต่ำลง คือสายโซ่โมเลกุลของ PP สั้นลงนั่นเอง และวัสดุคอมพอสิตที่ปริมาณไม้ 60% โดยน้ำหนัก PP จะรับ แสงต่ำลงเพราะถูกไม้บดบังทำให้ค่า Intrinsic viscosity ลดต่ำลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับปริมาณไม้ที่ 30 และ 0% โดยน้ำหนัก

จากงานวิจัยของ M.D.H. Beg และคณะ [22] ศึกษาผลของการทนทานต่อสภาพอากาศของ PP และวัสดุคอมพอสิตไม้และ PP ผลจาก DSC พบว่า PP หลังผ่านการทดสอบสภาพอากาศแล้วความ เป็นผลึกจะเพิ่มมากขึ้นเพราะอุณหภูมิของสภาพอากาศสูงกว่า Glass transition temperature (T_g) ของ PP สายโซ่โมเลกุลที่เป็น Amorphous จะจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกได้มากขึ้น แต่สำหรับวัสดุคอม พอสิตความเป็นผลึกจะต่ำลงเพราะการบวมตัวของไม้เนื่องจากน้ำทำให้การจัดเรียงตัวของผลึกเกิด ได้ยากกว่า

จากงานวิจัยของ J. Moran และคณะ [23] กำจัดลิกนินออกจากเส้นใยป่านสรนารายณ์ด้วย Sodium chlorite, Sodium bisulphate และ Sodium hydroxide จากผลการทดสอบ TGA พบว่า Cellulose เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 315 °C จนกระทั่งถึง 400 °C จะเหลือกากของแข็งประมาณ 6.5% โดยน้ำหนัก สำหรับเฮมิเซลลูโลสเริ่มสลายตัวที่ 220 °C จนถึง 315 °C จะเหลือกากของแข็ง ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก และลิกนินจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C ไปจนถึง 700 °C โดย เหลือของแข็งประมาณ 46% โดยน้ำหนัก สำหรับป่านสรนารายณ์ที่ทำการกำจัดลิกนิน พบว่า อุณหภูมิของการเริ่มสลายตัวต่ำกว่า Commercial cellulose และปริมาณของกากของแข็งที่เหลือ มากกว่าด้วย แสดงถึงเฮมิเซลลูโลสหรือลิกนินที่ทนต่อกระบวนการแยกและความแตกต่างของ ของแข็งที่เหลืออยู่เกิดจากกระบวนการทางเคมีที่ใช้ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้มากกว่า หลังจากนั้น ทดสอบการเปลี่ยนแปลงไปของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR พิกเอกลักษณะของลิกนินอยู่ ในช่วง 1600-1500 cm^{-1} (แสดงถึงการสั่นของโครงสร้าง Aromatic) นอกจากนั้นยังมีหมู่ฟังก์ชัน ของ methoxyl -O-CH₃, C-O-C และ Aromatic C=C ดูดกลืนพลังงานระหว่าง 1830 และ 1730 cm^{-1} ซึ่งพบว่าวิธีการกำจัดลิกนินที่ใช้สามารถทำให้พิกของลิกนินหายไปได้

จากงานวิจัยของ P.A. Ahlgren และคณะ [24] ทำการกำจัดลิกนินออกจากไม้โดยใช้ 0.3 กรัม Sodium chlorite และ 0.1 ม.ล. Glacial acetic acid ต่อ 1 กรัมของน้ำหนักไม้แห้ง Liquor ratio คือ

15:1 และอุณหภูมิ 70 °C ที่เวลา 2 ชั่วโมง 10 นาที และ 7 โมง จะกำจัดลิกนินได้ 50 และ 90% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการกำจัดลิกนินด้วยวิธีนี้จะไม่ทำลายองค์ประกอบของเซลลูโลสเมื่อกำจัดลิกนินไม่เกิน 60%

จากงานวิจัยของ N. Abidi และคณะ [25] พิจารณาการป้องกันแสง UV ของผ้าฝ้าย เพื่อต้านทานการทะลุผ่านของแสง UV มาสัมผัสผิวหนังของผู้สวมใส่โดยนำผ้าฝ้ายมาข้อมด้วยสียไคเร็กซ์ (CI Direct blue 80) และรีแอคทีฟ (Drimarine X-3LR, chlorotriazine) ความสามารถในการป้องกันแสง UV เรียกว่า Ultraviolet Protection Factor (UPF) พบว่ายิ่งความเข้มข้นของสีมากขึ้นทำให้ UPF สูงขึ้นด้วยและจะคงที่ที่ความเข้มข้นประมาณ 1.5%ของน้ำหนักรายสีรีแอคทีฟ X-3LR ป้องกัน UV ได้ดีกว่าสียไคเร็กซ์ ทั้งนี้ค่า UPF จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสีและเส้นใยที่ใช้

ตารางที่ 1 การดูดซับพลังของหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน [21]

Fiber component	Wave number (cm ⁻¹)	Functional group	Compounds
Cellulose	4,000–2,995	OH	Acid, methanol
	2,890	H–C–H	Alkyl, aliphatic
	1,640	Fiber–OH	Adsorbed water
	1,270–1,232	C–O–C	Aryl-alkyl ether
	1,170–1,082	C–O–C	Pyranose ring skeletal
	1,108	OH	C–OH
	4,000–2,995	OH	Acid, methanol
	2,890	H–C–H	Alkyl, aliphatic
Hemicellulose	1,765–1,715	C=O	Ketone and carbonyl
	1,108	OH	C–OH
	4,000–2,995	OH	Acid, methanol
Lignin	2,890	H–C–H	Alkyl, aliphatic
	1,730–1,700		Aromatic
	1,632	C=C	Benzene stretching ring
	1,613, 1,450	C=C	Aromatic skeletal mode
	1,430	O–CH ₃	Methoxyl–O–CH ₃
	1,270–1,232	C–O–C	Aryl-alkyl ether
	1,215	C–O	Phenol
	1,108	OH	C–OH
	700–900	C–H	Aromatic hydrogen

บทที่ 3

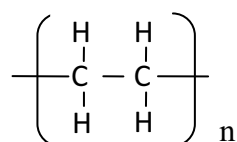
วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบความเสถียรต่อแสงแดดของสีสังเคราะห์และสีธรรมชาติที่ใช้ในการย้อมผงไม้ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตพลาสติก HDPE ผสมกับผงไม้ยางพารา หลังจากนำไปตากแดดเป็นระยะเวลานาน 3 เดือน ซึ่งในงานวิจัยจะปรับปรุงผงไม้ยางพาราด้วยการกำจัดลิกนิน แล้วย้อมสีด้วยสีสังเคราะห์ (สีโคเร็กซ์ หรือสีรีแอคทีฟ) และสีธรรมชาติ (จากไม้ฝาง) โดยที่สมบัติต่างๆ ที่ศึกษาของวัสดุคอมพอสิตทั้งก่อนและหลังจากนำไปตากแดด ได้แก่ สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล โครงสร้างพื้นฐานภายใน และการเปลี่ยนแปลงสี

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ต่อกันเป็นสายโซ่ตรงยาวของเอทิลีนมอนอเมอร์ ซึ่งจะใช้เป็นพอลิเมอร์เชื่อมประสานผงไม้เข้าด้วยกันสำหรับการเตรียมวัสดุคอมพอสิตในงานวิจัยนี้ โดยมีสูตร โครงสร้างทางเคมี ดังนี้



ภาพที่ 20 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ HDPE

HDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) เกรด InnoPlus HD1100J มีค่าดัชนีการไหล 18 กรัมต่อ 10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238

3.1.2 Maleic anhydride graft HDPE (MAPE)

MAPE ทำหน้าที่เป็นสารประสานคู่ควบ (Coupling agent) ให้พอลิเมอร์ HDPE และผงไม้ยางพาราเข้ากันได้ดีขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของ MAPE มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว จึงช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่าง HDPE และผงไม้ได้ โดย MAPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซื้อมาจากบริษัท DuPont เกรด Fusabond® EMB100D มีค่าดัชนีการไหล 2 กรัมต่อ 10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยมีปริมาณ Maleic anhydride 0.9% โดยน้ำหนัก

3.1.3 ผงไม้ยางพารา

ผงไม้ยางพาราได้มาจากเศษจี้เลื่อยไม้ยางพาราจากโรงงานแปรรูปเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา โดยนำเศษจี้เลื่อยไม้ยางพารามาอบให้แห้งในตู้อบ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Ball mill แล้วคัดแยกขนาดผงไม้ยางพาราด้วยเครื่อง Sieve shaker ให้ได้ขนาด 200-500 mesh

3.1.4 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้เป็นสีสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ Solophenyl Bordeaux 3BLE (C.I. direct red 83.1) และ Novacron Red C-2G (C.I. Reactive Red 281) จากบริษัท Huntsman (Guangdong) Ltd. สำหรับสีธรรมชาติได้มาจากการต้มสกัดสีจากไม้ฝาง (Sappan wood)

3.1.5 สารเคมี

- Benzene, C ₆ H ₆ (99.8%)	Grade A.R.	Panreac Sintesis
- Ethanol, CH ₃ CH ₂ OH (95%)	Grade L.R.	Union Intraco Co.,Ltd
- Sulfuric acid, H ₂ SO ₄ (98%)	Grade A.R.	Labscan Asia Co., Ltd.
- Sodium chlorite, NaClO ₂ (80%)	Grade A.R.	Ajax Finechem
- Acetic acid, CH ₃ COOH (99.7%)	Grade A.R.	Labscan Asia Co., Ltd.
- Sodium carbonate, Na ₂ CO ₃ (99.9%)	Grade A.R.	QReC TM
- Sodium sulfate, Na ₂ SO ₄	Grade COM.	
- Aluminium sulphate, Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O (105%)	Grade A.R.	Ajax Finechem
- Sodium chloride, NaCl (99%)	Grade A.R.	QReC TM

*A.R. = Analytical Reagent, L.R. = Laboratory Reagent, COM. = Commercial Reagent

3.2 เครื่องมือ

3.2.1 เครื่องวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสาร Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) บริษัท Bruker รุ่น Vertex 70

3.2.2 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ Universal testing machine บริษัท Lloyd Instrument รุ่น LR 50K สหราชอาณาจักร

3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning electron microscope (SEM) บริษัท Jeol รุ่น JSM 5410LV

3.2.4 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพโดยใช้ความแตกต่างของความร้อน Differential scanning calorimeter (DSC) บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC 1

3.2.5 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน Thermogravimetric analysis (TGA) บริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC 1

3.2.6 เครื่องวัดเฉดสี Color reader บริษัท Konica Minolta Sensing รุ่น CR-10

3.2.7 ตู้แสง Daylight บริษัท GretagMacbeth รุ่น The Judge II

3.2.8 เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง UV/Visible Spectrophotometer บริษัท PG Instruments รุ่น T80+

3.2.9 กล้องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.2.10 เครื่องเขย่า Sieve shaker บริษัท Scientific promotion รุ่น AS 200digit (ชื่อทางการค้า Retsch)

3.2.11 ตะแกรงร่อน ชื่อทางการค้า Retsch รุ่น 361 L

3.2.12 เครื่อง Co-rotating twin screw extruder บริษัท รุ่น SHJ-25 ประเทศจีน

3.2.13 เครื่อง Injection molding บริษัท Battenfeld รุ่น PLUS 350/75

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมผงไม้ยางพารา

3.3.1.1 บดคัดแยกขนาดผงไม้ยางพารา

นำเศษไม้ยางพารามาอบให้แห้งในตู้อบ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Ball mill ทำการคัดแยกขนาดผงไม้ยางพาราด้วยเครื่อง Sieve shaker ให้ได้ขนาด 200-500 mesh

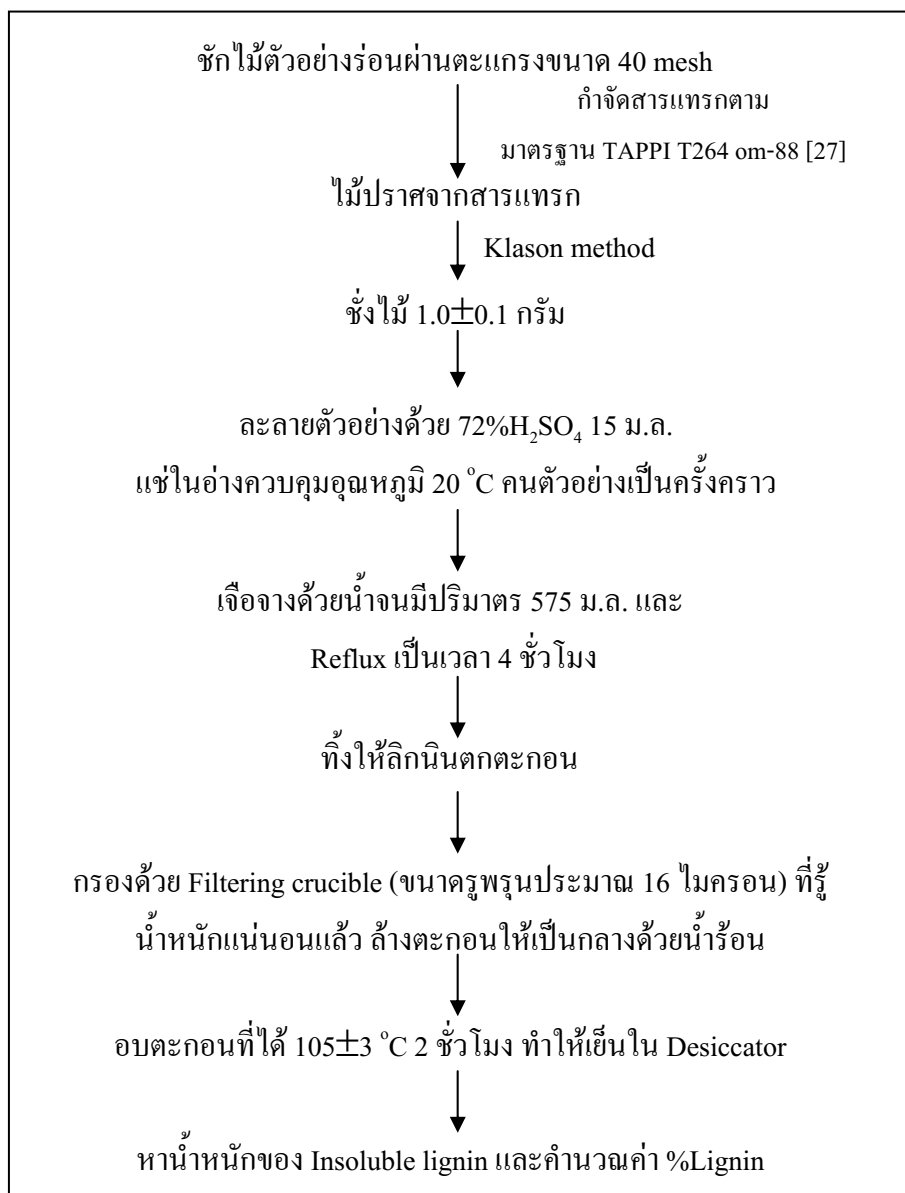
3.3.1.2 การหาปริมาณลิกนิน

หาปริมาณลิกนิน ตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98, “Acid – insoluble lignin in wood and pulp” [26] เรียกว่า “Klason lignin” ซึ่งมีขั้นตอนการหาตามภาพที่ 21

3.3.1.3 การกำจัดลิกนิน

กำจัดลิกนินออกจากผงไม้ยางพาราด้วย Acid chlorite treatment ตามวิธีของ P.A. AHLGREN และคณะ [24] โดยมีขั้นตอนดังนี้ ใส่ผงไม้ 500 กรัม (น้ำหนักแห้ง) และน้ำ 7,500 กรัม (Liquor ratio = 15:1) ลงในหม้อต้ม แล้วต้มที่อุณหภูมิ 70 °C เติม Sodium chlorite (NaClO_2) 150 กรัม (NaClO_2 0.3 กรัมต่อ 1 กรัมของไม้แห้ง) และ Glacial acetic acid 50 มิลลิลิตร (CH_3COOH 0.1 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัมของไม้แห้ง) โดยใช้เวลาดำเป็นช่วงเวลาต่างๆ (2-12 ชั่วโมง) แล้วเก็บผงไม้ตัวอย่างที่ต้มมาทดสอบหาปริมาณลิกนินตามหัวข้อ 3.3.1.2 เพื่อพิจารณาถึงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดลิกนิน

ผงไม้ยางพาราที่ผ่านการกำจัดลิกนินจะถูกนำมาอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในที่แห้งที่มีสารดูดความชื้น เพื่อนำไปย้อมสีในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 21 แสดงขั้นตอนในการหาปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98

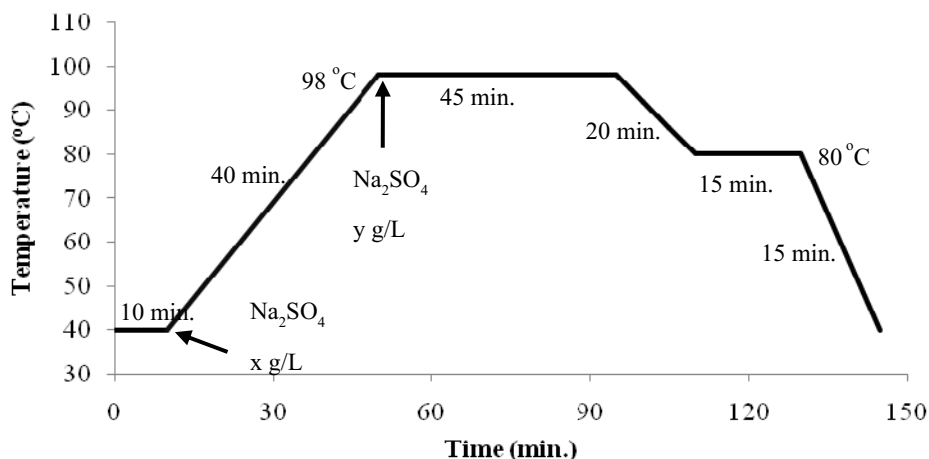
3.3.1.4 การย้อมสีผงไม้ยางพาราที่ผ่านการกำจัดลิกนิน

3.3.1.4.1 สีไดเรกซ์ (Direct dye)

นำผงสีไดเรกซ์เรด Solophenyl Bordeaux 3BLE (C.I. direct red

83.1) ปริมาณ 1% ต่อน้ำหนักของผงไม้ (%o.w.f.) ละลายลงในน้ำโดยใช้สัดส่วนของน้ำหนักผงไม้

ต่อน้ำเป็น 10:1 (Liquor = 10:1) และเติมเกลือ Sodium sulphate (Na_2SO_4) เป็นสารช่วยย้อมโดยใช้สถานะในการย้อมสีตามที่ผู้ผลิตกำหนดให้ ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 22 และตารางที่ 2



ภาพที่ 22 แสดงสถานะที่เหมาะสมในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีไคเร็กซ์

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณ Sodium sulphate ที่ใช้ในการย้อมสีไคเร็กซ์เมื่อใช้ปริมาณสีที่แตกต่างกัน โดยเติม Group x ก่อนที่เวลา 10 นาที และตามด้วย Group y ที่เวลา 50 นาที

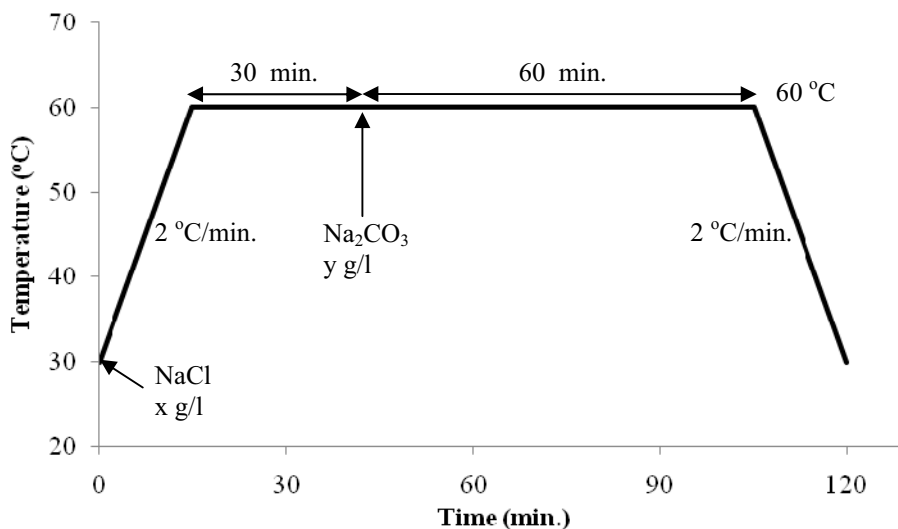
Dye (%)	Group x (g/l)	Group y (g/l)
0.05 - 0.1	1 - 2	5 - 7.5
0.25 - 0.5	5 - 7.5	10 - 15
0.75 - 1	10 - 15	20 - 30
1.25 - 1.5	17.5 - 20	35 - 40
>2.5	25	40

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการย้อม กรองแยกผงไม่ออกจากร้าน้ำย้อม นำน้ำย้อมที่เหลือจากการย้อมมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง Visible จากเครื่อง UV/visible spectrometer เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสีก่อนย้อมและหลังย้อม นำผงไม้ยางพาราที่ย้อมสีไคเร็กซ์เรดไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในที่แห้งที่มีสารดูดความชื้น เพื่อใช้สำหรับการผสมเป็นวัสดุคอมพอสิตในขั้นตอนต่อไป

3.3.1.4.2 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

นำผงสีรีแอคทีฟเรด Novacron Red C-2G (C.I. Reactive Red 281) ปริมาณ 1% o.w.f. ละลายลงในน้ำ Liquor ratio = 4:1 เติมสารช่วยย้อมคือ Sodium chloride (NaCl)

และ Sodium carbonate (Na_2CO_3) โดยใช้สภาวะในการย้อมสีตามที่ผู้ผลิตกำหนด ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 23 และตารางที่ 3



ภาพที่ 23 แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสียรีแอกทีฟ

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณ Sodium chloride และ Sodium carbonate ที่ใช้ในการย้อมสียรีแอกทีฟที่ปริมาณสีที่แตกต่างกัน

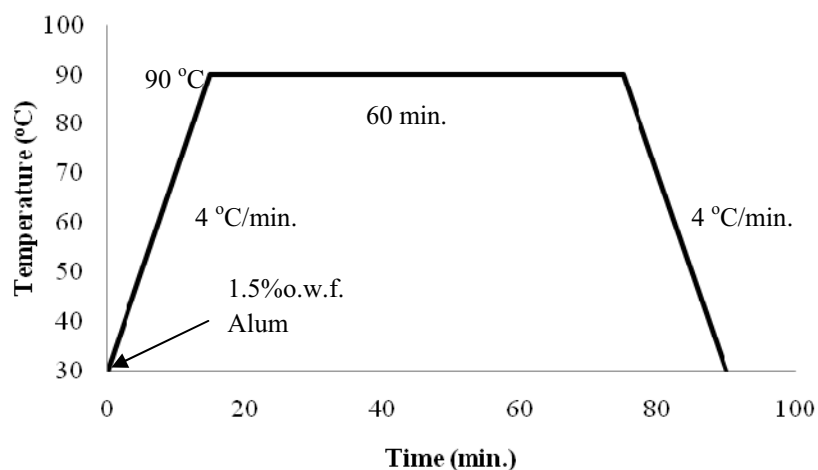
Dye (%)	Sodium chloride (g/l)	Sodium carbonate (g/l)
1	40	10
2	50	12.5
4	70	17.5
8	80	20

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการย้อม กรองแยกผงไม้ออกจากน้ำย้อม นำน้ำย้อมที่เหลือจากการย้อมมาวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง Visible จากเครื่อง UV/visible spectrometer เพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของสีก่อนย้อมและหลังย้อม นำผงไม้ยางพาราที่ย้อมสียรีแอกทีฟเรดแล้วไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในที่แห้งที่มีสารดูดความชื้น เพื่อใช้สำหรับการผสมเป็นวัสดุคอมพอสิตในขั้นตอนต่อไป

3.3.1.4.3 สียธรรมชาติจากไม้ฝาง (Sappan wood dye)

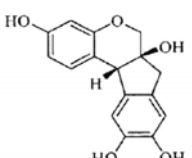
บดไม้ฝางให้เป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 1 คืน โดยใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของไม้ฝางต่อน้ำเป็น 1:10 หลังจากนั้นให้ความร้อนเพื่อให้สีออกจากไม้ฝาง

มากขึ้นด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองแยกน้ำย้อมออกจากไม้ฝาง ไล่ผงไม้ยางพาราลงในน้ำย้อม Liquor ratio = 1:10 เติมสารช่วยย้อมคือสารส้ม (Aluminium sulphate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) 1.5%o.w.f. โดยใช้สภาวะในการย้อมปรับปรุงจากงานวิจัยของปาเจรา พัฒนถาบุตรและคณะ [28] แสดงไว้ในภาพที่ 24

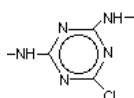


ภาพที่ 24 แสดงสภาวะที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีธรรมชาติของไม้ฝาง

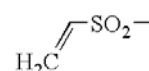
ตารางที่ 4 แสดงเอกลักษณ์ของสีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Commercial name	Scientific name	Main structure	Maximum wave length (nm)
Solophenyl Bordeaux 3BLE	C.I. direct red 83.1	Sodium sulphonate, Metal complex	519
Novacron Red C-2G	C.I. Reactive Red 281	MCT ¹ /VS ² /VS	514
Sappan wood dye		Brazilein ; 	540

1. MCT : monochlorotriazine ;



2. VS : vinyl sulphone ;



3.3.2 กระบวนการผสม HDPE และผงไม้ยางพารา

ตารางที่ 5 แสดงสูตรการผสมของวัสดุคอมพอสิตของไม้ยางพาราและ HDPE โดยมีการเรียกชื่อตัวอย่างต่างๆ ดังแสดงไว้ในตาราง ในการผสมวัสดุคอมพอสิตนั้นจะเติมสารประสานคู่ควบ (Coupling agent) ได้แก่ MAPE ในปริมาณ 10% โดยน้ำหนักของผงไม้ (10 phr ของปริมาณผงไม้) โดยที่สัดส่วนการผสมระหว่างผงไม้ยางพาราและ HDPE คือ 60:40 % โดยน้ำหนักในทุกสูตรการผสม

ก่อนการผสม จะนำสารไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการหลอมผสมสารทั้งหมดตามสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง Co-rotating twin screw extruder โดยใช้ความเร็วรอบสกรู 60 รอบต่อนาที (rpm) กำหนดให้อุณหภูมิแต่ละโซนของเครื่อง คือ 145, 145, 155, 155, 170, 170, 180, 180 และ 185 °C ตามลำดับ หลังจากผ่านกระบวนการอัดรีดและตัดเม็ด จะได้เม็ดของวัสดุคอมพอสิต จากนั้นนำเม็ดวัสดุคอมพอสิตไปอบที่ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสำหรับ Tensile test และ Three-point bending test ด้วยเครื่อง Injection molding โดยใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปคือ 180 °C ความเร็วฉีด 80 ซม./นาที่ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 60 °C ความดันฉีด 110 bar และความเร็วรอบการหมุนสกรู 50 rpm

ตารางที่ 5 แสดงสูตรการผสมของวัสดุคอมพอสิตของไม้ยางพาราและ HDPE

Sample	Compositions	Ratio
HDPE	HDPE	100
MA-HDPE	HDPE : MAPE	100:15
W-WPC	HDPE : Pure wood : MAPE	40:60:6
D-WPC	HDPE : Delignin wood : MAPE	40:60:6
DR-WPC	HDPE : Direct dyed wood : MAPE	40:60:6
RT-WPC	HDPE : Reactive dyed wood : MAPE	40:60:6
SP-WPC	HDPE : Sappan dyed wood : MAPE	40:60:6

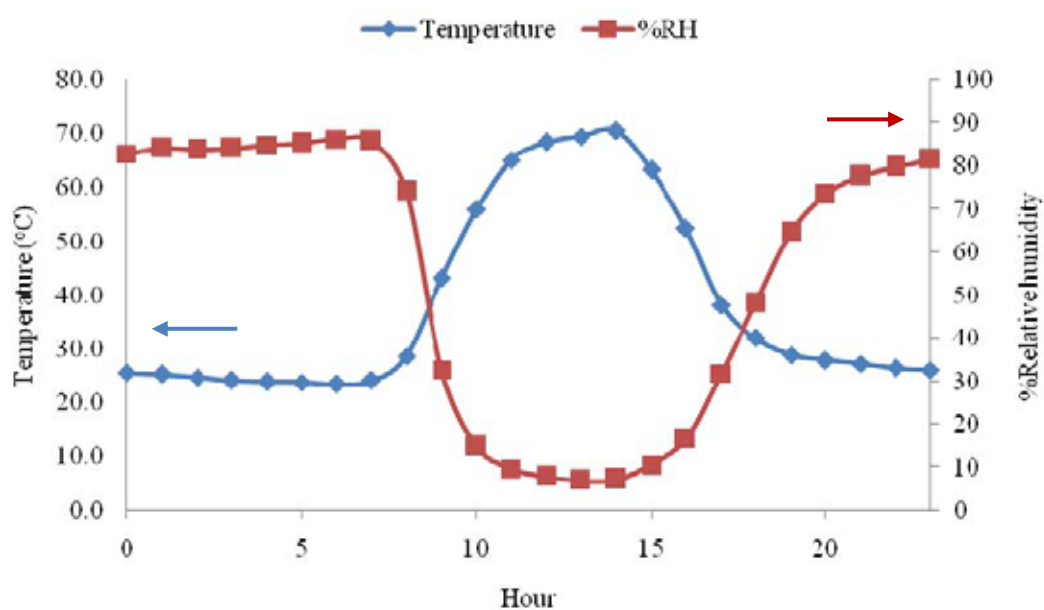
3.3.3 ทดสอบความทนทานต่อแสงแดด

นำชิ้นงานทดสอบที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปไปวางตากแดดในกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (ภาพที่ 25) ซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องกระจกใส มีพัดลมระบายอากาศในเวลากลางวัน เนื่องจากใช้ระบบ Solar cell โดยจะทิ้งไว้ให้ตัวอย่างตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยภายในกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ในแต่ละวันของ
ช่วงเวลาที่ศึกษา แสดงดังในภาพที่ 26



ภาพที่ 25 แสดงกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่บรรจุชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต



ภาพที่ 26 แสดงลักษณะของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในแต่ละวัน ของเดือนมกราคม-เมษายน พ.ศ. 2553 ภายในกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุคอมพอสิตของไม้ยางพาราและ HDPE

3.3.4.1 ทดสอบหาความต้านทานต่อการดึงยืด (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยความเร็วของการดึงเท่ากับ 5 มม./นาที สำหรับชิ้นงาน HDPE และ MAgPE จะทดสอบ 5 ชิ้นงานและชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตจะทดสอบ 10 ชิ้นงานสำหรับทุกสูตรการผสม จากนั้น

คำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Young's modulus, Tensile strength, และ Ultimate strain ทั้งนี้ จะเก็บตัวอย่างมาทดสอบทุกๆ 1 เดือน

3.3.4.2 ทดสอบหาความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural test) ตามมาตรฐาน ASTM D790 แบบ Three point bending ด้วยความเร็วของหัวกดขึ้นงานเท่ากับ 1.8 มม./นาที ระยะ Span เท่ากับ 60 มม. กดจนกระทั่งถึง 5% Strain สำหรับชิ้นงาน HDPE และ MAgPE จะทดสอบ 5 ชิ้นงานและชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตจะทดสอบ 10 ชิ้นงานสำหรับทุกสูตรการผสม จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Flexural modulus และ Flexural strength ทั้งนี้ ในช่วง จะเก็บตัวอย่างมาทดสอบทุกๆ 1 เดือน

3.3.4.3 ติดตามการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันของวัสดุคอมพอสิตด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยศึกษาในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ 32 Scans และความละเอียด 4 cm^{-1} การทดสอบใช้โหมด Transmittion จะต้องเตรียมสารตัวอย่างบดผสม KBr แล้วอัดให้เป็นแผ่นก่อนการทดสอบ โดยจะเก็บชิ้นงานที่ตากแดดของทุกสูตรการผสมมาทดสอบ ก่อนและหลังการตากแดด

3.3.4.4 วัดค่า Contact angle ของพื้นผิว HDPE MA-HDPE และวัสดุคอมพอสิตในสูตรต่างๆ ด้วยเครื่อง FTA 1000 Drop Shape Instrument โดยทำการหยดน้ำกลั่นลงบนพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตและวิเคราะห์หาค่า Contact angle ด้วยโปรแกรม Fta32 Video software โดยมุมของหยดน้ำเมื่อหยดลงบนชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงไปดังนั้นจะวัดค่าการเปลี่ยนแปลงมุมทุกวินาทีจนครบ 10 วินาที และเฉลี่ยเป็นค่า Contact angle ทดสอบชิ้นงานสูตรละ 2 ชิ้น และชิ้นละ 2 จุด โดยจะเก็บชิ้นงานที่ตากแดดของทุกสูตรการผสมมาทดสอบทุกเดือน

3.3.4.5 วัดสีของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังตากแดดตามระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบทุกเดือน ด้วยเครื่อง Color reader และทำการวัดสีในตู้แสงแบบ Daylight โดยจะติดตามค่าความสว่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่า ΔL^* และการเปลี่ยนแปลงสีด้วยค่า ΔE

3.3.4.6 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ ระหว่างพวงม้ายางพาราและ HDPE ด้วยการนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วตีให้แตกด้วยค้อน หลังจากนั้นจะเคลือบบริเวณรอยแตกของชิ้นงานด้วยทองคำก่อนที่จะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.4.7 ศึกษา %Crystallinity ที่เปลี่ยนแปลงไปของ HDPE ในชิ้นงานทดสอบทุกสูตรการผสมทั้งก่อนและหลังการตากแดดด้วยเทคนิค DSC โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ คือ ศึกษา

ในช่วงอุณหภูมิ 50-160 °C ด้วยอัตราเร็วการให้ความร้อน 10 °C/min และอัตราเร็วการหล่อเย็น 10 °C/min

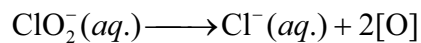
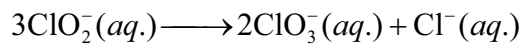
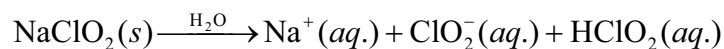
3.3.4.8 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของผงไม้ทั้งก่อนและหลังการกำจัดกลินินและการย้อมสี และศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานทดสอบทั้งก่อนและหลังการตากแดดทุกสูตรการผสมด้วยเครื่อง TGA โดยใช้ช่วงอุณหภูมิการศึกษา 40-700 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min ในบรรยากาศไนโตรเจนที่ป้อนเข้าด้วยอัตรา 20 ml/min

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid Chlorite Treatment

การกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid chlorite treatment เกิดขึ้นจากการสลายตัวของ NaClO_2 ในสารละลายกรด ตามกลไกการสลายตัวที่แสดงไว้ในภาพที่ 27 จะทำให้ได้ก๊าซ Chlorine dioxide (ClO_2) ที่ละลายในน้ำ ซึ่งจะไปออกซิไดซ์ลิกนินในผงไม้ยางพาราอย่างรุนแรง รวมทั้งไปฟอกสีของผงไม้ยางพาราให้ขาวขึ้น แต่ ClO_2 เป็นแก๊สพิษที่ระเบิดได้และมีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงมาก ดังนั้นในกระบวนการกำจัดลิกนินด้วยกระบวนการนี้ต้องมีการควบคุมสภาวะที่เหมาะสม โดยการสลายตัวของ NaClO_2 นั้นขึ้นกับค่า pH เป็นหลัก ถ้าหากค่า pH ต่ำมาก คือ 1-2 จะเกิดก๊าซ ClO_2 อย่างรวดเร็วและเป็นอันตรายได้ โดยค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดลิกนิน จะอยู่ที่ pH 3-4 ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยการเติมสารละลายบัฟเฟอร์ เช่น Acetic acid เป็นต้น [29,30]



ภาพที่ 27 แสดงกลไกการแตกตัวของ NaClO_2 ในสารละลาย

4.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดลิกนินออกจากผงไม้ยางพารา

4.1.1.1 ปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98

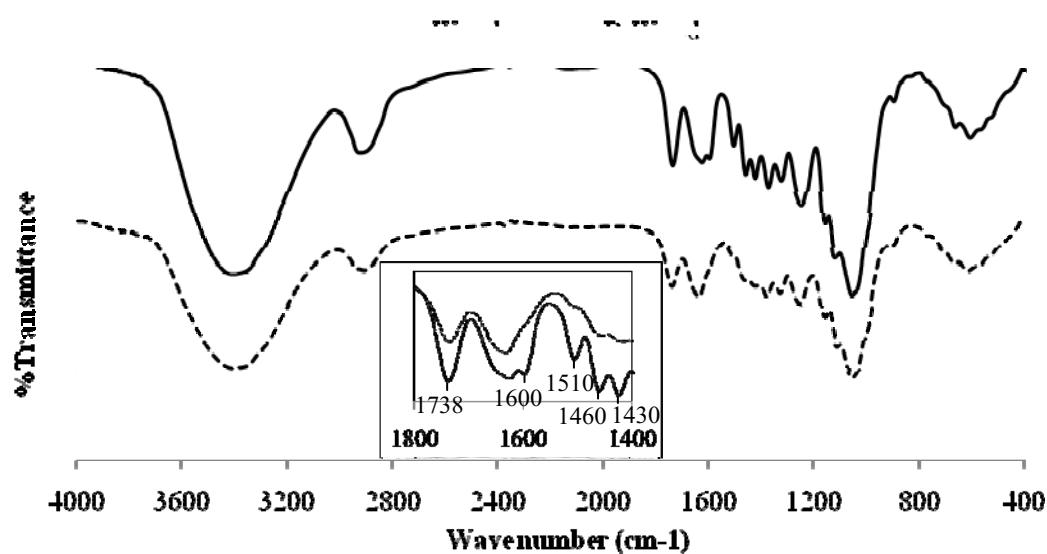
จากข้อมูลในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าร้อยละของ Klason lignin (ลิกนินที่ไม่ละลายในกรด อ้างอิงจากมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98) ของผงไม้ยางพาราเริ่มต้น มีอยู่ประมาณ 26 wt% ขององค์ประกอบไม้ทั้งหมด เมื่อกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid chlorite treatment เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจะทำให้ปริมาณของ Klason lignin ลดลงไปถึง 60% และยังใช้เวลาในการกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid chlorite treatment นานขึ้นจะยิ่งลดปริมาณของ Klason lignin แต่จะเริ่มคงที่เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 8 ชั่วโมงเป็นต้นไป ดังนั้น เวลาที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ใช้เวลาในการกำจัดลิกนินเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งจะสามารถกำจัดลิกนินได้ 71.57% แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาก็คือเซลล์ulosบางส่วนจะถูกทำลายไป [24] ซึ่งมีผลต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุ

คอมพอสิตที่เตรียมได้โดยจะกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 6 แสดงร้อยละของ Klason lignin และของลิกนินที่ถูกกำจัดที่เวลาเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

Reaction time (hr)	%Klason lignin	%Removing of lignin
0	26.87	0.00
2	10.74	60.03
4	10.38	61.37
6	10.16	62.19
8	7.64	71.57
12	7.46	72.24

4.1.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้ยางพาราที่กำจัดลิกนิน



ภาพที่ 28 แสดง FTIR spectrum ของผงไม้เริ่มต้น (Wood) และผงไม้ที่กำจัดลิกนิน (D-Wood)

ภาพที่ 28 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้เริ่มต้นและผงไม้ที่กำจัดลิกนิน ด้วยเทคนิค FTIR โดยพีคการดูดกลืนที่เป็นเอกลักษณ์ของลิกนินจะปรากฏที่ wavenumber 1,600-1,450 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของโครงสร้าง Aromatic C=C และที่ wavenumber 1430 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของหมู่ Methoxyl ($-\text{O}-\text{CH}_3$) (อ้างอิงจากตารางที่ 1) สำหรับผงไม้เริ่มต้นจะปรากฏพีคเอกลักษณ์ทั้งสองอย่างเด่นชัด แต่สำหรับผงไม้ที่กำจัดลิกนินแล้วจะพบว่าการลดลงของความเข้ม

ของฟิเคอเอกลักษณ์เหล่านี้ ในการเปรียบเทียบการลดลงของฟิเคอเอกลักษณ์ของลิกนิน ผู้วิจัยได้ทำการ Normalization ความเข้มของฟิเคอด้วยการเทียบกับฟิเคออ้างอิงที่พบการเปลี่ยนแปลงน้อย ได้แก่ ฟิเคอเอกลักษณ์ของ unconjugated $\text{-}\overset{\text{O}}{\text{C}}\text{-}$ ในเฮมิเซลลูโลสที่ wavenumber 1738 cm^{-1} โดยจะเรียกว่าค่าดัชนีลิกนิน (Lignin index) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$\text{Lignin index} = \frac{I_{1510}}{I_{1738}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

ผลจากการทำ Normalization ของผงไม้ที่กำจัดลิกนินและที่ปรับปรุงด้วยการย้อมสีชนิดต่างๆ ทำให้ได้ค่าดัชนีลิกนิน ดังแสดงในภาพที่ 29 จะเห็นได้ว่าหลังการกำจัดลิกนินจะทำให้ปริมาณลิกนินลดลงไปอย่างเด่นชัด โดยมีการลดลงไปประมาณ 70% จากปริมาณลิกนินที่มีอยู่เดิม ซึ่งสอดคล้องกับการหาปริมาณลิกนินตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-98 นอกจากนี้ เมื่อนำผงไม้ยางพาราที่กำจัดลิกนิน (D-Wood) มาย้อมด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ คือ สีไคเร็กซ์ (DR-Wood), รีแอกทีฟ (RT-Wood) และสีจากไม้ฝาง (SP-Wood) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลิกนินใน D-Wood



ภาพที่ 29 แสดงค่าดัชนีลิกนิน (Lignin index) ของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนิน และผงไม้ที่ย้อมสีโดยที่ Wood คือผงไม้เริ่มต้น D-Wood คือผงไม้ที่กำจัดลิกนิน DR-Wood คือ D-Wood ย้อมสีไคเร็กซ์ RT-Wood คือ D-Wood ย้อมสีรีแอกทีฟ และ SP-Wood คือ D-Wood ย้อมสีจากไม้ฝาง

4.2 ประสิทธิภาพการย้อมสีผงไม้ยางพาราที่กำจัดลิกนิน

การย้อมสีผงไม้ยางพาราในงานวิจัยนี้ทำในกระบวนการเช่นเดียวกับการย้อมสีผ้าฝ้าย ลินิน ป่าน หรือเส้นใยอื่นๆ ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ในการย้อมสีชนิดต่างๆ นั้นจะมีการใช้สารช่วยย้อมและสภาวะที่เหมาะสมในการย้อมที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยจึงกำหนดให้กระบวนการย้อมสีของผงไม้ด้วยสีชนิดต่างๆ ทำในสภาวะที่ทำให้เกิดการดูดซับหรือดูด

จับของอนุภาคสีในผงไม้เกิดขึ้นมากกว่าที่ % Dye Absorption มากกว่า 60% ตารางที่ 7 แสดงค่าร้อยละของการดูดซึมสีชนิดต่างๆ ของผงไม้ที่กำจัดลิกนิน จะเห็นได้ว่าผงไม้ที่กำจัดลิกนินแล้วสามารถดูดซับสีโคเร็กซ์ได้ดีมากที่สุด รองลงมาได้แก่สีจากไม้ฝาง และสีที่ผงไม้ดูดซับได้น้อยที่สุดคือ สิริแอกทีฟ

ตารางที่ 7 แสดงค่าร้อยละของการดูดซึมสีชนิดต่างๆ ของผงไม้ที่กำจัดลิกนิน

Dye types	% Dye Absorption
Direct red ($\lambda_{\max} = 519 \text{ nm}$)	88
Reactive red ($\lambda_{\max} = 514 \text{ nm}$)	70
Sappan dye ($\lambda_{\max} = 540 \text{ nm}$)	75

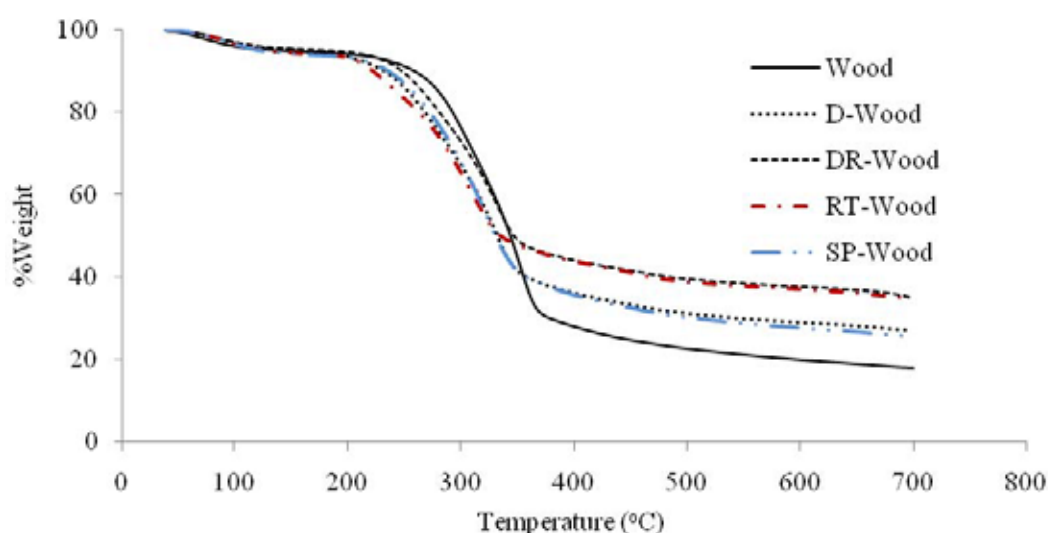
ภาพที่ 30 แสดงสีของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนิน และผงไม้ที่ย้อมสีชนิดต่างๆ จะเห็นว่าหลังจากกำจัดลิกนินออกจากผงไม้ด้วยวิธี Acid chlorite treatment จะทำให้ผงไม้มีสีที่สว่างมากขึ้นกว่าสีผงไม้เริ่มต้น เนื่องจากวิธี Acid chlorite treatment นั้นช่วยกำจัดสารแทรกที่ให้อสีในผงไม้ เมื่อนำผงไม้ที่กำจัดลิกนินไปย้อมสีชนิดต่างๆ ที่ให้สีในโทนสีแดง พบว่าผงไม้ที่ย้อมสีโคเร็กซ์จะมีสีแดงสดและดูสว่างมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจาก % Dye Absorption ที่มากถึง 88% ผงไม้ที่ย้อมสิริแอกทีฟจะให้สีแดงอมน้ำตาลจึงทำให้มีความสว่างของสีที่ลดลง ส่วนผงไม้ที่ย้อมสีจากไม้ฝางจะมีสีน้ำตาลมากกว่าจะให้สีแดง ซึ่งเป็นผลมาจากสีเดิมของน้ำย้อมไม้ฝางจะให้สีแดงคล้ำมากกว่าที่จะเป็นสีแดงสดเหมือนสีสังเคราะห์



ภาพที่ 30 แสดงสีของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนิน และผงไม้ที่ย้อมสีชนิดต่างๆ

4.3 ความเสถียรทางความร้อนของผงไม้ยางพาราและผงไม้ยางพาราที่ย้อมสี

ภาพที่ 31 แสดงผลการทดสอบ TGA ของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนินและผงไม้ที่ย้อมสี จะเห็นได้ว่าผงไม้เริ่มต้นมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวทางความร้อนสูงกว่าผงไม้ที่กำจัดลิกนิน หรือผงไม้ที่ย้อมสี แสดงว่าผงไม้เริ่มต้นมีความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่าผงไม้ที่กำจัดลิกนิน หรือผงไม้ที่ย้อมสี เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เกิดจากเซลลูโลสได้ถูกทำลายไปบางส่วนในระหว่างการกำจัดลิกนินด้วยวิธี Acid Chlorite Treatment [24] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผงไม้ที่ย้อมสีพบว่า DR-Wood มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวทางความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือ SP-Wood ซึ่งมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกันกับ D-Wood สำหรับ RT-Wood จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนก่อนผงไม้ทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการย้อมผงไม้ด้วยสีรีแอคทีฟ ที่ต้องใช้เบส คือ Sodium carbonate เพื่อทำให้น้ำย้อมมีค่า pH เป็นด่าง ทำให้เซลลูโลสเกิดการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Chlorite (ClO_2^-) ที่เกิดขึ้นมากเกินไปในสถานะที่ pH สูงกว่า 7 เป็นตัวเข้าไปทำลายเซลลูโลส [29] สำหรับกระบวนการย้อมสีไคเร็กซ์และสีจากไม้ฝางนั้น อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวทางความร้อนมีค่าสูงกว่าหรือใกล้เคียงกันกับ D-Wood น่าเป็นผลมาจากผงไม้ยางพาราเกิดการบวมตัวจากน้ำและความร้อนที่เข้าไป ทำให้โครงสร้างเซลลูโลสเกิดการจัดเรียงตัวกันได้อย่างมีระเบียบมากยิ่งขึ้นหรือเกิดเมอร์เซอร์เซชัน (Mercerization) จึงทำให้สามารถทนทานต่ออุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย [31]



ภาพที่ 31 แสดงผลการทดสอบ TGA ของผงไม้เริ่มต้น ผงไม้ที่กำจัดลิกนินและผงไม้ที่ย้อมสี

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เหลืออยู่ของผงไม้แต่ละประเภทพบว่า DR-Wood และ RT-Wood จะเหลืออยู่ในปริมาณที่มากที่สุด เป็นผลจากผงสีสังเคราะห์มีความเสถียรทางความร้อนสูงจากการมีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติกจำนวนมากและมีโลหะบางชนิดอยู่ ผงไม้ที่ย้อมสีจากไม้ฝางซึ่งเป็นสีธรรมชาติจะมีค่าเหลืออยู่น้อยและใกล้เคียงกันกับ D-Wood แสดงว่าโครงสร้างของสีธรรมชาติไม่คงทนต่อความร้อนเหมือนสีสังเคราะห์ที่ใช้ และเมื่อพิจารณาผงไม้ที่กำจัดลิกนินเปรียบเทียบกับผงไม้เริ่มต้นพบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เหลือของผงไม้ที่กำจัดลิกนินมีค่าสูงกว่าผงไม้เริ่มต้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการทางเคมีซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดจีเอ็มมากขึ้นและเกล็ดของโซเดียมคลอไรด์ที่เหลืออยู่จากกระบวนการกำจัดลิกนิน โดยข้อดีของการเกิดจีเอ็มมากขึ้นคือตัวมันเองจะต้านทานการติดไฟได้มากขึ้น [23]

ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ TGA ทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ผงไม้เริ่มเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนจึงจะนำไปใช้กำหนดอุณหภูมิของการผสมและขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตโดยอุณหภูมิที่ใช้จะต้องไม่สูงเกินอุณหภูมิที่ผงไม้เริ่มเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อน

4.4 สมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต HDPE ที่ผสมผงไม้และผงไม้ย้อมสีชนิดต่างๆ ในปริมาณ 60 wt% ไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน พบความแตกต่างที่สามารถสังเกตเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงสี และสภาพผิวภายนอก ซึ่งบ่งบอกถึงความเสื่อมสภาพของชิ้นงานได้ ภาพที่ 32 แสดงภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบทุกสูตรทั้งก่อนตากแดดและหลังตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานพลาสติก HDPE และ HDPE ผสม Maleic anhydride graft HDPE (MA-HDPE) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือความสว่างอย่างเด่นชัดเมื่อมองด้วยตาเปล่า ในขณะที่ชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้เริ่มต้น (WPE) เกิดการซีดจางของสีอย่างชัดเจนจากสีน้ำตาลคล้ำไปเป็นสีน้ำตาลอ่อน ชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้ที่กำจัดลิกนิน (D-WPE) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือความสว่างที่ชัดเจนแต่สังเกตเห็นร่องรอยการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวจากเดิมที่เรียบเนียนเป็นผิวที่ขรุขระมากขึ้น ส่วนชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้ที่ย้อมด้วยสียไคเร็กซ์ (DR-WPE) จะสังเกตเห็นการหายไปของสีแดงในเนื้อวัสดุ สังเกตเห็นได้ชัดที่บริเวณผิวชิ้นงานที่ขึ้นภาพแล้วไม่เรียบเนียนในภาพที่ 32 ที่มีสีแดงของผงไม้ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจนสำหรับตัวอย่างก่อนนำไปตากแดด แต่หลังจากเวลาผ่านไป 2 เดือน สีแดงจะเลือนหายไปจนเกือบหมด สำหรับชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้ที่ย้อมด้วยสีรีแอทีฟ (RT-WPE) จะเห็นการซีดจางของสีและการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงมากกว่าชิ้นงานคอมพอสิต WPE และชิ้นงานคอมพอสิตของผง

ไม้ที่เชื่อมด้วยสัรรมชาติจากไม้ฝาง (SP-WPE) พบว่าเนื้อวัสดุให้โทนสีของชิ้นงานที่เข้มกว่าชิ้นงานคอมพอสิตชนิดอื่นและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเพียงเล็กน้อยในระยะเวลา 3 เดือน

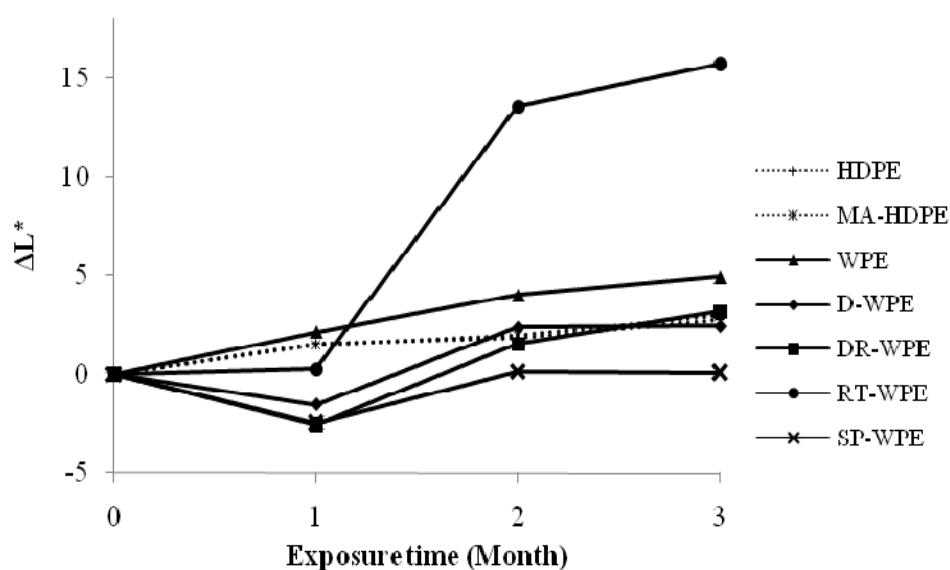


ภาพที่ 32 แสดงภาพถ่ายการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทดสอบทั้งก่อนตากแดดและหลังตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน (จากซ้ายไปขวา) โดยที่ a) HDPE, b) MA-HDPE, c) WPE, d) D-WPE, e) DR-WPE, f) RT-WPE และ g) SP-WPE

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุคอมพอสิต

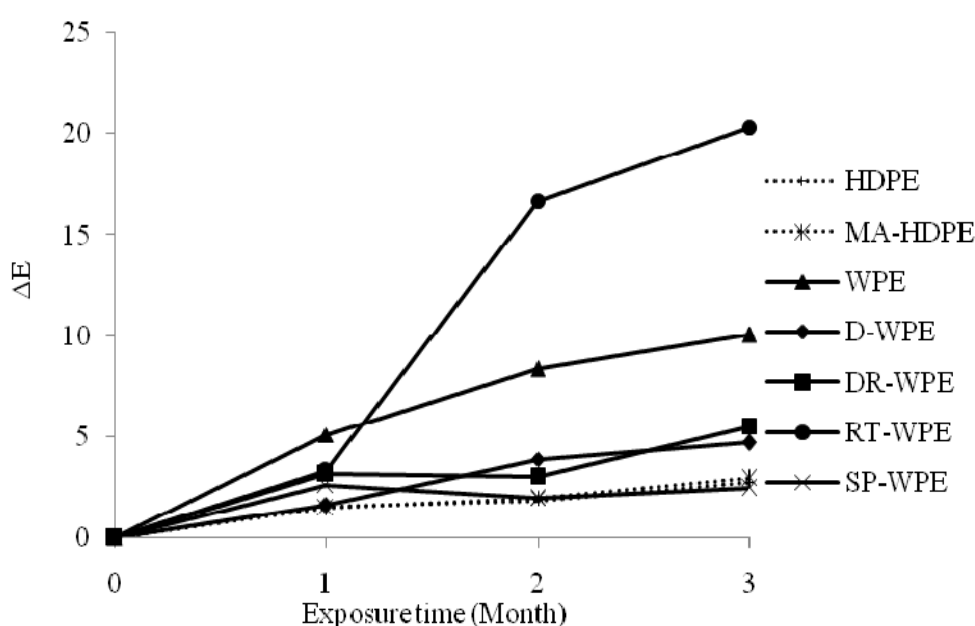
การเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานทดสอบได้ตรวจวัดได้ด้วยเครื่อง Color reader ซึ่งรายงานค่าออกมาเป็นผลต่างของความสว่างของชิ้นงานทดสอบหลังการตากแดดกับก่อนตากแดด (ΔL^*) และค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) ภาพที่ 33 แสดงผลของการตากแดดของวัสดุคอมพอสิต

เป็นเวลา 3 เดือนที่มีต่อค่าความสว่าง โดยพบชิ้นงาน HDPE และ MA-HDPE จะมีค่าความสว่างมากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลที่สั้นลงเหนี่ยวนำให้ความเป็นผลึกของ HDPE เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการทะลุผ่านของแสงทำให้ความโปร่งแสงลดลงซึ่งจะแสงสะท้อนกลับมากขึ้นส่งผลให้ค่า ΔL^* เพิ่มขึ้น สำหรับ WPE เมื่อผ่านการตากแดด สีของชิ้นงานจะมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นหรือสีเกิดการซีดจางลงอย่างชัดเจนและเพิ่มขึ้นไปตามระยะเวลาที่นำไปวางตากแดด ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของลิกนินเมื่อได้รับรังสียูวีจากแสงแดด จะเกิดการสลายตัวแตกออกเป็น Phenoxy radicals ส่งผลให้เกิดสีเหลืองหรือซีดจางไป [6] สำหรับชิ้นงานของ D-WPE พบว่าการตากแดดเป็นเวลา 1 เดือน สีของชิ้นงานกลับเข้มขึ้นเล็กน้อย เหตุผลน่าจะเกิดจากการนำชิ้นงานคอมพอสิตไปวางไว้ในกล่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งภายในกล่องเก็บตัวอย่างมีความชื้นสัมพัทธ์สูงมากในเวลากลางคืน (สูงถึง 85 RH%) จนทำให้ผู้วิจัยสังเกตเห็นหยดน้ำค้างเปียกอยู่บนผิวชิ้นงานในช่วงเช้าของทุกวัน แล้วความร้อนในช่วงเวลากลางวันจะระเหยหยดน้ำเหล่านี้ให้หายไป ความชื้นที่อาจเหลือค้างในชิ้นงานจึงทำให้สีของชิ้นงานมีความเข้มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานคอมพอสิตที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดและเก็บไว้ในห้องปรับอากาศ ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นกับชิ้นงานคอมพอสิต DR-WPE และ SP-WPE ด้วยเช่นกัน เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน ชิ้นงาน D-WPE มีความสว่างเพิ่มมากขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ได้ตากแดดเนื่องจากการสลายตัวของลิกนินที่ยังเหลืออยู่เช่นเดียวกับชิ้นงาน WPE แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่างเกิดขึ้นน้อยกว่าและการซีดจางนี้ไม่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 3 เดือน



ภาพที่ 33 แสดงผลการตากแดดชิ้นงานคอมพอสิตเป็นเวลา 3 เดือน ต่อค่าความสว่างที่เปลี่ยนไป (ΔL^*)

สำหรับชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้ที่ย้อมสีไคเร็กซ์ DR-WPE เกิดการเปลี่ยนแปลงของความสว่างในรูปแบบเดียวกับ D-WPE แต่เกิดขึ้นในระดับที่ต่ำกว่า และชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้ที่ย้อมสีจากไม้ฝาง SP-WPE พบว่าสีของชิ้นงานเข้มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน แต่เมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน ความสว่างของชิ้นงานกลับมาอยู่ในระดับเดียวกับชิ้นงานก่อนตากแดด สำหรับชิ้นงานคอมพอสิตของผงไม้ที่ย้อมสีรีแอคทีฟ RT-WPE พบว่าสีของชิ้นงานซีดจางลงไปอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 2 เดือน แสดงว่าสภาวะการย้อมสีรีแอคทีฟที่มีการใช้เบสช่วยเร่งให้ผงไม้เกิดการเสื่อมสภาพด้วยแสงได้รวดเร็วมากขึ้น



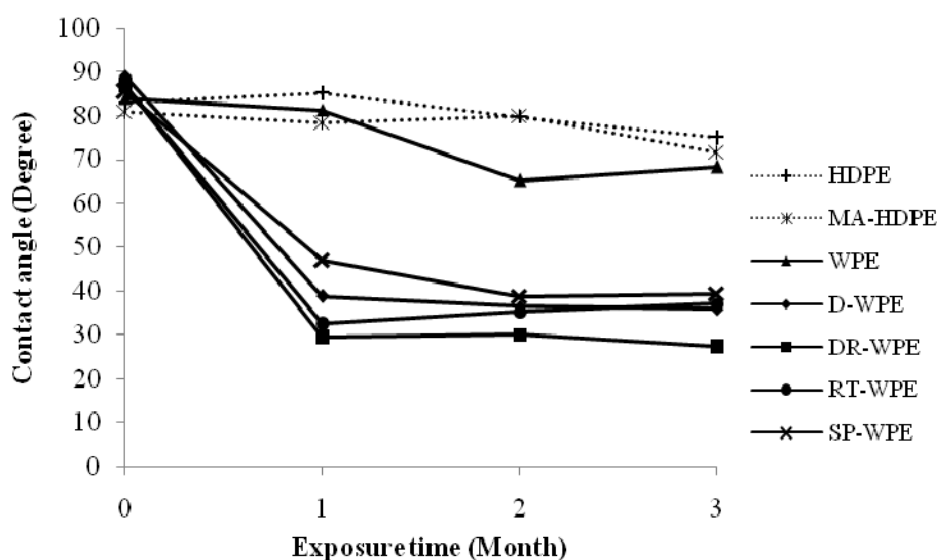
ภาพที่ 34 แสดงผลการตากแดดชิ้นงานคอมพอสิตเป็นเวลา 3 เดือน ต่อค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE)

ภาพที่ 34 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ของชิ้นงานคอมพอสิตในสูตรต่างๆ โดยพบว่าชิ้นงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมากที่สุด คือ RT-WPE ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างรวดเร็วและสูงมากกว่า D-WPE เป็นผลมาจากการหายไปของอนุภาคสีที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานเมื่อดูดซับกับการได้รับความชื้นสูงในเวลากลางคืน ประกอบการสลายตัวด้วยแสงของผงไม้ที่เกิดได้รวดเร็วมากขึ้นจากความอ่อนแอของเซลล์ลูลิซของผงไม้ที่ย้อมสี ซึ่งได้ยืนยันจากผลการศึกษาทางความร้อนที่ลดลงมากที่สุดจากการทดสอบ TGA เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผงไม้ที่กำจัดกลิ่นแล้วย้อมสีไคเร็กซ์และสีจากไม้ฝาง ซึ่งมีความเสถียรทางความร้อนใกล้เคียง พบว่าชิ้นงานของ SP-WPE เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยที่สุด น่าจะเป็นผลมาจากการยึดเกาะของอนุภาคสีจากไม้ฝางกับผงไม้ที่เกิดได้ดีมากกว่าสีไคเร็กซ์ที่เกิดการแพร่ออกไปเมื่อเวลาผ่านไป

4.4.2 ค่าการเปียกผิวของวัสดุคอมพอสิตเมื่อผ่านการตากแดดนาน 3 เดือน

ภาพที่ 35 ค่า Contact angle ของวัสดุคอมพอสิตทั้งก่อนและหลังการตากแดดนาน 3 เดือนจะเห็นได้ว่าทั้งพลาสติก HDPE และ MA-HDPE มีสภาพเคมีของพื้นผิวเป็นแบบไม่มีขั้ว เมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน ค่า Contact angle มีค่าลดต่ำลงหรือมีสภาพพื้นผิวมีความเป็นขั้วสูงขึ้น เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา Photo-oxidation บนพื้นผิว ซึ่งยืนยันจากการมีหมู่ Carbonyl เพิ่มขึ้นของพลาสติกจากการศึกษา FTIR รวมทั้งสภาพพื้นผิวของ HDPE และ MA-HDPE อาจเกิดรอยแตกเล็กๆ หรือมีผิวหยาบมากขึ้น [31]

สำหรับชิ้นงานคอมพอสิตที่ผสมผงไม้ทุกชนิด สภาพพื้นผิวยังคงแสดงความไม่มีขั้วใกล้เคียงกับชิ้นงานพลาสติก แสดงถึงสภาพพื้นผิวของตัวอย่างคอมพอสิตจากการฉีดจะมีพลาสติกเคลือบผิวภายนอกเป็นส่วนใหญ่ [1] สำหรับชิ้นงานคอมพอสิตจากการผสมผงไม้เริ่มต้น (WPE) เมื่อนำไปตากแดดจะมีการลดลงของค่า Contact angle อย่างเด่นชัดรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของพื้นผิวที่ทำให้ผิวมีความหยาบมากขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานที่ผสมผงไม้ที่กำจัดลิกนิน หรือนำไปย้อมสีไปตากแดด จะพบว่าการลดลงของค่า Contact angle อย่างรวดเร็ว แสดงถึงความมีขั้วที่สูงมากขึ้นของพื้นผิว เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของพื้นผิวจากแสงแดดที่ทำให้พื้นผิวมีความหยาบมากขึ้น [32] ทำให้อนุภาคของผงไม้ที่กำจัดลิกนินซึ่งทำให้มีปริมาณเซลลูโลสเข้มข้นมากขึ้น รวมทั้งอนุภาคของสีย้อมและเกลือที่ใช้ในกระบวนการย้อมสามารถหลุดออกมาที่พื้นผิวมากขึ้น ดังนั้น สภาพพื้นผิวจึงสามารถดูดซับน้ำได้ดีมากขึ้น

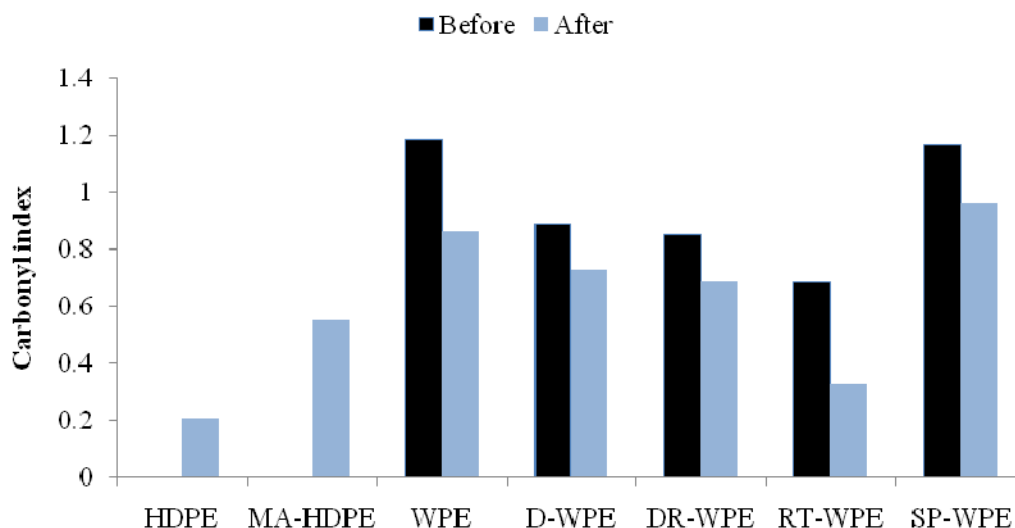


ภาพที่ 35 แสดงค่า Contact angle ของวัสดุคอมพอสิต ทั้งก่อนและหลังการตากแดดนาน 3 เดือน

4.5 การเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

ภาพที่ 40 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของ HDPE และ MA-HDPE ทั้งก่อนและหลังตากแดด พบพีกของหมู่คาร์บอนิลในช่วง $1780-1700\text{ cm}^{-1}$ หลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน แต่พีกที่เกิดขึ้นชัดเจนที่สุดคือพีก 1713 cm^{-1} ของ Carboxylic acid ซึ่งเกิดจากผลของการตัดสายโซ่ของ HDPE [20] ส่งผลให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กที่ผิวของ HDPE หรือ MA-HDPE ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ในการพิจารณาถึงการเกิด Carboxylic acid เพื่อเปรียบเทียบกันจะต้องทำการ Normalization เป็นค่า Carbonyl index คือเทียบพีกที่ประมาณ 1713 cm^{-1} กับพีกอ้างอิงที่ 722 cm^{-1} การสั่นของ $-\text{CH}_2-$ ซึ่งพบทุกครั้งและมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ค่า Carbonyl index หาจากสมการที่ 2

$$\text{Carbonyl index} = \frac{I_{1713}}{I_{722}} \quad \text{สมการที่ 2}$$

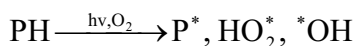


ภาพที่ 36 แสดงค่า Carbonyl index ของชิ้นงานทดสอบทุกสูตร ทั้งก่อน (Before) และหลัง (After) การตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

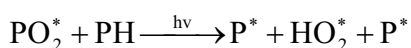
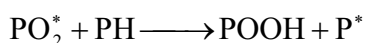
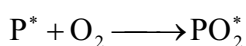
จากภาพที่ 36 แสดงว่า MA-HDPE เกิดการเสื่อมสภาพจากแสงแดดมากกว่า HDPE เมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน เนื่องจากการเสื่อมสภาพของ HDPE ทำให้ค่า Carbonyl index เพิ่มขึ้น จากกลไกการเสื่อมสภาพจากแสงแดดของ HDPE จะเหนี่ยวนำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลดังภาพที่ 37 และภาพที่ 38 กลไกการเสื่อมสภาพจากแสงแดดของ HDPE ตามแบบ Norrish type I และ Norrish type II ซึ่งหมู่คาร์บอนิลจะเหนี่ยวนำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลหรือการเชื่อมขวาง [33] แต่สำหรับวัสดุคอมพอสิตในสูตรต่างๆ จะไม่สามารถใช้ค่า Carbonyl index รายงานการเกิด Carboxylic acid ได้ เพราะพีกในช่วง 1713 cm^{-1} เป็นช่วงที่แสดงเอกลักษณ์ของ $-\text{C}(=\text{O})-$ จากเฮมิ

เซลลูโลส (ประมาณ 1738 cm^{-1}) ซึ่งไปบดบังพีคของ Carboxylic acid แต่จะสามารถบอกได้ว่าเฮมิเซลลูโลสเสื่อมสภาพไปเนื่องจากแสงแดดเพราะมีการลดลงของ Carbonyl index เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสได้เสื่อมสภาพไป [11] ซึ่งพบว่า RT-WPE มีการลดลงของ Carbonyl index อย่างเห็นได้ชัดคือลดลง 51.69% บอกได้ว่าการใช้เบสในสภาวะการย้อมสีเป็นตัวเร่งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเสื่อมสภาพจะสามารถเกิด Free radical และการแตกออกของสายโซ่โมเลกุลได้ง่ายเมื่อรับพลังงานจากแสงแดด เมื่อเปรียบเทียบ WPE และ D-WPE พบว่า WPE มีการลดลงของ Carbonyl index 27.25% ขณะที่ D-WPE ลดลง 18.25% แสดงถึงเสถียรภาพจากแสงแดดของผงไม้ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อกำจัดลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ดูดกลืนรังสียูวีและทำให้เกิดการเสื่อมสภาพจากแสงแดด เมื่อพิจารณา DR-WPE และ SP-WPE มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Carbonyl index เป็น 19.65 และ 17.91% ตามลำดับ ดังนั้นการย้อมสีด้วยสีไครเร็กซ์ไม่ช่วยต้านทานการเสื่อมสภาพของผงไม้จากแสงแดดโดยเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Carbonyl index สูงกว่า D-WPE และการย้อมสีจากไม้ฝางมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Carbonyl index ต่ำกว่า D-WPE เพียงเล็กน้อยกล่าวคือมันช่วยเพิ่มเสถียรภาพจากแสงแดดของผงไม้ได้เล็กน้อย ภาพที่ 41 เปรียบเทียบผลการตากแดดของ WPE พบว่าพีค FTIR เอกลักษณะของลิกนินที่ $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ หายไปเมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน แสดงถึงลิกนินมีการเสื่อมสภาพไปนั่นเองและเช่นเดียวกับ D-WPE และวัสดุคอมพอสิตที่ย้อมสีต่างๆ ลิกนินที่เหลืออยู่ก็เสื่อมสภาพไป เนื่องจากลิกนินดูดกลืนพลังงานของรังสียูวีจนกระทั่งมีพลังงานเพียงพอที่จะแตกพันธะทางเคมีได้ กลไกการสลายตัวของไม้จากแสงแดดและออกซิเจนเมื่อไม้ดูดกลืนแสงยูวีจะทำให้เกิด Free radical เมื่อได้รับออกซิเจนและน้ำทำให้เกิด Hydroperoxide (ROOH) ซึ่งทั้ง Free radical และ Hydroperoxide เป็นตัวเริ่มทำให้เกิดการตัดสายโซ่และการเสื่อมสภาพของไม้ดังภาพที่ 39

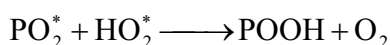
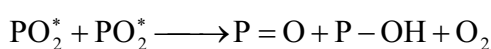
Initiation



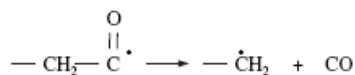
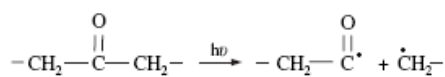
Propagation



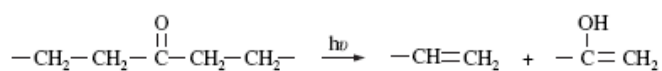
Termination



ภาพที่ 37 แสดงกลไกการออกซิเดชันของพอลิเมอร์จากแสงแดด (ให้ P คือ HDPE) [11]

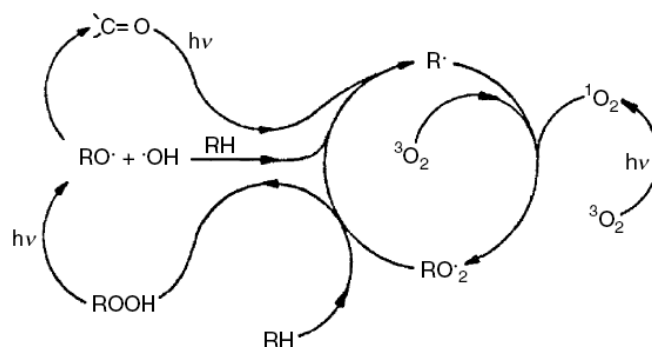


Norrish I

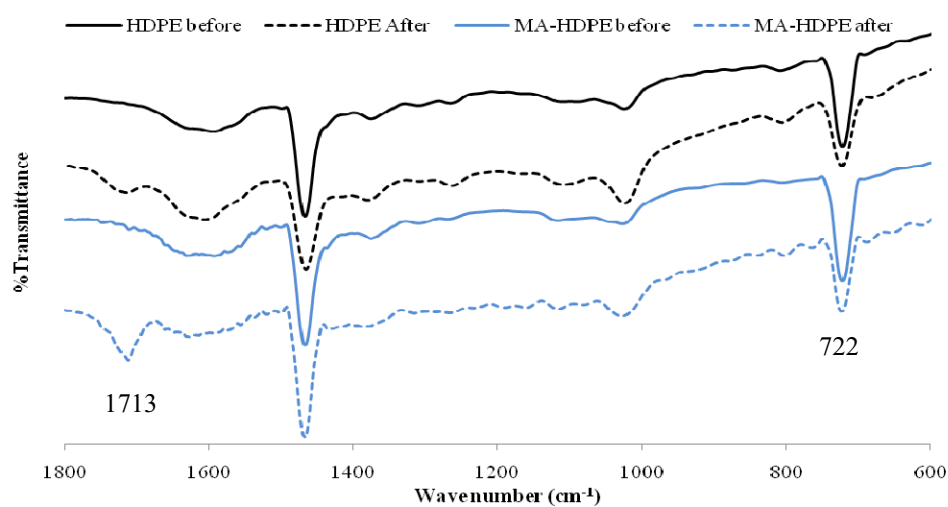


Norrish II

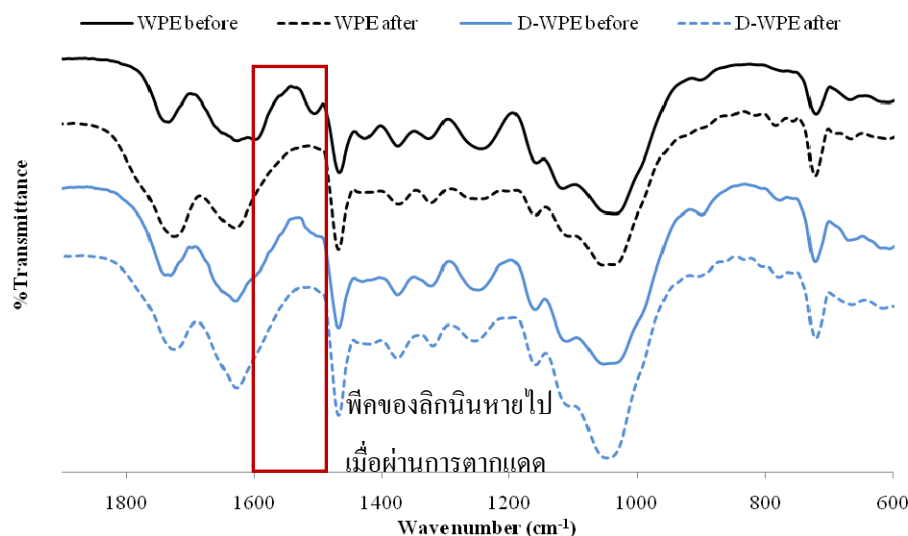
ภาพที่ 38 แสดงกลไกการเสื่อมสภาพจากแสงแดดแบบ Norrish type I และ type II ของ HDPE [33]



ภาพที่ 39 แสดงกลไกการเสื่อมสภาพของไม้ในส่วนของสารประกอบ $-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-$ ในเฮมิเซลลูโลสเมื่อได้รับแสงแดด [11]



ภาพที่ 40 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของ HDPE และ MA-HDPE ก่อน (before) และหลังการตากแดด (after) เป็นเวลา 3 เดือน



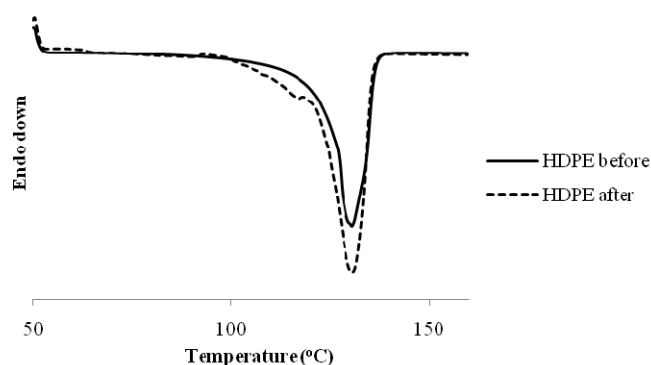
ภาพที่ 41 แสดงผลการทดสอบ FTIR ของ WPE และ D-WPE ก่อน (before) และหลังการตากแดด (after) เป็นเวลา 3 เดือน

4.6 สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

4.6.1 ค่าความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิต

ภาพที่ 42 แสดงให้เห็นว่า HDPE เมื่อผ่านการตากแดดเป็นระยะเวลา 3 เดือนจะทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นประมาณ 35% จากก่อนตากแดด เนื่องจาก HDPE ได้รับพลังงานและมีเวลาที่ยาวนานพอให้สายโซ่โพลิเอทิลีนของมันจัดเรียงตัวกันอย่างอิสระ อีกทั้งสายโซ่โพลิเอทิลีนมีขนาดสั้นลง การเกี่ยวพันกันของสายโซ่โพลิเอทิลีน (Entanglement) ในส่วน Amorphous น้อยลงทำให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลิเอทิลีนเป็นได้ง่าย ดังนั้น ส่วนของผลึกจึงไปแทนที่ส่วนของ Amorphous การที่สายโซ่โพลิเอทิลีนมีขนาดสั้นลงนั้นเกิดจากการออกซิเดชันจากแสงแดดเป็นผลให้เกิดการตัดสายโซ่โพลิเอทิลีนตามกลไกแบบ Norrish type I และ type II [34] ผลคือสมบัติเชิงกลจะลดต่ำลงซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป ค่าความเป็นผลึกของ MA-HDPE มากกว่า HDPE แสดงว่า Maleic anhydride graft HDPE (MAPE) ที่ใช้ในการทดลองนี้มีสมบัติทำให้ HDPE เกิดผลึกได้มากขึ้นอาจเกิดจากค่าความหนืดของ HDPE แตกต่างจาก MAPE มาก คือ 20 และ 2 กรัมต่อ 10 นาที่ ตามลำดับ MAPE ที่หนืดกว่าจะถูกดึงยืดจากแรงเฉือนในกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มให้สายโซ่โพลิเอทิลีนมาจัดเรียงตัวเป็นผลึก กล่าวคือตัวที่หนืดกว่าทำหน้าที่เป็นส่วนผลึก Shish และให้สายโซ่โพลิเอทิลีนมาจัดเรียงตัวเป็นส่วนผลึก Kebab ได้ [35] จากตารางที่ 8 พบว่าความเป็นผลึกของชิ้นงานทดสอบทุกๆ สูตรเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านการตากแดด สำหรับวัสดุคอมพอสิตเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของผลึกจะต่ำกว่า HDPE และ MA-HDPE เนื่องจากองค์ประกอบของผงไม่ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงแดดได้ ทำให้

MA-HDPE มีการเสื่อมสภาพจากแสงแดดลดลง ดังนั้น HDPE ของวัสดุคอมพอสิตจึงมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของผลึกน้อยกว่า HDPE และ MA-HDPE เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบวัสดุคอมพอสิตพบว่า WPE มีการเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึกต่ำที่สุดเนื่องจากมีองค์ประกอบของลิกนินที่ดูดกลืนแสงยูวีได้ดีทำให้ HDPE ใน WPE มีการเสื่อมสภาพจากแสงแดดต่ำที่สุด หลังจากการกำจัดลิกนินพบว่าความเป็นผลึกของ HDPE ใน D-WPE มีการเพิ่มขึ้นอย่างมากแสดงว่าเมื่อขาดองค์ประกอบหลักที่ดูดกลืนแสงยูวีทำให้ HDPE ได้รับพลังงานจากแสงแดดมากขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่า WPE หลังจากการย้อมสีด้วยสีไดเร็กซ์และสีจากไม้ฝางพบว่าค่าความเป็นผลึกของ HDPE ในวัสดุคอมพอสิตทั้งคู่มีการลดลงจาก D-WPE แสดงให้เห็นว่าสีทั้งสองสามารถดูดกลืนแสงยูวีได้ช่วยให้ HDPE ไม่ต้องรับพลังงานโดยตรง แต่ RT-WPE หลังการตากแดดมีการเพิ่มขึ้นของความเป็นผลึกถึง 23.49 % บอกได้ว่า RT-WPE ช่วยลดการเสื่อมสภาพจากแสงแดดของ HDPE ได้เพียงเล็กน้อย แต่หากพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE หลังการตากแดดของ RT-WPE จะเห็นว่ามีค่าสูงที่สุดคือ 83.57 % แสดงให้เห็นการเสื่อมสภาพของ HDPE มากที่สุดทำให้ RT-WPE เปราะแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงจากภายนอก

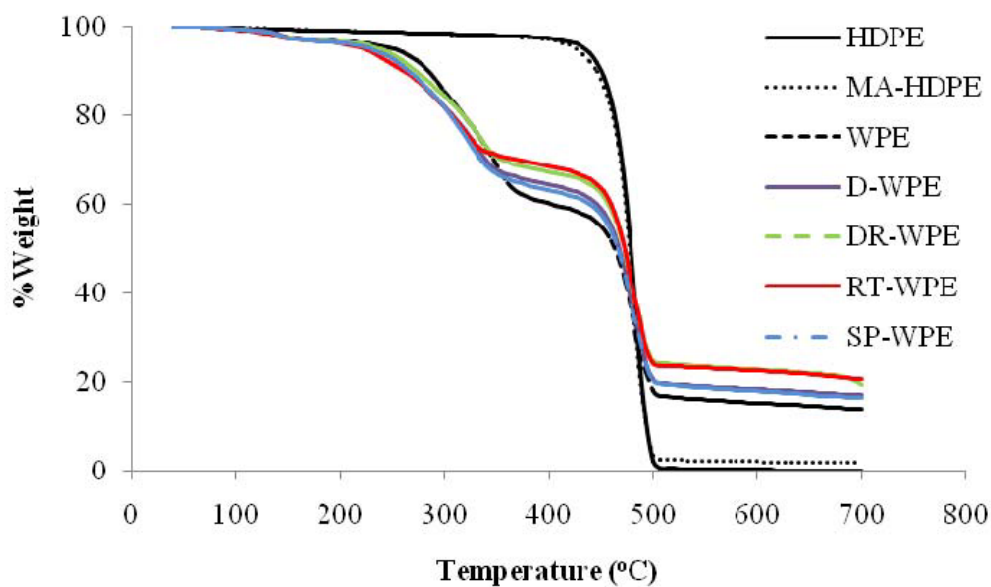


ภาพที่ 42 แสดงผลการทดสอบ DSC ของ HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

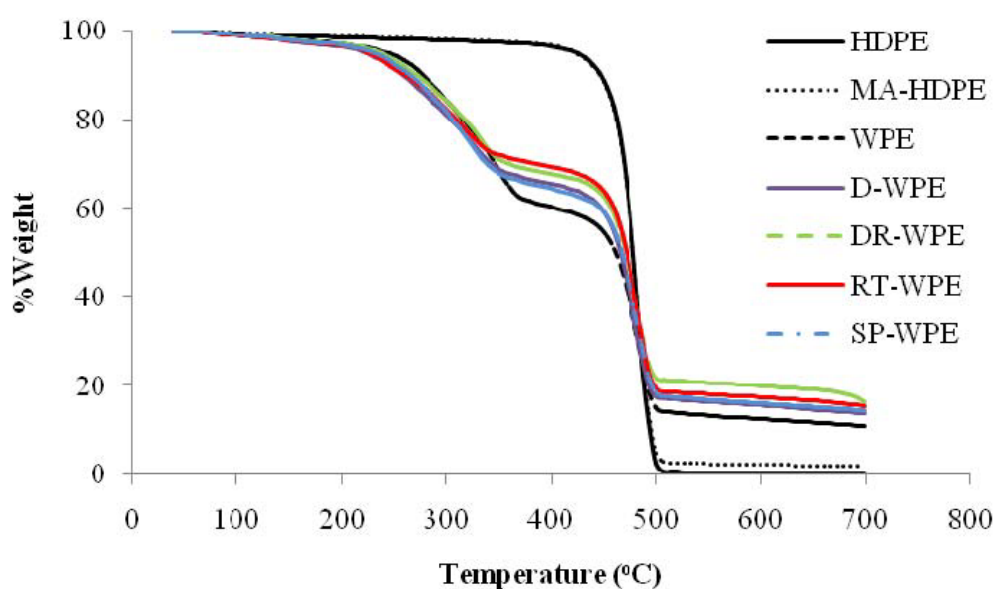
ตารางที่ 8 ค่าความเป็นผลึกของชิ้นงานทดสอบ

Sample	%Crystallinity		
	Before	After	%Increase
HDPE	48.97	66.20	35.19
MA-HDPE	54.69	71.40	30.56
WPE	63.94	72.54	13.45
D-WPE	62.63	79.52	26.98
DR-WPE	63.43	75.85	19.59
RT-WPE	67.67	83.57	23.49
SP-WPE	62.38	74.30	19.11

4.6.2 ความเสถียรทางความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์



ภาพที่ 43 แสดงผลการทดสอบ TGA ของชิ้นงานทดสอบก่อนการตากแดด



ภาพที่ 44 แสดงผลการทดสอบ TGA ของชิ้นงานทดสอบหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

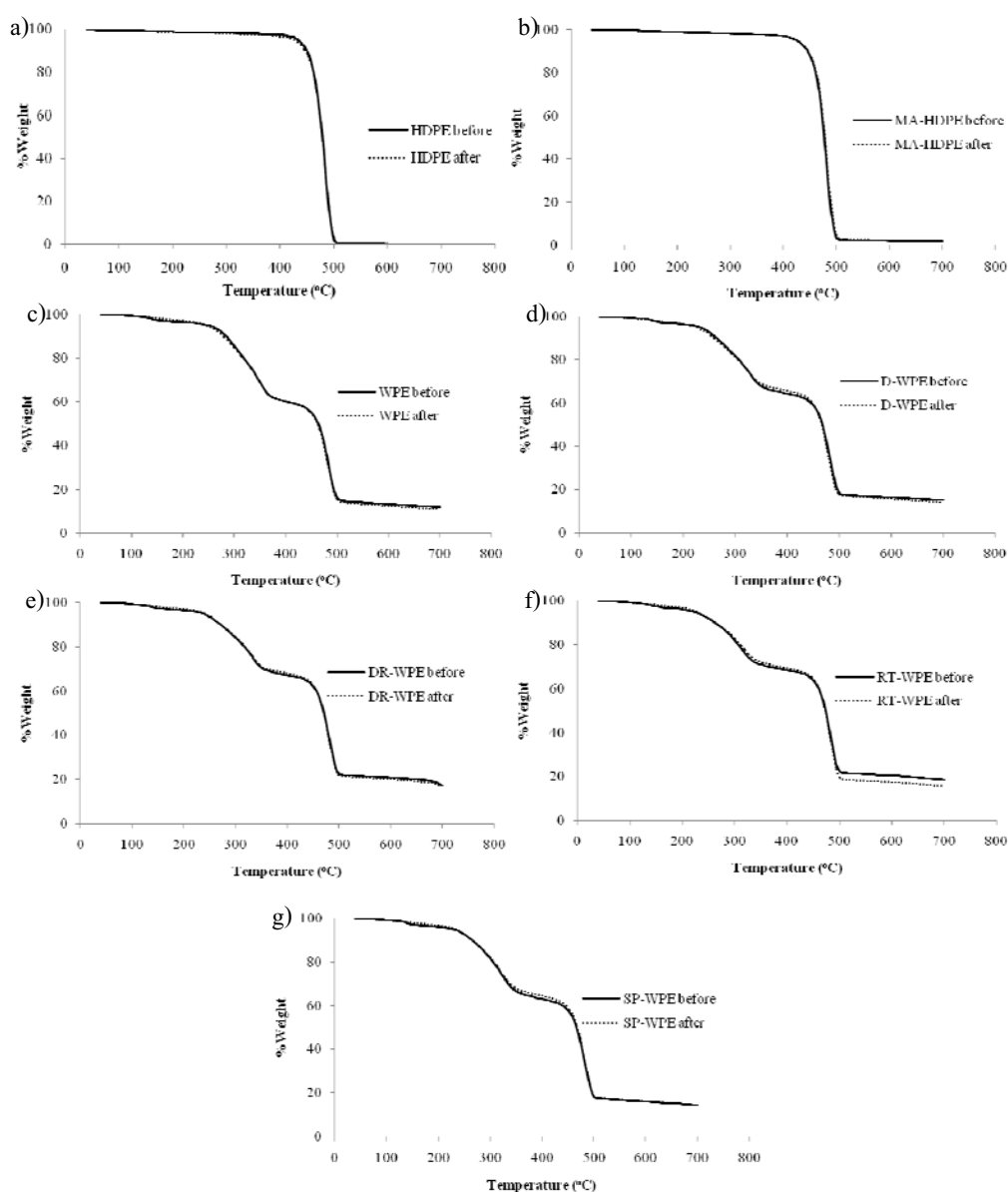
ภาพที่ 43 แสดงผลการทดสอบ TGA ของชิ้นงานทดสอบก่อนการตากแดดพบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์มีแนวโน้มเหมือนกับผงไม้ก่อนการขึ้นรูป กล่าวคือ การสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์ในช่วงแรก เป็นการสลายตัวที่เกิดจากผงไม้ซึ่ง WPE

มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงที่สุด ตามด้วย DR-WPE, SP-WPE, D-WPE และ RT-WPE ตามลำดับ เหตุผลได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.3 แต่เนื่องจากมีเฟสของ MA-HDPE อยู่ในวัสดุคอมพอสิตทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวประมาณ 462 °C และกากของแข็งที่เหลือ (Residue) เป็นแนวโน้มเดียวกับการทดสอบ TGA ของผงไม้ในหัวข้อ 4.3 สำหรับภาพที่ 44 เป็นผลการทดสอบ TGA ของชิ้นงานทดสอบหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของวัสดุคอมพอสิตมีความแตกต่างกับหลังตากแดดเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 45 โดยที่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการเสื่อมสภาพมีแนวโน้มที่ลดต่ำลงเนื่องจากทั้งผงไม้และพลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพจากแสงแดด และเมื่อพิจารณาที่ Residue พบว่า RT-WPE มี Residue ลดลง 16% หลังจากการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน แสดงให้เห็นว่าสรีรเอกทีฟที่มีความเสถียรภาพทางความร้อนสูงนั้นได้หายไปในช่วงการตากแดด จากภาพที่ 32 (f) สนับสนุนเหตุการณ์นี้ คือสีที่ผิวของวัสดุคอมพอสิตซีดจางลงไปเนื่องจากการสูญเสียส่วนของสรีรเอกทีฟไปจากสถานะการตากแดดนั่นเอง สำหรับวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆ จะมีการลดลงของเปอร์เซ็นต์กากของแข็งที่เหลืออยู่ไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์ เรียงลำดับการลดลงของเปอร์เซ็นต์กากของแข็งจากมากไปน้อยได้ดังนี้ RT-WPE, WPE, D-WPE, DR-WPE และ SP-WPE โดยที่ SP-WPE ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่เลย

ตารางที่ 9 อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว อุณหภูมิสลายตัวสูงสุด อุณหภูมิหยุดสลายตัวและเปอร์เซ็นต์กากของแข็งที่เหลืออยู่ ของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

Sample		Onset (°C)		Inflection point (°C)		Endset (°C)		%Residue	
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
HDPE		463.36	463.12	484.01	482.6	494.55	494.98	0	0
MA-HDPE		461.03	462.53	480.89	482.86	493.43	494.83	1.85	1.98
WPE	1 st	287.36	284.15	349.05	348.66	363.99	364.65	12.01	10.98
	2 nd	463.94	462.3	484.05	482.55	495.38	494.95		
D-WPE	1 st	262.05	255.42	327.75	325.2	347.06	345.36	15.05	13.88
	2 nd	461.05	458.92	482.52	480.39	494.12	492.4		
DR-WPE	1 st	269.45	268.77	332.46	332.88	349.37	348.13	17.39	16.56
	2 nd	461.58	460.49	482.39	482.17	493.87	493.61		
RT-WPE	1 st	254.55	253.05	313.96	317.43	334.64	337.85	18.64	15.58
	2 nd	462.29	462.06	482.45	482.29	493.77	493.89		
SP-WPE	1 st	264.73	262.02	319.85	319.96	342.85	341.97	14.47	14.47
	2 nd	461.22	461.08	482.33	482.1	494.33	494.14		

หมายเหตุ 1st การสลายตัวครั้งที่ 1, 2nd การสลายตัวครั้งที่ 2

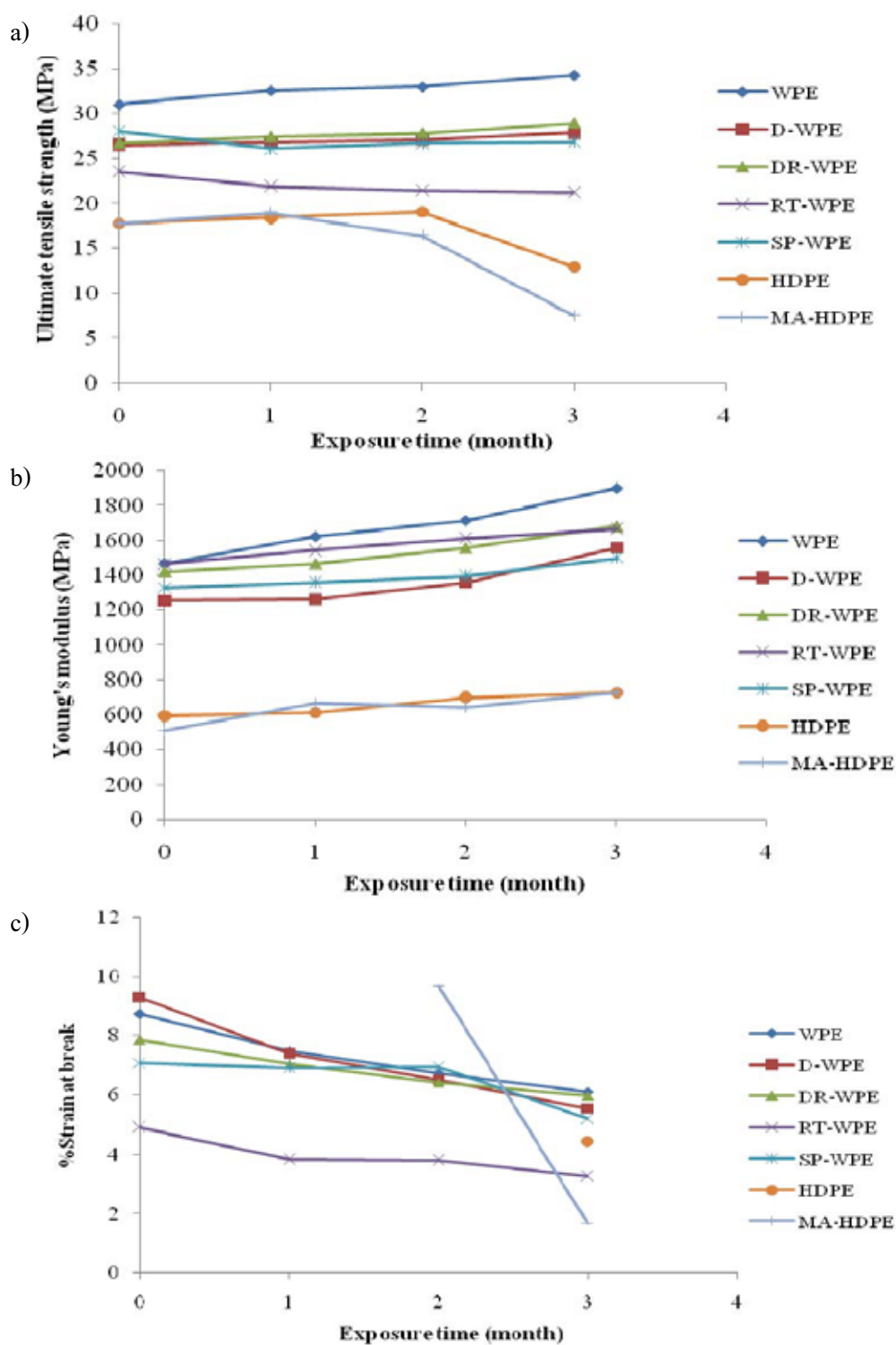


ภาพที่ 45 แสดงผลการทดสอบ TGA ของวัสดุคอมพอลิติก่อนและหลังการตากแดด โดยที่ a) HDPE b) MA-HDPE c) WPE d) D-WPE e) DR-WPE f) RT-WPE และ g) SP-WPE

4.7 สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอลิติก่อนนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

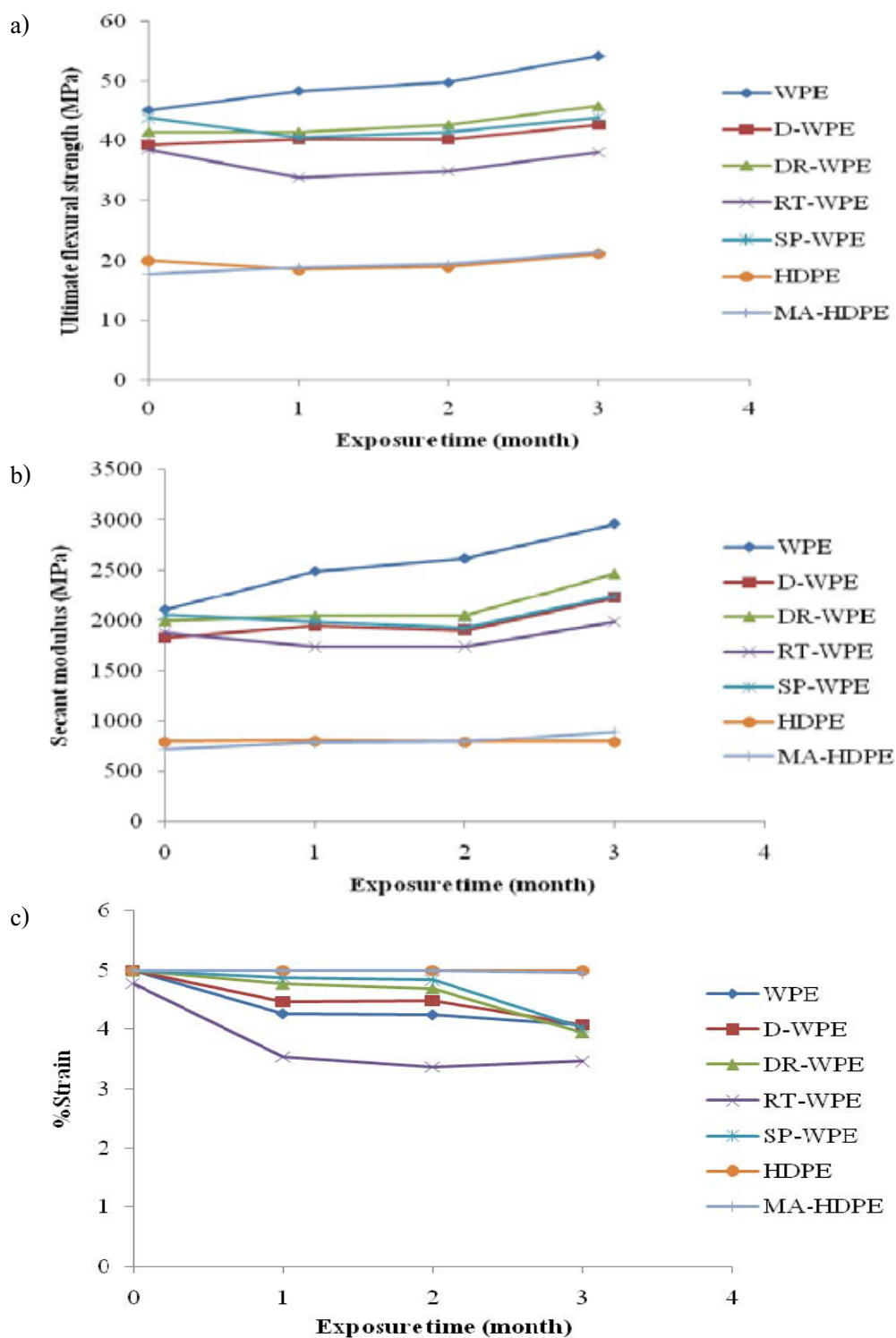
สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบเมื่อผ่านการตากแดดจะรายงานเป็นค่า Ultimate tensile strength (TS), Young's modulus (YM) และ %Strain at break ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน ผลคือเมื่อผ่านการตากแดดจะทำให้ค่า %Strain at break ของทุกๆ ชิ้นงานทดสอบมีค่าลดลงเพราะสายโซ่โมเลกุลของ HDPE สั่นลงความเป็นผลึกสูงมากขึ้นส่งผลให้สมบัติของชิ้นงานทดสอบมีความแข็งแรงมากขึ้น (ค่า TS และ YM สูงขึ้น) พิจารณาค่า %Strain at break

ของ MA-HDPE ในเดือนที่ 3 พบว่าขาดออกที่ 1.68 %Strain จากเดิมที่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวสูง กล่าวคือหลังจุดคราก (Yield point) สามารถดึงยืดได้อีกมากทำให้เกิด Necking การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบมากขึ้นและยืดได้อีกจนกระทั่งสู่ระยะการดึงของเครื่องมือ แสดงให้เห็นว่าแสงแดดทำให้ HDPE และ MA-HDPE เกิดการออกซิเดชันและเสื่อมสภาพไปอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบค่า %Strain at break ของ MA-HDPE กับ HDPE พบว่าที่ผ่านการตากแดด 3 เดือน MA-HDPE แตกที่ระยะยืดสั้นกว่า HDPE แสดงว่า MAPE เร่งให้เกิดการตัดสายโซ่มากขึ้นนั่นเอง เช่นเดียวกับผล DSC จะเห็นค่าความเป็นผลึกของ MA-HDPE สูงกว่า HDPE เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตเทียบกับ MA-HDPE พบว่า %Strain at break ของวัสดุคอมพอสิตมีอัตราการลดลงช้ากว่า MA-HDPE แสดงถึงผงไม้ช่วยบดบังไม่ให้ MA-HDPE รับแสงแดดโดยตรง สมบัติเชิงกลของ WPE สูงที่สุดเนื่องจากเซลลูโลสไม่ได้ถูกทำลายต่างจากวัสดุคอมพอสิตอื่นๆ ซึ่งเซลลูโลสถูกทำลายขณะกระบวนการกำจัดลิกนิน เมื่อพิจารณาผลของการย้อมสีเทียบกับ D-WPE พบว่า DR-WPE มีค่า TS และ YM สูงกว่า D-WPE ในทุกช่วงเวลาการตากแดด เป็นผลจากผงไม้ที่ผ่านกระบวนการย้อมสีไคเร็กซ์จะเกิดการ Mercerization ดังที่ได้กล่าวในส่วนของการเสถียรภาพทางความร้อนของผงไม้แต่ละชนิดโดยจะทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงขึ้นทำให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น แต่ผลจากการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟจะได้ผลตรงกันข้ามดังที่เคยกล่าวไว้แล้วว่าเซลลูโลสถูกทำลายไปมากขึ้นเนื่องจากเบสที่เติมลงไปในขณะที่ย้อม ผลคือ %Strain at break และ TS จะลดต่ำลงมาก และค่า YM สูง บ่งบอกถึงสภาพวัสดุคอมพอสิตเป็นแบบแข็งเปราะ อีกทั้งสีจางลงอย่างรวดเร็วที่สุด ดังนั้นพอจะบอกได้ว่าการย้อมด้วยสีรีแอคทีฟไม่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ สำหรับ SP-WPE ค่า TS เริ่มต้นสูงกว่าและ %Strain at break ต่ำกว่า D-WPE แสดงให้เห็นว่าการย้อมสีจากไม้ผงช่วยทำให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงมากกว่า D-WPE เหตุผลเช่นเดียวกับ DR-WPE แต่เมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา 2 เดือน พบว่าค่า YM และ %Strain at break มีค่าไม่ต่างจากค่าเริ่มต้นนัก แต่ค่า TS ลดต่ำลงเล็กน้อย แสดงถึงความเสถียรต่อแสงในช่วง 2 เดือนแรกได้ดี แต่เมื่อผ่านไปเดือนที่ 3 จะเห็นว่าค่า YM สูงขึ้นและ %Strain at break ต่ำลง บอกลถึงการเสื่อมสภาพ แต่อย่างไรก็ดี เหตุผลหลักของการเสื่อมสภาพในเดือนที่ 3 ของวัสดุคอมพอสิตเกิดจาก MA-HDPE ที่เสื่อมสภาพไปอย่างมากในเดือนที่ 3 นั่นเอง ซึ่งค่า %Strain at break ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตทุกสูตรบอกว่าผงไม้ช่วยดูดกลืนแสงยูวีได้และชะลอการเสื่อมสภาพของ MA-HDPE ได้บางส่วน ผลการทดสอบ Flexural testing ก็ได้ผลที่สามารถสนับสนุนกับ Tensile testing ได้ดีคือผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 46 แสดงสมบัติ Tensile ของชิ้นงานทดสอบเมื่อตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน โดยที่

a) Ultimate tensile strength, b) Young's modulus, และ c) %Strain at break



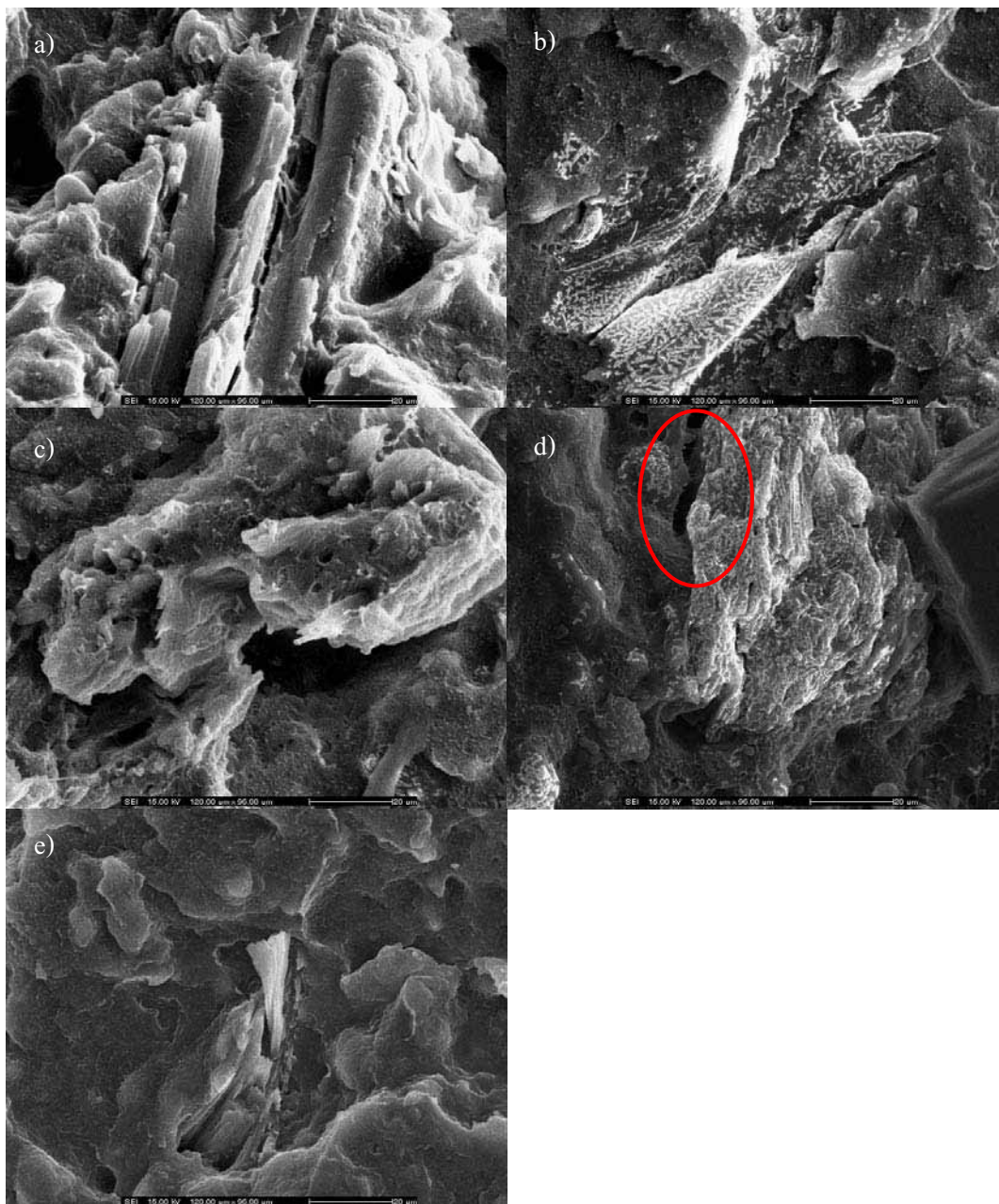
ภาพที่ 47 แสดงสมบัติ Flexural ของชิ้นงานทดสอบเมื่อตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน โดยที่
a) Ultimate flexural strength, b) Secant modulus, และ c) %Strain

ภาพที่ 47 แสดงผลการทดสอบ Flexural ของชิ้นงานทดสอบทุกๆ สูตร เมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน พบว่าเมื่อผ่านการตากแดดแล้วค่า Ultimate flexural strength (FS) และ Secant modulus (SM) มีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นแต่ค่า %Strain จะลดต่ำลง กล่าวคือชิ้นงานทดสอบทุกๆ สูตรมีความแข็งแรงเปราะมากขึ้นเนื่องจากการออกซิเดชันจากแสงแดดแต่ตัวที่เสื่อมสภาพมากที่สุดสำหรับวัสดุคอมพอสิตในชุดการทดลองนี้คือ RT-WPE มีความเปราะมากที่สุดและสีของชิ้นงานซีดขาวเร็วที่สุด สำหรับสมบัติเชิงกลนั้น DR-WPE มีความแข็งแรงมากที่สุดและ SP-WPE แสดงค่า %Strain at break ไม่ลดลงมากนักในช่วง 2 เดือนแรก เมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตในทุกสูตร แต่ DR-WPE มีข้อเสียที่สี เมื่อผ่านการตากแดดเป็นระยะเวลา 3 เดือน สีของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า SP-WPE เนื่องจากสีไดเร็กซ์สามารถแพร่ออกมาที่ผิว เมื่อโดนน้ำและแสงแดดบ่อยๆ จนสีเสื่อมสภาพและเปลี่ยนสีไปสังเกตได้จากภาพที่ 48 เปรียบเทียบด้านที่โดนแสงแดดของชิ้นงาน DR-WPE พบว่าสีแดงของสีไดเร็กซ์เปลี่ยนแปลงไปทำให้สีจางลง (ค่า ΔL^* ในภาพที่ 33) แต่ด้านหลังของชิ้นงานที่ไม่โดนแสงแดดจะยังคงเห็นสีแดงจากสีไดเร็กซ์แสดงให้เห็นผลกระทบของแสงแดดต่อสีไดเร็กซ์ได้อย่างชัดเจนเสมือนกับสีของผ้าเมื่อตากแดดนานจะสีซีดจางลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับ SP-WPE สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนจะต่ำกว่า DR-WPE เล็กน้อย แต่สีจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตอื่นๆ



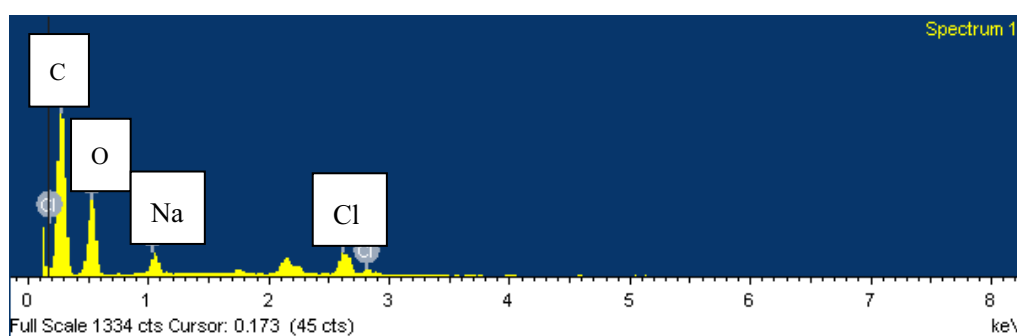
ภาพที่ 48 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของ DR-WPE ก่อนตากแดดและหลังตากแดดเป็นเวลา 3 เดือนซึ่งด้านซ้ายมือสุดคือ DR-WPE ก่อนตากแดด ไปทางขวามือสุดคือชิ้นงานที่ตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือนตามลำดับ โดยพิจารณาด้านที่รับแสงแดด (ชิ้นงานขวามือ) เทียบกับชิ้นงานทดสอบที่ไม่ได้รับแสงแดด (ชิ้นงานซ้ายมือ)

4.8 โครงสร้างพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน



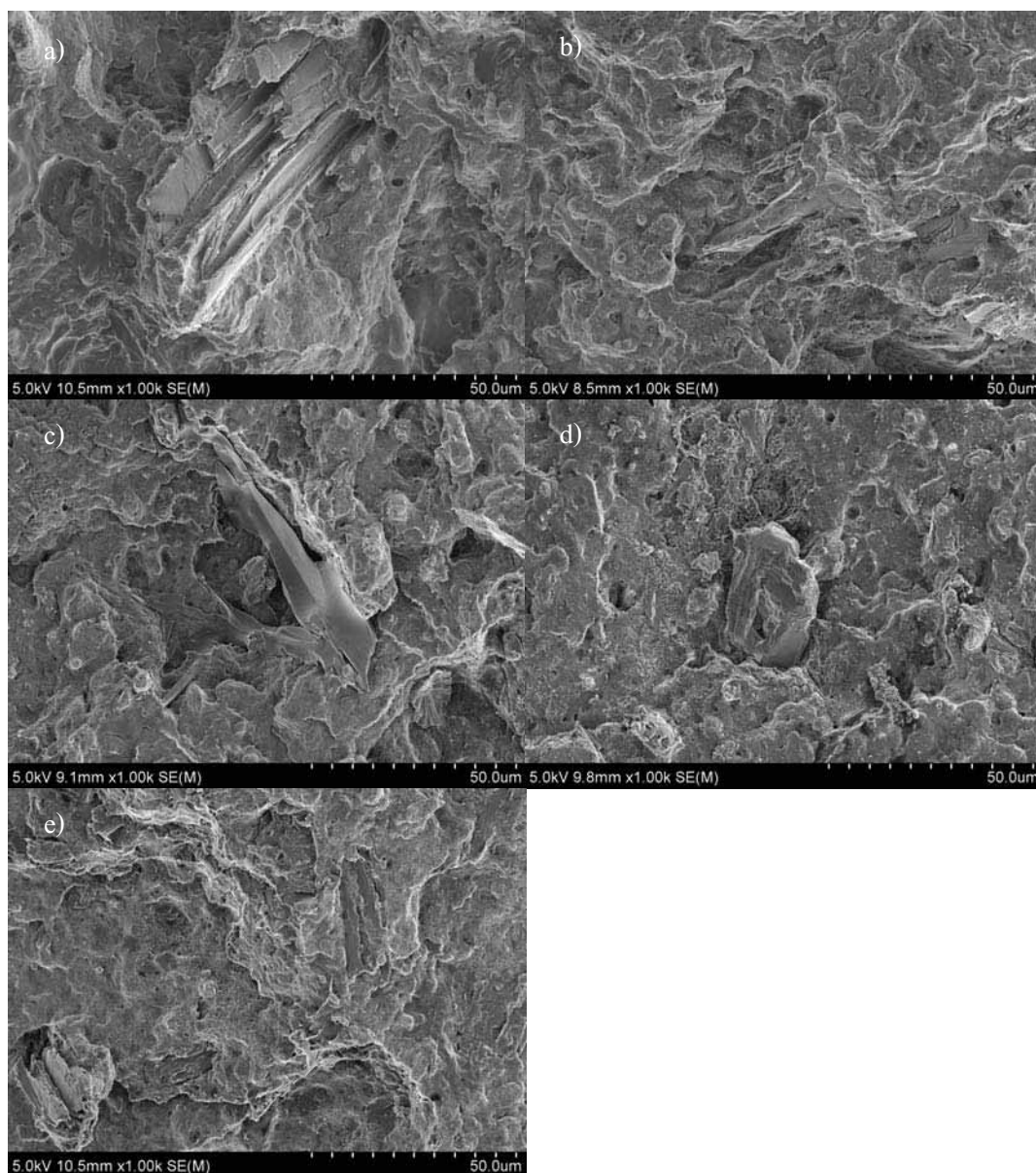
ภาพที่ 49 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติการตัดโค้งที่หักหลังจุ่มในโตรเจนเหลวของวัสดุคอมพอสิตสูตรต่างๆ ก่อนตากแดด ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่ง a) WPE, b) D-WPE, c) DR-WPE, d) RT-WPE และ e) SP-WPE

ภาพที่ 49 แสดงให้เห็นลักษณะพื้นฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิตพบว่าผงไม่มีการกระจายตัวที่ดีและเข้ากันได้ดีกับเนื้อ HDPE ที่มี MAPE ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารประสานกุ่มบ แต่สำหรับชิ้นงาน RT-WPE จะเห็นช่องว่างระหว่าง HDPE กับผงไม่ เป็นจุดเริ่มเริ่มต้นของการแตกหักได้ง่ายส่งผลให้ค่า %Strain at break ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่น ภาพที่ 49 (b) และ (d) แสดงให้เห็นว่ามีผลึกของเกลือโซเดียมเคลือบอยู่บริเวณผิวของผงไม่ ซึ่งเกิดจากกระบวนการกำจัดลิกนินที่ยังคงเหลือธาตุ Na และ Cl อยู่ ภาพที่ 50 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย SEM โหมด Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ยืนยันว่าผลึกเกลือที่เห็นเป็นของธาตุ Na และ Cl ทำให้สรุปได้ว่าเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการย้อมสีรีแอคทีฟและที่ยังตกค้างจากการกระบวนการกำจัดลิกนิน

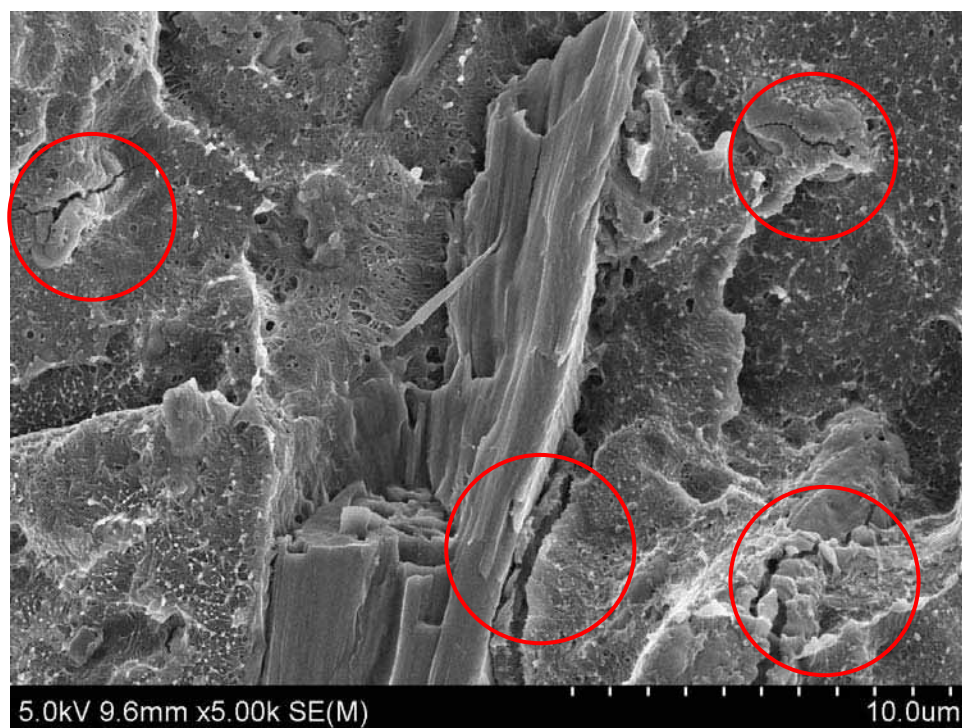


ภาพที่ 50 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณผลึกเกลือบนผงไม่ด้วยเทคนิค SEM-EDS

เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพ SEM ของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังทำการตากแดดพบว่าลักษณะพื้นฐานวิทยาของไม้หลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน จะแห้งมากขึ้นซึ่งแสดงถึงไม่เกิดการเสื่อมสภาพจากแสงแดด สำหรับความเข้ากันได้ของผงไม่อย่างพาราและ HDPE จะไม่เห็นความแตกต่างจากก่อนตากแดดที่กำลังขยาย 1000x แต่ถ้าเพิ่มกำลังขยายไปมากขึ้นเป็น 5000x จะพบรอยแตกบนชิ้นไม้ [11] และเฟสของ HDPE ดังแสดงในภาพที่ 52 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานลดต่ำลงนั่นเอง แต่จะไม่พบเกลือของโซเดียมเหลืออยู่เนื่องจากผ่านสภาวะที่มีความชื้นและแสงแดดเป็นเวลา 3 เดือน ทำให้ผลึกเกลือดังกล่าวถูกชะล้างออกไปได้มาก



ภาพที่ 51 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติการดัดโค้งที่หักหลังจุ่มในโครเจนเหลวของวัสดุคอมพอสิตสูตรต่างๆ หลังตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ซึ่ง a) WPE, b) D-WPE, c) DR-WPE, d) RT-WPE และ e) SP-WPE



ภาพที่ 52 แสดงภาพ SEM บริเวณหน้าตัดที่หักชิ้นงานหลังจุ่มไนโตรเจนเหลวของชิ้นงาน RT-WPE ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอสิต HDPE กับผงไม้ข้อมสี้ ซึ่งจะศึกษาอิทธิพลของการกำจัดลิกนิน และชนิดของสีย้อมที่ใช้ ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดเมื่อผ่านการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน ได้ผลดังนี้

จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดลิกนินออกจากผงไม้ยางพาราได้ประมาณ 71% จากปริมาณลิกนินเริ่มต้น ด้วยวิธี Acid chlorite treatment แต่ผลเสียที่ตามมาคือเซลลูโลสบางส่วนจะถูกทำลายไปทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดต่ำลงจากผงไม้ยางพาราเริ่มต้น หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบ สีของชิ้นงานทดสอบจะเข้มขึ้นและเมื่อนำไปตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและสีโดยรวมจะน้อยเมื่อเทียบกับ WPE แต่เสถียรภาพทางความร้อน Ultimate tensile strength (TS) และ Young's modulus (YM) ต่ำกว่า WPE เนื่องจากเซลลูโลสถูกทำลายไปบางส่วน แต่ค่า %Strain เพิ่มมากขึ้น แสดงถึงความยืดหยุ่นที่เพิ่มมากขึ้นของวัสดุคอมพอสิต

ผลจากการย้อมสีย้อมสี้ไคเร็กซ์ช่วยให้ไม้ที่กำจัดลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบและตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน การเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและสีโดยรวมจะน้อยกว่า WPE แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและสีโดยรวมมากกว่าวัสดุคอมพอสิตที่ไม่ผ่านการกำจัดลิกนิน (D-WPE) เล็กน้อยในช่วงเดือนที่ 3 แต่หากใช้เวลากตากแดดมากกว่า 3 เดือน ความสว่างและสีโดยรวมมีแนวโน้มจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้นไปอีก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าวัสดุคอมพอสิตที่ไม่ผ่านการย้อมสีย้อมสี้ไคเร็กซ์ (DR-WPE) มีค่า TS และ Young's modulus สูงกว่า D-WPE ในทุกช่วงเวลากตากแดด เนื่องจากเกิดการ Mercerization ในระหว่างกระบวนการย้อมสีย้อมสี้ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงขึ้น แต่ปัญหาของสีย้อมสี้ไคเร็กซ์คือเมื่อกตากแดดไประยะเวลาหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉดสีอย่างชัดเจนสังเกตได้จากภาพถ่ายของชิ้นงานด้านที่ตากแดดเทียบกับด้านที่ไม่ตากแดด

ผลจากการย้อมสีย้อมสี้รีแอคทีฟทำให้ไม้ที่กำจัดลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำลง เกิดจากเซลลูโลสถูกทำลายมากขึ้นเนื่องจากเบสที่เติมเข้าไปในระหว่างกระบวนการย้อม หลังจากผ่าน

กระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบและตากแดดเป็นเวลา 3 เดือนพบว่า ความสว่างและสีโดยรวมของชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากที่สุด แสดงถึงการหายไปของสีเมื่อได้รับแสงแดดและความชื้น จากผลของ Carbonyl index แสดงให้เห็นการเสื่อมสภาพของไม้เนื่องจากหมู่ -C=O- ของเอมิเซลลูโลสถูกทำลายเมื่อได้รับแสงแดดไปมากที่สุด ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นค่า Young's modulus สูงขึ้นแต่ Ultimate tensile strength (TS) และ %Strain at break ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ D-WPE บอกลักษณะสมบัติของวัสดุที่แข็งแรงแต่เปราะมาก

ผลการย้อมสีจากไม้ผงทำให้ไม้ที่กำจัดลิกนินมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบและตากแดดเป็นเวลา 3 เดือนพบว่า ความสว่างและสีโดยรวมของชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยที่สุดบอกลักษณะความคงทนของสีจากแสง ผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลบอกลักษณะสมบัติเชิงกลไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับก่อนตากแดดในช่วงเวลา 2 เดือนแรก แต่เมื่อเข้าสู่เดือนที่ 3 สมบัติเชิงกลจะลดลงอย่างมากเนื่องมาจากพลาสติก HDPE เกิดการเสื่อมสภาพที่เวลาการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือนนั่นเอง

จากผลการทดสอบ FTIR และสมบัติเชิงกลบอกลักษณะให้ทราบว่า HDPE และ MA-HDPE เกิดการออกซิเดชันจากแสงแดดมากกว่าวัสดุคอมพอสิตเนื่องจากผงไม้ในวัสดุคอมพอสิตช่วยดูดกลืนยูวีไม่ให้ HDPE ต้องรับยูวีโดยตรง และสมบัติเชิงกลของ MA-HDPE ลดลงอย่างรวดเร็วในเดือนที่ 2 และ 3 ทำให้วัสดุคอมพอสิตเมื่อเข้าสู่เดือนที่ 3 สมบัติเชิงกลจะลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าการย้อมสีธรรมชาติจากไม้ผงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมน้อยที่สุดและสมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างจากการย้อมสีไคเร็กซ์นัค ดังนั้นในการใช้งานวัสดุคอมพอสิตภายนอกอาคารควรเลือกการย้อมสีธรรมชาติเพื่อเพิ่มความคงทนของสีจากแสงให้กับวัสดุคอมพอสิต

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การกำจัดลิกนินจากผงไม้ยางพาราด้วยวิธี Acid chlorite แม้จะกำจัดลิกนินได้จริงแต่เซลลูโลสถูกทำลายไปบางส่วนทำให้สมบัติของวัสดุคอมพอสิตต่ำลง ดังนั้นจึงควรลดเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากำจัดลิกนินลงเหลือ 2 ชั่วโมง หรือควรเปลี่ยนวิธีการกำจัดลิกนิน

5.2.2 ควรศึกษาสีธรรมชาติชนิดอื่นๆ ต่อไปเพื่อให้ได้เฉดสีที่หลากหลายมากขึ้นและอาจพบสีที่มีความเสถียรต่อแสงแดดมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรทำการวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกเพื่อเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสภาพไปของพลาสติกในวัสดุคอมพอสิตได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2.4 ควรวัดค่าน้ำหนักของชิ้นงานก่อนการตากแดดเทียบกับหลังการตากแดด เพื่อให้ทราบถึงน้ำหนักที่หายไป จะสามารถอธิบายการเสื่อมสภาพจากแสงแดดได้ดีขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ธนดล สัตตบงกช. "ไม้ประกอบและไม้ประกอบพลาสติก." **ศักยภาพของป่าไม้ต่อการฟื้นฟูเศรษฐกิจไทย** (2546) : 247-255.
- [2] วิจิต สุวรรณปรีชา. **ไม้ยางพาราทดแทนไม้ป่าจากธรรมชาติ** [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤษภาคม 2550. เข้าถึงจาก http://www.rubber.co.th/knowledge_1v.html.
- [3] Amornchote, P., and others. "Study on Utilization Potential of Wood Waste from Rubberwood Industry" **ศักยภาพของป่าไม้ต่อการฟื้นฟูเศรษฐกิจไทย** (2546) : 183-192.
- [4] วิชาการดอทคอม. **มีเศษไม้ปึกไม้ ขี้เลื่อย จีบ รวมเดือนละ 50 ตัน จะสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวลได้ไหม** [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 1 พฤษภาคม 2551. เข้าถึงจาก <http://www.vcharkarn.com/vcafe/143066>.
- [5] บริษัท ศาลา-ท่าน้ำ จำกัด. **คิดค้นไม้พลาสติกจากเศษไม้ประยุกต์ใช้งานสารพัดประโยชน์** [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2552. เข้าถึงจาก http://www.sala-tanum.com/highlight/wood_plastic.html.
- [6] George, B., and others. "Photodegradation and Photostabilisation of Wood - the State of the Art." **Polymer Degradation and Stability** 88, 2 (2005) : 268-274.
- [7] Czajkowski, W., and Paluszkiewicz, J. "Synthesis of Bifunctional Monochlorotriazine Reactive Dyes Increasing Uv-Protection Properties of Cotton Fabrics." **FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe** 16, 5 (2008) : 122-127.
- [8] Saravanan, D. "UV Protection Textile Materials." **AUTEX Research Journal** 7, 1 (2007) : 53-62.
- [9] Morán, J., and others. "Extraction of Cellulose and Preparation of Nanocellulose from Sisal Fibers" **Cellulose** 15, 1 (2008) : 149-159.
- [10] Buranapa Group Co., Ltd. **ไม้ยางพารา** [Online]. Accessed 2009. Available from http://buranapagroup.com/rubber_wood.pdf.
- [11] Rowell, R. **HANDBOOK OF WOOD CHEMISTRY AND WOOD COMPOSITES**. Florida : CRC Press, 2005.
- [12] วิมลรัตน์ ศรีจิรัสสิน. **เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ : บริษัท คราฟแมนเนพลส จำกัด, 2550.
- [13] Feng, W., Nansheng, D., and Helin, H. "Degradation Mechanism of Azo Dye C. I. Reactive Red 2 by Iron Powder Reduction and Photooxidation in Aqueous Solutions." **Chemosphere** 41, 8 (2000) : 1233-1238.

- [14] Li, S.Y., Tai, L.J., and Bo, B. "TiO₂-Assisted Photodegradation of Direct Blue 78 in Aqueous Solution in Sunlight." **Water, Air, & Soil Pollution** (2010) : n. pag.
- [15] มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒน์ โครงการจัดตั้งศูนย์วิจัยและการจัดการความรู้ทางพฤกษศาสตร์. ฝาง [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2552. เข้าถึงจาก http://bot.swu.ac.th/upload/meattree_document/1229050189.pdf.
- [16] สมุนไพรไทยและพื้นบ้านล้านนา. ฝาง [ออนไลน์]. เข้าถึงเมื่อ 2547. เข้าถึงจาก <http://203.114.105.84/virtual/Physicals/www.thaimedicinalplant.com/popup/fang.html>.
- [17] Kyu, L.D., and others. "Fabrication of Nontoxic Natural Dye from Sappan Wood." **Korean Journal of Chemical Engineering** 25, 2 (2008) : 354-358.
- [18] พลอย เหลืองไฟโรจน์. "การพัฒนาผ้ามาตรฐานสีธรรมชาติเพื่อการทดสอบความคงทนต่อแสงสำหรับผ้าทอพื้นเมืองข้อมสีธรรมชาติ." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย ศิลปากร, 2550.
- [19] Forest Products Laborator. "Wood-Plastic Composite." **Techline** 4, 1 (2004) : 1-2.
- [20] Ndiaye, D., and others. "Durability of Wood Polymer Composites: Part 1. Influence of Wood on the Photochemical Properties." **Composites Science and Technology** 68, 13 (2008) : 2779-2784.
- [21] La Mantia, F.P., and Morreale, M. "Accelerated Weathering of Polypropylene/Wood Flour Composites." **Polymer Degradation and Stability** 93, 7 (2008) : 1252-1258.
- [22] Beg, M.D.H., and Pickering, K.L. "Accelerated Weathering of Unbleached and Bleached Kraft Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites." **Polymer Degradation and Stability** 93, 10 (2008) : 1939-1946.
- [23] Morán, J., and others. "Extraction of Cellulose and Preparation of Nanocellulose from Sisal Fibers." **Cellulose** 15, 1 (2008) : 149-159.
- [24] Ahlgren, P.A., and Goring, D.A.I. "Removal of Wood Components During Chlorite Delignification of Black Spruce." **Canadian journal of chemistry** 49 (1971) : 1272-1275.
- [25] Abidi, N., Hequet, E.F., and Abdalah, G. "Cotton Fabric and Uv-Protection." **Proceedings of the Beltwide Cotton Conference** 2 (2001) : 1301-1303.
- [26] "Tappi Standard T 222 Om-98. Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp." (1998).
- [27] "Tappi Standard T 264 Om-88. Preparation of Wood for Chemical Analysis." (1988).

- [28] ปาเจรา พัฒนถาบุตร, นิสารัตน์ ทวีวรรณและวัลลภเกอ์ รอสบาต. "การลดปริมาณสารช่วยยิดชนิดโลหะในการย้อมผ้าไหมด้วยสีธรรมชาติ โดยเทคนิคการสร้างสารอนินทรีย์ชั้นบาง" วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์ 2, 1 (2546) : 73-89.
- [29] Shore, J. **Cellulosics Dyeing**. North Carolina : Society of Dyers and Colourists, 1995.
- [30] Lemeune, S., and others. "Effects of Ozone and Chlorine Dioxide on the Chemical Properties of Cellulose Fibers." **Journal of Applied Polymer Science** 93, 3 (2004) : 1219-1223.
- [31] Chen, Q., and others. "The Effect of Fibre Volume Fraction and Mercerization on the Properties of All-Cellulose Composites." **Carbohydrate Polymers** 71, 3 (2008) : 458-467.
- [32] Fabiyi, J. S., and others. "Wood Plastic Composites Weathering: Visual Appearance and Chemical Changes." **Polymer Degradation and Stability** 93, 8 (2008) : 1405-1414.
- [33] Stark, N. M., and Matuana, L. M. "Surface Chemistry Changes of Weathered Hdpe/Wood-Flour Composites Studied by XPS and FTIR Spectroscopy." **Polymer Degradation and Stability** 86, 1 (2004) : 1-9.
- [34] Khan, J. H., and Ahmed, N. "Photo-oxidative degradation of recycled, reprocessed HDPE:changes in chemical, thermal and mechanical properties." **Bulgarian Journal of Physics** 30 (2003) : 158-169.
- [35] Balzano, L. "Flow Induced Crystallization of Polyolefins." Doctor of Philosophy Chemical Engineering and Chemistry Eindhoven University of Technology, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการคำนวณ

ก-1 การคำนวณร้อยละการดูดซึมสี

$$\% \text{Dye absorption} = \frac{[a] - [b]}{[a]} \times 100\%$$

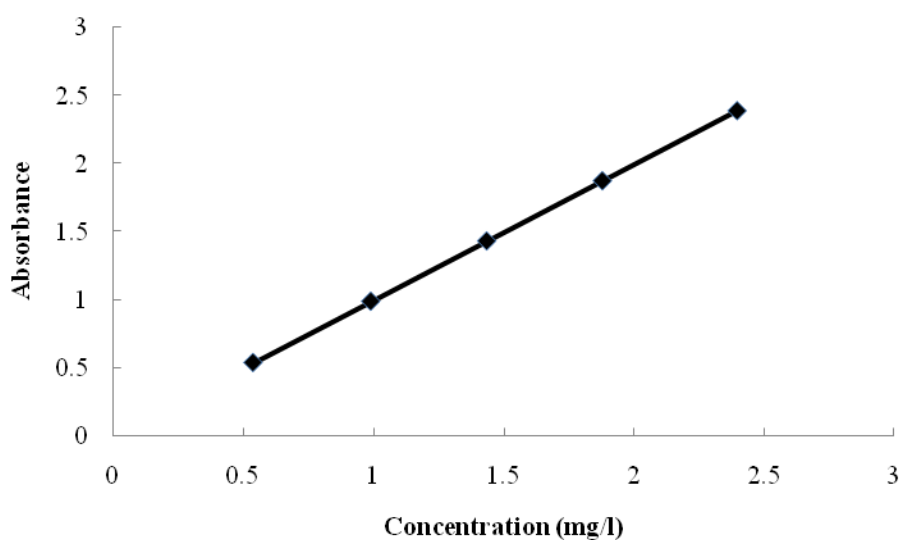
โดยที่ [a] = ความเข้มข้นของน้ำย้อมก่อนย้อม

[b] = ความเข้มข้นของน้ำย้อมหลังย้อม

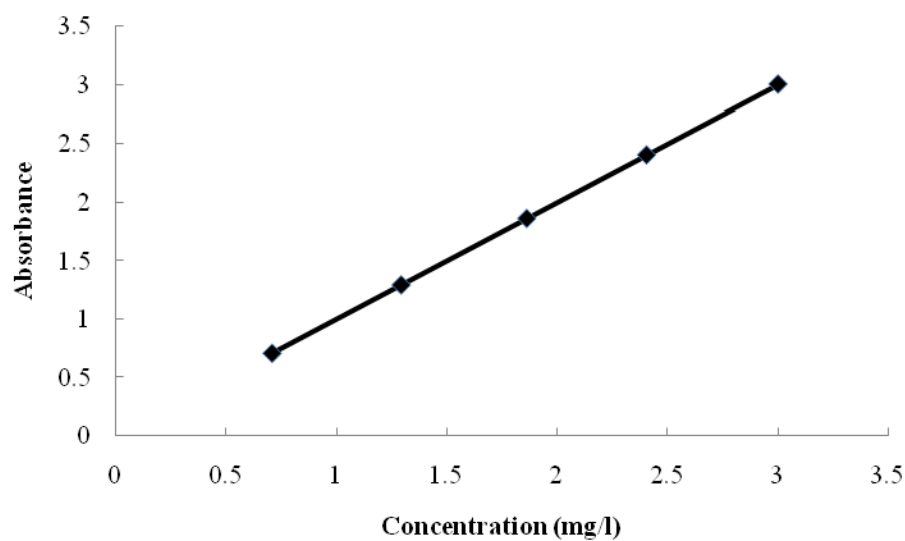
ซึ่งความเข้มข้นของน้ำย้อมหาได้จากเทคนิค UV/Visible spectroscopy เริ่มจากการสร้าง

Calibration curve ดังนี้

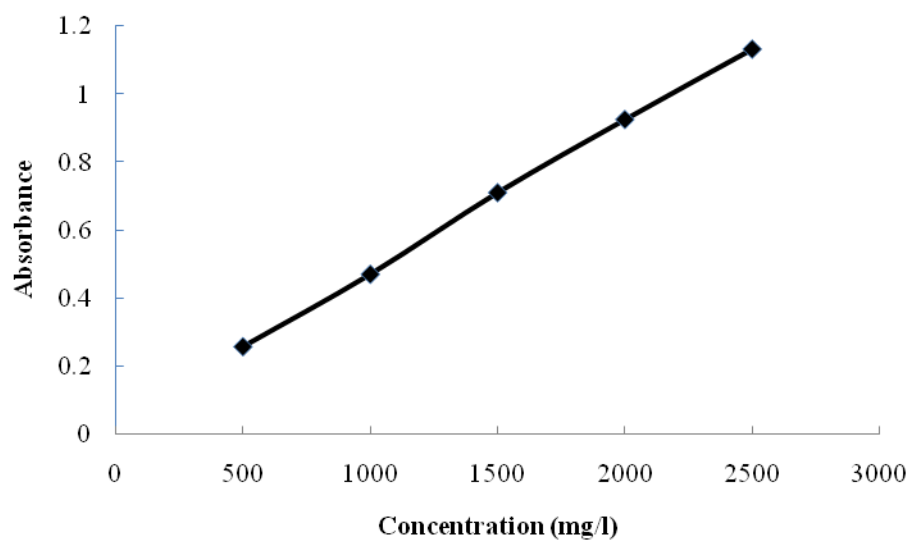
เตรียมความเข้มข้นของน้ำย้อมที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ค่า ในที่นี้ใช้ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 ml/l จากนั้นนำแต่ละความเข้มข้นมาหาค่าการดูดกลืนรังสี UV (Absorbance) โดยสนใจค่าความยาวคลื่นสูงสุด มา plot เป็นกราฟ ดังภาพที่ 53-55 เพื่อใช้หาค่าความเข้มข้นของน้ำย้อมได้โดยง่าย



ภาพที่ 53 Calibration curve ของสีไคเร็กซ์



ภาพที่ 54 Calibration curve ของสตีริกแอซิด



ภาพที่ 55 Calibration curve ของสตีริกแอซิดจากไม้อัด

ก-2 การคำนวณ %Crystallinity

$$\%Crystallinity = \frac{\Delta H_m}{(\Delta H_f^\circ)(1-W)} \times 100\%$$

โดยที่ ΔH_m = ปริมาณค่า Heat of fusion ที่ได้จากการทดลอง

ΔH_f° = ค่า Heat of fusion ของ 100%Crystalline ของ HDPE ที่อุณหภูมิ 130 °C มีค่า

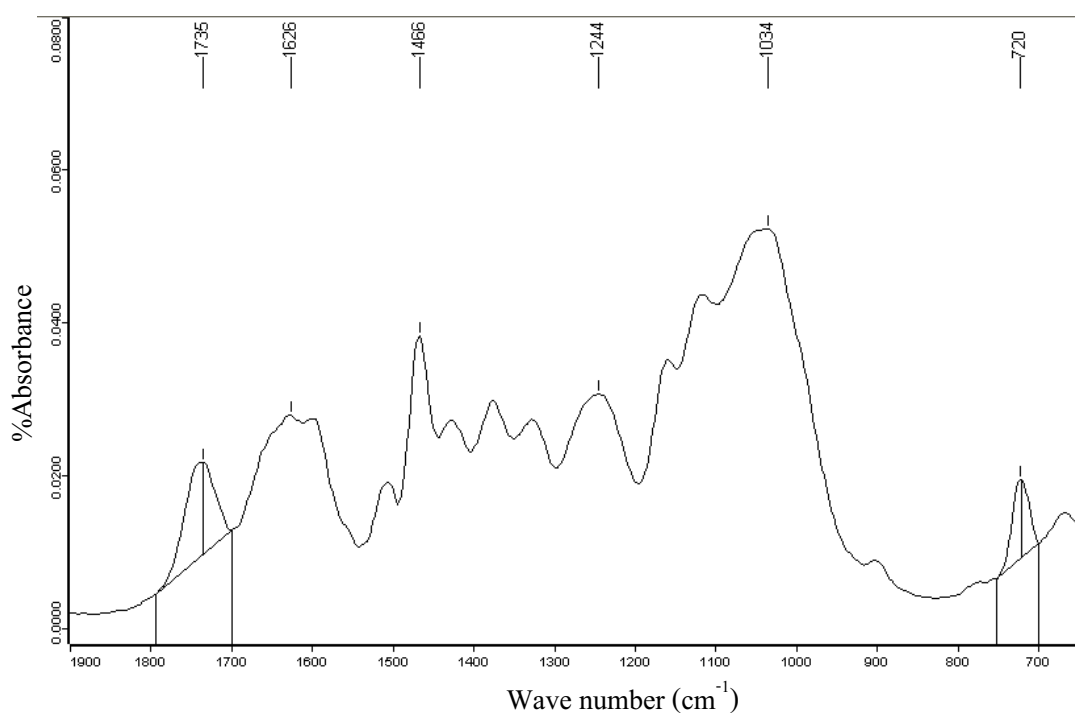
เท่ากับ 293 J/g

W = ร้อยละโดยน้ำหนักของผงไม้อัดในวัสดุคอมพอสิต = 0.60

ก-3 การคำนวณค่า Carbonyl index จากกราฟ FTIR

$$\text{Carbonyl index} = \frac{I_{1713}}{I_{722}}$$

การหาความเข้มของพีคสูงสุดของหมู่คาร์บอนิล ($\text{-}\overset{\text{O}}{\parallel}\text{C-}$) ในเฮมิเซลลูโลสที่ 1735 cm^{-1} และ 720 cm^{-1} ในกราฟ FTIR มีลักษณะดังภาพที่ 56 แล้วนำค่าที่ได้ไปแทนค่าในสมการการหาค่า Carbonyl index

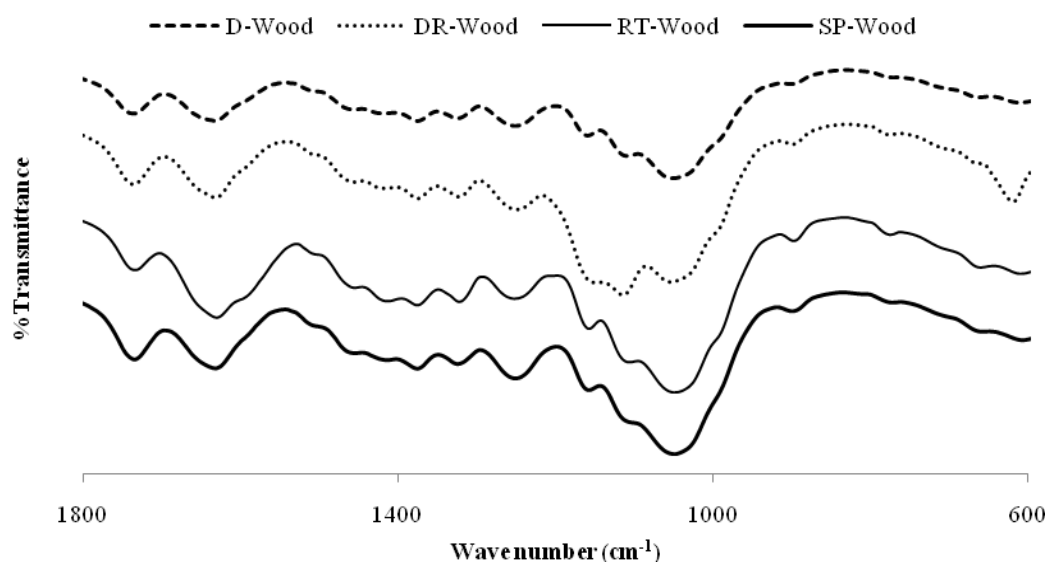


ภาพที่ 56 ตัวอย่างการหาความเข้มของพีคการดูดกลืนรังสี IR ของ WPE ก่อนตากแดดที่ wavenumber 1735 cm^{-1} และ 720 cm^{-1}

ภาคผนวก ข

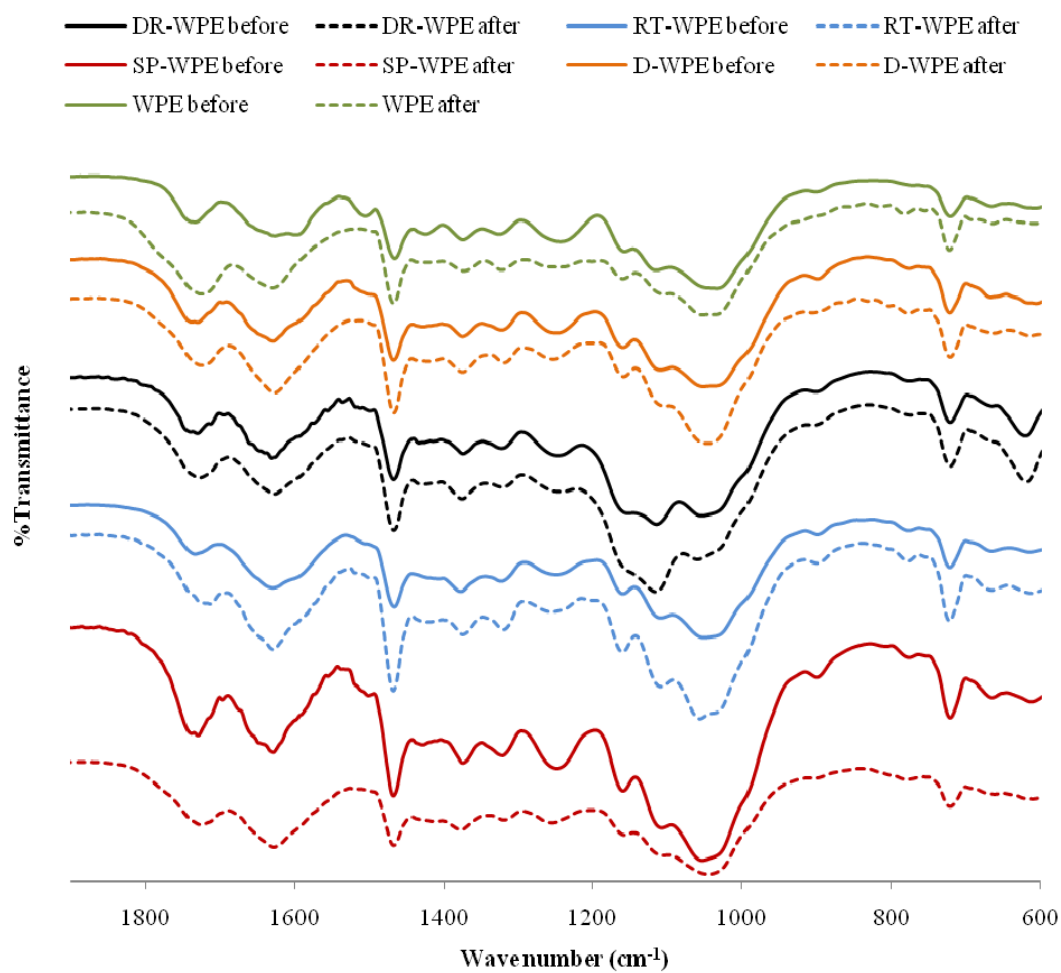
ข้อมูลและภาพผลการทดสอบวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิคต่างๆ

ข-1 ผลการทดสอบ FTIR ของผงไม้



ภาพที่ 57 FTIR spectra ของผงไม้ D-Wood, DR-Wood, RT-Wood และ SP-Wood เรียงลำดับจาก
เส้นบนลงล่าง

ข-2 ผลการทดสอบ FTIR ของวัสดุคอมพอสิต



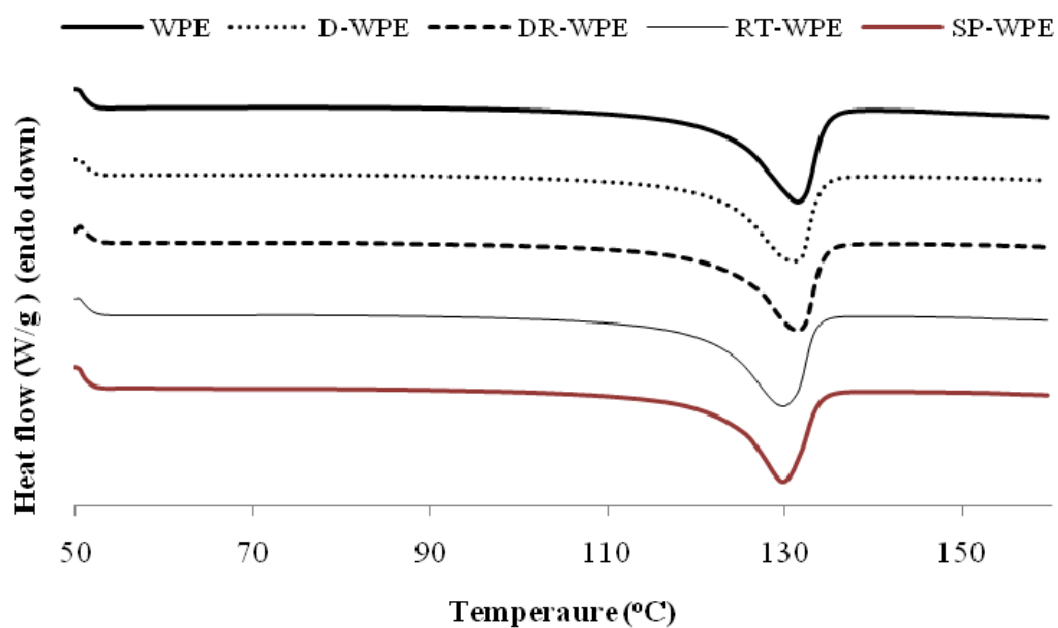
ภาพที่ 58 FTIR Spectra ของวัสดุคอมพอสิตทั้งก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน

ข-3 ผลการวัดสีและค่า Contact angle

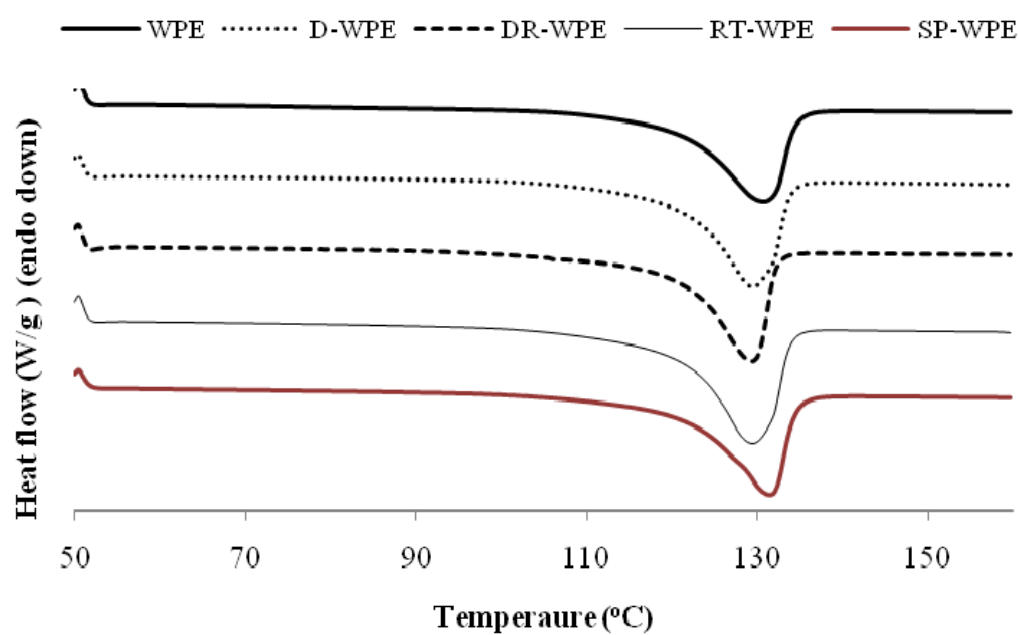
ตารางที่ 10 ผลการวัดสีและค่า Contact angle ของวัสดุคอมพอสิตทั้งก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Sample	Exposure time (month)	การวัดค่าความแตกต่างสี				Contact angle (Degree)
		DL*	Da*	Db*	DE	
HDPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	83.00
	1	1.53	0.22	0.08	1.55	85.29
	2	1.83	0.27	-0.03	1.85	79.77
	3	2.75	0.20	0.19	2.76	75.12
MA-HDPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	80.91
	1	1.48	0.11	0.11	1.49	78.48
	2	2.00	0.15	0.03	2.01	79.97
	3	2.93	0.05	0.42	2.96	71.64
WPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	84.00
	1	2.15	1.30	4.41	5.07	81.30
	2	4.02	2.17	7.00	8.36	65.28
	3	4.91	3.37	8.08	10.04	68.32
D-WPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	89.14
	1	-1.54	0.15	0.53	1.63	38.82
	2	2.38	1.24	2.80	3.88	36.45
	3	2.44	2.04	3.48	4.71	35.79
DR-WPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	87.08
	1	-2.54	1.72	0.76	3.16	29.51
	2	1.52	1.23	2.33	3.04	29.97
	3	3.15	1.03	4.35	5.47	27.40
RT-WPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	86.96
	1	0.25	1.44	2.97	3.31	32.60
	2	13.54	3.28	9.14	16.66	35.24
	3	15.72	4.20	12.19	20.33	37.05
SP-WPE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	85.43
	1	-2.50	-0.55	0.42	2.59	47.06
	2	0.17	0.37	1.93	1.97	38.69
	3	0.04	0.82	2.33	2.47	39.45

ข-4 ผลการทดสอบ DSC



ภาพที่ 59 ผลการทดสอบ DSC ของวัสดุคอมพอสิตก่อนตากแดด



ภาพที่ 60 ผลการทดสอบ DSC ของวัสดุคอมพอสิตก่อนหลังการตากแดด 3 เดือน

ข-5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตาราง 11 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	597.17±85.1	17.83±0.28	-
1	614.07±51.83	18.45±0.23	-
2	700.83±59.08	19.07±0.34	-
3	727.76±91.29	12.96±0.55	4.43±0.38

ตาราง 12 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ MA-HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	511.73±39.54	17.78±0.3	-
1	662.7±37.66	18.98±0.25	-
2	643.87±71.89	16.49±1.31	9.68±2.27
3	724.76.87±103.26	7.61±0.32	1.68±0.07

ตาราง 13 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	1466.56±84.85	31.02±0.92	8.73±0.44
1	1621.88±73.27	32.56±0.58	7.49±0.99
2	1713.09±95.58	32.98±0.76	6.72±1.32
3	1899.81±74.78	34.28±0.82	6.12±1.09

ตาราง 14 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ D-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	1256.48±83.24	26.53±0.36	9.31±0.75
1	1262.92±53.76	26.89±0.25	7.37±0.93
2	1356.69±112.96	27.06±0.48	6.51±0.9
3	1554.67±59.84	27.82±0.29	5.55±0.42

ตาราง 15 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ DR-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	1419.39±46.07	26.77±0.27	7.87±0.77
1	1466.56±48.22	27.45±0.59	7.05±0.45
2	1558.28±57.21	27.85±0.89	6.43±1.25
3	1683.89±57.5	28.96±0.97	5.98±0.93

ตาราง 16 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ RT-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	1465.21±37.67	23.56±0.9	4.9±0.86
1	1544.88±44.93	21.96±1.42	3.84±0.62
2	1615.07±49.55	21.49±1.92	3.8±0.79
3	1668.35±64.95	21.24±2.38	3.27±1.09

ตาราง 17 แสดงค่า Young's modulus, Ultimate tensile strength และ %Strain at break ของ SP-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Young's modulus (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	%Strain at break
0	1329.43±45.27	28.03±0.34	7.08±1.01
1	1359.93±60.01	26.1±0.41	6.91±1.29
2	1398.05±66.54	26.67±0.38	6.96±0.86
3	1499.62±57.87	26.88±0.5	5.02±0.5

ตาราง 18 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	791.92±21.58	20.08±0.4	-
1	802.62±46.5	18.55±0.44	-
2	793.1±74.08	18.94±0.4	-
3	791.98±16.19	21.2±0.26	-

ตาราง 19 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ MA-HDPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	719.59±20.53	17.89±0.49	-
1	782.71±29.5	18.93±0.63	-
2	795.65±43.82	19.49±0.81	-
3	893.45±56.10	21.47±0.96	-

ตาราง 20 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	2108.29±65.89	45.15±0.1	-
1	2493.54±33.72	48.36±1.12	4.27±0.51
2	2619.57±42.26	49.77±1.95	4.25±0.68
3	2962.06±81.57	54.21±1.2	4.08±0.52

ตาราง 21 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ D-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	1825.77±56.85	39.28±0.63	-
1	1944.24±83.26	40.25±1.22	4.5±0.77
2	1900.21±72.08	40.17±0.76	4.5±0.68
3	2227.71±53.38	42.62±1.23	4±0.88

ตาราง 22 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ DR-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	1997.28±46.62	41.51±0.61	-
1	2043.55±43.7	41.47±0.56	4.77±0.5
2	2049.32±24.63	42.67±0.93	4.7±0.48
3	2472.86±59.64	45.85±1.06	3.95±0.51

ตาราง 23 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ RT-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	1876.74±40.35	38.51±1.16	4.78±0.37
1	1737.03±39.21	33.79±0.71	3.5±0.3
2	1740.7±46.73	34.82±0.42	3.36±0.25
3	1986.74±88.01	38.06±1.73	3.46±0.43

ตาราง 24 แสดงค่า Secant modulus, Ultimate flexural strength และ %Strain at break (Limit at 5%Strain) ของ SP-WPE ก่อนและหลังการตากแดดเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน

Exposure time (month)	Secant modulus (MPa)	Ultimate flexural strength (MPa)	%Strain at break (Limit at 5%Strain)
0	2052.79±50.97	43.76±0.82	-
1	1982.52±66.79	40.56±0.94	4.88±0.26
2	1925.56±51.31	41.49±0.79	4.8±0.30
3	2242.19±91.7	43.83±1.14	4.02±0.57

ข-7 ผลการทดสอบ SEM โหมด EDS

ตารางที่ 25 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค SEM และ EDS

Element	%Weight	
	D-WPE	RT-WPE
C	72.09	49.65
O	17.73	46.69
Na	6.95	2.67
Cl	3.24	0.99

ภาคผนวก ค

การนำเสนอผลงานวิจัย

**Certificate of Participation**

This is to certify that

Mr. Awat Sirisukpaibul

has participated in *The 1st National Research Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials and The 16th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers* at Montien Hotel, Bangkok, Thailand April 22, 2010.

He has given a poster presentation and the proceedings were published in the book of abstracts.

(Assistant Professor Pomthong Malakul Na Ayudhaya)

Dean

Poster presentation



EFFECT OF WOOD DYEING ON WOOD/HDPE COMPOSITE

Awat Sirinukunwong^a, Nattakorn Hongviphan^{a,b}, and Pajanya Patanavibutr^{a,b}^a Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 72000, Thailand^b Center of Excellence for Petrochemical and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding author: Tel. Fax: +66-2611-9163, natnake@msae.su

Introduction

Wood-plastic composites (WPC) are widely used in many applications. Different applications take advantage of properties that WPC offers. For example, automotive applications take advantage of a lower specific gravity, compared with inorganic filled thermoplastics. It is well known that color of WPC changes to lighter after outdoor exposure. Direct and reactive dyes are synthetic dyes, which are suitable for cellulosic dyeing. Removal of lignin before dyeing should be better to resist color fading of WPC from outdoor applications.

The aim of this work was to improve appearance of wood plastic composite by dyeing delignin wood flour with two types of synthetic dye. Dyed wood plastic composites were characterized by FTIR, TGA, and their mechanical properties and morphology were studied and compared with non-dyed specimens.

Experimental

A. Preparation of wood

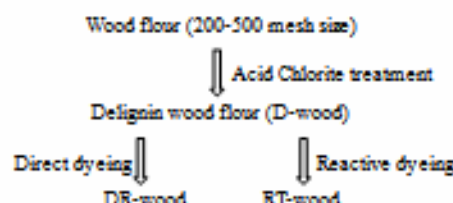


Table 1. Characteristics of dyes used in this work.

Trade name	Scientific name	λ_{max} (nm)
Solophenyl Redraun 3 BLE	CI Direct Red 33.1	519
Novacron Red C-2G	CI Reactive Red 281	514

B. Preparation of wood polyethylene composite (WPE).

HDPE, wood, and MAPE were compounded by a Twin screw extruder and injection molded into specimen.

Results and Discussion

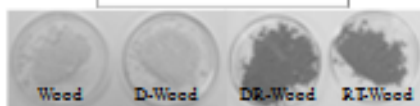


Fig 1. Color of wood and modified wood.

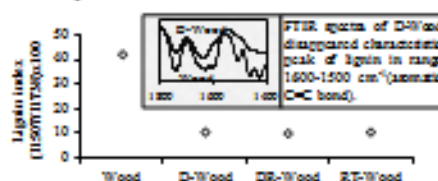


Fig 2. Lignin index of wood and modified wood.

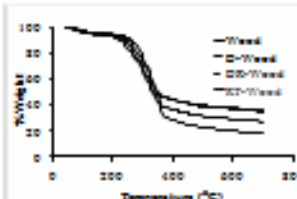


Fig 3. TGA curve of wood and modified wood.

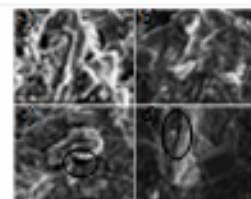


Fig 4. SEM micrographs of WPE specimens: a) WPE, b) D-WPE, c) DR-WPE, d) RT-WPE.

Figure 3 shows that wood started to decompose at higher temperature than modified wood. This result indicates that acid chlorite treatment damaged celluloses. Compared among modified wood, DR-wood had the highest onset degradation temperature while D-wood and RT-wood had the same temperature. Mercerization of celluloses might occur during the dyeing process, resulting celluloses to be rearranged and stiffer. SEM micrographs (Figure 4) indicate that original wood and modified wood could disperse well in polymer matrix when MAPE was incorporated in compounding. DR-WPE and RT-WPE had lower compatibility between HDPE and wood fibers compared to D-WPE. There were spaces around fibers implying coupling agents did not wet fibers as well as WPE.

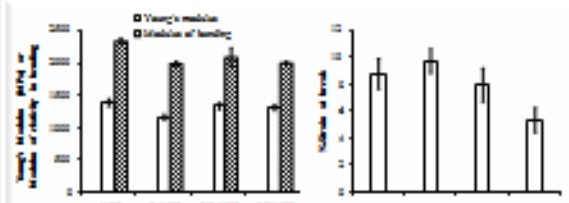


Fig 5. Tensile and flexural properties of test specimens.

Figure 5 shows that after acid chlorite treatment, Young's modulus and flexural modulus of D-WPE were lower due to weaken wood fibers as explained in TGA results. Dyed wood composites had higher modulus than delignin wood composites, indicating the same damaged celluloses might have mercerization during the dyeing condition. In the other hand, acid chlorite treatment increased flexibility to D-WPE (higher in %strain), since D-Wood were softened and polymer replaced the role of lignin in fibers made composites more hydrophobic and tougher.

Conclusions

Lignin was removed from wood 70wt% after the acid chlorite treatment. Unfortunately, these fibers were weakened due to celluloses was destroyed during the treatment. Dyeing condition of wood might help celluloses to be mercerization, which caused them to have higher onset degradation temperature compared to delignin wood. Dyed wood composites had higher modulus than D-WPE, indicating the dyeing condition improved some properties of cellulose and composite materials.

This work was supported by the Department of Materials Science and Engineering Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, and the National Center of Excellence for Petrochemical, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Thailand. The authors also thank PT Chemical Public Co Ltd., Thailand, for kindly supplied HDPE.

บันทึกงานประชุม (Proceeding) จากหนังสือแสดงบทคัดย่อ



The 1st National Research Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials and The 16th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers
April 22, 2010, Rajmontien Grand Ballroom, Motien Hotel, Bangkok, Thailand

Poster Sessions

^{b)} Center for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials

This study focused on effect of coupling agent content on morphology and mechanical properties of microcellular wood reinforced polypropylene composite. Microcellular wood composites were prepared by using wood flour (200 mesh size) of 20%wt and 40%wt, coupling agent (MAPP) of 0, 3, 7, and 10%wt (based on wood flour) were varied, and a chemical blowing agent was fixed to be constant for all formula. All compositions except blowing agent were melt-blending with twin-screw extruder. Extrudate mixed with blowing agent were injection molded and tested in accordance to ASTM D-638 and D-790. Morphology of composites was studied with SEM, and their viscosities were determined by MFI. SEM indicates that wood flour content affected microcellular structure of composites more than MAPP content. Composites with 40%wt wood flour had finer microcellular structure because wood flour acted as nucleating agent. Composites with 20%wt wood flour had larger cell sizes due to blowing gas could expand better in lower viscosity of melt which was confirmed by their melt flow index results. In spite of similar fine microcellular structure, tensile modulus, tensile strength and flexural strength were increased with respect to MAPP content. This is due to better adhesion between fibers and polymer matrix.

PA-P(8)-11 Effect of Wood dyeing on Wood/HDPE Composite

Awat Sirisukpaibul^a, Nattakarn Hongsriphan^{a,b}, Pajaera Patanatabutr^{a,b}

^{a)} Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

^{b)} Center for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials

This study investigated effect of dye types on properties of dyed wood-HDPE composites. Two types of red synthetic dyes (direct dye and reactive dye) were used to dye delignin wood flour (Chlorite treatment) with upper 60% absorption ratio of the origin dye solution. Wood composites were prepared by melt blending of HDPE (40 wt%) and dyed wood flour (60 wt%) using 10 phr of MA-g-HDPE as a coupling agent. Samples were characterized by FTIR, TGA and SEM. Mechanical properties of injection molded WPC were determined in accordance to ASTM D-638 and D-790. After Chlorite treatment, most lignin in wood flour was removed and its thermal stability was decreased due to weaken celluloses. From SEM, it found that wood fibers were coated with coupling agents providing good adhesion between fibers and polymer matrix. However, delignin and reactive dye wood fibers were coated with salts while there was no trace of salts in direct dye wood fibers. Comparing to non-treatment WPC, modulus of WPC with delignin wood was lowered significantly, but both WPC with direct dyed wood and reactive dyed wood had higher modulus than WPC with delignin wood. It indicates that synthetic dyes help fibers to be stiffer.

PA-P(8)-12 Effect of Catalyst Types on The Ring-Opening Reaction of Epoxidized Natural Rubber in Latex Form

Pensri Anurak^a, Wanchai Lerdwijitjarad^{a,b}, Amnard Sittatrakul^{a,b}

^{a)} Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

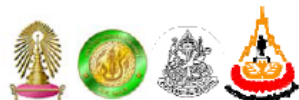
^{b)} Center for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials

The influence of catalyst types on the opening of oxirane ring of an epoxidized natural rubber (ENR) for the synthesis of 1,2-amino alcohols was investigated. The epoxidized natural rubber was reacted with ammonium hydroxide (NH₄OH) in latex form by using three types of catalysts namely silica gel (70-230 mesh), zinc(II) perchlorate hexahydrate [Zn(ClO₄)₂·6H₂O], and tetrabutyl orthotitanate [C₁₆H₃₆O₄Ti]. The chemical structures of the ENR and the product obtained after ring opening reaction were characterized by FT-IR and ¹H-NMR techniques. The thermal property was characterized by DSC. Silica gel (70-230 mesh) was found to be the best catalyst for the opening of epoxide ring of ENR in latex form compared to the other two catalysts. The glass transition temperature of natural rubber, epoxidized natural rubber, and 1,2-amino alcohol of natural rubber were -64.75°C, -14.74°C, and -10.98°C, respectively.

แผ่นคอมแพ็กดิสก์ (CD) บันทึกการรายงานการประชุม (Proceeding)



บันทึกงานการประชุม (Proceeding)



The 1st National Research Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials and The 16th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers
April 22, 2010, Rajmontien Grand Ballroom, Motien Hotel, Bangkok, Thailand

Technical Program

Polymer Engineering and Advanced Rubber (PA)

SU-MSE

- PA-P(8)-10 Effect of Coupling Agent on Properties of Microcellular Wood Reinforced Polypropylene Composite** Proceeding

Atchara Chadsiriwattana, and Nattakarn Hongsrirphan

- PA-P(8)-11 Effect of Wood Dyeing on Wood/HDPE Composite** Proceeding

Awat Sirisukpaibul, Nattakarn Hongsrirphan, and Pajaera Patanatabutr

- PA-P(8)-12 Effect of Catalyst Types on The Ring-Opening Reaction of Epoxidized Natural Rubber in Latex Form**

Pensri Anurak, Wanchai Lerdwijitjarad, and Amnard Sittattrakul

SUT-PE

- PA-P(9)-13 Compatibilization and Properties of Poly (lactic acid)/Poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends**

Arpaporn Teamsinsungvon, Yupaporn Ruksakulpiwat, and Kasama Jarukumjorn

- PA-P(9)-14 Effect of Filler Content on Mechanical Properties and Morphologies of Rice Husk Silica (RHS)/ Poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) Composites**

Jirapa Phosee, Jatuporn Wittayakun, and Nitinat Suppakarn

- PA-P(9)-15 Influence of Fiber Orientations and Fiber content on Mechanical Properties of Sisal Fiber/Epoxy Composites**

S. Srisuwan, and P. Chumsamrong

EFFECT OF WOOD DYEING ON WOOD/HDPE COMPOSITE

Awat Sirisukpaibul^a, Nattakarn Hongsririphan^{a,b}, and Pajara Patanathabutr^{a,b}

^a Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn university, Nakhon Pathom 73000, Thailand

^b Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

ABSTRACT

This study investigated effect of dye types on properties of dyed wood-HDPE composites. Two types of red synthetic dyes (direct dye and reactive dye) were used to dye delignin wood flour (Chlorite treatment) with upper 60% absorption ratio of the origin dye solution. Wood composites were prepared by melt blending of HDPE (40 wt%) and dyed wood flour (60 wt%) using 10 phr of MA-g-HDPE as a coupling agent. Samples were characterized by FTIR, TGA and SEM. Mechanical properties of injection molded WPC were determined in accordance to ASTM D-638 and D-790. After Chlorite treatment, most lignin in wood flour was removed and its thermal stability was decreased due to weaken celluloses. From SEM, it found that wood fibers were coated with coupling agents providing good adhesion between fibers and polymer matrix. However, delignin and reactive dye wood fibers were coated with salts while there was no trace of salts in direct dye wood fibers. Comparing to non-treatment WPC, modulus of WPC with delignin wood was lowered significantly, but both WPC with direct dyed wood and reactive dyed wood had higher modulus than WPC with delignin wood. It indicates that synthetic dyes help fibers to be stiffer.

*nattakar@su.ac.th

INTRODUCTION

Wood-plastic composites (WPC) are widely used in many applications. Different applications take advantage of properties that WPC offers. For example, automotive applications take advantage of a lower specific gravity, compared with inorganic filled thermoplastics. House decorated products take advantage of the aesthetics, resulting in a product that can look like wood but can be processed like plastics [1]. There are several ways to improve properties and appearance of WPC such as adding coupling agents, pigment, antimicrobials or light stabilizer [2]. It is well known that color of WPC changes to lighten after outdoor exposure. During photo-oxidation, lignin in wood fibers is broken into water-soluble product such as carboxylic acids, quinones, and hydroperoxy radicals [3]. Direct and reactive dyes are synthetic dye, which are suitable for cellulosic dyeing. Removal of lignin before dyeing should be better to resist color fading of WPC from outdoor applications. Acid chlorite treatment is widely used for the preparation of holocellulose. Acid chlorite treatment dissolves only lignin during 60% of delignification and after pass 60% some of carbohydrate was dissolved [4]. However, this event make cellulose decreased in strength.

The aim of this work was to improve appearance of wood plastic composite by dyeing delignin wood flour with two types of synthetic dye. Dyed wood plastic composites were characterized by FTIR, TGA, and their mechanical properties and morphology were studied and compared with non-dyed specimens.

EXPERIMENTAL

A. Materials

Rubber wood (*Hevea brasiliensis*) sawdust was ball milled and sieved by a sieve shaker (200-500 mesh size) to be 31-74 micron in particle size. High density polyethylene

(HDPE) with MFI of 20 g/10 min was kindly supplied by PTT Chemical Public Co Ltd., Thailand. Maleated polyethelene (MAPE) with maleic anhydride content of 0.9 wt% was purchased from DuPont, USA. Other reagents used were; Sodium Chlorite (Ajax Finechem Pty Ltd.); Acetic acid (LABSCAN ASIA Co Ltd.); Sodium Sulphate (QReCTM); Sodium Carbonate anhydrous (QReCTM). All materials were used as received.

B. Removing lignin

Method to remove lignin was done following P.A. Ahlgren et al [4]. Sodium Chlorite (NaClO_2) of 0.3 g and glacial acetic acid of 0.1 ml, per 1 gram of dry wood and liquor ratio of 15:1 were used to remove lignin from wood. Bleaching temperature was set at 70°C and wood flours were treated for 8 hrs. After that, treated wood were soaked and washed with distilled water until pH of water was 7. Treated wood were dried in an air-circulating oven at 80°C until constant weight. Wood and treated wood was determined lignin content in accordance to TAPPI T 222 om-98, "Acid – insoluble lignin in wood and pulp" (Klason lignin) [5].

C. Dyeing of delignin wood

Direct dye

Delignin wood (D-Wood) was dyed with Solophenyl Bodeaux 3 BLE (CI Direct Red 81.3) 1% on weight of fiber (%o.w.f.) at liquor ratio 10:1. Dyeing procedure is summarized in Figure 1 (suggested by supplier). D-Wood was dyed with upper 60% absorption ratio of the origin dye solution, which concentrations of dye solution before and after dyeing process were determined using T80+ UV/VIS Spectrometer, PG Instruments Ltd.

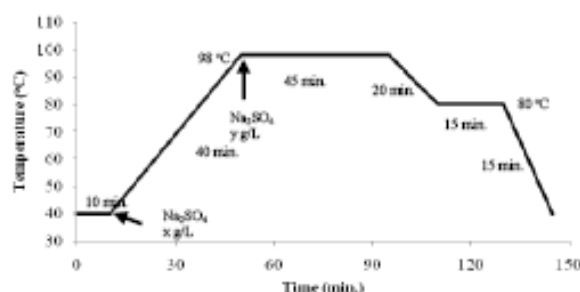


Fig 1. Dyeing profile of direct dye.

Table 1. Exhaustion aid for direct dyeing.

Dye (%)	Sodium Sulphate x (g/l)	Sodium Sulphate y (g/l)
0.5	7.5	15
0.75	10	20
1.0	15	30
1.25	17.5	35
1.5	20	40
>2.5	25	40

Reactive dye

D-Wood was dyed with Novacron Red C-2G (CI Reactive Red 281) 1 %o.w.f. at liquor ratio 4:1. Dyeing method is summarized in Figure 2 (suggested by supplier). D-Wood was dyed with upper 60% absorption ratio of the origin dye solution.

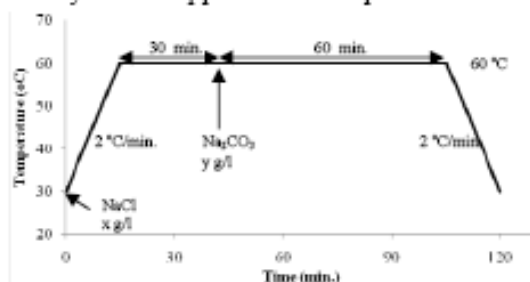
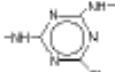
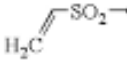


Fig 2. Dyeing profile of reactive dye.

Table 2. Exhaustion aid for reactive dyeing.

Dye (%)	Sodium Chloride (g/l)	Sodium Carbonate (g/l)
1	40	10
2	50	12.5
4	70	17.5
8	80	20

Table 3. Characteristics of dyes used in this work.

Trade name	Scientific name	Main functional group	λ_{max} (nm)
Solophenyl Bodeaux 3 BLE	CI Direct Red 83.1	Amide, Sodium sulphonate, Metal complex	519
Novacron Red C-2G	CI Reactive Red 281	MCT ¹ /VS ² /VS	514
1. MCT : monochlorotriazine ;		2. VS : vinyl sulphone ;	
			

D. Preparation of wood-plastic composite (WPC)

Before compounding, wood flour were dried in an air-circulating oven at 80°C for 24 hours. Sample codes and compositions are presented in Table 4. MAPE was added 10 wt% of wood flour. Compounding of wood flour and resins were done in a co-rotating twin screw extruder. Barrel temperature profiles were 145, 155, 170, 180 and 185°C from hopper to the die, and screw speed was 60 rpm. Extrudate were pelletized into pellets. Pellets of WPC were dried at 80°C for 24 hr before injection molding into tensile and flexural specimens using the PLUS 350/75 (Battenfeld) injection molding machine. Injection pressure was set 110 MPa and the nozzle temperature was 180°C.

Table 4. Sample codes and their compositions.

Sample Code	Compositions	Compositions ratio
HDPE	HDPE	100
MA-HDPE	HDPE : MAPE	100 : 15
W-WPE	HDPE : Pure wood : MAPE	40 : 60 : 6
D-WPE	HDPE : Delignin wood : MAPE	40 : 60 : 6
DR-WPE	HDPE : Direct dyed wood : MAPE	40 : 60 : 6
RT-WPE	HDPE : Reactive dyed wood : MAPE	40 : 60 : 6

E. Characterization methods

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

Fourier transform infrared (FT-IR) spectra of sample were recorded on a Vertex 70, BRUKER in range 4000-400 cm⁻¹ using KBr disc. Spectra were obtained using 32 scan and a resolution 4 cm⁻¹.

Thermogravimetric analysis (TGA)

Thermogravimetric measurements were performed using TGA/DSC1 STAR[®] System, Mettler Toledo. Temperature program for tests were run from 40°C to 700°C at heating rate 10°C/min in nitrogen atmosphere (20 ml/min).

Mechanical test

Tensile test was performed according to ASTM D-638-03 [6] using LR 50 K universal testing machine (Lloyd Instrument) equipped with 50 kN load cell and a crosshead speed of 5 mm/min. Ten measurements of each sample code were conducted to calculate the average and its standard deviation. Flexural test was performed according to ASTM D-790-03 [7] using LR 50 K universal testing machine (Lloyd Instrument) equipped with 50 kN load cell. Specimens were deflected in three-point loading mode until failure or until 5 percent strain was reached in the outer surface of test specimen with a crosshead speed of 1.8 mm/min.

Scanning electron microscopy (SEM)

Microstructure of wood flour and test specimens were characterized by a scanning electron microscope (JSM 5410 LV). Samples were prepared by immersing specimen in liquid nitrogen and then breaking them. The fractured surfaces were sputter-coated with gold for observation.

RESULTS AND DISCUSSION

A. Content of lignin

Figure 3 presents color of wood and modified wood. It is clearly seen that delignin wood flour (D-wood) had lighter color than original wood after Chlorite treatment. From TAPPI T 222 om-98, it found that Klason lignin was removed about 70wt% of wood flour. The reduction of lignin in wood was also detected by FTIR spectra (Figure 4) showing that the characteristic peaks of lignin in range 1,600-1,500 cm^{-1} (aromatic skeleton vibration) disappeared [8].



Fig 3. Color of wood and modified wood.

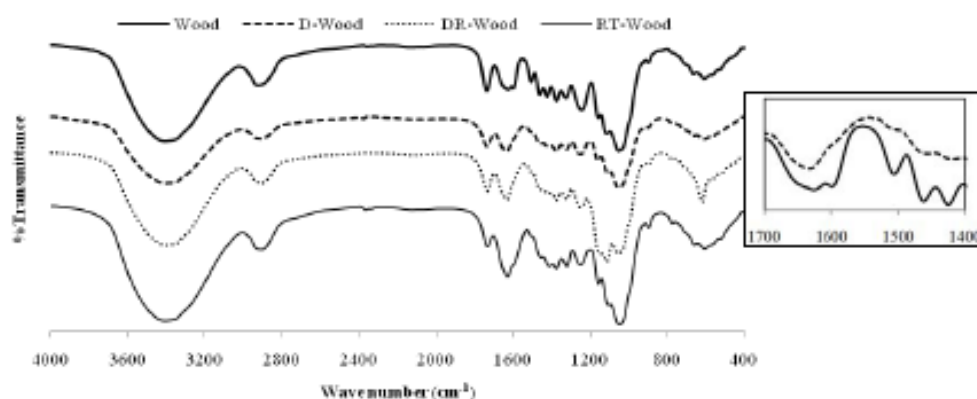


Fig 4. FTIR spectra of pure wood (Wood) and delignin wood (D-Wood).

After dyeing with direct and reactive dyes, FTIR spectra of DR-wood indicated characteristic peaks of direct dye at 619, 1,114 and 1,150 cm^{-1} , while FTIR spectra of D-Wood presented broader peaks at 1,630 cm^{-1} representing more C=C benzene stretching and $-\text{NH}_2$ from reactive dye [8,9]. Figure 5 indicates normalized FTIR peak of lignin (Lignin index), which was calculated using the following equation:

$$\text{Lignin index} = \frac{I_{1502}}{I_{1738}} \times 100 \quad (1)$$

Where I is a peak intensity of FTIR spectra. The peak intensities were normalized using peak at 1,738 cm^{-1} (unconjugated C=O in xylans (hemicelluloses)). This peak was chosen as a reference peak because it slightly changed after treatment with acid or dyes. It is seen that lignins in modified wood flour were in the same range.

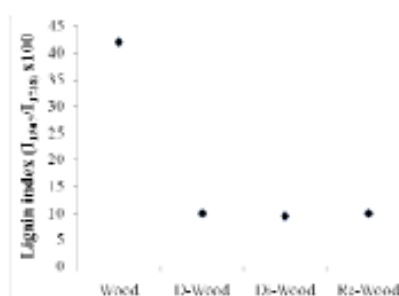


Fig 5. Lignin index of wood and modified wood.

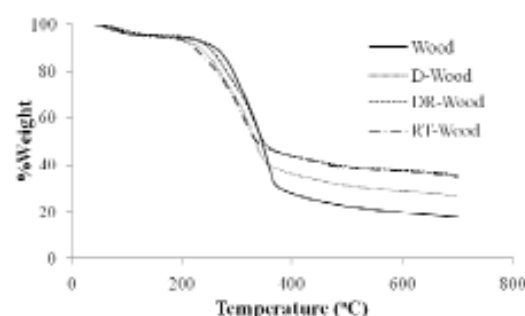


Fig 6. TGA curves of original wood and modified wood.

B. TGA analysis

Figure 6 presents thermal stability of original wood compared with modified wood. Original rubber wood started to decompose at higher temperature than modified wood. This result indicates that acid chlorite treatment damaged celluloses [4,10]. Compared among modified wood, DR-wood had the highest onset degradation temperature while D-wood and RT-wood had the same temperature. Mercerization of celluloses might occur during the dyeing process, resulting celluloses to be rearranged and stiffer [11]. In addition, delignification showed higher amounts of residual solids compared to original wood. It might be due to the chemical procedures used, which could induce higher char formation [8]. Regarding to residual solids, both dyed wood had higher residual solids than original wood confirming the presence of dyes in wood fibers.

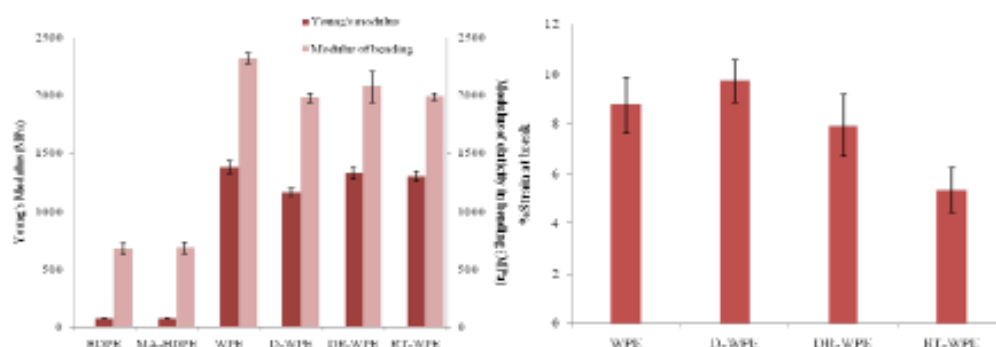


Fig 7. Tensile and flexural properties of test specimens.

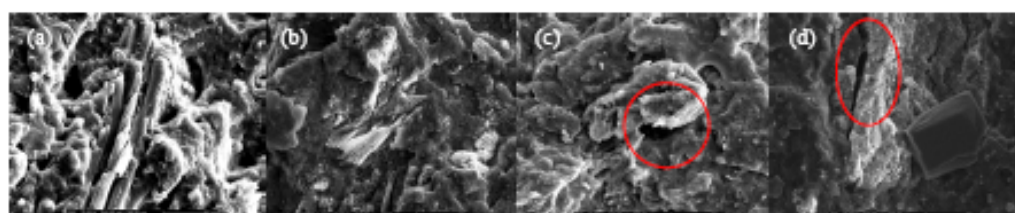


Fig 8. SEM micrographs of WPE specimens; a) WPE ; b) D-WPE, c) DR-WPE ; d) RT-WPE.

C. Mechanical properties and morphology

Figure 7 shows mechanical properties of pure resin and WPE added original or modified wood. After Chlorite treatment, Young's modulus and flexural modulus of D-WPE were lower due to weakened wood fibers as explained in TGA results. Dyed wood composites had higher modulus than delignin wood composites, indicating the same

damaged cellulosed might have mercerization during the dyeing condition. In the other hand, acid chlorite treatment increased flexibility to D-WPE (higher in %strain), since D-Wood were soften and polymer replaced the role of lignin in fibers made composites more hydrophobic and tougher [12]. SEM micrographs in Figure 8 indicate that original wood and modified wood could disperse well in polymer matrix when MAPE was incorporated in compounding. DR-WPE and RT-WPE showed lower compatibility between HDPE and wood fibers compared to D-WPE. There were spaces around fibers referring coupling agents did not wet fibers as well as WPE. Also, there was some trace of salts coated on delignin and reactive dye wood fibers while there was no trace of salts in direct dye wood fibers.

CONCLUSIONS

Lignin was removed from rubber wood flour 70wt% after the acid chlorite treatment. Unfortunately, these fibers were weaken due to celluloses was destroyed during the treatment. Dyeing condition of wood flour might help celluloses to be mercerization, which caused them to have higher onset degradation temperature compared to delignin wood. After Chlorite treatment, Young's modulus and flexural modulus of D-WPE were lower due to weaken wood fibers as explained in TGA results. Dyed wood composites had higher modulus than delignin wood composites, indicating the same damaged cellulosed might have mercerization during the dyeing condition.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and industrial Technology, Silpakorn University, and the National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Thailand. The authors also thank PTT Chemical Public Co Ltd., Thailand, for kindly supplied HDPE.

REFERENCES

- [1] Forest Products Laborator. (2004) Techline. Com-1(4), 1-2.
- [2] Wechsler, A. and Hiziroglu, S. (2007) Build. Environ. **42**(7), 2637-44.
- [3] Fabiyi, J. S., McDonald, A. G., Wolcott M. P. and Griffiths P. R. (2008) Polym. Degrad. Stabil. **93**(8), 1405-14.
- [4] Ahgren, P. A. and Goring, D. A. I. (1971) Can. J. Chemistry. **49**, 1272-1275.
- [5] TAPPI Standard T 222 om-98. Acid insoluble lignin in wood and pulp.
- [6] ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [7] ASTM D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- [8] Moran, J.I., Alvarez, V. A., Cyras, V. P. and Vázquez, A. (2008) Cellulose. **15**(1), 149-159.
- [9] Niramol, S., Paitip, T. and Woranan N. (2005) J. Colloid. Interf. Sci. **286**(1), 36-42.
- [10] Kim, D. Y., Nishiyama, Y., Wada, M. and Kuga, S. (2001) Cellulose. **8**(1), 29-33.
- [11] Qin, C., Soykeabkaew, N., Xiuyuan, N. and Peijs, T. (2008) Carbohydr. Polym. **71**(3), 458-467.
- [12] Li, X., Tabil, L. G. and Panigrahi, S. (2007) J. Polym. Environ. **15**(1), 25-33.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายอวัศ ศิริสุขไพบูลย์
 ที่อยู่ 21/46 ม.3 ซอยสำคัญอุทิศ ต.เกาะขวาง อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000
 โทรศัพท์ 0819455747
 E-mail Address Awatsun@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและ
 วัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม
 พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2550 ฝึกงานที่บริษัท ปตท. เคมีคอล จำกัด (มหาชน) ฝ่ายวิจัยและพัฒนา
 ผลิตภัณฑ์

ทุนที่ได้รับระหว่างการศึกษา

พ.ศ. 2551-2552 ทุนการศึกษาและผู้ช่วยอาจารย์ในรายวิชา Chemical process engineering
 laboratory จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และ
 วัสดุขั้นสูง และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร