



การศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพพอลิแล็กติกแอซิด
และผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ

โดย

นายอริวัชร วิริยะอมรชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพพอลิแล็กติกแอซิด
และผงไม้ม้วนสีธรรมชาติ

โดย

นายอิวัชร วิริยะอมรชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**STUDY OF THE ENVIRONMENTAL STABILIZATION OF NATURAL DYED
WOOD FILLED PLA BIO-COMPOSITES**

By

Atiwat Wiriya-amornchai

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

2011

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาความเสถียร
ต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพพอลิแล็กติกแอซิดและผงไม้ม้วนสีธรรมชาติ ” เสนอโดย
นายอิทธิวัชร วิริยะอมรชัย เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ชารัทสนวงศ์)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

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

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)
...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร)
...../...../.....

53402236 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิแล็กติกแอซิด/วัสดุคอมพอสิต/สีธรรมชาติ/ผงไม้/พอลิเมอร์ชีวภาพ

อชิวัชร วิริยะอมรชัย : การศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพพอลิแล็กติกแอซิดและผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และ ผศ.ดร.ปาเจรา พัฒนถานุตร 160 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิตพอลิแล็กติกแอซิด ที่ผสมผงไม้ธรรมชาติ โดยใช้ผงไม้สนเป็นสารเสริมแรง โดยงานวิจัยนี้มีการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารละลาย NaOH และมีการย้อมสีธรรมชาติทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ สีเหลืองจากแก่นขนุน, สีแดงจากแก่นไม้ฝาง และสีน้ำเงินจากคราม ผงไม้ทุกชนิดจะมีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน 3-TEPA เพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่าง PLA และผงไม้สน จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน dog bone และจะนำวัสดุคอมพอสิตทั้งหมดไปผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

จากผลการวิจัย พบว่า B-WPC มีความเสถียรทางความร้อนต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตอื่นๆ แต่เมื่ออัตราการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆ แต่เมื่อผ่านการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่า PLA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเสถียรทางความร้อน ส่วนวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆจะมีความเสถียรทางความร้อนที่ลดลง ยกเว้น B-WPC นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกก่อนการตากแสง จะเห็นว่า วัสดุคอมพอสิตทุกชนิดมีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA แต่วัสดุคอมพอสิตผสมผงไม้ที่ได้รับการย้อมสีธรรมชาติพบว่า มีปริมาณผลึกที่ลดลงเมื่อเทียบกับ AL-WPC นอกเหนือจากนั้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลพบว่า ค่า modulus ของวัสดุทุกชนิดมีแนวโน้มลดลงหลังการตาก 1 เดือน หลังจากนั้นก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ค่า tensile strength กลับมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องใน PLA บริสุทธิ์ และ W-WPC แต่ใน AL-WPC และวัสดุคอมพอสิตผสมผงไม้ที่ได้รับการย้อมสีธรรมชาติกลับมีค่าที่ลดลงหลังตาก 1 เดือน และเพิ่มขึ้นในช่วงเดือนที่ 2 แล้วลดอีกครั้งในช่วงเดือนที่ 3

เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของวัสดุ (ΔE) พบว่า B-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุด นั้นแสดงให้เห็นถึง สีน้ำเงินจากครามช่วยทำให้วัสดุคอมพอสิตมีเสถียรภาพต่อแสงได้ดี นอกเหนือจากนั้นสีน้ำเงินจากครามมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้ แต่เมื่อผสมในผงไม้เพื่อผลิตวัสดุคอมพอสิตกลับไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

53402236 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD : POLY LACTIC ACID (PLA) / COMPOSITES / NATURAL DYES / WOODS / BIO-COMPOSITE

ATIWAT WIRIYA-AMORNCHAI : STUDY OF THE ENVIRONMENTAL STABILIZATION OF NATURAL DYED WOOD FILLED PLA BIO-COMPOSITES. THESIS ADVISORS : ASST.PROF.NATTAKARN HONGSRIPHAN, D.ENG., AND ASST.PROF.PAJAERA PATANATHABUTR, Ph.D. 160 pp.

This study examines the environmental stability of natural dyed wood filled PLA bio-composite that pine wood flour as reinforcement. This research has improved surface treatment of pine wood with NaOH solution. Three types of natural dyes; yellow color from jackfruit tree, red color from sappan wood and blue color from indigo, were selected to dye alkali-treated pinewood fibers. Before compounding with PLA, original, alkali-treated and natural dyed wood flour were treated with 3-TEPA to increase the compatibility between PLA and pine wood flour. Afterwards, the prepares were injected to be the dog bone shape and composites were placed in UV-radiation exposure box for 3 months.

The results showed that the B-WPC has lower thermal stability than the other composites. However, the thermal decomposition rate was lower than the other composites. The thermal degradation of PLA was not change after UV radiation exposure. After weathering for 3 month composites had lower thermal stability more than before weathering except B-WPC. In addition, % crystallinity of composites were increased compare to neat PLA but % crystallinity of natural dyed wood composites were decreased compare to AL-WPC. Moreover, the tensile modulus of all composites decreases after 1 month UV-exposure and increase after that. On the other hand, neat PLA and W-WPC have continuously decreased tensile strength but natural dyed wood composites have decreased tensile strength after 1 month exposure then it was increased after 2 month and decreased after 3 month again.

When considering of the overall color change of the material (ΔE), B-WPC have the lowest color change indicated the indigo blue capable to photo stability. Moreover blue color from indigo was able to anti-bacterial but compounding to composites was not able to anti-bacterial.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษา ซึ่งแนะวิธีการทำงานและการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจาก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร ฉาย ทองปิ่น อาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ข้อเสนอแนะและเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความรู้ รวมถึงการติดต่อประสานงานกับบริษัทหรือบุคคลผู้มีความรู้มาให้คำแนะนำในบางโอกาส และขอบคุณภาควิชา วิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งสนับสนุนเรื่องสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ของภาควิชาที่ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือและสารเคมีต่างๆ ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งสุภรวัช นายช่างเทคนิคของภาควิชาที่ช่วยซ่อมบำรุงเครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการทำงาน ขอขอบคุณพนักงานและเจ้าหน้าที่ของภาควิชาที่ช่วยติดต่อประสานงานเรื่องต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอบคุณเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยทุนการศึกษา และ ทุนการนำเสนอผลงาน จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และ วัสดุขั้นสูง และทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขอบคุณคุณศุภักษร ทรัพย์สมบูรณ์ นักวิทยาศาสตร์ของภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ สอนการเลี้ยงเชื้อ ตลอดจนเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการศึกษาผลการด้านเชื้อแบคทีเรียในสิรินธรชาติ, พงไม้ และ วัสดุคอมพอสิต จนกระทั่งสำเร็จได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่มีน้ำใจช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้อง ที่ช่วยเป็นกำลังใจในการทำงานครั้งนี้จนกระทั่งสำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
วิธีการดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป	5
นิยามศัพท์เฉพาะ	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
2 เอกสารและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
พอลิแล็กติก แอซิด	8
กระบวนการผลิตพอลิแล็กติก แอซิด	8
สมบัติของ PLA	9
การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PLA.....	10
การนำไปใช้ประโยชน์ของ PLA.....	10
ผงไม้ธรรมชาติ.....	11
ลักษณะทั่วไปของผงไม้ธรรมชาติ	11
องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้	11
วัสดุคอมพอสิต.....	16
นิยามคอมพอสิต	16
คอมพอสิตไม้-พลาสติก	17
การขึ้นรูปคอมพอสิตไม้-พลาสติก.....	18
ทฤษฎีที่เกี่ยวกับสีและการย้อมสีธรรมชาติ.....	20
สีและองค์ประกอบของการเห็นสี	20

บทที่	หน้า
	ระบบการวัดสีมาตรฐาน 24
	สีธรรมชาติ..... 27
	คุณสมบัติทางเคมีของสี 29
	การย้อมด้วยสีธรรมชาติ..... 33
	สีธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย 35
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 41
3	วิธีดำเนินงานวิจัย..... 49
	วัตถุดิบ 49
	พอลิแล็กติก แอซิด (poly lactic acid, PLA) 49
	ผงไม้สน (pine wood) 49
	3-(Triethoxysilyl)-propanamide; 3-TEPA..... 49
	สีย้อมธรรมชาติ..... 50
	สารเคมีที่ใช้..... 50
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 50
	วิธีการทดลอง 51
	การปรับปรุงผงไม้สนด้วยวิธีการทำ alkaline treatment..... 51
	การสกัดสีธรรมชาติ 51
	การย้อมสีธรรมชาติลงบนผงไม้สน..... 52
	การหา % dye absorption โดยใช้เทคนิค UV-VIS spectroscopy..... 53
	การปรับปรุงผงไม้โดยใช้สารเชื่อมประสาน 3-TEPA 53
	กระบวนการผสม PLA และผงไม้สนชนิดต่างๆ 54
	การทดสอบความเสถียรต่อแสงแดด 55
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้สนชนิดต่างๆ และ วัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA ผสมผงไม้สนชนิดต่างๆ..... 55
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 58
	ประสิทธิภาพของการย้อมสีธรรมชาติในผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิว ด้วยสารละลาย NaOH..... 58

บทที่	หน้า
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้สนผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ ผงไม้สนที่ผ่านย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด.....	62
ความเสถียรทางความร้อนของผงไม้สนบริสุทธิ์ ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด	67
สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตชนิดต่างๆ หลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน	73
ค่าความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิต	73
ความเสถียรทางความร้อน และ ความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันของวัสดุคอมพอสิตหลังจากการจำลองการตากแดดในกล่องแสงยูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน	75
สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตชนิดต่างๆก่อน และ หลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน	82
การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และ กายภาพของวัสดุคอมพอสิต หลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน	89
การเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิต โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน	89
ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุคอมพอสิต	93
ฐานฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิต	99
ผลของการดำนเชื้อแบคทีเรียในสีธรรมชาติ, ผงไม้ที่ย้อมสีธรรมชาติ และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด	99
5 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ	107
สรุปผลการวิจัย	107
ข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม	111
ภาคผนวก	116
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ	117

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบที่ได้จากงานวิจัย	123
ภาคผนวก ค การนำเสนองานวิจัย	142
ประวัติผู้วิจัย	160

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สัญลักษณ์ของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย	7
2	สมบัติของ PLA ที่ผลิตขึ้นทางการค้า.....	10
3	สูตรการผสมของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพระหว่างผงไม้สน และ PLA.....	54
4	ร้อยละการดูดซึ่มสีธรรมชาติแต่ละชนิดในผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย สารละลาย NaOH.....	58
5	ตำแหน่งการดูดกลืนของพีคที่ปรากฏขึ้นในผงไม้สนแต่ละชนิด.....	64
6	ตำแหน่งการดูดกลืนของพีคที่ปรากฏขึ้นใน 3-TEPA	66
7	สมบัติทางความร้อนของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตก่อนการจำลองการ ตากแสงในกล่องรังสียูวีโดยใช้เทคนิค DSC	73
8	ค่าการดูดกลืนรังสี UV-VIS ก่อนและหลังการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน เพื่อคำนวณร้อยละการดูดซึ่ม	120
9	ค่าการดูดกลืนรังสี UV-VIS ก่อนและหลังการย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง เพื่อคำนวณร้อยละการดูดซึ่ม	120
10	ค่าการดูดกลืนรังสี UV-VIS ก่อนและหลังการย้อมสีน้ำเงินจากคราม เพื่อคำนวณร้อยละการดูดซึ่ม	120
11	ความเข้มข้นของตำแหน่งหมู่ลิกนินในโครงสร้างของผงไม้แต่ละชนิด	121
12	ตัวอย่างการคำนวณค่า L^* , a^* และ b^* ของ PLA ก่อน และ หลังการตากแสง เป็นเวลา 5 วัน	122
13	ผลของ DSC ในวัสดุ PLA ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี	130
14	ผลของ DSC ในวัสดุ W-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี	130
15	ผลของ DSC ในวัสดุ AL-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี	130
16	ผลของ DSC ในวัสดุ Y-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี.....	131
17	ผลของ DSC ในวัสดุ R-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี.....	131

ตารางที่		หน้า
18	ผลของ DSC ในวัสดุ B-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี	131
19	ค่าเฉลี่ย และ SD ของ modulus ในวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิต.....	132
20	ค่าเฉลี่ย และ SD ของ tensile strength ในวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิต	132
21	ค่าเฉลี่ย และ SD ของ % elongation ในวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิต	133
22	ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ PLA	138
23	ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ W-WPC	139
24	ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ AL-WPC.....	140
25	ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ Y-WPC	141
26	ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ R-WPC	142
27	ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ B-WPC	143

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กลไกการเกิดอนุมูลอิสระจากการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบลิกนิน (lignin) ในไม้.....	2
2	วัตถุดิบในการสกัดสีธรรมชาติในงานวิจัย	3
3	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเล็กติกแอซิด	8
4	กระบวนการผลิต PLA จาก 2 กระบวนการที่แตกต่างกัน	9
5	องค์ประกอบด้านเนื้อไม้ทั้งสามด้าน	11
6	องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้	12
7	โครงสร้างของเซลลูโลส	12
8	สูตรโครงสร้างของน้ำตาลชนิดต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส	13
9	โครงสร้างทางเคมีของสารเคมีบางชนิดในลิกนิน	14
10	โครงสร้างของสารแทรกบางชนิด	15
11	ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต	16
12	วัสดุหลักในการผลิตคอมพอสิต	17
13	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมพอสิต-ไม้	19
14	อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกชนิดต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิการเสื่อมสภาพ ของไม้.....	20
15	แถบสเปกตรัมแสงและความยาวคลื่นของช่วงคลื่นที่มองเห็น	21
16	การผสมแสงสีหรือแม่สี	22
17	โครมส์คู่ตรงข้าม (complementary color)	23
18	ความสัมพันธ์ของสีตามมาตรฐาน CIE	24
19	CIELAB 1976 ซึ่งมีลักษณะของ color space	26
20	โครงสร้างของสีฟลาโวนอยด์	29
21	โครงสร้างสีเทอร์ปีนอยด์บางชนิด	30
22	โครงสร้าง indigo (blue insoluble) และ โครงสร้าง leucoindigo (slightly yellow soluble)	34
23	สารเชิงซ้อนระหว่างโลหะมอร์แดนท์กับสีย้อมธรรมชาติและเส้นใย.....	34
24	ไม้ฝาง.....	35
25	แก่นของไม้ฝาง.....	36

ภาพที่		หน้า
26	โครงสร้าง brazilin และ brazilein.....	37
27	ต้นขนุน	37
28	แก่นขนุน	38
29	โครงสร้างของ morin	39
30	ต้นคราม	39
31	โครงสร้างของ indigo.....	40
32	Giles' diagrams ของอัตราการจางหายของสี (เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อระยะเวลา)	44
33	การเกิด photochemistry ของ 2-hydroxybenzophenone	47
34	การเกิด photochemistry ของ phenyl salicylate.....	47
35	ลักษณะสีธรรมชาติที่ได้จากการสกัดก่อนการย้อมลงในผงไม้สน	52
36	ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ รีดักชันของโครงสร้างสี indigo	52
37	ผงไม้แต่ละชนิดหลังการปรับปรุงด้วย 3-TEPA	53
38	วัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่ผ่านการผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่	54
39	วัสดุคอมพอสิตหลังจากขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด (injection molding)	55
40	การเกิด tautomerism ของโครงสร้าง morin ในสีเหลืองจากแก่นขนุน.....	59
41	โครงสร้างของ brazilin ในสีแดงจากแก่นไม้ฝาง	60
42	การย้อมสีน้ำเงินจากครามที่ใช้การย้อมแบบวัดในสถานะที่เป็นด่าง.....	60
43	ลักษณะทางกายภาพของผงไม้สนแต่ละชนิด	61
44	FTIR spectra ของผงไม้สน เทียบกับ ผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด	63
45	ผลจากการ normalized lignin ของผงไม้แต่ละชนิด	65
46	FTIR spectra ของ 3-TEPA, ผงไม้สนที่ผ่าน และ ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย สารเชื่อมประสานชนิด silane	66
47	TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด temperature scan ที่สถานะ การทดสอบก๊าซไนโตรเจน	68
48	TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด temperature scan ที่สถานะ การทดสอบก๊าซออกซิเจน	69

ภาพที่		หน้า
49	DTG Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด temperature scan ที่สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน	71
50	TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด isothermal ที่อุณหภูมิการทดสอบ 280 องศาเซลเซียส ในสภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน	71
51	TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด isothermal ที่อุณหภูมิการทดสอบ 280 องศาเซลเซียส ในสภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน	72
52	% crystallinity ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังจากผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน	74
53	TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน	76
54	DTG Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน	76
55	TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน	77
56	DTG Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน	78
57	เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ.....	79
58	เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ W-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ.....	79
59	เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ AL-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ.....	79
60	เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ Y-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ.....	80
61	เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ R-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ.....	81
62	เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ B-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ.....	81

ภาพที่		หน้า
63	ค่า modulus ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการตากจำลอง การตากแสงในกล่องรังสียูวี.....	83
64	ค่า tensile strength at break ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการ ตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี.....	84
65	ค่า % elongation ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการตากจำลอง การตากแสงในกล่องรังสียูวี.....	85
66	ค่า modulus ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังผ่านการจำลอง การตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน.....	86
67	ค่า tensile strength ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังผ่านการ จำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน.....	87
68	% elongation ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังผ่านการ จำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน.....	88
69	FTIR spectra ของ PLA บริสุทธิ์ก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี.....	90
70	กลไกการเสื่อมสภาพของ PLA ที่ทำให้เกิดสารประกอบคาร์บอกซาลิก.....	90
71	โครงสร้างของลิกนิน.....	91
72	กลไกในการสลายตัวขององค์ประกอบลิกนิน.....	92
73	FTIR spectra ของ W-WPC ก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี.....	93
74	ความสว่างของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิต หลังผ่านการจำลองการตาก แสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน.....	94
75	ความแตกต่างของค่าความสว่าง (ΔL^*) ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อนและ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน.....	95
76	ค่า b^* ของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิต หลังผ่านการจำลองการตากแสง ในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน.....	97
77	ความแตกต่างของค่า b^* (Δb^*) ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อนและหลังการ ตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน.....	97
78	ความแตกต่างของค่าความสว่าง (ΔE) ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อนและ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน.....	98

ภาพที่		หน้า
79	ภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลที่หักหลังจุ่ม ในไตรเจนเหลวของวัสดุต่างๆที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ PLA, W-WPC และ AL-WPC	100
80	ภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลที่หักหลังจุ่ม ในไตรเจนเหลวของวัสดุต่างๆที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ Y-WPC, R-WPC และ B-WPC	101
81	ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> (ชนิดแกรมบวก) ของ สีย้อมจากธรรมชาติทั้งสามชนิด	102
82	ผลการทดสอบการต้านเชื้อของแบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i> (ชนิดแกรมลบ) ของ สีย้อมจากธรรมชาติทั้งสามชนิด	103
83	ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย <i>Bacillus subtilis</i> (ชนิดแกรมบวก) ของ ผงไม้ที่ได้รับการสีย้อมจากธรรมชาติ เทียบกับผงไม้สน	104
84	ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i> (ชนิดแกรมลบ) ของ ผงไม้ที่ได้รับการสีย้อมจากธรรมชาติ เทียบกับผงไม้สน	105
85	ผลการทดสอบการต้านเชื้อของจุลินทรีย์ <i>Escherichia coli</i> (ชนิดแกรมลบ) ของ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด เทียบกับ PLA บริสุทธิ์ และกระดาษที่มีตัวยาด้าน เชื้อแบคทีเรีย	106
86	calibration curve ของสีเหลืองจากแก่นขนุนทั้งก่อน และ หลังย้อมสีลงในผงไม้	118
87	calibration curve ของสีแดงจากแก่นไม้ฝางทั้งก่อน และ หลังย้อมสีลงในผงไม้	119
88	calibration curve ของสีน้ำเงินจากครามทั้งก่อน และ หลังย้อมสีลงในผงไม้.....	119
89	ผลจากการ heat ครั้งที่ 2 ของ PLA บริสุทธิ์ตำแหน่งการเกิดผลึก	122
90	ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีเหลืองจากแก่นขนุน.....	124
91	ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีแดงจากไม้ฝาง	125
92	ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีน้ำเงินจากคราม.....	126
93	ผลการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ ก่อนการตากจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี	127
94	ผลการทดสอบ DSC ของ W-WPC ก่อนการตากจำลองการตากแสงใน กล่องรังสียูวี	127

บทที่ 1

บทนำ

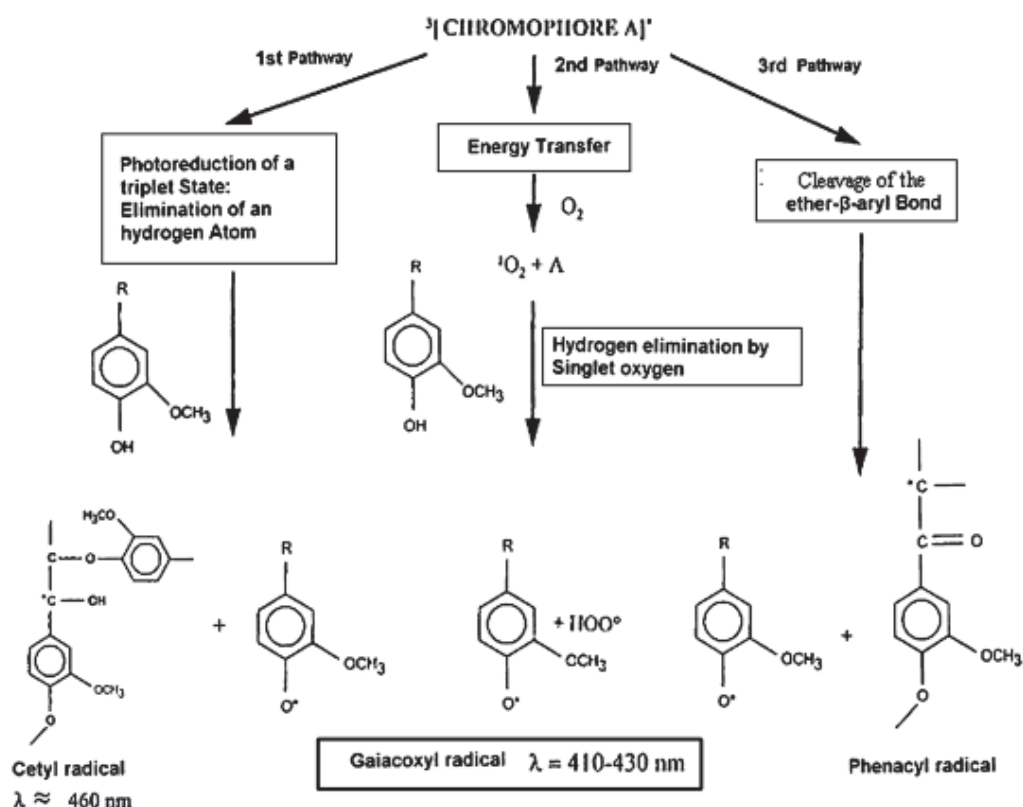
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

การสะสมของพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (non-biodegradable plastics) ในสิ่งแวดล้อม เช่น พอลิเอทิลีนส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เนื่องจากพลาสติกบนโลกนี้เป็นขยะมีมากกว่า 200 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 5% ต่อปี แม้ว่า พอลิเมอร์จากปิโตรเลียมซึ่งเป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่ย่อยสลายไม่ได้ จะมีราคาถูก และสะดวกสบายในการผลิต และยังสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง แต่มันก็ก่อให้เกิดปัญหาปริมาณขยะพลาสติกจำนวนมาก [1] ในปัจจุบันจึงมีการประยุกต์นำเอาวัสดุที่มีองค์ประกอบพื้นฐานที่เป็น “เซลลูโลส” ที่ได้จากธรรมชาติเติมลงไปในวัสดุ thermoplastic composite เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ เช่น เพิ่มความทนทานต่อสารเคมีที่ดี มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรงที่สูง รวมถึง มีการย่อยสลายที่ง่ายขึ้น [2] แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มักเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมที่ยาก จึงทำให้พลาสติกเหล่านี้จะเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในด้านการกำจัดทิ้ง [3] ดังนั้น การเติมสารตัวเติมจากธรรมชาติลงในพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) จะสามารถผลิตเป็น eco-composite ที่น่าสนใจ เนื่องจาก PLA และผงไม้เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ มีความยั่งยืนในการนำมาใช้งาน ใช้พลังงานในการผลิตค่อนข้างน้อย สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย รวมถึงยังสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ตามธรรมชาติและไม่ว่าก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [4]

โดยทั่วไปแล้ววัสดุคอมพอสิตเป็นที่ยอมรับ และ ถูกใช้อย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป สำหรับสมบัติของวัสดุคอมพอสิตไม้ผสมพลาสติกนั้น จะเป็นการรวมเอาคุณสมบัติ ทั้งข้อดีและข้อด้อยของวัสดุทั้งสองชนิดเข้าไว้ด้วยกัน โดยสมบัติที่โดดเด่นก็คือความสามารถในการทนความชื้นที่ดี ด้านทานสารเคมีบางชนิด (ขึ้นอยู่กับพลาสติกที่ใช้) ด้านทานปลวกและมอด รวมถึงสามารถนำไปใช้งานที่ทดแทนไม้แผ่นจริงๆ หรือเสาที่ไม่ได้เป็นส่วนที่รับแรงโดยตรง ส่วนข้อด้อยนั้น จะเป็นเรื่องอายุการใช้งาน ซึ่งอาจไม่ทนทานนานเท่าไม้ปกติ เนื่องจากการใช้งานวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติกนี้มักจะอยู่กลางแจ้ง ซึ่งได้รับอิทธิพลของสภาพอากาศโดยตรง โดยที่สภาพอากาศจะเป็นตัวเร่งทำให้วัสดุคอมพอสิตเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควรจะเป็น เช่น แสงแดดจะเร่งการเกิดออกซิเดชันในเนื้อวัสดุ ทำให้สีไม้จะซีดจางลง [5] รวมถึง สมบัติการย่อย

สลายทางธรรมชาติเร็วจนเกินไปทำให้อายุในการใช้งานของวัสดุคอมพอสิตมีค่าที่น้อยลง ทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการนำวัสดุคอมพอสิตมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งทำให้สมบัติเชิงกลต่างๆ จะลดลงไปอีกด้วย ดังนั้นหากจะนำเอาวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ (bio-composite) มาใช้ในอุตสาหกรรม จะไม่เหมาะสม เนื่องจากมันอาจจะเกิดการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม เช่น รังสียูวีจากแสงแดดได้

สำหรับการเสื่อมสภาพของไม้นั้น ปัจจัยหลักเกิดจากองค์ประกอบของลิกนินในโครงสร้างของไม้ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดการเสื่อมสภาพจากแสง จากภาพที่ 1 การเสื่อมสภาพของลิกนินเกิดได้หลายเส้นทางที่ทำให้เกิด phenoxy radicals ส่งผลทำให้เกิดการแตกออกของสายโซ่ของพอลิเมอร์ในผนังไม้ และทำให้เกิดสารประกอบ quinone ที่เป็นหมู่ chromophore ซึ่งดูดกลืนแสงทำให้เกิดสีเหลืองในชิ้นงาน [6] ดังนั้น การใช้งานวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับแสงแดดนั้นให้สามารถใช้งานได้นานจะต้องปรับปรุงสมบัติของวัสดุ ซึ่งกระทำได้หลายวิธี เช่น การทาสีทึบเพื่อเคลือบผิว การเติมสารเติมแต่งประเภทสารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน การปกป้องผิวด้วยสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนรังสียูวีจากแสงได้ ปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี หรือ ทำการย้อมสีไม้ เป็นต้น



ภาพที่ 1 กลไกการเกิดอนุมูลอิสระจากการเสื่อมสภาพขององค์ประกอบลิกนิน (lignin) ในไม้ [6]

วิธีการหนึ่งในการปรับปรุงวัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก คือ การย้อมสีเนื้อไม้ ซึ่งการใช้สีในการย้อมนั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้สีสังเคราะห์ เนื่องจากมีขั้นตอนในการย้อมที่ง่ายไม่ยุ่งยาก มีสีสดใสสวยงาม รวมถึงมีเฉดสีให้เลือกได้ตามต้องการทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกดึงดูดใจ และทำให้วัสดุคอมพอสิตน่าใช้มากขึ้น แต่ในปัจจุบันผู้คนเริ่มหันมาตื่นตัวในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมมากขึ้น เนื่องจาก ผลจากการย้อมด้วยสีสังเคราะห์ที่มีลักษณะโครงสร้างที่เสถียรเกินไป ทำให้สีที่เหลือจากกระบวนการย้อมนั้นกำจัดยาก และถ้าบำบัดไม่ถูกวิธีอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติได้ ส่งผลทำให้เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้นักวิจัยเริ่มกลับมาสนใจในสีจากธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากเห็นว่าเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ใช้ไม่มีวันหมด สามารถหาใช้ได้ง่าย รวมถึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม สีธรรมชาติก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้ กล่าวคือ ร้อยละในการดูดซึมสี ความคงทนต่อแสง และ ความเสถียรต่อแสงค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการพัฒนาให้สีธรรมชาติมีความเสถียรที่ดีจึงเป็นสิ่งที่นักวิจัยในปัจจุบันต้องศึกษามากขึ้น [7]



ภาพที่ 2 วัตถุดิบในการสกัดสีธรรมชาติในงานวิจัย ก) สีเหลืองจากแก่นขมิ้น ข) สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ค) สีน้ำเงินจากคราม

จากงานวิจัยของนายอวต ศิริสุขไพบูลย์ [5] ได้ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอสิตชนิด HDPE ที่ผสมไม้ยางพารา โดยทำการย้อมสีในผงไม้ยางพาราก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิต ซึ่งสีที่เลือกใช้ในการศึกษา คือ สีแดง จากสีสังเคราะห์ (สีโคเร็กซ์) และสีจากธรรมชาติ (สีจากแก่นไม้ฝาง) มาเปรียบเทียบกัน พบว่า การย้อมสีแดงจากไม้ฝางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) น้อยที่สุด อีกทั้งสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างจากการย้อมสีโคเร็กซ์มากนัก ดังนั้น ในการใช้งานวัสดุคอมพอสิตภายนอกอาคารควรเลือกการย้อมสีธรรมชาติเพื่อเพิ่มความคงทนของสีจากแสงให้กับวัสดุคอมพอสิต

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุคอมพอสิตชนิดที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ เพื่อให้มีความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมด้วยวิธีการย้อมสีธรรมชาติในผงไม้สนโดยใช้วิธีเดียวกันกับการย้อมสีเส้นใยในสิ่งทอมาใช้กับผงไม้สนก่อนที่จะนำไปผสมกับพลาสติก โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ คือ PLA และเลือกใช้สีธรรมชาติ ทั้งหมด 3 ชนิดมาทำการย้อม ได้แก่

สีแดงจากแก่นไม้ฝาง สีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีนํ้าเงินจากคราม ที่แสดงในภาพที่ 2 โดยก่อนการย้อมสีธรรมชาติลงในผงไม้สน จะต้องผ่านขั้นตอนการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH (alkaline treatment) เพื่อกำจัดองค์ประกอบบางอย่างในผงไม้ เช่น เฮมิเซลลูโลส รวมถึง ลิกนิน ออกบางส่วน เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถการย้อมติดสีผงไม้ที่ดี โดยใช้สารช่วยย้อมติดสีคือ อลูมิเนียมซัลเฟต $[Al_2(SO_4)_3]$ โดยหลังจากการย้อมแล้ว ในขั้นตอนการผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิต จะมีการใส่สารเชื่อมประสานลงไปผสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ หลังจากนั้น ทำการศึกษาเปรียบเทียบความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของสีทั้งสามชนิด และ สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของวัสดุคอมพอสิต รวมถึงศึกษาถึงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และ ทางเคมีของวัสดุคอมพอสิตหลังจากการขึ้นรูปด้วยวิธีการ injection molding เพื่อผลิตเป็นชิ้นงาน dog bone และทำการเปรียบเทียบกับหลังจากนำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาชนิดและขั้นตอนการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดลงในผงไม้สนที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต PLA ผสมผงไม้สน เพื่อศึกษาความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากแสงแดด โดยจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของการย้อมสีผงไม้สนด้วยสีธรรมชาติที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุคอมพอสิต PLA ผสมผงไม้สน

1.2.3 ศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิต เปรียบเทียบ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และ ทางเคมี รวมถึงความเสถียรทางสภาพแวดล้อม และ ผลของการต้านเชื้อแบคทีเรียของวัสดุคอมพอสิตก่อนและหลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวี เป็นระยะเวลา 3 เดือน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 วัสดุคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ คือ poly (lactic acid); PLA และ ผงไม้สนที่มีขนาดอนุภาค 200 mesh (60-70 μm) ปริมาณ 20 % โดยน้ำหนัก โดยใช้สารเชื่อมประสาน คือ 3-(Triethoxysilyl)-Propanamide (3-TEPA) 5 % โดยน้ำหนักของผงไม้

1.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทำ alkaline treatment คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร และใช้กรดอะซิติก (CH_3COOH) ในการสะเทินให้เป็นกลาง

1.3.3 สีธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ สีเหลืองจากแก่นขนุน สีแดงจากแก่นไม้ฝาง และสีน้ำเงินจากคราม โดยสีเหลือง และ สีแดงจะทำการย้อมที่อุณหภูมิสูง โดยใช้สารช่วยย้อมคือ อลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) สำหรับสีน้ำเงินจากครามจะทำการย้อมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมไดไธโอไนต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) เปลี่ยนจากโครงสร้างสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ให้เป็นโครงสร้างสีที่สามารถละลายน้ำ แล้วจึงย้อมที่อุณหภูมิห้อง

1.3.4 วัสดุคอมพอสิตทั้งหมดจะขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดเป็นรูป dog bone แล้วจึงนำไปจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีที่มีอุณหภูมิระหว่าง 23-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\% \text{RH}$ เป็นเวลา 3 เดือน

1.3.5 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่ พฤษภาคม 2554 ถึง เดือน มีนาคม 2555 ณ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ตำบลสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัยโดยสังเขป

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าตำราหนังสือหรือแม้กระทั่งบทความที่เกี่ยวข้องและจะช่วยให้เกิดประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ เพื่อเตรียมตัวและวางแผนการดำเนินงานวิจัย

1.4.2 ออกแบบวิธีการทดลองรวมถึงวางแผนการดำเนินงานวิจัย

1.4.3 ดำเนินงานวิจัยตามที่วางแผน

1.4.3.1 นำผงไม้สนขนาด 200 mesh (60-70 μm) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำการปรับปรุงผิวผงไม้สน และกำจัดออกประกอบบางอย่าง เช่น เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน โดยกวนด้วยใบพัดตลอดระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นสะเทินด้วยกรดอะซิติก และล้างด้วยน้ำกลั่นทั้งหมด 5 รอบ เพื่อกำจัดเกลือที่เกิดขึ้น

1.4.3.2 ย้อมสีผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ย้อมสีธรรมชาติทั้งหมด 3 ชนิด โดยให้ร้อยละการดูดซับสี (absorption) มากกว่า 60 % ของปริมาณสีเริ่มต้นที่ย้อม โดยใช้เทคนิค UV-VIS Spectroscopy ในการตรวจสอบ

1.4.3.3 ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้สน ผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH และ ผงไม้สนที่ย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ด้วยเทคนิค TR-FTIR รวมถึงศึกษาเสถียรภาพ

ทางความร้อนของผงไม้สนทั้งหมดด้วยเทคนิค TGA ในสภาวะไนโตรเจน และ ออกซิเจน ในโหมด temperature scan และ isothermal เพื่อดูอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว อัตราการสลายตัวของผงไม้ในแต่ละชนิด และ ปริมาณขี้เถ้าที่เหลือ

1.4.3.4 จากนั้นทำการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารเชื่อมประสาน 3-TEPA 5% โดยน้ำหนักของผงไม้ โดยใช้สารตัวกลางคือเอทานอลผสมกับน้ำในอัตราส่วน 60:40 โดยปริมาตร แล้วค่อยๆพ่นลงบนผิวผงไม้สน จากนั้นผสมในเครื่องปั่นผสมด้วยความเร็วสูง (internal mixer)

1.4.3.5 พิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค TR-FTIR เพื่อดูว่าสารเชื่อมประสานยึดติดกับผงไม้สนหรือไม่

1.4.3.6 ผสมผงไม้ทั้งหมด (บริสุทธิ์, ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด) ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย 3-TEPA และ พอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA ในอัตราส่วน 20:80 โดยน้ำหนัก ในเครื่อง co-rotating twin-screw extruder ที่อุณหภูมิกระบอกหลอมระหว่าง 155-180 องศาเซลเซียส โดยความเร็วรอบสกรูที่ 90 rpm จากนั้นทำการบดวัสดุคอมพอสิตที่ได้ด้วยเครื่อง grinder ให้เป็นเม็ดวัสดุคอมพอสิต จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน dog bone ด้วยเครื่อง injection molding

1.4.3.7 ทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพก่อนการรับแสง เพื่อเปรียบเทียบวัสดุคอมพอสิตในแต่ละชนิด โดยวัดออกมาเป็นค่า modulus, tensile strength และ % elongation ตามมาตรฐาน ASTM D638 รวมถึงศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DSC อีกทั้งศึกษาลักษณะทางกายภาพ และ ทางเคมีพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดด้วยการวัดสีของชิ้นงานด้วยเครื่อง color reader ตามระบบ CIE L*a*b* และ ATR-FTIR เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันที่บริเวณพื้นผิว ตามลำดับ นอกเหนือจากนั้น ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของผงไม้ในวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดด้วยเทคนิค SEM

1.4.3.8 ศึกษาอิทธิพลของแสงแดด โดยการจำลองสภาวะตากแสงในกล่องรังสียูวี ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 23-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 %RH เป็นเวลา 3 เดือนติดต่อกัน โดยทำการวัดความแตกต่างของค่าความสว่าง (ΔL^*), ความแตกต่างของค่า a^* (Δa^*) และ ความแตกต่างของค่า b^* (Δb^*) เพื่อหาความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) โดยจะเก็บตัวอย่างมาวัดทุกๆ 5 วัน รวมถึง สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DSC การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวหลังการตากแสงในกล่องแสงยูวีด้วยเทคนิค ATR-FTIR อีกทั้งลักษณะพื้นฐานหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีด้วยเทคนิค SEM โดยการทดสอบจะทำการทดสอบในทุกๆ เดือน

1.4.3.9 ศึกษาผลของการดำนเชื้อแบคทีเรียที่พบมากในสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาจากสีธรรมชาติที่สกัดออกมาได้ ผงไม้หลังจากการย้อมสีธรรมชาติ และวัสดุคอมพอสิตที่ผสมผงไม้ที่

ย้อมสีธรรมชาติแล้ว โดยแบคทีเรียที่เลือกมาศึกษามี 2 ชนิด ชนิดแรก เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ชื่อ *Bacillus subtilis* ส่วนชนิดที่สองเป็นแบคทีเรียแกรมลบ ชื่อ *Escherichia coli* โดยทำการเลี้ยงเชื้อใน nutrient agar (NA) และ nutrient broth (NB) เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นดู clear zone ที่เกิดขึ้น

1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

1.4.5 สรุปผลการวิจัยที่เกิดขึ้น

1.4.6 รายงานผลการวิจัย และ เสนอผลงานวิจัย

1.4.6.1 เสนอผลงานในรูปแบบรายงาน (report)

1.4.6.2 เสนอผลงานในรูปแบบนำเสนอปากเปล่า (oral presentation)

1.4.6.3 เสนอผลงานในรูปแบบโปสเตอร์ (poster presentation)

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	ชิ้นงาน
PLA	PLA บริสุทธิ์
W-WPC	PLA ผสมผงไม้สน
AL-WPC	PLA ผสมผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH
Y-WPC	PLA ผสมผงไม้สนที่ย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน
R-WPC	PLA ผสมผงไม้สนที่ย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง
B-WPC	PLA ผสมผงไม้สนที่ย้อมสีน้ำเงินจากคราม

1.6 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สีธรรมชาติช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน รวมถึงลักษณะทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุคอมพอสิต

1.6.2 สีธรรมชาติช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุคอมพอสิตเกิดการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อมหลังจากการตากแดด

1.6.3 ส่งเสริมให้มีการพัฒนาให้สีธรรมชาติมีความสามารถในการต้านการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อมมากขึ้น อีกทั้งปรับปรุงคุณสมบัติความคงทนต่อแสงให้ดีขึ้น

1.6.4 สามารถใช้งานไม่เทียม เมื่อได้รับแสงแดดที่ยาวนานมากขึ้น ให้สีไม่เกิดการเสื่อมสภาพ รวมถึงมีความสามารถในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั่วไปได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

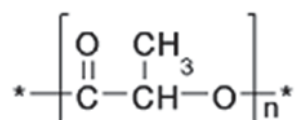
2.1 พอลิแล็กติก แอซิด (poly lactic acid, PLA) [8]

เป็นพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการหมักพืชจำพวกแป้ง ข้าวโพด เป็นต้น PLA เป็นแหล่งคาร์บอนที่ได้จากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นทดแทนได้โดยคาร์บอนที่ดูดซับโดยพืช กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรก โดยนักวิจัยของบริษัท Dupont ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ W.H. Carothers ในปี 1932 โดยการให้ความร้อนแก่กรดแล็กติกภายใต้ความดันสุญญากาศ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และได้จดสิทธิบัตรไว้ในปี 1954 หลังจากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากราคาที่สูงของ PLA ทำให้การนำไปใช้งานมุ่งเน้นไปทางด้านการแพทย์ และเภสัชกรรมมากกว่า

บริษัท Cargill, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิต PLA โดยในปี 1987 ได้เริ่มทำการวิจัยเพื่อผลิตกรดแล็กติก, แล็กไทด์ และ PLA ซึ่งผลิตภัณฑ์ PLA มีชื่อทางการค้าว่า NatureWorks® ออกมาสู่ตลาดบริษัท ในปี 2005

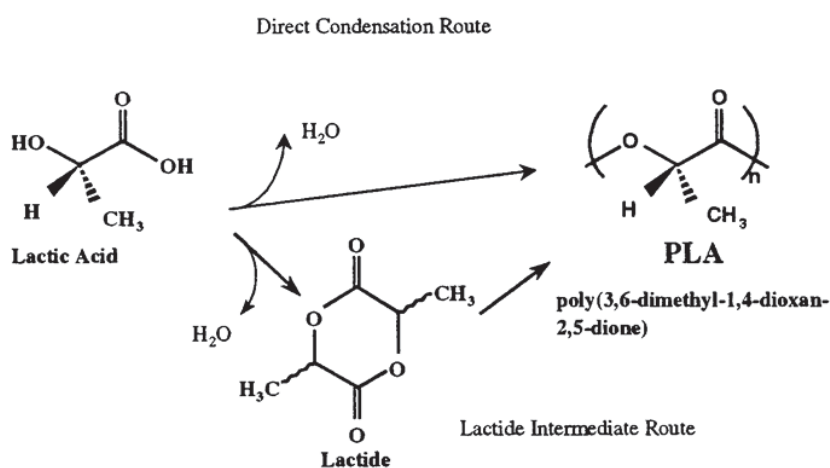
2.1.1 กระบวนการผลิตพอลิแล็กติก แอซิด [9]

เริ่มต้นจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบโดยการปลูกข้าวโพด ซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และ น้ำ เป็นวัตถุดิบ จากนั้นจะผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ได้ผลผลิตเป็นแป้งจึงนำเอาแป้งข้าวโพดมาผ่านกระบวนการหมักบ่มโดยใช้จุลินทรีย์เฉพาะ เพื่อย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้ง และ น้ำตาล เป็นกรดแล็กติก (lactic acid, C₃H₆O₃) ซึ่งใช้เป็นมอนอเมอร์ในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 กระบวนการที่แตกต่างกัน คือ กระบวนการควบแน่น (poly-condensation) และ กระบวนการเปิดวง (ring-opening polymerization)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด [9]

ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการนี้จะมีโครงสร้างและสมบัติต่างๆ เหมือนกันทุกประการ แต่ก็มีรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ที่ต่างกัน จึงเป็นที่มาของการเรียกชื่อพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการแรกมักจะเรียกว่า “พอลิแล็กติก แอซิด” ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการใช้กรดแล็กติกโดยตรงจนได้พอลิเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย แต่ในกระบวนการที่สองจะมีการเปลี่ยนกรดแล็กติกโดยปฏิกิริยาการรวมตัวของกรดแล็กติก 2 โมเลกุล แล้วเกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่มีชื่อว่า “แล็กไทด์” (lactide) ก่อน จากนั้นจึงนำเอาวงแหวนแล็กไทด์นี้มาสังเคราะห์เป็นสายโซ่ยาวพอลิเมอร์ในขั้นตอนต่อมา ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชื่อผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์จากกระบวนการนี้ว่า “พอลิแล็กไทด์” ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการผลิต PLA จาก 2 กระบวนการที่แตกต่างกัน [10]

2.1.2 สมบัติของ PLA

PLA มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ PLA มีสมบัติทางกล และสามารถนำไปใช้งานได้ เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความทนต่อการกระแทก (impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรงพลาสติก มีความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก และ ความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ พอลิเอทิลีน (PE) หรือ พอลิโพรพิลีน (PP) ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้ เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟินที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี ซึ่งสมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้าได้ แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของ PLA ที่ผลิตขึ้นทางการค้า [9]

สมบัติ	NatureWork® PLA	Biomer® L9000
ความหนาแน่น (g/ml)	1.24	1.25
T_g (°C)	56.7-57.9	n/a
T_m (°C)	140-152	n/a
HDT (°C)	40-45 (Amorphous) 135 (Crystalline)	n/a
Tensile strength (MPa)	53	70
Elongation (%)	6	2.4
Flexural modulus (MPa)	350-450	3,600

n/a ไม่สามารถทดสอบได้

2.1.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PLA

PLA สามารถย่อยสลายได้ดีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่จะไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิ glass-transition: T_g ใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ และ กรดแล็กติกโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ จากนั้นสารประกอบที่ได้ และ กรดแล็กติกที่ได้จะถูกย่อยต่อไปโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆโดยการ metabolism อย่างรวดเร็วไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และ มวลชีวภาพ

2.1.4 การนำไปใช้ประโยชน์ของ PLA

PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลาย ทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่

2.1.4.1 ด้านการแพทย์ เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) จึงสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) เช่น ไหมเย็บแผล (sutures), ตัวเย็บแผล (staples), วัสดุปิดแผล (wound dressing), วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.4.2 ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช, วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง, ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด

2.1.4.3 ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง, ภาชนะบรรจุอาหาร, ขวดน้ำ, ถุงพลาสติก กล่องโฟม, ฟิล์มสำหรับหีบห่อ, เม็ดโฟมกันกระแทก, ตัวเคลือบภาชนะกระดาศ

2.1.4.4 ด้านอื่นๆ เช่น เส้นใย, อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (bumpers), ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่, สารยึดติด เป็นต้น

2.2 ผงไม้ธรรมชาติ [11]

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของเนื้อไม้

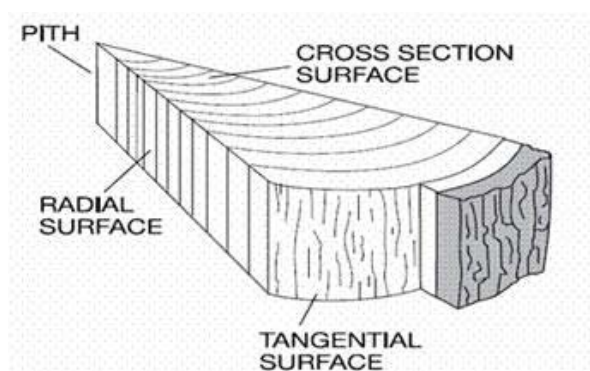
2.2.1.1 ด้านของเนื้อไม้

เนื้อไม้หรือไซเลมของต้นไม้ ถูกหุ้มด้วยแคมเบียม แล้วหุ้มด้วยเปลือก ซึ่งมีส่วนของโฟมอยู่ด้านในอีกชั้นหนึ่งเนื้อไม้เป็นวัสดุที่มีลักษณะและคุณสมบัติในด้านต่างๆไม่เหมือนกัน (Anisotropic) ด้านของเนื้อไม้แบ่งออกได้เป็นสามด้านด้วยกันคือ

2.2.1.1.1 ด้านหน้าตัด (cross or transverse section) คือ ด้านที่ตัดขวางตั้งฉากกับลำต้น

2.2.1.1.2 ด้านรัศมี (radial section) คือ ด้านที่ตัดตามยาวในแนวของแถบเซลล์รัศมีซึ่งมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ใจไม้ (pith)

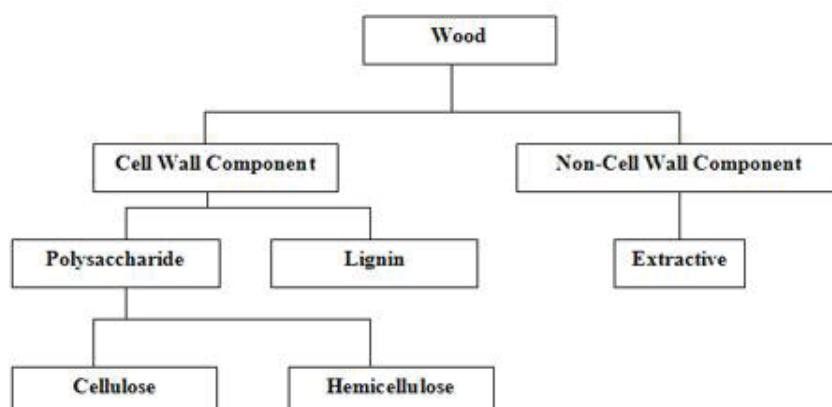
2.2.1.1.3 ด้านสัมผัส (tangential section) คือ ด้านที่ตัดตามยาวในแนวตั้งฉากกับแถบเซลล์รัศมี ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 องค์ประกอบด้านเนื้อไม้ทั้งสามด้าน [11]

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้

เนื้อไม้ประกอบด้วยสารประกอบต่างๆ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยที่สำคัญได้ดังนี้

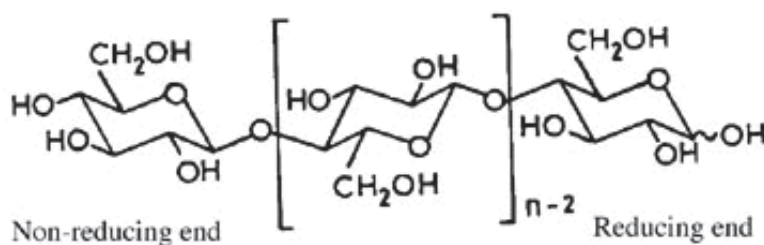


ภาพที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ [11]

2.2.2.1 เซลลูโลส (cellulose)

เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดของเนื้อไม้ คือประมาณ 40% ทั้งในไม้ใบแคบหรือไม้ตระกูลสน (softwood) และไม้ใบกว้าง (hardwood) มีโครงสร้างอัดกันแน่นเป็นเส้นตรงไม่มีกิ่ง มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $(C_6H_{10}O_5)_n$ จะซ้ำกัน 2 ลักษณะ เรียกว่า cellobiose unit ซึ่งส่วนปลายของทั้งสองข้าง คือ reducing end group (C1) ส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ง่ายสุด และ non-reducing end group (C4) ส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา โดยส่วนใหญ่แล้วจำนวนโมเลกุลของ glucose unit (DP = degree of polymerization) เท่ากับ 1000-3000 หรือ 4000 และแต่ละ unit ยึดเกาะกันด้วยพันธะ 1,4-β-D-anhydro-glucosidic bonding ดังแสดงในภาพที่ 7

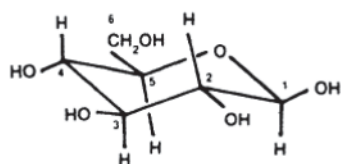
เซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์สะเทิน (neutral organic solvent) เช่น เบนซีน แอลกอฮอล์ และ อีเทอร์ เป็นต้น แต่จะละลายได้ดีใน กรดเกลือ และ กรดกำมะถันเข้มข้น



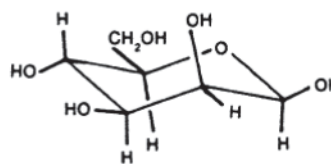
ภาพที่ 7 โครงสร้างของเซลลูโลส [12]

2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

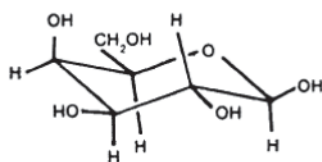
เฮมิเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสที่จัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ และ ไม่มีความแน่นอนในโครงสร้าง (amorphous) ประกอบด้วยหน่วยซ้ำของน้ำตาลเชื่อมกันด้วยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4) และมีกิ่งที่พันธะ (1 $\rightarrow$ 2) (1 $\rightarrow$ 3) หรือ (1 $\rightarrow$ 6) มีค่า DP ต่ำประมาณ 100-200 มีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลดังนี้ 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- ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งเป็นตัวอย่างสูตรโครงสร้างของมอนอเมอร์น้ำตาลบางชนิดในเฮมิเซลลูโลส



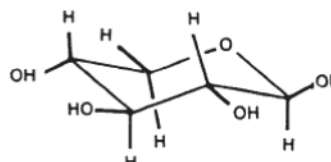
β -D-Glucose
 β -D-Glucopyranose
 β -D-Glup



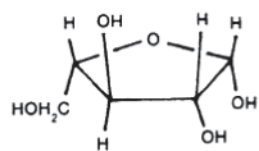
β -D-Mannose
 β -D-Mannopyranose
 β -D-Manp



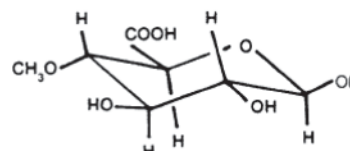
β -D-Galactose
 β -D-Galactopyranose
 β -D-Galp



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

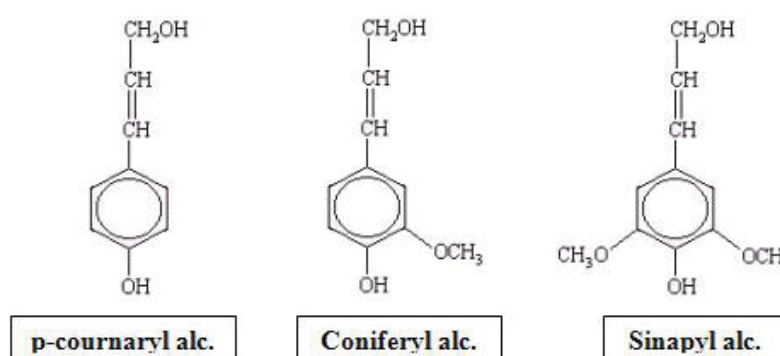
ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้างของน้ำตาลชนิดต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลส [13]

ประโยชน์ของเฮมิเซลลูโลส

- ในรูปมอนอเมอร์ (monomer) สามารถแยกน้ำตาลโดยวิธีไฮโดรไลซิส (hydrolysis คือ การสลายพันธะของโมเลกุลโดยใช้น้ำเป็นตัวย่อยสลาย) ทำให้โมเลกุลของสาร และ คุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เรียกวิธีนี้ว่า การทำน้ำตาลจากเนื้อไม้ (wood saccharification)
- ในรูปพอลิเมอร์ (polymer) มีผลทำให้ผลผลิตเยื่อมากขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (amorphous) น้ำจึงเข้าไปได้ง่าย เกิดการพองตัวของเยื่อทำให้อุ่นน้ำได้ดี มีประโยชน์ในการตีเยื่อ คือ ทำให้ผิวของเส้นใยแตกออกเกิดการประสานตัวด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ทำให้เยื่อมีความแข็งแรงมากขึ้น
- เมื่อนำไปสังเคราะห์ทางเคมีได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารเติมแต่งทำให้อาหารข้น (food additive) ใช้ในเครื่องสำอาง, เป็นตัว absorbent (jelly agent), ตัวเชื่อมประสาน (adhesive) เป็นต้น

2.2.2.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ มีความซับซ้อน ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติกของ Phenyl propane เป็นหลักซึ่งสามารถแทนที่ที่ตำแหน่ง α , β , หรือ γ และรวมกันอยู่ด้วยพันธะอีเทอร์ (C-O-C) และ คาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ลิกนินสามารถแยกประเภทได้หลายรูปแบบแต่ที่นิยม คือ แบ่งตามองค์ประกอบของโครงสร้างทางเคมี สำหรับไม้เนื้ออ่อนมักประกอบด้วย coniferyl alcohol เรียกว่า guaiacyl lignin ส่วนไม้เนื้อแข็งมักประกอบด้วย coniferyl และ sinapyl alcohols จะเรียกว่า syringyl-guaiacyl lignin ลิกนินมักอยู่ที่ชั้นผนังเซลล์ชั้นที่ 2 และมากที่สุดที่กลางชั้น ภาพที่ 9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารบางชนิดของลิกนิน



ภาพที่ 9 โครงสร้างทางเคมีของสารเคมีบางชนิดในลิกนิน [11]

ลิกนินเป็นสารพอลิเมอร์ที่ซับซ้อนกว่า cellulose กับ hemicellulose และเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ชนิดหนึ่ง พบใน ไม้ใบกว้าง (hardwood), ไม้ใบแคบ (softwood), พืช

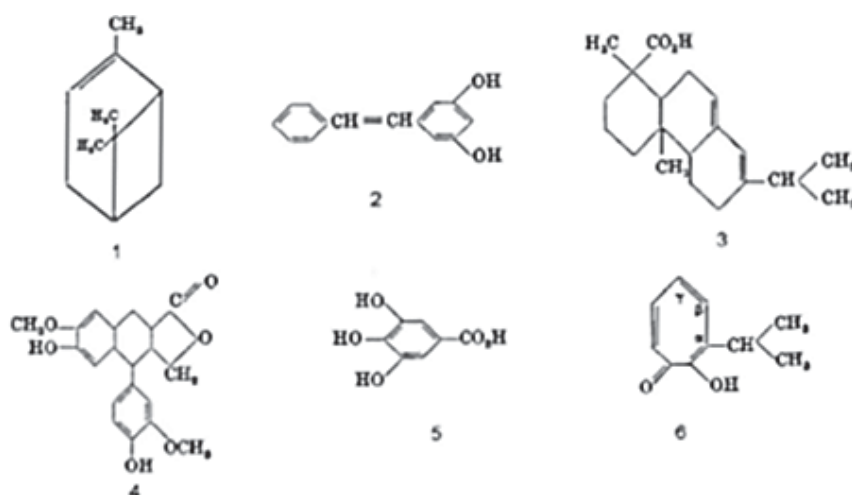
ล้มลุก (grasses) และพืชล้มลุกทั่วไป ค่า glucose unit (DP = degree of polymerization) เยอะ มีลักษณะโครงสร้างเป็น 3 มิติ ทำหน้าที่เป็น cell wall adhesive ยึดเส้นใยที่อยู่รวมกันให้เป็นโครงสร้างของเนื้อไม้

ประโยชน์ของลิกนิน

- ลิกนินที่ได้จากการต้มเชื้อกระดาษสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้
- ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเมื่อนำมาสังเคราะห์จะได้สารอินทรีย์ เช่น วานิลลิน (vanillin), ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide = DMSO)
- ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักใช้ในรูปของแหล่งลิกนินที่ได้มาโดยตรง เช่น ลิกนิน ซัลโฟเนตหรือคราฟลิกนิน และ ลิกนินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงใช้กันมากในอุตสาหกรรมการชุบเจาน้ำมัน ทำสี ทำยาฆ่าแมลง ทำซีเมนต์ ทำยาง และอาจใช้เป็นตัวเพิ่ม (extenders) ในกาาพีนอล

2.2.2.4 สารแทรก (extractives)

สารแทรก คือ สารที่ไม่ใช่องค์ประกอบของโครงสร้างของผนังเซลล์ อาจเป็นกรดหรือเป็นกลางก็ได้ มีตั้งแต่ สารไอโซพรีน เทอร์พีน เฮทเทอโรไซคลิก กรดเรซิน สารพอลิฟีนอลต่างๆ และ แอลคาลอยด์ เป็นต้น และเป็นสารประกอบที่เป็นคุณสมบัติของพันธุ์ไม้แต่ละชนิด สารประกอบเหล่านี้ จะทำให้พืชแต่ละชนิดมีสี กลิ่น รส และความแข็งที่แตกต่างกันออกไป สารพวกนี้มีประมาณ 5-30% โดยมวล ซึ่งรวมไปถึง สารส่วนน้อย (minor constituent) เป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดได้แก่ สารประกอบแอลเคมิค โพแทสเซียม ฟอสเฟต และ ซิลิกา เป็นต้น สารพวกนี้มีประมาณ 0.1-3% โดยมวล ภาพที่ 10 โครงสร้างของสารแทรกบางชนิด

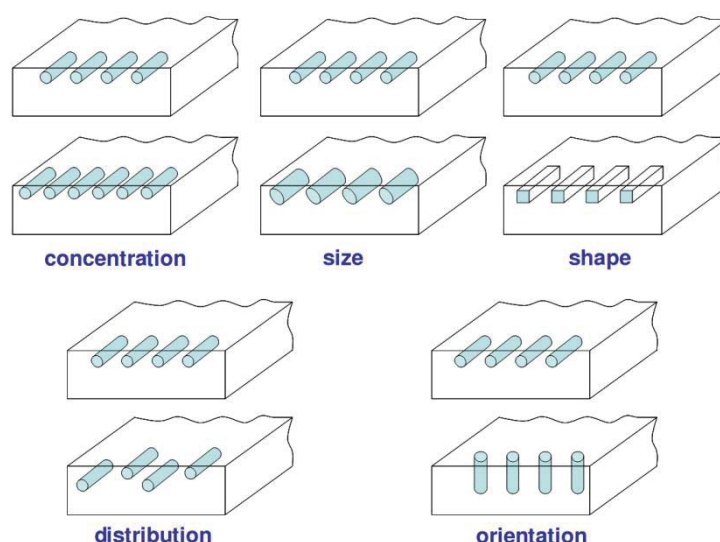


ภาพที่ 10 โครงสร้างของสารแทรกบางชนิด (1) abietic acid, (2) α -pinene, (3) pinosylvin, (4) pinneresinol, (5) gallic acid, (6) α -, β -, และ γ -thujaplicin [13]

2.3 วัสดุคอมพอสิต [14]

2.2.1 นิยามของคอมพอสิต [14]

คอมพอสิต (composite) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกัน ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุที่ได้จะมีสมบัติของวัสดุเริ่มต้นรวมกัน โดยทั่วไปแล้วคอมพอสิตจะประกอบด้วยวัสดุตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (dispersed phase) อยู่ในเมทริกซ์นั้น หรืออาจเรียกว่าเป็นเฟสเสริมแรง (reinforced phase) ยกตัวอย่างคอมพอสิตที่พบในธรรมชาติ เช่น “ไม้” ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบระหว่างลิกนิน (lignin) กับ เส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) หรือ “กระดูก” ซึ่งเป็นคอมพอสิตระหว่างแร่อะพาไทต์ (apatite) กับ โปรตีนคอลลาเจน (collagen) เป็นต้น ในส่วนของคอมพอสิตสังเคราะห์นั้น จะถูกเตรียมขึ้นมาเพื่อให้มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการใช้งานเฉพาะทาง โดยสมบัติของคอมพอสิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น อัตราส่วนของวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และลักษณะของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ภาพที่ 11 แสดงถึงลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวอยู่ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของคอมพอสิต จะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเป็นคอมพอสิตที่เกิดจากเมทริกซ์และเฟสที่กระจายตัวอยู่ชนิดเดียวกัน แต่ถ้ามีความเข้มข้น (ปริมาณ), ขนาด, รูปร่าง, ลักษณะการกระจาย หรือการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่แตกต่างกัน แล้วสุดท้ายคอมพอสิตที่ได้ก็จะมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะวัสดุคอมพอสิตพลาสติกผสมผงไม้



ภาพที่ 11 ลักษณะต่างๆของเฟสที่กระจายตัวต่อสมบัติของวัสดุคอมพอสิต ได้แก่ ความเข้มข้น (ปริมาณ), ขนาด, รูปร่าง, การกระจาย และการจัดเรียงตัว [14]

2.2.2 คอมพอสิตไม้-พลาสติก (wood-plastic composites; WPCs) [15]

เป็นวัสดุซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากทั่วโลก ทั้งในยุโรป อเมริกา หรือแม้แต่ในเอเชีย รู้จักในชื่อทั่วไปว่า “ไม้เทียม” วัสดุชนิดนี้สามารถทนทานต่อแสงแดดและฝน มีสีสนิม และ ลวดลายหลากหลาย หรือสามารถทาสีได้ตามความต้องการ และปลอดภัยจากการรุกรานของปลวก เทอมของคอมพอสิตไม้-พลาสติกนี้ครอบคลุมการใช้วัสดุคอมพอสิตในช่วงกว้าง ตั้งแต่การใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิโพรพิลีน, พอลิเอทิลีน, พอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) และ พอลิสไตรีน เป็นต้น พลาสติกเหล่านี้เป็นเทอร์โมพลาสติก เมื่อได้รับความร้อนจะหลอมเป็นของเหลวหนืดและกลายเป็นของแข็ง เมื่อปล่อยให้เย็นลง สมบัติดังกล่าวทำให้เราสามารถเติมวัสดุอื่นๆ ลงไปผสมกับพลาสติกก่อนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์คอมพอสิตได้ สารดังกล่าวรวมเรียกว่า “สารเติมแต่ง (additives)” ด้วยเหตุนี้วัสดุคอมพอสิตไม้-พลาสติกจึงเป็นวัสดุที่ผลิตง่าย สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากมาย และ ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

โดยทั่วไปคอมพอสิตไม้-พลาสติกจะมีไม้ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (fillers) หรือ สารเสริมแรง (reinforcement) อยู่ในปริมาณ 30-60% ของส่วนผสมทั้งหมด ไม้ดังกล่าวจะอยู่ในรูปของผงไม้ นอกจากสารตัวเติมที่เป็นไม้แล้ว ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่นซึ่งเติมลงในคอมพอสิตไม้-พลาสติก เพื่อเพิ่มสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ตัวอย่าง เช่น สารหล่อลื่น (lubricants) ซึ่งช่วยให้ผิวของผลิตภัณฑ์ลื่นนุ่มและ ง่ายต่อการขึ้นรูป, สารเชื่อมโยง (coupling agents) หรือ สารประสาน (binders) ช่วยในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างองค์ประกอบของพลาสติกและไม้, สีทำหน้าที่เพิ่มความสวยงามแก่ผลิตภัณฑ์, สารเพิ่มความเสถียรต่อแสง (light stabilizer), สารเพิ่มฟอง (blowing agents) และ เทอร์โมเซตติงเรซิน เป็นต้น องค์ประกอบหลักของคอมพอสิตไม้-พลาสติกแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 วัสดุหลักในการผลิตคอมพอสิต (บนซ้าย: เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน, บนขวา: ผงไม้, ล่าง: เม็ดคอมพอสิตไม้-พลาสติก) [15]

วัสดุที่เป็นองค์ประกอบต่างๆของไม้เทียมเหล่านี้ เดิมมีเพียง “คอมพอสิตไม้ (wood composite) เพียงอย่างเดียว” คอมพอสิตไม้นี้ได้จากการอัดขึ้นรูปผงไม้กับสารประสานด้วยความดันสูง เป็นวัสดุอุดมคติเพื่อใช้ทดแทนไม้จริงซึ่งมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของคอมพอสิตไม้ซึ่งพบในท้องตลาด เช่น พาติเคิลบอร์ด (particle-board) และ ไฟเบอร์บอร์ดความหนาแน่นปานกลาง (medium density fiber-board; MDF) แต่ในปัจจุบันคอมพอสิตไม้ดังกล่าว ได้มีการปรับเปลี่ยนพัฒนาขึ้นเป็นคอมพอสิตชนิดใหม่

คอมพอสิตไม้-พลาสติกแนวใหม่ได้จากการผสมระหว่างเศษไม้เลื่อยหรือผงไม้ สารประสานและพลาสติกเพื่อผลิตเป็นวัสดุซึ่งสามารถขึ้นรูปได้เหมือนกับการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป แต่รวมลักษณะเด่นของทั้งไม้ และ พลาสติกเข้าไว้ด้วยกัน ในส่วนที่เป็นไม้นั้นมักได้จากเศษไม้เลื่อย เศษหรือชิ้นไม้จากการตัดขอบ ไม้ส่วนที่เหลือใช้และไม่สามารถนำไปใช้ในงานอื่นๆได้ นำมาผ่านกระบวนการบด (grinding) เป็นผงอนุภาคขนาดเล็กก่อนเติมลงในเนื้อพลาสติก นั่นก็หมายความว่า การผลิตวัสดุคอมพอสิตไม้-พลาสติกนี้ เราไม่จำเป็นต้องสูญเสียทรัพยากรไม้เพิ่มขึ้นจากเดิม ส่วนของพลาสติกนั้นเราสามารถนำพลาสติกซึ่งเคยผ่านการใช้งานแล้วกลับมาขึ้นรูปและใช้ใหม่อีกได้ เช่น ถูพลาสติกเก่า, กล่องแบตเตอรี่เก่า การใช้ผลิตภัณฑ์ไม้และพลาสติกเหลือใช้หรือเศษวัสดุเป็นวัตถุดิบในการผลิตนี้สามารถช่วยทำให้คอมพอสิตชนิดใหม่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ให้ผลกำไรสูง และช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้คอมพอสิตไม้-พลาสติกยังมีสมบัติเชิงกลดี เหนียว และแข็งแรง มีความคงรูปสูง ตลอดจนสามารถใช้ในการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนได้

2.2.3 การขึ้นรูปคอมพอสิตไม้-พลาสติก

คอมพอสิตไม้-พลาสติกสามารถขึ้นรูปได้โดยผ่านกระบวนการผลิต 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนแรกเป็นการผลิตเม็ดพลาสติกคอมพาวด์ ซึ่งนำส่วนผสมทั้งหมด เช่น ผงไม้ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 40 ถึง 60 mesh (ประมาณ 250-350 ไมครอน) ผสมกับพลาสติกและสารปรับแต่งสมบัติ (modifiers) ชนิดต่างๆตามองค์ประกอบที่ต้องการในสภาวะที่แห้ง เพื่อป้องกันความชื้นที่ตกค้างจากวัตถุดิบ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวของผลิตภัณฑ์ จากนั้นส่วนผสมดังกล่าวจะถูกผสมเป็นเม็ดพลาสติกคอมพาวด์เนื้อเดียวกันตลอดทั้งเม็ด (homogeneous) ด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) คอมพอสิตเหลวจะไหลผ่านหัวฉีด (die) อย่างสม่ำเสมอออกมาในลักษณะของเส้นพลาสติกตันยาวอย่างต่อเนื่องเส้นพลาสติกนี้จะถูกตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆด้วยเครื่องทำเม็ด (pelletizer) จากนั้นขั้นตอนที่สองซึ่งเป็นการนำเม็ดพลาสติกคอมพาวด์มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปชนิดต่างๆให้เป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างตามที่ต้องการ กระบวนการทั่วไปที่นิยมใช้ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตไม้-พลาสติก ในขั้นตอนที่สองมี 3 กระบวนการ คือ

2.3.3.1 กระบวนการอัดรีด (extrusion)

ซึ่งเป็นกระบวนการที่บังคับให้พลาสติกคอมพาวด์หลอมตัวผ่านหัวฉีดจะได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในลักษณะแผ่น หรือ โพรไฟล์ตามลักษณะของหัวฉีด

2.3.3.2 กระบวนการอัดในแม่แบบ (compression moulding)

ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่เม็ดพลาสติกคอมพาวด์ และ อัดด้วยความดันสูงจนกระทั่งคอมพาวด์หลอมในช่องว่างของแม่แบบ

2.3.3.3 กระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ (injection moulding)

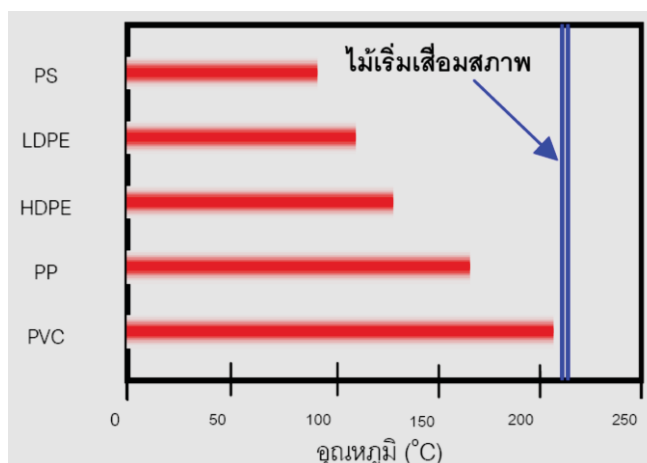
ซึ่งเป็นกระบวนการหลอมเม็ดพลาสติกคอมพาวด์ และ ฉีดเข้าไปเติมเต็มในช่องว่างของแม่แบบ แม่แบบดังกล่าวจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าพลาสติกหลอมเหลว แต่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง เพื่อให้พลาสติกเย็นตัวลงและกลายเป็นของแข็ง ในอดีตที่ผ่านสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตวัสดุคอมพอสิตประเภทนี้ ก็คือ การรวมพลาสติกให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกับผงไม้ เทคนิคที่ใช้คือ การใช้สารตัวกลางซึ่งทำให้ทั้งไม้ และพลาสติกเกิดการผสมเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือ เราเรียกว่า “สารเชื่อมประสาน” เพื่อปรับปรุงการผสมกันของวัสดุทั้งสอง สารประสานที่นิยมใช้ คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride), ซิเลน (silanes), ไททาเนท (titanates) และกรดอะคริลิก (acrylic acid) [16, 17] ซึ่งใช้ในการทำให้ส่วนผสมของไม้และพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ผลผลิตสุดท้ายมีความแข็งแรงและมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์คอมพอสิตไม้-พลาสติกแสดงดังภาพที่ 13

วัสดุคอมพอสิตพลาสติกผสมผงไม้เป็นการดึงเอาสมบัติที่เป็นทั้งข้อดี และ ข้อเสียของวัสดุทั้งสองชนิดเข้ามาไว้ด้วยกัน อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษไม้เลื่อย และ ไม้ผุอย่างคุ้มค่าสูงสุด เท่ากับว่าเป็นการสร้างวัสดุที่มีสมบัติใหม่ขึ้นมารองรับความต้องการทางวิศวกรรมที่ดี



ภาพที่ 13 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมพอสิต-ไม้ [15]

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเทอร์โมพลาสติก [18] เช่น พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีน, พอลิสไตรีน และ พอลิไวนิลคลอไรด์ เพราะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพประมาณ 200 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 14 จะสามารถหลอมเหลวและผสมเป็นวัสดุคอมพอสิตพลาสติกผสมผงไม้โดยไม้ไม่เปลี่ยนสีและกลิ่น ซึ่งโดยรวมแล้วการเพิ่มผงไม้ลงไป ในพลาสติกนั้นจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวพลาสติก แต่มันกลับทำให้มีความเปราะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สมบัติด้านอื่นๆก็จะแตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้งานภายนอกหรือภายในก็ตาม ในขั้นตอนต่างๆตั้งแต่การคัดสรรวัตถุดิบ เลือกกระบวนการผลิตที่เหมาะสม และ ทดสอบสมบัติด้านต่างๆ จึงควรที่จะทำให้อัดคล้องกับการนำไปใช้งานจริง ซึ่งสัดส่วนที่นิยมสร้างเป็นวัสดุคอมพอสิตพลาสติกผสมผงไม้คือ 30-60 % ของผงไม้



ภาพที่ 14 อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกชนิดต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิการเสื่อมสภาพของไม้ [18]

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับสีและการย้อมสีธรรมชาติ [19]

2.4.1 สีและองค์ประกอบของการเห็นสี

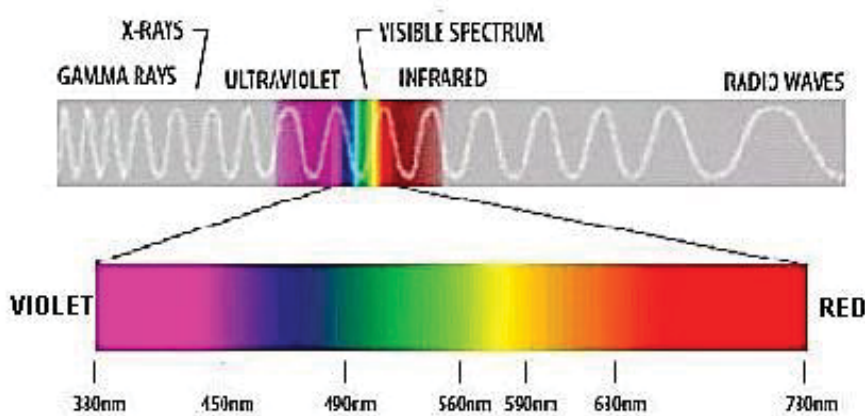
การมองเห็นสีของมนุษย์ เกิดจากการที่แสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้นๆ มากระทบตาเรา และส่งไปยังสมอง เพื่อแปลออกมาเป็นสีที่เห็น ดังนั้นในการมองเห็นจึงมีปัจจัยอยู่ 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตาของคนเรา

การมองเห็นด้วยตาจะบ่งบอกลักษณะของวัตถุได้ 3 ลักษณะคือ

- สีที่ปรากฏในการมองเห็น เช่น สีแดง สีเขียว หรือสีน้ำเงิน เรียกว่า hue
- ความสว่างของสีซึ่งเป็นการสะท้อนของแสงที่มีค่าต่างกันเรียกว่า lightness
- ความสดใสดูความเข้มและความบริสุทธิ์ของสี เรียกว่า chroma

2.1.4.1 แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงสำหรับการมองเห็นมาจาก 2 แหล่ง คือ แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ และ แหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้น สำหรับแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ ได้แก่ แสงจากดวงอาทิตย์ หรือแสงแดดในตอนกลางวัน (daylight) ส่องมายังพื้นผิวโลก โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงแคบๆ ระหว่าง 380 – 780 นาโนเมตร ซึ่งช่วงนี้เรียกว่า “ช่วงคลื่นที่มองเห็นได้” (visible spectrum/visible light) โดยมองเห็นเป็นแสงสีขาว (light white) และเมื่อผ่านปริซึมแสงสีขาวนี้จะแยกออกเป็นแถบสีต่างๆกัน 7 สี โดยแต่ละสีจะมีความยาวคลื่นต่างกันซึ่งอยู่ระหว่าง 400-780 นาโนเมตร ดังภาพที่ 15

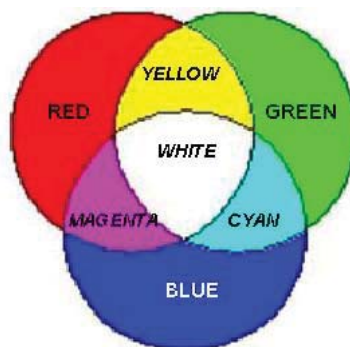


ภาพที่ 15 แถบสเปกตรัมแสงและความยาวคลื่นของช่วงคลื่นที่มองเห็น [20]

แสงที่มองเห็น เป็นสีต่างๆ นี้ เกิดจากความยาวคลื่นและความถี่ที่ต่างกัน โดยความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดสี (hue) และ amplitude เป็นตัวกำหนดความสว่างของสี (brightness) ความยาวคลื่นของสีที่มองเห็นมีดังนี้ แสงสีม่วง 380 - 450 นาโนเมตร, แสงสีน้ำเงิน 450 – 490 นาโนเมตร, แสงสีเขียว 490 - 560 นาโนเมตร, แสงสีเหลือง 560 - 590 นาโนเมตร, แสงสีส้ม (orange) 590 - 630 นาโนเมตร และ แสงสีแดง (red) 630 - 780 นาโนเมตร แสดงได้ดังภาพที่ 16

แม่สีของแสง มี 3 สี คือสีแดง (red, R) สีเขียว (green, G) น้ำเงิน (blue, B) แสงหรือแม่สีทั้งสามนี้ เป็นสีขั้นต้น เมื่อผสมเข้าด้วยกันเป็นคู่จะได้สีขั้นที่สอง ดังนี้

- แสงสีแดง (red) ผสมแสงสีเขียว (green) จะได้สีเหลือง (yellow)
- แสงสีเขียว (green) ผสมสีน้ำเงิน (blue) จะได้สีน้ำเงินแกมเขียว (cyan)
- แสงสีแดง (red) ผสมแสงสีน้ำเงิน (blue) จะได้แดงแกมม่วง (magenta)



ภาพที่ 16 การผสมแสงสีหรือแม่สี [20]

เมื่อนำแสงหรือแม่สีทั้งสามสีมาผสมกันเข้าจะได้แสงสีขาว

แต่แสงแดดในแต่ละท้องที่ของประเทศต่างๆจะพบว่าการกระจายพลังงาน (spectral energy distribution, SED) ที่แตกต่างกันไปตามภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฤดู และช่วงเวลาดังนั้นการมองเห็นสีที่มีแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติในช่วงเวลา สถานที่ หรือสภาพอากาศที่ต่างกันแล้ว ก็เป็นเหตุให้การมองเห็นสีต่างกันไปด้วย

แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ มีอยู่ด้วยกันหลายแบบได้แก่ หลอดไฟ incandescence, หลอดไฟทังสเตน (tungsten filament lamp), หลอดฟลูออเรสเซนต์, หลอดไฟซีนอนอาร์ค (xenon arc lamp) หลอดไฟซีนอนอาร์ค จะให้แสงที่มีการกระจายพลังงานอยู่ระหว่างช่วงรังสียูวี และรังสีอินฟราเรด เมื่อเราใช้ที่กรองแสงรังสียูวีอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งใช้ที่กรองความร้อนลดความเข้มของรังสีอินฟราเรดให้ต่ำลงแล้ว จะทำให้หลอดไฟซีนอนอาร์คมีการกระจายพลังงานได้ใกล้เคียงกับแสงแดดตอนกลางวัน นอกจากนี้หลอดไฟซีนอนอาร์คที่ให้แสงกะพริบ (xenon flash lamp) เมื่อให้แสงกะพริบที่มีความเข้มของแสงสูงในช่วงระยะสั้น ทำให้ขึ้นตัวอย่างที่ทำการวัดสีไม่ร้อนมากนักเกิดการเปลี่ยนสี

2.1.4.2 วัตถุที่มีสี

แสงจากแหล่งกำเนิดแสงเมื่อตกกระทบวัตถุที่มีสีจะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของแสงที่พื้นผิวของวัตถุที่มีความเงามัน เรียกว่า specula reflection ถ้าพื้นผิวไม่เรียบ ไม่มีความเงามันเมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปกระทบวัตถุนั้นจะเกิดการกระเจิงของแสง และอนุภาคของสีในบางช่วงคลื่นจะถูกดูดกลืนเอาไว้ บางช่วงคลื่นจะถูกสะท้อนออกมาทำให้เกิดการมองเห็นสีแตกต่างกันตามความยาวช่วงคลื่นที่มีการสะท้อนออกมาเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า diffuse reflection

นอกจากจะมีการสะท้อน และการดูดกลืนในบางช่วงของคลื่นแสงแล้ว ยังมีการส่องผ่านของแสงบนวัตถุโปร่งแสงและเกิดการกระเจิงของแสงที่พื้นผิวปรากฏการณ์นี้เรียกว่า

diffuse transmission แต่ถ้าเป็นวัตถุที่มีความโปร่งใส เช่น กระจกใส จะเกิดการส่องผ่านทะลุวัตถุโปร่งใสนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า regular transmission

โครงสีคู่ตรงข้าม (complementary color) คือ สีที่อยู่ตรงกันข้ามกันในวงจรัสสี มีทั้งหมด 6 คู่ คือ สีเหลือง กับ สีม่วง, สีเขียว กับ สีแดง, สีส้ม กับ สีน้ำเงิน, สีเขียวเหลือง กับ สีม่วงแดง, สีเขียวน้ำเงิน กับ สีส้มแดง และสีส้มเหลือง กับ สีม่วงน้ำเงิน [21] ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 โครงสีคู่ตรงข้าม (complementary color) [22]

2.1.4.3 ผู้สังเกตการณ์

เป็นปัจจัยสุดท้ายของการมองเห็นเมื่อแสงตกกระทบบนวัตถุที่มีสีและสะท้อนเข้าตาผู้สังเกตการณ์แล้วส่งไปยังเรตินาที่มีส่วนไวต่อแสงแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิด คือ ส่วนที่จะแยกความแตกต่างระหว่างความมืดและความสว่างที่เรียกว่า rods และ ส่วนที่สามารถแยกสีที่เรียกว่า cones แบ่งออกอีก 3 ชนิด คือ ส่วนที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้วว่าการมองเห็นของมนุษย์ต่อวัตถุที่มีสีนั้นจะเป็นการมองเห็นที่แตกต่างกันไป ดังนั้น ถ้าวัตถุที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมานั้นมีสีที่สม่ำเสมอและเป็นมาตรฐานสากลแล้ว การวัดสีจะบอกลักษณะของสีให้เป็นที่เข้าใจในระดับสากลได้ ซึ่งมีหลายวิธีหลายระบบ ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ “ระบบ Munsell” และ “ระบบ CIE”

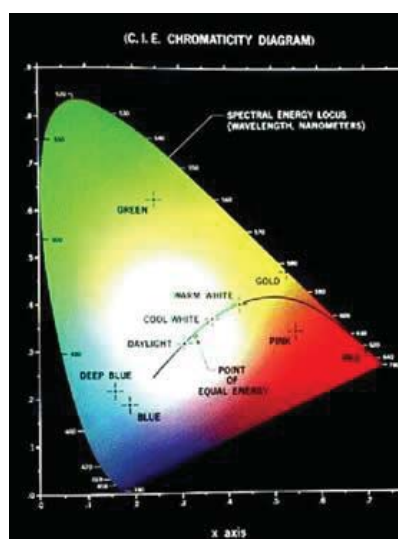
2.4.2 ระบบการวัดสีมาตรฐาน

2.4.2.1 ระบบ Munsell

เป็นระบบที่ได้มีการพัฒนามาก่อนการนำเครื่องมือวัดสีมาใช้ในการวัดสี โดยการ ใช้สายตาและอาศัยคุณสมบัติของการมองเห็นสีคือ hue, lightness และ chroma ซึ่งต้องอาศัย ประสบการณ์ความคิดของมนุษย์ในการวัดสี ระบบนี้จัดเป็นระบบที่ตรงกับที่สายตามนุษย์มองเห็น สีแตกต่างกันเป็นช่วงที่เท่าๆกัน

2.4.2.2 ระบบ CIE

เป็นระบบที่ได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของ objective ที่ไม่ต้องอาศัย ประสบการณ์ หรือ ความคิดของมนุษย์ในการวัดสีดัง เช่น ระบบ Munsell โดยเริ่มขึ้นใน คริสต์ศตวรรษที่ 19 ในปี 1928 ไรท์ (W.D.Wright) และ กิลด์ (J.Guild) ประสบความสำเร็จในการ ตรวจวัดคลื่นแสงครั้งสำคัญ และ ได้รับการรับรองจาก Commission International de l'Eclairage (CIE) ในปี 1931 โดยถือว่าการตรวจวัดมาตรฐานสามเหลี่ยมสี CIE เป็นภาพที่ 18 นำเสนอไว้ ในปี 1931 โดยการวิเคราะห์สีจากแสงสเปกตรัม สัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสง แสงสีขาวทำมกลาง แสงสเปกตรัมรอบรูปเกือบม้าโค้งรูปเกือบม้า แสดงความยาวคลื่นจาก 400-700 ไมโครเมตร สามเหลี่ยมสี CIE สร้างขึ้นตามระบบความสัมพันธ์พิภัก X และ Y คาร์เตเซียนในทางคณิตศาสตร์ จากมุมตรงข้าม 3 มุมของรูปเกือบม้า คือ สีนํ้าเงินม่วงเข้มประมาณ 400 ไมโครเมตร สีเขียว ประมาณ 520 ไมโครเมตร และสีแดงประมาณ 700 ไมโครเมตร คือ สีจากแสงที่จะนำมาผสมกัน และก่อให้เกิดสีต่าง ๆ ขึ้น แสงสีแดงมีความยาวคลื่นสูงสุด แต่มีความถี่คลื่นต่ำสุด จะหักเหได้น้อย ที่สุดและแสงสีม่วงจะมีความยาวคลื่นน้อยสุด แต่มีความถี่คลื่นสูงสุด และหักเหได้มากที่สุด [20]



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ของสีตามมาตรฐาน CIE [20]

การวัดสีระบบนี้มีข้อดี คือ เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลข เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณ และ ทำนายสูตรสีผสมได้ด้วย ดังนั้น การมองเห็นสีของวัตถุ ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตามนุษย์ ถ้าเราสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขได้ก็สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขได้

❖ แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ในระบบ CIE

ในการวัดสีของวัตถุจากเครื่องวัดสีต้องอาศัยแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ ที่เมื่อให้แสงออกมาแล้วสามารถที่จะวัดการกระจายพลังงานที่แต่ละความยาวคลื่นได้ด้วยเครื่อง spectroradiometer และ ด้วยผลของแหล่งกำเนิดแสงที่ต่างกันจะมีผลให้การมองเห็นสีที่ต่างกัน ดังนั้นระบบ CIE จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานของแหล่งกำเนิดแสงขึ้น คือ

➤ Illuminant A มีการกระจายพลังงานใกล้เคียงกับหลอดไฟทั้งสแตน หรือ หลอดไฟ incandescence ที่มี color temperature ประมาณ 2848 K

➤ Illuminant B เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากหลอด Illuminant A ที่ผ่านตัวกรองแสงแล้วให้แสงแดดตอนเที่ยง โดยมี color temperature ประมาณ 4900 K

➤ Illuminant C เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากหลอด Illuminant A ที่ผ่านตัวกรองแสงแล้วให้แสงแดดตอนกลางวัน โดยมี color temperature ประมาณ 6700 K

➤ Illuminant D เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้แทน แสงแดดตอนกลางวัน แต่มีความละเอียดของ color temperature ที่ต่างกันเช่น D65 และ D75 โดยที่ D65 เป็นแสงแดดตอนกลางวันที่มี color temperature 6500 K แต่ใน D75 เป็นแสงแดดตอนกลางวันที่มี color temperature 7500 K และเรานิยมที่จะใช้ D65 เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการวัด

❖ วัตถุที่มีสี

เครื่องมือที่ใช้วัดสี เรียกว่าเครื่อง “spectrophotometer” ที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลขได้ ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุ เทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น reflectance curve วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกัน

วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมาก็จะมีความยาวคลื่นต่างกันโดยที่สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่ 430-460 นาโนเมตร, สีเขียว มีความยาวคลื่นที่ 500-580 นาโนเมตร และ สีแดง มีความยาวคลื่นที่ 620-780 นาโนเมตร

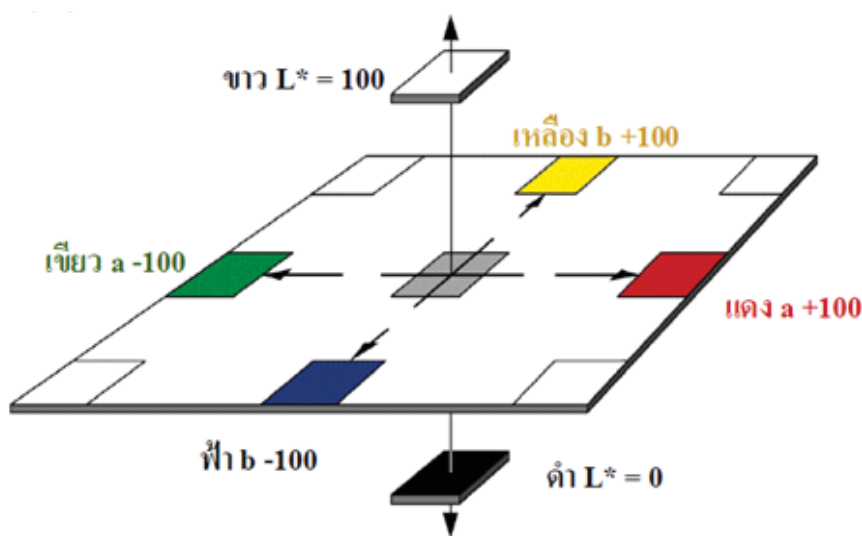
ระบบการวัดสีในเครื่อง spectrophotometer มีอยู่หลายระบบด้วยกัน คือ ระบบ Munsell ซึ่งได้กล่าวไว้แล้ว, ระบบ Tristimulus Value, ระบบ Chromaticity coordinate และ ระบบ CIE $L^*a^*b^*$

ระบบ Tristimulus Value ค่าที่หาได้ออกมาเป็น X, Y, Z โดยค่านี้จะระบุเป็นค่าสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ แต่ค่าที่ได้ยังขาดความสัมพันธ์ระหว่างกันของสีที่มองเห็น จึงไม่สามารถที่นำมาใช้ประโยชน์อะไรได้มาก

ระบบ CIE : chromaticity coordinate เป็นวิธีการที่สามารถระบุความหมายของสีได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งค่าที่ได้เป็น

$$X = \frac{X}{X+Y+Z} \quad Y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad Z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

โดยที่ค่า X และ Y เป็นค่าที่ระบุความเป็นสี ส่วนความสว่างของสีเป็นค่า Y แต่วิธีการวัดสีโดยวิธีการนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการบอกค่าความแตกต่างของสีได้ดี ระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ color space ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 CIELAB 1976 ซึ่งมีลักษณะของ color space [23]

โดยกำหนดให้ L^* เป็นค่าความสว่าง (lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100

แกน a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง

แกน a^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

แกน b^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน

และในการหาความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้น เมื่อพิจารณาจากรูป จะพบว่า จุดๆหนึ่งใน space นั้นเป็น $L_1^*a_1^*b_1^*$ และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน space เป็น $L_2^*a_2^*b_2^*$ ซึ่ง 2 จุดนี้ จะมีระยะห่างกันใน space เท่าไร ก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสีดังกล่าว

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดย ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสี

เราอาจจะกล่าวได้ว่าการมองเห็นสีของมนุษย์และการวัดสีจากเครื่องวัดจะต้องอาศัยปัจจัย 3 อย่าง คือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และ การอ่านค่าสี แต่กับการมองเห็นสีของมนุษย์นั้นจะพบว่าแต่ละคนอาจจะอ่านค่าสีแตกต่างกันไป สำหรับเครื่องวัดสีนั้นจะให้ค่าที่ได้จากการวัดสีในทางอุตสาหกรรมเป็นไปตามมาตรฐานสากล รวมทั้งยังสามารถที่จะวัดค่าความแตกต่างของสีที่มีเฉดสีต่างออกไปเพียงเล็กน้อยได้ เป็นผลให้ในทางอุตสาหกรรมสามารถกำหนดให้ค่าความแตกต่างของสีเท่าไรได้

ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดการวัดสีในระบบที่เป็นตัวเลขขึ้นมา เพื่อควบคุมคุณภาพของสินค้า และสีที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามมาตรฐานในระดับสากลการมองเห็นสีของมนุษย์ เกิดจากการที่แสงที่สะท้อนจากวัตถุนั้นๆมากระทบตาเราและส่งไปสมอง เพื่อแปลออกมาเป็นสีที่เห็น

2.4.3 สีธรรมชาติ [7]

การพัฒนาสีธรรมชาติเพื่อใช้ในการย้อมเส้นด้ายฝ้าย สาลี และ ไม้ และให้มีเฉดสีที่หลากหลายดังเช่นสีที่สังเคราะห์ในปัจจุบัน สีที่มีความคงทน ย้อมง่าย ไม่ยุ่งยากจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายปัจจุบัน และ อนาคต ด้วยข้อจำกัดของสีธรรมชาติที่มีปัญหาหลักในความยุ่งยากในการเตรียมน้ำย้อม และ การย้อมการสี รวมถึงมีสีเฉดสีที่ไม่หลากหลาย และมีความคงทนต่อแสงแดดไม่ดี เมื่อเทียบกับสีสังเคราะห์ ด้วยข้อจำกัดต่างๆของสีธรรมชาติ ทำให้ในปัจจุบันไม่สามารถหาเฉดสีที่หลากหลายจากวัตถุดิบธรรมชาติได้ การสร้างเฉดสีจึงต้องใช้วิธีย้อมสีมากกว่าหนึ่งสีขึ้นไป โดยอาจจะเป็นการย้อมทับ หรือ การย้อมสีผสม แล้วแต่กรณี การสร้างสีผสมนี้ต้องใช้สีหลัก หรือ สีที่เรียกว่า แม่สี ได้แก่ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน ทั้งนี้สีต้องมีความอึดตัวของสีสูง หรือกล่าวว่าเป็นแม่สีที่บริสุทธิ์ ซึ่งในปัจจุบันกล่าวได้ว่า ยังไม่มีสีธรรมชาติใดที่มีสมบัติตามที่ว่ามานี้

สีธรรมชาติ จำแนกประเภทได้หลายแบบ ส่วนมากจะจำแนกตามประเภทของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งจะแยกเป็นกลุ่ม คลอโรฟิลล์ (chlorophylls) แครโรทีนอยด์ (carotenoids)

ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ควิโนนอยด์ (quinonoids) คูมาริน (cumarins) อินดิโกอยด์ (indigoids) เคอร์คูมินอยด์ (curcuminoids) และ เบตาเลน (betalains) ฯลฯ หากจำแนกตามการใช้งานจะจำแนกได้เป็น สีย้อมโดยตรง (direct dyes) ที่สามารถย้อมติดเส้นใยโดยไม่ต้องใช้สารช่วยอื่น และ สีมอร์แดนต์ (mordant dyes) ซึ่งย้อมติดเส้นใยได้เมื่อใช้สารตัวช่วยอื่น บ้างเรียกทั้งสองประเภทนี้ว่า substantive และ non-substantive dyes ตามลำดับ

สีธรรมชาติที่ให้สีแดงมีทั้งที่ได้จากพืช และ ที่ได้จากสัตว์ สีแดงที่ได้จากพืช ได้แก่ สารที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแอนทราควิโนน (anthraquinone) ได้แก่ สีที่ได้จากรากของพืชหลายชนิดในวงศ์ Rubiaceae เช่น madder (*Rubia tinctorum* L.) wild madder (*Rubia peregrine* L.) munjeet (*Rubia cordifolia* L.) ladies' bedstraw (*Galium verum* L.) โครงสร้างประเภทฟลาโวนอยด์ได้จากพืชสกุล *Caesalpinia* เช่น brazil wood (*Caesalpinia brasiliensis* L.) peachwood (*Caesalpinia echinata* L.) limawood ไม้ฝาง (sappan wood) (*Caesalpinia sappan* L.) เป็นต้น ในประเทศไทยมีรายงานการย้อมสีแดงจากวัตถุดิบหลายชนิด เช่น ขอบป่า ขอบ้าน ครั่ง ไม้ฝาง เมล็ดคำแสด มะกาคัด เปลือกต้นสะเดา ใบสักอ่อน คำฝอย เป็นต้น สีแดงที่ได้จากสัตว์เป็นสารที่มีโครงสร้างที่เป็นแอนทราควิโนน เช่น สารสีที่ได้จากสัตว์ที่เป็นตัวเบียนของพืช เช่น carminic acid จาก cochineal kermesic acid จาก kermes และ laccaic acid จากครั่ง (lac) เป็นต้น

สีเหลืองประมาณ 90% มีโครงสร้างทางเคมีหลักเป็นฟลาโวนอยด์ ส่วนมากจะมีโครโมฟอร์ เป็น ฟลาโวน และ ฟลาโวนอล (3-hydroxy flavones) สีหลักได้จาก weld (*Reseda luteola* L.) young fustic (*Cotinus coggygria* Scop.) dyer's greenweed (*Genista tinctoria* L.) sawwart (*Serratula tinctoria* L.) chamomile (*Anthemis nobilis* L.) osage orange (*Maclura pomifera* L.) jackfruit tree (*Artocarpus heterophyllus* L.) พืชให้สีเหลืองอื่น ได้แก่ คำฝอย, เมล็ดคำแสด (anatto) (*Bixa orellana* L.) turmeric หรือ curcuma (*Curcuma longa* L.) kamala หรือ monkey face tree (*Mallotus philippensis* L.) ให้สีส้ม ถึงสีแดง เป็นต้น ในประเทศไทยมีรายงานวัตถุดิบหลายชนิด ได้แก่ แก่นขนุน แก่นกาเล รากไม้ฝาง เปลือกต้นมะม่วง ขมิ้น เนื้อไม้พุด เปลือกต้นเพกา กลีบดอกกรรณิการ์ เป็นต้น

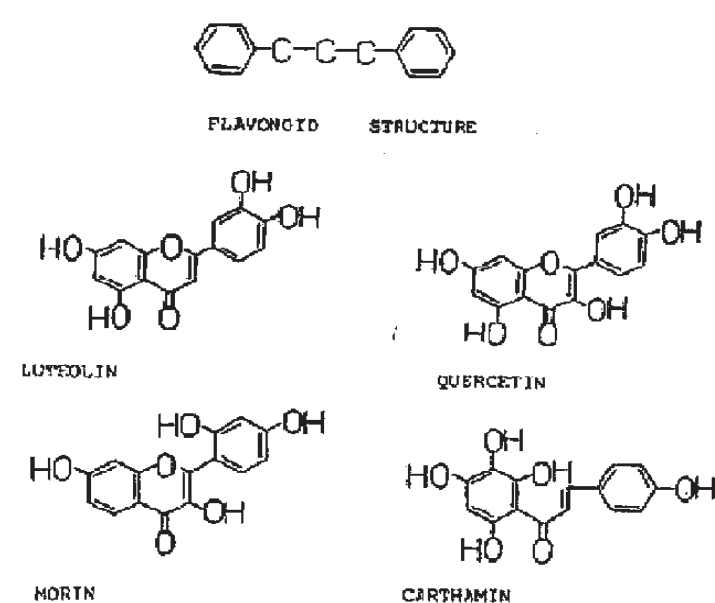
สีน้ำเงิน มีโครงสร้างทางเคมีหลักอยู่ในกลุ่มอินดิโกอยด์ ได้จากพืชที่มีสารที่สามารถให้คราม หรือ อินดิโก (indigo) เช่น woad (*Isatis tinctoria* L.) ในทศวรรษที่ผ่านมา woad ได้รับการศึกษาครบวงจรในยุโรปตั้งแต่การเพาะปลูก การคัดเลือกสายพันธุ์ให้ผลผลิตที่สูง การสกัด การผลิตเนื้อคราม และการย้อม นอกจากนี้ยังมีแหล่งสีน้ำเงินอื่นๆ เช่น ครามญี่ปุ่น (*Polygonum tinctorium* L.) คราม (*Indigofera tinctoria* L.) ในประเทศไทยใช้วัตถุดิบเป็นคราม และ ส้อม

(*Baphicacanthus cusia* Brem.) แต่ก็มีรายงานวัตถุดิบที่ให้สีน้ำเงินเช่นกัน เช่น ดอกอัญชัน, เมล็ดชุมเห็ดไทย, ใบน้อยโหน่ง เป็นต้น

2.4.4 คุณสมบัติทางเคมีของสี [24]

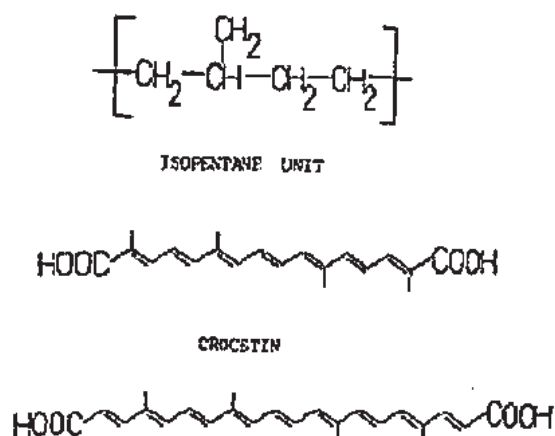
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ให้คำจำกัดความของสารสีไว้ว่า สีจากพืชเป็นสารเคมีคุณสมบัติเป็นสีเชื่อมสกัดจากพืชโดยกรรมวิธีการหมัก การต้ม หรือกรรมวิธีทางเคมีในปริมาณเล็กน้อย และ สารที่ได้จากพืชมีคุณสมบัติเป็นสารสี เพราะสารเหล่านี้จะดูดซับสีในช่วงความยาวคลื่นของแสง 400-800 นาโนเมตร ที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้ พืชในแต่ละชนิดให้สีซึ่งแตกต่างกัน ได้กล่าวถึงสารให้สีที่สำคัญ 4 ชนิดดังต่อไปนี้

1. สารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoids) ชนิดนี้ใช้เป็นสีเชื่อมกันมาก มักให้สีเหลืองถึงสีส้ม-เหลือง มีสูตรโครงสร้างพื้นฐานเป็น C_3-C_6 โดยที่ C_6 ส่วนมากเป็นวงเบนซีน (benzene ring) ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 โครงสร้างของสีฟลาโวนอยด์ [24]

2. สารประกอบเทอร์ปีนอยด์หรือไอโซปีนอยด์ (terpenoid or isopenoids) สารกลุ่มนี้เป็นสารที่มีชีวิตสังเคราะห์จากหน่วยไอโซเพนเทน (isopentane unit, C_5) เช่น crocetin จากหญ้าฝรั่น (saffron) มีสีเหลืองจาก bixin จากเมล็ดคำแสด ให้สีส้ม-แดง มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 โครงสร้างของสีพวาทอโรปีนอยด์บางชนิด [24]

3. สารประกอบแอนทราควิโนนและแนฟทาควิโนน (anthraquinones and naphthaquinones) สารในกลุ่มนี้มักจะให้สีแดง แอนทราควิโนนที่ใช้เป็นสีย้อม เช่น alizarin จากรากต้น madder และจากแก่นของต้นข่อย laccaic acid จากครั่ง ส่วน แนฟทาควิโนน เช่น juglone จากเปลือกมันฮ่อให้สีเขียวถึงสีน้ำตาล

4. สารประกอบแอลคาลอยด์ (alkaloids) สารในกลุ่มนี้มักจะได้จากพืชชั้นสูง และ จะมีในโตรเจนอะตอมอยู่ในโมเลกุล ได้แก่ สี indigo จากต้นคราม ซึ่งจะให้น้ำเงิน ไชริแอน (tyrian) เป็นสีจากหอยสังข์หนาม (shellfish) อยู่แถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียนจะให้สีม่วงแดง

เทียนศักดิ์ เมฆพรรณ โอภาส [25] ได้กล่าวว่า สีธรรมชาติที่ได้จากการสกัดมาจากส่วนต่างๆของพืชนั้นเป็นสารเคมี ดังต่อไปนี้

1. แอนโทไซยานิน (anthocyanin) เป็นสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) เมื่อสลายตัวด้วยน้ำตาล และ ส่วนที่ไม่ใช่น้ำตาล เรียกว่า แอนโทไซยานิดิน (anthocyanidin) แอนโทไซยานิน เป็นสารที่ให้สีแดง สีม่วง และ สีฟ้า มีอนุพันธ์มากกว่า 140 ชนิดละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์ กรด และ ด่างเจือจาง สีจะเข้มในสภาพที่ยังไม่แตกตัวเป็นไอออน คือ pH ประมาณ 1.0 และถ้า pH มีค่าสูงกว่า 4.5 อาจจะไม่มีสีเลยก็ได้

2. แคโรทีนอยด์ (carotenoid) เป็นสารประกอบลิพิดชนิดหนึ่ง เรียกว่า เทอร์พีน (terpene) หรือในกรณีที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เรียกว่า เทอร์พีนอยด์ (terpenoid) สีพวาทอโรทีนอยด์มีหลายชนิด เช่น แอนนัตโต (annatto) ซึ่งได้เมล็ดของพืชที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Bixa orellana* โดยการทำการสกัดซึ่งฝังที่อยู่รอบเมล็ดด้วยด่าง หรือ น้ำมัน สารที่พบคือ bixin ซึ่งเป็นผลึกสีน้ำตาลแดง มีจุดหลอมเหลวประมาณ 198 องศาเซลเซียส และคงตัวต่อแสงต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน ต่อกรด และด่าง รวมถึงเชื้อจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีเบต้า-แคโรทีน (β -carotene) และ ไคโคปีน

(lycopene) ซึ่งเบต้า-แคโรทีนนี้เป็นสารประกอบประเภทแคโรทีนอยด์ที่สามารถสังเคราะห์ได้เป็นครั้งแรกในชั้นอุตสาหกรรม และเป็นสารที่มีคุณค่าทางอาหาร เนื่องจากเอนไซม์ในตับสามารถเปลี่ยนเบต้า-แคโรทีนเป็นวิตามินเอได้ เบต้า-แคโรทีนเป็นสารที่มีผลึกสีม่วงแดง มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 183 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ เอทานอล กลีเซอริน ละลายได้น้อยในตัวทำละลายอินทรีย์ ไม่คงตัวต่อแสง อากาศ แสง และอุณหภูมิสูงๆ 45 องศาเซลเซียส จะถูกทำลายภายใน 6 สัปดาห์ ส่วนไลโคปีน (lycopene) นั้นเป็นสารประกอบประเภทเทอร์พีน เป็นสารที่ให้สีแดง

3. แซฟฟรอน (saffron) เป็นผงสีน้ำตาลปนแดง หรือ สีเหลืองทองได้จากเกสรแห้งของพืช มีสารสำคัญ คือ โครซิน (crocin) และ โครเซทิน (crocetin) ซึ่งโครซินเป็นสารประกอบกลัยโคไซด์ที่มีสีส้มปนเหลือง หลอมเหลวพร้อมกับการสลายตัวที่อุณหภูมิ 186 องศาเซลเซียส ละลายได้ดีในน้ำร้อน ละลายได้น้อยในแอลกอฮอล์ และ กลีเซอริน ไม่ละลายในน้ำมันพืช ส่วนโครเซทินเป็นสารประกอบเทอร์พีนอยด์ เมื่อตกผลึกในอะซิติกแอนไฮไดรด์ (acetic anhydride) จะได้รูปผลึกเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนสีแดงอิฐ เป็นสารที่หลอมเหลวพร้อมกับการสลายตัวที่อุณหภูมิ 285 องศาเซลเซียส ละลายในน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์น้อยมาก แต่ละลายได้ดีในไพรดีน และ สารอินทรีย์ที่เป็นด่าง

4. เคอร์คูมิน (curcumin) เป็นผงผลึกสีเหลืองส้ม ไม่ละลายน้ำ และอีเทอร์ แต่ละลายในเอทานอล และกรดอะซิติกเข้มข้น ไม่คงตัวต่อแสง ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด และด่าง มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 180-183 องศาเซลเซียส

5. คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) เป็นสารประกอบประเภท tetrapyrrole ที่มีแมกนีเซียม คลอโรฟิลล์เป็นสารสีเขียวที่อยู่ในพืช สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยใช้น้ำ และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศมาผลิตเป็นคาร์โบไฮเดรต ได้สารอาหารที่ต้องการ คลอโรฟิลล์แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ คลอโรฟิลล์ เอ และ บี

โดยปกติภายในสีย่อมจะประกอบไปด้วยส่วนที่ เรียกว่า โครโมฟอร์ และ ออกโซโครม (chromophores and auxochromes) โดยส่วนโครโมฟอร์จะสามารถดูดกลืนได้ทั้งในช่วงแสงอัลตราไวโอเลตและแสงที่มองเห็นได้ เป็นโครงสร้างหลักที่ทำให้เกิดสี ซึ่งมีโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชัน เช่น $-N=N-$, $C=O$, $C=C$, $-NO_2$ และ conjugate double bond เป็นต้น และ ส่วนของออกโซโครม ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ เช่น $-OH$, $-NH_2$, $-Cl$ จะไม่ดูดกลืนแสง แต่สามารถมีผลต่อ absorption spectrum เมื่ออยู่ติดกับส่วนของโครโมฟอร์ จะช่วยส่งเสริมอิทธิพลของโครโมฟอร์ที่ช่วยทำให้เกิดเฉดสีและความเข้มของสีที่แตกต่างกัน [26, 27]

หมู่โครโมฟอร์ [27] แบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1. โครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะ โดยไม่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว เช่น alkene
2. โครโมฟอร์ที่มีหลายพันธะ และมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเช่น หมู่คาร์บอนิล
3. โครโมฟอร์ที่มีวงเบนซีน เช่น สารประกอบอะโรมาติก

ถ้าโครโมฟอร์เกิดคอนจูเกต (conjugated) กันเอง จะทำให้เกิดแถบการดูดกลืนแสงที่เลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น ในส่วนของออกโซโครม มีผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโครโมฟอร์ โดยอาจทำให้ความยาวคลื่นเพิ่ม หรือ ลด หรือทำให้การดูดกลืนเพิ่มหรือลด มี 4 แบบ คือ

1. bathochromic (red) shift เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นยาวขึ้น (max เพิ่ม)
2. hypsochromic (blue) shift เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นลดลง (max ลด)
3. hyperchromic shift เป็นปรากฏการณ์ที่การดูดกลืนแสงของสารเพิ่มขึ้น
4. hypochromic shift เป็นปรากฏการณ์ที่การดูดกลืนแสงของสารลดลง

ดังนั้นค่าการดูดกลืนแสงของสารจึงเป็นค่าที่ขึ้นเฉพาะกับ สภาพแวดล้อมนั้นๆ เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิ ชนิดของตัวทำละลาย เป็นต้น การรายงานผลสเปกตรัมจึงจำเป็นต้องรายงานสภาพแวดล้อมในขณะที่ทำการทดลองให้ชัดเจน

สีธรรมชาติโดยทั่วไปเป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ และมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถย้อมติดได้ด้วยตนเอง (substantively) โดยไม่ต้องใช้สารอื่นช่วยในการย้อม เพียงแต่นำมาผสมน้ำก็สามารถย้อมได้ ซึ่งมีลักษณะคล้ายสีสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง คือ direct dyes เป็นสีที่ย้อมติดง่าย และ หลุดง่าย กล่าวคือ มีความคงทนของสีต่ำ และไม่สดใส [7]

สีธรรมชาติจะเริ่มย้อมที่อุณหภูมิห้องและติดสีได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80-100 องศาเซลเซียส ระหว่างการย้อมต้องทำการคนอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสีธรรมชาติจะตกตะกอนได้ง่าย เป็นสาเหตุให้การย้อมเส้นใยต่าง แต่สีธรรมชาติจะมีคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่ง คือ สามารถกระจายตัวได้ดี ดังนั้นสามารถแก้ปัญหาการย้อมติดที่ไม่สม่ำเสมอได้โดยการเติมน้ำย้อมเดิมจนกว่าสีจะติดเรียบสม่ำเสมอ

ข้อดีของการใช้สีธรรมชาติ คือ สีธรรมชาติเป็นสารสีที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ผลิตและผู้บริโภค น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม วัตถุดิบหาได้ง่ายในชุมชนไม่ต้องใช้สีเคมีที่นำเข้าจากต่างประเทศ การย้อมสีธรรมชาติสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง เป็นความรู้ที่เพิ่มพูนขึ้นตามประสบการณ์ สามารถถ่ายทอดให้แก่คน

รุ่นหลัง เป็นภูมิปัญญาของท้องถิ่น สีธรรมชาติดีเยี่ยมยังมีความหลากหลาย ตามชนิด อายุ และส่วนของพืชที่ใช้ ตลอดจนชนิดของสารกระตุ้น หรือ ขั้นตอนการย้อม การย้อมสีธรรมชาติทำให้เห็นคุณค่า และรู้จักใช้ประโยชน์ของทรัพยากรธรรมชาติ ก่อให้เกิดความรัก ความหวงแหน และ เรียนรู้ที่จะอนุรักษ์ และ ปลูกทดแทนเพื่อการผลิตที่ยั่งยืน

ข้อจำกัดของสีธรรมชาติ คือ ปริมาณสารสีในวัตถุดิบย้อมสีมีน้อย ทำให้ย้อมได้สีไม่เข้ม หรือต้องใช้ วัตถุดิบปริมาณมาก หรือ มีเจดสีที่จำกัด ความหลากหลายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสีสังเคราะห์ สีซีดจางและมีความคงทนต่อแสง การผลิตสีไม่สามารถผลิตได้ในปริมาณมากและไม่สามารถผลิตสีตามที่ต้องการได้ เนื่องจากคุณภาพการผลิตและการย้อมสีธรรมชาติขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการซึ่งควบคุมได้ยาก การย้อมสีให้เหมือนเดิมจึงทำได้ยาก [28]

2.4.5 การย้อมด้วยสีธรรมชาติ [29]

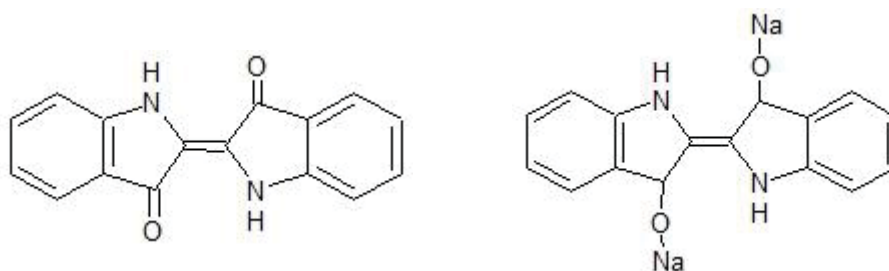
การย้อมด้วยสีธรรมชาติแบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้

2.4.5.1 แบบโดยตรง (direct dyes หรือ substantive dyes)

เป็นการย้อมโดยที่สีที่ใช้ย้อมสามารถเกิดพันธะเคมีกับวัสดุที่นำมาย้อมโดยตรง คือ ถ้าวัสดุที่นำมาย้อมนั้นเป็นพวกเซลลูโลส (cellulose) จะเห็นว่าวัสดุที่นำมาย้อมประเภทนี้มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก จึงสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) กับโมเลกุลของสีได้โดยตรง ส่วนวัสดุที่เป็นพวกพอลิเปปไทด์ (polypeptide) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นโปรตีน จะมีส่วนที่เป็นทั้งหมู่กรด และ หมู่เบสอยู่ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะเกิดปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นหมู่กรด หรือหมู่เบสของสีได้ เกิดแรงดึงดูดไอออนิก (ionic interaction) ซึ่งก็จะเกิดเป็นเกลือขึ้น

2.4.5.2 แบบวัด (vat dyes)

สารที่เป็นสีบางชนิดเมื่ออยู่ในรูปออกซิไดส์ (oxidized form) จะไม่ละลายน้ำ แต่เมื่ออยู่ในรูปรีดิวซ์ (reduced form) จะละลายน้ำได้ ดังนั้น ในการย้อมสีประเภทนี้ในตอนแรกต้องรีดิวซ์สารที่มีสีนั้นให้เป็นสารที่ละลายได้ในน้ำเสียก่อน แล้วจึงนำมาย้อมในสารละลายนั้น ในขั้นต่อไปนำวัสดุที่ย้อมแล้วไปผึ่งให้แห้ง การผึ่งนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะเปลี่ยนสารละลายที่ใช้ย้อมนั้นให้เป็นสารที่มีสี ซึ่งไม่ละลายน้ำจับอยู่บนวัสดุ ตัวอย่าง เช่น ในการย้อมสีอินดิโก (indigo) หรือ สีครามจากต้นคราม อินดิโกนี้เมื่อไม่ละลายน้ำจะเป็นสีน้ำเงิน (oxidized form) แต่เมื่อถูกรีดิวซ์โดยโซเดียมไดไธโอนิต (sodium dithionite) จะได้เป็นลิวโคอินดิโก (leucoindigo) ละลายน้ำได้ และ ไม่มีสี คือ อยู่ในรูปรีดิวซ์ (reduced form) จากนั้นนำวัสดุที่จะย้อมไปแช่กับสารละลายลิวโคอินดิโก แล้วนำวัสดุที่ย้อมนั้นออกมาผึ่งไว้ ลิวโคอินดิโกจะถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศไปเป็นอินดิโกยึด จับทั้งภายในและผิวของวัสดุที่ย้อมอินดิโกที่ไม่ละลายน้ำนี้ จะทำให้สีมีความคงทน เช่น ใช้ย้อมผ้าฝ้าย ดังแสดงในภาพที่ 22



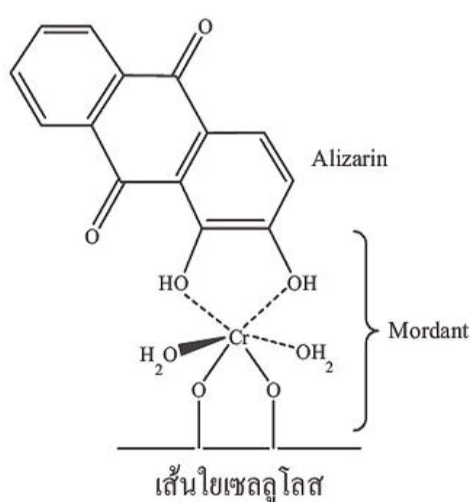
ภาพที่ 22 โครงสร้าง indigo (blue insoluble) (ซ้าย) และ โครงสร้าง leucoindigo (slightly yellow soluble) (ขวา)

2.4.5.3 แบบมอร์แดนต์ (mordant dyes)

การย้อมสีด้วยวิธีนี้เป็นการย้อมแบบที่ใช้สารมอร์แดนต์ด้วยเพื่อช่วยให้การติดย้อมระหว่างตัวสีกับวัสดุที่ใช้ย้อมดีขึ้น ทำให้สีที่ย้อมโดยวิธีนี้มีความคงทน ไม่ตกสีหรือซีดง่าย สารมอร์แดนต์ที่นิยมใช้ก็คือ สารละลายของเกลือโลหะ ได้แก่

- alum (Aluminium potassium sulfate), $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- blue vitriol (Copper sulfate), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- chrom (Potassium dichromate), $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
- tin (Stannous Chloride), SnCl_2

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการย้อมแบบนี้ก็คือ พวกละหะของสารละลายมอร์แดนต์ จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่แข็งแรง (strong complex) กับวัสดุและสีที่ใช้ย้อมจึงทำให้โมเลกุลย้อมติดกับวัสดุที่นำมาย้อมได้ดี



ภาพที่ 23 สารเชิงซ้อนระหว่างโลหะมอร์แดนต์กับสีย้อมธรรมชาติและเส้นใย [5]

การย้อมโดยวิธีนี้อาจทำได้ 3 ลักษณะ คือ

1. นำวัสดุที่ต้องการย้อมชุบสารละลายมอร์แดนท์ก่อนแล้วจึงทำการย้อม
2. ทำการย้อมและชุบสารละลายมอร์แดนท์พร้อมๆกัน
3. ชุบสารละลายมอร์แดนท์ก่อนและหลังทำการย้อม

โดยวิธีนี้ถ้าใช้มอร์แดนท์ที่ต่างชนิดกันแม้ว่าสีที่ใช้เป็นตัวเดียวกันก็ตามวัสดุที่นำมาย้อมที่ได้หลังการย้อมก็จะมีสีที่ต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมอร์แดนท์ เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของมอร์แดนท์สีที่ได้จากการย้อมก็จะเปลี่ยนไป ตัวอย่าง การย้อมสีธรรมชาติโดยใช้โลหะมอร์แดนท์บนเส้นใยเซลลูโลสดังแสดงในภาพที่ 23

2.4.6 สีธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย

2.4.6.1 ไม้ฝาง [7]



ภาพที่ 24 ไม้ฝาง [30]

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Caesalpinia sappan* Linn.

วงศ์ : CAESALPINIACEAE

ชื่ออื่นๆ : ฝางเสน, ง้าย (กะเหรี่ยง-กาญจนบุรี), หนามโค้ง (แพร่), sappan

จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นลักษณะไม้ฝางซึ่งเป็นไม้พุ่มถึงไม้เถา ลำต้นมีหนามโค้งสั้นๆ และแข็งทั่วไป ผลัดใบ ในธรรมชาติอาจพบเป็นไม้เถาขนาดใหญ่ เกิดตามป่าดงดิบเขา ป่าโปร่งทั่วไป ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด ใบ เป็นช่อแบบขนนก 2 ชั้นเรียงสลับกันเป็นช่อ ประกอบด้วยใบย่อยรูปขอบขนานแคบๆ ติดตรงข้ามเป็นคู่ ปลายใบมนและหยัก เว้าตรงกึ่งกลางเล็กน้อย ผิวใบ

เกลี้ยง ทั้ง 2 ด้าน ขอบใบเรียบ ดอก สีเหลือง ออกรวมกันเป็นช่อไม่แยกแขนงตามปลายกิ่ง และง่ามใบใกล้ๆ ปลายกิ่ง กลีบรองดอกมี 5 กลีบ รูปไข่กลับ ผิวและขอบกลีบย่น เกสรตัวผู้ 10 อัน แยกเป็นอิสระ ผล เป็นฝักแบนแข็ง ส่วนที่ค่อนมาทางโคนฝักจะเอียงเล็กน้อย ด้านปลายฝักจะผายกว้าง ปลายฝักจะตัดเป็นลักษณะคล้ายงอยแหลมอยู่ทางมุมด้านนอก แต่ละฝักมีเมล็ดรูปรีๆ 2-4 เมล็ด

ประโยชน์ เนื้อไม้แข็ง ตกแต่งขัดเงาได้ดี แก่นและเนื้อไม้ให้สีแดง รากให้สีเหลือง ใช้ย้อมผ้าและไหม และใช้ใส่เป็นสีใส่อาหาร และ เครื่องดื่ม

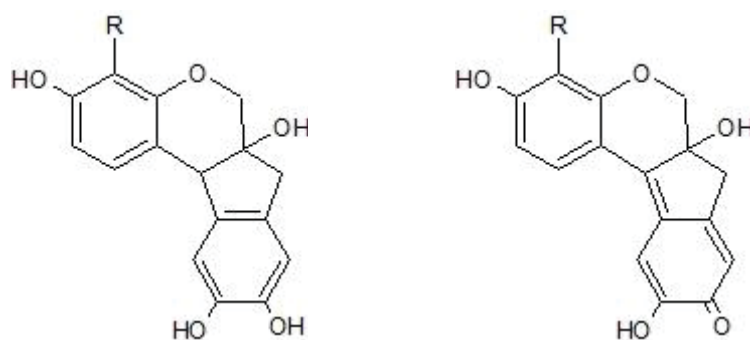
ประโยชน์ทางยา เนื้อไม้เป็นยาระงับระดูอย่างแรง รสขมฝาด ดมเอาน้ำดื่ม บำรุงโลหิต แก้ปวดพิการ แก้ร้อนใน กระหายน้ำ แก้ท้องร่วง แก้ธาตุพิการ แก้โลหิตออกทางทวารหนัก แก้กำเดา แก้เสมหะ



ภาพที่ 25 แก่นของไม้ฝาง [31]

ลักษณะทั่วไปเป็นไม้ยืนต้น ขนาดเล็กถึงขนาดกลางสูงประมาณ 8-10 เมตร ลำต้นมีหนามโค้งสั้นๆ และ แข็ง ส่วนที่ให้สี คือ แก่นและเนื้อไม้ให้สีแดงซึ่งแสดงในภาพที่ 25 รากจะให้สีเหลือง ใช้ย้อมผ้าและไหม และใช้เป็นสีใส่อาหารและเครื่องดื่ม เนื้อไม้มีสรรพคุณทางยา สารที่ให้สีหลักในเนื้อไม้ ได้แก่ brazilin ซึ่งไม่มีสี แต่เมื่อถูกอากาศและแสงจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม ละลายได้ในน้ำ ละลายได้ดีมากในแอลกอฮอล์ อีเทอร์ ในสารละลายเบสจะให้สีแดงเข้ม (carmine-red color) เนื่องจาก brazilin ถูกออกซิไดส์ไปเป็น brazilein ดังแสดงในภาพที่ 26

ไม้ฝางที่จะใช้ในการผลิตสี ควรมีอายุรอบระหว่าง 6-8 ปี เพื่อให้เนื้อไม้แข็งแรงเป็นแก่น การสกัดสีจากไม้ฝางปกติจะบดเป็นผง ทำให้เปียกชื้นด้วยน้ำ ปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดการหมัก เพื่อเร่งการเกิดออกซิไดส์สาร brazilin ไปเป็นสาร brazilein ก่อนต้มสกัดด้วยน้ำเดือด



ภาพที่ 26 โครงสร้าง brazilin (ซ้าย) และ brazilein (ขวา) ตามลำดับ

2.4.6.2 แก่นขนุน [7]



ภาพที่ 27 ต้นขนุน [32]

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อวิทยาศาสตร์ :	<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lamk
วงศ์ :	MORACEAE
ชื่อสามัญ :	Jackfruit
ชื่ออื่นๆ :	มะหนูน ขะหนูน หมากลาง (เหนือ-ใต้) หมักหมี่ บักมี (อีสาน) ชะนูน (ซอง-จันทบุรี) นากอ (มลายู-ปัตตานี) โนน (ชาวนนนครราชสีมา) ขนุน ขะเนอ (เขมร)

จากภาพที่ 27 แสดงให้เห็นลักษณะไม้ขนุนซึ่งเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง สูง 8-15 เมตร ลำต้นหรือกิ่ง เมื่อมีบาดแผลจะมีน้ำยางสีขาวข้นคล้ายน้ำมันไหล ไบ เป็นไบเดี่ยวเรียงสลับ แผ่นใบรูปรี ขนาดกว้าง 5-8 เซนติเมตร ยาว 10-15 เซนติเมตร ก้านใบยาว 1-2.5 เซนติเมตร ปลายใบ ทุ้งแหลม โคนใบมน ผิวในด้านบนเป็นสีเขียวเข้มเป็นมัน เนื้อใบหนา ผิวใบด้านล่างจะสาบมือ ดอก เป็นช่อแบบเชิงสดแยกเพศอยู่รวมกัน ดอกเพศผู้มักงอกตามปลายกิ่ง ดอกเพศเมียจะออกตาม กิ่งใหญ่ และ ตามลำต้นของยอดเกสรเพศเมียเป็นหนามแหลม ส่วนของเนื้อที่รับประทานจะเจริญ มาจากกลีบดอก ส่วนซัง คือ กลีบเลี้ยง ผล เป็นผลรวม ผลกลม และยาวมีขนาดใหญ่ หนัก 10-60 กิโลกรัม ในหนึ่งผลใหญ่มีผลย่อยหลายๆผล (เราเรียกผลย่อยนั้นว่า ขวง)

นิเวศวิทยา มีถิ่นกำเนิดอยู่ที่ประเทศอินเดีย เป็นพืชเศรษฐกิจเมืองร้อนที่ให้ผลมี ขนาดใหญ่ที่สุด มีปลูกทั่วทุกภาคของประเทศไทย ออกดอก จะออกดอกปีละ 2 ครั้ง คือช่วงเดือน ธันวาคม-มกราคม และ เมษายน-พฤษภาคม ขยายพันธุ์ โดยการเพาะเมล็ด, ติดตา และ ทาบกิ่ง ประโยชน์ ผลอ่อนใช้ปรุงอาหาร ผลสุกเชื่อมหุ้มเมล็ดมีรสหวาน เมล็ดปรุงอาหาร ส่วนเนื้อไม้ใช้ทำ พื้นเรือน และสิ่งก่อสร้าง ครก สาก กระเดื่อง หวี โทน รำมะนา ระนาด ราก นอกเหนือจากนั้นแก่น มีสารสีเหลืองชื่อ morin ใช้เป็นสีย้อม ใช้ย้อมผ้า และ โหมให้มีสีเหลืองถึงสีเหลืองน้ำตาล

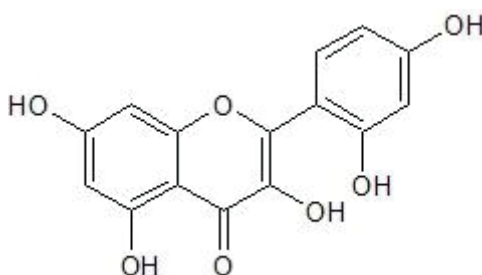


ภาพที่ 28 แก่นขนุน [33]

ประโยชน์ทางยา “ราก” รสหวานอมขม แก้ท้องร่วง แก้ไขสรวพคุณ แก้อาไป ธาตุ กำริบ และโลหิตพิการฝาดสมาน บำรุงกำลัง บำรุงโลหิต “ยาง” รสจืดฝาดเล็กน้อย รักษาแผลเรื้อรัง มีหนอง ใช้ขับพยาธิ ยางขนุนมาผสมกับยางไม้ชนิดอื่นๆเพื่อนำมาทำกับดักนกได้ “ใบสด” ใช้ต้มน้ำให้สัตว์กิน ช่วยขับน้ำมัน และสามารถเผากับขี้เถ้าในนา ได้ถ้าซึ่งเมื่อรวมกับก้นกะลามะพร้าว ขูดใช้ทำยารักษาบาดแผลได้ “ใบสด” นำมาตำให้ละเอียด อุ่นและนำไปพอกแผล “ใบแห้ง” นำมา บดเป็นผง หรือ ใช้ผสมยาทาตรงเป็นแผลภายนอก และแผลมีหนองเรื้อรัง “ก้านขนุนอ่อน” นำก้าน

ขุ่นอ่อนที่มีผลขุ่นติดอยู่ 3-7 ก้านดม่น้ำ รับประทานจะช่วยขับน้ำนม (ยาพื้นบ้านของชาวเหนือ) “ดอกตัวผู้ (ขุ่นหน่ง)” หรือ เรียกว่า “ส่า” ตากแห้ง ใช้เป็นเชื้อจุดไฟได้ และนำมาสุ้มแทรกน้ำปูนใส ทาลิ้นเด็กแก้ซางชุมละอองซาง “ผลอ่อน” สรรพคุณฝาด สมานอาการท้องเสีย “เนื้อผลสุก” รสหวาน บำรุงกำลัง กลิ่นหอม ระบายอ่อนๆ “เมล็ด” ช่วยขับน้ำนมสตรีหลังคลอด บำรุงร่างกาย

แก่นขุ่น มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 28 เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “กรัก” ใช้ย้อมผ้าจีวร รากและแก่นมีสารสี คือ morin ดังแสดงในภาพที่ 29 และ cyanomaclurin ใช้เป็นสีย้อมผ้า และไหม ซึ่งจะให้สีเหลืองถึงสีเหลืองอมน้ำตาล สีที่ได้จากการย้อมด้วยฝ้ายไม่ทนต่อแสง รากและใบใช้ประโยชน์ทางยา มีการศึกษาสารฟลาโวนอยด์ที่สกัดจากขุ่น และสมบัติแอนติออกซิแดนซ์ของ ฟลาโวนอยด์ อีกทั้งมีการทำขุ่นผง จากเนื้อขุ่นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และการใช้ morin ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในสารตัวอย่างต่างๆ เป็นต้น



ภาพที่ 29 โครงสร้างของ morin

2.4.6.3 คราม [7]



ภาพที่ 30 ต้นคราม [34]

ข้อมูลทั่วไป

ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Indigofera tinctoria* Linn.

วงศ์ : Papilionaceae (Leguminosae)

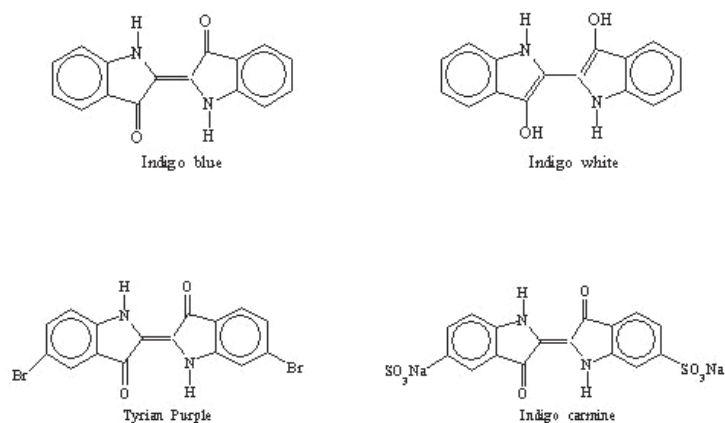
ชื่ออื่นๆ : ครามย้อย, คราม (ภาคกลางและภาคเหนือ), คราม (ไทย), คาม (อีสาน)

จากภาพที่ 30 แสดงให้เห็นลักษณะต้นคราม เป็นไม้พุ่มขนาดเล็ก สูง 1-2 เมตร ใบคล้ายใบก้างปลา แต่จะมีขนาดเล็กกว่า ดอก เป็นสีม่วงแกมน้ำตาล หรือจะเป็นสีชมพู และเป็นสีเขียวอ่อนแกม ดอกจะแน่นและออกเป็นช่อยาวประมาณ 10-15 เซนติเมตร มีอยู่ตามป่าโปร่งทางภาคอีสาน และ ภาคเหนือนิยมปลูกกันไว้เพื่อทำครามสำหรับย้อมผ้า

ประโยชน์อื่นๆ ทั้งต้นใช้เป็นยา ใช้ฟอกขับปัสสาวะ รักษาพิษย้อม น้ำปัสสาวะบุนั่นรักษาฝี

ครามมีชื่อทั่วไป indigo blue หรือ indigo tin เป็นผลึกรูปเข็มสีม่วงหรือสีน้ำเงิน ระเหิดที่ 107 องศาเซลเซียส มีสมบัติไม่ละลายในน้ำ แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และกรดเจือจาง แต่จะละลายได้ดีมากใน aniline และ pyridine ขณะเดือด รวมถึงละลายได้ดีพอควรในกรดอะซิติกต้มเดือด ถ้าละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้วจะปรากฏสีม่วงแดง แต่ถ้าละลายในตัวทำละลายมีขั้วจะปรากฏสีน้ำเงิน ถ้าให้ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเย็นจะเกิดเกลือโซเดียมได้ง่าย เรียกว่า indigo carmine มีสีน้ำเงินเข้มใช้ย้อมติดสีดี จัดเป็นสีแอซิด (acid dye)

indigo blue ถูกรีดิวซ์ในสารละลายต่างกลายเป็นสารไม่มีสีเรียกว่า indigo white ดังแสดงในภาพที่ 31 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร ตัวรีดิวซ์และด่างมีหลายคู่ เช่น ไฮโดรซัลไฟด์กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4/\text{NaOH}$), ผุนผงสังกะสีในน้ำปูนใส อุณหภูมิไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ($\text{Zn}/\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือ น้ำจี้เถ้าในน้ำปูนใส (ภูมิปัญญาท้องถิ่น) ส่วน indigo white ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายมากด้วยออกซิเจนในอากาศกลับไปเป็น indigo blue



ภาพที่ 31 โครงสร้างของ indigo [35]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อนันต์เสวก เทวซึ่งเจริญ และคณะ [7] ได้ศึกษาถึงการพัฒนาสีธรรมชาติสำหรับฝ้าย, สา และไม้ พบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์กลุ่มสารสี และ แทนนินโดยใช้น้ำเป็นตัวสกัด ไม้ฝางและ แก่นขนุน จะมีสารประกอบแทนนิน และ สารฟีนอลิก รวมถึงมีฟลาโวนอยด์ แต่ในครามจะไม่มี สารจำพวกแทนนิน แต่มีสารฟีนอลิก และ ฟลาโวนอยด์ นอกเหนือจากนั้น เขายังพบว่า ไม้ฝางมี สารให้สีหลัก คือ brazilein สารละลายสกัดที่ได้มีสีแดงอิฐ และมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 448 และ 540 นาโนเมตร อีกทั้งความเข้มของสีจากไม้ฝางมีค่าค่อนข้างสูงในช่วงอุณหภูมิ 60-95 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 70 องศาเซลเซียส นอกเหนือจากนั้นเขายังพบว่า ควรใช้ดีบุก (Sn) หรือ อลูมิเนียม (Al) ก่อนการย้อมสี เพราะนอกจากจะให้สีแดงที่เข้มขึ้นแล้ว ยังเพิ่มความคงทนต่อ แสงได้อีกครั้งระดับ ส่วนแก่นขนุนมีสารสีหลัก คือ morin ซึ่งให้เฉดสีเหลืองมากที่สุด และมีค่าความ ยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 387 นาโนเมตร มีความเข้มของสีเหลืองที่สูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากแก่นขนุนเป็นสีที่มีความคงทนต่อแสงต่ำ ควรใช้มอร์แดนต์ดีบุก หรือ อลูมิเนียมก่อนการย้อมสี เพื่อทำให้สีทนต่อแสงมากขึ้น ส่วนการศึกษาจากสีน้ำเงินจากคราม พบว่า ค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ 286 นาโนเมตร และในช่วงที่ตามองเห็นที่ 606 นาโนเมตร และมีค่าที่ 336 นาโนเมตร ซึ่งเหมือนกับการดูดกลืนแสงของ indigo นอกเหนือจาก นั้นยังมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร อีกด้วย แสดงว่า ครามมีสารอินดิโรบิน และ ไอโซอินดิโรบินปนอยู่กับอินดิโก แต่เนื่องจากสารสีน้ำเงินจากอินดิโกไม่ได้มีความสว่างสดใสเท่าสี น้ำเงินสังเคราะห์ทั่วไป และครามที่มาจากแหล่งต่างๆ จะให้สีน้ำเงินที่แตกต่างกัน เนื่องจากความ แตกต่างกันทั้งทางกายภาพ และ ทางเคมี, จากการเพาะปลูก, การดูแลรักษา, การเก็บเกี่ยว และ กรรมวิธีในการผลิตเนื้อคราม ฯลฯ

กรรณิกา ชะไกรน, ปฐมาวดี อธิวงศ์ และ วรณรวิ สิทธิวงศ์ [36] ได้ศึกษาด้านการ พัฒนาระบบการย้อมสีธรรมชาติในผ้าทอสุโขทัยโดยใช้แม่สี 3 สี ได้แก่ สีแดงจากฝาง, สีเหลือง จากแก่นขนุน และสีน้ำเงินจากคราม โดยใช้อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) เป็นสารมอร์แดนท์ โดย ศึกษาผลของการใช้สารช่วยย้อม คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) พบว่า การใช้ NaCl เป็นสารช่วยย้อม จะช่วยให้เฉดสีด้ายมีความสว่างเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำไปตากแดดพบว่า การใช้สารช่วยย้อมไม่ได้ทำให้ ด้ายย้อมมีความคงทนของสีต่อแสง และ ความคงทนต่อการซักล้างของด้ายย้อมลดลง แต่การย้อม ด้ายฝ้ายด้วยสีครามจะช่วยเพิ่มความคงทนของสีต่อแสง แต่ไม่ส่งผลต่อค่าความคงทนของสีต่อการ ซักล้างอย่างชัดเจน

จากงานวิจัยของ D. Ndiaye และคณะ [37] ได้ศึกษาผลของแสงต่อการเสื่อมสภาพของ วัสดุคอมพอสิตไม้พลาสติก โดยจะใช้พลาสติก 2 ชนิด คือ HDPE และ PP เส้นใยไม้ใช้ขนาด 425

ไมครอน และใช้ PPgMA เป็นสารเชื่อมประสาน ทดสอบการเสื่อมสภาพจากแสงโดยใช้เครื่องให้รังสียูวีซึ่งจำลองมาจากสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ให้ค่าความยาวคลื่นในช่วง 300 นาโนเมตร ในสภาวะอากาศ จากนั้นติดตามการเสื่อมสภาพจากแสงตามเวลาต่างๆ โดยพิจารณาพีคของ FTIR ที่เกิดจากหมู่คาร์บอนิลเลขคลื่น $1,713\text{ cm}^{-1}$ กับพีคการสั่นแบบยืดของ -CH จาก PP ที่ $2,722\text{ cm}^{-1}$ ที่เวลาการฉายรังสียูวีต่างๆ พบว่ายิ่งการเติมไม่มากขึ้นจะเร่งให้เกิดการออกซิเดชันมากขึ้น เพราะลิกนิน จากไม้เป็นตัวดูดกลืนยูวีซึ่งเร่งให้เกิดการออกซิเดชัน และ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจะได้หมู่ chromophore เช่น คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล ซึ่งทำให้สายโซ่สั้นลงและเกิดสีเหลือง แต่เมื่อพิจารณาผลของ PPgMA พบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณ PPgMA ยิ่งทนการออกซิเดชันจากแสงได้นานขึ้น เพราะ MA สามารถช่วยดูดกลืนแสงด้วยหมู่ chromophore ของ MA

จากงานวิจัยของ M. Muasher และ M. Sain [38] ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ photostabilizers ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสีในวัสดุคอมพอสิต โดยใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่แตกต่างกันระหว่าง hindered amine ที่เป็นตัว light stabilizer และ UV-absorber ที่ใช้เป็น photostabilizers ในวัสดุคอมพอสิต โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะติดตามจากการวัดสี และ FTIR spectroscopy ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกลไกการเกิด photodegradation จากการเสื่อมสภาพทางธรรมชาติในวัสดุคอมพอสิต จากผลการทดลอง พบว่า การเสื่อมสภาพทางธรรมชาติจะทำให้เกิดการจางหายไปของสี และ สีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ผู้วิจัยเสนอกลไกปฏิกิริยารีดอกซ์อยู่ 2 แบบ คือแบบที่ 1 เกิดจากองค์ประกอบของลิกนินนำไปสู่การฟอร์มตัวเป็น paraquinone chromophoric ซึ่งจะเกิดหลังจากการตากแดดเป็นเวลา 250 ชั่วโมง แบบที่ 2 จะเกิด reduction ของโครงสร้าง paraquinone เป็น hydroquinones นำไปสู่การเกิด photobleaching

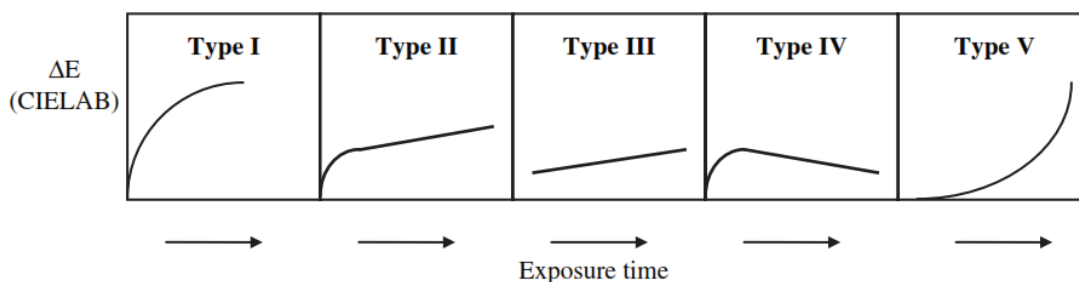
จากงานวิจัยของ D. Cristea และ G. Vilarem [39] ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนต่อแสงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายใน เช่น

➤ โครงสร้างทางโมเลกุลของสี (chemical structure) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของโครงสร้างหลัก (main skeleton) เรียกว่า หมู่โครโมฟอร์ และ ส่วนของหมู่แทนที่ (substituent groups) เรียกว่า หมู่ออกโซโครม โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างหลักจะเกี่ยวข้องกับความเข้มแสงโดยรวมของสี ในขณะที่หมู่แทนที่จะบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความคงทนของแสงของสี การวิเคราะห์โครงสร้างของสีธรรมชาติได้บันทึกค่าดัชนีของแสง ซึ่งเปิดเผยว่า 50% ของสีธรรมชาติที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมียังคงประกอบจำพวก “ฟลาโวนอยด์” โดยทั่วไปสีธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ แอนทราควิโนน, แนนทาคิโนน และ อินดิโกอยด์ แม้ว่าสารประกอบฟลาโวนอยด์จะมีความคงทนต่อแสงที่ต่ำ แต่ แอนทราควิโนน และ อินดิโกอยด์ ถูกบันทึกว่ามีความคงทนต่อแสงอยู่ในระดับดีมากและดีกว่าโครงสร้างอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ความคงทน

ต่อแสงของ แอนทราควิโนน จะมีค่าที่ลดลง เมื่อมีหมู่แทนที่เป็นหมู่ hydroxyl ที่มากขึ้น ในอีกแง่หนึ่ง โครงสร้างทางเคมีของสีธรรมชาติอาจจะมีผลต่อความคงทนต่อแสง เช่น ความสมมาตรของโมเลกุลของสี ซึ่งโมเลกุลของสีที่มีความสมมาตรมากกว่า จะมีความคงทนต่อแสงที่ดีกว่า, ขนาดของโมเลกุลของสี ซึ่งโมเลกุลของสีที่มีขนาดใหญ่จะมีความคงทนต่อแสงที่ด้อยกว่า

➤ ขั้นตอนของการย้อมสีธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้ว มีความสำคัญมากกว่าลักษณะโครงสร้างทางเคมี การที่จะทำให้สีเกิดการกระจายตัวในเส้นใย รวมถึงเส้นใยที่เกิดการแยกกัน ไม่จับกลุ่มเป็นก้อน จะทำให้ความคงทนต่อแสงของเส้นใยมีค่าที่มากขึ้น เพราะ มีพื้นที่ผิวที่สีสามารถไปเกาะกับกลุ่มของเส้นใยได้ดี เมื่อไปตากแดด หรือตากอากาศ

วิธีการตรวจสอบที่เป็นประโยชน์ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขั้นตอนในการย้อมสีธรรมชาติ กับ ค่าความคงทนต่อแสง โดยตรวจสอบจากอัตราการหายไปของสี (fading rate) ของวัสดุ โดยในปี 1965 Giles [40] ได้อธิบายถึงกราฟอัตราการหายไปของสีทั้ง 5 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 32 ซึ่งเขาใช้สี่สังเคราะห์ในการทำการทดลอง จากแบบที่ 1 คือ อัตราการหายไปของสีมีค่าลดลงและคงที่ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ไม่มีการปรากฏขึ้นในทางปฏิบัติ ซึ่งในกรณีนี้เกิดจากที่โมเลกุลของสีเกิดการกระจายเข้าไปภายในเส้นใย แบบที่ 2 อัตราการหายไปของสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และ เมื่อเวลาผ่านไปอัตราจะช้าลงและจะคงที่ที่อัตราค่าหนึ่ง ซึ่งเกิดจากในช่วงแรกสีจะเกิดการรวมกลุ่มกันภายในเส้นใย จากนั้น เมื่อเวลาผ่านไปสีจะเริ่มกระจายตัวทั่วบริเวณเส้นใย โดยทั่วไปสี่สังเคราะห์จะแสดงอัตราการหายไปของสีในแบบที่ 2 ในส่วนแบบที่ 3 แสดงอัตราการหายไปของสีแบบเชิงเส้นที่มีอัตราที่คงที่ ซึ่งโดยมากจะพบใน pigments และ สีที่จางค่อนข้างเร็ว ซึ่งจะรวมกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ภายในเส้นใย แบบที่ 4 คืออัตราการจางสีเริ่มต้นจะมีค่า จากนั้นจะมีอัตราการจางสีที่ช้าลง แบบนี้จะเกิดกับสีที่มีการจางสีที่ช้า แบบที่ 5 อัตราการจางสีจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งพบในสีจำพวก azo dyes บนเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งจะเกิดการลดขนาดอนุภาคจากขนาดใหญ่ ให้มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ กราฟแสดงอัตราการจางหายของสี จะเป็นประโยชน์อย่างมากในเชิงคุณภาพ ที่เกี่ยวกับขั้นตอนการย้อมสีทางกายภาพลงบนเส้นใย มันอาจจะเป็นประโยชน์ในการหาสูตร หรือ ความเข้มข้นของสีที่มีต่อการจางหายของสีของวัสดุ อัตราการจางหายของสีสังเคราะห์จะมีรูปแบบที่หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการจางสีในแต่ละกราฟสำหรับสีธรรมชาติโดยส่วนใหญ่ยังมีเคยมีใครศึกษามาก่อน ในปี 1987 Cox-Crews [41] ศึกษาอัตราการหายไปของสีธรรมชาติบางชนิด เช่น ดันเสมา (cochineal), ดัน fustic, ดัน madder, ดัน weld, ทัวร์มาลิน (turmeric) และ อินดิโก (indigo) โดยอัตราการจางหายไปของสีจะวัดจากเครื่อง tristimulus colorimeter ผลการศึกษาพบว่า การรวมกันของสี mordant/dye จะมีอัตราการจางสีเหมือนรูปแบบที่ 2 และ 3



ภาพที่ 32 Giles' diagrams ของอัตราการจางหายของสี (เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นต่อระยะเวลา) [40]

➤ ความคงทนต่อแสงในเส้นใยผ้า จะสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมี และลักษณะทางกายภาพของเส้นใย จากงานวิจัยของ Cumming และ คณะ [42] ได้ศึกษาว่าการจางสีบนเส้นใยเซลลูโลสจะเกิดจากกระบวนการ oxidative ในขณะที่เส้นใยโปรตีนจะเกิดการจางสีโดยปฏิกิริยareductive Padfield และ Landi [43] ได้อ้างถึงสีอินดิโก ซึ่งเป็นสีที่มีความสามารถในการทนต่อแสงบนเส้นใยขนสัตว์ได้ดีกว่าเส้นใยผ้าฝ้าย ในขณะที่พวกสี madder จะมีลักษณะที่ตรงข้ามกัน วิธีการในการเกิด oxidative จะเกี่ยวข้องกับการหายไปของสีอินดิโกในเส้นใยผ้าฝ้าย อินดิโกยด์โครโมฟอร์ ซึ่งมีความต้านทานในการเกิด photoreduction ทำให้ความคงทนของสีต่อแสงบนเส้นใยขนสัตว์ดีขึ้น ในขณะที่การจางสีของเส้นใยที่ไม่ใช่โปรตีนจะเกิดจากปฏิกิริยareductive

➤ ความคงทนต่อแสงที่มีการใช้มอร์แดนท์ร่วมกับสี จะขึ้นอยู่กับชนิดของมอร์แดนท์ และ วิธีการ mordanting เนื่องจากความแตกต่างของมอร์แดนท์จะทำให้เกิดการ form ตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แตกต่างกัน ทำให้มีความเสถียรต่อแสงแดดได้ไม่เท่ากัน เพราะโลหะมีอิทธิพลจาก positive หรือ negative catalytic ต่อการเกิด photochemical degradation ของสีธรรมชาติในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

นอกเหนือจากปัจจัยภายในที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ยังคงมีปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อความคงทนต่อแสง เช่น

➤ แหล่งกำเนิดของแสง (ธรรมชาติของแสงที่มีอยู่ในธรรมชาติ) จะมีความสำคัญในระหว่างกระบวนการเกิดการจางหายไปของสี สีธรรมชาติที่เป็น fugitive จะเกิดการจางหายไป โดยรังสีที่สามารถมองเห็นได้ ในขณะที่สีที่มีความคงทนต่อแสงสูงจะเกิดการจางหายไปโดยรังสียูวี Gantz และ Sumner [44] ได้กล่าวว่า รังสียูวีจะเป็นปัจจัยหลักในการเกิดการหายไปของสี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สีเหลือง และ สีส้มที่มีความไวต่อแสงค่อนข้างมาก การใช้ตัวกรองยูวี จะช่วยป้องกันการไม่ให้สีเกิดการจางหายไป

➤ อุณหภูมิ และ ความชื้น ภายใต้สภาวะทั่วไปที่มีแสง รวมถึงสภาวะที่มีอุณหภูมิ และ ความชื้น จะมีอิทธิพลในการเร่งการเกิดการจางหายไปของสีในวัสดุเส้นใย มันถูกพบว่าเมื่อ ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงจาก 65% เหลือ 45% จะทำให้การจางหายไปของสีลดลง 25%

➤ การปนเปื้อนในสภาวะบรรยากาศ (atmosphere contaminants) เช่น SO_2 และ ออกไซด์ของไนโตรเจน และ โอโซน ซึ่งอาจจะเข้าทำปฏิกิริยากับสี ทำให้เกิดการหายไป

➤ สารบางชนิด, การปนเปื้อนของสีอื่นๆ อาจจะทำให้เส้นใยมีความคงทนต่อแสงที่ แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น หลังจากการปรับปรุงผิวผ้าไหมด้วยกรดแทนนิน และ การปรับปรุงผิวผ้า ฝ้ายด้วย myrobolans ก่อน และ หลังการย้อมจะมีความคงทนต่อแสงที่ดีมากขึ้น ในทางตรงข้าม การ ปราบกฏขึ้นของสารบางชนิด เช่น แป้ง (starch) หรือ ยางไม้ (gum) จะไปเร่งการเกิดการจางหายไป ของสีมากขึ้น

สารจำพวก UV-absorber ถูกใช้เป็นสารป้องกันการเกิด photodegradation ของวัสดุ จำพวกพอลิเมอร์ซึ่งจะป้องกันแสงที่มาจากธรรมชาติ และ แสงยูวี การเติมสารเหล่านี้จะช่วยในการ ดูดกลืนรังสี และ ปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์ หรือ แสงอินฟราเรดออกมา พลังงานจะทำให้ โมเลกุลเกิดการกระตุ้นไปสู่สภาวะ excited state ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิด photodegradation ปลดปล่อยออกมาเป็นพลังงานความร้อน

UV-absorber ต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้: สามารถดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น ในช่วง 290-490 นาโนเมตร, มีความเสถียรต่อแสงในช่วงระยะที่ยาว, โมเลกุลของสารจะต้อง กระจายตัวในวัสดุและทำหน้าที่ป้องกัน, มีความเหนียวต่อการทำปฏิกิริยากับสารเคมี หรือ สารเติม แต่งใดๆ

โดยส่วนใหญ่สารที่มีความเสถียรต่อรังสี ultraviolet จะต้องเป็นอนุพันธ์ของ 2-hydroxybenzophenone, 2-(2H-benzotriazol-2-yl)-phenols, phenyl esters, substituent cinnamic acids และ nickel chelates นอกเหนือจากนั้น มีรายงานการวิจัยถึงโครงสร้างที่เป็น UV-absorber หลากหลายชนิด ซึ่งมันสามารถกล่าวได้ว่า หมู่แทนที่ที่เป็น benzophenones มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจาก หมู่ hydroxyl ณ ตำแหน่ง ortho เมื่อเทียบกับหมู่คาร์บอนิล จะมีความเสถียรในการเป็น UV-absorber เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่มีความเสถียร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานภายใน ภายในโมเลกุล

ซึ่งจากงานวิจัยของ D. Cristea และ G. Vilarem [39] ได้ศึกษาสี madder, weld และ woad เพื่อศึกษาความคงทนต่อแสงแดด พบว่า สี madder และ weld เป็นสีธรรมชาติ 2 ชนิดที่มีการ จางหายไปของสีในช่วงแรกค่อนข้างเร็ว ต่อมา ก็จะมีการจางหายไปของสีของลดลงเรื่อยๆจนเข้าสู่ สภาวะที่คงที่ นั่นแสดงให้เห็นถึงอัตราการจางหายไปของสีอยู่ในรูปแบบที่ 2 ซึ่งเกิดจากสัดส่วน

ของโมเลกุลขนาดเล็กของสีสามารถกระจายตัวอยู่ในเส้นใย แต่โดยส่วนใหญ่มันโมเลกุลของสีจะเกิดการเกาะรวมกลุ่มกัน แต่สำหรับสี woad เป็นหนึ่งในสีวัต มันจะเกิดการจางหายไปของสีในรูปแบบที่ 3 ผลที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการศึกษาจากสีที่สกัดจากพืช *indigofera tinctoria* ว่ามีสีมากกว่า *Isatis tinctoria* (woad) อัตราการจางสีที่เกิดขึ้น เกิดจากที่สีโมเลกุลใหญ่เกิดการรวมกลุ่มกันภายในเส้นใย ซึ่งจะเกิดการลดบริเวณพื้นผิวเส้นใย ทำให้ ออกซิเจน แสง และความชื้นเข้าไปได้

ในอีกแง่ทางหนึ่ง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีจะพบว่า สีจาก madder จะมีองค์ประกอบจำพวกแอนทราควิโนน ซึ่งอนุพันธ์ของสารประกอบตัวนี้มีไม่น้อยกว่า 19 ชนิด โดยองค์ประกอบที่สำคัญของสารเหล่านี้ เช่น alizarin, purpurin, ruberythric acid และ lucidin-primeveroside โดยทั่วไปแล้ว สีที่เป็นแอนทราควิโนน จะมีความทนทานต่อแสงค่อนข้างดี สำหรับ hydroxyanthraquinone จะมีความคงทนต่อแสงที่น้อยลง เมื่อมีหมู่ hydroxyl เป็นหมู่แทนที่ที่มากขึ้น

ส่วนองค์ประกอบของสีที่ได้มาจาก weld ได้แก่ luteolin, luteolin-7-glucoside, luteolin-3'-7'-diglucoside และ apigenin ความทนทานต่อแสงขององค์ประกอบเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ substituent group (auxochrome)

สีที่เป็นองค์ประกอบของ woad คือ indigotin และ indirubin indigotin จะเป็นโมเลกุลสีที่มีความสมมาตร นอกเหนือจากนั้น indigoid จะมีความทนทานต่อแสงอยู่ในระดับที่ดี และ ความทนทานต่อแสงก็ยังสัมพันธ์กับ substituent group นอกเหนือจากนั้น องค์ประกอบอื่นๆที่เกี่ยวกับขั้นตอนทางกายภาพในการย้อมสีธรรมชาติ อาจจะมีอิทธิพลต่อความคงทนต่อแสงมากกว่า

และเมื่อพิจารณาความคงทนต่อแสง พบว่า สี madder และ woad จะมีความทนทานต่อแสงอยู่ในระดับที่ดีกว่าสี weld ความเป็นจริงนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อโมเลกุลของสีเข้าไปแทรกตัวอยู่ในเส้นใย indigotin จะเกิดการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ ทำให้ไม่ละลายน้ำ และ แอนทราควิโนน จะรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ภายในเส้นใย ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ (metal-complexes) Giles และ คณะ [40] ได้กล่าวถึงองค์ประกอบของ alizarin ต่อความทนทานต่อแสง ที่สามารถเกิดการ shift ของเส้น absorption เส้นสเปกตรัมว่า มันจะเกิดการฟอร์มสารประกอบเชิงซ้อนโลหะ Van Beek [45] ได้สันนิษฐานว่า ไอออนของโลหะถูกกระตุ้นอย่างรวดเร็วไปสู่สถานะ excited state ดังนั้น การปรากฏภายในระบบจะมีความเสถียรต่อแสงที่เพิ่มขึ้น ส่วน สีเหลืองเป็น UV-filter จะทำให้เกิดการ absorb ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการทำลายจากรังสียูวีสำหรับสีธรรมชาติชนิดนี้

นอกเหนือจากนั้น การศึกษาครั้งนี้ได้แสดงว่า 2-hydroxybenzophenone ไม่มีประสิทธิภาพในการเป็น UV absorber สำหรับสีธรรมชาติทั้งสามชนิดที่ยึดติดลงผ้าฝ้าย ดังแสดงในภาพที่ 33 นอกเหนือจากนั้น phenyl salicylate แสดงให้เห็นว่า มีการ absorption รังสียูวีจาก

(minimum inhibitory concentration; MIC) ของสีธรรมชาติทั้ง 4 ชนิดจะอยู่ระหว่าง 5-40 μg และเมื่อทำการข้อมลงบนผ้าพบว่า ความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์มีค่าต่ำกว่าค่า MIC

จากงานวิจัยของ Mari K. และ คณะ [47] ทำการศึกษาถึงการต้านเชื้อแบคทีเรียของสาร tryptanthrin และ kaempferol จากพืช indigo (*Polygonum tinctorium* Lour.) เพื่อต้านการเชื้อแบคทีเรียชนิด *Helicobacter pylori* ที่เป็นเชื้อทำให้เกิดโรคน้ำในมอโกเลีย โดย incubated ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส, สภาวะ CO_2 10%, เป็นเวลา 5 วันใน agar แล้วนับเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้น จากนั้นทดลองในหมอมองโกเลียตามมาตรฐาน ATCC 43504 โดยการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียชนิดนี้ หลังจากนั้น นิดสาร tryptanthrin และ kaempferol พบว่า หมอมองโกเลียมีเชื้อ *H.pylori* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อฉีดสาร tryptanthrin และ kaempferol นั้นแสดงว่า สารทั้งสองชนิดนี้ สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคท้องร่วงในหมอมองโกเลียได้

จากงานวิจัยของ Penpun W. และคณะ [48] ได้ศึกษาความสามารถในการต้านการเกิดออกซิเดชันของแก่นไม้ฝาง (*Caesalpinia sappan* L.) ในช่วงอายุที่แตกต่างกัน โดยการหาอายุของไม้ที่ทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นตัวต้านการเกิดออกซิเดชันที่ดีที่สุด แก่นไม้ที่ใช้ในสัปดาห์จะใช้ปรับเปลี่ยนตามสัดส่วนตัวทำละลาย $\text{CH}_3\text{OH}:\text{CH}_2\text{Cl}_2$ และ อายุของเนื้อไม้ เพื่อวัดปริมาณของ brazilin และ ความสามารถในการต้านการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของ $\text{CH}_3\text{OH}:\text{CH}_2\text{Cl}_2$ อยู่ที่ 1:3 และเมื่ออายุของไม้มากขึ้น จะทำให้ปริมาณของการต้านการเกิดออกซิเดชันดีขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณของ brazilin และ อนุพันธ์ของ brazilin

จากงานวิจัยของ Masud S. Huda และ คณะ [49] ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของเส้นใยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารเชื่อมประสานชนิด silane ที่มีต่อสมบัติต่างๆของวัสดุ laminated biocomposites จากพอลิแล็กติก แอซิด และ เส้นใยปอกระเจา โดยวัสดุคอมพอสิตจะถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการ compression molding เพื่อผลิตเป็นฟิล์ม โดยพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงด้วย silane ในเส้นใยที่ใช้เป็นสารเสริมแรง ร่วมกับการเปิดผิวด้วยสารละลาย alkaline จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงมากกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวในวัสดุคอมพอสิต การเปิดผิวผิวไม้ด้วยสารละลาย alkali ตามด้วยการปรับปรุงด้วย silane จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ค่าอุณหภูมิในการอ่อนตัว (heat deflection temperature; HDT) ของวัสดุคอมพอสิต PLA laminated จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ยิ่งไปกว่านั้น ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้จากการศึกษา SEM แสดงให้เห็นว่ามีแรงยึดเหนี่ยวที่กระหว่างเส้นใย และ พอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น มันพบว่า PLA resin เหมาะสมในการผลิตเป็น laminated biocomposites ซึ่งเป็นประโยชน์ในงานทางด้านวิศวกรรม

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) โดยใช้ผงไม้สนเป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต โดยผงไม้สนจะผ่านการย้อมสีธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ สีเหลืองจากแก่นขนุน (jackfruit tree) สีแดงจากแก่นไม้ฝาง (sappan wood) และ สีนํ้าเงินจากคราม (indigo blue) แล้วเติมลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จากนั้นเปรียบเทียบสมบัติต่างๆกับวัสดุคอมพอสิตที่เติมผงไม้สนแต่ละชนิด หลังจากนั้นจะนำเอาวัสดุคอมพอสิตไปจำลองการตากแสงภายในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลานาน 3 เดือน โดยทำการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพทั้งก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และ สมบัติทางเคมี รวมถึงสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม

3.1 วัสดุดิบ

3.1.1 พอลิแล็กติก แอซิด (poly lactic acid, PLA)

PLA เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดเทอร์โมพลาสติก ซึ่งเตรียมจาก กรดแล็กติก หรือ แล็กไทด์ โดยผ่านกระบวนการ direct polymerization หรือ ring-opening polymerization ตามลำดับ โดยมีสูตรโครงสร้างเคมีดังแสดงในภาพที่ 3 ในบทที่ 2 โดยงานวิจัยนี้ใช้ PLA จากบริษัท NatureWorks® เกรดชนิด 3051D โดยมีหมายเลขการผลิต (batch) VI 2428B113

3.1.2 ผงไม้สน (pine wood)

ผงไม้สนใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ โดยผงไม้สนที่ใช้ได้มาจาก บริษัท Deqing Linpai Wood Flour Co. ประเทศจีน ซึ่งมีขนาดของอนุภาคผงไม้ในช่วงระหว่าง 200 mesh (60-70 μm) โดยใช้สัดส่วนการเติมผงไม้ต่อพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ 20:80 โดยน้ำหนัก

3.1.3 3 - (Triethoxysilyl)-propanamide; 3-TEPA

3-TEPA ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (coupling agent) ให้พอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA กับ ผงไม้สนเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากในองค์ประกอบของ 3-TEPA ประกอบด้วยส่วนที่มีขั้ว และ ส่วนที่ไม่มีขั้ว จึงช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว และ ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ PLA และ ผงไม้สน โดย 3-TEPA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซื้อมาจากบริษัท Merck เกรด analytical ที่มีความบริสุทธิ์ 98.7%

3.1.4 สีย้อมธรรมชาติ

สีย้อมธรรมชาติที่เลือกใช้มีทั้งหมด 3 สี ได้แก่ สีเหลืองจากแก่นขนุน สีแดงจากแก่นไม้ฝาง และสีน้ำเงินจากคราม โดยวัตถุดิบที่ใช้ซื้อมาจากกลุ่มชุมชนบ้านหนองอาบช้าง จังหวัดเชียงใหม่ โดยสีเหลืองและสีแดงจะใช้น้ำ deionized ในการต้มสกัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นนำผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ย้อมสีภายใต้ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สำหรับสีน้ำเงินจากครามจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไดไธโอไนต์ ($\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) ทำให้สีครามที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นสารละลายสีเขียวแกมเหลืองใส จากนั้นทำการย้อมผงไม้สนที่อุณหภูมิห้อง ผึ่งผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีครามให้เกิดออกซิเดชันในบรรยากาศโดยจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน

3.1.5 สารเคมีที่ใช้

- sodium hydroxide, NaOH	grade COM.	Vidhyasom Co.,Ltd.
- ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (95%)	grade L.R.	Union Intraco Co.,Ltd
- acetic acid, CH_3COOH (99.7%)	grade A.R.	Labscan Asia Co.,Ltd.
- aluminium sulphate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 51-59\%$]	grade A.R.	Ajax Finechem Pty Ltd.
- sodium dithionite, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$ [$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 = 80\%$]	grade A.R.	Ajax Finechem Pty Ltd.

*COM = commercial grade, L.R. = laboratory grade, A.R. = analytical grade

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะหมู่ฟังก์ชันของสาร Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) บริษัท Bruker รุ่น Vertex 70

3.2.2 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต Universal testing machine บริษัท Instron instrument รุ่น 4204 สหรัฐอเมริกา

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

3.2.4 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพโดยใช้วัดความแตกต่างของความร้อนที่ให้กับสารอ้างอิง และ สารตัวอย่าง Differential scanning calorimeter (DSC) บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC 1

3.2.5 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน Thermo gravimetric 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 เครื่องตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของสีก่อน และ หลังการย้อม ด้วยการใช้นิเทศการดูดกลืนแสง UV-VIS Spectroscopy บริษัท PG Instruments รุ่น T80+

3.2.9 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ co-rotating twin screw extruder บริษัท รุ่น SHJ-25 ประเทศจีน

3.2.10 เครื่องบดเม็ดพลาสติก (grinder) บริษัท Bosco Engineering Co.Ltd. ประเทศไทย

3.2.11 เครื่อง Injection molding บริษัท Battenfeld รุ่น PLUS 350/75

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การปรับปรุงผิวผงไม้สนด้วยวิธีการทำ alkaline treatment

3.3.1.1 นำผงไม้สน เดิมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตรโดยใช้ผงไม้สน 100 กรัม ต่อสารละลาย NaOH 2 ลิตร จากนั้นกวนด้วย mechanical stirrer เพื่อให้ผงไม้กระจายตัวในสารละลายอย่างทั่วถึงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.1.2 จากนั้นทำการสะเทินด้วยกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้น 1 mol/dm³ (1 M) จนสารละลายมี pH เท่ากับ 7 หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 1 รอบ และแช่น้ำทิ้งไว้ข้ามคืนเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นเปลี่ยนน้ำ แล้วแช่ทั้งหมด 5 ครั้ง เพื่อกำจัดเกลือที่เกิดจากการสะเทิน และ เบสบางส่วนที่เหลืออยู่ออกจนหมด

3.3.1.3 นำผงไม้ที่ได้หลังจากการแช่น้ำ อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน เพื่อระเหยน้ำจากผงไม้

3.3.2 การสกัดสีธรรมชาติ

3.3.2.1 สีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง

บดหรือสับแก่นไม้ ให้มีขนาดเล็ก จากนั้นทำการนึ่งผงไม้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการสกัดสีด้วยน้ำ deionized ในอัตราส่วนไม้ ต่อ น้ำที่ 1 ต่อ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ต่อจากนั้น นำไปต้มให้เดือดอ่อนๆ ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยกวนตลอดเวลา หลังจากนั้นกรองแยกกากไม้เพื่อเอาน้ำย้อมออกจากวัตถุดิบ

3.3.2.2 สีนํ้าเงินจากคราม

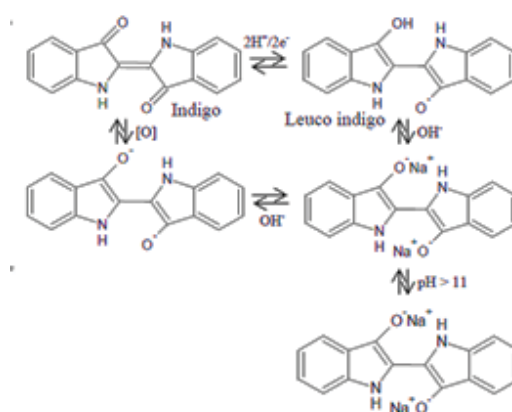
paste ที่ได้จากสีครามจะไม่ละลายน้ำ จึงต้องค่อยๆเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 5 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ โซเดียมไดไฮโอไนต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) จนค่า pH มีค่าเท่ากับ 11.5 เขย่าจนเห็นเป็นสารละลายสีเขียวแกมเหลืองใส



ภาพที่ 35 ลักษณะสีธรรมชาติที่ได้จากการสกัดก่อนการย้อมลงในผงไม้สน ก) สีเหลืองจากแก่นขนุน ข) สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ค) สีนํ้าเงินจากคราม

3.3.3 การย้อมสีธรรมชาติลงบนผงไม้สน

ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และผ่านการอบแห้งแล้ว จะถูกย้อมสีธรรมชาติแต่ละชนิด ในอัตราส่วน liquor ratio เท่ากับ 1:10 โดยสำหรับสีเหลือง และสีแดงที่ได้ จะถูกย้อมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยเติมสารช่วยย้อม คือ อลูมิเนียมซัลเฟต $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$ 1.5 % โดยน้ำหนักของผงไม้ สำหรับสีนํ้าเงินจะถูกย้อมที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหลังจากการย้อมแล้วผงไม้สนต้องผึ่งลมให้แห้ง เพื่อให้สีของผงไม้เกิดการออกซิเดชันเป็นสีนํ้าเงินในรูปที่ไม่ละลายน้ำ (leucoindigo) ดังแสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ รีดักชันของ โครงสร้างสี indigo [50]

3.3.4 การหา % dye absorption โดยใช้เทคนิค UV-VIS spectroscopy

สีธรรมชาติที่ได้จากการสกัดทั้ง 3 ชนิดจะถูกวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 380-800 นาโนเมตร โดยใช้อัตราการ scan 200 นาโนเมตรต่อนาที เพื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ค่าหนึ่งๆ เพื่อนำมาสร้าง calibration curve จากนั้นทำการคำนวณความเข้มข้นก่อนและหลังย้อม เพื่อหา % dye absorption ตามสมการที่ 2

$$\% \text{ Dye absorption} = \frac{[a] - [b]}{[a]} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดยที่ [a] เป็นความเข้มข้นก่อนการย้อมในผงไม้ และ [b] เป็นความเข้มข้นหลังการย้อมในผงไม้

3.3.5 การปรับปรุงผิวผงไม้โดยใช้สารเชื่อมประสาน 3-TEPA

ก่อนการปรับปรุงผิว ผงไม้สนทั้งหมดจะถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดน้ำออก จากนั้นจึงเติมสารเชื่อมประสานในปริมาณ 5 % โดยน้ำหนักของผงไม้ (5 phr) โดยก่อนเติมสารเชื่อมประสาน 3-TEPA จะถูกเตรียมในตัวยาง คือ สารละลายเอทานอล ในอัตราส่วน น้ำ:เอทานอล เท่ากับ 40:60 โดยใช้ตัวยางปริมาตร 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นค่อยๆหยดสารละลายผสมในเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (internal mixer) หลังจากเติมสารเชื่อมประสานแล้ว ผงไม้ทั้งหมดจะอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้แห้ง



ภาพที่ 37 ผงไม้แต่ละชนิดหลังการปรับปรุงด้วย 3-TEPA ก) ผงไม้สน ข) ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ค) ผงไม้สนที่ย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน ง) ผงไม้สนที่ย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง จ) ผงไม้สนที่ย้อมสีน้ำเงินจากคราม

3.3.6 กระบวนการผสม PLA และผงไม้สนชนิดต่างๆ

ก่อนการผสมเป็นวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ พอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA, ผงไม้สนแต่ละชนิด จะถูกอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน จากนั้นทำการผสมวัสดุคอมพอสิตชีวภาพตาม สูตรดังแสดงในตารางที่ 2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder) และ ใช้ ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 90 rpm โดยอุณหภูมิของกระบอกหลอมอยู่ในช่วง 155-180 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนการผสมระหว่างผงไม้ และ PLA ในแต่ละสูตร คือ 20:80 โดยน้ำหนักในทุกสูตร จากนั้นผ่านกระบวนการอัดรีดและเย็นตัวในบรรยากาศ แล้วจึงผ่านกระบวนการบดเม็ดพลาสติกให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้เครื่องบดพลาสติก (grinder) จนได้เม็ดวัสดุคอมพอสิตดังแสดงในภาพที่ 38 จากนั้นจึงนำเม็ดวัสดุคอมพอสิตไปอบที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน ก่อนนำไปขึ้นรูปต่อเป็น ชิ้นงานในรูป dog bone ด้วยเครื่อง injection molding ดังแสดงในภาพที่ 39

ตารางที่ 3 สูตรการผสมของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพระหว่างผงไม้สน และ PLA

Sample	Compositions	Ratio (phr)
PLA	PLA	100
W-WPC	PLA : pure wood : 3-TEPA	80:20: (5)
AL-WPC	PLA : alkali treated wood : 3-TEPA	80:20: (5)
R-WPC	PLA : red (sappan wood) : 3-TEPA	80:20: (5)
Y-WPC	PLA : yellow (jackfruit wood) : 3-TEPA	80:20: (5)
B-WPC	PLA : blue (indigo) : 3-TEPA	80:20: (5)



ภาพที่ 38 วัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่ผ่านการผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่



ภาพที่ 39 วัสดุคอมพอสิตหลังจากขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด (injection molding)

3.3.7 การทดสอบความเสถียรต่อแสงแดด

ชิ้นงานคอมพอสิตที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 39 จะถูกจำลองสภาวะการตากแสงในกล่องรังสียูวี โดยการจำลองสภาวะภายในกล่องแสงยูวี ที่มีอุณหภูมิในช่วง 23-30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ $50 \pm 5\% \text{RH}$ เป็นเวลา 3 เดือนติดต่อกัน

3.3.8 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงไม้สนชนิดต่างๆ และ วัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA ผสมผงไม้สนชนิดต่างๆ

3.3.8.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผงไม้สน, ผงไม้สนที่ผ่านปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และผงไม้สนหลังจากการเชื่อมสัทธิธรรมชาติ รวมถึงการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) โดยศึกษาในช่วงเลขคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ 16 scans ความละเอียด 4 cm^{-1} โดยใช้โหมด TR-FTIR โดยเตรียมผงไม้ตัวอย่างบดผสมกับ KBr ในอัตราส่วน 1:9 โดยน้ำหนัก แล้วอัดเป็นแผ่นก่อนการทดสอบ

3.3.8.2 ศึกษาความเสถียรทางความร้อนของผงไม้สน, ผงไม้สนที่ผ่านการ treated ด้วย NaOH และผงไม้สนหลังจากการเชื่อมสัทธิธรรมชาติด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analysis (TGA) โดยใช้โหมด temperature scan ในช่วงอุณหภูมิการศึกษา 50-500 องศาเซลเซียส ในอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทั้งในสภาวะก๊าซไนโตรเจน และ ก๊าซออกซิเจน ด้วยอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที จากนั้นศึกษาในโหมด isothermal ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งในสภาวะไนโตรเจน และ ออกซิเจน เพื่อวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของผงไม้แต่ละชนิด

3.3.8.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพตามมาตรฐาน ASTM D638-08 ด้วยเครื่อง Instron-4204 tensile testing machine ที่โหลด cell 5 กิโลนิวตัน ด้วยอัตราเร็วในการดึง 5.0 มิลลิเมตรต่อนาที โดยชิ้นงาน PLA และวัสดุคอมพอสิตชีวภาพจะทดสอบ 8 ชิ้นงานในทุกๆชุด จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า tensile strength, % elongation และ ค่า modulus ทั้งนี้จะเก็บชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีมาทดสอบในทุกๆเดือน จนครบ 3 เดือน

3.3.8.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพทั้งก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีในทุกๆชุด ด้วยเทคนิค TGA โดยศึกษาในโหมด temperature scan ในช่วงอุณหภูมิการศึกษา 50-500 องศาเซลเซียส ในอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทั้งในสถานะก๊าซไนโตรเจน และ ก๊าซออกซิเจน ด้วยอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 50 มิลลิตรต่อนาที

3.3.8.5 ศึกษาความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพทั้งก่อน และ หลังการตากรังสียูวีในทุกๆชุดด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 0-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และ อัตราการหล่อเย็นที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้สถานะก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 50 มิลลิตรต่อนาที

3.3.8.6 ศึกษาการเสื่อมสภาพต่อแสงแดด โดยการติดตามเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพทั้งก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีในทุกๆชุด ด้วยเครื่อง FTIR โดยศึกษาในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ 64 scans ความละเอียด 4 cm^{-1} โดยใช้โหมด ATR-FTIR

3.3.8.7 ศึกษาความเสถียรต่อแสงแดด โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นในวัสดุคอมพอสิตชีวภาพทั้งก่อน และ หลังการตากรังสียูวีในทุกๆชุด ด้วยเครื่อง color reader รุ่น CR-10 จากบริษัท Konica Minolta Sensing โดยการวัดค่าสีในระบบ CIE L*a*b* โดยติดตามค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง (ΔL^*) ค่าการเปลี่ยนแปลงความเป็นสีเหลือง (Δb^*) และค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่เกิดขึ้น และทำการวัดสีในกล่องแสงแบบ daylight

3.3.8.8 ศึกษาลักษณะฐานานวิทยาของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพทั้งก่อน และ หลังการตากรังสียูวีในทุกๆชุดด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) โดยการนำเอาชิ้นงานทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วตีให้แตกด้วยค้อน หลังจากนั้นทำการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยทองคำก่อนการทดสอบ

3.3.8.9 ศึกษาผลของการต้านเชื้อแบคทีเรียที่พบมากในสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาจาก สัณนิษฐานที่สกัดออกมาได้, พงไม้หลังจากการย้อมสีธรรมชาติ และวัสดุคอมพอสิตที่ผสมพงไม้ หลังการย้อมสีธรรมชาติ โดยแบคทีเรียที่เลือกมาศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดแรก แบคทีเรียแกรม บวก ชื่อ *Bacillus subtilis* ส่วนชนิดที่สองเป็นแบคทีเรียแกรมลบ ชื่อ *Escherichia coli* โดยมี ขั้นตอนการเลี้ยงเชื้อดังนี้

- ละลาย nutrient agar (NA) จำนวน 8.4 กรัมลงในน้ำ deionized 300 มิลลิลิตร คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

- ละลาย nutrient broth (NB) จำนวน 13 กรัมลงในน้ำ 1000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปิเปตในหลอดทดลองจำนวน 20 หลอด หลอดละ 5 มิลลิลิตร

- นำ NA และ NB ที่ได้ไปผ่านการ autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

- นำ NA ที่ได้ใส่ลงใน plate พลาสติกจนเต็ม จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนเกิดการแข็งตัว ใส่ถุงพลาสติก แล้วทำการบ่มในตู้อบ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน

- นำเชื้อแบคทีเรียที่ต้องการศึกษามา incubated ลงใน NB แล้วทำการบ่มใน ตู้อบ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน

- ทำการปิเปต NB ที่มีเชื้อปริมาณ 10 ไมโครลิตรลงใน plate ที่มี NA จากนั้น spread เชื้อจากให้ทั่ว plate แล้วจึงนำเอาชิ้นงานตัวอย่างไปวางใน plate ที่มีเชื้อ

- บ่ม plate ที่มีชิ้นงานในตู้อบ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน จากนั้น สังเกตลักษณะ clear zone ที่เกิดขึ้นรอบๆชิ้นงาน (ลักษณะเป็นวงใสๆ แสดงว่า มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ประสิทธิภาพของการย้อมสีธรรมชาติในผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH

การย้อมสีธรรมชาติในผงไม้สนสำหรับงานวิจัยนี้จะทำในกระบวนการเช่นเดียวกับการย้อมสีผ้าฝ้าย หรือ เส้นใยอื่นๆ ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ในการย้อมสีธรรมชาตินั้น มีการใช้สารมอร์แดนต์ หรือ สารช่วยย้อม เพื่อให้ประสิทธิภาพในการย้อมติดสีที่ดีขึ้น และ ในการย้อมสีธรรมชาติจะมีวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปในงานวิจัยกำหนดให้กระบวนการย้อมสีของผงไม้ด้วยสียชนิดต่างๆ ทำในสภาวะการดูดซึม หรือ ดูดจับของอนุภาคของสีในผงไม้มากกว่า 60% แต่จากผลการศึกษาร้อยละการดูดซึมสีในผงไม้สน โดยใช้เทคนิค UV-VIS พบว่า สียธรรมชาติทั้งสามชนิดมีร้อยละการดูดซึมสีในผงไม้สนมากกว่า 80% ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH กำจัดองค์ประกอบที่เป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ เช่น เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน จึงทำให้มีความเข้มข้นขององค์ประกอบของเซลลูโลสมากขึ้นในผงไม้ ทำให้ผิวของผงไม้มีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น (hydrophilicity) สีจึงแพร่เข้าสู่ผงไม้แล้วยึดติดได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4 ร้อยละการดูดซึมสีธรรมชาติแต่ละชนิดในผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH

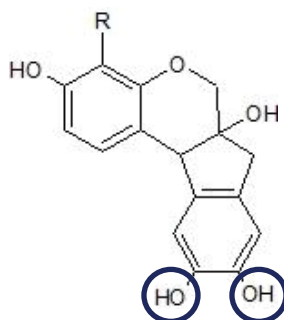
ชนิดของสีธรรมชาติ	% Dye absorption
สีเหลืองจากแก่นขนุน ($\lambda_{\max} = 399 \text{ nm}$)	89.01
สีแดงจากไม้ฝาง ($\lambda_{\max} = 499 \text{ nm}$)	94.63
สีน้ำเงินจากคราม ($\lambda_{\max} = 663 \text{ nm}$)	91.69

จากตารางที่ 4 พบว่าร้อยละการดูดซึมสีแดงจากแก่นไม้ฝางมีร้อยละการดูดซึมสีที่มากที่สุด รองลงมาเป็นสีน้ำเงินจากคราม และ สีเหลืองจากแก่นขนุนมีร้อยละการดูดซึมสีน้อยที่สุด อาจเป็นเพราะผลของลักษณะ โมเลกุลใน โครงสร้างของสีที่แตกต่างกันรวมถึงวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน

ในกรณีการย้อมด้วยสีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ซึ่งมีการย้อมภายใต้อุณหภูมิที่สูง และ มีการใช้สารช่วยย้อม คือ อลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ซึ่งเป็นสารประกอบของเกลือโลหะอลูมิเนียม พบว่าสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสี (metal dye complexes) โดยที่สารช่วยย้อมจะทำปฏิกิริยากับสีย้อมผ่านพันธะโคเวเลนต์ หรือ พันธะโคออดิเนตโคเวเลนต์ กับหมู่อะตอมในโครงสร้างของสีที่สามารถให้อิเล็กตรอนตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป และจะสร้างพันธะเชิงซ้อนแก่อะตอมกลางที่เป็นโลหะช่วยย้อม ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนประเภทวงแหวน (chelate) ซึ่งสามารถยึดติดกับโครงสร้างของหมู่ hydroxyl ใน cellulose ได้ดี จึงทำให้มีร้อยละการดูดซึมสีที่สูง [29] แต่เนื่องจากโครงสร้างของสีเหลืองจากแก่นขนุน มีโครงสร้างเป็น morin [7] ดังแสดงในภาพที่ 40 ซึ่งมีหมู่อะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนแก่โลหะได้ แต่เนื่องจากตำแหน่งหมู่อะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนแก่โลหะนั้นสามารถเกิด tautomerism เมื่อถูกกระตุ้นโดยการดูดพลังงาน ทำให้เกิดสารประกอบ enol ซึ่งสามารถคายพลังงานกลับไปสู่โครงสร้างของ morin เดิมได้ ดังนั้น พันธะของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะช่วยย้อมกับโครงสร้างของสีธรรมชาติ และผงไม้สนจะมีความเสถียรที่ต่ำกว่า ในทำนองเดียวกัน โครงสร้างของสีแดงจากแก่นไม้ฝาง จะมีลักษณะโครงสร้างเป็น brazilin [7] ดังแสดงในภาพที่ 41 สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนประเภทวงแหวนได้เช่นกัน เนื่องจากมีหมู่ hydroxyl 2 หมู่ที่สามารถให้อิเล็กตรอนกับโลหะช่วยย้อมได้ แต่เนื่องจากโครงสร้างของ brazilin ไม่สามารถเกิด tautomerism เหมือนกับโครงสร้างของ morin ดังนั้น ความเสถียรของพันธะเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับโครงสร้างของสีธรรมชาติจะมีความเสถียรที่มากกว่า จึงมีร้อยละการดูดซึมสีที่สูงกว่า

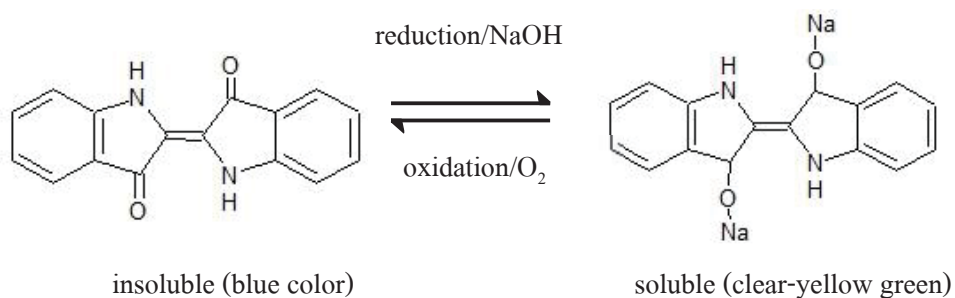


ภาพที่ 40 การเกิด tautomerism ของโครงสร้าง morin ในสีเหลืองจากแก่นขนุน (วงกลมสีน้ำเงินแสดงหมู่อะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้ วงกลมสีฟ้าแสดงหมู่อะตอมที่สามารถเกิด tautomerism ได้)



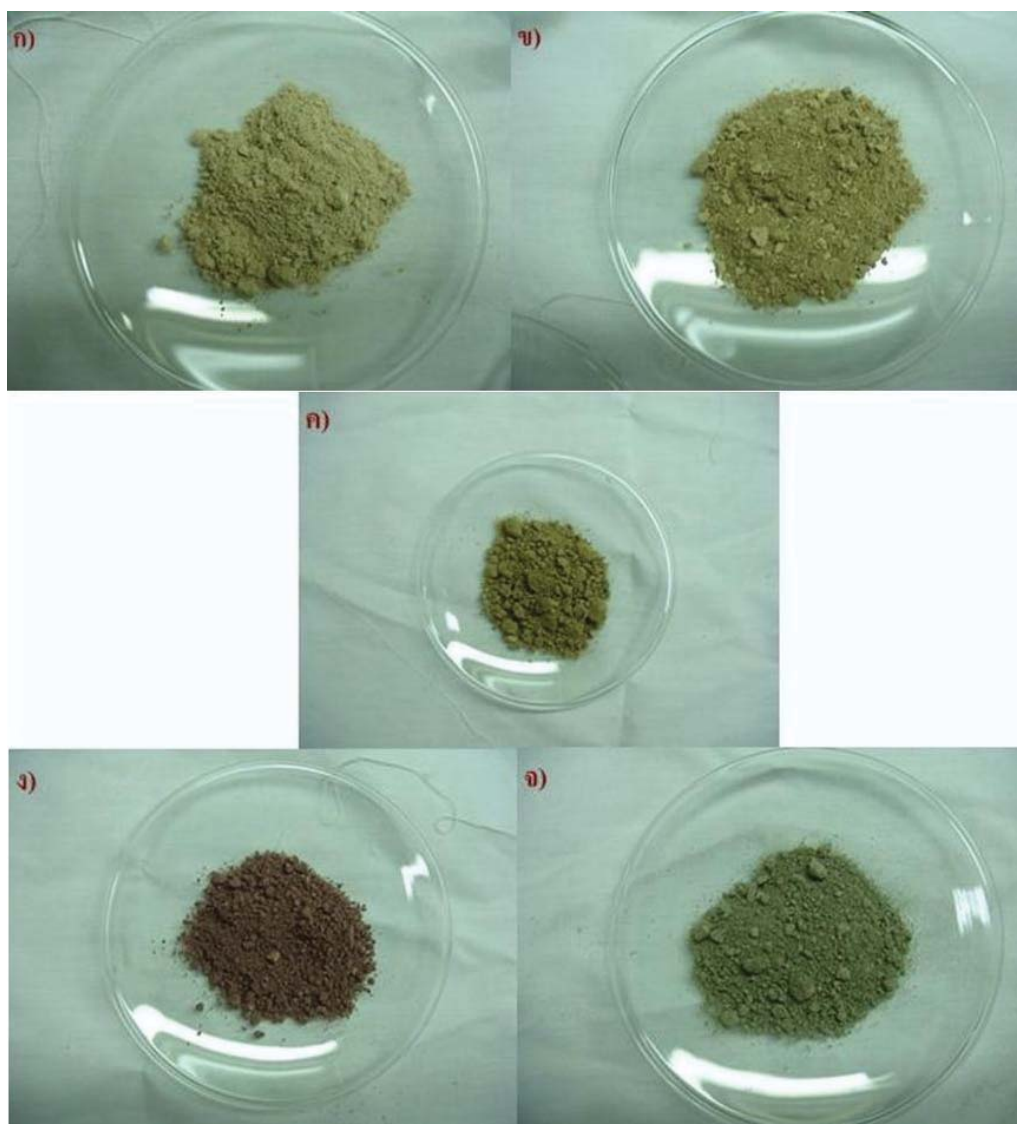
ภาพที่ 41 โครงสร้างของ brazilin ในสีแดงจากแก่นไม้ฝาง (วงกลมสีน้ำเงินแสดงหมู่อะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้)

แต่อย่างไรก็ตามในกรณีการย้อมสีน้ำเงินจากคราม ซึ่งมีการย้อมภายใต้อุณหภูมิห้องพบว่า การที่สีติดซึมในผงไม้ได้ดี เป็นผลมาจากสีครามมีการย้อมแบบสียัต (Vat dyed) ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นโครงสร้างที่ละลายน้ำ ซึ่งจะก่อให้เกิดพันธะไฮดรอกซิลในโครงสร้างของสี ซึ่งโมเลกุลที่เกิดขึ้นสามารถละลายน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 42 จึงทำให้โมเลกุลของสีสามารถแพร่ผ่านไปพร้อมกับน้ำเข้าไปสู่ในผงไม้ได้ง่าย จึงทำให้ร้อยละการดูดซึมสีมีค่าที่สูงขึ้น สีครามจึงย้อมติดผงไม้ได้ดี



ภาพที่ 42 การย้อมสีน้ำเงินจากครามที่ใช้การย้อมแบบยัตในสภาวะที่เป็นด่าง

จากภาพที่ 43 แสดงลักษณะทางกายภาพของผงไม้สน, ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด จะเห็นได้ว่า ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH สีของผงไม้จะมีสีน้ำตาลที่เข้มมากขึ้น เนื่องจากมีการกำจัดองค์ประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ที่เป็นองค์ประกอบที่มีความไวต่อแสง จึงทำให้ผงไม้มีสีเข้มมากขึ้น



ภาพที่ 43 ลักษณะทางกายภาพของผงไม้สนแต่ละชนิด ก) ผงไม้สน ข) ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ค) ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน ง) ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง จ) ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากคราม

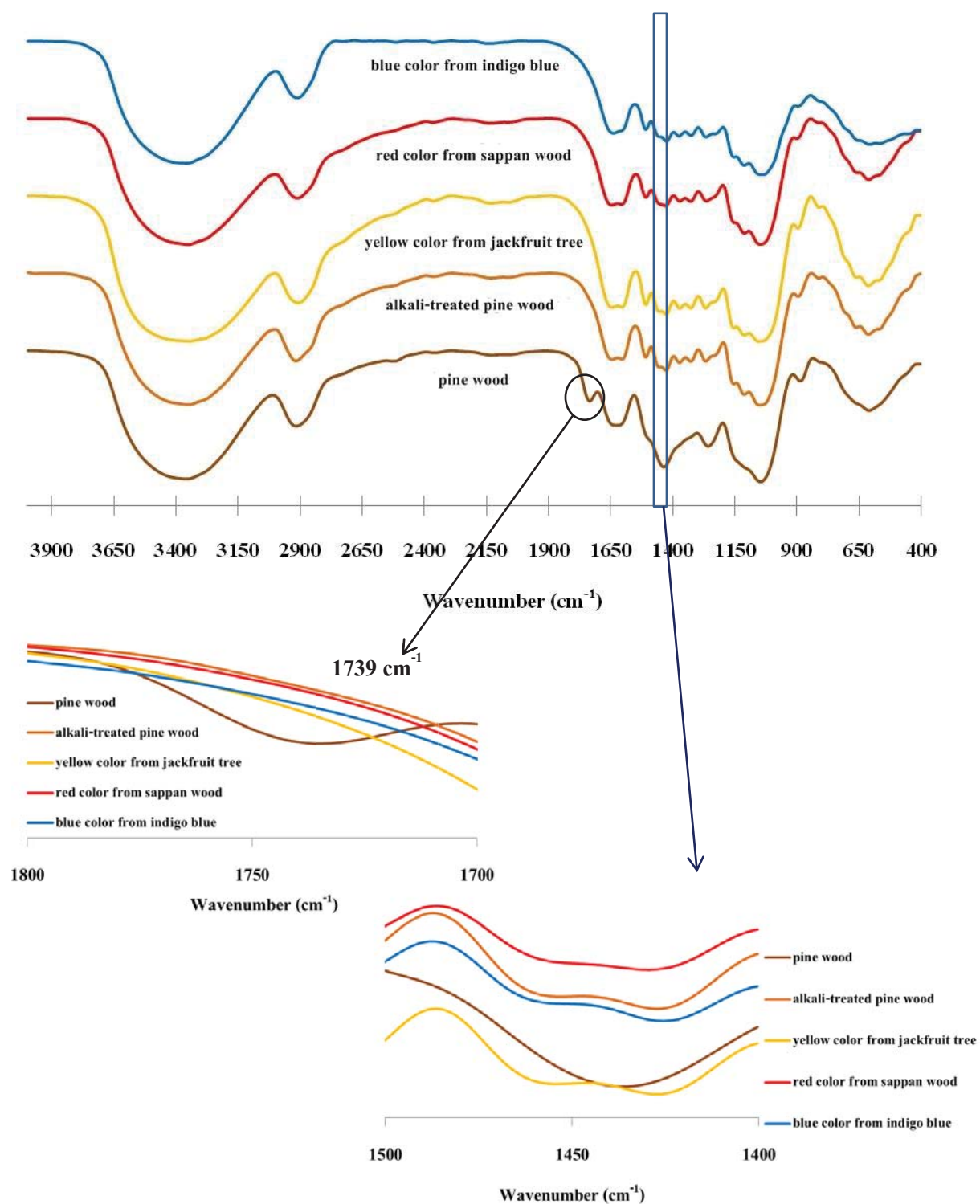
ส่วนการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน พบว่า พงไม้จะมีสีออกโทนน้ำตาลมากขึ้นกว่าเดิม พงไม้สนที่ย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝางจะมีสีน้ำตาลแดง และ พงไม้สนที่ย้อมสีครามจะเห็นว่า สีของ พงไม้เป็นเฉดสีเขียว ไม่เป็นสีน้ำเงินจากสีของคราม เนื่องจากในระหว่างกระบวนการย้อม พงไม้จาก สีครามนั้น จะต้องผ่านกระบวนการรีดักชันเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ ดังแสดงในภาพที่ 42 ซึ่งจะได้เป็นสารละลายสีเหลืองอมเขียวใส หลังจากนั้นจึงนำ พงไม้สนที่ย้อมแล้วนำไปตากในสภาวะบรรยากาศให้สามารถเกิดกระบวนการออกซิเดชันได้กลับมาในรูปของสีน้ำเงินที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่เนื่องจากในระหว่างกระบวนการย้อมและตากในสภาวะบรรยากาศอาจจะเกิดการออกซิเดชันของสีได้ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ พงไม้เป็นเฉดสีเขียว

4.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ พงไม้สน พงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ พงไม้สนที่ผ่านย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ พงไม้สนชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิค FTIR แสดงรายละเอียด ลักษณะและตำแหน่งการดูดกลืนที่ปรากฏขึ้นของใน พงไม้สนดังภาพที่ 44 และ ตารางที่ 5

การปรากฏขึ้นของพีคตำแหน่งที่ 1739 cm^{-1} อย่างชัดเจนใน พงไม้สน ซึ่งตำแหน่งดังกล่าว แสดงเอกลักษณ์การสั่นของหมู่ฟังก์ชัน ketone และ carbonyl ในโครงสร้างของ องค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส และ โครงสร้างของ aromatic ในองค์ประกอบของลิกนิน แต่เมื่อพิจารณา พงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ พงไม้สนที่ผ่านย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด พบว่า จะไม่ปรากฏตำแหน่งพีคดังกล่าวเกิดขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผิว พงไม้โดยใช้สารละลายเบส จะไปกำจัดเฮมิเซลลูโลส และ ลิกนินใน พงไม้ [5] ซึ่งเป็น องค์ประกอบที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ [11] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1436 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์การสั่นของหมู่ methoxy ($-\text{O}-\text{CH}_3$) ในโครงสร้างของลิกนิน พบว่า พงไม้สนมีการปรากฏขึ้นของตำแหน่งพีคอย่างชัดเจน ส่วน พงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงจะมีการลดลงของความเข้มของพีค ณ ตำแหน่งดังกล่าว โดยในการเปรียบเทียบการลดลงของพีคเอกลักษณ์ของลิกนิน ผู้วิจัยได้ทำการ normalization ความเข้มของพีคด้วยการเทียบกับความเข้มของพีคที่ตำแหน่งประมาณ 900 cm^{-1} ซึ่งจะแสดงถึงตำแหน่งการสั่นของพันธะ β -glucosidic ซึ่งเป็นตำแหน่งที่พันธะไม่เกิดการทำลายหลังจากการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สมการ 3 [52] ซึ่งผลจากการคำนวณตามสมการที่ 3 จะแสดงในภาพที่ 44

$$\text{Normalized lignin} = (I_{1436}) / (I_{900}) \times 100 \quad \text{สมการที่ 3}$$

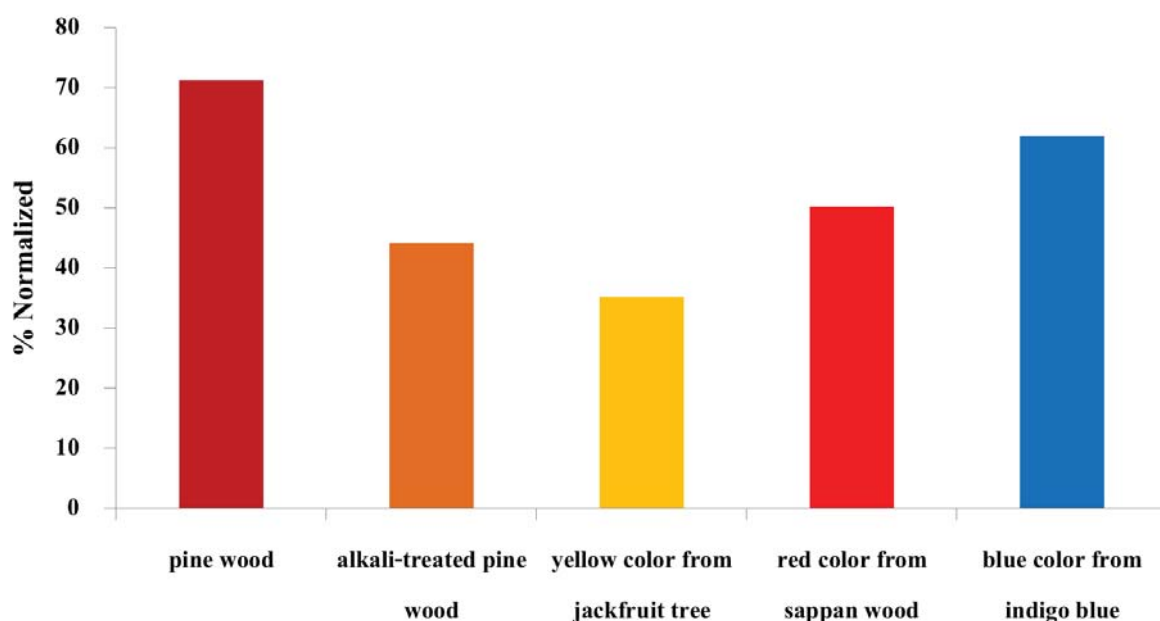


ภาพที่ 44 FTIR spectra ของผงไม้สน เทียบกับ ผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 5 ตำแหน่งการดูดกลืนของฟิสิกส์ที่ปรากฏขึ้นในผงไม้สนแต่ละชนิด

wave number ที่พบ (cm^{-1})					หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏ [51]
pine wood	alkali-treated pine wood	yellow color from jackfruit tree	red color from sappan wood	blue color from indigo blue	
3345	3342	3343	3343	3342	γ -OH (hydrogen bond)
2934	2922	2899	2912	2940	γ -CH (stretching)
1739	-	-	-	-	C=O (ketone and carbonyl) in hemicelluloses, Aromatic in lignin
1658	1663	1665	1663	1662	OH-bending of bound water,
1436	1424	1424	1424	1424	δ -CH ₂ -symmetric, -O-CH ₃ (methoxy -O-CH ₃)
-	1324	1324	1325	1324	δ -CH ₂ -wagging at C-6
1262	1271	1271	1270	1270	δ -COH in plane at C2-C3
-	1223	1223	1224	1223	δ -COH in plane at C6
1160	1164	1164	1164	1164	γ -COC (β -glucosidic bond)
1048	1062	1063	1062	1062	γ -CO at C3-C6, γ -CC
881	892	893	893	892	γ -COC at β -glucosidic linkage, γ -CCO, γ -CCH at C5-C6
668	668	668	667	664	γ -COH-out of plane

การปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH บนพื้นผิวของผงไม้สน จะไปกำจัดลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่เป็นระเบียบในผงไม้ ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 45 ส่งผลให้ค่าความเข้มของฟิสิกส์หลังจากการทำ normalization มีค่าลดลง หรือ อาจกล่าวได้ว่าไปทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นเซลลูโลสของผงไม้มีความเข้มข้นมากขึ้น รวมทั้งไปทำให้เซลลูโลสสามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้มากขึ้นจากการเกิด mercerization [26]

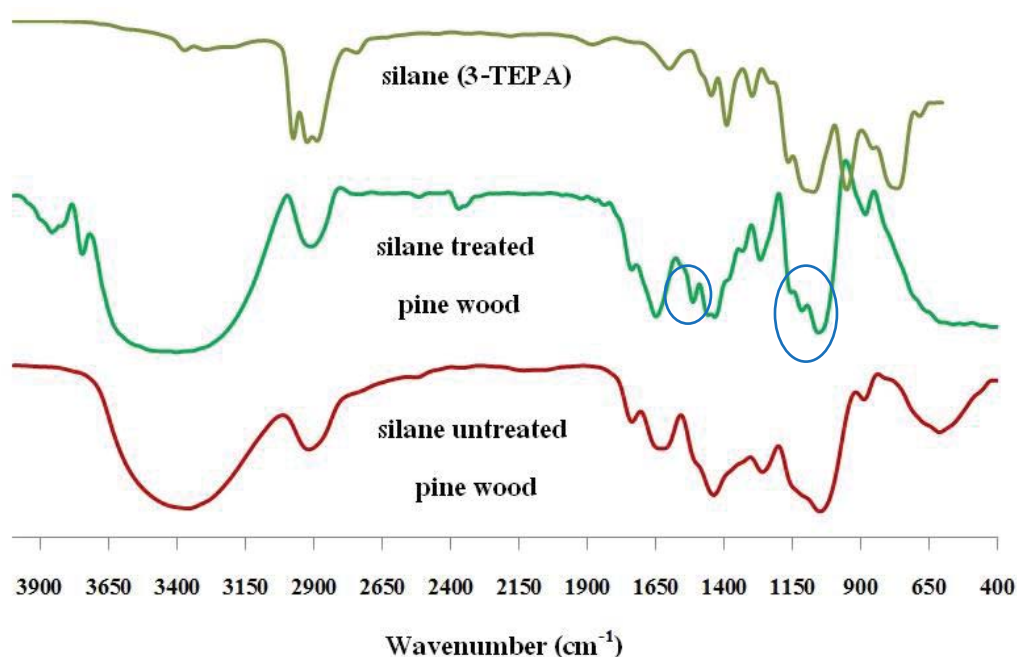


ภาพที่ 45 ผลจากการ normalized lignin ของผงไม้แต่ละชนิด

ผลจากการที่เซลลูโลสสามารถจัดเรียงตัวได้ระเบียบมากขึ้น จึงทำให้เห็นตำแหน่งเลขคลื่นของพันธะ β -glucosidic (ณ ตำแหน่ง 1160 และ 881 cm^{-1} ในผงไม้สน) ของผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH มีเลขคลื่นที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผงไม้สน เนื่องจากตำแหน่งพันธะ β -glucosidic ที่เชื่อมระหว่างโครงสร้างของกลูโคสที่เป็น monomer ของเซลลูโลส มีแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้น ทำให้พันธะเข้าใกล้กันมากขึ้น จึงทำให้จำเป็นต้องใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นในการทำให้พันธะ β -glucosidic เกิดการสั่น ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนในหมู่ hydroxyl (γ -OH; hydrogen bond) ณ ตำแหน่งเลขคลื่น 3345 cm^{-1} ในผงไม้สนถูกดึงไปใช้ในการสร้างพันธะโคเวเลนต์มากขึ้น ทำให้ไฮโดรเจนอะตอมในหมู่ hydroxyl เกิดการสั่นได้ง่ายขึ้น จึงทำให้รังสี IR ใช้พลังงานน้อยลงที่จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเกิดการสั่น เลขคลื่น ณ ตำแหน่งดังกล่าวของผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH จึงมีค่าที่ลดลง

แต่เมื่อพิจารณาผลของสีย้อมธรรมชาติที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะหมู่ฟังก์ชันในผงไม้สนพบว่า ลักษณะกราฟ FTIR ที่ได้จากภาพที่ 44 และ ตำแหน่งเลขคลื่นในตารางที่ 3 ของผงไม้สนที่ย้อมสีย้อมธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH นั้นแสดงว่า การย้อมสีย้อมชาติดึงไปในผงไม้ไม่ได้ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสในผงไม้เกิดการเปลี่ยนแปลง

จากนั้น พงไม้สนทั้งหมดจะถูกปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานชนิด silane คือ 3-(Triethoxysilyl)-propanamide; 3-TEPA จากภาพที่ 46 แสดงการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ 3-(Triethoxysilyl)-propanamide; 3-TEPA และ พงไม้สนที่ผ่าน และ ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน silane ด้วยเทคนิค FTIR โดยพิจารณาการดูดกลืนของ 3-TEPA; silane จะปรากฏที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 46 FTIR spectra ของ 3-TEPA, พงไม้สนที่ผ่าน และ ไม่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานชนิด silane

ตารางที่ 6 ตำแหน่งการดูดกลืนของฟังก์ชันที่ปรากฏขึ้นใน 3-TEPA [53]

Wave number ที่พบ (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏ
3375, 3304	NH_2 -asymmetric stretching
2976, 2927	CH_3 -asymmetric ($-\text{OCH}_2-\text{CH}_3$)
2882, 2735	$-\text{CH}_2$ -symmetric ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$), CH_3 -symmetric ($-\text{OCH}_2-\text{CH}_3$)
1591	NH_2 -deformation bending
1485	$-\text{CH}_2$ -propyl, symmetric deformation
1443	CH_3 -symmetric deformation
1168, 1118, 1064, 954	Si-O-C

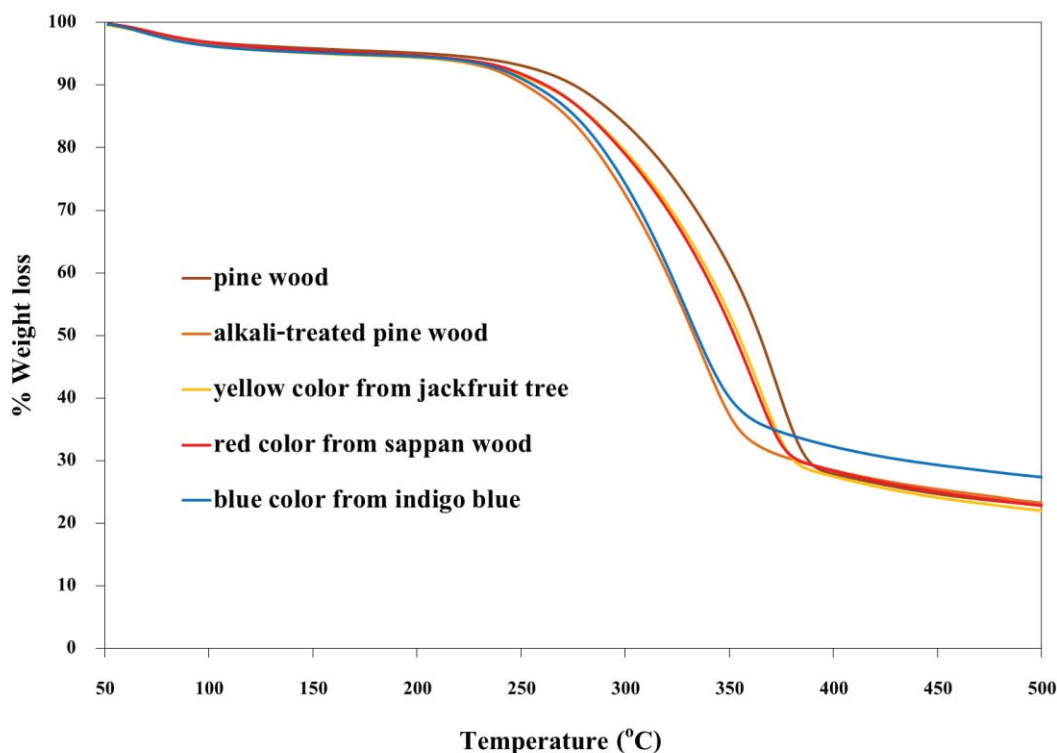
จากภาพที่ 46 แสดงให้เห็นถึงการปรากฏของพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งที่ 1514 cm^{-1} ของผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย silane ซึ่งตำแหน่งนี้แสดงถึงเอกลักษณ์ของการสั่นของหมู่ -NH_2 ใน 3-TEPA รวมถึง ณ ตำแหน่งพีคการดูดกลืนที่ 1164, 1116 และ 1063 cm^{-1} ที่แสดงถึงเอกลักษณ์ของการสั่นของ Si-O-C ซึ่งมีความชัดเจนมากขึ้นหลังจากการปรับปรุงผิว นั้นแสดงให้เห็นว่า 3-TEPA สามารถอันตรกิริยากับหมู่ hydroxyl ในผงไม้สนได้ดี จึงทำให้มีการปรากฏขึ้นของพีคตำแหน่งดังกล่าว

4.3 ความเสถียรทางความร้อนของผงไม้สน, ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด

การสลายตัวทางความร้อนของผงไม้ ณ อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส จะมีการลดลงของน้ำหนักของผงไม้ เนื่องจาก การระเหยของน้ำภายในโครงสร้างของเนื้อไม้ (bound water) จากนั้นไม้จะมีอุณหภูมิเริ่มต้น (onset) ในการสลายตัวประมาณ 220 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวขององค์ประกอบเฮมิเซลลูโลส ที่มีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำกว่า หลังจากนั้นจะเริ่มเกิดการสลายตัวของโครงสร้างเซลลูโลส โดยเกิดการแตกออกของพันธะ β -glucosidic ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น combustion gases (เช่น CH_4) และ volatile gases (เช่น CO , CO_2) ที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ volatile gases จะเกิดอย่างสมบูรณ์ และเหลือปริมาณไม้เข้าในโครงสร้างหลังจากการสลายตัวทางความร้อน [4]

จากภาพที่ 47 ผลของการทดสอบ TGA ของผงไม้สน, ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ในสภาวะก๊าซไนโตรเจน (N_2) ซึ่งพบว่า TGA Thermogram ของผงไม้ทุกชนิดจะมีการลดลงของน้ำหนักในช่วงแรก ซึ่งเป็นผลมาจากการระเหยของน้ำภายในโครงสร้างของผงไม้ทุกชนิด

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวของผงไม้แต่ละชนิด พบว่า ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวต่ำกว่าผงไม้สน แสดงให้เห็นว่า ความเสถียรทางความร้อนของผงไม้สนมีค่าสูงกว่า เนื่องจากในกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH มีการกำจัดองค์ประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งองค์ประกอบของลิกนินเป็นองค์ประกอบที่มีความเสถียรทางความร้อนสูงสุดในผงไม้ [4] จึงทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวของผงไม้สนสูงกว่าผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH

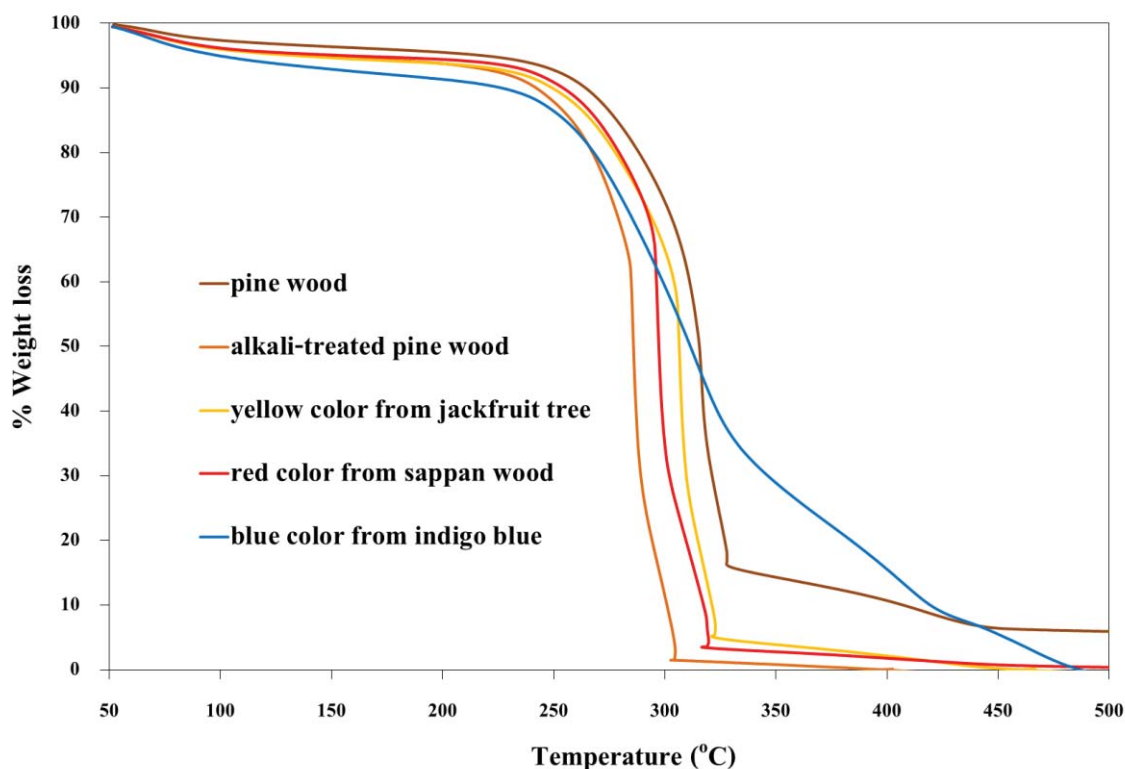


ภาพที่ 47 TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด temperature scan ที่สภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน

เมื่อพิจารณาความเสถียรทางความร้อนของผงไม้สนที่ย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด พบว่า ผงไม้สนที่มีการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวใกล้เคียงกัน และ สูงมากกว่าผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ในขณะที่ผงไม้สนที่มีการย้อมสีน้ำเงินจากครามจะมีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกับผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH แต่เมื่อพิจารณาปริมาณขี้เถ้าที่เหลือ พบว่า ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีคราม มีปริมาณขี้เถ้าที่เหลือสูงกว่าผงไม้สนทุกชนิด

จากผลการทดสอบข้างต้น แสดงให้เห็นว่า สารช่วยย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อมผงไม้สนจากสีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ไปช่วยลดอัตราการสลายตัวทางความร้อนของโครงสร้างเซลลูโลสในระหว่างกระบวนการ pyrolysis เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสลายพันธะโลหะเชิงซ้อนระหว่างสี และ ผงไม้ แต่ในขณะที่กระบวนการย้อมสีน้ำเงินจากคราม ไม่มีการใช้สารช่วยย้อม ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโลหะ จึงทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวเทียบเคียงกับผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย NaOH สำหรับปริมาณขี้เถ้าที่เหลือจากผงไม้สนที่ย้อมสีครามที่มีปริมาณมากกว่านั้น เป็นเพราะกระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของสีคราม ไป

เหนียวนำไปเกิดขี้เถ้าที่มีความเสถียร เมื่อเกิดการสลายตัวทางความร้อนจะได้เป็นสารประกอบ carbonaceous compound ทำให้สามารถปกคลุมผิวหน้าของผงไม้ [5] ทำให้อัตราการสลายตัวทางความร้อนของผงไม้มีค่าลดลง รวมถึงปริมาณขี้เถ้าที่เหลือสูงขึ้น



ภาพที่ 48 TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด temperature scan ที่สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน

จากภาพที่ 48 แสดงถึงผลของการทดสอบ TGA ของผงไม้สน, ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ในสภาวะก๊าซออกซิเจน (O_2) เพื่อพิจารณาความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (thermo-oxidative) พบว่า ในช่วงแรกยังคงมีการลดลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่องเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของไม้ อีกทั้งเมื่อเทียบกับสถานะไนโตรเจนพบว่า ไม่มีปริมาณขี้เถ้าเหลืออยู่ รวมถึงอัตราการสลายตัวทางความร้อนสูงกว่า นั้นแสดงให้เห็นว่า ก๊าซออกซิเจนไปช่วยเร่งการเสื่อมสภาพของผงไม้ให้เร็วมากขึ้น

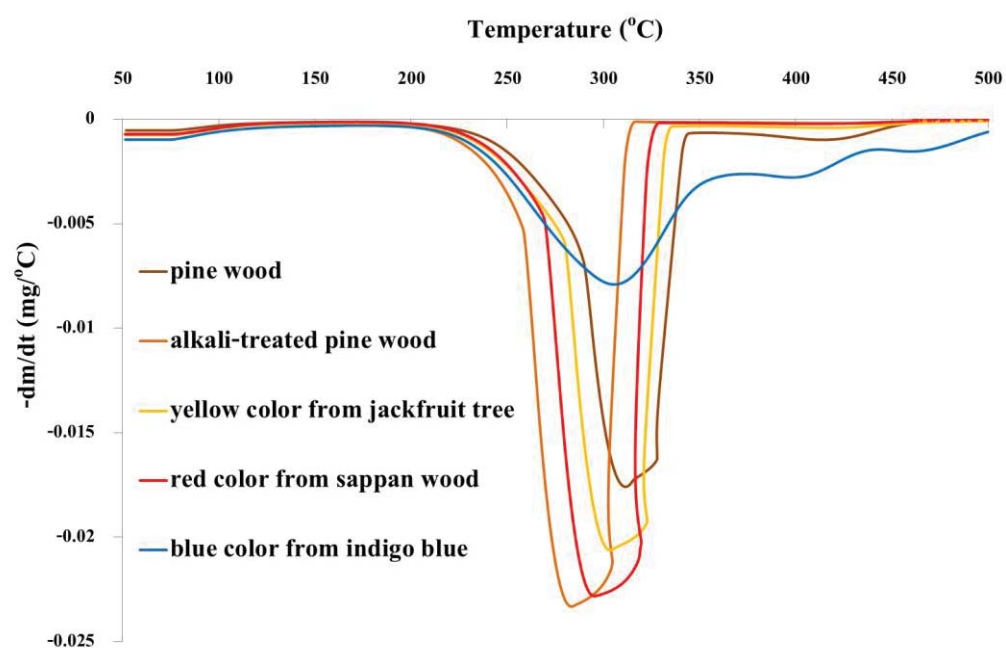
เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว พบว่า ผงไม้สนที่มีการย้อมสีน้ำเงินจากคราม มีการลดลงของน้ำหนักในช่วงแรกที่มากกว่า และ อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวที่มากกว่า เนื่องจาก ในกระบวนการย้อมสีคราม ยังมีสีบางส่วนที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ ทำให้

ออกซิเจนที่ใช้ในการวิเคราะห์ TGA สามารถทำให้โมเลกุลของสีเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่อเนื่องจากนี้กระบวนการย้อมสีน้ำเงินจากครามมีการใช้เบสที่ pH 11.5 ซึ่งเบสสามารถเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดไฮโดรไลซิสของผงไม้ได้ จึงทำให้มีการลดลงของน้ำหนักในช่วงแรกที่มากกว่า และทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำกว่าผงไม้ชนิดอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาผงไม้ที่ผ่านการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน และสีแดงจากแก่นไม้ฝาง พบว่า อุณหภูมิการเริ่มต้นในการสลายตัวของผงไม้ทั้งสองมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งสอดคล้องกับผล TGA Thermogram ในสถานะไนโตรเจน

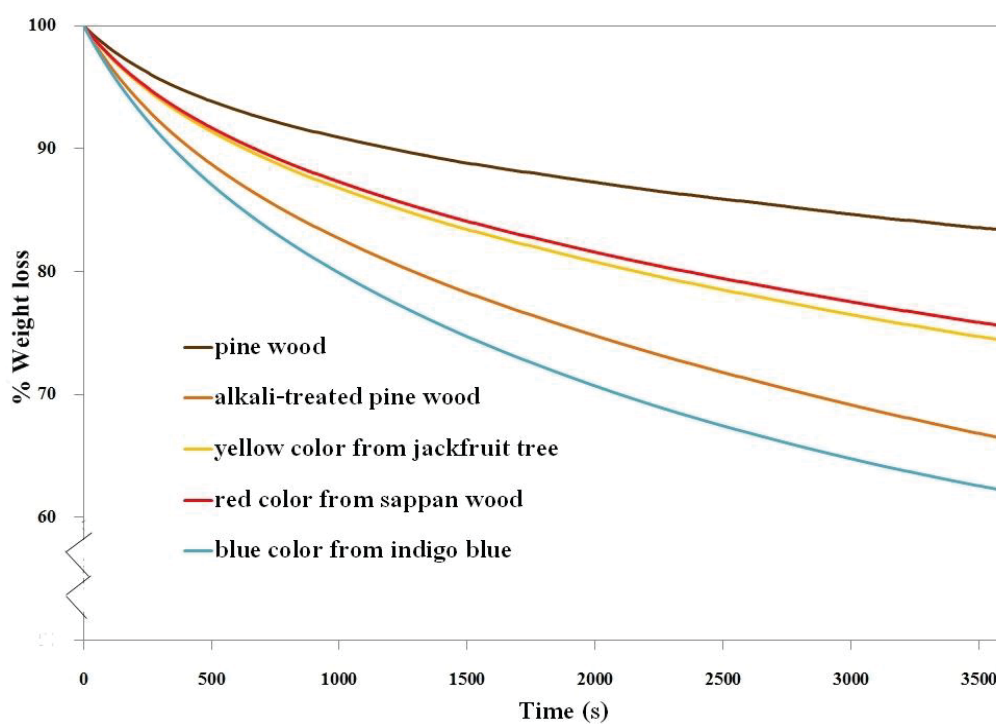
นอกเหนือจากนั้น เมื่อพิจารณาอัตราการสลายตัวของผงไม้สนแต่ละชนิด พบว่า สิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่งของผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากคราม จะมีอัตราการสลายตัวที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผงไม้สนชนิดอื่นๆ และ เมื่อสร้างกราฟ DTG Thermogram ดังแสดงในภาพที่ 49 เพื่อพิจารณา dm/dt ของผงไม้สนแต่ละชนิดเทียบกับอุณหภูมิ พบว่า พื้นที่ใต้กราฟของผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากคราม มีพื้นที่ใต้กราฟน้อยที่สุด และปรากฏว่าทางด้านขวาของพีค ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า โครงสร้างของโมเลกุลของสีครามเป็นโครงสร้างจำพวก indigo ที่มีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง [50] ทำให้โมเลกุลสามารถเกาะกลุ่มกันเอง การเกาะกลุ่มกันนี้ มีผลทำให้สียึดติดกับน้ำน้อยลง สีจึงชอบแพร่เข้าไปอยู่ในเส้นใย [26] ซึ่งทำให้ร้อยละการดูดซึมของสีครามมีร้อยละการดูดซึมที่สูง แม้ไม่ต้องใช้สารช่วยย้อม ซึ่งสามารถยืนยันผลจากร้อยละการดูดซึมน้ำเงินจากครามที่สูง อีกทั้งการที่โมเลกุลของสีเกาะกลุ่มกัน ทำให้โครงสร้างของผงไม้มีความเสถียรที่สูงขึ้น อัตราการสลายตัวของผงไม้จึงมีค่าที่ลดลง นอกเหนือจากนั้น ยังมีงานวิจัยที่ยืนยันว่า indigo สามารถเป็นสารต้านการเกิดออกซิเดชันได้ [54] จึงทำให้เห็นอัตราการลดลงของน้ำหนักจากกระบวนการ thermo-oxidation ที่มีค่าต่ำกว่า

เพื่อเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นนั้น จึงทดสอบ TGA Thermogram แบบ isothermal ที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการสลายตัวมากที่สุดของผงไม้ในแต่ละชนิด (inflection point) คือ ประมาณ 280 องศาเซลเซียส พบว่า ในสถานะก๊าซไนโตรเจน การลดลงของน้ำหนักในผงไม้สนมีการลดลงของน้ำหนักน้อยที่สุด เนื่องจาก ผงไม้สนยังคงมีองค์ประกอบลิกนินที่มีความเสถียรทางความร้อนที่มาก แต่เมื่อพิจารณาผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH จะมีการลดลงของน้ำหนักมีค่าสูงมากกว่า นั่นเป็นการยืนยันว่า ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่มีความเสถียรทางความร้อนที่มาก ซึ่งมีผลต่อการลดลงของน้ำหนักในผงไม้

แต่เมื่อพิจารณาการลดลงของน้ำหนักในผงไม้ชนิดที่มีการย้อมสีธรรมชาติ พบว่า ผงไม้ที่ย้อมสีน้ำเงินจากครามมีการลดลงของน้ำหนักมากกว่าเมื่อเทียบกับผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH แต่ในทางตรงกันข้าม ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน และ

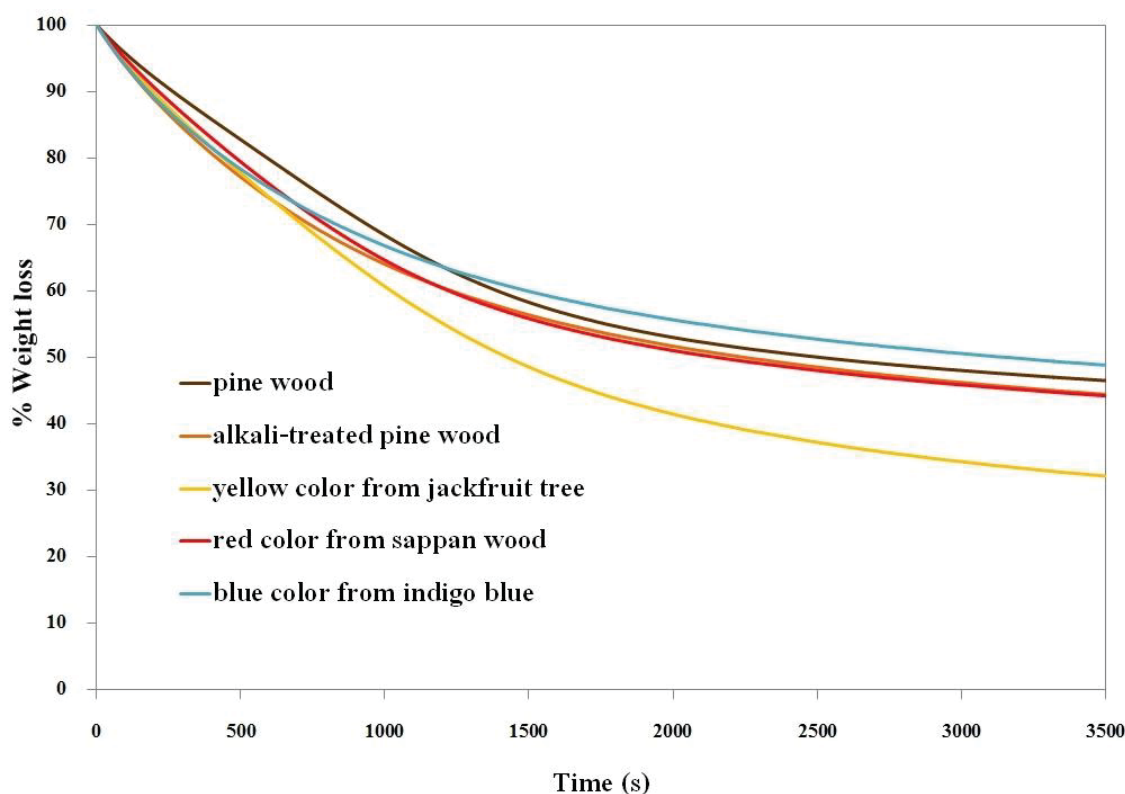


ภาพที่ 49 DTG Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด temperature scan ที่สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน



ภาพที่ 50 TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด isothermal ที่อุณหภูมิการทดสอบ 280 องศาเซลเซียส ในสภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน

สีแดงจากแก่นไม้ฝางมีการลดลงของน้ำหนักที่น้อยกว่า เนื่องจากกระบวนการย้อมสีน้ำเงินจากครามมีการใช้เบสช่วยในการย้อม ทำให้ช่วยไปเร่งการเกิดการสลายตัวของผงไม้ จึงทำให้ผงไม้มีน้ำหนักที่ลดลงอย่างมากกว่า แต่ในขณะที่การย้อมด้วยสีเหลือง และ แดงจะมีสารช่วยย้อมที่เกิดพันธะโลหะเชิงซ้อนได้ดีระหว่างสี และ ผงไม้ จึงทำให้การลดลงของน้ำหนักน้อยกว่า



ภาพที่ 51 TGA Thermogram ของผงไม้สนแต่ละชนิดในโหมด isothermal ที่อุณหภูมิการทดสอบ 280 องศาเซลเซียส ในสภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน

เมื่อพิจารณา TGA Thermogram ในการทดสอบแบบ isothermal ในสภาวะออกซิเจน พบว่า ผงไม้สนที่มีการย้อมสีน้ำเงินจากคราม มีการลดลงของน้ำหนักน้อยที่สุด นั้นเป็นการยืนยันว่า โครงสร้างของสี indigo ในสีน้ำเงินจากคราม มีความสามารถในการต้านการเกิดออกซิเดชันได้ดี แต่ในทางตรงกันข้าม ผงไม้สนที่มีการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน พบว่า มีการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจาก โครงสร้างของสีเหลืองที่เป็นสาร morin สามารถถูกกระตุ้นได้ง่ายโดยการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งจะไปเร่งการสลายตัวของพันธะโลหะเชิงซ้อนระหว่างโครงสร้างสี และ ผงไม้ และกลายเป็น สารจำพวก “enol” จึงทำให้โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนมีความเสถียรต่ำ จึงมีการลดลงน้ำหนักมากที่สุด

4.4 สมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตชนิดต่างๆ หลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

4.4.1 ค่าความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิต

ค่าความเป็นผลึกของวัสดุคอมพอสิต จะพิจารณาจากเทคนิค DSC ในการทดสอบ โดยการทดสอบจะศึกษาในสภาวะก๊าซไนโตรเจน แล้วทำการ heat ครั้งที่ 1 ตั้งแต่อุณหภูมิ 50-200 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อกำจัดประวัติทางความร้อนของวัสดุ (thermal history) จากนั้นทำการ cool ตั้งแต่อุณหภูมิ 200-50 องศา และท้ายสุดทำการ heat ครั้งที่ 2 เพื่อพิจารณาอุณหภูมิกลายแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการตกผลึก (cold crystallization temperature, T_c), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) รวมถึงค่าความเป็นผลึก (% crystallinity, X_c) ของวัสดุแต่ละชนิด

ตารางที่ 7 สมบัติทางความร้อนของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีโดยใช้เทคนิค DSC

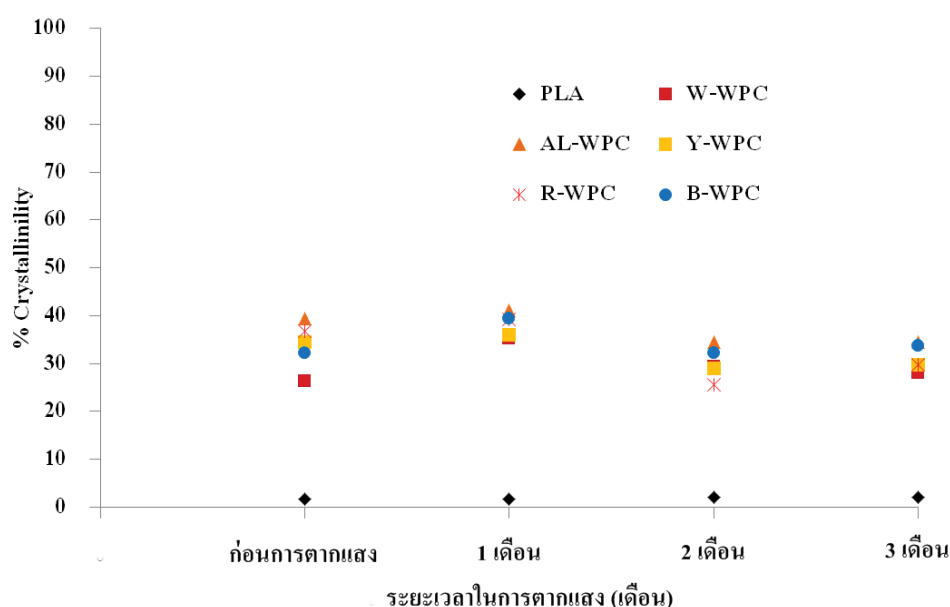
Sample	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
PLA	51.51	123.96	146.06	1.51	1.62
W-WPC	55.89	120.86	146.58	19.52	26.24
AL-WPC	50.29	106.80	139.27	29.29	39.37
Y-WPC	52.41	113.08	142.22	26.82	36.05
R-WPC	53.48	112.76	148.13	27.32	36.72
B-WPC	55.86	118.40	145.73	23.93	32.16

จากตารางที่ 7 เมื่อเติมผงไม้สนลงไปเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA พบว่า อุณหภูมิกลายแก้วของวัสดุคอมพอสิตมีค่าต่ำลง เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ยกเว้น AL-WPC นั้นแสดงว่า ผงไม้ไปทำการขัดขวางไม่ให้สายโซ่ PLA เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่าย [2] ซึ่งหมายถึงผงไม้สามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA ภายหลังจากการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน silane แต่สำหรับผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH เหตุที่อุณหภูมิกลายแก้วลดลงมากกว่า PLA บริสุทธิ์ น่าจะเป็นผลมาจากการหลงเหลืออยู่ของ NaOH ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวไม้ ทำให้สามารถเร่งปฏิกิริยา hydrolysis ของวัสดุคอมพอสิตได้ จึงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง ส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิกลายแก้วต่ำลง ซึ่งผลจากที่โมเลกุลมีขนาดเล็กลง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย จึงทำให้ปริมาณผลึกใน

AL-WPC มีค่าสูงมากกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการตกผลึก พบว่า วัสดุคอมพอสิตทุกชนิดมีอุณหภูมิการตกผลึกต่ำกว่า PLA บริสุทธิ์ นั้นแสดงให้เห็นว่า พงไม้ไปทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ทำให้ PLA สามารถเกิดผลึกใหม่ได้ (re-crystallization) ในระหว่างกระบวนการทดสอบ DSC จะเห็นได้ว่า PLA ที่ผสมพงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ปริมาณความเป็นผลึก (% crystallinity, X_c) เพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆ

ผลจากการปรับปรุงผิวพงไม้สนด้วยสารละลาย NaOH จะพบว่า วัสดุ AL-WPC มีปริมาณผลึกสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับวัสดุ W-WPC เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพันธะไฮโดรเจนในพงไม้สนหลังการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH จึงทำให้มีหมู่ hydroxyl ที่สามารถเหนี่ยวนำทำให้สายโซ่ PLA เกิดการจัดเรียงตัวได้เป็นระเบียบมากขึ้น ประกอบกับการหลงเหลืออยู่ของสารละลาย NaOH หลังการปรับปรุงผิว ทำให้ไปเร่งการเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิต ให้สายโซ่มีโมเลกุลขนาดสั้นลง จึงสามารถจัดเรียงตัวได้ง่าย ปริมาณความเป็นผลึกจึงสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมพงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด พบว่า อุณหภูมิคล้ายแก้ว และ อุณหภูมิในการตกผลึกมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับ AL-WPC เนื่องจาก พงไม้เมื่อผ่านการย้อมสีธรรมชาติลงไป โครงสร้างของสีธรรมชาติจะไปสร้างแรงยึดเหนี่ยวภายในพงไม้ ทำให้ไปลดบริเวณที่จะก่อให้เกิดการสร้างผลึก (nucleating site) จึงทำให้ปริมาณผลึกของวัสดุคอมพอสิตที่ผสมพงไม้ย้อมสีธรรมชาติดีมีค่าที่ลดลง



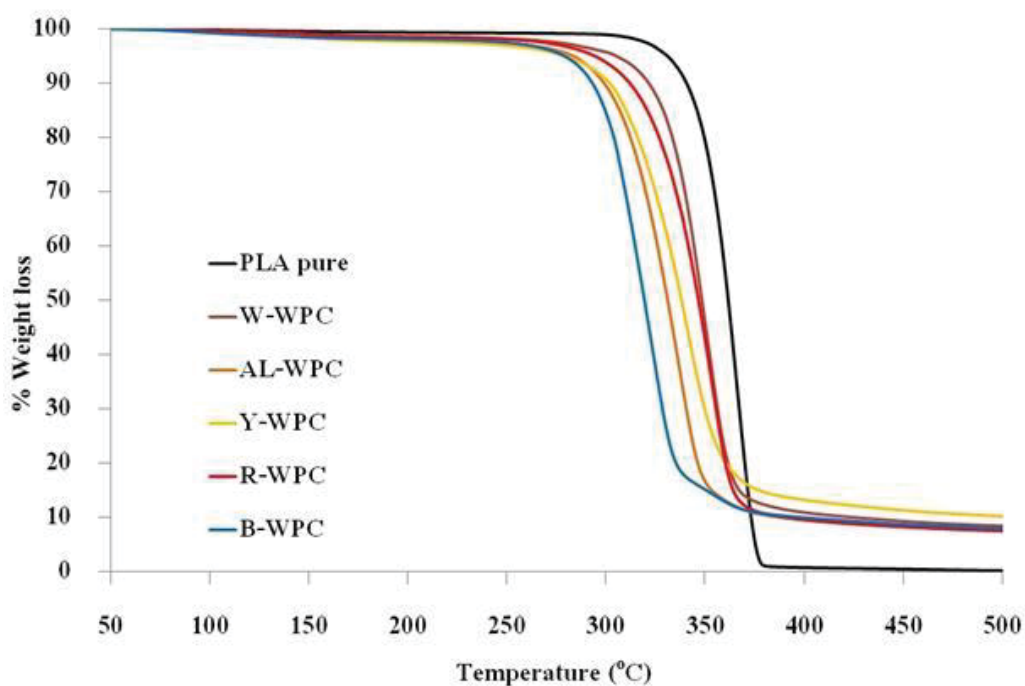
ภาพที่ 52 % crystallinity ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังจากผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกหลังจากผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า PLA บริสุทธิ์ มีปริมาณผลึกที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่สำหรับวัสดุคอมพอสิตทุกชนิด พบว่า ปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 1 เดือนหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของลิกนินในองค์ประกอบของผงไม้ ทำให้ไปเร่งการเสื่อมสภาพของ PLA จึงทำให้โมเลกุลของ PLA มีขนาดที่สั้นลง จึงทำให้สายโซ่ PLA สามารถจัดเรียงตัวได้ง่ายขึ้น ปริมาณความเป็นผลึกจึงสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในช่วงหลังการตากในเดือนที่ 2-3 พบว่า ปริมาณผลึกมีค่าลดลง อาจเป็นเพราะโมเลกุลของความชื้นอาจเกิดการแทรกตัวในโครงสร้างของสายโซ่ PLA ทำให้สายโซ่ PLA มีขนาดที่สั้นลง แต่จากผลของอุณหภูมิหลอมเหลวหลังการจำลองการตากแสง ดังแสดงในภาคผนวก ข-3 พบว่า ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าที่ลดลง นั่นแสดงให้เห็นว่า เกิดการแข่งขันกันระหว่างการเกิด nucleation และการ growth ของผลึก โดยหลังการจำลองการตากแสงในกล่อง แม้ว่าจะสายโซ่มีขนาดที่สั้นลง เกิดผลึกง่าย แต่ผลึกมีขนาดที่เล็กลง จึงทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าลดลง ส่งผลทำให้ PLA ไม่สามารถ pack ตัวเป็นโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่ได้ จึงทำให้ความเป็นผลึกมีค่าลดลง

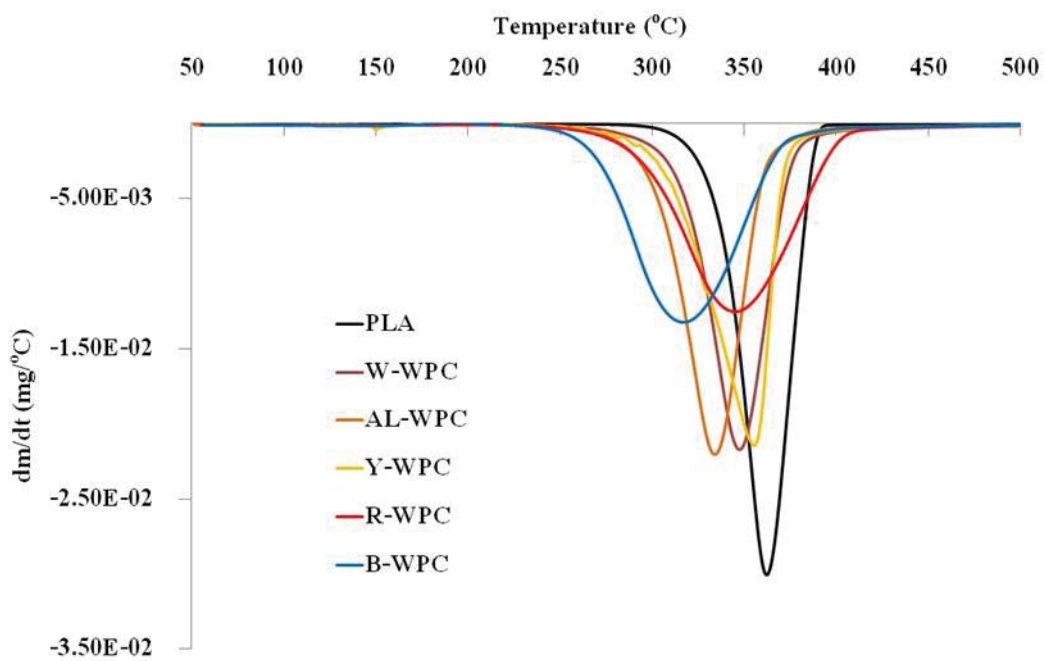
4.4.2 ความเสถียรทางความร้อน และ ความเสถียรต่อการเกิดออกซิเดชันของวัสดุคอมพอสิตหลังจากการจำลองการตากแดดในกล่องแสงยูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

จากภาพที่ 53 แสดงการทดสอบ TGA ของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตก่อนการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี ภายใต้สภาวะการทดสอบในโตรเจน เพื่อศึกษาความเสถียรทางความร้อน

ผลการศึกษาพบว่า PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตทุกชนิด มีการสลายตัวเพียงขั้นเดียว โดยพบว่า PLA บริสุทธิ์ มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวสูงสุด อยู่ที่ประมาณ 320 องศาเซลเซียส แต่ในขณะที่วัสดุคอมพอสิตทุกชนิด จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ต่ำกว่า เนื่องจากผงไม้มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 220 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อเติมผงไม้สนลงไปในพอลิเมอร์ เพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิต จะไปเหนี่ยวนำให้อุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวลดลง แต่เมื่อพิจารณาปริมาณขี้เถ้าที่เหลือ พบว่า วัสดุคอมพอสิตมีปริมาณขี้เถ้าเหลือประมาณ 10 % ในขณะที่ PLA บริสุทธิ์มีการสลายตัวหมด เนื่องจาก องค์ประกอบของผงไม้มี cellulose และ lignin อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถฟอร์มตัวเป็นองค์ประกอบจำพวก lignocelluloses ทำให้เมื่อเกิดการสลายตัวจะสามารถฟอร์มตัวเป็น carbonaceous compound เป็นขี้เถ้าที่เสถียร ซึ่งปกคลุมผิวหน้าโดยข้อดีของการเกิดขี้เถ้ามาก คือจะช่วยป้องกันการถ่ายโอนความร้อน (การแผ่รังสี) ทำให้การสลายตัวทางความร้อนเกิดได้ช้าลง

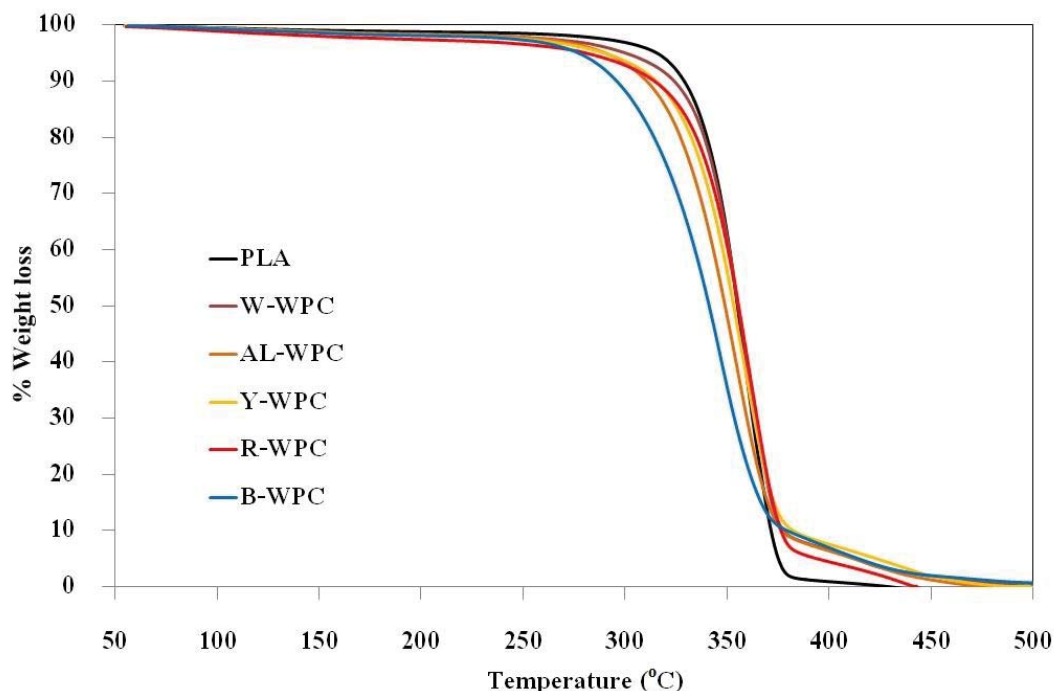


ภาพที่ 53 TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน



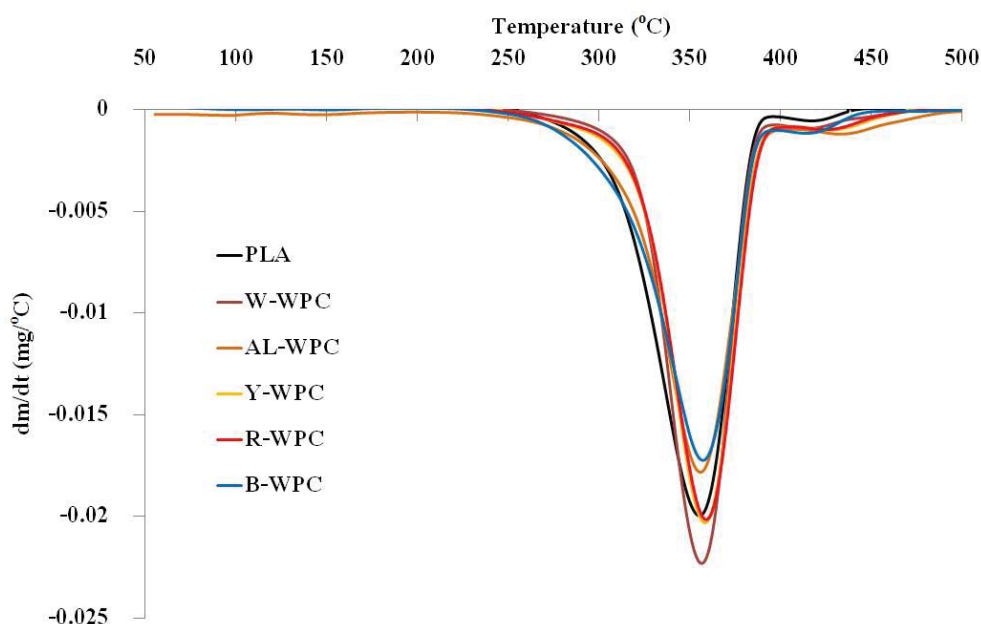
ภาพที่ 54 DTG Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซไนโตรเจน

เมื่อเปรียบเทียบความเสถียรทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่า W-WPC มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวมากที่สุด และ B-WPC มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของ TGA ในการทดสอบกับผงไม้ แต่เมื่อพิจารณากราฟ DTG ในสถานะไนโตรเจน เพื่อพิจารณาอัตราการสลายตัวทางความร้อน พบว่า PLA มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด เนื่องจาก PLA สามารถเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้ง่าย (thermal degradation) และหลังจากการเติมผงไม้ลงไปเป็นพอลิเมอร์ PLA พบว่า อัตราการสลายตัวทางความร้อนลดลง เนื่องจากโมเลกุลของผงไม้ไปช่วยดูดซับ และ ป้องกันพลังงานความร้อนกระจายตัวเข้าไปใน PLA ทำให้ PLA เกิดการสลายตัวทางความร้อนที่ช้าลง นอกจากนี้ยังพบว่า วัสดุ R-WPC และ B-WPC มีอัตราการสลายตัวทางความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตอื่นๆ เป็นผลจากการย้อมสีแดงในผงไม้สนที่ทำให้เกิดพันธะเชิงซ้อนโลหะที่แข็งแรง และ มีความเสถียรระหว่างผงไม้ กับ โครงสร้างของสี ในขณะที่การย้อมจากสีน้ำเงิน แม้ว่าในกระบวนการย้อมมีการใช้เบส ซึ่งอาจจะไปช่วยเร่งให้มีการสลายตัวทางความร้อนที่เร็วขึ้น แต่ลักษณะโครงสร้างของสี indigo ที่มีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ทำให้ไม่เกิดการหลุดออกของโมเลกุล volatile ขนาดเล็ก จึงไปช่วยยับยั้งให้วัสดุคอมพอสิตมีความเสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น



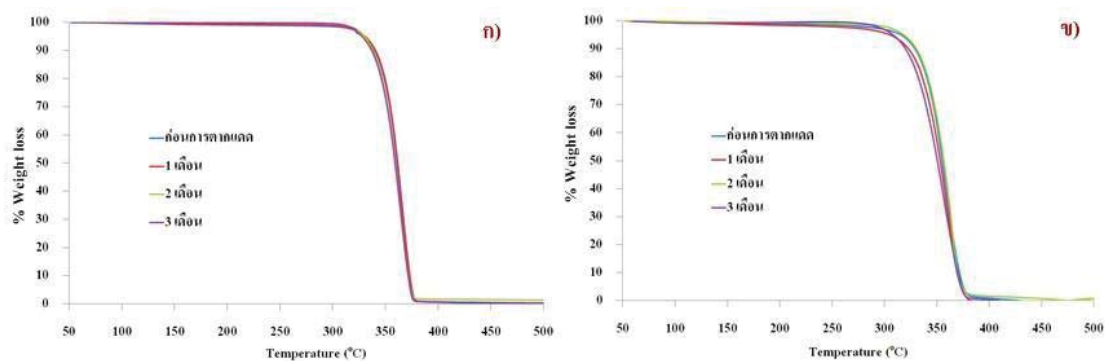
ภาพที่ 55 TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสถานะการทดสอบก๊าซออกซิเจน

จากภาพที่ 55 แสดงการทดสอบ TGA ของวัสดุคอมพอสิตก่อนการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี ภายใต้สภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน เพื่อศึกษาความเสถียรในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด ซึ่งพบว่า ขั้นตอนการสลายตัวของ PLA และ วัสดุคอมพอสิต มีการสลายตัวเพียงขึ้นเดียวคล้ายกับในสภาวะไนโตรเจน แต่ไม่หลงเหลือปริมาณจีไธในวัสดุ นอกจากนี้ วัสดุคอมพอสิต B-WPC จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวต่ำสุดเช่นเดียวกับการทดสอบในสภาวะไนโตรเจน แต่เมื่อพิจารณากราฟ DTG เพื่ออัตราการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด พบว่า B-WPC มีพื้นที่ใต้กราฟน้อยที่สุด นั่นแสดงถึงอัตราการสลายตัวต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของ TGA ในการทดสอบผงไม้ นั่นเป็นการชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างของสีน้ำเงินที่มีองค์ประกอบของ indigo ไปช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยา thermo-oxidation ในวัสดุคอมพอสิตได้

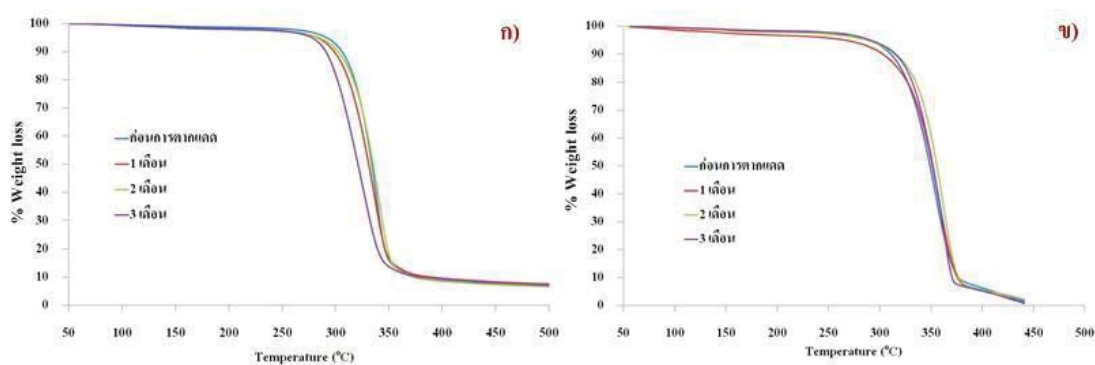


ภาพที่ 56 DTG Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะการทดสอบก๊าซออกซิเจน

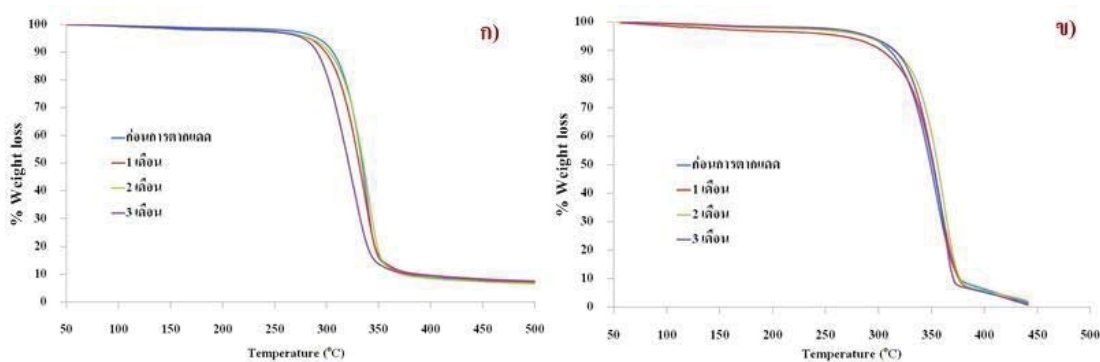
เมื่อเปรียบเทียบวัสดุชนิดเดียวกันก่อน และ หลังการจำลองการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี พบว่า TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัว หลังจากตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน ทั้งในการทดสอบสภาวะไนโตรเจน และ ออกซิเจน ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ PLA บริสุทธิ์ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ ก) ก๊าซไนโตรเจน ข) ก๊าซออกซิเจน



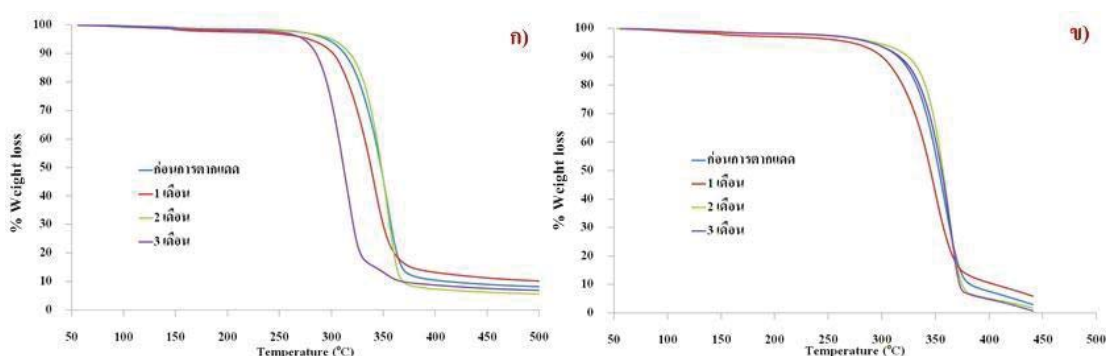
ภาพที่ 58 เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ W-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ ก) ก๊าซไนโตรเจน ข) ก๊าซออกซิเจน



ภาพที่ 59 เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ AL-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ ก) ก๊าซไนโตรเจน ข) ก๊าซออกซิเจน

เมื่อพิจารณาวัสดุ W-WPC และ AL-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสถานะไนโตรเจน พบว่า หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน วัสดุคอมพอสิตทั้งสองมีความเสถียรทางความร้อนที่ลดลง เนื่องจากผงไม้ยังคงมีองค์ประกอบลิกนิน ที่มีความว่องไวต่อการเสื่อมสภาพจากรังสียูวี ทำให้ไปเร่งการเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิต จึงทำให้ความเสถียรทางความร้อนมีค่าที่ต่ำลง แต่เมื่อพิจารณาในสถานะออกซิเจน พบว่า ไม่มีความแตกต่างของ TGA trace หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวี อาจเป็นผลจากการที่องค์ประกอบในวัสดุคอมพอสิตเกิดการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ในสถานะที่มีออกซิเจนช่วยเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชัน ทำให้ไม่เห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้น

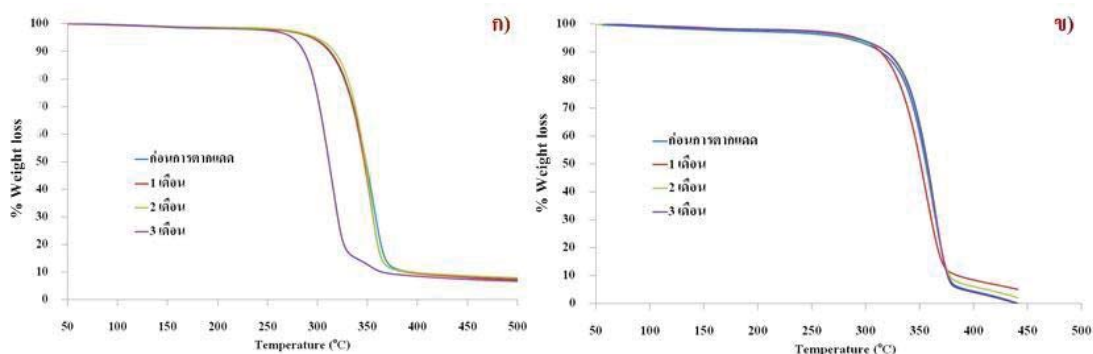
เมื่อพิจารณาวัสดุ Y-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสถานะไนโตรเจน พบว่า หลังการตากแสงเป็นเวลา 3 เดือน ความเสถียรทางความร้อนมีค่าลดลง เช่นเดียวกับ W-WPC และ AL-WPC แต่เมื่อทดสอบในสถานะออกซิเจน พบว่า หลังตากแสงในกล่องรังสียูวีในช่วง 1 เดือนแรก มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวที่น้อยกว่า หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน เป็นผลมาจากโครงสร้างของสีเหลืองเป็นสาร morin ที่ถูกกระตุ้นได้ง่าย ทำให้ในช่วง 1 เดือนแรก ทำให้โครงสร้างของ morin เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย และเปลี่ยนโครงสร้าง ส่งผลทำให้พันธะโลหะเชิงซ้อนที่ยึดติดกับโครงสร้างของสีและผงไม้มีความอ่อนแอลง จึงทำให้ความเสถียรทางความร้อนในช่วง 1 เดือนแรกลดลง แต่หลังจากการตากแสง 3 เดือน ผลของออกซิเจนไปเร่งการเสื่อมสภาพของผงไม้ย้อมสีเหลืองพอกัน ดังนั้น จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของ TGA ที่เกิดขึ้นมากนัก



ภาพที่ 60 เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ Y-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสถานะต่างๆ ก) ก๊าซไนโตรเจน ข) ก๊าซออกซิเจน

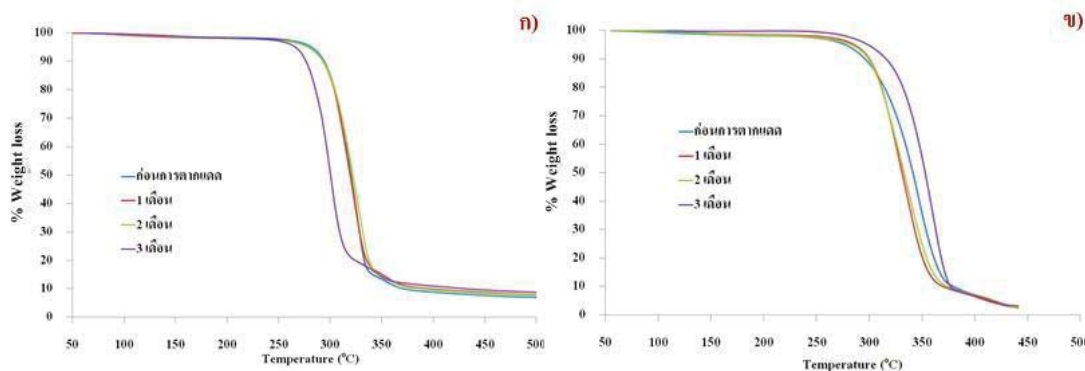
เมื่อพิจารณาวัสดุ R-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสถานะไนโตรเจน พบว่า หลังการตากรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน ความเสถียรทางความร้อนมีค่าลดลง

เช่นเดียวกับ W-WPC, AL-WPC และ Y-WPC แต่เมื่อทดสอบในสภาวะออกซิเจน พบว่า ไม่มีความแตกต่างของ TGA trace หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวี นั้นแสดงให้เห็นว่า พันธะโลหะเชิงซ้อนที่ยึดติดระหว่างโครงสร้างของไม้กับไม้ มีความแข็งแรง จึงถูกกระตุ้นจากรังสียูวีได้ยาก หลังการตากรังสียูวี จึงทำให้ผลจากสภาวะออกซิเจนไปเร่งการเสื่อมสภาพของผงไม้ก่อนและหลังการตากรังสียูวีพอกัน จึงทำให้ไม่เห็นผลความแตกต่างที่เกิดขึ้นหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 61 เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ R-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ ก) แก๊สไนโตรเจน ข) แก๊สออกซิเจน

เช่นเดียวกันกับวัสดุ B-WPC ในสภาวะการทดสอบไนโตรเจน พบว่า หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน ความเสถียรทางความร้อนมีค่าลดลงเช่นเดียวกับวัสดุคอมพอลิติกชนิดอื่นๆ แต่ที่น่าสนใจ คือ ในสภาวะการทดสอบออกซิเจน พบว่า วัสดุ B-WPC มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวที่สูงขึ้น เมื่อผ่านการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน นั้นเป็นการยืนยันได้ว่า โครงสร้างของสีครามที่มีองค์ประกอบเป็นสาร indigo มีคุณสมบัติในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในวัสดุคอมพอสิต จึงทำให้อุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่า



ภาพที่ 62 เปรียบเทียบ TGA Thermogram ของ B-WPC ก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ในสภาวะต่างๆ ก) แก๊สไนโตรเจน ข) แก๊สออกซิเจน

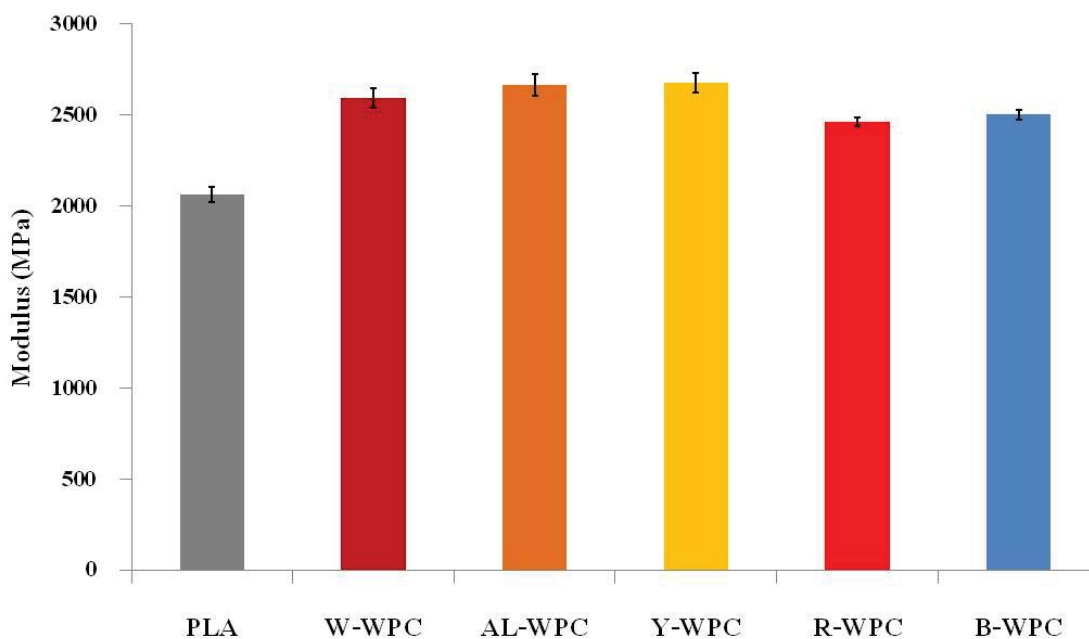
4.5 สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตชนิดต่างๆ ก่อนและหลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบเมื่อผ่านการตากแสงในกล่องรังสียูวี จะรายงานออกมาเป็นค่า tensile strength (TS), Young's modulus (YM) และ % elongation at break ต่อระยะเวลาในการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือนตามลำดับ จากภาพที่ 63 พบว่า เมื่อเติมผงไม้ลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA จะทำให้ค่า modulus สูงขึ้น เนื่องจากผลของผงไม้ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ (reinforcing effect) เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ ผงไม้สนทุกชนิดผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานชนิด silane เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ ผงไม้สน รวมถึงสัดส่วนการผสมระหว่างผงไม้แต่ละชนิด และ พอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA เท่ากันในทุกๆ สูตรที่ 20:80 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตก่อนการตากแสงในกล่องรังสียูวี พบว่า modulus ของ WPC จะมีค่ากว่า AL-WPC เล็กน้อย เนื่องจาก ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH จะเกิดกระบวนการ mercerization ทำให้มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเซลลูโลสใหม่จึงทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงขึ้น สามารถรับแรงได้มากขึ้น [5] ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จาก FTIR ของผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลาย NaOH จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งเลขคลื่นที่แสดงเอกลักษณ์การสั่นของพันธะ β -glucosidic เกิดการเปลี่ยนแปลงเลขคลื่น อีกทั้งผลของปริมาณผลึกในโครงสร้างของวัสดุ AL-WPC มีค่ามากกว่า W-WPC ซึ่งยืนยันผลจาก DSC รวมถึงผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลาย NaOH มีการกำจัดองค์ประกอบ เช่น เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่โครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ทำให้ผงไม้มีความเข้มข้นของเซลลูโลสมากขึ้น จึงทำให้สารเชื่อมประสาน silane สามารถเกิดอันตรกิริยากับผงไม้สนได้ดี ค่าความแข็งแรงของวัสดุจึงมีค่าที่มากขึ้น

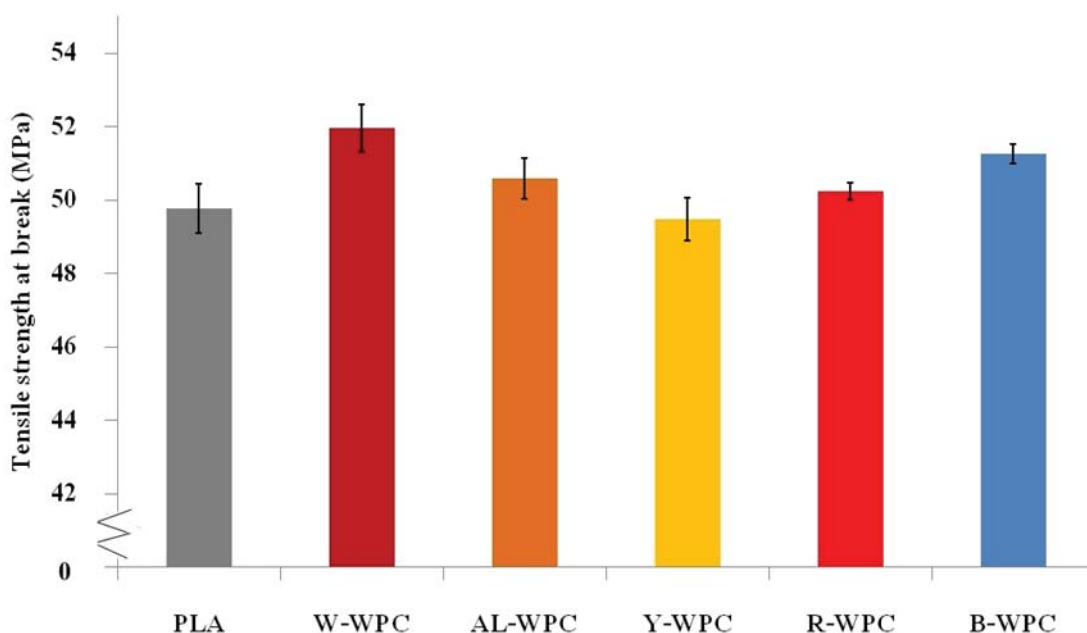
แต่เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ พบว่า R-WPC มีค่า modulus ต่ำที่สุด รองมาเป็น B-WPC และ Y-WPC มีค่า modulus เทียบเคียงกับ AL-WPC อาจเป็นเพราะผลจากร้อยละการดูดซึมสีที่แตกต่างกัน จะเห็นว่า วัสดุคอมพอสิตที่ผสมผงไม้ย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุนซึ่งมีร้อยละการดูดซึมสีที่น้อยสุด แต่กลับมีค่า modulus ในวัสดุคอมพอสิตที่มากที่สุด ในทางตรงข้ามสีแดงจากแก่นไม้ฝางมีร้อยละการดูดซึมสีที่มากที่สุด แต่กลับมีค่า modulus ในวัสดุคอมพอสิตที่น้อยที่สุด เนื่องมาจาก โครงสร้างของโมเลกุลสีเดิมสามารถเกิดพันธะโลหะเชิงซ้อนกับผงไม้ได้ดี ซึ่งถ้าร้อยละการดูดซึมของสีในผงไม้มาก แสดงว่า มีหมู่ hydroxyl ในผงไม้สามารถเกิดพันธะโลหะเชิงซ้อนกับโครงสร้างของสีได้ดี จึงทำให้มีบริเวณ active site ของผงไม้ที่สามารถเกิดอันตรกิริยาสารเชื่อมประสานมีจำนวนที่น้อยลง ทำให้ค่าความแข็งแรงในตัววัสดุต่ำลง นั่นแสดงว่า

ค่า modulus ของวัสดุคอมพอสิตที่ย้อมสีธรรมชาติจะมีความสัมพันธ์กับร้อยละการดูดซึมสีแต่ละชนิดในผงไม้ เนื่องจากจะมีผลต่อความสามารถในการยึดติดกันของพอลิเมอร์เมทริกซ์ และ ผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ



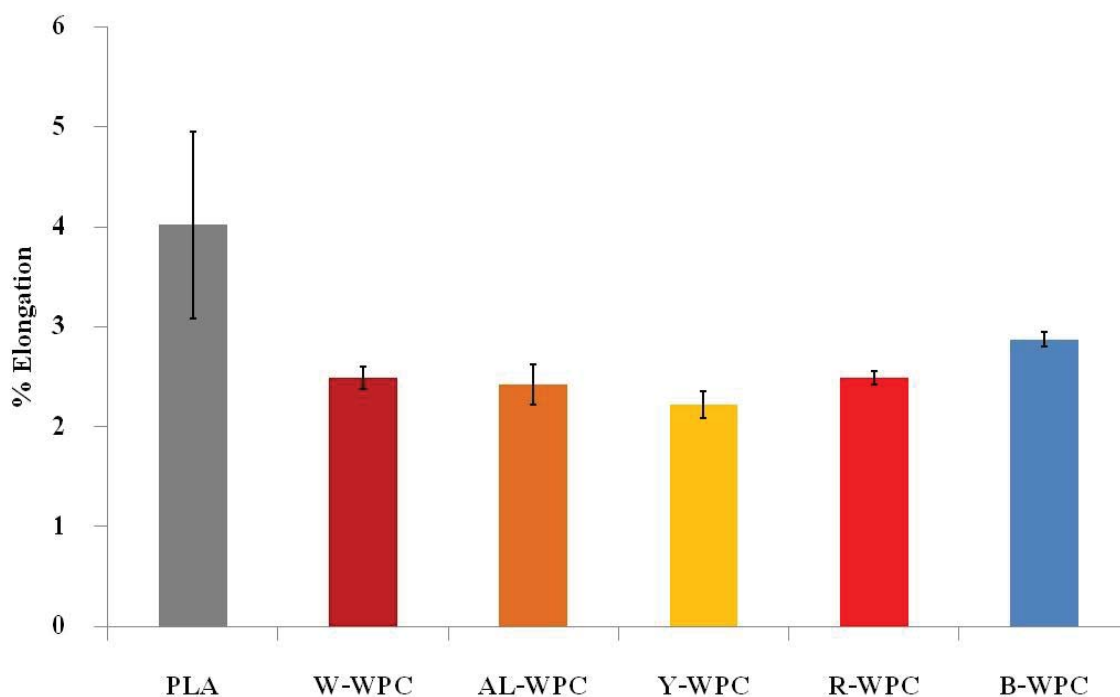
ภาพที่ 63 ค่า modulus ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

เมื่อพิจารณาค่า tensile strength at break ของวัสดุคอมพอสิตก่อนการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี พบว่า W-WPC มีค่าสูงมากกว่าเมื่อเทียบกับ AL-WPC นั้นแสดงให้เห็นถึงการใช้น้ำ NaOH ไปเปลี่ยนโครงสร้างการจัดเรียงตัวใหม่ขององค์ประกอบเซลลูโลส ทำให้เซลลูโลสเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันเองมากขึ้น เนื่องจากระบวนการเกิด mercerization ทำให้เกิดผลึกรูปแบบใหม่ และทำให้ผงไม้เกิดการจับตัวกันเองบนพื้นผิวมากขึ้น ซึ่งยืนยันผลจาก FTIR ที่พบว่าตำแหน่งพันธะ β -glucosidic ที่มีเลขคลื่นที่สูงขึ้น และเป็นผลมาจากการหลงเหลือเบส NaOH ในผงไม้ AL-WPC ไปทำให้ความว่องไวในการเกิดอันตรกิริยาของสารเชื่อมประสาน silane ระหว่างผงไม้สนกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มีค่าลดลง เนื่องจากระบวนการเกิดปฏิกิริยาของสารเชื่อมประสานจะเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยใช้ตัวเร่งที่เป็นกรด แต่การหลงเหลือเบสอยู่ในผงไม้ ทำให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง จึงทำให้ interface หรือ เฟสระหว่างผงไม้และพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการส่งผ่านแรงได้น้อยลง จึงทำให้ค่า tensile strength ลดลง



ภาพที่ 64 ค่า tensile strength at break ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการตากจำลอง การตากแสงในกล่องรังสียูวี

แต่เมื่อพิจารณาค่า tensile strength at break ของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ พบว่า วัสดุ Y-WPC และ R-WPC มีแนวโน้มที่ลดลง ส่วน B-WPC มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับ AL-WPC เนื่องมาวิธีการย้อมสีธรรมชาติลงในผงไม้สนที่แตกต่างกัน สำหรับการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง มีการย้อมโดยใช้อุณหภูมิสูง ผลทำให้ลดการเกาะ การรวมกันของสีธรรมชาติ ซึ่งทำให้โมเลกุลของสีเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและกระจายตัวได้ดี ประกอบกับการใช้โลหะช่วยย้อม จึงทำให้การดูดซึมสีธรรมชาติทั้งสองในผงไม้มีค่าสูงขึ้น [26] แต่การที่โมเลกุลสีกระจายตัวดีขึ้น ทำให้ไปแย่ง active site ของผงไม้บริเวณที่เกิดอันตรกิริยากับสารเชื่อมประสาน ทำให้การถ่ายโอนแรงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับผงไม้มีค่าน้อยลง ผลคือ ค่า tensile strength มีค่าลดลง ในขณะที่สีน้ำเงินจากคราม โมเลกุลสีมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ทำให้สามารถเกาะกลุ่มกันเอง ไม่เกิดการแย่ง active site ของผงไม้ ดังนั้นบริเวณ active site ของผงไม้ที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับสารเชื่อมประสานจึงมีค่ามาก ดังนั้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผงไม้ และ สารเชื่อมประสานมีมีค่ามาก ค่า tensile strength จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เทียบเคียงกับ AL-WPC



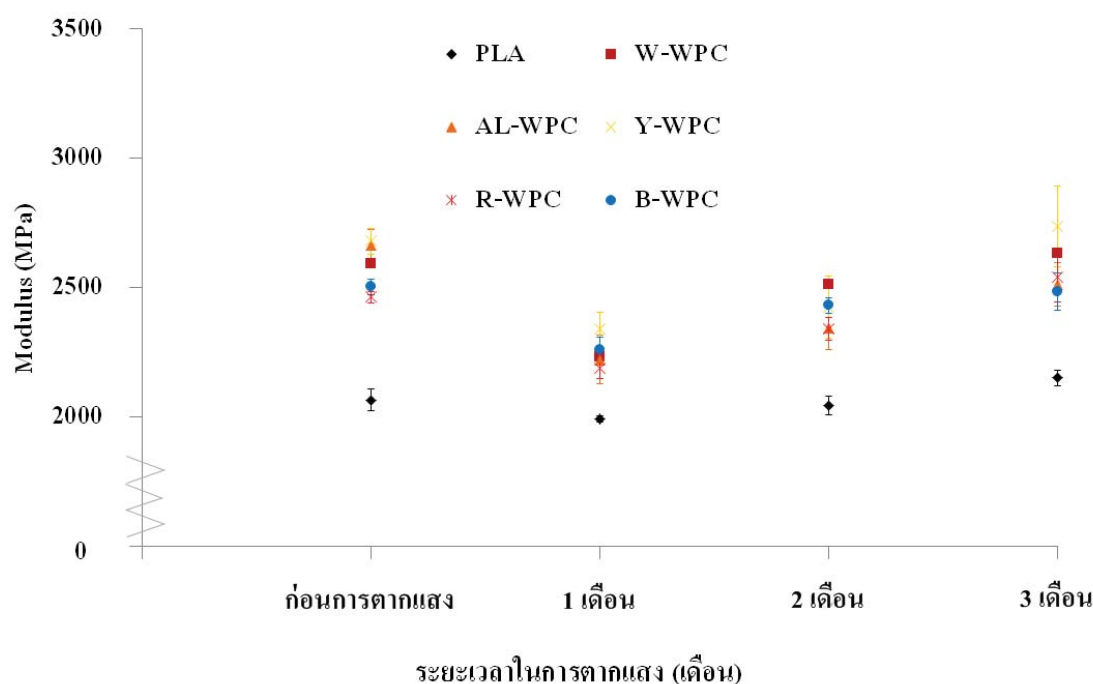
ภาพที่ 65 ค่า % elongation ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบ % elongation ของ PLA พบว่า มี % elongation ที่มากกว่าวัสดุคอมพอสิตทุกชนิด นั้นแสดงให้เห็นว่า การเติมผงไม้ไปช่วยขัดขวางไม่ให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย และยังทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบ % elongation ของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันมากนัก

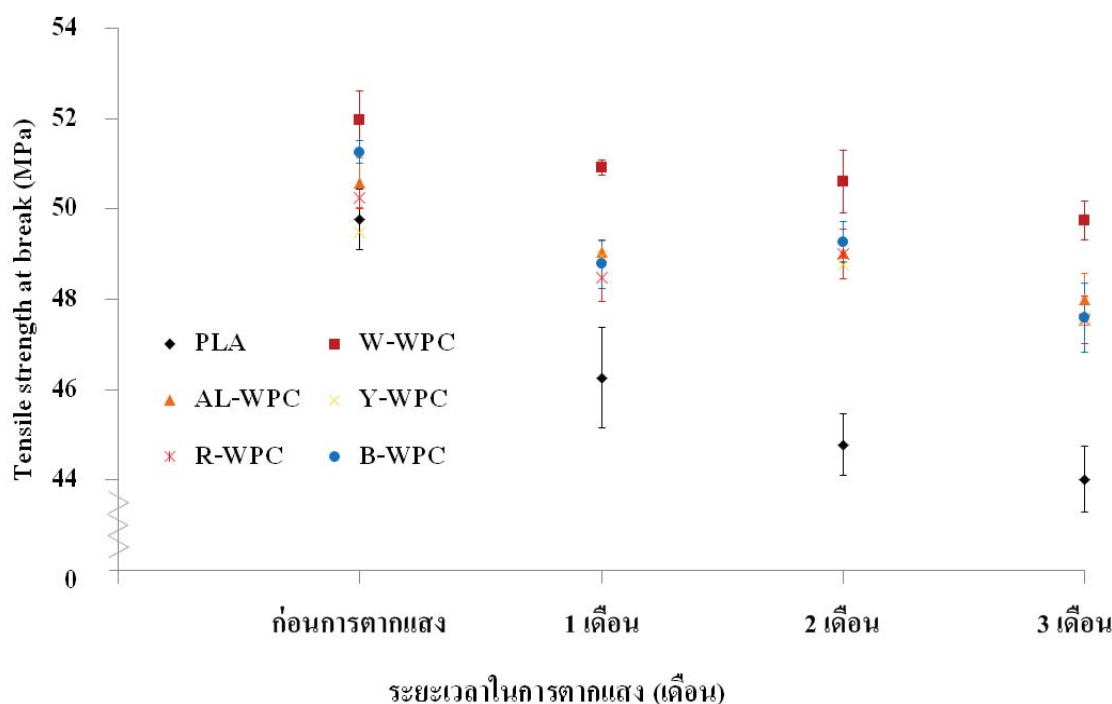
จากนั้น PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิตทุกสูตรไปทำการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี ที่มีอุณหภูมิในช่วง 23-30 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ 50 ± 5 %RH เป็นระยะเวลา 3 เดือน แล้วพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุแต่ละชนิดหลังการตากแสงทุกๆ เดือน

เมื่อพิจารณาค่า modulus ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือในช่วง 1 เดือนแรกหลังจากการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี ค่า modulus ของวัสดุทั้งหมดมีค่าที่ลดลง อาจเป็นผลเนื่องจากแสงยูวีไปเร่งการเกิด photooxidation degradation ซึ่งทำให้ PLA เกิด chain scission ของสายโซ่ ทำให้สายโซ่มีขนาดที่เล็กลง เป็นผลทำให้ค่า modulus หรือความแข็งแรงของ PLA

ต่ำลง [55] แต่เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตทุกชนิดจะมีอัตราการลดลงของ modulus หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวีในช่วง 1 เดือนแรกที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ เนื่องจาก พงไม้สน ยังคงมีองค์ประกอบของลิกนิน แม้ว่าพงไม้สนจะผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH แล้วก็ตาม แต่ยังคงเหลือองค์ประกอบลิกนินอยู่ภายในโครงสร้างอยู่ ซึ่งยืนยันจากผล FTIR การที่มีองค์ประกอบของลิกนินอยู่นั้น จึงทำให้วัสดุคอมพอสิตมีความไวต่อการเกิดการเสื่อมสภาพจากแสง ส่งผลทำให้อาจไปเร่งการเสื่อมสภาพของสายโซ่ของพอลิเมอร์ในวัสดุคอมพอสิตได้มากขึ้น [6] จึงทำให้เห็นการลดลงของค่า modulus ที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาหลังการตากแสง 2-3 เดือน พบว่า ค่า modulus ของวัสดุทุกชนิดมีค่าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น ภายหลังจากการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 66 ค่า modulus ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน



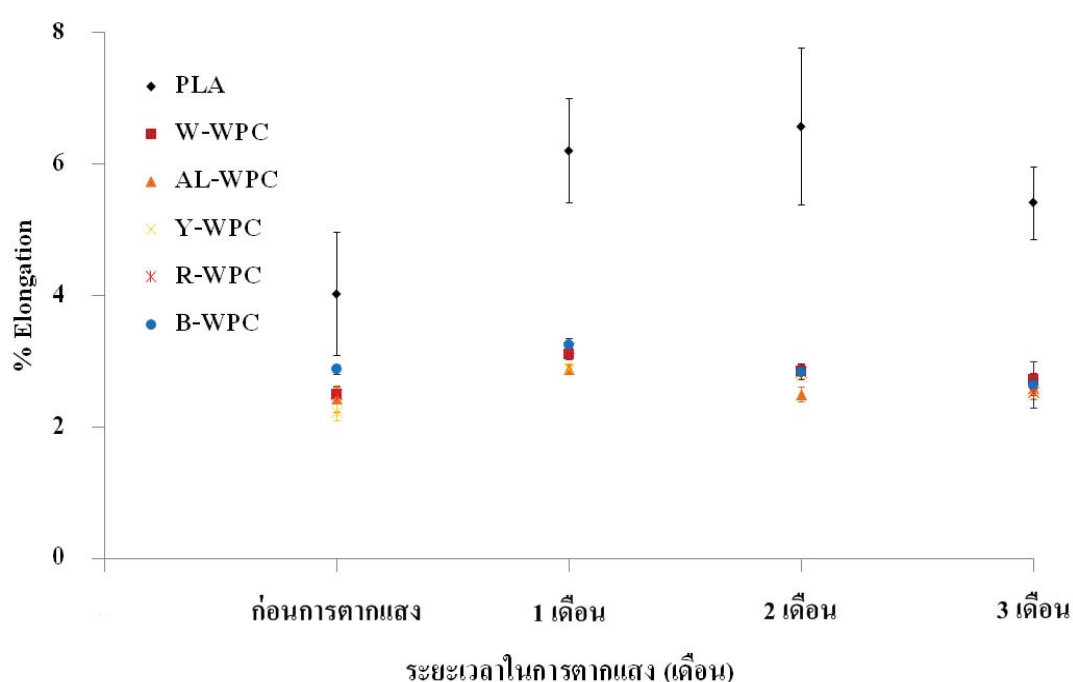
ภาพที่ 67 ค่า tensile strength ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

เมื่อพิจารณาค่า tensile strength ของวัสดุแต่ละชนิดหลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุ W-WPC มีการลดลงของค่า tensile strength อย่างต่อเนื่อง หลังจากการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี โดยที่อัตราการลดลงของค่า tensile strength ใน PLA บริสุทธิ์มีอัตราการลดลงที่มากกว่า W-WPC เนื่องจาก การเสื่อมสภาพของ PLA ทำให้สายโซ่โพลิเมอร์ PLA เกิดการขาดออก ส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่มีค่าที่ลดลง จึงทำให้ค่า tensile strength ลดลง แต่สำหรับ W-WPC มีการเติมผงไม้สนลงไป จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์บดบังรังสียูวี (screening effect) จากการที่ผงไม้มีองค์ประกอบของลิกนินที่มีความไวต่อการดูดกลืนแสงมาก [6] จึงทำให้การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์เมทริกซ์ใน W-WPC มีค่าลดลง

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตชนิด AL-WPC และวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้สนที่ย้อมสีธรรมชาติ พบว่า ค่า tensile strength ในช่วง 1 เดือนแรก มีค่าลดลงในหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงเดือนที่ 2 และ ลดลงอีกครั้งในช่วงเดือนที่ 3 อาจเป็นเพราะในช่วง 1 เดือนแรก อิทธิพลจากการเสื่อมสภาพของ PLA มีอิทธิพลมากกว่า จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างลดลง ผลทำให้ค่า tensile ลดลง จึงมีโอกาสทำให้ความชื้นสามารถ

แทรกเข้าไปในโครงสร้างของวัสดุคอมพอสิตได้ง่าย และ อาจทำให้โมเลกุลของน้ำไปเหนี่ยวนำทำให้เกิดการฟอร์มตัวระหว่างผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH กับ

พอลิเมอร์เมทริกซ์ PLA จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวมีค่าสูงขึ้น [2] ผล คือค่า tensile strength สูงขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณความชื้นเข้าไปในวัสดุคอมพอสิตมากขึ้น ความชื้นนั้นไปทำให้เกิดปรากฏการณ์ plasticization รวมถึงทำให้ผงไม้เกิดการบวมตัว (swelling effect) ทำให้ส่งผ่านแรงได้น้อยลง จึงทำให้หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีหลังเดือนที่ 3 ค่า tensile strength มีค่าต่ำลง[2]



ภาพที่ 68 % elongation ของ PLA บริสุทธิ์ และวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

เมื่อพิจารณาค่า % elongation ของวัสดุคอมพอสิตหลังจากการตากกล่องแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า PLA บริสุทธิ์ มีการเพิ่มขึ้นของ % elongation ในช่วง 2 เดือนแรก พอช่วงเดือนที่ 3 ค่ากลับลดลง ทั้งนี้สาเหตุหลักน่าจะมาจาก การเสื่อมสภาพของ PLA ในช่วง 1 เดือนแรก ทำให้สายโซ่โมเลกุล PLA มีขนาดเล็กลง จึงทำให้สายโซ่ไม่เกี่ยวพันกัน เกิดการเลื่อนผ่านกันได้ง่าย (slippage) ผลทำให้ค่า elongation มากขึ้น แต่เมื่อสายโซ่มีขนาดสั้นลง จึงทำให้ความชื้นเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย ทำให้เกิดการกักความชื้นไว้ในโครงสร้างระหว่างสายโซ่ ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ plasticization ทำให้มีค่า % elongation ที่สูงขึ้น แต่ในทางกลับกัน เมื่อผ่านการ

ตากภายในกล่องรังสียูวีเป็นเวลานาน 3 เดือน สังเกตได้ว่า วัสดุจะมีความแข็งเปราะเพิ่มขึ้น จึงทำให้การยืดตัวน้อยลง %elongation จึงต่ำลง แต่สำหรับวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่าหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน ค่า % elongation ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก

4.6 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และ กายภาพของวัสดุคอมพอสิต หลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

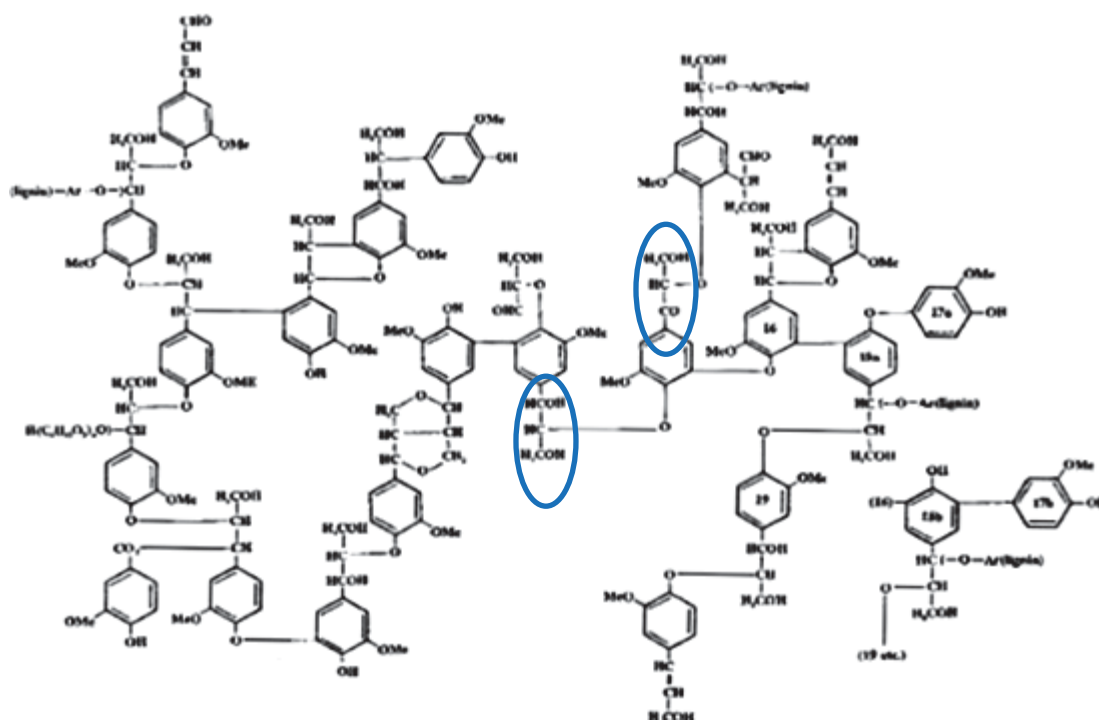
4.6.1 การเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิต โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน

จากภาพที่ 69 แสดงผลการทดสอบ FTIR ในโหมด ATR-FTIR ของ PLA บริสุทธิ์ ในกล่องแสงยูวีทั้งก่อนและหลังการจำลองการตากแสงเป็นเวลา 3 เดือน พบผลการดูดกลืนแสงในช่วง $1780-1700\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ในโครงสร้างของ PLA (วงกลมสีน้ำเงิน) แต่เนื่องจากพิกนี้ เป็นพิกที่ซ้อนทับกันระหว่างการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ที่ก่อให้เกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล และ ตำแหน่งของหมู่คาร์บอนิลใน PLA จึงทำให้ตำแหน่งพิกตำแหน่งนี้ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน หลังการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี

แต่เมื่อพิจารณาพิกตำแหน่ง 1650 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกแสดงถึงหมู่คาร์บอนิลเช่นเดียวกัน [57] ซึ่งจากภาพที่ 69 พบว่า ในช่วง $1730-1650\text{ cm}^{-1}$ ความเข้มของพิกมีค่าที่ลดลง หลังจากผ่านการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน นั้นแสดงถึง หมู่คาร์บอนิลใน PLA น่าจะเกิดการสลายตัว และเหนี่ยวนำให้เกิด free radical รวมถึงเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุล ส่งผลทำให้เกิดสารประกอบจำพวกคาร์บอกซาลิกเกิดขึ้น (วงกลมสีเขียว) ตามแนวทางการสลายตัวในภาพที่ 70

เมื่อพิจารณาพิกการดูดกลืนในช่วง $1080-1040\text{ cm}^{-1}$ และ ช่วง $840-800\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์ของตำแหน่งหมู่ carboxylic acid (dimer) จากภาพที่ 70 พบว่า ความเข้มของพิกมีค่าที่เพิ่มขึ้น หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน นั้นแสดงถึง PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวในการเกิด photooxidation degradation ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของ PLA หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี ซึ่งการเสื่อมสภาพจากรังสียูวีของ PLA นั้นจะเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอกซาลิก ทำให้ความเข้มของพิกตำแหน่งดังกล่าวมีค่าที่เพิ่มขึ้น

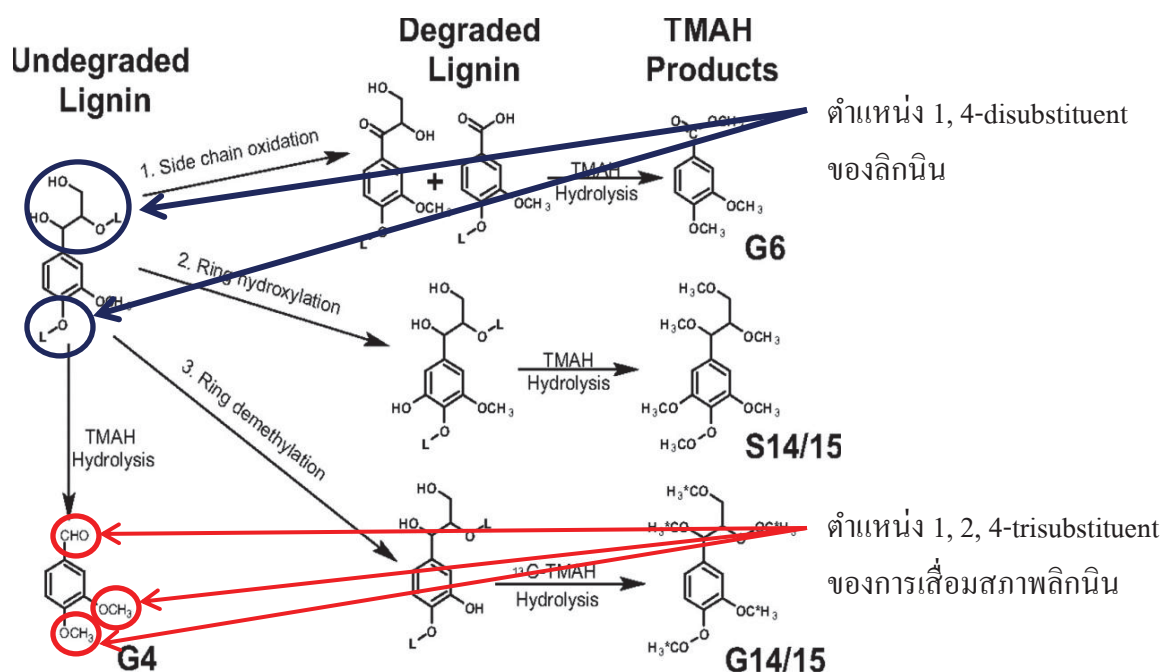
จากนั้นเมื่อทำการผสมผงไม้สนลงในพอลิเมอร์ PLA เพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิต WPC ลักษณะพิกในช่วงการดูดกลืน $1730-1650\text{ cm}^{-1}$, $1080-1040\text{ cm}^{-1}$ และ $840-800\text{ cm}^{-1}$ ยังคงปรากฏให้เห็นเช่นเดียวกับ PLA บริสุทธิ์ แต่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพิก ณ ตำแหน่งพิกในช่วง $1200-1100\text{ cm}^{-1}$ หลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน ตำแหน่งดังกล่าว แสดงเอกลักษณ์ของหมู่ aromatic (1,4 disubstituent) ในโครงสร้างขององค์ประกอบลิกนิน ซึ่งโดยส่วนใหญ่ โครงสร้างขององค์ประกอบลิกนินจะมีการเชื่อมกับโครงสร้าง aromatic ณ ตำแหน่ง 1,4 ดังแสดงในภาพที่ 71 [11] และพบว่า หลังจากการตากแดดเป็นเวลา 3 เดือน ความเข้มของพิกมีค่าต่ำลง นั่นแสดงถึงการเสื่อมสลายขององค์ประกอบลิกนิน หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวี ซึ่งการเสื่อมสลายของลิกนินจะเป็นไปตามกลไกตามภาพที่ 72



ภาพที่ 71 โครงสร้างของลิกนิน (วงกลมสีฟ้า แสดงตำแหน่งหมู่แทนที่ 1, 4 ในโครงสร้างขององค์ประกอบลิกนิน) [11]

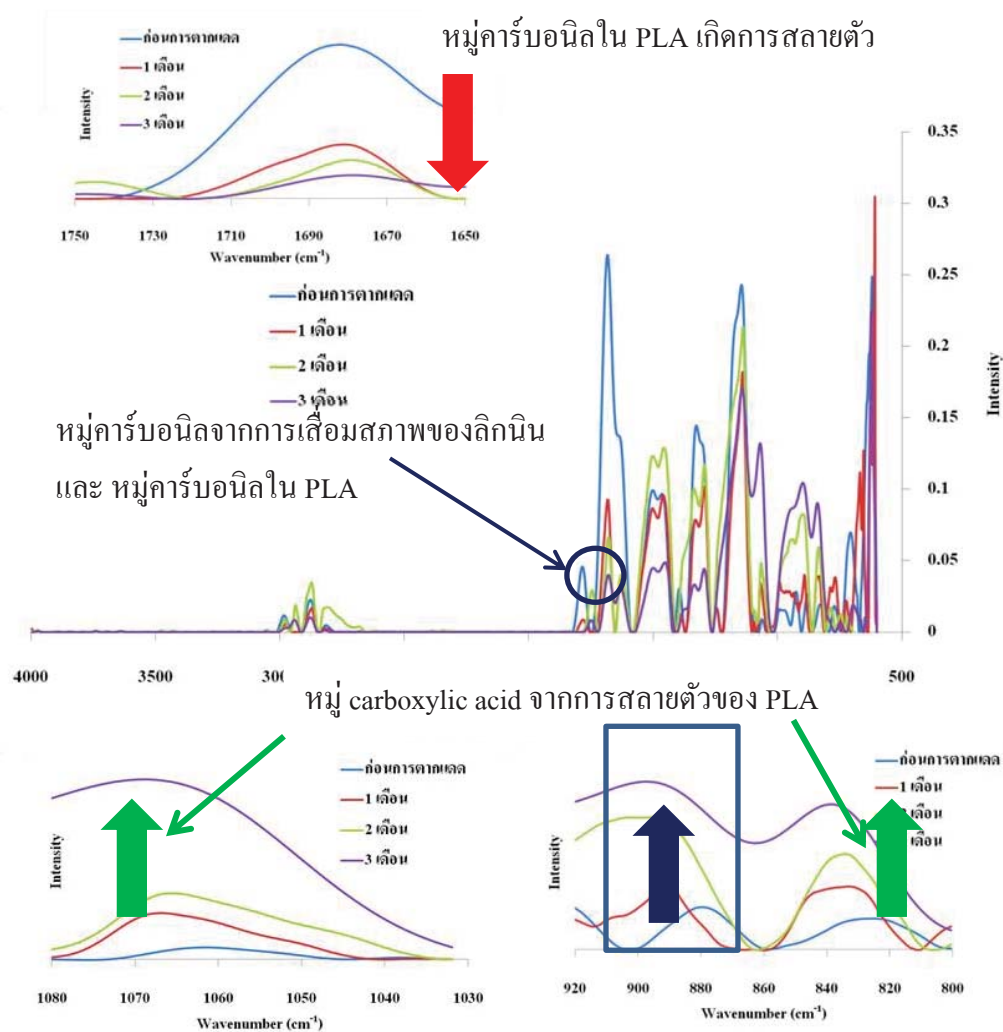
จากภาพที่ 72 แสดงกลไกในการสลายตัวของลิกนิน ซึ่งพบว่า เมื่อลิกนินเกิดการเสื่อมสลายจะเกิดเป็นสารประกอบที่มีลักษณะโครงสร้างเป็น aromatic ที่มีเชื่อมตำแหน่งที่ 1,2,4 ซึ่งพิกเอกลักษณ์ของสารประกอบ aromatic (1, 2, 4-trisubstituent) อยู่ในช่วง $1000-800\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งการซ้อนทับของ carboxylic acid (dimer) ที่เกิดจากการเสื่อมสลายของ PLA แต่เมื่อพิจารณาพิกในช่วง $900-860\text{ cm}^{-1}$ ของ PLA บริสุทธิ์ไม่ได้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น หรือ ลดลงอย่าง

มีนัยสำคัญเมื่อผ่านการตากแสงในกล่องรังสียูวี ดังแสดงในภาพที่ 69 (กรอบสี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน) หลังจากการเติมผงไม้สนลงไป พบว่า ความเข้มของพีคในช่วงนี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในภาพที่ 73 เนื่องจากองค์ประกอบของลิกนินเกิดการสลายตัวจากรังสียูวี ทำให้ไปเร่งการเกิด photooxidation degradation ของวัสดุคอมพอสิตได้



ภาพที่ 72 กลไกในการสลายตัวขององค์ประกอบลิกนิน [58]

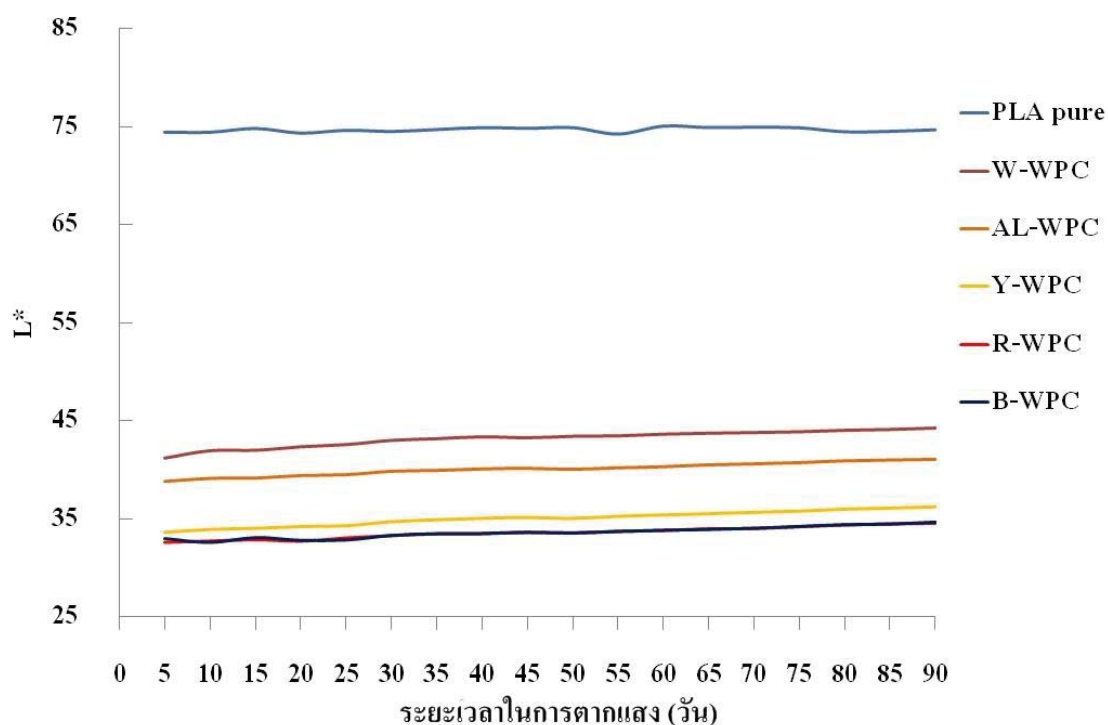
สำหรับวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆ ลักษณะพีคที่ได้จากการทดสอบ FTIR มีลักษณะที่คล้ายกับ W-WPC ไม่แตกต่างกันมากนัก (แสดงในภาคผนวก ข-4) อาจเป็นเพราะเทคนิค FTIR ไม่สามารถบอกการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุคอมพอสิตได้อย่างชัดเจน เนื่องจาก ลักษณะพีคบางช่วงเกิดการซ้อนทับ รวมถึง ผลของการย้อมสีธรรมชาติไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเซลลูโลสในผงไม้ จึงไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงในวัสดุคอมพอสิตได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 73 FTIR spectra ของ W-WPC ก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี (ในช่วง $900\text{--}860\text{ cm}^{-1}$ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของพีคอย่างมีนัยสำคัญ)

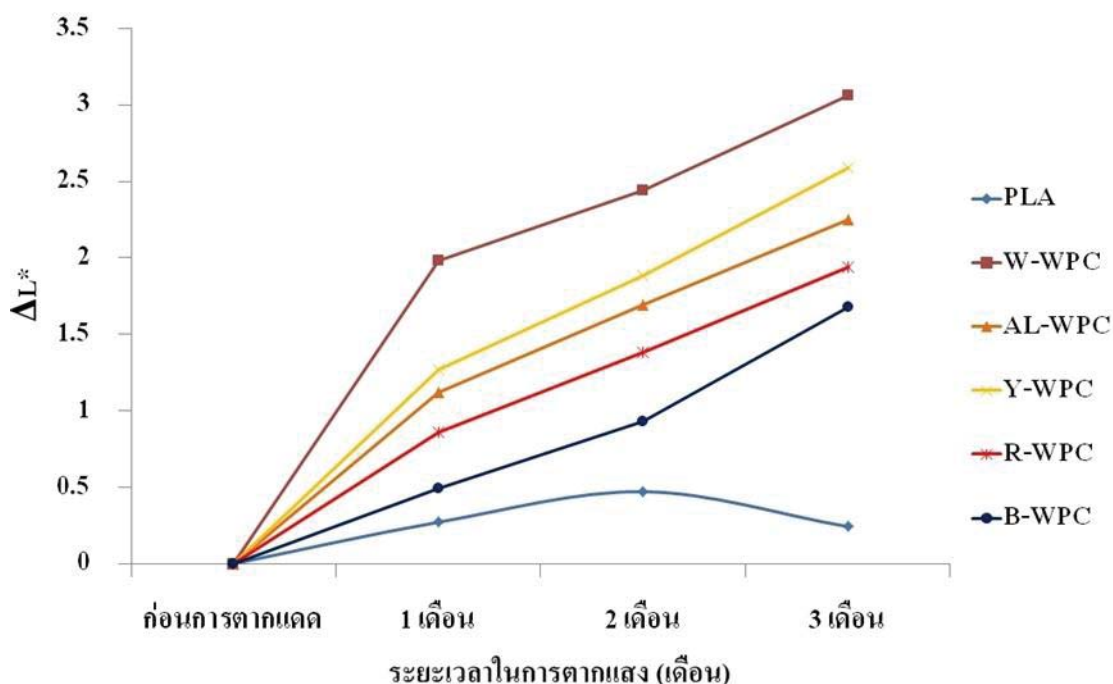
4.6.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงสีของวัสดุคอมพอสิต

การเปลี่ยนแปลงสีในชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต จะใช้การตรวจวัดด้วยเครื่อง color reader ซึ่งรายงานออกมาเป็นค่าความสว่าง L^* a^* และ b^* เพื่อทำการหาค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) หลังจากการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี จากภาพที่ 74 แสดงค่าความสว่างของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด โดยทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างทุกๆ 5 วัน ซึ่งพบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าความสว่างมากกว่าวัสดุคอมพอสิตทุกๆชนิด เนื่องจากการเติมผงไม้ลงไปโพลีเมอร์ จะทำให้เกิดความทึบแสงในตัววัสดุ จึงทำให้ค่าความสว่างลดลง



ภาพที่ 74 ความสว่างของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิต หลังผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่า W-WPC มีค่าความสว่างสูงสุด เนื่องจาก องค์ประกอบที่เป็นลิกนินในโครงสร้างของผงไม้สนที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ มีความไวต่อแสง จึงทำให้ W-WPC ดูดกลืนแสงได้ดี สีจึงซีดจางลง เมื่อวัดค่าความสว่างจากแสงขาวในเครื่อง รังสีจึงเกิดการสะท้อนกลับได้ดี ค่าความสว่างจึงมีค่าที่มากกว่า และ เมื่อพิจารณาวัสดุ AL-WPC พบว่า มีค่าความสว่างที่ลดลง เนื่องจากผงไม้สนเมื่อผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH จะไปกำจัดองค์ประกอบลิกนินซึ่งมีความเสถียรทางความร้อนที่สูง เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานคอมพอสิตจำเป็นต้องใช้ความร้อนในการขึ้นรูป ทำให้ผงไม้สนมีความอ่อนไหวต่อการสลายตัวทางความร้อนมากขึ้น จึงทำให้วัสดุ AL-WPC มีความสว่างที่ลดลง และ เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ พบว่า ค่าความสว่างของวัสดุคอมพอสิตทั้งสามชนิด มีค่าที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับ AL-WPC เนื่องจาก สีธรรมชาติเป็นสีที่ไม่ได้มีความสดใสสว่างเหมือนสีสังเคราะห์ทั่วไป ทำให้หลังจากการย้อมสีธรรมชาติลงไปบนผงไม้สน ค่าความสว่างจึงมีค่าที่ลดลง



ภาพที่ 75 ความแตกต่างของค่าความสว่าง (ΔL^*) ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าความสว่างหลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวี ซึ่งนำมา plot กราฟเปรียบเทียบทั้งก่อน และ หลังจากการตากแสงภายในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 1-3 เดือน ซึ่งได้ผลการทดลองตามภาพที่ 75 พบว่า ในช่วงระยะ 2 เดือนแรก ค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่างของ PLA บริสุทธิ์ มีค่าที่เพิ่มขึ้น นั้นเป็นการยืนยันว่า PLA เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสียูวี และไปทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของ PLA ทำให้สายโซ่มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ส่งผลต่อการทะลุผ่านของแสง ทำให้ความโปร่งแสงเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความสว่างมีค่าที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเข้าสู่เดือนที่ 3 พบว่า ค่าความสว่างกลับมีค่าที่ลดลง เนื่องจาก โมเลกุล PLA เกิดการเสื่อมสภาพจะทำให้โมเลกุลความชื้นในบรรยากาศสามารถแทรกตัวระหว่างสายโซ่ ทำให้ความเข้มของสีมีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

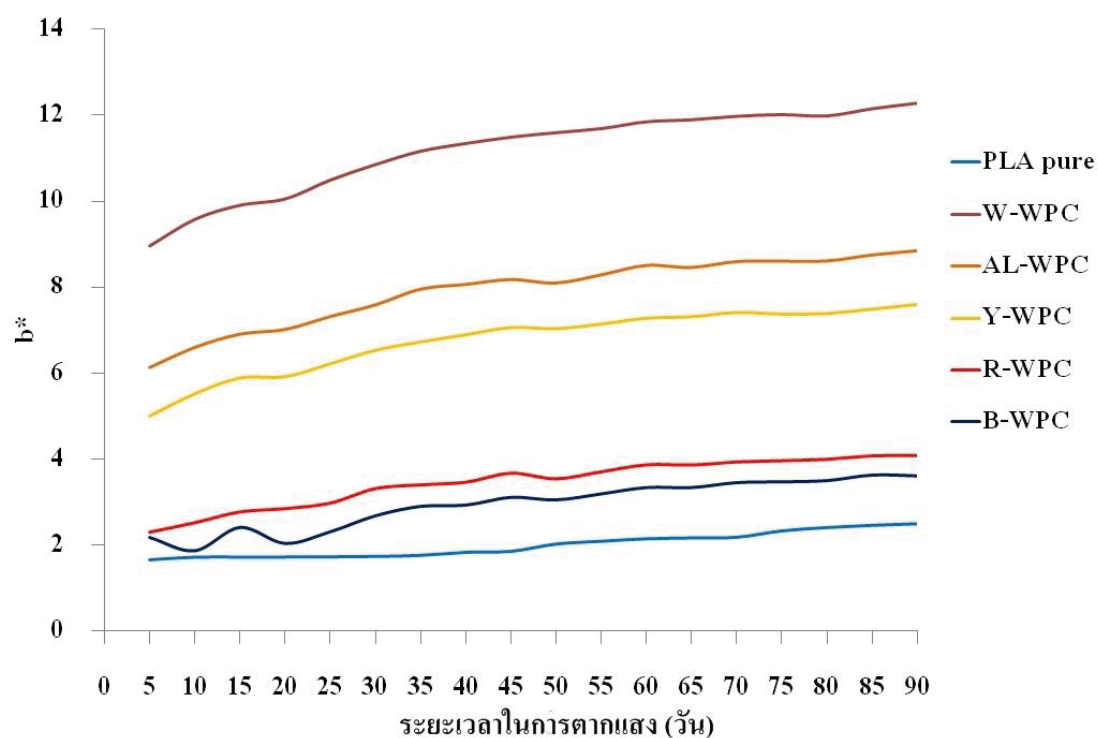
สำหรับวัสดุคอมพอสิตทุกชนิดมีการเปลี่ยนแปลงความสว่างของวัสดุที่มีเพิ่มขึ้น หลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน เนื่องจาก ผลของโครงสร้างลิกนิน เมื่อได้รับรังสียูวี จะทำให้เกิดการเสื่อมสลายตัวและแตกออกเป็นสารประกอบ phenoxy radicals [6] ส่งผลทำให้เกิดความขรุขระบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งส่งผลต่อการตกกระทบของแสง และเมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความสว่างของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่า W-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลง

ของความสว่างมากที่สุด เนื่องจากองค์ประกอบของผงไม้ในตัววัสดุคอมพอสิต มีลักษณะเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในจำนวนมาก ทำให้เร่งการเกิดการเสื่อมสภาพจากรังสียูวีได้ง่าย

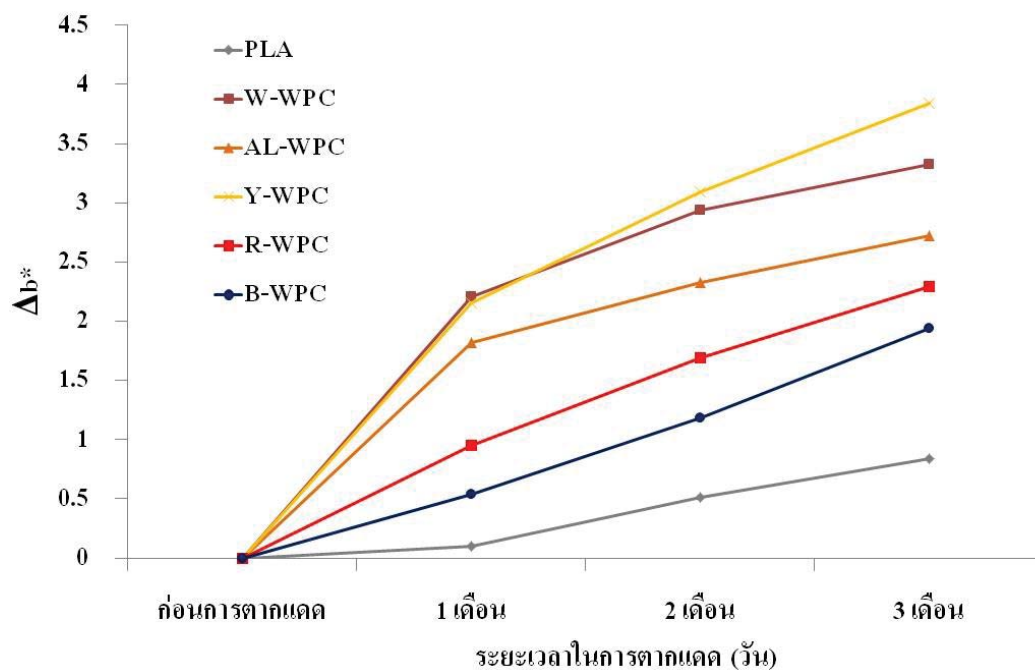
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิต AL-WPC จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง เพราะมีการกำจัดองค์ประกอบลิกนินออกไปบางส่วน ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความสว่างมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตที่เติมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ พบว่า Y-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความสว่างมากกว่า AL-WPC เนื่องจากลักษณะสีเหลือง เป็นสีที่มีความไวต่อรังสียูวีมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่สีเหลืองดูดกลืนได้ จากการวัดร้อยละการดูดซึมสีด้วยเทคนิค UV-VIS พบอยู่ตำแหน่งที่ 399 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในย่านของรังสียูวี ทำให้สามารถ absorb รังสียูวีจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสว่างที่มากกว่า รวมถึงลักษณะโครงสร้างของสีที่สามารถเกิด tautomerism ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีได้ง่าย จึงทำให้เห็นค่าการเปลี่ยนแปลงของความสว่างได้มากกว่า ในทางตรงกันข้าม R-WPC และ B-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความสว่างน้อยกว่า AL-WPC นั้นแสดงว่า หลังจากการย้อมผงไม้ด้วยสีแดง และ น้ำเงิน ความเสถียรต่อแสงของวัสดุคอมพอสิตมีค่าที่เพิ่มขึ้น เป็นผลจากความยาวคลื่นที่สีแดง และ สีนํ้าเงินดูดกลืนมีความยาวคลื่นที่มากกว่า จากการทดสอบการวัดร้อยละการดูดซึมสีด้วยเทคนิค UV-VIS ทำให้ไม่ว่องไวในการดูดกลืนรังสียูวี รวมถึงการย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝางมีพันธะโลหะเชิงซ้อนที่มีความเสถียรระหว่างโครงสร้างของสีธรรมชาติ และ ผงไม้สน ส่วนในกรณีสีนํ้าเงินจากครามเป็นผลมาจากโครงสร้างของโมเลกุลสี indigo ที่มีความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการจางหายไปของสียากขึ้น จึงทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความสว่างมีค่าน้อยลง

จากภาพที่ 76 แสดงค่า b^* ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงทิศทางการเปลี่ยนสี โดยที่ถ้า b^* มีค่าเป็นบวก จะมีความเป็นสีเหลืองมาก แต่ถ้า b^* มีค่าเป็นลบ จะมีความเป็นสีนํ้าเงินมาก จากภาพที่ 77 แสดงค่า b^* ซึ่งพบว่า W-WPC มีความเป็นสีเหลืองมากกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ รองลงมาเป็น AL-WPC, Y-WPC, R-WPC, B-WPC และ PLA มีความเป็นสีเหลืองน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลง b^* (Δb^*) เพื่อดูอัตราการเกิดสีเหลืองในวัสดุ พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิตอื่นๆ เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของ PLA ทำให้เกิดสารประกอบจำพวกคาร์บอนิลเกิดขึ้นในโครงสร้าง ดังแสดงในกลไกการเสื่อมสภาพของ PLA ในภาพที่ 70 จึงทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีเหลืองที่เพิ่มขึ้นหลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวี แต่เมื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า b^* ในวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด พบว่า Y-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด เป็นผลมาจากลักษณะสีที่ขมในผงไม้สนเป็นสีเหลือง รวมถึงความว่องไวในการดูดกลืนรังสียูวีจากการทดสอบ UV-VIS ทำให้ผงไม้สีเหลืองมีความสามารถในการดูดซับรังสียูวีได้ดี เป็นเหตุทำให้วัสดุคอมพอสิต Y-WPC เกิดการ

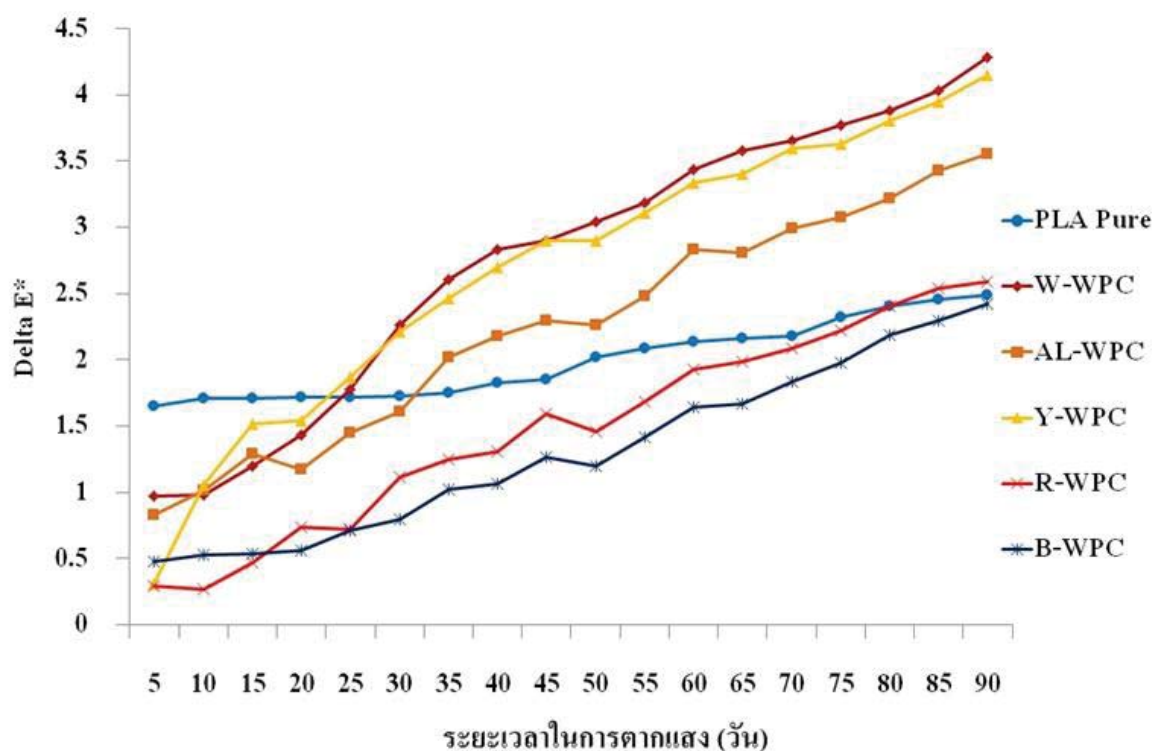


ภาพที่ 76 ค่า b^* ของ PLA บริสุทธิ์ และ วัสดุคอมพอสิต หลังผ่านการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน



ภาพที่ 77 ความแตกต่างของค่า b^* (Δb^*) ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

เปลี่ยนแปลงสีเหลืองมากกว่า รองลงมาเป็น W-WPC และ AL-WPC เหตุผลเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง แต่วัสดุ R-WPC และ B-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า b^* น้อยที่สุดในวัสดุคอมพอสิต นั่นเป็นการยืนยันอีกครั้งว่า สีแดงจากแก่นไม้ฝาง และ สีน้ำเงินจากคราม มีความเสถียรต่อแสง จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นสีเหลืองลดต่ำลง



ภาพที่ 78 ความแตกต่างของค่าความสว่าง (ΔE) ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อนและหลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ของวัสดุแต่ละชนิด พบว่า แนวโน้มวัสดุทุกชนิดมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่เพิ่มขึ้น หลังจากการตากแสงภายในกล่องรังสียูวี นั้นแสดงถึงวัสดุคอมพอสิตมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพจากรังสียูวี และ ถ้าพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของวัสดุ พบว่า PLA มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยที่สุด สอดคล้องกับค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง (ΔL^*) และ การเปลี่ยนแปลง b^* (Δb^*) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบวัสดุคอมพอสิตที่มีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมมากที่สุด คือ W-WPC ซึ่งเทียบเคียงกับ Y-WPC เนื่องจากผลของค่า ΔL^* ของ W-WPC มีค่าสูงกว่า Y-WPC แต่ในขณะที่ ค่า Δb^* ของ Y-WPC มีค่าสูงกว่า W-WPC ผลจึงมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่ใกล้เคียงกัน ในทางกลับกัน R-WPC และ B-WPC มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยที่สุด ซึ่ง

สอดคล้องกับค่า ΔL^* และ Δb^* โดยที่ B-WPC มีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยที่สุด นั้นแสดงให้เห็นถึง สีน้ำเงินจากครามมีความเสถียรต่อรังสียูวีได้ดี ทำให้การเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมในวัสดุ B-WPC มีค่าต่ำกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิดอื่นๆ

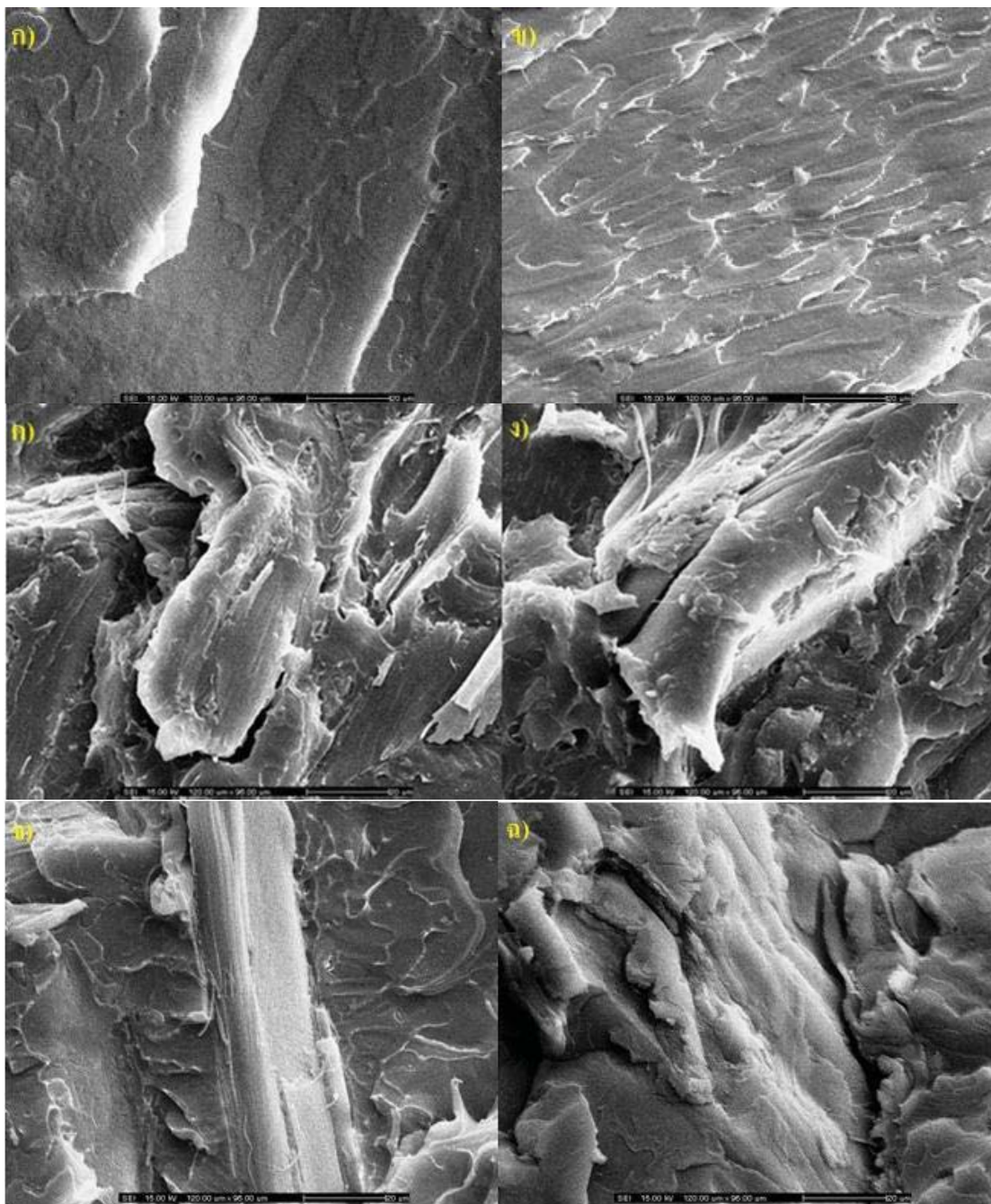
4.6.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิต

จากภาพที่ 79-80 แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี โดยใช้เทคนิค SEM แบบส่องกราด ซึ่งวัสดุทุกชนิดจะถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนการส่องลักษณะสัณฐานวิทยาทุกครั้ง

เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของ PLA บริสุทธิ์ พบว่า หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน PLA บริสุทธิ์มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากกว่าก่อนการตาก ซึ่งแสดงถึงการเสื่อมสภาพของ PLA จากรังสียูวี นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิต W-WPC, AL-WPC รวมถึง วัสดุคอมพอสิตที่ผสมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติที่กำลังขาย 1000 เท่า พบว่า ผงไม้สนมีความเข้ากันได้กับ PLA เมทริกซ์ เนื่องจาก มีการเติมสารเชื่อมประสาน 3-TEPA เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างผงไม้และพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้เห็นการยึดเกาะระหว่างผงไม้ และ PLA เป็นอย่างดี แต่เมื่อวัสดุคอมพอสิตผ่านการตากภายในกล่องแสงเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ไม้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนการตากแดด ซึ่งสอดคล้องกับผลของ FTIR ที่ไม่เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนหลังจากการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน

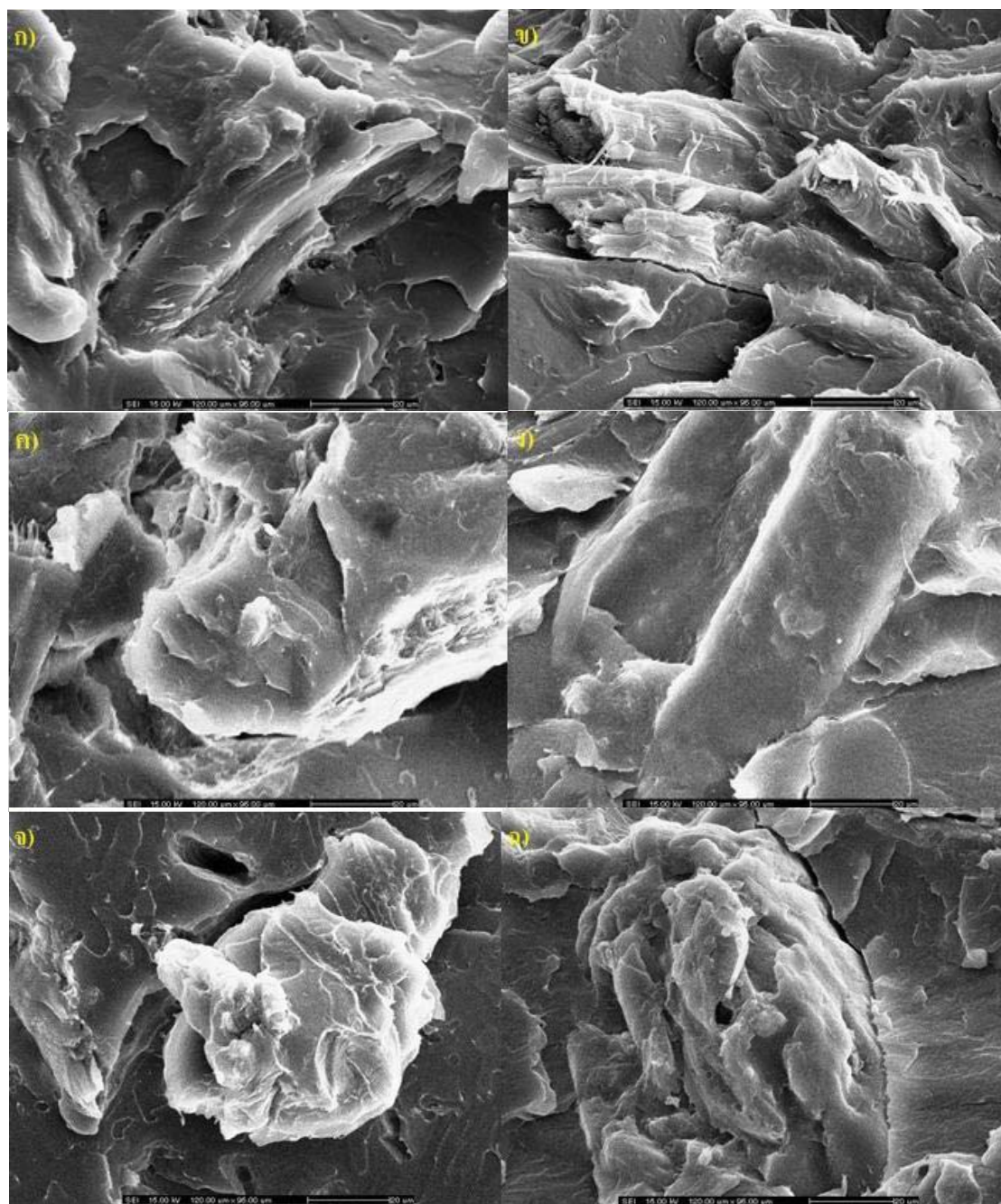
4.6.4 ผลของการต้านเชื้อแบคทีเรียในสีธรรมชาติ, ผงไม้ที่ย้อมสีธรรมชาติ และ วัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด

ในการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย ผู้ทำการทดลองเลือกเชื้อแบคทีเรียมาทำศึกษา 2 ชนิด ได้แก่ เชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* และ เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ซึ่งเป็นชนิดแบคทีเรียแกรมบวก และ แกรมลบที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั่วไป เพื่อศึกษาความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในวัสดุคอมพอสิต



ภาพที่ 79 ภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลที่หักหลังจุ่มในไตรเจนเหลวของวัสดุต่างๆที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยที่

- ก) PLA บริสุทธิ์ ก่อนการตากแสง ข) PLA บริสุทธิ์ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี 3 เดือน
 ค) W-WPC ก่อนการตากแสง ง) W-WPC หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี 3 เดือน
 จ) AL-WPC ก่อนการตากแสง ฉ) AL-WPC หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี 3 เดือน



ภาพที่ 80 ภาพถ่าย SEM บริเวณหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลที่หักหลังจุ่มในไตรเจนเหลวของวัสดุต่างๆที่กำลังขยาย 1000 เท่า โดยที่

ก) Y-WPC ก่อนการตากแสง

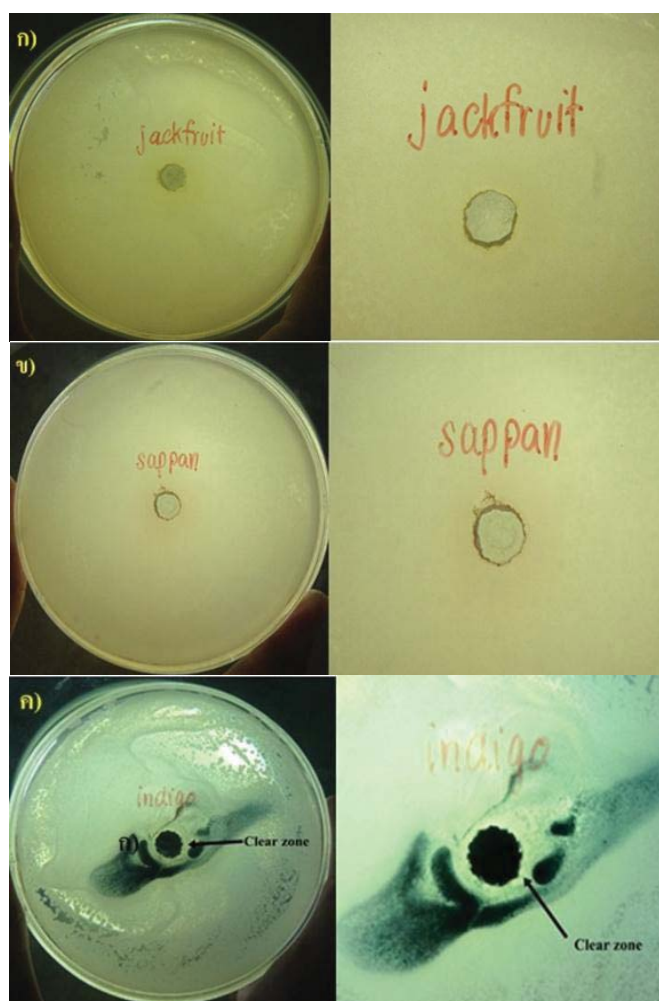
ข) Y-WPC หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี 3 เดือน

ค) R-WPC ก่อนการตากแสง

ง) R-WPC หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี 3 เดือน

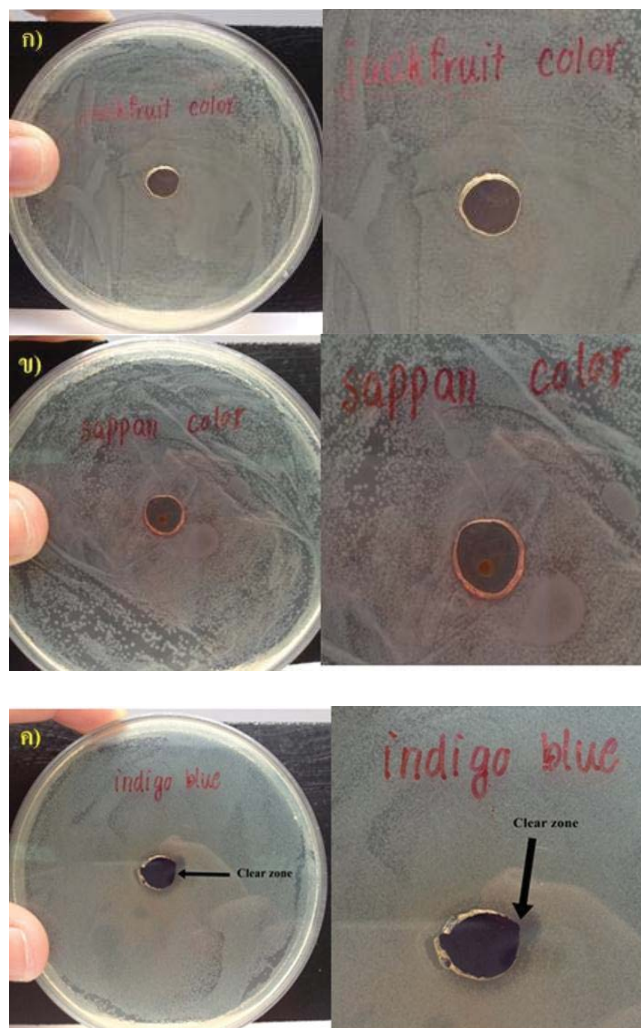
จ) B-WPC ก่อนการตากแสง

ฉ) B-WPC หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี 3 เดือน



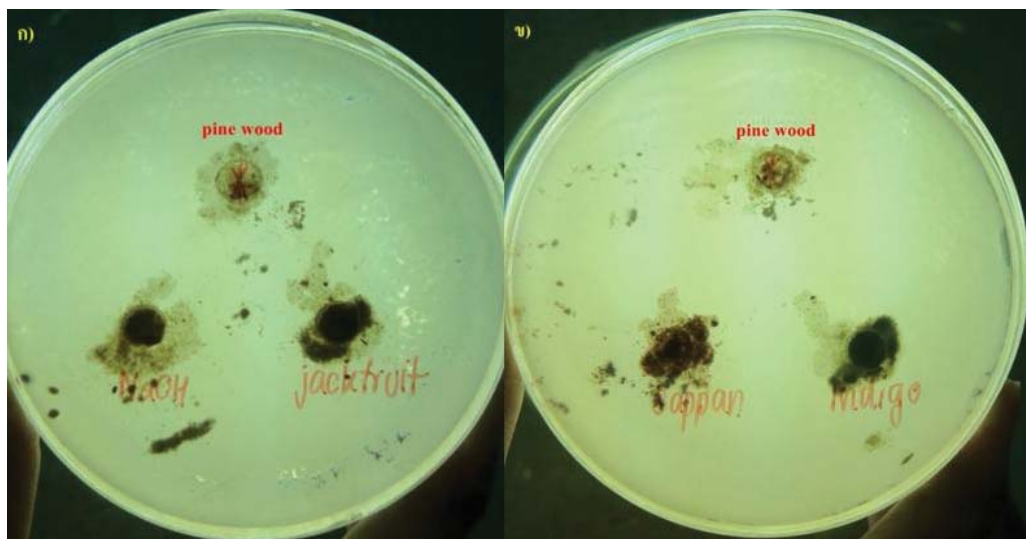
ภาพที่ 81 ผลการทดสอบการด้านเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* (ชนิดแกรมบวก) ของสีย้อมจากธรรมชาติทั้งสามชนิด ก) สีเหลืองจากแก่นขนุน ข) สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ค) สีนํ้าเงินจากคราม

จากภาพที่ 81 จะพบว่าสีเหลืองจากแก่นขนุน และสีแดงจากแก่นไม้ฝางไม่มีผลในการด้านเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เนื่องจากไม่ปรากฏลักษณะ clear zone เกิดขึ้นรอบๆบริเวณสีในทางตรงกันข้าม สีนํ้าเงินจากคราม มีลักษณะ clear zone เกิดขึ้นรอบๆบริเวณสี ซึ่งสังเกตได้จากบริเวณสีขาวรอบๆสีที่เกิดขึ้น นั่นแสดงว่า สีครามมีความสามารถในการด้านเชื้อ *Bacillus subtilis* ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Mari K. และ คณะ [47]



ภาพที่ 82 ผลการทดสอบการด้นเชื้อของแบคทีเรีย *Escherichia coli* (ชนิดแกรมลบ) ของสีย้อมจากธรรมชาติทั้งสามชนิด ก) สีเหลืองจากแก่นขนุน ข) สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ค) สีนํ้าเงินจากคราม

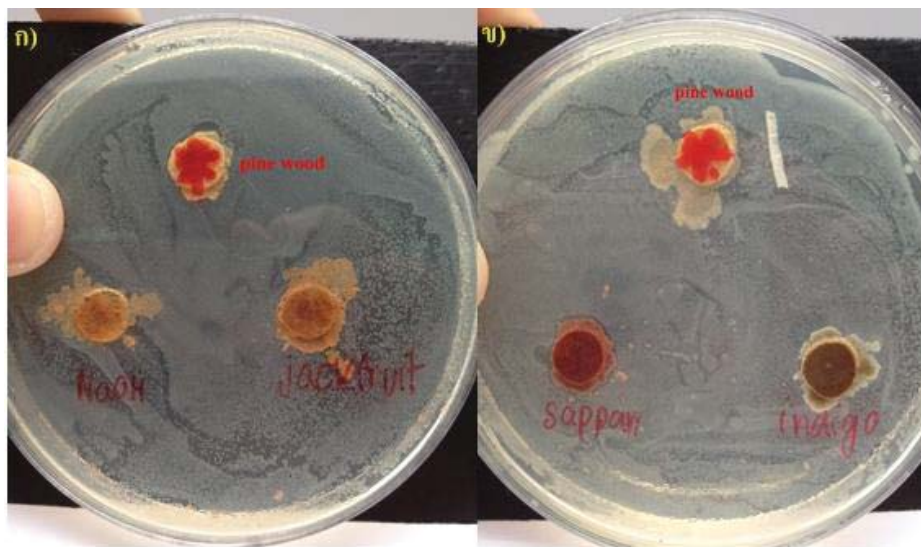
เมื่อศึกษาผลของการด้นเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* หรือ *E.coli*. จากภาพที่ 82 พบว่า สีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ไม่มีความสามารถในการด้นเชื้อแบคทีเรีย เช่นเดียวกันกับในเชื้อ *Bacillus subtilis* แต่สีนํ้าเงินจากครามพบว่ามีสามารถในการด้นเชื้อแบคทีเรีย *E.coli*. ซึ่งผลสอดคล้องกับลักษณะที่เกิดขึ้นกับเชื้อ *Bacillus subtilis* แต่เมื่อสังเกตลักษณะ clear zone ที่เกิดขึ้น พบว่า มีลักษณะที่เกิดขึ้นน้อยกว่าในเชื้อจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* นั้นแสดงให้เห็นว่า สีนํ้าเงินจากครามมีความสามารถในการด้นเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมลบมากกว่าแกรมลบ



ภาพที่ 83 ผลการทดสอบการด้นเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* (ชนิดแกรมบวก) ของผลไม้ที่ได้รับการสีย้อมจากธรรมชาติ เทียบกับผลไม้สน ก) ผลไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผลไม้สนที่ย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน ข) ผลไม้สนที่ย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง และ ผลไม้สนที่ย้อมสีน้ำเงินจากคราม

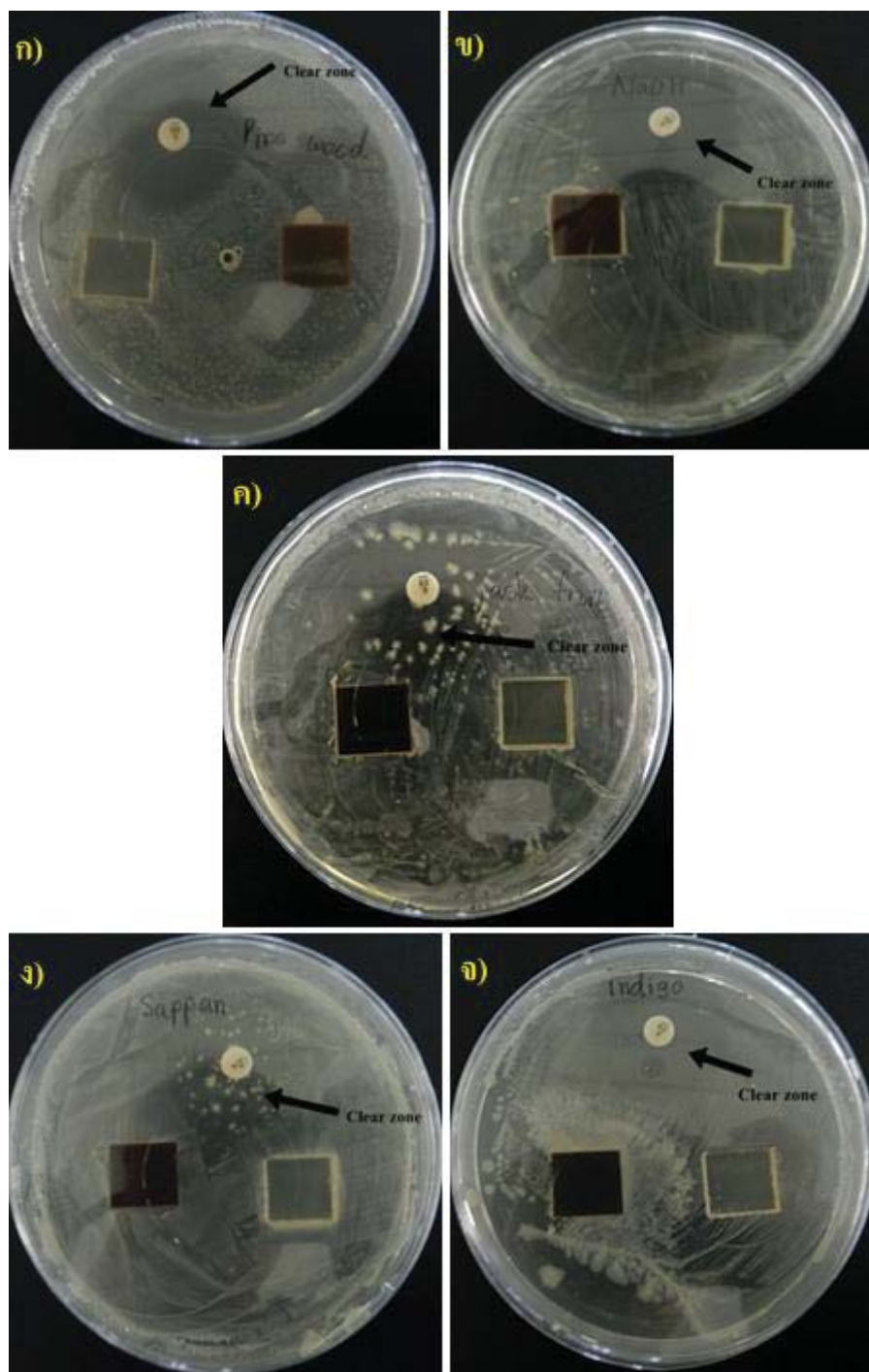
แล้วทำการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบผลของการด้นเชื้อแบคทีเรียในผลไม้สน เมื่อนำสีธรรมชาติมาย้อมในผลไม้ จากภาพที่ 83 แสดงว่าเมื่อผลไม้ที่ได้รับการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผลไม้ที่ย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ถูกนำมาศึกษาผลของการด้นเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด พบว่า ผลไม้ทุกชนิดไม่มีความสามารถในการด้นเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด ซึ่งเป็นผลมาจาก โมเลกุลของสีไม่สามารถแพร่ผ่านออกมาจากผลไม้ได้ เนื่องจาก โมเลกุลของสีสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับผลไม้สนได้ ทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านโมเลกุลตัวสีมาด้นเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้

จากนั้นจะนำผลไม้ที่ได้ไปผสมกับ PLA เมทริกซ์ เพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิต เพื่อศึกษาผลของการด้นเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิด ในวัสดุคอมพอสิตเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ และ กระดาษที่มีตัวยาด้นเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามภาพ 85



ภาพที่ 84 ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (ชนิดแกรมลบ) ของผงไม้ที่ได้รับ การสีย้อมจากธรรมชาติ เทียบกับผงไม้สน ก) ผงไม้สนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH และ ผงไม้สนที่ย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน ข) ผงไม้สนที่ย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง และ ผงไม้สนที่ ย้อมสีน้ำเงินจากคราม

จากการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียในวัสดุคอมพอสิต พบว่า วัสดุคอมพอสิตทุก ชนิด รวมถึง PLA บริสุทธิ์ ไม่มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งผลสอดคล้องกับการ ทดสอบในผงไม้แต่ละชนิด นั้นแสดงให้เห็นว่า วัสดุคอมพอสิตยังคงไม่สามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ ได้ เนื่องจาก ปริมาณความเข้มข้นของสารที่ต้านจุลินทรีย์มีปริมาณน้อย เมื่อนำไปย้อมลงในผงไม้ และ ผสมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ปริมาณความเข้มข้นยิ่งน้อยลง ประกอบกับโมเลกุลของสีไม่ สามารถแพร่ผ่านออกมาจากวัสดุคอมพอสิตได้ ทำให้ไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ จึงไม่ สามารถเห็น clear zone ที่เกิดขึ้นในวัสดุแต่ละชนิดได้



ภาพที่ 85 ผลการทดสอบการต้านเชื้อของจุลินทรีย์ *Escherichia coli* (ชนิดแกรมลบ) ของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด เทียบกับ PLA บริสุทธิ์ และกระดาษที่มีตัวยาด้านเชื้อแบคทีเรีย ก) W-WPC ข) AL-WPC ค) Y-WPC ง) R-WPC จ) B-WPC

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเสถียรต่อสภาพแวดล้อมของวัสดุคอมพอสิตพอลิแล็กติก แอซิดที่ผสมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ โดยใช้ผงไม้สนในการศึกษา ซึ่งผงไม้สนจะผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH ก่อนการย้อมสีธรรมชาติ โดยสีธรรมชาติที่นำมาใช้ทั้งหมดมี 3 ชนิด ได้แก่ สีเหลืองจากแก่นขนุน สีแดงจากแก่นไม้ฝาง และสีน้ำเงินจากคราม หลังจากการย้อมสีธรรมชาติแล้ว ผงไม้ทั้งหมดจะถูกปรับปรุงผิวโดยเติมสารเชื่อมประสาน 3-TEPA เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ PLA และผงไม้สน แล้วจึงทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมพอสิตโดยกระบวนการ injection molding จากนั้นศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด ก่อน และหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

ผลจากประสิทธิภาพการย้อมสีธรรมชาติในผงไม้สน พบว่า สีแดงจากแก่นไม้ฝางมีร้อยละการดูดซึมสีที่มากที่สุด รองมาเป็นสีน้ำเงินจากคราม และสีเหลืองจากแก่นขนุนมีร้อยละการดูดซึมสีที่ต่ำที่สุด ซึ่งผลการดูดซึมสีที่แตกต่างกันมีอิทธิพลมาจากวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน และโครงสร้างของสีที่สามารถเกิดพันธะกับผงไม้ที่แตกต่างกัน นอกเหนือจากนั้นลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้จากการย้อมสีธรรมชาติแต่ละชนิดจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารละลาย NaOH ทำให้องค์ประกอบบางส่วนของไม้ เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ถูกกำจัดออกไป มีผลทำให้โครงสร้างผงไม้มีความแข็งแรงมากขึ้น และเมื่อทำการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารเชื่อมประสาน 3-TEPA พบว่า สารเชื่อมประสานสามารถเกิดอันตรกิริยากับผงไม้ ทำให้ผงไม้สนสามารถเข้ากันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี

เมื่อศึกษาผลของความเสถียรทางความร้อนในผงไม้สนแต่ละชนิด พบว่า ผงไม้สนมีความเสถียรทางความร้อนสูงสุด เนื่องจากมีลิกนินซึ่งมีความเสถียรทางความร้อนที่สูง แต่เมื่อผงไม้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย NaOH พบว่ามีความเสถียรที่ลดลง แต่เมื่อทำการย้อมสีธรรมชาติลงในผงไม้สน พบว่า ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝางมีความเสถียรทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่ผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากครามไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเสถียรทางความร้อน นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาปริมาณเชื้อราที่เชื้อพบว่า ผงไม้

สนที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากครามมีปริมาณสีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมาผลจากการเหนี่ยวนำของโครงสร้างสีทำให้การสลายตัวทางความร้อนของผงไม้ลดลง

นอกเหนือจากนั้น เมื่อทำการศึกษาความเสถียรทางความร้อนต่อการเกิดออกซิเดชันในสถานะก๊าซออกซิเจน พบว่า อัตราการสลายตัวทางความร้อนของผงไม้สนที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากครามมีอัตราการสลายตัวทางความร้อนที่น้อยที่สุด นั้นแสดงให้เห็นถึง สีน้ำเงินจากครามมีความสามารถในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตที่ผสมผงไม้สนชนิดต่างๆ พบว่า AL-WPC จะมีค่า modulus ที่สูงขึ้น แต่กลับมีค่า tensile strength ที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการปรับปรุงผิวผงไม้ ทำให้เซลลูโลสเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกใหม่ แต่การจัดเรียงตัวใหม่นี้จะทำให้การส่งผ่านแรงระหว่างโมเลกุลมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับ W-WPC และเมื่อพิจารณาวัสดุคอมพอสิตที่ผสมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติ พบว่า ค่า modulus และ tensile strength มีค่าลดต่ำลง เมื่อเทียบกับ AL-WPC ซึ่งเป็นผลมาจาก ร้อยละการดูดซึมน้ำ และ โครงสร้างสีที่มีอันตรกิริยากับผงไม้ที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดบริเวณ active site ของผงไม้ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมประสานต่างกัน

ผลจากการศึกษาปริมาณผลึกพบว่า AL-WPC มีปริมาณผลึกมากกว่า W-WPC แต่เมื่อทำการย้อมสีธรรมชาติลงในผงไม้พบว่า วัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติกลับมีแนวโน้มผลึกที่ลดลง นอกเหนือจากนั้น เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของ PLA บริสุทธิ์พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ในวัสดุคอมพอสิตกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลังการตาก 1 เดือนแรก และลดลงในช่วงเดือนที่ 2 และคงที่ในช่วงเดือนที่ 3

ผลจากการศึกษาเปรียบเทียบความเสถียรทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิดก่อนการตากรังสียูวี พบว่า B-WPC มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวที่สูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากวิธีการย้อมสีน้ำเงินลงในผงไม้สน ที่มีการใช้เบสเป็นตัวช่วย ซึ่งไปทำให้เกิดการเร่งการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น แต่เมื่อพิจารณาอัตราการสลายตัวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่า B-WPC มีอัตราการสลายตัวที่น้อยที่สุด

นอกจากนั้น เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีพบว่า ค่า modulus ของ PLA และ วัสดุคอมพอสิตมีแนวโน้มที่คล้ายกัน กล่าวคือ มีค่าลดต่ำลงหลังการตากในช่วง 1 เดือนแรก ส่วนในช่วงหลังการตากเดือนที่ 2-3 กลับมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก PLA เกิดการเสื่อมสภาพในช่วง 1 เดือนแรก หลังจากนั้น เมื่อวัสดุเกิดการตากรังสียูวีนานขึ้น วัสดุมีความแข็งแรง ค่า modulus จึงมีค่าที่สูงขึ้น ในทางกลับกัน ค่า tensile strength ของ PLA บริสุทธิ์ และ W-WPC มีแนวโน้มที่ต่ำลง แต่วัสดุคอมพอสิต AL-WPC และ คอมพอสิตที่ผ่านการเติมผงไม้ย้อมสีธรรมชาติกลับมีแนวโน้มที่ลดลงหลังการตาก 1

เดือนแรก พอช่วงเดือนที่ 2 กลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และ ลดลงอีกครั้งในช่วงเดือนที่ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของ PLA ทำให้โมเลกุลของน้ำจากความชื้นในอากาศ สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ ส่วนค่า % elongation พบว่า PLA บริสุทธิ์มี % elongation ที่เพิ่มขึ้นหลังการตากในช่วง 2 เดือนแรก พอเดือนที่ 3 กลับมีแนวโน้มที่ลดลง สำหรับวัสดุคอมพอสิต % elongation กลับมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ผลจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ PLA และ วัสดุคอมพอสิต พบว่า มีการเสื่อมสภาพของ PLA เนื่องจากการเกิด photooxidation และ การเสื่อมสภาพของผงไม้จากองค์ประกอบของลิกนินอยู่จริง

ผลจากการเปลี่ยนแปลงสีในชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต พบว่า W-WPC และ Y-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) มากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นผลจาก W-WPC มีการเติมผงไม้ที่ยังคงมีองค์ประกอบของลิกนินที่มีความไวต่อแสงมาก ส่วน Y-WPC เป็นผลมาจากค่าการย้อมสีเหลืองในผงไม้สน ความยาวในการดูดกลืนแสงสีเหลืองอยู่ในช่วงยูวี ทำให้มีความว่องไวในการดูดกลืนแสงยูวี ประกอบกับโครงสร้างของสีเหลืองมีพันธะเชิงซ้อนโลหะระหว่างผงไม้และโครงสร้างสีที่ความไม่เสถียร ส่วนวัสดุ B-WPC มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสีน้อยสุด นั้นแสดงให้เห็นว่าสีน้ำเงินจากครามมีความเสถียรต่อแสงที่ดี

นอกเหนือจากนั้น ผลจากการศึกษาการด้านเชื้อแบคทีเรียพบว่า สีน้ำเงินจากครามมีความสามารถในการด้านเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก และ แกรมลบ ในทางตรงข้ามสีเหลืองจากแก่นขนุน และ สีแดงจากแก่นไม้ฝาง ไม่มีความสามารถในการด้านเชื้อแบคทีเรียทั้งสอง และเมื่อพิจารณานำสีธรรมชาติไปย้อมในผงไม้ แล้วไปผลิตเป็นวัสดุคอมพอสิต จากนั้นทำการศึกษาผลการด้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่า ผงไม้ที่ย้อมสีธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด รวมถึงวัสดุคอมพอสิตทุกชนิด ไม่มีความสามารถในการด้านเชื้อแบคทีเรียทั้งสอง อันเนื่องจากโมเลกุลของสีไม่สามารถแพร่ผ่านออกมาจากผงไม้ หรือ วัสดุคอมพอสิตได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ความเสถียรทางความร้อนของผงไม้ที่ผ่านการย้อมสีแดง และสีเหลืองมีความเสถียรทางความร้อนที่มากกว่า แต่กลับมีปริมาณจีเถ้าที่ต่ำกว่า ในขณะที่ผงไม้ที่ผ่านการย้อมสีน้ำเงินจากครามกลับมีความเสถียรทางความร้อนที่ต่ำ แต่มีอัตราการสลายตัว และ ปริมาณจีเถ้าอยู่มาก ดังนั้น น่าจะมีการศึกษาผลของการนำเอาสีทั้ง 3 ชนิดมาผสมกับผงไม้ ซึ่งอาจจะเพิ่มคุณสมบัติซึ่งกันและกันได้

5.2.2 ควรศึกษาสีธรรมชาติชนิดอื่นๆต่อไป เพื่อทำให้ได้เฉดสีที่หลากหลายมากขึ้น และอาจทำให้สมบัติทางความร้อน รวมถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้น

5.2.3 สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมผงไม้อยู่มีสมบัติพบว่า ความแตกต่างเมื่อเทียบระหว่างก่อนตากรังสียูวี และ หลังตากรังสียูวี มีความแตกต่างที่น้อย ดังนั้น น่าจะเอาสมบัตินี้มาใช้เป็นสารให้สีให้วัสดุคอมพอสิตได้

5.2.4 เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงสีต่อแสงยูวี สมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตของ B-WPC พบว่า มีสมบัติที่ดีมากกว่าวัสดุคอมพอสิตชนิด Y-WPC และ R-WPC น่าจะมีการศึกษาผลของสีน้ำเงินจากครามให้มากกว่านี้ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นๆได้

บรรณานุกรม

- [1] Hee-Soo Kim, and others. (2010). “Enhanced interfacial adhesion, mechanical, and thermal properties of natural flour-filled biodegradable polymer bio-composites.” **Thermal analysis and calorimetry** 11 n. pag.
- [2] Islam, M.S., Pickering K.L. and Foreman N.J. (2010). “Influence of alkali treatment on the interfacial and physico-mechanical properties of industrial hemp fibre reinforced polylactic acid composites.” **Composite Part A** 41: 596-603.
- [3] Tran Huu Num, and others. (2011). “Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites.” **Composite Part B** 42: 1648-1656.
- [4] H.-S. Kim, and others. (2005). “Thermal properties of agro-flour-filled biodegradable polymer bio-composites.” **Thermal analysis and calorimetry** 81: 299-306.
- [5] อาวีส ศิริสุขไพบูรณ์. (2552). “ความเสถียรต่อแสงแดดของวัสดุคอมพอสิต HDPE และผงไม้ ย้อมสี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิต วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [6] George, B., and others. (2005). “Photodegradation and Photostabilisation of Wood -the State of the Art.” **Polymer Degradation and Stability** 88: 268-274.
- [7] อนันต์แสวก เห่วซึ่งเจริญ และ คณะ. (2551). “โครงการการพัฒนาสีธรรมชาติสำหรับฝ้าย สี และไม้.” รายงานการวิจัยเสนอต่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. พฤษภาคม 2551.
- [8] ปกรณ์ โอภาประกาศิต. เขียนเพื่อวิชาการ.คอม. เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม 2554. เข้าถึงได้จาก <http://www.vcharkarn.com>.
- [9] สำนักหอสมุด และ ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Green products). เข้าถึง เมื่อ 14 พฤศจิกายน 2553. เข้าถึงได้จาก <http://www.siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>.
- [10] Calvin W. NEW DEVELOPMENTS IN BIODEGRADABLE NONWOVENS. เข้าถึง เมื่อ 19 พฤศจิกายน 2553. เข้าถึงได้จาก <http://www.nonwoven.co.uk/reports/Prague %202000.html>.
- [11] ปรีชา เกียรติกระจาย, ทรงกลด จารุสมบัติ, และ สุรัชย์ ศรีชินราช. (2528). **เคมีของเนื้อไม้**. ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ: บุรณพากรูป จำกัด.

- [12] เชลลูโลส. เข้าถึงเมื่อ 9 พฤษภาคม 2554. เข้าถึงได้จาก <http://www.afma.org/f-tutor/cellulose.htm>.
- [13] Rowell, R. (2005). **HANDBOOK OF WOOD CHEMISTRY AND WOOD COMPOSITES**. Florida: CRC Press.
- [14] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ. n.d. เอกสารประกอบรายวิชา บทที่ 10 เรื่องคอมโพสิต. n.p.
- [15] ปิ่นสุภา ปิติรักษสกุล. (2551). “คอมโพสิตไม้-พลาสติกวัสดุใหม่สำหรับงานก่อสร้าง.” **รวมคำแห่ง ฉบับวิศวกรรมศาสตร์** 2, 1, (พฤษภาคม): 20-25.
- [16] Myers G.E., Chahyadi C.A., Coberly and Ermer D.S. (1991). “Wood flour/PP composites: Influence of Maleated Polypropylene and Process and Composition Variables on Mechanical Properties.” **International Journal of Polymeric Materials** 15: 21-44
- [17] Sain M. M., Suhara, P., Law, S. and Bouilloux, A. (2005). “Interface Modification and Mechanical Properties of Natural Fiber-Polyolefin Composite Products.” **Journal of Reinforced Plastics and Composites** 24, 2: 121-130.
- [18] ธนดล สัตตบงกช. (2546). “ไม้ประกอบและไม้ประกอบพลาสติก ศักยภาพของป่าไม้ต่อการฟื้นฟูเศรษฐกิจไทย.” : 247-255.
- [19] ภักนัย ทองทิมพร. (2553). การมองเห็นและการวัดสี. เข้าถึงเมื่อ 30 มีนาคม 2555. เข้าถึงได้จาก http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf
- [20] พิสิษฐ์ราชมงคล. (2009). **ทฤษฎีแสง บทเรียนที่ 4.1-4.3**. เข้าถึงเมื่อ 15 มีนาคม 2555. เข้าถึงได้จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/naturemystery/colour/colour1.html>
- [21] **โครงสีคู่ตรงข้าม (Complementary Color)**. (2010). เข้าถึงเมื่อ 8 มีนาคม 2555. เข้าถึงได้จาก <http://student.nu.ac.th/nackie/Instruction/lesson14.html>.
- [22] **Complementary Color**. (2007). Access March 8 2012. Available from http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf.
- [23] HEIDELBERG. (2547). **แสงและสี**. เข้าถึงเมื่อ 28 มีนาคม 2555. เข้าถึงได้จาก http://northprinting.com/component/option,com_docman/task,doc_view/gid,9/Itemid,28.
- [24] สุภาวดี พึ่งรุ่ง. (2553). “การพัฒนาสีข้อมธรรมชาติจากพืชในท้องถิ่นเพื่อใช้ในการข้อมไม้ไผ่สำหรับงานจักสาน.” **วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขา วิทยาศาสตร์ศึกษา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์**.

- [25] เทียนศักดิ์ เมฆพรรณโอกาส และคณะ. (2543). “การศึกษาการเป็นสีของพืชบางชนิดในท้องถิ่น.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [26] วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน. (2550). **เทคโนโลยีสิ่งทอเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัทกราฟแมนเพรส จำกัด.
- [27] **Chromophores Auxochromes**. (2009). Access March 25 2012. Available from http://www.science.mju.ac.th/chemistry/.../t.../CH210-Anal_chem_UV-VIS.pdf.
- [28] ศูนย์วิชาการและเทคโนโลยีสิ่งทอพื้นบ้าน. (2009). **ฝ้ายแกมไหม**. เข้าถึงเมื่อ 15 มีนาคม 2555. เข้าถึงได้จาก http://www.ist.cmu.ac.th/cotton/naturalColor_Human.php?subnav=3.
- [29] วีรศักดิ์ อุดมเดชา. (2542). **วิทยาศาสตร์เส้นใย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ลาดพร้าวคุรุสภา.
- [30] **Caesalpinia sappan**. n.d. Access 25 November 2010. Available from <http://www.eco-planet.com/herbalextracts/Caesalpinia%20sappan.htm>.
- [31] **แก่นไม้ฝาง**. เข้าถึงเมื่อ 30 ธันวาคม 2010. เข้าถึงได้จาก <http://kobfapasuay.igetweb.com/index.php?mo=3&art=69223>
- [32] **Jackfruit**. n.d. Access 30 December 2010. Available from <http://www.mollybee.org/china/chpics49.html>.
- [33] **Natural dye making**. n.d. Access 9 May 2011. Available from <http://bluekombi.blogspot.com/2010/04/natural-dye-making.html>.
- [34] **ต้นคราม**. เข้าถึงเมื่อ 30 ธันวาคม 2553 เข้าถึงได้จาก <http://gotoknow.org/blog/k-creation/201228?page=1>.
- [35] **โครงสร้างอินดิโก**. เข้าถึงเมื่อ 30 ธันวาคม 2553. เข้าถึงได้จาก <http://pineapple-eyes.snru.ac.th/cram/index.php?q=node/206>.
- [36] กรรณิกา ชะไวริน, ปฐมาวดี อธิวงศ์ และ วรรณรวิ สิทธิวงศ์. (2552). “การพัฒนากระบวนการย้อมสีธรรมชาติในผ้าทอสุโขทัย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [37] Ndiaye D. and others. (2008). “Durability of Wood Polymer Composites: Part 1. Influence of Wood on the Photochemical Properties.” **Composites Science and Technology** 68, 13: 2779-2784.
- [38] Muasher M. and Sain M. (2005). “The efficacy of photostabilizers on the color change of wood filled plastic composites.” **Polymer degradation and stability** 91:1156-1165.

- [39] Cristea D. and Vilarem G. (2005). "Improving light fastness of natural dyed on cotton yarn." **Dyes and Pigments** 70: 238-245.
- [40] Giles CH. (1965). "The fading of colouring matters." **Applied Chemistry** 15, 5: 41-50.
- [41] Cox-Crews P. (1987). "The fading rates of some natural dyes." **Studies in Conservation** 32 (2): 65-72.
- [42] Cumming JW., Giles CH. and Mc Eachran AE. (1956) "A study of the photochemistry of dyes on proteins and other substrates." **Journal of the Society of Dyers and Colourists** 72, 3: 73-80.
- [43] Padfield T. and Landi S. (1996). "The light-fastness of the natural dyes." **Studies in Conservation II** 4: 81-96.
- [44] Gantz GM. and Sumner WG. (1957). "Stable ultraviolet light absorbers." **Textile Research Journal** 27, 2: 44-51.
- [45] Van Beek HC. and Heertjes PM. (1966). "Fading by light of organic dyes on textile and other materials." **Studies in Conservation II** 1: 23-32.
- [46] Rajni S. and others. (2005). "Antimicrobial activity of some natural dyes." **Dye and pigment** 66: 99-102.
- [47] Mari K. and others. (2001). "Antibacterial action of tryptanthrin and kaempferol, isolated from the indigo plant (*Polygonum tinctorium* Lour.), against *Helicobacter pylori*-infected Mongolian gerbils." **Gastroenterology** 36: 5-9.
- [48] Penpun W. and others. (2005). "The antioxidant activity of *Caesalpinia sappan* L. Heartwood in various ages." **Biological & Pharmaceutical Bulletin** 13, 2: 43-52.
- [49] Masud S. Huda. and others. (2008). "Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly(lactic acid) (PLA) and kenaf fibers." **Composites science and technology** 68: 424-432.
- [50] G.A. Baig. (2010) **Journal AUTEX**. 10: 21-25.
- [51] Poletto M., Pistor V., Zeni M. and Zattera A.J. (2010). "Crystalline properties and decomposition kinetics of cellulose fibers in wood pulp obtained by two pulping processes." **Polymer degradation and stability** 96: 679-685.

- [52] Sang Youn Oh, Dong Il Yoo, Younsook Shin and Gon Seo. (2005). "FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide." **Carbohydrate research** 340: 417-428
- [53] Zhenghe Xu, Qingxia Liu and Finch J.A. (1997). "Silanation and stability of 3-aminopropyl triethoxy silane on nanosized superparamagnetic particles: I Direct silanation" **Applied surface science** 120: 269-278.
- [54] K. Kim, W. Hwang, H. Jang, B. Heo, M. Suhaj, H. Leontowicz, M. Leontowicz, Z. Jastrzebski, Z. Tashma and Shela Gorinstein. (2012). "Assessment of Indigo (*Polygonum tinctorium* Ait.) water extracts' bioactive compounds, and their antioxidant and antiproliferative activities." **Food science and technology** 46: 500-510.
- [55] Gardette M., Therias S., Gardette J-L., Murariu M. and Dubois P. (2011) "Photooxidation of polylactide/calcium sulphate composites." **Polymer degradation and stability** 96: 616-623.
- [56] Masud S. Huda, Lawrence T. Drzal, Amar K. Mohanty, and Manjusri Misra, (2008). "Effect of fiber surface-treatments on the properties of laminated biocomposites from poly (lactic acid) (PLA) and kenaf fibers." **Composite science and technology** 68: 424-432.
- [57] Pamula E., Blazewicz M., Paluszkiewicz C. and Dobrzynski P. "FTIR study of degradation product of aliphatic polyesters-carbon fibres composites." **Journal of molecular structure** 596: 69-75.
- [58] Geib S M et al., (2008). "Lignin biodegradation reaction." National academic of science. PNAS 105:12932-12937.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

ก-1 การคำนวณร้อยละการดูดซึมสี (% dye absorption)

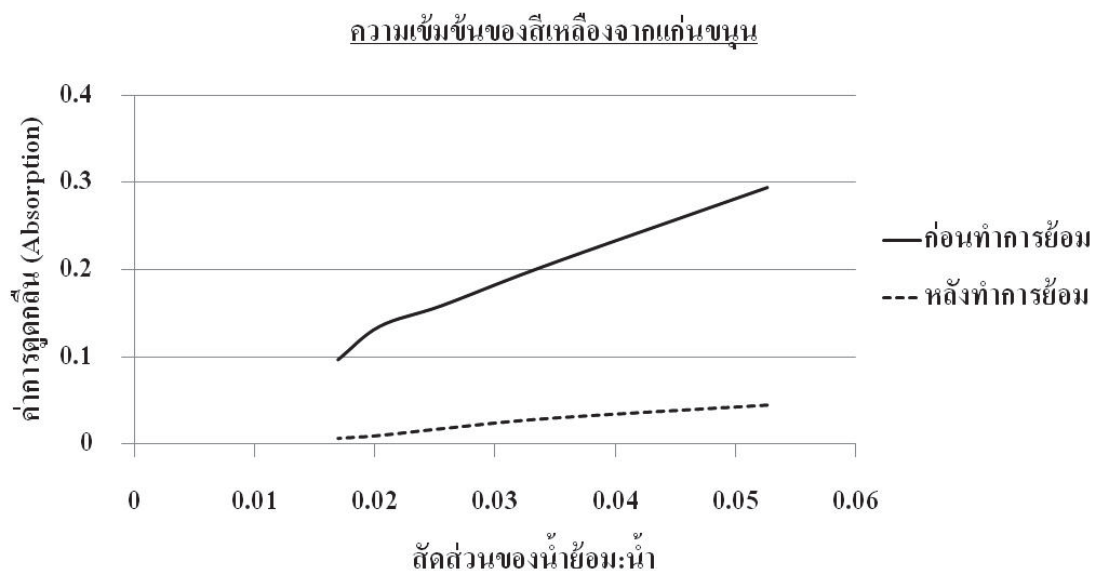
การคำนวณความเข้มข้นของน้ำย้อมจากสีธรรมชาติ เราสามารถหาได้จากเทคนิค UV-VIS spectroscopy แต่เราไม่สามารถหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนออกมาเป็นตัวเลขได้โดยตรงได้ เนื่องจากไม่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของน้ำย้อม ดังนั้น จึงทำการหาคัดส่วนของน้ำย้อมจากสีธรรมชาติ ต่อ น้ำกลั่น เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นออกมาทั้งหมด 5 ค่า ทั้งก่อนการย้อมสี และ หลังการย้อมสี แล้วทำการคำนวณร้อยละการดูดซึมสี โดยใช้สูตร

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

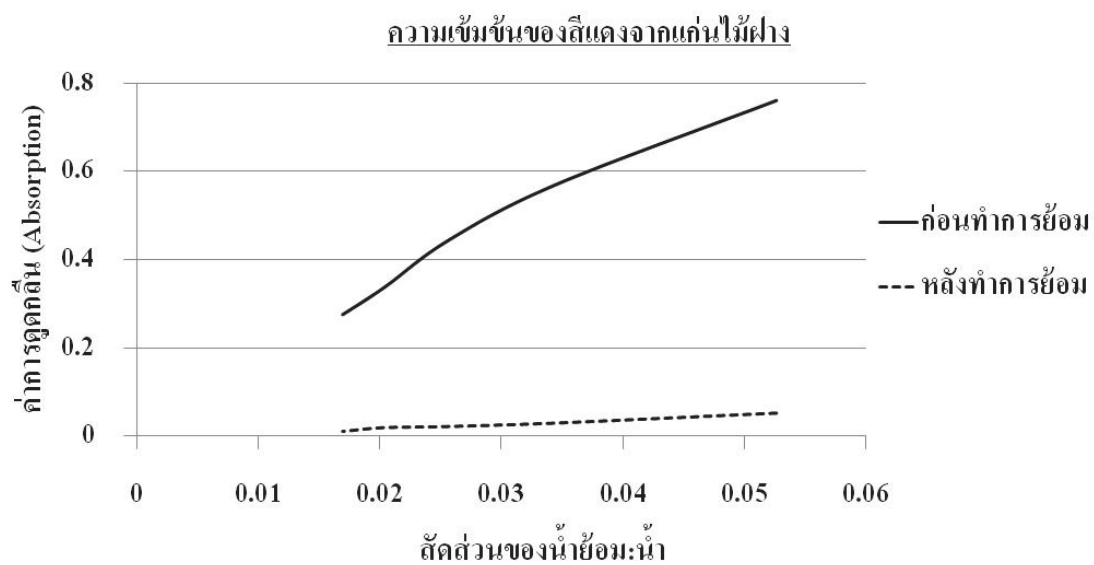
โดยที่ [a] = ความเข้มข้นของน้ำย้อมก่อนการย้อมสี

[b] = ความเข้มข้นของน้ำย้อมหลังการย้อมสี

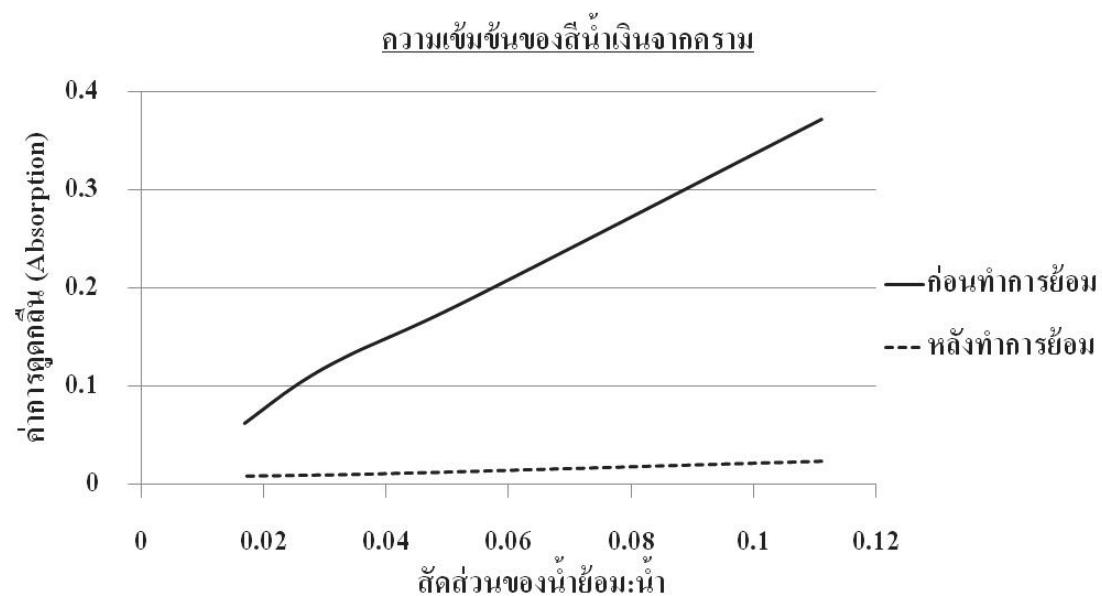
หลังจากนั้นนำความเข้มข้นของน้ำย้อมที่ได้มาสร้าง calibration curve โดยพิจารณาค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่สีแต่ละชนิดดูดกลืนได้ แล้วนำมาหา % dye absorption เปรียบดังภาพที่ 86-88



ภาพที่ 86 calibration curve ของสีเหลืองจากแก่นขนุนทั้งก่อน และ หลังย้อมสีลงในผงไม้



ภาพที่ 87 calibration curve ของสีแดงจากแก่นไม้ฝางทั้งก่อน และ หลังย้อมสีลงในผงไม้



ภาพที่ 88 calibration curve ของสีน้ำเงินจากครามทั้งก่อน และ หลังย้อมสีลงในผงไม้

ก-2 การคำนวณ ค่าร้อยละการดูดซึม เป็นไปตามตารางที่ 4-6

ตารางที่ 8 ค่าการดูดกลืนรังสี UV-VIS ก่อนและหลังการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน เพื่อคำนวณ ร้อยละการดูดซึม

สัดส่วนของน้ำย้อม:น้ำ	ค่า Abs ก่อนการย้อม	ค่า Abs หลังการย้อม	% Dye absorption
0.0526	0.29	0.04	84.77
0.0345	0.21	0.03	85.68
0.0256	0.16	0.02	88.82
0.0204	0.14	0.01	92.59
0.0169	0.10	0.01	93.18
ค่าเฉลี่ยหลังการย้อม			89.01

ตารางที่ 9 ค่าการดูดกลืนรังสี UV-VIS ก่อนและหลังการย้อมสีแดงจากแก่นไม้ฝาง เพื่อคำนวณร้อยละการดูดซึม

สัดส่วนของน้ำย้อม:น้ำ	ค่า Abs ก่อนการย้อม	ค่า Abs หลังการย้อม	% Dye absorption
0.0526	0.761	0.052	93.113
0.0345	0.570	0.030	94.755
0.0256	0.444	0.022	95.042
0.0204	0.338	0.020	94.226
0.0169	0.276	0.011	96.007
ค่าเฉลี่ยหลังการย้อม			94.628

ตารางที่ 10 ค่าการดูดกลืนรังสี UV-VIS ก่อนและหลังการย้อมสีน้ำเงินจากคราม เพื่อคำนวณร้อยละการดูดซึม

สัดส่วนของน้ำย้อม:น้ำ	ค่า Abs ก่อนการย้อม	ค่า Abs หลังการย้อม	% Dye absorption
0.1111	0.37	0.02	93.78
0.0526	0.18	0.01	93.24
0.0345	0.13	0.01	92.77
0.0256	0.10	0.01	91.45
0.0169	0.06	0.01	87.22
ค่าเฉลี่ยหลังการย้อม			91.69

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการดูดซึมสี เช่นการย้อมสีเหลืองจากแก่นขนุน ที่สัดส่วนของน้ำย้อม:น้ำ

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงก่อนย้อมสี} = 0.29$$

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสงหลังการย้อมสี} = 0.04$$

$$\text{ร้อยละการดูดซึมสี} = (0.29-0.04)/0.29 = 84.77$$

ก-3 การคำนวณความเข้ม peak ตำแหน่ง $I_{1436} / I_{900} \times 100$ เพื่อพิจารณาดำแหน่งของหมู่ลิกนิน
เทียบกับพันธะเบต้า-ไกลซิดิก เป็นไปตามตารางที่ 10

ตารางที่ 11 ความเข้มข้นของตำแหน่งหมู่ลิกนินในโครงสร้างของผงไม้แต่ละชนิด

ชนิดของผงไม้	ความเข้มของพีคตำแหน่ง 1430 cm^{-1}	ความเข้มของพีคตำแหน่ง 900 cm^{-1}	ร้อยละ %
pine wood	0.587413	0.824485	71.24605
alkali-treated pine wood	0.376993	0.855103	44.08744
yellow color from jackfruit tree	0.280045	0.795203	35.21679
red color from sappan wood	0.436891	0.871439	50.13443
blue color from indigo blue	0.359068	0.579846	61.92472

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละความเข้มของลิกนิน เช่น ในผงไม้สน

$$\text{ความเข้มพีคตำแหน่ง } 1430 \text{ cm}^{-1} = 0.587413$$

$$\text{ความเข้มพีคตำแหน่ง } 900 \text{ cm}^{-1} = 0.824485$$

$$\text{ร้อยละ \%} = (0.587413/0.824485) \times 100 = 71.24605 \%$$

ก-4 การคำนวณ % crystallinity ของวัสดุคอมพอสิตแต่ละชนิด

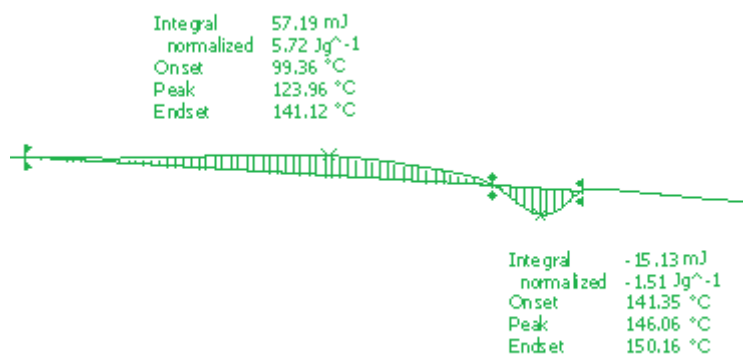
$$\% \text{ crystallinity} = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times \frac{100}{w}$$

โดยที่ ΔH_m = heat of melting (J/g)

ΔH_m^0 = heat of melting for 100% crystalline PLA sample ($\Delta H_m^0 = 93 \text{ J/g}$)

W = weight fraction of PLA in the sample

ซึ่งการคำนวณทุกครั้ง จะมีการกำจัดประวัติทางความร้อน โดยที่มีการ heat ครั้งที่ 1 หลังจากนั้นผ่านการ cool และ ผ่านการ heat ครั้งที่ 2 แล้วพิจารณาดำแหน่ง peak ได้กราฟ ดังแสดงในภาพ 89



ภาพที่ 89 ผลจากการ heat ครั้งที่ 2 ของ PLA บริสุทธิ์ตำแหน่งการเกิดผลึก

จากภาพ เราจะพบว่า PLA บริสุทธิ์ จะเกิดพีคการเกิด cold crystallization ซึ่งมีค่า ΔH_c เท่ากับ 5.72 J/g แต่ค่า ΔH_m มีค่าเท่ากับ -1.51 J/g ดังนั้น การคำนวณจะเอาเฉพาะส่วนที่เป็นพีค ΔH_m เท่านั้นในการคำนวณ

จะได้ % crystallinity ของ PLA บริสุทธิ์ ($w=1$) มีค่าเท่ากับ $(1.51/93) \times (1/1) = 1.62\%$

ก-5 การเปลี่ยนแปลงค่าของสี่โดยรวมในวัสดุ (ΔE)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

ตารางที่ 12 ตัวอย่างการคำนวณค่า L^* , a^* และ b^* ของ PLA ก่อน และ หลังการตากแสงเป็นเวลา 5 วัน

ระยะเวลา	L^*	a^*	b^*
ก่อนการตากแสง	74.45238095	1.995238095	1.60952381
5 วัน	74.44761905	1.976190476	1.50952381
ผลต่าง	0.0047619	0.019047619	0.1
(ผลต่าง) ²	2.2675×10^{-5}	3.628×10^{-4}	0.01

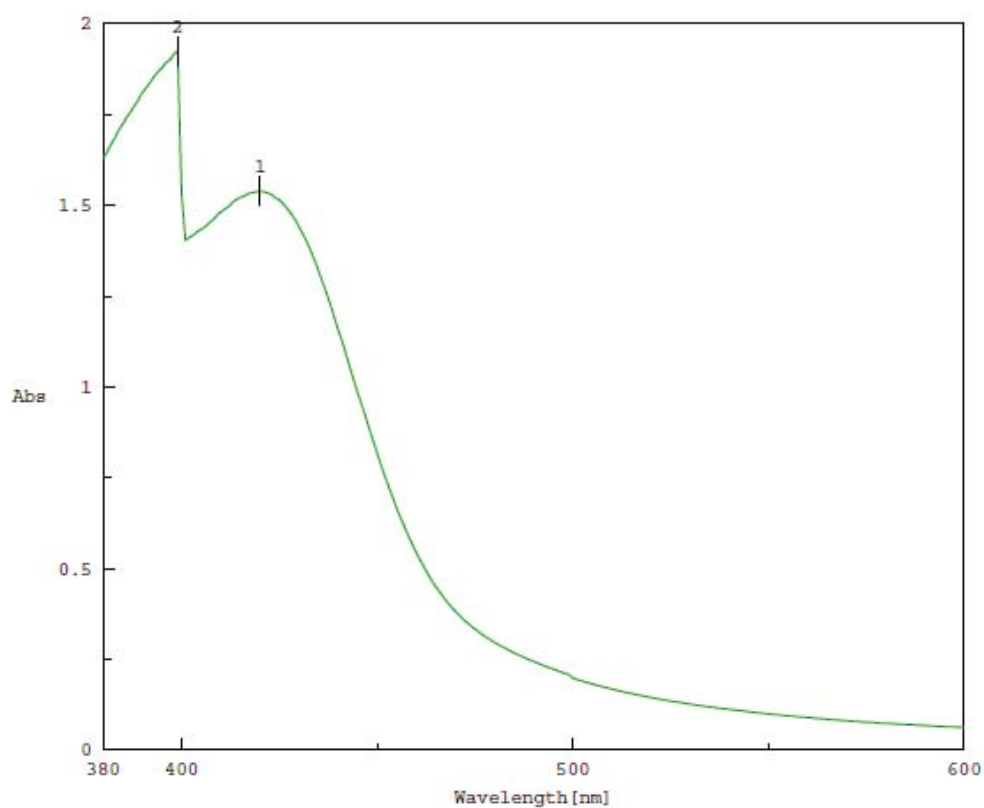
แทนค่า ในสูตรจะได้

$$\Delta E = [(2.2675 \times 10^{-5}) + (3.628 \times 10^{-4}) + (0.01)]^{1/2} = 0.10928$$

ภาคผนวก ข
ข้อมูลดิบที่ได้จากงานวิจัย

ข้อมูลและผลการทดสอบวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิคต่างๆ

ข-1 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่สีแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนได้

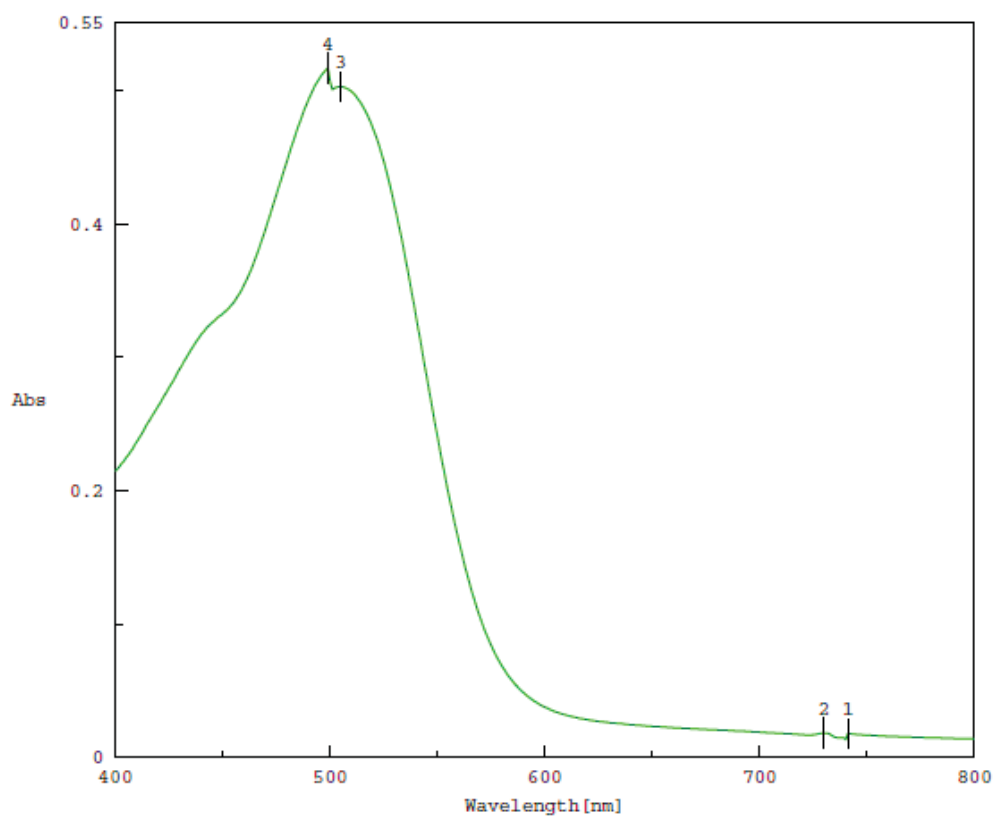


Date 3/8/11 16:13
 File name ABSCU001.jws
 Model V-530
 Serial No. B92260512
 Band width 2.0 nm
 Response Fast
 Measurement range 600 - 380 nm
 Data pitch 1nm
 Scanning speed 100nm/min
 Sample ID 1
 No. of cycle 1

 Sample name
 Operator
 Comment

1: 420.00, 1.5401 2: 399.00, 1.9257

ภาพที่ 90 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีเหลืองจากแก่นขนุน

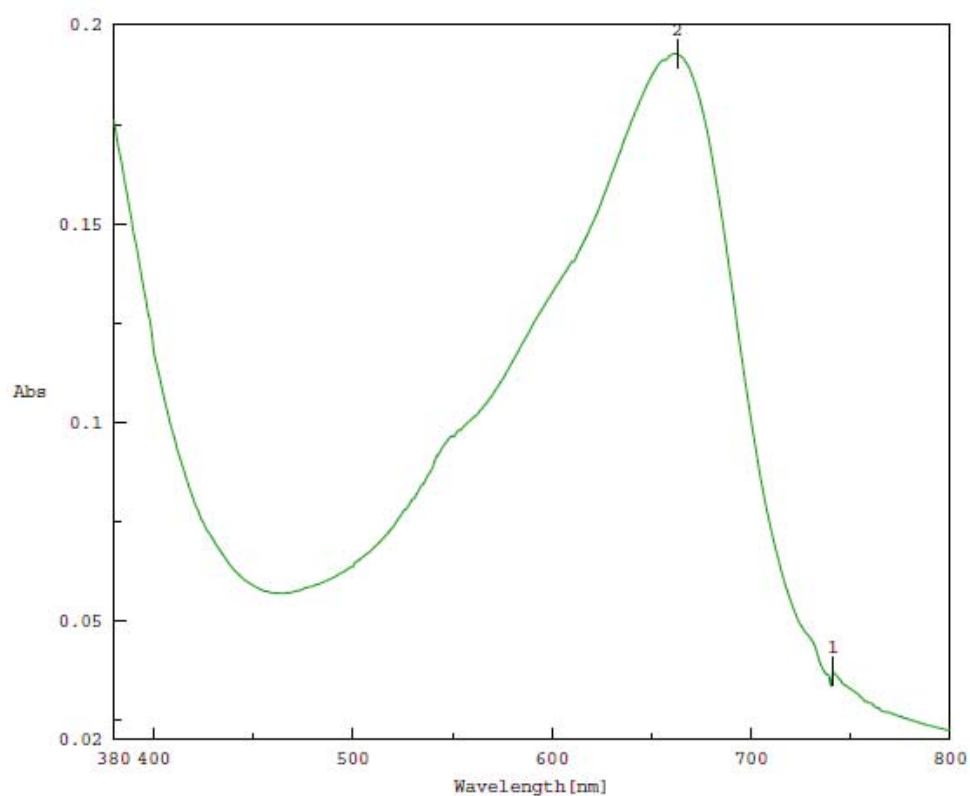


Date 3/8/11 15:48
 File name ABSCU002.jws
 Model V-530
 Serial No. B92260512
 Band width 2.0 nm
 Response Fast
 Measurement range 800 - 400 nm
 Data pitch 1nm
 Scanning speed 100nm/min
 Sample ID 2
 No. of cycle 1

Sample name
 Operator
 Comment

1: 741.00, 0.0184 2: 730.00, 0.0187 3: 505.00, 0.5027
 4: 499.00, 0.5167

ภาพที่ 91 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีแดงจากไม้ฝาง



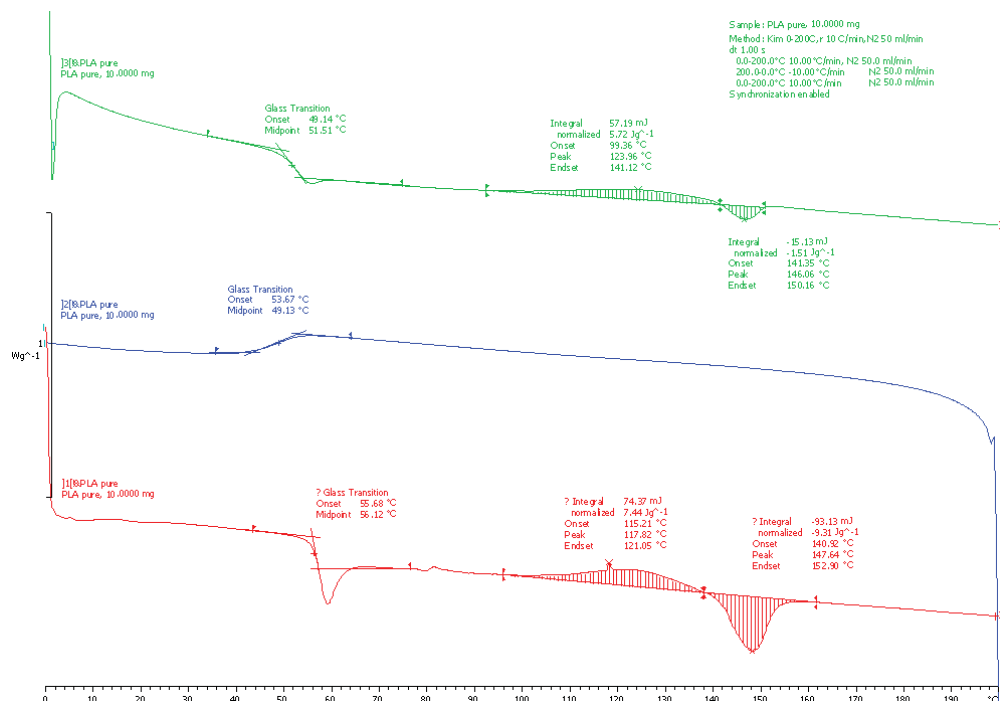
Date 24/8/11 17:14
 File name ABSCU001.jws
 Model V-530
 Serial No. B92260512
 Band width 2.0 nm
 Response Fast
 Measurement range 800 - 380 nm
 Data pitch 1nm
 Scanning speed 200nm/min
 Sample ID 1
 No. of cycle 1

 Sample name
 Operator
 Comment

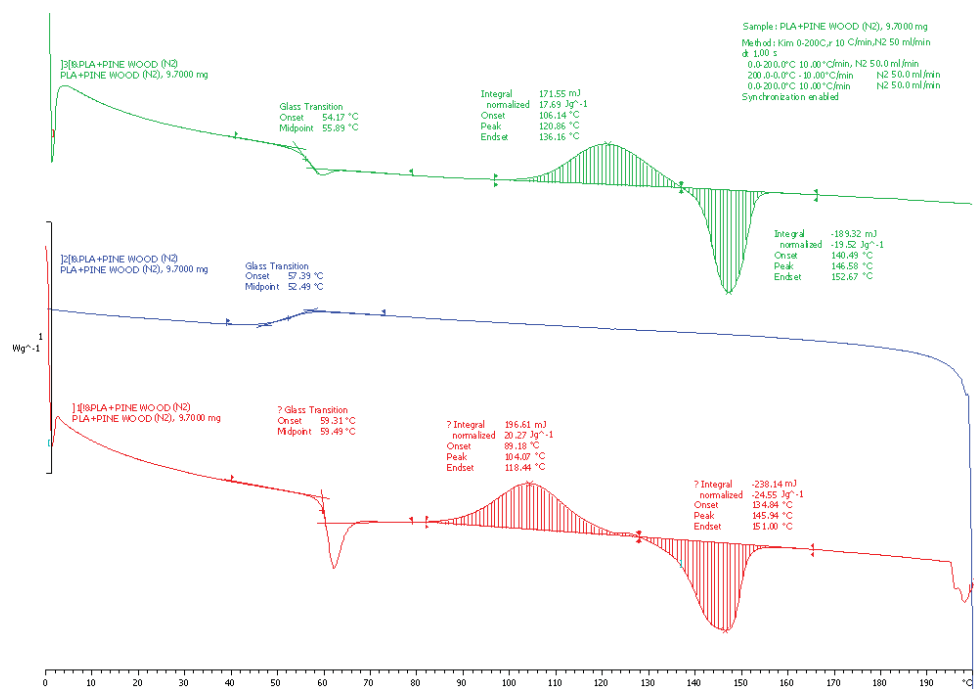
1: 741.00, 0.0374 2: 663.00, 0.1928

ภาพที่ 92 ค่าความยาวคลื่นสูงสุดของสีน้ำเงินจากคราม

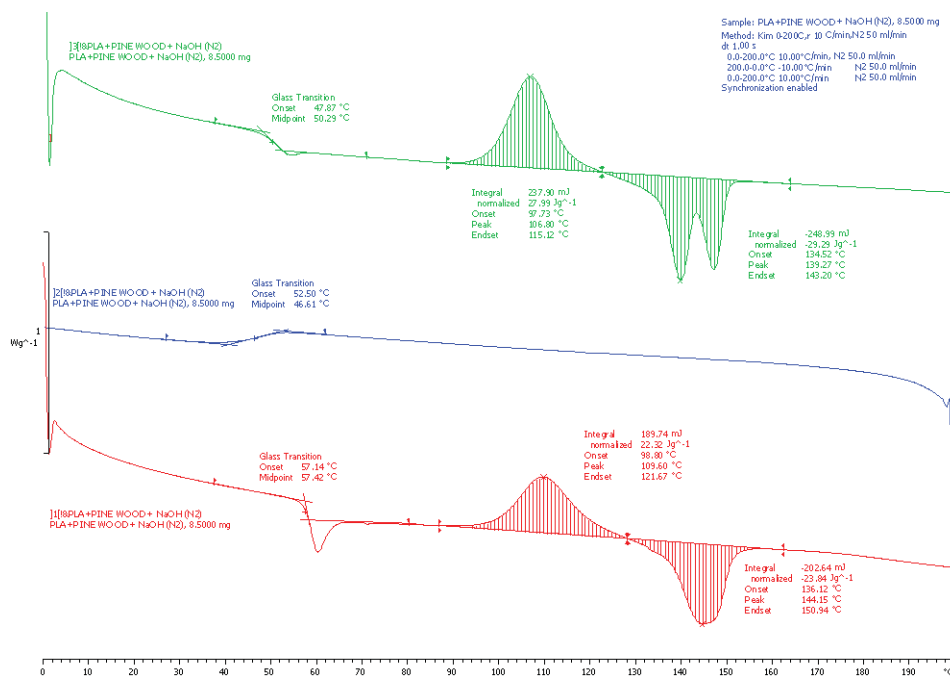
ข-2 ผลจากการทดสอบ DSC



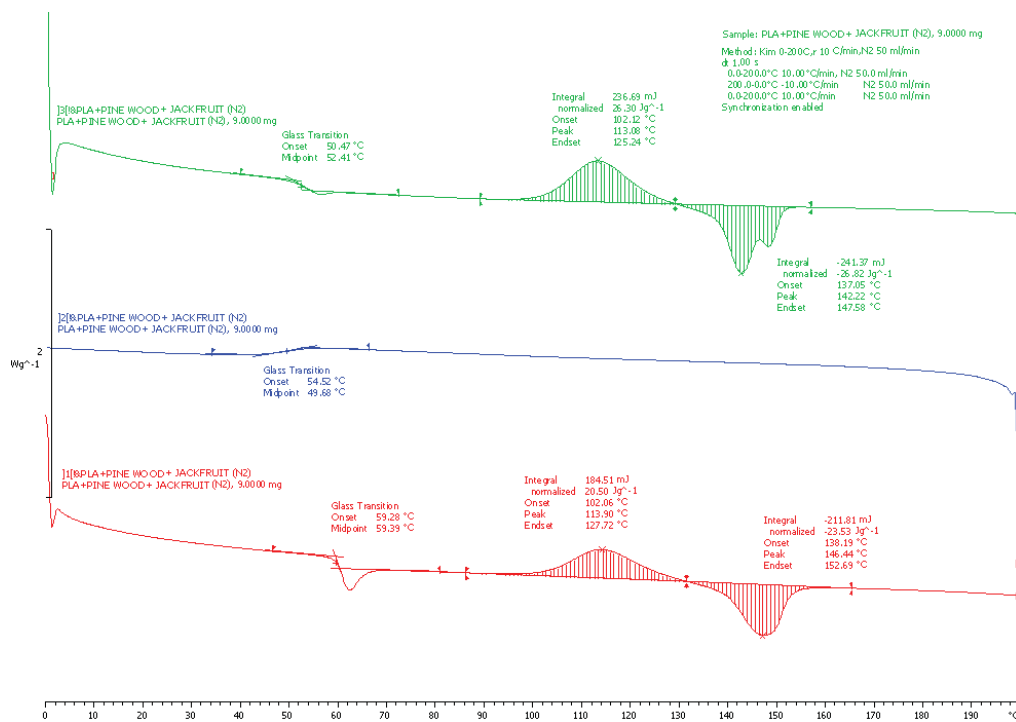
ภาพที่ 93 ผลการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ ก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



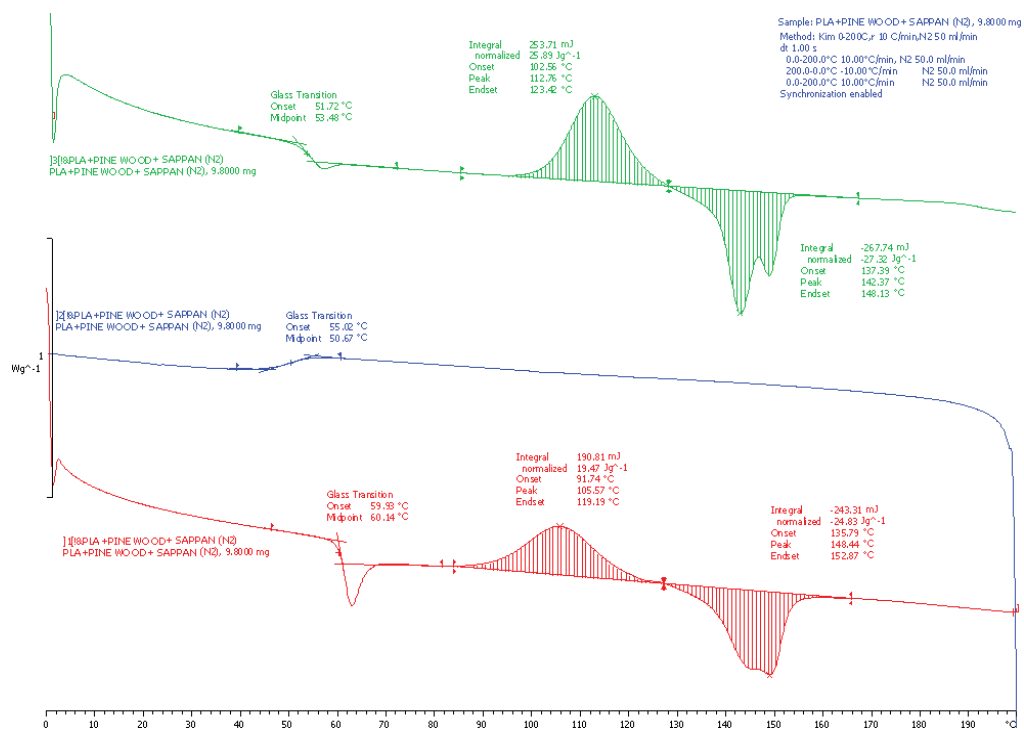
ภาพที่ 94 ผลการทดสอบ DSC ของ W-WPC ก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



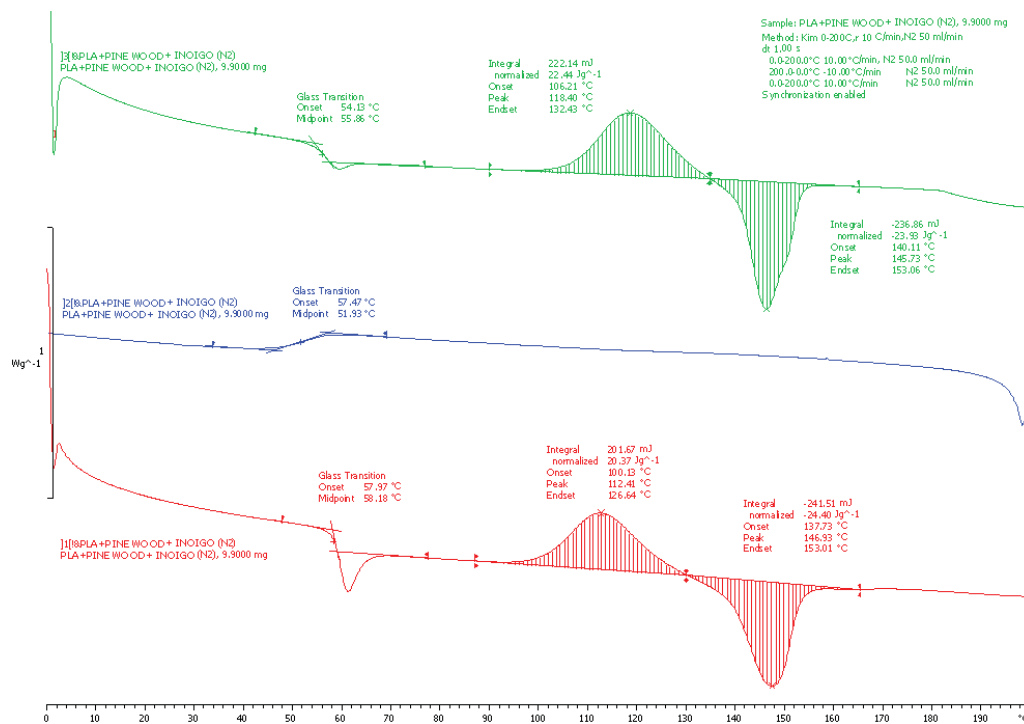
ภาพที่ 95 ผลการทดสอบ DSC ของ AL-WPC ก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 96 ผลการทดสอบ DSC ของ Y-WPC ก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 97 ผลการทดสอบ DSC ของ R-WPC ก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 98 ผลการทดสอบ DSC ของ B-WPC ก่อนการตากจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

ข-3 ผลการทดสอบ DSC หลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวีเป็นเวลา 3 เดือน

ตารางที่ 13 ผลของ DSC ในวัสดุ PLA ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก X _c (%)
ก่อนการตากแดด	51.51	123.96	146.06	1.51	1.623655914
1 เดือน	52	124.74	146.38	1.56	1.677419355
2 เดือน	51.79	124.85	145.97	1.95	2.096774194
3 เดือน	51.4	122.63	145.22	1.83	1.967741935

ตารางที่ 14 ผลของ DSC ในวัสดุ W-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก X _c (%)
ก่อนการตากแดด	55.89	120.86	146.58	19.52	26.23655914
1 เดือน	53.7	114.35	144.76	26.17	35.17473118
2 เดือน	54.3	117.18	143.76	21.83	29.34139785
3 เดือน	55.11	115.05	143.78	20.81	27.97043011

ตารางที่ 15 ผลของ DSC ในวัสดุ AL-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก X _c (%)
ก่อนการตากแดด	50.29	106.8	139.27	29.29	39.36827957
1 เดือน	48.95	103.7	145.84	30.58	41.10215054
2 เดือน	53.57	112.08	142.18	25.61	34.42204301
3 เดือน	53.79	112.43	141.93	25.67	34.50268817

ตารางที่ 16 ผลของ DSC ในวัสดุ Y-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก X _c (%)
ก่อนการตากแดด	53.37	111.87	142.57	25.59	34.39516129
1 เดือน	52.41	113.08	142.22	26.82	36.0483871
2 เดือน	52.1	106.59	139.63	21.59	29.0188172
3 เดือน	53.63	111.65	141.76	22.06	29.65053763

ตารางที่ 17 ผลของ DSC ในวัสดุ R-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก X _c (%)
ก่อนการตากแดด	53.48	112.76	148.13	27.32	36.72043011
1 เดือน	52.53	109.21	148.87	29.16	39.19354839
2 เดือน	55.77	121.31	146.43	19.07	25.63172043
3 เดือน	54.1	118.21	144.07	22.09	29.69086022

ตารางที่ 18 ผลของ DSC ในวัสดุ B-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

sample	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	ปริมาณความเป็นผลึก X _c (%)
ก่อนการตากแดด	55.86	118.4	145.73	23.93	32.16397849
1 เดือน	51.43	105.43	147.2	29.27	39.34139785
2 เดือน	50.73	101.66	145.5	23.88	32.09677419
3 เดือน	53.88	112.77	141.99	25.06	33.6827957

ข-4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 19 ค่าเฉลี่ย และ SD ของ modulus ในวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิต

Modulus (MPa)	ก่อนการตากแสง	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
PLA	2064.343474	1990.63405	2043.1989	2149.926494
SD	41.28370206	12.3399445	34.126557	30.965489
W-WPC	2592.657074	2229.46908	2512.9724	2632.836496
SD	52.92922934	42.345678	51.53464	173.7355233
AL-WPC	2664.146268	2220.46069	2345.2732	2511.134826
SD	60.01405546	93.1753489	87.120603	84.87555736
Y-WPC	2677.755534	2340.01288	2423.4334	2737.335256
SD	51.4476006	63.7437603	120.025478	155.9120653
R-WPC	2461.887428	2188.42314	2338.8349	2541.38962
SD	22.65161467	40.5092664	44.940866	98.12529843
B-WPC	2501.595964	2258.87973	2430.0533	2483.206568
SD	29.16643887	48.3049828	29.2484	71.92149951

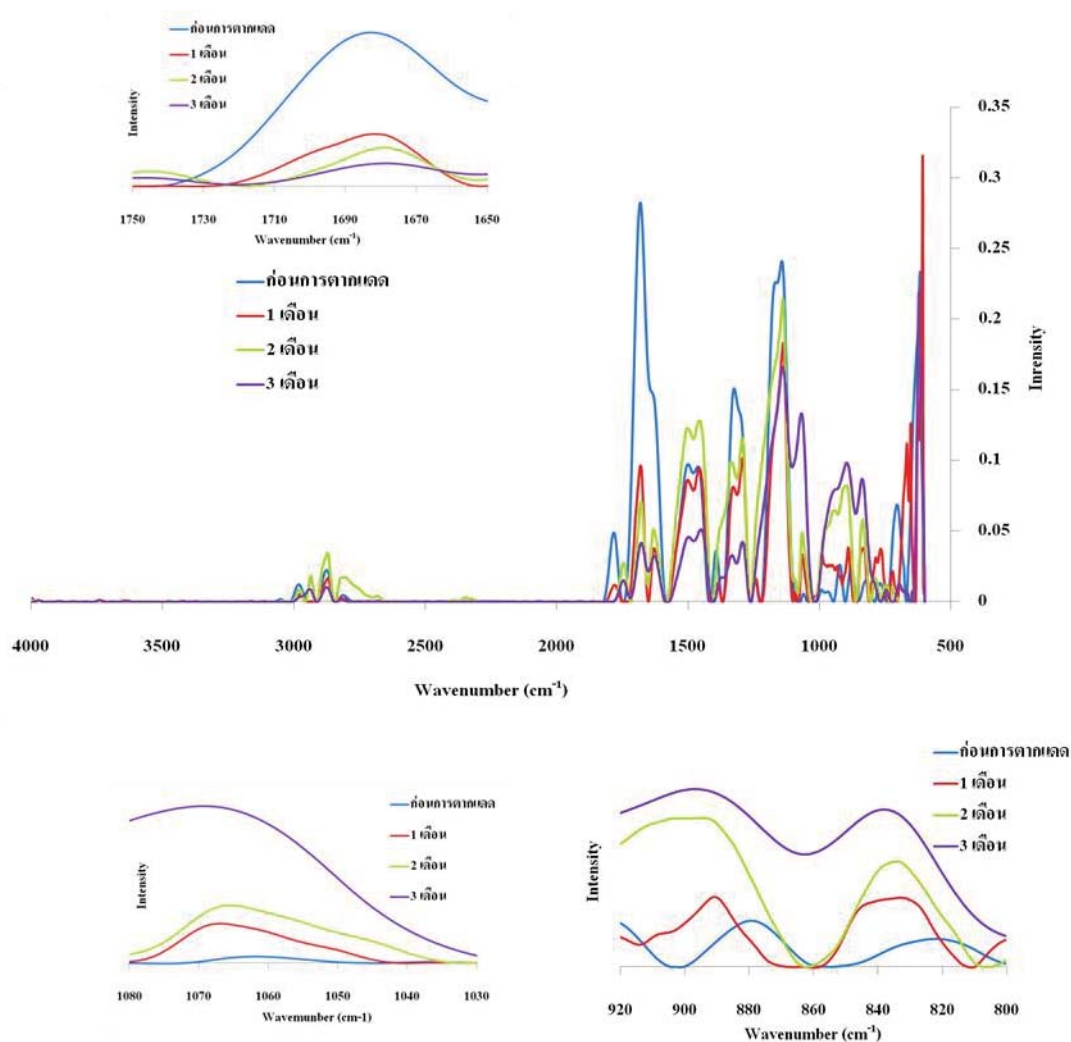
ตารางที่ 20 ค่าเฉลี่ย และ SD ของ tensile strength ในวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิต

Tensile strength (MPa)	ก่อนการตากแสง	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
PLA	49.76	46.26	44.78	44.02
SD	0.67	1.1148991	0.6870226	0.736206493
W-WPC	51.96	50.92	50.6	49.74
SD	0.650384502	0.16431677	0.6964194	0.427784993
AL-WPC	50.58	49.06	49.02	48
SD	0.554075807	0.23021729	0.1923538	0.583095189
Y-WPC	49.48	48.96	48.76	47.6
SD	0.580517011	0.29664794	0.7021396	0.913783344
R-WPC	50.24	48.48	49	47.54
SD	0.240831892	0.54037024	0.5567764	0.531977443
B-WPC	51.26	48.78	49.26	47.6
SD	0.250998008	0.53572381	0.4560702	0.768114575

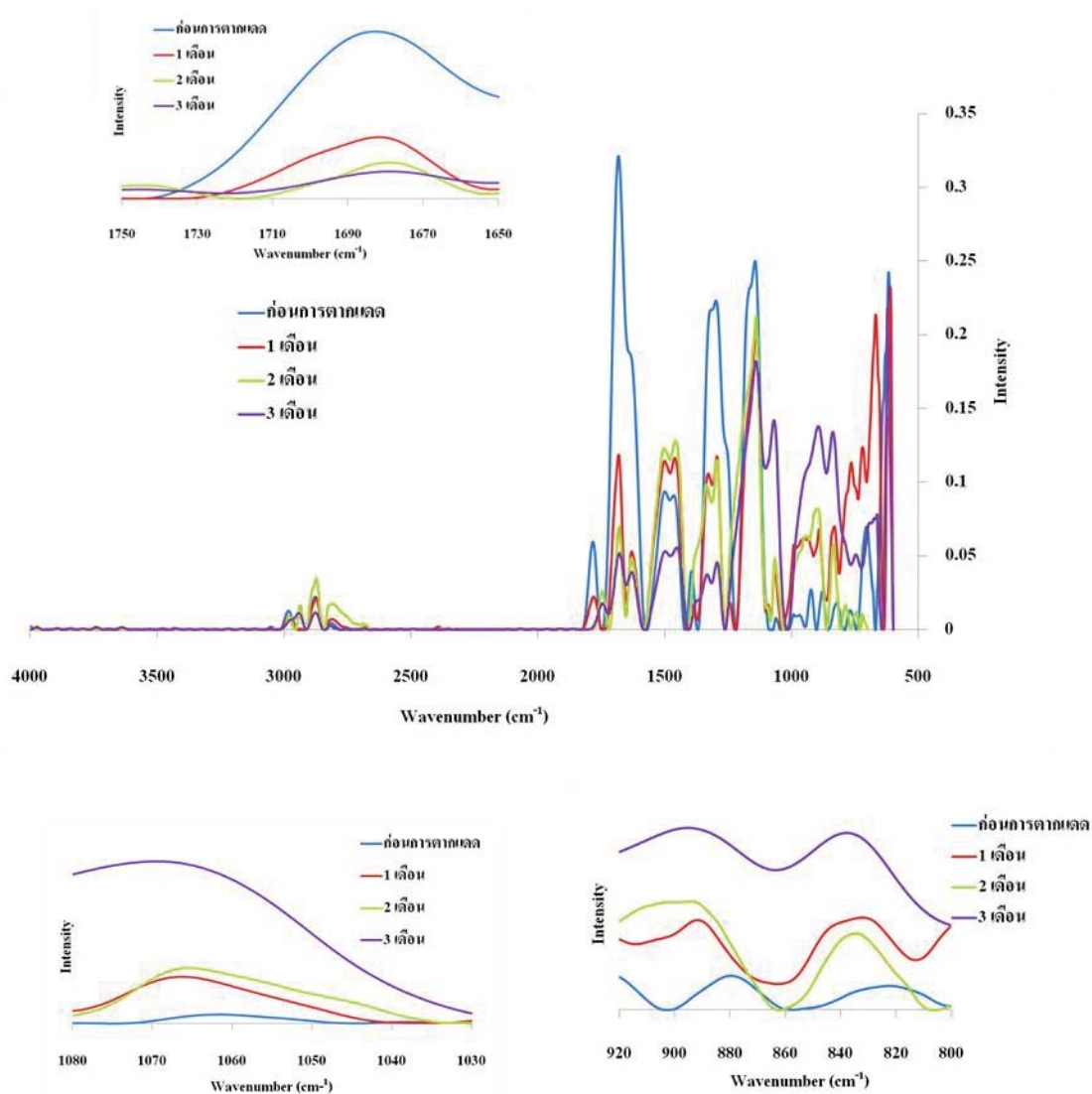
ตารางที่ 21 ค่าเฉลี่ย และ SD ของ % elongation ในวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิต

% Elongation	ก่อนการตากแสง	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
PLA	4.02	6.198	6.566	5.404
SD	0.932791509	0.78906274	1.1896344	0.549890898
W-WPC	2.486	3.106	2.844	2.722
SD	0.11326959	0.08677557	0.1073778	0.092303846
AL-WPC	2.422	2.878	2.49	2.584
SD	0.206082508	0.06685806	0.1124722	0.166222742
Y-WPC	2.222	2.882	2.762	2.562
SD	0.131415372	0.06760178	0.0363318	0.134610549
R-WPC	2.492	3.196	2.83	2.532
SD	0.069065187	0.14741099	0.1072381	0.061400326
B-WPC	2.872	3.246	2.83	2.64
SD	0.072594766	0.09633276	0.1202082	0.356580987

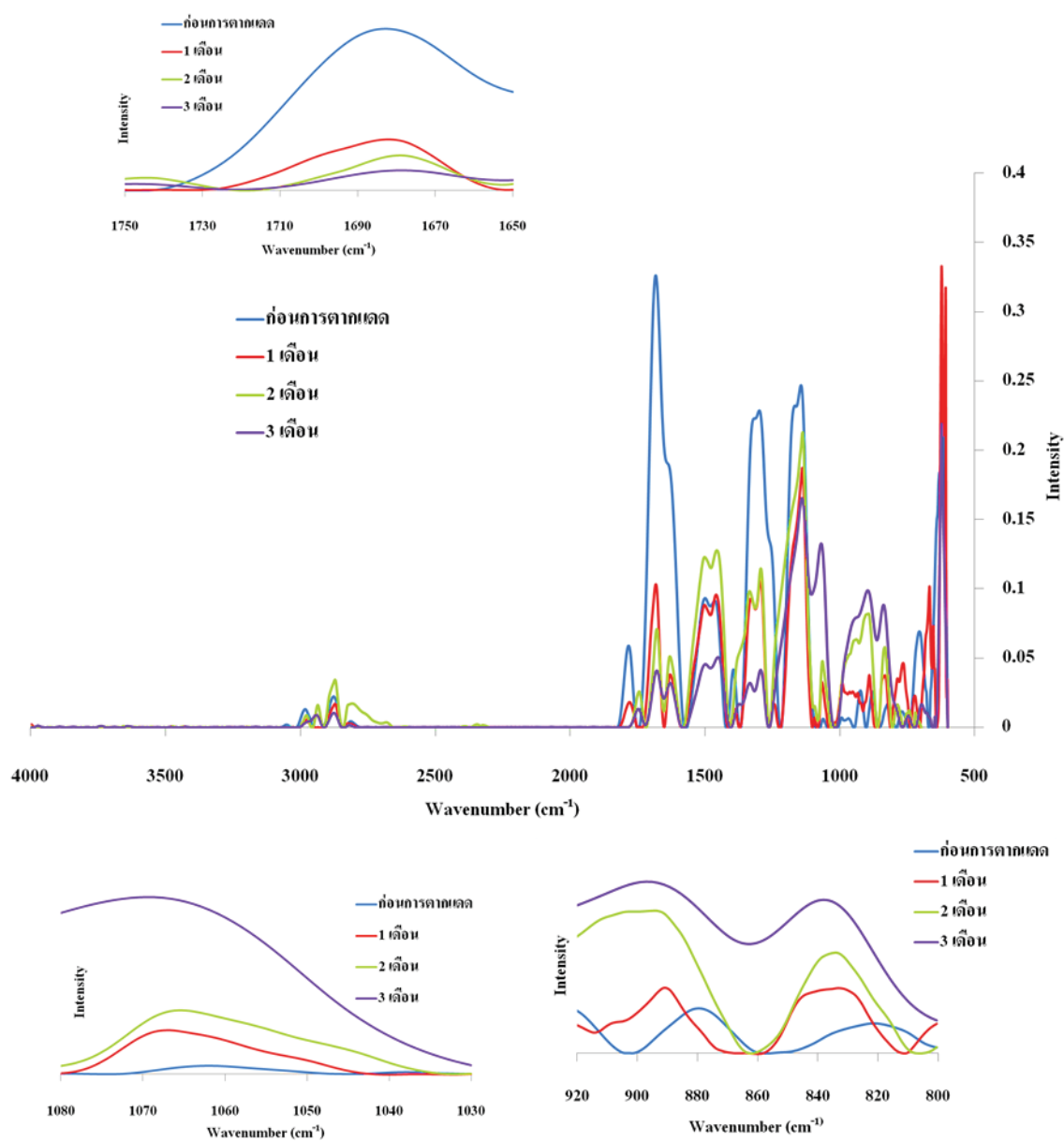
ข-5 ผลของการทดสอบ FTIR ของวัสดุคอมพอสิตก่อน และ หลังการตากแสงในกล่องรังสียูวี



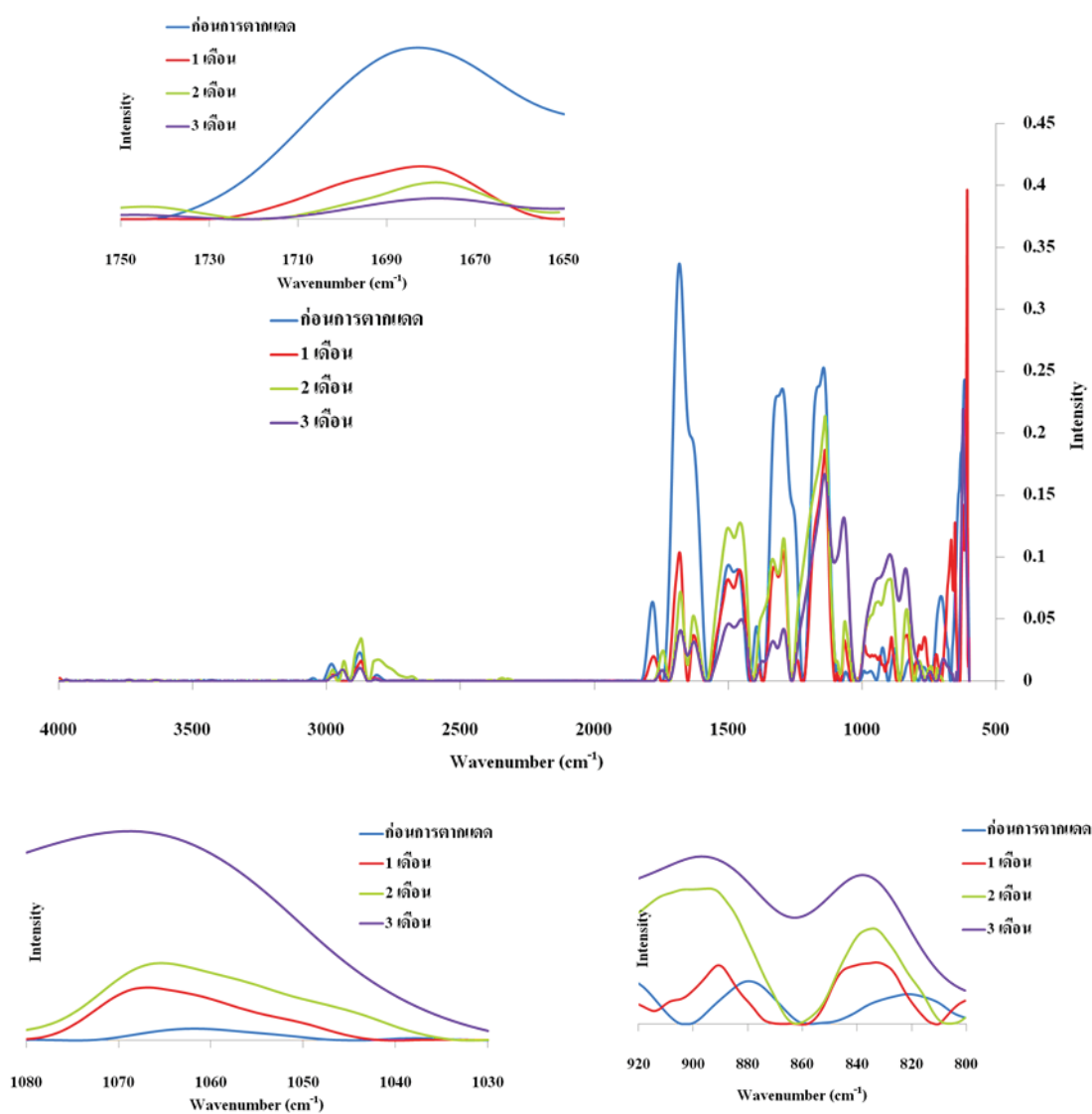
ภาพที่ 99 FTIR spectra ของ AL-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 100 FTIR spectra ของ Y-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 101 FTIR spectra ของ R-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี



ภาพที่ 102 FTIR spectra ของ B-WPC ก่อนและหลังการจำลองการตากแสงในกล่องรังสียูวี

**ข-6 ผลของค่า L^* , b^* และ ΔE ของวัสดุ PLA และ วัสดุคอมพอสิตที่ผ่านการตากแสงใน
กล่องรังสียูวีเป็นระยะเวลา 3 เดือน**

ตารางที่ 22 ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ PLA

ระยะเวลาในการตากกล่องแสง (วัน)	L^*	b^*	ΔE
5	74.45238	1.609524	1.651847
10	74.44762	1.509524	1.712967
15	74.83333	1.833333	1.713786
20	74.35714	1.766667	1.715756
25	74.64762	1.766667	1.720745
30	74.52381	1.680952	1.729163
35	74.72381	1.938095	1.754333
40	74.91429	1.633333	1.825418
45	74.8381	1.77619	1.848988
50	74.91429	1.638095	2.018548
55	74.2619	2.680952	2.083302
60	75.07143	1.728571	2.140621
65	74.92381	2.033333	2.160384
70	74.9619	1.809524	2.175856
75	74.9	2.12381	2.324152
80	74.49048	2.519048	2.402007
85	74.5381	2.504762	2.453885
90	74.69524	2.633333	2.489415

ตารางที่ 23 ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ W-WPC

ระยะเวลาในการตากกึ่งแสง (วัน)	L^*	b^*	ΔE
5	41.20952	8.957143	0.969135
10	41.96667	9.57619	0.978184
15	42.00952	9.904762	1.199413
20	42.36667	10.05238	1.430825
25	42.58571	10.49048	1.773393
30	43.01905	10.85238	2.263026
35	43.19048	11.1619	2.610489
40	43.38095	11.34286	2.835471
45	43.28571	11.49048	2.897322
50	43.4381	11.59524	3.044437
55	43.48095	11.69048	3.187753
60	43.65238	11.84762	3.434242
65	43.74762	11.89524	3.575568
70	43.81429	11.97619	3.65913
75	43.89524	12.01429	3.77343
80	44.04762	11.98571	3.884628
85	44.12857	12.15238	4.034671
90	44.27143	12.28095	4.284001

ตารางที่ 24 ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ AL-WPC

ระยะเวลาในการตากกึ่งแสง (วัน)	L^*	b^*	ΔE
5	38.83333	6.128571	0.831224
10	39.14286	6.595238	1.012972
15	39.17143	6.904762	1.295183
20	39.43333	7.014286	1.170928
25	39.51905	7.314286	1.450246
30	39.86667	7.585714	1.609466
35	39.95238	7.952381	2.020076
40	40.1	8.061905	2.178422
45	40.16667	8.17619	2.293625
50	40.06667	8.095238	2.263769
55	40.21905	8.285714	2.479527
60	40.32857	8.504762	2.833043
65	40.52381	8.457143	2.80853
70	40.61905	8.595238	2.99567
75	40.75238	8.604762	3.076191
80	40.92857	8.609524	3.215908
85	41.01429	8.747619	3.428058
90	41.08571	8.847619	3.555489

ตารางที่ 25 ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ Y-WPC

ระยะเวลาในการตากกึ่งแสง (วัน)	L^*	b^*	ΔE
5	33.64762	5	0.309946
10	33.9381	5.514286	1.058108
15	34.04762	5.885714	1.519956
20	34.22381	5.914286	1.542416
25	34.31905	6.214286	1.86562
30	34.72381	6.528571	2.209458
35	34.91905	6.72381	2.460943
40	35.06667	6.890476	2.698644
45	35.15238	7.057143	2.900194
50	35.0619	7.033333	2.903914
55	35.27619	7.138095	3.106725
60	35.41429	7.27619	3.333134
65	35.53333	7.309524	3.403817
70	35.68095	7.409524	3.59535
75	35.80476	7.371429	3.631255
80	36.00476	7.385714	3.809101
85	36.11429	7.485714	3.951103
90	36.2381	7.595238	4.146904

ตารางที่ 26 ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ R-WPC

ระยะเวลาในการตากกึ่งแสง (วัน)	L^*	b^*	ΔE
5	32.61905	2.295238	0.295983
10	32.74762	2.514286	0.266329
15	32.89048	2.766667	0.472571
20	32.74286	2.842857	0.739688
25	33.07143	2.971429	0.717064
30	33.30476	3.309524	1.112372
35	33.48095	3.395238	1.248254
40	33.49524	3.457143	1.308401
45	33.63333	3.666667	1.588848
50	33.58571	3.538095	1.459906
55	33.7381	3.7	1.687619
60	33.81905	3.861905	1.928764
65	34	3.857143	1.989042
70	34.02857	3.928571	2.083752
75	34.21429	3.957143	2.221209
80	34.39524	3.990476	2.407432
85	34.5	4.071429	2.537045
90	34.5619	4.080952	2.589089

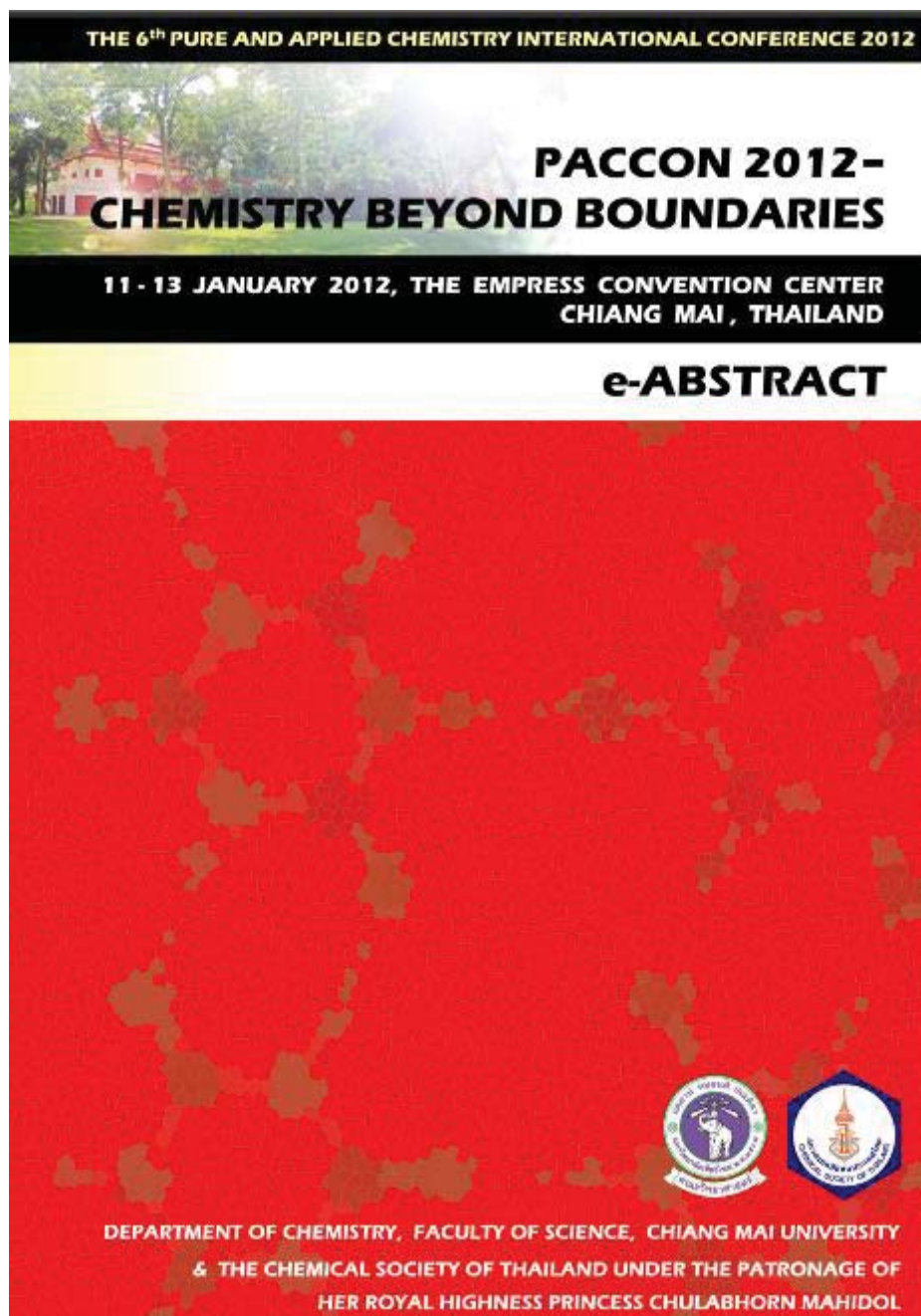
ตารางที่ 27 ค่า L^* , b^* และค่า ΔE ของ B-WPC

ระยะเวลาในการตากกึ่งแสง (วัน)	L^*	b^*	ΔE
5	33.00476	2.171429	0.481545
10	32.60952	1.861905	0.524528
15	33.1	2.404762	0.536712
20	32.82857	2.033333	0.562392
25	32.85714	2.304762	0.712438
30	33.32381	2.67619	0.798682
35	33.49524	2.895238	1.021066
40	33.52381	2.92381	1.064573
45	33.6381	3.104762	1.267549
50	33.56667	3.047619	1.195455
55	33.73333	3.185714	1.418621
60	33.85714	3.333333	1.642724
65	33.93333	3.333333	1.665097
70	34.05238	3.447619	1.838616
75	34.23333	3.466667	1.98128
80	34.41905	3.495238	2.189455
85	34.48571	3.62381	2.29816
90	34.68095	3.604762	2.425494

ภาคผนวก ค
การนำเสนองานวิจัย

การนำเสนองานประชุมวิชาการนานาชาติ PACCON 2012-CHEMISTRY BEYOND
BOUNDARIES ระหว่างวันที่ 11-13 มกราคม พ.ศ.2555

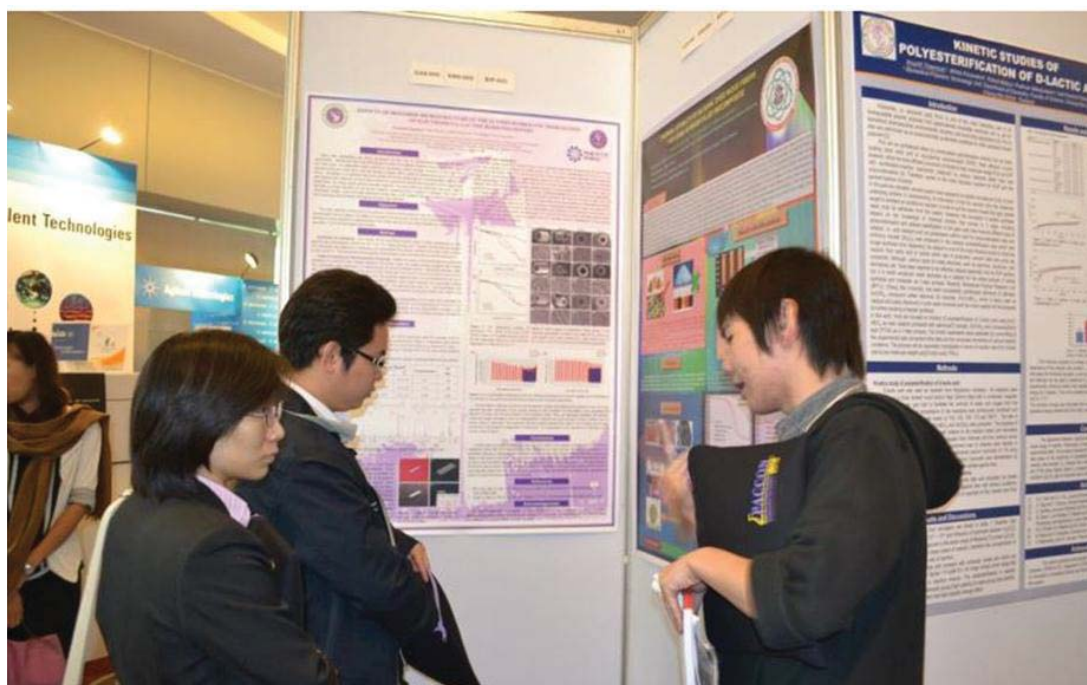
หนังสือบันทึกรายงานการประชุมวิชาการ



ใบรับรองเข้าร่วมประชุมวิชาการงาน PACCON 2012 โดยการนำเสนอ Poster presentation



Poster presentation ในหัวข้อ THERMAL STABILITY OF NATURAL DYED WOOD FIBERS FOR USING IN WOOD-FILLED BIOCOMPOSITE ในงาน PACCON 2012



THERMAL STABILITY OF NATURAL DYED WOOD FIBERS FOR USING IN WOOD-FILLED BIOCOMPOSITES

Atiwat Wiriya-amornchai¹, Pajaera Patanathabutr^{1,2}, Nattakarn Hongsrirphan^{1,2*}

¹Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand.

²Center of Excellence in Petroleum, Petrochemical and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

* Author for correspondence; E-Mail: nattakar@su.ac.th, Tel.+66 34 219363, Fax. +66 34 219363

Abstract: Three types of natural dyes typically used in traditional Thai textiles; yellow color from jackfruit tree, red color from sappan wood and blue color from indigo, were selected to dye alkali-treated pinewood fibers that would be alternative reinforced fibers for preparing wood-filled biocomposites. In this study, thermal stability of natural dyed alkali-treated wood fibers was investigated by thermogravimetric analysis (TGA) in both inert and oxidative atmosphere conditions. FTIR and UV-VIS spectrophotometer were used to characterize functional groups of natural dyes and the percentage of dye absorption in wood fibers, respectively. It is found that alkali-treated wood fibers started to decompose at lower temperature than original wood fibers, and there were fewer residues after thermal degradation due to lignin removal. In inert atmosphere, jackfruit-dyed (yellow) and sappan-dyed (red) wood fibers showed the same thermal degradation profiles with higher degradation temperature due to thermal stability from metal mordanting. Moreover, in oxidative atmosphere, indigo (blue) enhanced alkali-treated wood fibers to withstand thermo-oxidative degradation.

1. Introduction

The environmental conservation becomes one of the considerable factors for selection of materials used in the present applications [1]. Natural cellulose fibers can be combined with various commercial polymers to produce ecologically friendly composites. Natural fibers have many advantages compared to inorganic fibers (such as glass, aramid, carbon fibers) due to their low weight, low density, low cost, recyclability and biodegradability. Besides, incorporating them into thermoplastics or thermosets, produces composites, having relatively high strength, and stiffness [1-3]. These renewable and biodegradable natural fibers can be disposed by composting or incineration. Several studies have been conducted to generate reinforced composites based on the potential of cellulose based fibers [1].

Dyeing with synthetic dyes has negative impact on the environments. The use of natural dyes to color materials increased because of low toxicity, high compatibility with the environments as well as availability of many natural color resources such as plants, insects etc [4]. However, natural dyes have disadvantage preference in industrial applications due to low color yields, low stability, and low light-fastness. The development of stable and consistent

natural dyes is currently investigated by many researchers.

Thermal analysis is an analytical experimental technique that measures thermal behavior of materials as a function of temperature. It is a useful technique to evaluate the thermal stability of materials. In addition, it is possible to quantify the amount of moisture and volatile substances. Thermogravimetric data can describe a number of stages of thermal breakdown, weight loss of materials in each stage, onset and end temperature of degradation etc [5]. Generally, thermal decomposition of cellulose based fibers has three stages, the heat of vaporization of the water from fibers (stage 1), the thermal depolymerization of hemicelluloses and 1,3-glucosidic bond of cellulose (stage 2) and the degradation of cellulose (stage 3) [6].

The aim of this study is to investigate the relative thermal degradation behavior of natural dyed wood fibers by thermogravimetric analysis (TGA). Three types of natural dyes used in traditional Thai textile; yellow color from jackfruit tree, red color from sappan wood and blue color from indigo paste, were used to dye alkali-treated pinewood fibers. The percentage of dye absorption was determined using ultraviolet-visible spectroscopy (UV-VIS). Fourier transforms infrared spectroscopy (FTIR) was used to study the functional groups of non-dyed and dyed wood fibers. The understanding of thermal degradation behavior of natural dyed wood fibers, will provide an alternative method for their use in wood-filled biocomposites. It could not only provide desired appearance to the biocomposites but also preserve the environments by using all-natural resources to produce the "green biocomposites".

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Pinewood flour (200-500 mesh, 60-70 μm) was purchased from Deqing Linpai Wood Flour Co, China. Natural dyes were extracted from natural resources as; yellow color from heartwood of jackfruit tree, red color from heartwood of sappan wood, and blue color from indigo paste (*Indigofera tinctoria* ferment). All natural dyes were supplied by Bannongkabchang textile group, Chiang Mai, Thailand. NaOH (laboratory grade, purchased from Vidhyasom Co, Nakhonprathom, Thailand) was dissolved in deionized

water to obtain 5%wt/v aqueous NaOH solution. Aluminium sulphate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) (purchased from Ajax finechem company) was used as a mordant to improve dye affinity between wood fibers and natural dyes.

2.2 Extraction of natural dyes

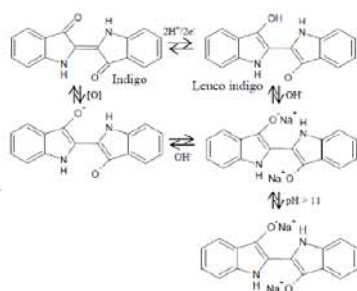
Dried heart wood of jackfruit tree and sappan wood were ground into small pieces, and then boiled in distilled water (1:10 weight ratio) at 100°C for 4 hrs to extract natural dyes. Then, the dye solution was filtrated to remove insoluble residues. As indigo was insoluble in water, 5%wt/v aqueous NaOH solution and a small amount of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ were gradually added into the indigo paste and shaken until indigo became soluble and was clear yellow-green solution.

2.3 Alkali treatment of pinewood flour

Dried pinewood flour was soaked in 5%wt/v aqueous NaOH solution for 2 hrs at room temperature. The pH of the mixture was adjusted to 7 by 1 M acetic acid. Alkali-treated wood flour was washed with distilled water several times, and then was dried in an oven at 100°C for 24 hrs.

2.4 Dyeing of pinewood flour

Alkali-treated pinewood flour was dyed with the dye solution using a dye liquor ratio of 1:15. For dyeing with jackfruit (yellow) and sappan (red) dyes, the alkali-treated wood flour was dyed at 100°C with 1.5 wt% of aluminium sulphate as a mordant. For dyeing with indigo (blue), the alkali-treated wood flour was dyed at room temperature, and then dried in air to allow oxidation of the dye (the dye changed from yellow-green soluble dye to blue insoluble dye) as shown in scheme 1.



Scheme 1. Indigo reduction and oxidation reaction [9].

2.5 % Dye absorption by UV-VIS spectroscopy

Extracted natural dye solutions were measured to determine the maximum absorbance for each type of natural dyes in the wavelength range of 380-800 nm with scanning rate of 200 nm/min. A calibration curve for each natural dye was produced using different dye solution concentration. Before and after dyeing of wood flour with natural dye solution, the concentration of dye solution was measured by means of absorbance

at the maximum wavelength. The % Dye absorption was calculated using the following equation.

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

Where [a] and [b] were natural dye concentrations before and after wood dyeing.

2.6 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

Fourier transform infrared (FT-IR) spectra of all samples were recorded on a Vertex 70, BRUKER in range $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ using KBr disc. Spectra were obtained using 16 scanning, and a resolution of 4 cm^{-1} .

2.7 Thermogravimetric analysis (TGA)

Thermogravimetric analyzer (TGA/DSC1 Mettler Toledo Stare system) was used to investigate the mass loss stage, threshold temperature and rate of decomposition. In the TGA experiment, the natural dyed woods were heated from 50 to 500°C at heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$. The weight of all TGA samples were approximately 10 mg. During the experiment the cell of TGA was flushed with 50 ml/min of nitrogen (N_2) in inert atmosphere condition and 50 ml/min of oxygen (O_2) in oxidative atmosphere condition to investigate thermal and oxidative decomposition of the samples.

3. Results and Discussion

3.1 Dye absorption in pinewood flour

Using UV-VIS spectrophotometer, it is found that alkali-treated pinewood fibers could be dyed with natural dyes with more than 80% dye absorption; the percentage of dye absorption was 87.65, 94.57, and 92.34 for jackfruit (yellow) wood, sappan (red) wood, and indigo (blue), respectively. After alkali treatment, some hemicelluloses and lignin in the fibers were hydrolyzed and removed from wood fibers, leaving fiber surfaces to be rougher and having voids on fiber surface. This increased hydrophilicity of wood fiber surface is due to higher amount of hydroxyl groups on the surface. In the case of dyeing with jackfruit and sappan wood which were dyed in hot water with aluminium sulphate, the mordant would help in binding natural dye molecules onto hydroxyl groups of celluloses. However, in the case of dyeing with indigo at room temperature, the high dye absorption is a result of vat dyeing condition that was higher alkaline so that lignin and hemicelluloses can be further hydrolyzed.

3.2 FTIR analysis

Figure 1 presents FTIR spectra of pinewood, alkali-treated wood and natural dyed wood fibers. Pinewood shows a medium peak at $1,739\text{ cm}^{-1}$ which represents vibration of carbonyl and ketone groups in hemicelluloses and aromatic groups in lignin. This peak was absent in alkali-treated and natural dyed pinewood fibers. Also, the strong peak due to vibration of methoxy group ($-\text{O}-\text{CH}_3$) in lignin structure of pinewood appears

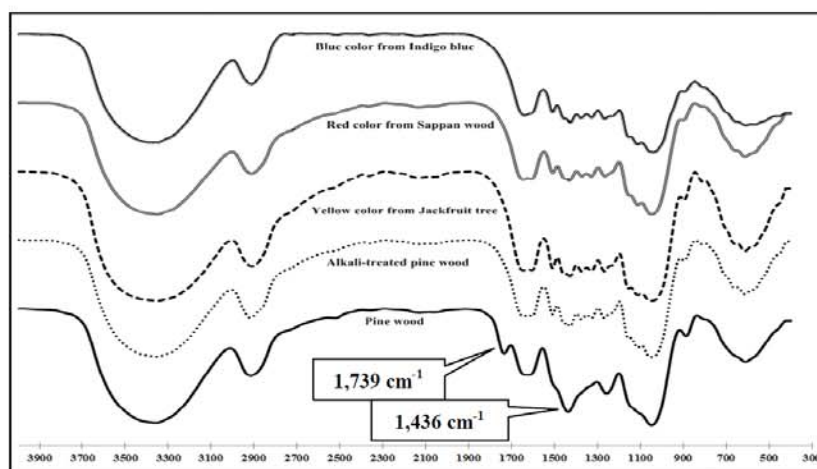


Figure 1. FTIR spectra of pinewood, alkali-treated pinewood, jackfruit-dyed (yellow) wood, sappan-dyed (red) wood and indigo-dyed (blue) wood fibers.

at $1,436\text{ cm}^{-1}$ [7], while this peak's intensity was reduced in alkali-treated and natural dyed wood fibers. This confirms that hemicelluloses and lignin were removed from pinewood after alkali treatment, prompting pinewood to absorb natural dyes easier as previously discussed. However, there is no significant difference between FTIR spectra of natural dyed wood and alkali-treated wood fibers, showing that all natural dyes in this study did not alter chemical properties of cellulose fibers.

3.3 Thermogravimetric analysis (TGA)

Figure 2 shows TGA thermograms in inert (N_2) atmosphere of pinewood, alkali-treated pinewood, and natural dyed wood fibers. Although the wood samples were dried thoroughly before the TGA tests, the vaporization of moisture was presented at 100°C in all samples indicating there was bound water left inside the wood fibers.

In inert atmosphere, it is found that original pinewood fibers started to decompose at 220°C of which the lower thermal stable hemicelluloses decomposed yielding non-combustion gas, then cellulose structure had absorbed enough energy to activate the cleavage of the 1,3-glycosidic linkage of them yielding combustion gases (i.e. CH_4) and volatile gas (CO_2 , CO) causing continuously decreased in sample weight. As temperature increased to around 450°C , the production of volatile compounds was completed, the remaining char from carbonization was about 25%wt of the fibers. However, alkali-treated wood started to decompose at lower temperature than original pinewood did. This was due to the removal of lignin by alkali treatment. Lignin is the most thermally stable of all compositions in the fibers and thermal stability of the fibers increased with increasing of lignin content [6]. It is found that alkali treatment would weaken celluloses in the wood fibers causing

them to decompose at lower degradation temperature and the char residue left was lower due to lower content of lignin in the alkali-treated wood fibers.

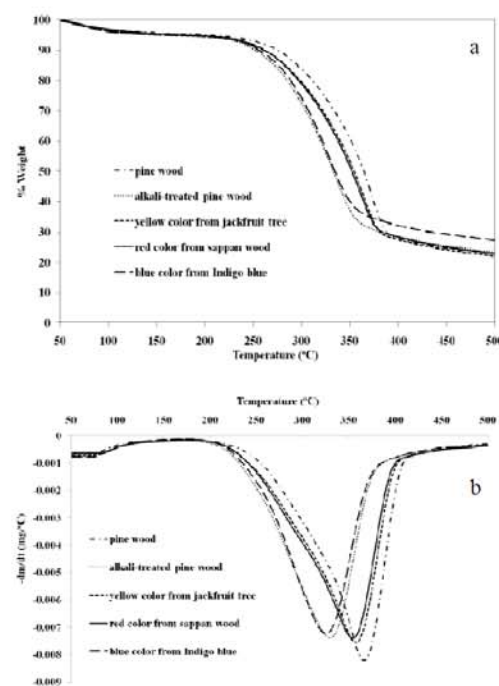


Figure 2. (a) TGA thermograms (b) DTA thermograms of pinewood, alkali-treated pinewood, jackfruit-dyed (yellow) wood, sappan-dyed (red) wood and indigo-dyed (blue) wood fibers in inert (N_2) atmosphere.

Compared to non-dyed alkali-treated pinewood fibers, jackfruit-dyed (yellow) and sappan-dyed (red) wood fibers showed the same degradation profiles with higher degradation temperature and left the same amount of char residues, while there was no change in degradation temperature profile for indigo-dyed (blue) wood fibers but left the higher amount of char residues.

This indicated that dyeing wood fibers with natural dyes from jackfruit and sappan wood could reduce thermal degradation rate of celluloses during pyrolysis process. This is due to higher energy is required to break binding between the complex structure of natural dye molecules with metal mordant and hydroxyl groups of celluloses. Meanwhile, dyeing wood fibers with indigo without mordant, could alter carbonization reaction of celluloses to be more favor resulting on higher char residues.

Figure 3, shows TGA thermograms in oxidative (O_2) atmosphere of pinewood, alkali-treated pinewood, and natural dyed wood fibers. Both original pinewood and alkali-treated wood fibers decomposed with faster thermal degradation rate and left a few or almost no char residues. Similarly to inert atmosphere, jackfruit-dyed (yellow) and sappan-dyed (red) wood fibers showed better thermal stability than alkali-treated wood fibers. However, their onset thermal degradation temperature was lower than original pinewood fibers. Interestingly, indigo-dyed (blue) wood fibers had gradually thermo-oxidative degradation with the slowest degradation rate compared to other wood samples. The DTA thermogram of indigo-dyed wood fibers in oxidative (O_2) atmosphere had a shoulder on the right. The possible hypothetical explanation is based on chemical structure of oxidized indigo (as shown in scheme 1) which has strong hydrogen bonding, caused indigo molecules to aggregate, and giving higher stability. Moreover, indigo was reported to possess sufficient antioxidant activity [8], thus indigo would act as antioxidants and then reduce thermo-oxidative reaction of alkali-treated wood fibers.

4. Conclusions

It is found that alkali-treated pinewood fibers started to decompose at lower temperature than original pinewood fibers did, and there were fewer residues after thermal degradation due to lignin removal. In inert atmosphere, jackfruit-dyed (yellow) and sappan-dyed (red) wood fibers showed the same thermal degradation profiles with higher degradation temperature due to higher thermal stability from metal mordanting. Moreover, in oxidative atmosphere, indigo (blue) enhanced alkali-treated wood fibers to withstand thermo-oxidative degradation due to higher thermal stability of oxidized indigo molecules. Not only coloring cellulose based fibers, natural dyes have promising potential to enhance thermal properties of biocomposites.

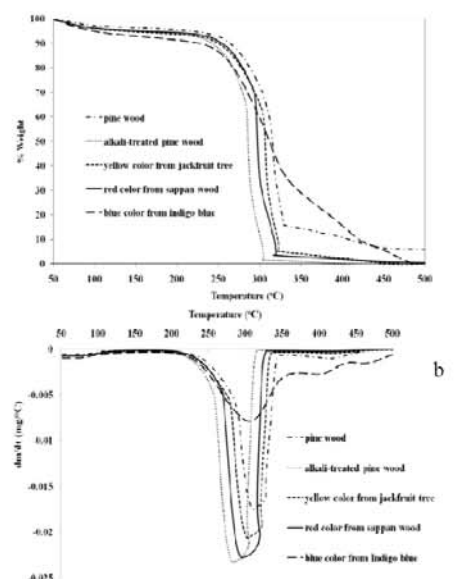


Figure 3. (a) TGA thermograms (b) DTA thermograms of pinewood, alkali-treated pinewood, jackfruit-dyed (yellow) wood, sappan-dyed (red) wood and indigo-dyed (blue) wood fibers in oxidative (O_2) atmosphere.

Acknowledgements

This work was financial supported by Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, and scholarship funded by Center of Excellence in Petroleum, Petrochemical and Advanced Materials, Chulalongkorn University, Thailand.

References

- [1] K. Oksmana, M. Skrifvars and J.-F. Selin, *Compos. Sci. Technol.* 63 (2003) 1317-1324.
- [2] T. Huu Nama, S. Ogihara, N. Huy Tung and Satoshi Kobayashi, *Compos. Part B.* 42 (2011) 1648-1656.
- [3] A. Awal, S. B. Ghosh and M. Sain, *J. Therm. Anal. Calorim.* 99 (2010) 695-701.
- [4] V.K. Gupta and Suhas, *Environ. Managem.* 90 (2009) 2313-2342.
- [5] P.V. Josepha, K. Joseph, S. Thomas, C.K.S. Pillai, V.S. Prasad, G. Groeninckx and M. Sarkissovad, *Compos. Part A.* 34 (2003) 253-266.
- [6] H.-S. Kim, H.-S. Yang, H.-J. Kim, B.-J. Lee and T.-S. Hwang, *J. Therm. Anal. Cal.* 81 (2005) 299-306.
- [7] F.P. La Mantia and M. Morreale, *Polym. Degrad. Stab.* 93 (2008) 1252-125.
- [8] K. Kim, W. Hwang, H. Jang, B. Heo, M. Suhaj, H. Leontowicz, M. Leontowicz, Z. Jastrzebski, Z. Tashma and Shela Gorinstein, *Food. Sci. Technol.* (2011).
- [9] G.A. Baig, *J. AUTEX.* 10 (2010) 21-25.

การนำเสนองานประชุมวิชาการนานาชาติ 2 nd International Conference on Key Engineering
Materials (ICKEM 2012) ระหว่างวันที่ 26-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2555

หนังสือบันทึกรายงานการประชุมวิชาการ



ใบรับรองเข้าร่วมประชุมวิชาการงาน ICKEM 2012 โดยการนำเสนอ Oral presentation



Certificate for Oral Presentation

Paper Title: Natural Dyeing of Wood Fibers for Green Biocomposites (K0043)

This is to certify that *Atiwat Wiriya-amornchai* from *Slipakorn University, Nakhon Pathom* has attended, and delivered an oral presentation in the 2012 International Conference on Key Engineering Materials (ICKEM 2012) held in Singapore during February 26-28, 2012.

Conference Committee

ICKEM 2012



ใบรับรองยืนยันการเข้าร่วมประชุมวิชาการ ICKEM 2012

2012 2nd International Conference on Key Engineering Materials
ICKEM 2012

Notification of Acceptance of the ICKEM 2012

February 26-28, 2012, Singapore

<http://www.ickem.org/>



Dear Atiwat Wiriya-Amornchai, Nattakarn Hongsriphan and Pajeara Pattanatabutr,

Paper ID : K0043

Paper Title : Natural Dyeing Of Wood Fibers For Green Biocomposites

Congratulations! The review processes for 2012 2nd International Conference on Key Engineering Materials (ICKEM 2012) has been completed. The conference received submissions from nearly 12 different countries and regions, which were reviewed by international experts, and about 100 papers have been selected for presentation and publication. Based on the recommendations of the reviewers and the Technical Program Committees, we are pleased to inform you that your paper identified above has been accepted for publication and oral presentation. You are cordially invited to present the paper orally at ICKEM2012 to be held on February 26-28, 2012, in Singapore.

The ICKEM 2012 is organized by International Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT), and has been listed in the TTP Conference Search.

(Important) So in order to the register the conference and have your paper included in the proceeding successfully, you must finish following FIVE steps.

1. Revise your paper according to the Review Comments in the attachment carefully.
2. Format your paper according to the Template carefully.
http://www.ickem.org/NEW_AuthorInstructions.rtf (DOC Format)
3. Download and complete the Registration Form.
<http://www.ickem.org/reg.doc> (English)
4. Finish the payment of Registration fee by Credit Card. (The detailed information can be found in the Registration form)
<http://www.ickem.org/reg.doc> (English)

บันทึกงานประชุม (Proceeding) งาน ICKEM 2012

Advanced Materials Research Vols. 488-489 (2012) pp 511-514
 Online available since 2012/Mar/15 at www.scientific.net
 © (2012) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.511

NATURAL DYEING OF WOOD FIBERS FOR GREEN BIOCOMPOSITES

Atiwat Wiriya-Amornchai^{1, a}, Nattakarn Hongsriphan^{1, 2, b},
 Pajeara Pattanatabutr^{1, 2, c}

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand.

²Center of Excellence in Petroleum, Petrochemical, and Advanced Materials, Bangkok 10330, Thailand

^aatiwat_wiriya@hotmail.com, ^bnattakar@su.ac.th, ^cpajara@su.ac.th

Keywords: poly (lactic acid), wood composite, natural dyeing, biocomposite

Abstract. In this study, the mechanical and thermal properties of green biocomposites adding natural dye were investigated by tensile test and Differential Scanning Calorimetry (DSC). Poly(lactic acid), one of biodegradable polymers recently been interested for replacing petroleum-based polymers, was compounded with wood fibers to produce biocomposite, and natural dyes were introduced to improve appearance of biocomposite. Pine wood fibers were dyed with three types of natural dyes; yellow color from heartwood of Jackfruit tree, red color from Sappan wood, and blue color from Indigo blue. Prior compounding, original and dyed wood fibers were treated with silane to improve compatibility between wood fiber and polymer matrix. It is found that %crystallinity of alkali-treated and natural dyed wood/PLA biocomposites were significantly higher than original wood/PLA biocomposites. The modulus and tensile strength of natural dyed wood poly (lactic acid) composites were in the same level of alkali-treated wood composites; however, elongation at break was improved by natural dye.

Introduction

In the present, petroleum-based polymers and natural fiber reinforced composites are widely used in different fields due to their low density and high mechanical and physical properties [1]. However, these natural fiber composites are not fully environmentally friendly because matrix resins are non-biodegradable [2]. There is considered a serious challenge to natural ecosystems and has caused various forms of environmental pollution. Therefore, biodegradable composites based on natural fibers and biodegradable polymeric matrix made from cellulose, starch, and other natural resources are called *green composites* and have been developed because of their environmentally beneficial properties including low cost, low density, acceptable specific properties, less health risk, reduced energy consumption, renewability, recyclability and complete bio-degradability [1, 2, 3].

Generally, these composites are used in the outside that change properties and color after outdoor exposure. There are many ways to improve properties and appearance such as adding coupling agent, natural dyes, pigment or light stabilizer. With the rising concern for environmental protection so this study concerning about natural dyes to improve properties because source of raw material are more than enough and eco-friendly as well as this is a new research.

The objective of this study is to prepare green biocomposites from PLA and natural fibers. Natural dyes were introduced to improve appearance of biocomposite. Mechanical and thermal properties of natural dyed wood-PLA composites were investigated using tensile test and differential scanning calorimetry (DSC).

Experimental

Material

Biopolymer used was poly (lactic acid) (PLA, Ingeo™ biopolymer 3051D) with MFI of 15 g/10 min (190 °C, 2.16 kg) purchased from Nature Work LLC, USA. Bio-reinforcing filler was Pine wood flour (200-500 mesh, 60-70 µm) supplied by Deqing Lin Pai Wood Flour Co, China. The

natural dyes used were yellow color from heartwood of Jackfruit tree, red color from Sappan wood, and blue color from Indigo blue (supplied from Bannongkabchang textile group, Chiang Mai, Thailand). Silane coupling treatment was 3-(Triethoxysilyl)-propylamine, (3-TEPA) purchased from Merck, Germany. NaOH was purchased from Vidhyasom Co, Nakhonprathom, Thailand. NaOH was dissolved into distilled and deionized water to obtain a 5%wt/v.

Extraction of natural dyes

Heart wood of Jackfruit and Sappan wood were dried, ground to small pieces, and boiled in water (1:10 weight ratio) for 4 hr at 100 °C to extract color. Then, the extraction was filtrated to remove the insoluble residues. In case of Indigo blue which is insoluble in water, NaOH solution and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ were gradually added into the extraction and shake until it was colorless.

Alkali treatment of the Pine wood flour

Dried Pine wood flour was soaked in aqueous NaOH solution (5%wt/v) for 2 hr at room temperature. The pH of the mixture was adjust to 7 with 1 M acetic acid and washed with distilled water several times. Alkali-treated wood flour was then dried in an oven at 100 °C for 24 hr.

Dyeing of wood flour

Alkali-treated Pine wood flour was dyed with dye solution using the dye liquor ratio (1:15). For hot dyeing (100 °C) of Jackfruit and Sappan, aluminium sulphate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) of 1.5 wt% was added in order to increase dye affinity. For Indigo blue, alkali treated wood flour was dyed with dye solution at room temperature and then dried in air for oxidation of dye showing Indigo blue color.

Silane treatment

Before compounding with PLA, original, alkali-treated and natural dyed wood flour were treated with 5 wt% of 3-TEPA (weight percentage compared to the wood flour) in water-ethanol (40:60 w/w) for 1 hr. Silane treated wood flour was dried in an air-circulating oven at 100 °C for 72 hr.

Compounding and sample preparation

Prior compounding, PLA, original wood flour, alkali-treated wood flour, and natural dyed wood flours were dried an air-circulating oven at 80 °C for 24 hr. Biocomposites were prepared by compounding PLA 80 wt% and wood flour 20 wt%. PLA and wood flour were melt compounded using a co-rotating twin-screw extruder (SHJ-25, Nanjing Yonteng Chemical Equipment Co., Ltd., China) with a screw diameter of 25 mm. The barrel temperatures profiles were 155 and 180 °C keeping the screw speed of 90 rpm. The extrudate was cooled in the air and grinded using a grinder. The extruded pellets were injection molded into dogbone specimens using an injection molding machine (Battenfeld, BA250, Germany) at 180 °C. After injection molding, the dogbone specimens were conditioned in a desiccator before mechanical testing. The codenames for samples presented further in the discussion was as following in table 1.

Table 1. Codename of neat PLA and dyed wood-PLA composites.

Codename	Samples
PLA	Neat PLA
W-WPC	Original Pine wood-PLA composite
AL-WPC	Alkali-treated Pine wood-PLA composite
Y-WPC	Jack fruit dyed wood-PLA composite
R-WPC	Sappan dyed wood-PLA composite
B-WPC	Indigo blue dyed wood -PLA composite

Differential scanning calorimetry (DSC)

DSC was carried out using a Differential scanning calorimeter (Mettler Toledo Stare system model DSC1) in nitrogen condition with a heating rate of 10 °C/min. The temperature range scanned was from 0 to 200 °C. The weights of all specimens were approximately between 3-10 mg and aluminum sample pans were used. The glass transition temperature (T_g), melt temperature (T_m), cold crystallization temperature (T_c), and heat of melting (ΔH_m) were determined for neat PLA and PLA-biocomposites. The percentage crystallinity of each sample was calculated using the following eq.1.

$$X_c (\% \text{ crystallinity}) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times \frac{100}{w} \quad (1)$$

where ΔH_m is the heat of melting, ΔH_m^0 is the heat of melting for 100% crystalline PLA sample ($\Delta H_m^0 = 93 \text{ J/g}$) and w is the weight fraction of PLA in the sample [4].

Tensile property tests

Tensile testing was carried out according to the ASTM 638-08: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. The specimens were then tested using an Instron-4204 tensile testing machine fitted with a 5 kN load cell. The cross head speed of 5.0 mm/min was used. An Instron 2630-112 extensometer was used to measure the strain. Eight specimens were tested with a gauge length of 50 mm and the average and its standard deviation of tensile strength at break, %elongation at break, and secant modulus, were calculated.

Result and discussion

Dye absorption in Pine wood flour

Using UV-VIS spectrophotometer, it is found that alkali-treated wood fiber was dyed with natural dyes in more than 80% absorption of the origin natural dye solution. The percentage of dye absorption was 87.65, 94.57, and 92.34 for Jackfruit, Sappan, and Indigo dyeing, respectively. After alkali treatment, lignin was removed from wood fibers resulting in higher concentration of celluloses in wood fibers. Increasing of hydrophilicity of wood fibers, along with adding mordant, permits these natural dyes to be absorbed by wood fibers via chemical affinity.

Thermal properties of neat PLA and natural dyed-wood PLA composites

Thermal properties of neat PLA and dyed wood PLA composites were summarized in Table 2. Adding wood fibers increases T_g of PLA indicating wood fibers inhibited mobility of PLA from interfacial interaction between them even though there was no treatment was introduced to wood fibers. The interfacial interaction between them also prompted PLA to have lower cold crystallization (T_c) [5]. This indicates wood fibers became nucleating sites for PLA to re-crystallize during the heating in DSC test, which resulted in higher % crystallinity.

Table 2. Thermal properties of neat PLA and natural dye-wood/PLA composites.

Sample	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
PLA	51.51	123.96	146.06	1.51	1.62
W-WPC	55.89	120.86	146.58	19.52	26.24
AL-WPC	50.29	106.80	139.27	29.29	39.37
Y-WPC	52.41	113.08	142.22	26.82	36.05
R-WPC	53.48	112.76	148.13	27.32	36.72
B-WPC	55.86	118.40	145.73	23.93	32.16

As a result of the modification of wood surfaces by alkali treatment, bonding between the wood and PLA matrix was improved due to the increased interaction through hydrogen bonding between PLA matrix and wood fibers. This decreased T_c of PLA significantly and increased % crystallinity dramatically [5]. After alkali-treated wood fibers were dyed with natural dyes, T_g and T_c of composites were higher implying that interfacial interaction between phases was diminish since natural dyes were fixed on wood surfaces decreasing nucleating sites for PLA to re-crystallize.

Mechanical properties of neat PLA and natural dyed-wood PLA composites

Figure 1 presents the secant modulus, tensile strength, and elongation at break of neat PLA and natural dyed wood-PLA composites. Adding wood flour into PLA increased modulus due to the reinforcing effect. In this study, silane treatment on wood fibers was performed in order to improve compatibility between polymer matrix and wood fibers. There was no change in mechanical strength of alkali-treated wood-PLA composites implying that wood fibers did not weaken by alkali treatment.

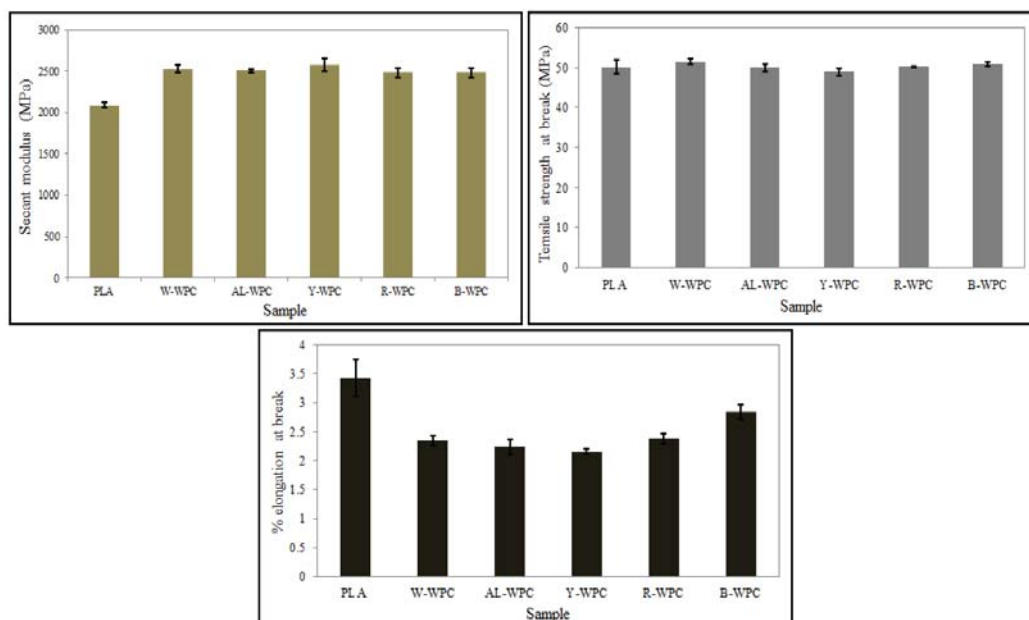


Fig 1. Modulus, tensile strength, and % elongation at break of neat PLA, original wood, alkali-treated wood and natural dyed wood-PLA composites.

After dyeing with natural dyes, modulus and tensile strength of wood composites did not change; however, there was significantly increase in elongation at break. Typically, good interfacial adhesion between polymer matrix and fibers would result in higher percentage of elongation at break. Although the silane treatment in every wood composite in this work was done at the same weight ratio, the condensation of siloxane on hydroxyl groups would occur at the different fashion. In natural dye wood fibers, the condensation of siloxane on wood surfaces fixed with hydrophilic dye substance might happen in the higher degree, because these dye substance and mordant would act as the active site for the condensation to occur during the compounding.

Conclusion

This study demonstrated that natural dyed biocomposites with good thermal property. This is believed to be cause by natural dye fixed on wood surface increasing, resulting in higher T_g and T_c . However, modulus and tensile strength of natural dyed wood poly(lactic acid) composites were in the same level of alkali-treated wood composites, however, elongation at break was improved by natural dye.

References

- [1] X. Huang and A. Netravali: *Compos. Sci. Technol.* Vol. 69 (2009), p. 1009-1015.
- [2] T. Huu Nama, S. Ogihara, N. Huy Tung and S. Kobayashi: *Compos. Part B.* Vol. 42 (2011), p. 1648-1656.
- [3] H.-S. Kim and H.-J. Kim: *Polym. Degrad. Stabil.* Vol 93 (2008), p. 1544-1553.
- [4] M.S. Islama, K.L. Pickering and N.J. Foreman: *Compos. Part A.* Vol. 41 (2010), p. 596-603.
- [5] H.-S. Kim, H.-S. Yang, H.-J. Kim, B.-J. Lee and T.-S. Hwang: *Therm. Anal. Calorim.* Vol. 81 (2005), p. 299-306.

Key Engineering Materials II

10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489

Natural Dyeing of Wood Fibers for Green Biocomposites

10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.511

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายอิวัชร วิริยะอมรชัย
ที่อยู่	9 ซอย เทอดไท 49 แขวง ปากคลอง เขต ภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร 10160 โทรศัพท์ 088-230-2048
E-mail Address	atiwat_wiriya@hotmail.com, kimnarak30519@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2553	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม
พ.ศ. 2555	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2551	ฝึกงานที่บริษัท ไฟโอเนีย อินดัสเทรียล จำกัด แผนก P&RD, บรรจุก๊าซ และ ผสมสี จังหวัด ฉะเชิงเทรา
ทุนที่ได้รับระหว่างการศึกษา	
พ.ศ. 2553	ทุนการศึกษาและผู้ช่วยอาจารย์ในรายวิชา Polymer science Laboratory และ Polymer processing and testing Laboratory จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2554	ทุนการศึกษาและผู้ช่วยอาจารย์ในรายวิชา Chemical process engineering Laboratory และ Polymer processing and testing Laboratory จากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร