

ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส



นางสาวนันทกัศ วรัชญ์ไคว์ไพโรจน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Microcellulose reinforced natural rubber

Miss Nanthaphak Varatkowpairote



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

นันทัก วรัชญ์ไคว้ไพโรจน์ : ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลส (Microcellulose reinforced natural rubber) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์, 74 หน้า.

ไมโครเซลลูโลส ที่เตรียมจากเยื่อกระดาษขุยคาลิปตัสที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 26.5 ไมโครเมตร ถูกใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในเนื้อยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเชิงเคมีของฟิล์มสารประกอบยางธรรมชาติ คอมโพสิทฟิล์มของยางธรรมชาติและไมโครเซลลูโลสถูกขึ้นรูปโดยวิธีหล่อแบบสารละลาย โดยปรับสัดส่วนการเติมไมโครเซลลูโลส 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้อัลจิเนตเป็นสารเพิ่มความข้นของสารละลาย จากนั้นได้ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล เชิงเคมี และความเสถียรภาพในโทลูอีนและน้ำของฟิล์ม จากภาพโดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน FESEM แสดงให้เห็นว่า ไมโครเซลลูโลสกระจายได้อย่างดีในเนื้อยางและไม่สังเกตเห็นการแยกชั้น พบว่าค่าความเป็นผลึกของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ฟิล์มของยางธรรมชาติที่เสริมด้วยไมโครเซลลูโลสมีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นอย่างชัดเจน คอมโพสิทฟิล์มมีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) และความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าดังกล่าวของฟิล์มจากยางธรรมชาติ นอกจากนี้พบว่าที่ปริมาณไมโครเซลลูโลสไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ คอมโพสิทฟิล์มมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่สูงกว่าฟิล์มยางธรรมชาติ เมื่อเทียบกับฟิล์มยางธรรมชาติ คอมโพสิทฟิล์มมีอัตราการบวมโทลูอีนลดลงอย่างชัดเจนแต่มีการดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น การเสริมแรงด้วยไมโครเซลลูโลสไม่ทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของฟิล์มเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมเซลลูโลสจะทำให้คอมโพสิทฟิล์มมีความเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลงในขณะที่มีอัตราการแตกสลายทางชีวภาพในดินที่เพิ่มขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770436521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ไมโครเซลลูโลส / ยางธรรมชาติ / การเสริมแรงยางธรรมชาติ

NANTHAPHAK VARATKOWPAIROTE: Microcellulose reinforced natural rubber.

ADVISOR: ASSOC. PROF.MUENDUEN PHISALAPHONG, Ph.D., 74 pp.

In order to improve mechanical and chemical properties of NR composite film, microcellulose (MC) prepared from eucalyptus pulp at an average size of 26.5 micron was used as reinforcement in NR matrix. The MC-NR composite films were fabricated by casting solution method. The loading content of MC was varied from 0 to 50 percent by weight and alginate was used to thickening agent in the solution. The MC-NR films were investigated for physical, mechanical and chemical properties and stability in toluene and water. Images from Field emission scanning electron microscopy (FESEM) demonstrated well dispersion of MC in NR matrix and no phase separation was observed. The crystallinity of MC-NR films increased with increasing cellulose contents. The films of NR reinforced with MC exhibited significant improved mechanical performance. Young's modulus and tensile strength of MC-NR films were considerably higher as compared to those of NR films. In addition, it was shown that the elongation at break values of the MC-NR films at MC content not greater than 30 percent were more than that of NR film. The rate of swelling in toluene of MC-NR films was found to be significantly lower as compared to that of the NR films, whereas the water absorption of the films increased with increasing cellulose contents. The reinforcement by adding MC caused no change of the glass transition temperature (T_g). Moreover, with the increase in cellulose loading, the thermal stability of the composite films decreased, whereas the rate of biodegradation in soil increased.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือจากบุคคลต่างๆ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัย และข้อคิดเห็นในการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนช่วยแก้ไขและเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รศ.ดร.บรรเจิด จงสมจิตร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อาทิตย์วรรณ โชติพิชญ์ และ ดร.จิรัญ กิ่งแก้ว (มหาลัยมหิตล) กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนรัชดาภิเษกสมโภช (CU-57-032-Am)

ขอขอบพระคุณ บริษัท เทพพัฒนาระดาฯ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เยื่อกระดาษเพื่อใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ตลอดจนพี่และเพื่อนๆทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่ได้ให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัย.....	5
2.1 ยางธรรมชาติ.....	5
2.2 เซลลูโลส.....	9
2.3 อัลจินต.....	11
2.4 กรดอะซิติก.....	12
2.5 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเซลลูโลสและยางธรรมชาติ.....	13
2.6 การปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส.....	17
บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง.....	21
3.1 วัสดุ.....	21
3.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.3 การวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะคอมโพสิทฟิล์ม.....	22

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทฟิล์ม	25
4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิทฟิล์ม	29
4.3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของคอมโพสิทฟิล์ม	33
4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทฟิล์ม	36
4.5 ผลการศึกษาการบวมคอมโพสิทฟิล์มในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว	39
4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิทฟิล์ม	40
4.7 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิทฟิล์ม	42
4.8 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	48
รายการอ้างอิง	50
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก การคำนวณ	56
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง.....	57
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์	67
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	74

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะอนุภาคของเม็ดยางที่แขวนลอยในน้ำ	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช	9
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของอัลจินต	11
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะซิติก	12
รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสกับยางธรรมชาติอีพ็อกซี ไดซ์	14
รูปที่ 2.7 แสดงการยึดติดธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ระหว่างเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ..	16
รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆที่ผิวของคอมโพสิต (ก). เซลลูโลส (ข). NR (ค). AC10/90 (ง). C10/90 (จ). C20/80 (ฉ). C30/70 (ช). C40/60 (ญ). C50/50	27
รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆภายใน (cross section) ของ คอมโพสิต (ก). NR (ข). C10/90 (ค). C20/80 (จ). C30/70 (ฉ). C40/60 (ฉ). C50/50.....	28
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy	30
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy	31
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ระหว่างที่แช่กรดและไม่ได้แช่กรดอะซิติก ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy	32
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของคอมโพสิตด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน	34
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	34

สารบัญรูปลภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระหว่างที่แช่กรดและไม่ได้แช่กรดอะซิติก ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	35
รูปที่ 4.9 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก.) ความทนต่อแรงดึง (ข.) โมดูลัสของยัง (ค.) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด.....	38
รูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองการเกิดแรงดึงดัดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสในเมทริกซ์	38
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะทางกายภาพของคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่แช่โทลูอิน ก. คอมโพสิทที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดอะซิติก ข. คอมโพสิทที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรดอะซิติก.....	40
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การบวมโทลูอินของคอมโพสิทฟิล์ม เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	41
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของคอมโพสิทฟิล์ม เป็นเวลา 7 วัน.....	41
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิทฟิล์มที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา 8 สัปดาห์....	42
รูปที่ 4.15 ลักษณะของคอมโพสิทฟิล์มที่ผ่านการย่อยสลายทางชีวภาพในดินเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์.....	43
รูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิความเสถียรภาพทางความร้อนของเซลลูโลส ยางธรรมชาติและคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์.....	46
รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆของยางธรรมชาติ เซลลูโลสและคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 -50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	46
รูปที่ 4.18 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆของคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระหว่างคอมโพสิทที่แช่กรดและไม่ได้แช่กรดอะซิติก.....	47

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ราคาขายส่งออกต่างประเทศและปริมาณยางในสต็อกของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2550-2558.....	1
ตารางที่ 1.2 แผนดำเนินงานวิจัย.....	4
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด.....	7
ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของคอมโพสิทฟิล์ม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง).....	25
ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของคอมโพสิทฟิล์ม.....	35
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T _g) ของคอมโพสิท ฟิล์ม.....	44

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดในโลก ยางธรรมชาติจึงเป็นสินค้าหลักทางการเกษตรที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นจำนวนมาก แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ราคายางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจึงส่งผลให้มูลค่าการส่งออกของยางธรรมชาติลดลงจากการรายงานของสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย พบว่าในปี 2555 ราคาน้ำยางธรรมชาติอยู่ที่ 68.72 บาทต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตามราคาน้ำยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปี 2558 ราคาน้ำยางธรรมชาติลดลงเหลือกิโลกรัม 35.68 บาท ประเทศไทยไม่สามารถส่งออกยางธรรมชาติได้หมด ทำให้มีปริมาณยางในสต็อกมีมากถึง 642,895 เมตริกตัน [1] แนวทางในการแก้ปัญหาราคายางให้มีความเสถียรภาพ คือการเพิ่มปริมาณความต้องการการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศและลดการพึ่งพาการส่งออกวัตถุดิบ ด้วยการขยายตลาดของวัตถุดิบสามารถทำได้ การพัฒนาอุตสาหกรรมสร้างผลิตภัณฑ์และการใช้วัสดุจากยางธรรมชาติ เช่น ล้อยาง ถนนลาดยาง พื้นยางภายในอาคาร เบาะรถยนต์ เป็นต้น และการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ๆจากยางธรรมชาติเพื่อส่งออกในรูปแบบผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยเพิ่มมูลค่าและความต้องการ จะทำให้อายุการใช้งานมีเสถียรภาพ ยกระดับรายได้และคุณภาพชีวิตของเกษตรกรชาวสวนยางแล้ว ยังสามารถเพิ่มมูลค่าการส่งออกยาง ลดการขาดดุลทางการค้า และสร้างเศรษฐกิจของประเทศให้เข้มแข็งอีกด้วย นอกจากนี้การส่งเสริมงานวิจัยและพัฒนา (R&D of Products) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ ให้สามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์มากขึ้น และสามารถขยายไปสู่การทำธุรกิจยางครบวงจรในอนาคตได้

ตารางที่ 1.1 ราคาขายส่งออกต่างประเทศและปริมาณยางในสต็อกของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2550-2558[1]

	2555	2556	2557	2558
ราคาขายส่งออก ต่างประเทศ (บาท/กก.)	68.72	56.24	45.07	35.68
ปริมาณยางในส ต็อก (เมตริกตัน)	51,6675	502,855	516,576	642,895

ยางธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ประเภท เทอร์โมพลาสติก ในปัจจุบันจะพบว่ายางธรรมชาติถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ยางยืด ถุงมือยาง ยางยานพาหนะ หรืออุปกรณ์การแพทย์ เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีลักษณะที่เด่นคือ มีความยืดหยุ่นสูง[2, 3] แต่ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ทำให้สามารถละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ อีกทั้งไม่เสถียรกับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง จึงมีขีดจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นมาใช้แทนยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมแก่การใช้งานที่สถานะต่างๆ แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์จากยางสังเคราะห์ยังย่อยสลายได้ช้ากว่าผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติและส่วนใหญ่ยังคงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ วิธีการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติโดยการปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติให้สามารถใช้งานในสถานะที่หลากหลายจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ที่ผ่านมามีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยการเสริมแรงด้วยสารตัวเติมหลายชนิด เช่น เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica)[4-7] และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) เป็นต้น ในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่นิยมใช้สารเสริมแรงจำพวกเขม่าดำ เนื่องจากสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับยางได้ดี แต่อย่างไรก็ตามเขม่าดำได้จากการเผาไหม้ของปิโตรเลียม เป็นสาเหตุทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ออกสู่บรรยากาศ อีกทั้งยังเป็นสารก่อมะเร็ง [8, 9]

การนำเซลลูโลสมาใช้เป็นสารเสริมแรงจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากเซลลูโลสมีสมบัติเด่นในด้านของความแข็งแรง มีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถหมุนเวียนและเกิดขึ้นใหม่ได้ตลอดเวลา (renewability) รวมทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาผลิตเซลลูโลส เพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส คือความไม่เข้ากันระหว่างเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ เนื่องจากเซลลูโลสมีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่พื้นผิว เซลลูโลสจึงแสดงความเป็นขั้วที่สูง ส่วนยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วที่ต่ำ ส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำเนื่องจากการยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างเซลลูโลสกับยางธรรมชาติต่ำ ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มแรงยึดติดที่อินเทอร์เฟซ สามารถปรับปรุงสมบัติของยางคอมโพสิตได้ 3 ส่วน คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลลูโลส การเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางให้มีความเป็นขั้วมากขึ้น และการเติมตัวประสาน[10]

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาคอมโพสิตฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส โดยการเติมอัลจินเตเป็นสารเพิ่มความหนืดของสารละลายและขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อแบบสารละลาย ศึกษาปริมาณของเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล

คุณสมบัติในเชิงความร้อน การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) และการบวมของคอมโพสิทฟิล์มในตัวทำละลายที่มีขี้และไม่มีขี้ นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติทางโครงสร้างของคอมโพสิทฟิล์มด้วยสารละลายกรดอินทรีย์ เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของยางให้มีความคงรูปได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาผลของปริมาณของเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติในอัตราส่วนต่างๆ
- 1.2.2 ศึกษาผลของการปรับปรุงโครงสร้างคอมโพสิทฟิล์มด้วยกรดอะซิติก

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ
 - 1.3.1.1 ขนาดของเซลลูโลสที่ศึกษา 26.53 ไมโครเมตร
 - 1.3.1.2 อัตราส่วนของเซลลูโลสที่ศึกษา 0, 10, 20, 30, 40, 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
- 1.3.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอมโพสิทฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดอะซิติกเข้มข้น 0.25 โมลาร์ กับคอมโพสิทฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรดอะซิติก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส และพัฒนาคอมโพสิทฟิล์มที่มีคุณสมบัติเชิงกล เชิงความร้อนที่ดี มีความเสถียรทางเคมี และแตกสลายทางชีวภาพโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบหรือการผลิตวัสดุห่อหุ้ม และบรรจุภัณฑ์กันน้ำ

ตารางที่ 1.2 แผนดำเนินงานวิจัย

ลำดับ	แผนดำเนินงาน	ปี 2558			ปี 2559								
		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.		
1.	ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง												
2.	ตั้งสมมุติฐานของงานวิจัยที่ศึกษาและวางแผนการทดลอง												
3.	จัดเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ทดลอง												
4.	ทดลองและศึกษาการผสมเซลล์ดูโตสกับยางธรรมชาติ โดยวิธีการหล่อแบบสารละลาย												
5.	ทดลองและศึกษาการผสมเซลล์ดูโตสกับยางธรรมชาติด้วยวิธีใส่ขี้สับในสารผสม												
6.	ทดลองและศึกษาการผสมเซลล์ดูโตสในอัตราส่วนต่างๆกับยางธรรมชาติ												
7.	ทดลองและศึกษาการปรับปรุงโครงสร้างของคอมโพสิทฟิล์มด้วยกรดอะซิติก												
8.	รวบรวมข้อมูลจากการทดลอง												
9.	สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล												
10.	จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์												

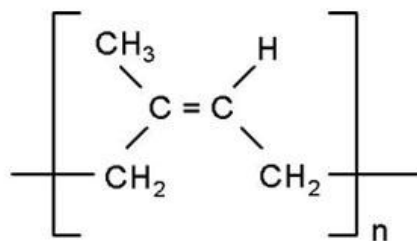
บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัย

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง และเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ยางที่ได้จากต้นพืช เรียกว่า ยางธรรมชาติ และยางที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี เรียกว่า ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนมีชื่อทางเคมี คือ 1,4-พอลิไอโซพรีน (1,4-polyisoprene) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นไอโซเมอร์แบบ *cis-isomer* ในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ของไอโซพรีน (isoprene) ซึ่งมีคาร์บอน 5 อะตอมกับไฮโดรเจน 8 อะตอมต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว แสดงดังรูปที่ 2.1 ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ส่งผลให้ยางแข็งเกินที่จะนำมาแปรรูปได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการบดยางก่อนที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ส่วนใหญ่นิยมใช้เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน [11]

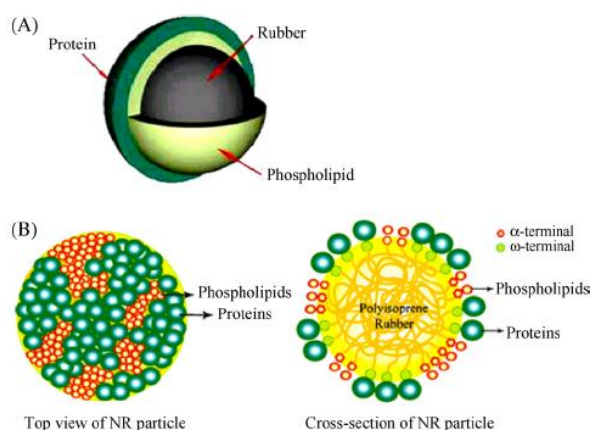
โดยทั่วไปการจัดเรียงโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นแบบอสัณฐาน มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส จึงสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของยางธรรมชาติในช่วงอุณหภูมินี้ค่อนข้างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดผลึก การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ จะทำให้ยางแข็งแรงมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางจะอ่อนและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่เกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น คือ มีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น

ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ คือมีความยืดหยุ่นที่สูง จึงถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ถุงมือยาง ยางรัดของ ยางยานพาหนะ รองเท้าและอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น ถึงแม้ว่ายางธรรมชาติจะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติมีข้อเสียบางประการ คือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ ยางไม่คงรูปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง จึงเป็นขีดจำกัดในการนำไปใช้งาน นอกจากนี้ มีความทนต่อสารละลายไม่มีขี้ด้า ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่าน (permeability) ของก๊าซและไอน้ำได้ เสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ เป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเป็นการยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ในระหว่างกระบวนการผลิตจึงต้องมีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) [11]

2.1.1 น้ำยาง

น้ำยาง (latex) จัดเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม มีความหนืดประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความเป็นกรดต่าง 6.5 - 7.0 เป็นสารแขวนลอยของอนุภาคยางในของเหลว รูปร่างของอนุภาคยางจะมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาด 0.05 - 5 ไมโครเมตร ถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีน และมีไขมันอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคและโปรตีนเป็นสารฟอสโฟไลปิดชนิด α -Lecithin ทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้อยู่ที่ผิวของอนุภาคยาง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะอนุภาคของเม็ดยางที่แขวนลอยในน้ำ [12]

2.1.1.1. ส่วนประกอบของน้ำยางสด ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นยาง (Dry rubber contents, DRC) เป็นอนุภาคยางของไอโซพรีนที่เชื่อมต่อกัน ประมาณ 2000 – 5000 หน่วยต่อ 1 โมเลกุล โดยน้ำยางสดที่ได้จากการกรีดยางจะมีเนื้อยางแห้ง ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์แขวนลอยอยู่ในน้ำ จากนั้นถ้านำน้ำยางไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex)

2. ส่วนประกอบอื่นๆที่ไม่ใช่ยาง (Non rubber content) มีสารประกอบต่างๆหลายชนิด เช่น น้ำตาล โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เกลือแร่ เอนไซม์ และสารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น[13]

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด[3]

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนัก)
ปริมาณเนื้อยาง	33
น้ำ	60
โปรตีน	2-3
กรดไขมัน	1-3
น้ำตาล	1
ซีลีเนียม	1
แร่ธาตุ	2-3 ppm
สิ่งสกปรก	8-10 ppm

2.1.1.2. การรักษาสภาพน้ำยางสด

น้ำยางสดสามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ เนื่องจากปัจจัย 2 ประการ คือ

1. ส่วนประกอบของโปรตีนที่อยู่รอบๆ ผิวของอนุภาคยางหรือชั้นโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง มีความสำคัญต่อความคงตัวของของเหลวของน้ำยาง เพราะโปรตีนมีหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของอนุภาคยาง ถ้ามีการสูญเสียน้ำในชั้นของโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยาง ซึ่งอาจเกิดจากการเติมแอลกอฮอล์หรือสารบางอย่างในน้ำยาง ทำให้น้ำยางสูญเสียความคงตัว ส่งผลให้อนุภาคยางเกิดการจับตัวเป็นก้อน

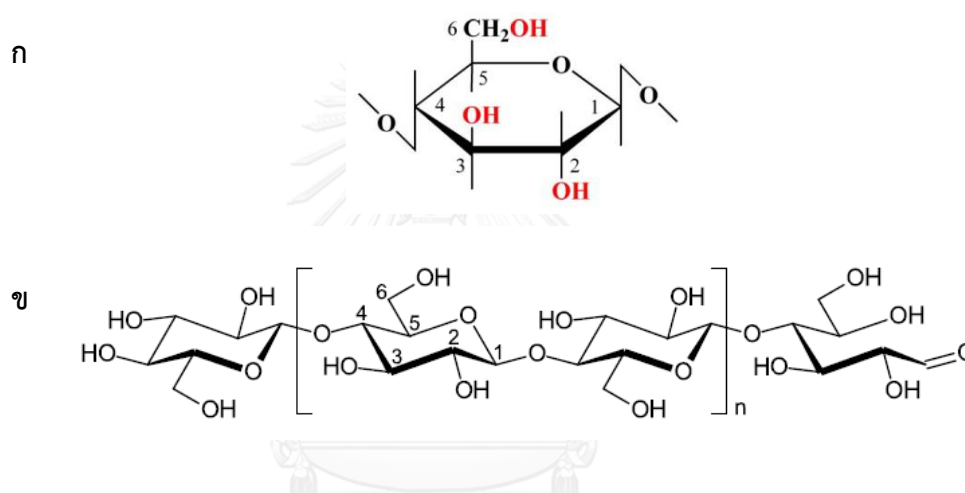
2. ประจุลบที่อยู่รอบๆ อนุภาคยางก่อให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาค จึงเกิดการกระจายตัวของอนุภาคยางทำให้น้ำยางคงสภาพเป็นของเหลว แต่ถ้าเกิดผลกระทบบทกระเทือนที่เป็นสาเหตุทำให้ประจุไฟฟ้าลดลง อนุภาคยางจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคยางลดลงจนกระทั่งเกิดการจับตัวเป็นก้อนยาง

น้ำยางสดที่ได้จากการกรีตต้นยางมีสถานะเป็นกลาง และมีสารประกอบน้ำตาลที่เป็นอาหารของแบคทีเรียและยีสต์ที่อยู่ในอากาศ ทำให้ไม่สามารถคงสภาพเป็นน้ำยางได้ไม่เกิน 6 ชั่วโมง เมื่อน้ำยางสดไหลออกจากต้นยาง แบคทีเรียในอากาศจะปะปนกับน้ำยางบนรอยกรีดยาง เปลือกต้นยาง และในถ้วยรับน้ำยาง ทำให้น้ำตาลเปลี่ยนเป็นสารที่เป็นกรดซึ่งไปทำลายชั้นโปรตีนที่หุ้มอนุภาคยาง ทำให้น้ำยางเสียสภาพการเป็นของเหลว น้ำยางจะหนืดขึ้น และจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งชาวบ้านเรียกว่า เม็ดพริก มีกลิ่นเหม็นบูดเน่าภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง การเสียสภาพแบบนี้ เรียกว่า การจับตัวที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural or spontaneous coagulation) การจับตัวของยางจะช้าเร็วเพียงใดขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิ ความคงตัวของน้ำยาง พันธุ์ยาง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางสดที่ได้อยู่ในสภาพของเหลว ไม่จับเป็นก้อน จำเป็นต้องเติมสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสด เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น อย่างไรก็ตามต้องเลือกสารเคมีรักษาสภาพน้ำยางสดให้เหมาะสมสำหรับการนำน้ำยางสดไปแปรรูปเป็นยางดิบชนิดต่างๆ ด้วย[13]



2.2 เซลลูโลส

เซลลูโลส ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ของพืชทุกชนิด ลักษณะการเรียงตัวของโมเลกุลเป็นเส้นตรง ไม่มีแขนงย่อย มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง โดยน้ำตาลกลูโคสจะต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง β -1,4 ส่วนใหญ่โมเลกุลของสายโซ่เซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคส 10,000 – 15,000 โมเลกุล แต่ละหน่วยของกลูโคสจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ (primary group 1 หมู่และ secondary group 2 หมู่) เหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาล แสดงดังรูปที่ 3 [14, 15]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช

ก. หน่วยย่อยของเซลลูโลส(กลูโคส) แสดงหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่[16]

ข. โครงสร้างเซลลูโลส[17]

เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคสมาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวจึงทำให้ไม่สามารถละลายน้ำได้และหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ในหน่วยน้ำตาลกลูโคส จะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้เซลลูโลสมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี และเป็นจุดที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดอะซิติกได้เป็นเซลลูโลสแอซิเตต หรือเส้นใยประดิษฐ์ชนิดอะซิเตต นอกจากนี้โครงสร้างของเซลลูโลสตรงบริเวณที่เกิดการต่อกันของ $-C-O-C-$ เป็นบริเวณที่ถูกทำลายได้ง่าย จากการเกิดออกซิเดชันหรือถูกทำลายด้วยสภาพภูมิอากาศ ทำให้โมเลกุลของสายโซ่เซลลูโลสขาดกลายเป็นส่วนเล็กๆคล้ายน้ำตาลและกลายเป็นอาหารพืชและสัตว์[18]

สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

1. การละลาย เซลลูโลสไม่สามารถละลายในน้ำได้แต่จะละลายได้ในกรดเข้มข้นหรือสารละลายของเกลือที่เข้มข้นได้ เช่น[19]

1.1 สารละลายกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) อย่างรวดเร็วในสารละลายกรด ที่อุณหภูมิห้อง และจะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ

1.2 สารละลายแอลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยชนิดของเซลลูโลสทั้ง 3 ชนิดสามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

1.2.1 แอลฟา-เซลลูโลส (α -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 เปอร์เซ็นต์

1.2.2. เบต้า-เซลลูโลส (β -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ที่อุณหภูมิห้อง แต่จะตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด

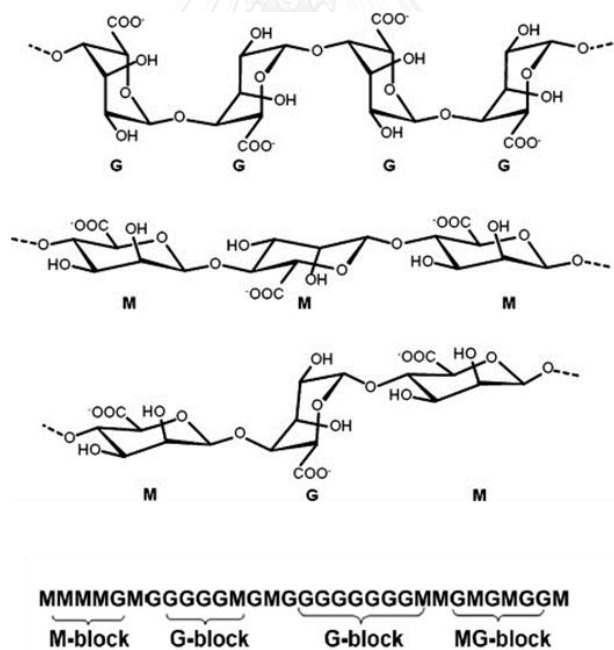
1.2.3 แกมมา-เซลลูโลส (γ -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5เปอร์เซ็นต์ และสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด

2. ความหนืด เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าความเข้มข้นของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนืดของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

3. การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับความชื้น โดยปริมาณความชื้นที่เซลลูโลสดูดซับจะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพบางประการของเส้นใย เช่น เมื่อความชื้นสูงขึ้นเส้นใยจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น[18]

2.3 อัลจิเนต

อัลจิเนต (alginate) เป็นสารที่ได้จากการสกัดผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล มีลักษณะโมเลกุลเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน จัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประเภท พอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาล ได้แก่ กรดแมนนูโรนิก (D-mannuronic acid, M) และกรดกลูคูโรนิก (L-guluronic acid, G) ปริมาณของอัลจิเนตและการเรียงลำดับของ M และ G ขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งการเจริญเติบโตของสาหร่าย ในโครงสร้างโมเลกุลจะประกอบด้วยมอนอเมอร์ M และ G เรียงต่อกันเป็นไฮโปพอลิเมอร์ เรียกว่า M-blocks และ G-blocks ตามลำดับ และบางส่วนของโมเลกุลจะประกอบด้วยมอนอเมอร์ของ MG เรียงตัวเป็นโคพอลิเมอร์ เรียกว่า MG-blocks แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยสัดส่วนของอนุพันธ์น้ำตาลเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นเจลที่แข็งที่ความเข้มข้นของโลหะประจุบวกเฉพาะ (polyvalent metal cation) แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณที่สูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสภาวะในการเกิดเจลที่ง่าย[20, 21]

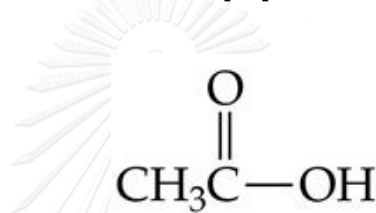


รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของอัลจิเนต[20, 22]

อัลจิเนต มีสมบัติเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) นิยมนำมาใช้เป็น สารเพิ่มความหนืด (thickening agent), สารเพิ่มความคงตัว (stabilizing agent), สารก่อให้เกิดเจล (gelling agent), สารที่ทำให้มีอิมัลชันคงตัว (emulsifier) เป็นต้น[21]

2.4 กรดอะซิติก

กรดอะซิติก (acetic acid) หรือกรดน้ำส้ม เป็นสารประกอบเคมีอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่อยู่ในน้ำส้มสายชู มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลเป็นกรดอินทรีย์ประเภท กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid, COOH) มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีรสเปรี้ยวและกลิ่นฉุน ไอระเหยของกรดสามารถทำให้เสตาและระคายเคืองจมูก เมื่อละลายน้ำจะมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน กรดอะซิติก อาจเกิดจากกระบวนการหมัก (fermentation) เอทิลแอลกอฮอล์ ด้วยแบคทีเรียอะซิติกโตแบคเตอร์ (Acetobacter) และกลูโคโนแบคเตอร์ (Gluconobacter) หรือจากการสังเคราะห์ทางเคมีโดยการออกซิไดซ์อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) หรือใช้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้เมธานอล แล้วทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์อีกครั้งหนึ่งจนได้กรดอะซิติก[23]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของกรดอะซิติก

2.5 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเซลลูโลสและยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเซลลูโลสกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นการรวมคุณสมบัติความยืดหยุ่นของยางกับความแข็งแรงของเส้นใย แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญในการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส คือความไม่เข้ากันระหว่างยางธรรมชาติกับเซลลูโลส เพราะยางธรรมชาติและเซลลูโลสมีความเป็นขั้วแตกต่างกันค่อนข้างสูง ทำให้การยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างเซลลูโลสและยางธรรมชาติต่ำ จึงส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงการยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างเซลลูโลสและยางธรรมชาติสามารถปรับปรุงได้ 3 วิธีคือ การปรับสภาพพื้นผิวของเซลลูโลส การเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางให้มีความเป็นขั้วมากขึ้นและการใส่สารช่วยให้เข้ากัน

2.5.1 การปรับสภาพพื้นผิวของเซลลูโลส

Hakkou และคณะ (2005) ศึกษาความสามารถในการเปียก (wettability) หลังจากให้ความร้อนกับเส้นใยภายใต้บรรยากาศเฉื่อย โดยการให้ความร้อนกับเส้นใยในช่วงอุณหภูมิ 20 – 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) หลังจากให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 130-160 องศาเซลเซียส และการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าอุณหภูมิในช่วง 260 องศาเซลเซียส พีคของคาร์บอนิลที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1730 cm^{-1} มีลักษณะลดลงซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของเอมิเซลลูโลส ลิกนินและเอมิเซลลูโลสสามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้เส้นใยหดตัวและเกิดผลึกของเส้นใยมากขึ้น[24]

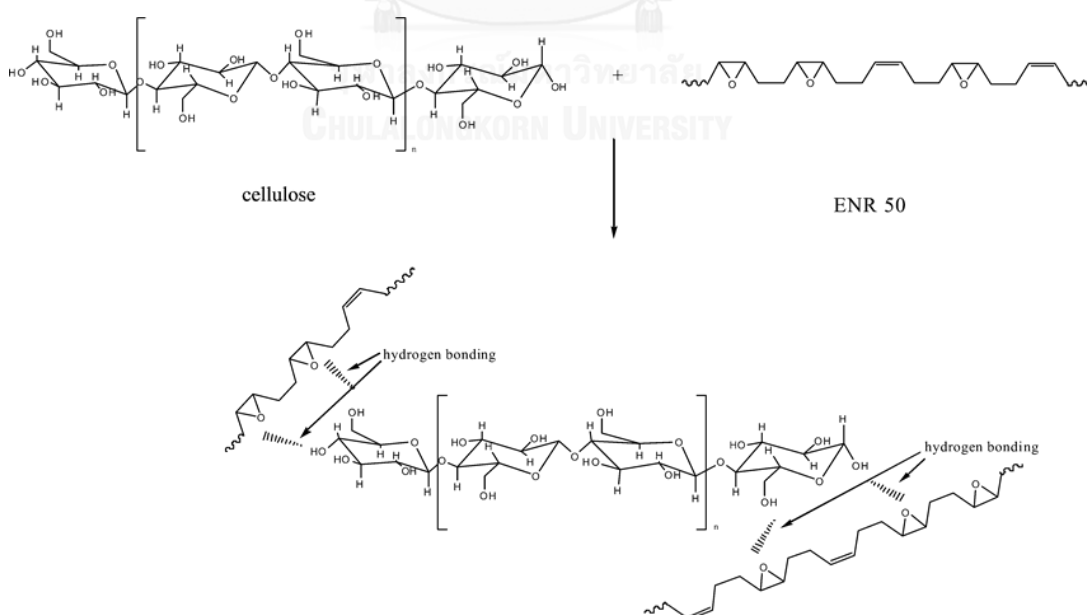
Edeerozey และคณะ (2007) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยปอแก้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3, 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทดลองโดยการแช่เส้นใยปอแก้วในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใยปอแก้วที่แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนที่อยู่บนพื้นผิวของเส้นใยได้ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยสะอาดที่สุดแต่กลับมีค่าทนต่อแรงดึงที่ต่ำ เนื่องจากเส้นใยเกิดความเสียหาย ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นใยมีพื้นผิวที่สะอาดและมีค่าทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด พื้นผิวของเส้นใยที่สะอาดสามารถช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ได้ขึ้น[25]

Chen และคณะ (2015) ศึกษาการละลายเซลลูโลส 4 ประเภทในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรีย ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรียคือ 7 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ -12.6 องศาเซลเซียส พบว่าเซลลูโลสประเภทที่ 1 และ 2 ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรียในปริมาณที่ต่างกันเนื่องจากมีความซับซ้อนของพันธะไฮโดรเจนที่ต่างกัน การมีพลังงานทางโครงสร้างที่ต่ำทำให้เซลลูโลสประเภทที่ 3 ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรียได้น้อย และเซลลูโลสชนิดที่ 4 มี degree of polymerization (DP) ต่ำ คือ มีปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) น้อย จึงมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลน้อยทำให้ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรียได้ดี[26] เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรียสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds) ระหว่างโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) จึงทำให้เซลลูโลสสามารถละลายน้ำได้[27]

2.5.2 การเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของยางให้มีความเป็นขี้

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) เป็นยางที่ถูกดัดแปลงมาจากยางธรรมชาติ โดยการเติมออกซิเจนตรงพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ ทำให้เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงเป็นยางที่มีความเป็นขี้สูงกว่ายางธรรมชาติทั่วไป ส่งผลให้มีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนไป เช่น สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขี้และสามารถป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดี ดังนั้นยางธรรมชาติอีพอกไซด์จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ที่มีขี้ได้ เช่น เซลลูโลส[28-30] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์

Ismail และคณะ (2006) ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทระหว่างเยื่อกระดาษกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ ปริมาณเยื่อกระดาษที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10, 20, 30 และ 40 ในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ พบว่าความทนต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมโพสิทจะลดลงตามปริมาณของเยื่อกระดาษที่เพิ่มขึ้น แต่มอดูลัสของยังของคอมโพสิทจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้คอมโพสิทของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์จะมีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังสูงกว่าคอมโพสิทของยางธรรมชาติ เนื่องจากการยึดติดที่ดีระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษกับหมู่อีพ็อกซีของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์[31]

Soheilmoghaddam และคณะ (2013) ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิทฟิล์มระหว่างเซลลูโลสและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy) พบว่าเซลลูโลสกระจายตัวในยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ได้ดีและไม่เกิดการแยกเฟสระหว่างเซลลูโลสกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ นอกจากนี้คอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณยางธรรมชาติอีพ็อกซีไธซ์ 20 เปอร์เซ็นต์จะมีความเสถียรทางความร้อนและปริมาณเถ้ามากกว่าเซลลูโลส[28]

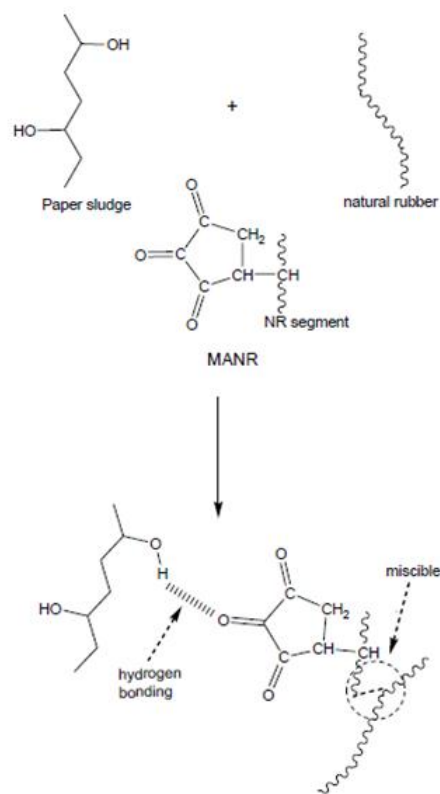
2.5.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน

สารช่วยให้เข้ากัน เป็นสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่ช่วยให้คอมโพสิทมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น โดยจะต้องสามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดได้ ซึ่งจะเข้าไปอยู่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างของผสมและช่วยลดแรงดึงผิว ส่งผลให้คอมโพสิทมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลดีขึ้น เช่น ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นสารที่สามารถปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผิวทั้งสองโมเลกุลของยางธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติได้ แสดงดังรูปที่ 2.7

Ismail และคณะ (2008) ศึกษาปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่มีผลต่อคอมโพสิท ปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 5, 10, 15, 20 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเตรียมที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที พบว่ามอดูลัสของยัง ความทนต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมโพสิทเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เนื่องจากมีแรงยึดระหว่างเส้นใยพอลัมกับยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นและยังเป็นการช่วยลดการหลุดออกของเส้นใยพอลัมจากคอมโพสิท[32]

Zheng และคณะ (2009) ศึกษาคอมโพสิทระหว่างเส้นใยฝ้ายกับยางธรรมชาติที่ใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์และไม่ใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ โดยการเตรียมยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่

อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที การวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าอย่างธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดพีคที่ตำแหน่ง 1784 และ 1860 cm^{-1} เป็นพีคที่แสดงถึงการเกิดมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนยางธรรมชาติ และคอมโพลีที่ผสมเส้นใยฝ้ายกับยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดพีคที่ตำแหน่ง 1780 และ 1856 cm^{-1} จะพบว่าพีคเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์ นอกจากนี้คอมโพลีที่ใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในยางธรรมชาติจะมีการยึดติดระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ได้ดีจึงทำให้มีค่าความแข็ง ความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังสูงกว่าคอมโพลีที่ไม่ใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์[33]



รูปที่ 2.7 แสดงการยึดติดธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ระหว่างเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ[32]

2.6 การปรับปรุงคุณสมบัติของยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส

ยางธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีลักษณะที่โดดเด่น คือ มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง เช่น เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ยางสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ และยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ แต่ยางธรรมชาติจะไม่เสถียรกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง คือ เมื่อได้รับความร้อนจะเหนียวและอ่อนตัว แต่จะแข็งและเปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งานของยางธรรมชาติ แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยการใช้เส้นใยจากธรรมชาติเป็นตัวเสริมแรง เนื่องจากเส้นใยสามารถหมุนเวียนและเกิดขึ้นใหม่ได้ตลอดเวลา มีความแข็งแรงเฉพาะที่สูง มีความหนาแน่นต่ำและสามารถย่อยสลายได้ง่าย จึงเป็นการรวมคุณสมบัติที่เด่นของยางธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติ ทำให้ได้คอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

Ismail และคณะ (2005) ศึกษาปริมาณเยื่อกระดาษที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้ยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยให้เข้ากันกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน ปริมาณของเยื่อกระดาษที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติอยู่ในช่วง 10 – 40 ในหนึ่งร้อยส่วนของยางธรรมชาติ การเตรียมเยื่อกระดาษที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติจะถูกอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล จนกระทั่งเป็นผงขนาดประมาณ 300 ไมโครเมตร พบว่า เมื่อปริมาณของเยื่อกระดาษเพิ่มขึ้น ความทนต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมโพสิตจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบคอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันกับคอมโพสิตที่ไม่ได้ใส่สารช่วยให้เข้ากัน คอมโพสิตที่ใส่สารช่วยให้เข้ากันมีความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของยังและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมากกว่าคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน เนื่องจากยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยเพิ่มแรงยึดที่อินเทอร์เฟซระหว่างเยื่อกระดาษและยางธรรมชาติ และจากการศึกษาการกระจายตัวของเซลลูโลสในคอมโพสิตพบว่าคอมโพสิตฟิล์มที่ไม่ใส่สารช่วยให้เข้ากัน เซลลูโลสเกิดการรวมตัว[34]

Ismail และคณะ (2006) ศึกษาปริมาณเยื่อกระดาษที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ พบว่าความทนต่อแรงดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมโพสิตลดลง แต่โมดูลัสของยังเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเยื่อกระดาษที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และการเสริมแรงยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ด้วยเยื่อกระดาษจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต พบว่า คอมโพสิตจะมีความทนต่อแรงดึง โมดูลัสของยังมากกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากมีแรงยึดติดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเยื่อกระดาษกับหมู่อีพ็อกซีของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์[31]

Bendahou และคณะ (2010) ศึกษาปริมาณเซลลูโลสจากปาล์มที่มีผลต่อสมบัติเชิงความร้อน และการบวมของคอมโพสิตฟิล์มในโพลีเอทิลีนและน้ำ ปริมาณเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติ อยู่ในช่วง 1 – 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของคอมโพสิต ปริมาณของเซลลูโลสไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) แต่ปริมาณของเซลลูโลสจะมีผลต่อการบวมของคอมโพสิตฟิล์มในโพลีเอทิลีนและน้ำ จากการศึกษาการบวมคอมโพสิตฟิล์มในโพลีเอทิลีน พบว่าการบวมโพลีเอทิลีนของคอมโพสิตฟิล์มลดลงเมื่อปริมาณเซลลูโลสในเมทริกซ์เพิ่มขึ้น และการบวมคอมโพสิตฟิล์มในน้ำเป็นเวลา 70 ชั่วโมง คอมโพสิตฟิล์มจะบวมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น[35]

Bras และคณะ (2010) ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของเซลลูโลสภายในเมทริกซ์ และปริมาณเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและการแตกสลายทางชีวภาพของคอมโพสิต โดยเตรียมเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยวิธีไฮโดรไลซิสกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 นาที ปริมาณเซลลูโลสที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0 – 12.5 เปอร์เซ็นต์ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสภายในเมทริกซ์ และปริมาณของเซลลูโลสที่เสริมแรงยางธรรมชาติจะมีผลต่อสมบัติเชิงกล พบว่ามอดูลัสของแข็งและความทนต่อแรงดึงของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณของเซลลูโลสยังมีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิต โดยคอมโพสิตที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสปริมาณ 12.5 เปอร์เซ็นต์ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี ทั้งนี้เมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น คอมโพสิตจะสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เร็วขึ้น และจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของคอมโพสิต พบว่าปริมาณของเซลลูโลสไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางธรรมชาติ และคอมโพสิตจะอยู่ในช่วง - 64 องศาเซลเซียส[36]

Visakh และคณะ (2011) ศึกษาปริมาณของเซลลูโลสในคอมโพสิตฟิล์ม โดยเซลลูโลสที่ศึกษาได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 64 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 130 นาที และศึกษาปริมาณของเซลลูโลสในช่วง 2.5, 5, และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) พบว่าที่พื้นผิวของคอมโพสิตมีลักษณะขรุขระ เซลลูโลสในปริมาณ 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักกระจายตัวในคอมโพสิตได้ดีไม่เกิดการรวมกลุ่ม ความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นแต่ความยืดหยุ่น จุดขาดของคอมโพสิตลดลง และการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิตด้วยเทคนิค TGA ที่สภาวะอากาศ(air) พบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวของยางธรรมชาติอยู่

ที่ 260 องศาเซลเซียส และคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ 2.5, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีอุณหภูมิสลายตัวอยู่ที่ 273, 276, 278 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังนั้นความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลลูโลส[37]

Abraham และคณะ (2012) ศึกษาการแตกสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์มที่เสริมแรงด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ และเปรียบเทียบการแตกสลายทางชีวภาพระหว่างคอมโพสิตที่ไม่เชื่อมขวางกับคอมโพสิตที่เชื่อมขวางด้วยสาร Sulphur, Zinc oxide (ZnO), Zinc mercaptobenzothiazole (ZMBT) และ Zinc di-thiocarbamate (ZDC) ปริมาณเซลลูโลสที่ศึกษาอยู่ในช่วง 2.5, 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซลลูโลสในเมทริกซ์ ดังนั้นคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างคอมโพสิตฟิล์มที่ไม่เชื่อมขวางกับคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง คอมโพสิตฟิล์มที่ไม่เชื่อมขวางสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เร็วกว่าคอมโพสิตที่เชื่อมขวาง เนื่องจากการเชื่อมขวางทำให้โมเลกุลเชื่อมกันด้วยพันธะที่แข็งแรงขึ้น ทำให้จุลินทรีย์แทรกตัวเข้าไปยาก[38]

Soheilmoghammad และคณะ (2013) ศึกษาการเสริมแรงยางธรรมชาติพ็อกซีไคซ์ด้วยเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ความเสถียรภาพทางความร้อนและความเป็นผลึกของคอมโพสิต พบว่า ความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสกับหมู่อีพ็อกซีของยางธรรมชาติพ็อกซีไคซ์ และจากการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ที่การสูญเสียน้ำหนัก 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิในการสลายตัวที่ 346 องศาเซลเซียสแต่อุณหภูมิในการสลายตัวของยางธรรมชาติอยู่ที่ 290 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเสริมแรงยางธรรมชาติพ็อกซีไคซ์ด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆมีผลต่อความเป็นผลึกของคอมโพสิต โดยความเป็นผลึกของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของเซลลูโลส[28]

Rajisha และคณะ(2014) ศึกษาปริมาณของเซลลูโลสที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยา ความเป็นผลึก สมบัติเชิงกล และการบวมตัวของคอมโพสิตฟิล์ม โดยเตรียมเซลลูโลสด้วยวิธีไฮโดรไลซิสกับกรดซัลฟิวริก ปริมาณเซลลูโลสที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0 – 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) คอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเกิดการรวมตัวจับเป็นกลุ่ม แต่ปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความเป็นผลึก สมบัติเชิงกล และการบวมตัวของคอมโพสิต คือ ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นอสัณฐาน แต่เมื่อเสริมแรงด้วยเซลลูโลส ทำให้คอมโพสิตฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเซลลูโลส ซึ่งส่งผลให้

คอมโพสิตที่มีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น และการบวมตัวของคอมโพสิตมากขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสมากขึ้น[39]

Dan และคณะ (2014) ศึกษาปริมาณเซลลูโลสที่มีผลต่อสมบัติเชิงความร้อนของคอมโพสิต และการเกิดหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิต จากการวิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าคอมโพสิตมีความเสถียรภาพทางความร้อนลดลงเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้าย ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเซลลูโลสซึ่งวิเคราะห์จาก DSC และจากเทคนิค FTIR ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3366 1056 แสดงหมู่ไฮดรอกซิลและ C-O ตามลำดับของเซลลูโลส[40]



บทที่ 3

วัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุ

น้ำยางเข้มข้น ซึ่ได้จากศูนย์วิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 60 % (DRC 60%) เซลลูโลสได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทเทพพัฒนากระดาษ จำกัด กรดอะซิติกและอัลจินตซึ่จากบริษัทชิกมา-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การเตรียมเซลลูโลส

อบเซลลูโลสในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นบดเซลลูโลสด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill รุ่น PM 100, นำเข้าโดย บริษัท ไชแอนติฟิคโปรดิวชั่น จำกัด, ผลิตที่ Haan, Germany) ด้วยความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที และร่อนด้วยตะแกรงคัดขนาดโดยเซลลูโลสที่ผ่านการร่อนจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 25 ไมโครเมตร

3.2.2 การขึ้นรูปคอมโพสิตฟิล์ม

อัตราส่วนของปริมาณเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติจะอยู่ในช่วง 0 - 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง โดยผสมไมโครเซลลูโลสกับน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) จากนั้นทำการโซนิเกตด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่ความถี่ 500 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และเติมอัลจินต 1% ลงในสารผสม กวนด้วยเครื่องกวนสารเป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นผสมสารแขวนลอยกับน้ำยางสด ก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยถาดพลาสติกและอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.3 การปรับสมบัติคอมโพสิตฟิล์มด้วยกรดอะซิติก

แช่คอมโพสิตฟิล์มในกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และล้างคอมโพสิตฟิล์มด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกระทั่งพีเอช (pH) กลายเป็น 7 จากนั้นอบคอมโพสิตฟิล์มในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3 การวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะคอมโพสิตฟิล์ม

3.3.1 Field emission scanning electron microscopy

เพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา ลักษณะรูปร่าง ขนาดของเซลล์โลส และการกระจายตัวของไมโครเซลล์โลสภายในคอมโพสิตฟิล์ม โดยการใช้เครื่อง Field emission scanning electron microscopy (รุ่น JEOL JSM-7610F, Tokyo, Japan)

3.3.2 Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณและการเกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ของคอมโพสิตฟิล์มที่เปลี่ยนไป โดยใช้เครื่อง FTIR spectrometer (รุ่น CPU32, Waltham, USA)

3.3.3 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction : XRD)

เพื่อวิเคราะห์ความเป็นผลึกของคอมโพสิตฟิล์มด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (Bruker AXS Model D8 Discover, Germany) ศึกษาในช่วงขนาดของมุม 5 – 45 องศา และเปรียบเทียบความเป็นผลึกของคอมโพสิตฟิล์มที่มีเซลล์โลสในอัตราส่วนต่างๆ

3.3.4 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เพื่อวิเคราะห์ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength), โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at Break) ของคอมโพสิตฟิล์ม ด้วยการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM D882 โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron 5582, Southampton, UK) โดยแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ยของการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งและแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดสอบ

3.3.5 Water absorption capacity (WAC)

เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิตฟิล์ม ที่มีปริมาณเซลล์โลสในอัตราส่วนต่างๆ โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตร (Wd) จากนั้นแช่ในน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ที่อุณหภูมิห้อง โดยตัวอย่างจะถูกชั่งน้ำหนักออกด้วยกระดาษเช็ดทำความสะอาดไม่ทิ้งขุย (Kimwipes paper) และชั่งน้ำหนัก (Wh) กระทำซ้ำๆ จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง ความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิตฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$WAC(\%) = \left(\frac{W_h - W_d}{W_d} \right) \times 100$$

W_h น้ำหนักของตัวอย่างคอมโพสิตที่อิมตัวด้วยน้ำ และ W_d น้ำหนักของตัวอย่างคอมโพสิตที่แห้ง

3.3.6 การบวมของโพลีเอทิลีน

เพื่อศึกษาการบวมของคอมโพสิตฟิล์มในตัวอย่างที่ไม่มีขี้ผึ้ง ด้วยการเตรียมตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.5x2.5x2.5 เซนติเมตร นำไปอบให้แห้งก่อนที่จะชั่งน้ำหนัก (W_0) จากนั้นแช่ตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มในโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิห้อง และชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งครบ 8 ชั่วโมง (W_t) การบวมของโพลีเอทิลีนสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$W_{\text{uptake}} = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100$$

W_0 น้ำหนักเริ่มต้นของคอมโพสิตฟิล์ม และ W_t น้ำหนักหลังจากการแช่โพลีเอทิลีนที่เวลานั้นๆ (น้ำหนักที่แสดงการบวมของโพลีเอทิลีนเป็นค่าเฉลี่ยที่ทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง)

3.3.7 การย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์ม

การย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์มในดินจากงานวิจัย[41] เตรียมตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มขนาด 5x5x5 เซนติเมตร อบให้แห้งก่อนที่จะชั่งน้ำหนัก (W_0) หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปฝังดินโดยกำหนดให้มีปริมาณดินในกระถางลึก 10 เซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิที่สิ่งแวดล้อม เป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดเวลา ตัวอย่างจะถูกนำมาล้างด้วยน้ำให้สะอาดก่อนที่จะนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง (W_t) ซึ่งปริมาณน้ำหนักรายของตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{Weight loss} = \left(\frac{W_0 - W_t}{W_0} \right) \times 100$$

W_0 น้ำหนักเริ่มต้นของคอมโพสิตฟิล์ม และ W_t น้ำหนักหลังจากการฝังดินที่เวลานั้นๆ (น้ำหนักที่แสดงการลดลงของตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มเป็นค่าเฉลี่ยที่ทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง)

3.3.8 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิทฟิล์ม

- Thermo gravimetric analysis (TGA)

วิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature, Td) และปริมาณเถ้าถ่าน (Char residue) ของคอมโพสิทฟิล์ม ในช่วงอุณหภูมิ 35 - 600 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้แก๊สไนโตรเจน โดยใช้เครื่อง Thermogravimetry (NETZSCH TG 209F3, Germany)

- Differential scanning calorimetric analysis (DSC)

วิเคราะห์หาอุณหภูมิจากการเปลี่ยนสถานะ (glass transition, Tg) ในช่วงอุณหภูมิ -100 ถึง 300 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้แก๊สไนโตรเจน โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (NETZSCH DSC 204F1, England)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสที่ได้จากต้นยูคาลิปตัส โดยปริมาณของเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติอยู่ในช่วงอัตราส่วน 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง แสดงดังตารางที่ 4.1 และปรับปรุงสมบัติทางโครงสร้างของคอมโพสิทฟิล์มด้วยกรดอะซิติก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติเชิงความร้อน ความเสถียรทางเคมี รวมถึงศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา และการแตกสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมจริงของคอมโพสิทฟิล์ม

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของคอมโพสิทฟิล์ม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง)

คอมโพสิทฟิล์ม	ยางธรรมชาติ (%) (DRC 60%)	เซลลูโลส (%)
NR	100	0
AC10/90	90	10
C10/90	90	10
C20/80	80	20
C30/70	70	30
C40/60	60	40
C50/50	50	50

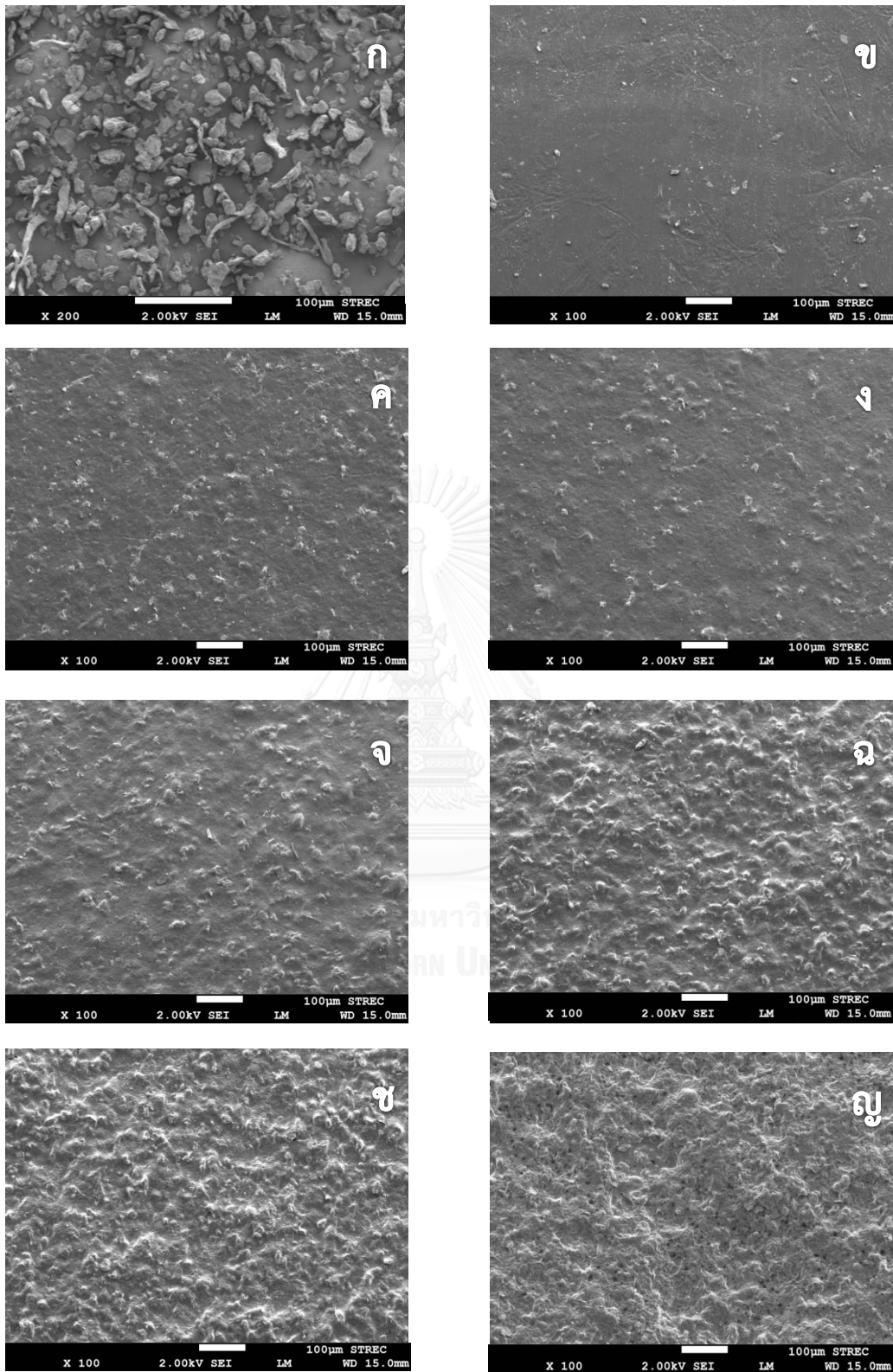
ยางธรรมชาติที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% (DRC 60%)

4.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทฟิล์ม

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ลักษณะรูปร่างของเซลลูโลสและการกระจายตัวของเซลลูโลสภายในเมทริกซ์ด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscopy (FESEM) พบว่า เซลลูโลสที่ได้จากการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอลและร่อนด้วยตะแกรงคัดขนาด เพื่อควบคุมขนาดของเซลลูโลสก่อนนำมาผสมกับยางธรรมชาติ จากการวิเคราะห์ขนาดของเซลลูโลสด้วยเครื่อง Laser particle size distribution (PSD) พบว่าเซลลูโลสที่นำมาเสริมแรงยางธรรมชาติในงานวิจัยนี้มีขนาดประมาณ 26.5 ไมโครเมตร

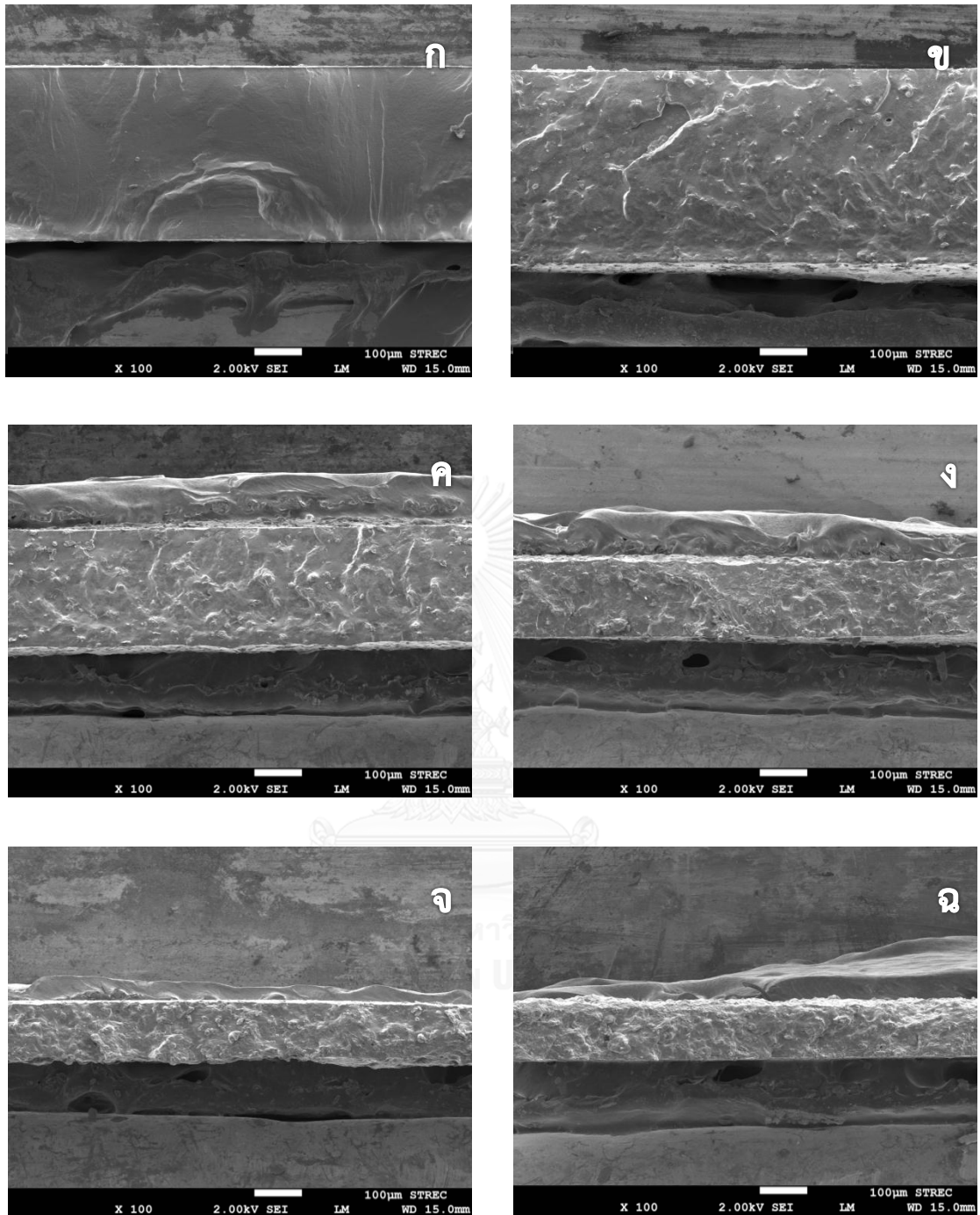
จากรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะรูปร่างของเซลลูโลส พื้นผิวของยางธรรมชาติและการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆ ที่ผิวของเมทริกซ์ จากภาพ (ก). แสดงลักษณะรูปร่างของเซลลูโลสพบว่า เซลลูโลสมีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนมีขนาดประมาณ 10-30 ไมโครเมตร (ข). แสดงลักษณะพื้นผิวของยางธรรมชาติ มีลักษณะเรียบ ไม่มีรอยขรุขระ และจากภาพ (ค). - (ง). แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในเมทริกซ์ที่อัตราส่วน 10 - 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจากภาพ (ค). และ (ง). เป็นภาพที่แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภาพ (ค). เป็นภาพคอมโพสิทฟิล์มที่นำไปแช่กรดอะซิติก ส่วนภาพ (ง.) เป็นคอมโพสิทฟิล์มที่ไม่ได้นำไปแช่กรดอะซิติก พบว่า ลักษณะพื้นผิวของคอมโพสิทฟิล์มทั้งสองไม่มีความแตกต่างกัน มีความขรุขระเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวของยางธรรมชาติ เนื่องมาจากเซลลูโลส ส่วนในรูป (จ). - (ญ). เป็นภาพที่แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในเมทริกซ์ที่อัตราส่วน 20 - 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ลักษณะพื้นผิวของคอมโพสิทฟิล์มมีความขรุขระเพิ่มขึ้น มีการกระจายตัวของเซลลูโลสบนพื้นผิวของยางธรรมชาติอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการรวมกลุ่มกันของเซลลูโลส ภาพ (ข). แสดงถึงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วนที่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เซลลูโลสเริ่มรวมตัวจับกันเป็นกลุ่ม และเมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสมากขึ้น เซลลูโลสเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มมากขึ้น ทำให้คอมโพสิทฟิล์มเริ่มไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และการจับตัวของกลุ่มเซลลูโลส ทำให้เกิดรูพรุน แสดงดังภาพ (ญ). แสดงถึงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วนที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังนั้น เมื่อปริมาณเซลลูโลสมากขึ้น เซลลูโลสจะเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มมากขึ้น ทำให้พื้นผิวของคอมโพสิทฟิล์มมีความเป็นรูพรุนมากขึ้นและเกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของคอมโพสิทฟิล์ม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abraham และคณะ (2013) พบว่า การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คอมโพสิทฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เซลลูโลสกระจายสม่ำเสมอในยางธรรมชาติ แต่เมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น คอมโพสิทฟิล์มเกิดรูพรุนเนื่องมาจากการจับตัวกันเป็นกลุ่มของเซลลูโลส[42]

และจากรูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วน 0 - 50 เปอร์เซ็นต์ภายใน (cross section)คอมโพสิท พบว่า เซลลูโลสกระจายตัวภายในเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ และไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างยางธรรมชาติและเซลลูโลส



รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของเซลลูโลสในอัตราส่วนต่างๆที่ผิวของคอมโพสิต (ก). เซลลูโลส (ข).

NR (ค). AC10/90 (ง). C10/90 (จ). C20/80 (ฉ). C30/70 (ช). C40/60 (ญ). C50/50



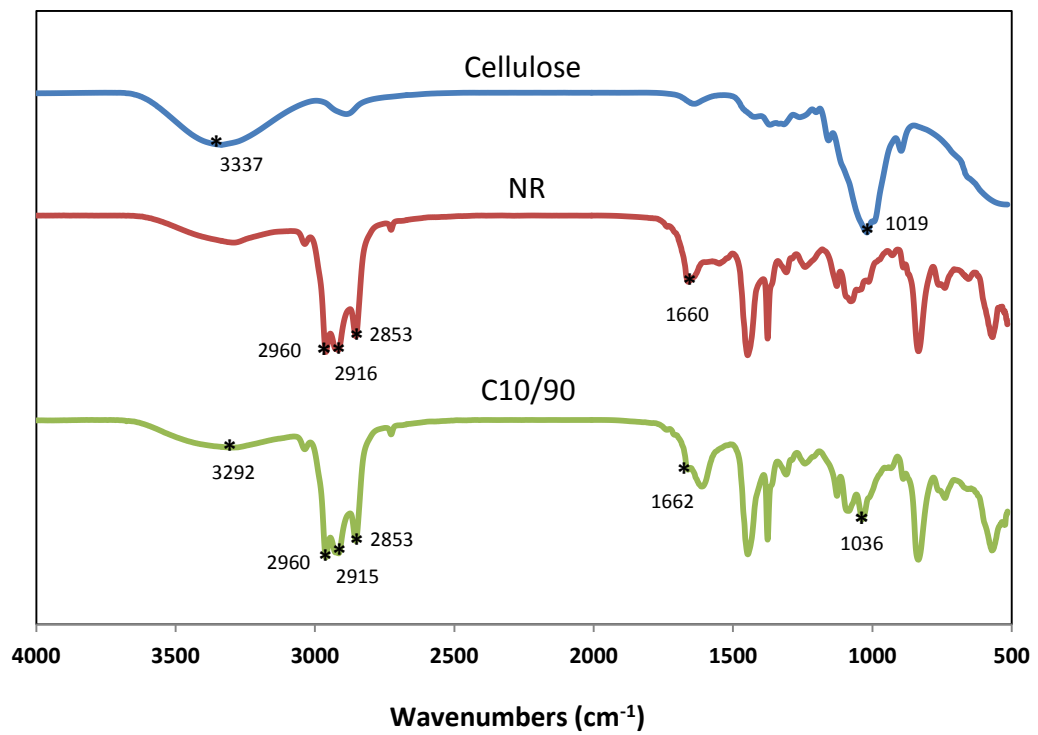
รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของเซลลูลอสในอัตราส่วนต่างๆภายใน (cross section) ของคอมโพสิต (ก). NR (ข). C10/90 (ค). C20/80 (ง). C30/70 (จ). C40/60 (ฉ). C50/50

4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิทฟิล์ม

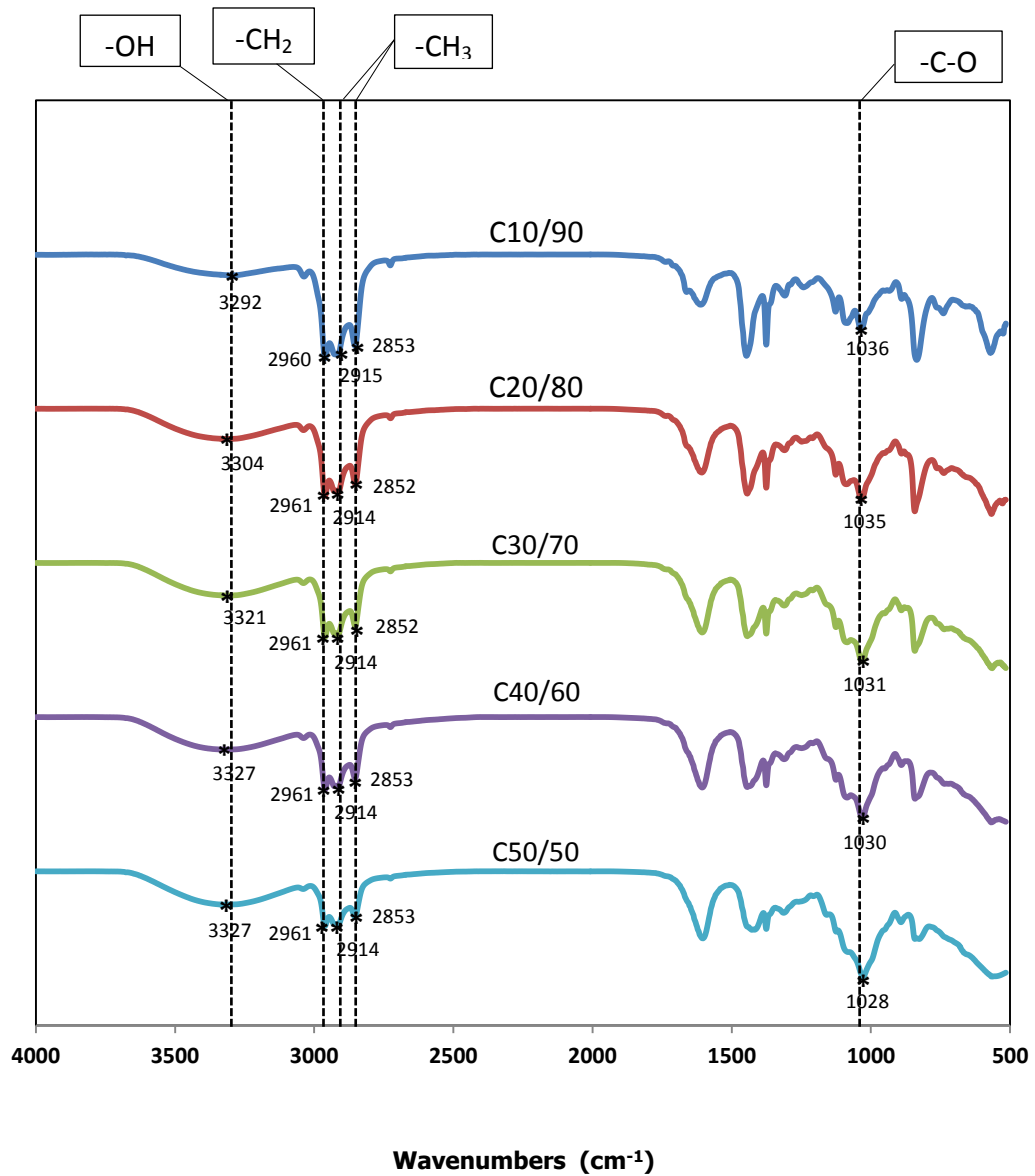
โดยทั่วไปเซลลูโลสดูดกลืนคลื่นแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3000 – 3500 เซนติเมตร⁻¹ ทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นเป็นคลื่นความถี่แบบยืด (stretching) ที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลลูโลส จากรูปที่ 4.3 เซลลูโลสดูดกลืนเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 3337 และ 1019 เซนติเมตร⁻¹ เป็นคลื่นความถี่ในการสั่นแบบยืดที่แสดงหมู่ไฮดรอกซิล และเป็นคลื่นความถี่ในการสั่นแบบยืดของ C - O ตามลำดับ[40, 43] ยางธรรมชาติดูดกลืนเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 2853 และ 2916 เซนติเมตร⁻¹ เป็นความถี่ในการสั่นแบบยืดของหมู่เมทิล (methyl group, - CH₃) ตำแหน่งเลขคลื่น 2960 เซนติเมตร⁻¹ เป็นความถี่ในการสั่นแบบยืดของเมทิลีน(methylene, - CH₂) และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1660 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ C=C[44] นอกจากนี้คอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงการดูดกลืนเลขคลื่นที่ตำแหน่ง 3292, 2960, 2915, 2853 และ 1036 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล หมู่เมทิลีน เมทิลและ C - O ตามลำดับ แสดงถึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิทฟิล์ม

ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3292 และ 3327 เซนติเมตร⁻¹ เป็นความถี่ในการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1036 และ 1028 เซนติเมตร⁻¹ เป็นความถี่ในการสั่นแบบยืดของ C - O ของคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น คอมโพสิทฟิล์มสามารถดูดกลืนคลื่นแสงที่บ่งบอกถึงหมู่ไฮดรอกซิลและ C - O เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม คอมโพสิทฟิล์มจะประกอบด้วยหมู่เมทิลและเมทิลีนลดลง เนื่องจากอัตราส่วนของยางธรรมชาติลดลง และจากรูปที่ 4.4 จะพบว่า การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 -50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิทฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.4

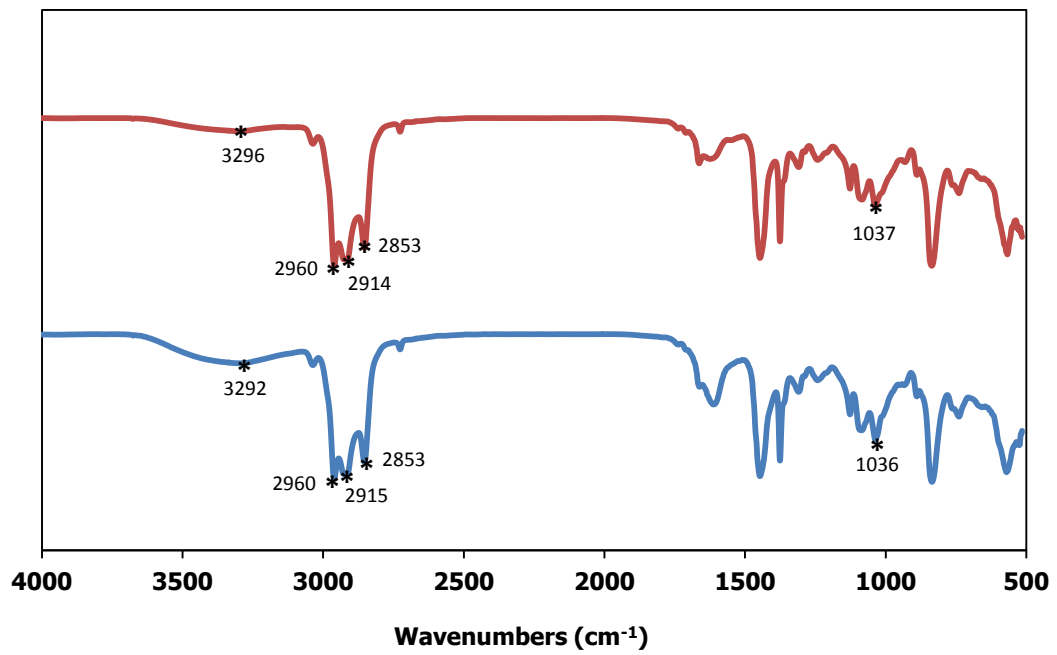
และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่แห้งกรดและไม่แห้งกรดอะซิติก พบว่า มีการดูดกลืนเลขคลื่นที่ตำแหน่งเดียวกัน และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของคอมโพสิทฟิล์ม ดังนั้น การแช่คอมโพสิทในกรดอะซิติกไม่มีผลในการสร้างพันธะใหม่ของคอมโพสิทฟิล์ม แสดงรูปดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 - 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy



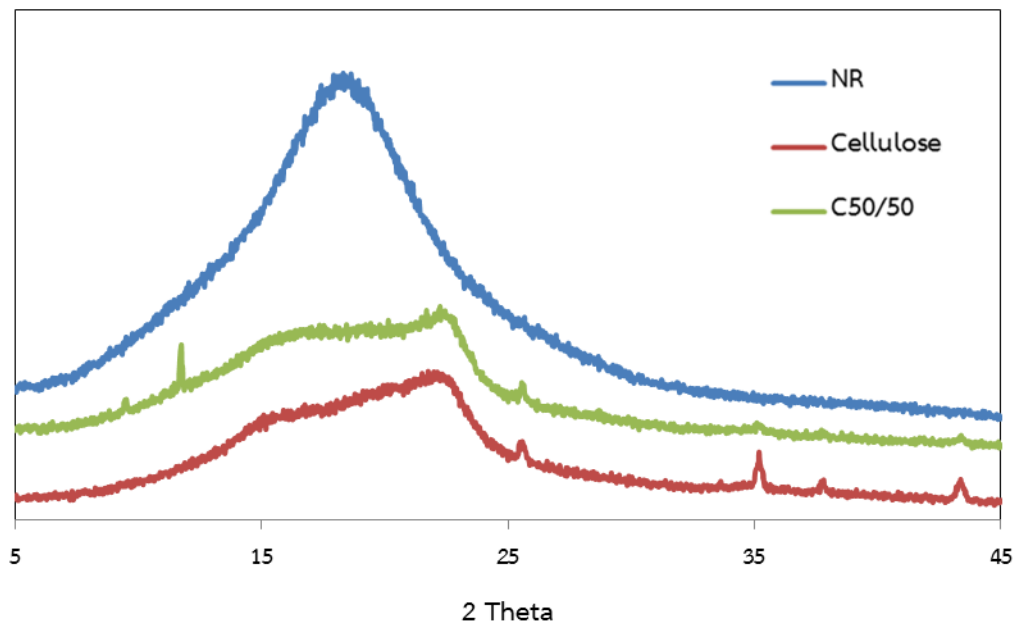
รูปที่ 4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันคอมโพลีเมอร์ฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระหว่างที่แช่กรดและไม่ได้แช่กรดอะซิติก ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy

4.3 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของคอมโพลีฟิล์ม

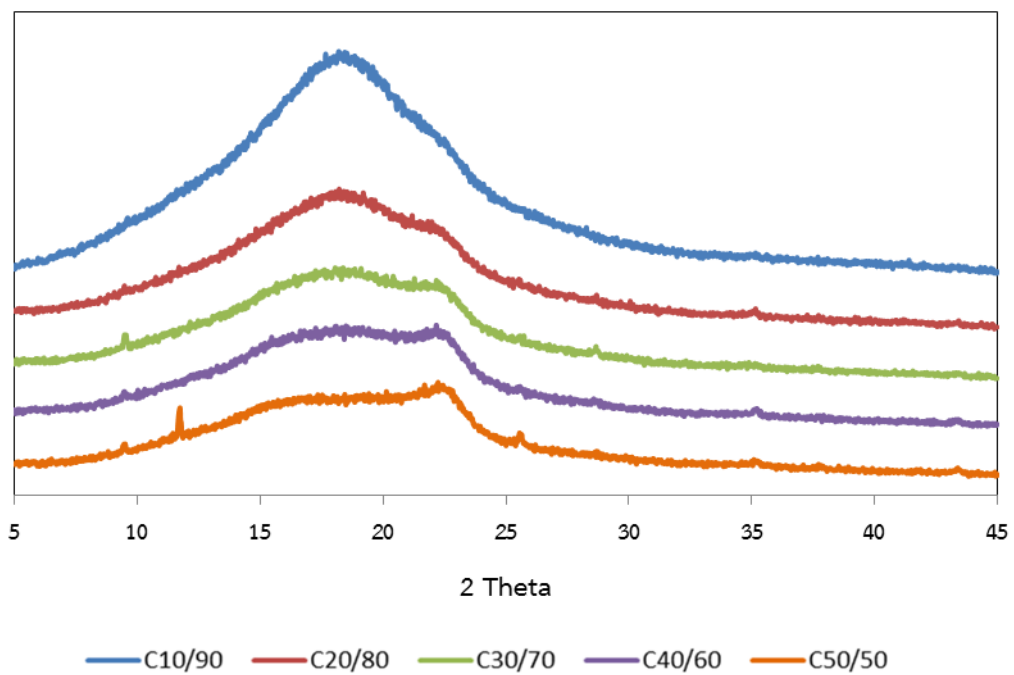
การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของคอมโพลีฟิล์มด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ในช่วงขนาดของมุม 5 – 45 องศา จากรูปที่ 4.6 ยางธรรมชาติไม่ปรากฏพีคของความเข้ม ซึ่งแสดงถึงลักษณะโครงสร้างเป็นอสัณฐาน เซลลูโลสปรากฏความเข้มของพีคที่ตำแหน่งของมุม 19.28 และ 22.04 องศา ซึ่งจากตำแหน่งความเข้มพีคของยางธรรมชาติและเซลลูโลสสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thomas และคณะ(2015)[45] และจากงานวิจัยของ Sirvio และคณะ(2013) รายงานความเป็นผลึกของอัลจินต ในช่วงขนาดมุม 0 – 40 องศา พบว่าอัลจินตไม่ปรากฏพีคความเข้มขึ้น ดังนั้นอัลจินตจึงมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ[46] ส่วนคอมโพลีฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรากฏตำแหน่งความเข้มของพีคคล้ายๆกับเซลลูโลส โดยปรากฏที่ตำแหน่ง 17.67 และ 22.24 องศา

คอมโพลีฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงตำแหน่งความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 18.19 และ 22.47 องศา และคอมโพลีฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงตำแหน่งความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 17.67 และ 22.24 องศา แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของคอมโพลีฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีความเป็นผลึกประมาณ 0.98 และ 14.56 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ความเป็นผลึกของคอมโพลีฟิล์มก็จะมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2

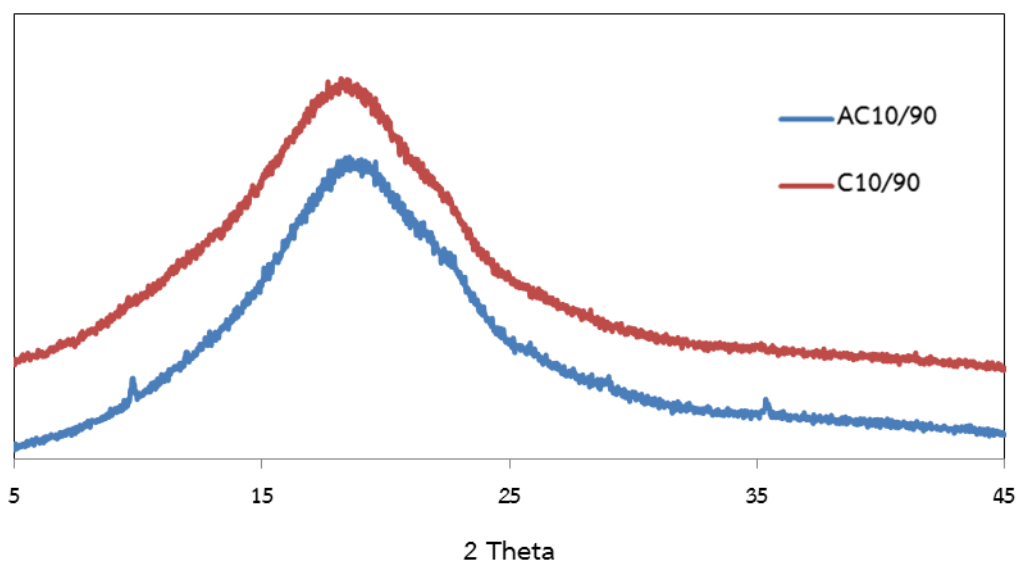
และจากรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบคอมโพลีฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักระหว่างที่แช่กรดและไม่แช่กรด พบว่า คอมโพลีฟิล์มที่แช่กรดปรากฏความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง ได้แก่ 18.66 และ 22.58 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเท่ากับ 1.43 ส่วน คอมโพลีฟิล์มที่ไม่ได้แช่กรด ปรากฏความเข้มของพีคที่ตำแหน่ง 18.19 และ 22.47 องศา มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเท่ากับ 0.98



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของคอมโพสิตด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ระหว่างที่แช่กรดและไม่ได้แช่กรดอะซิติก ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

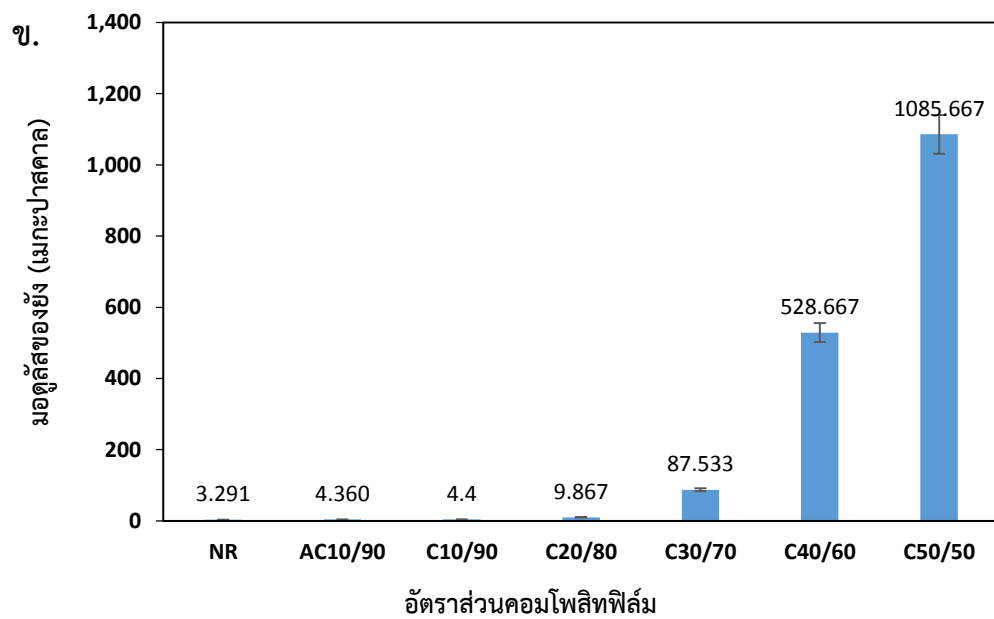
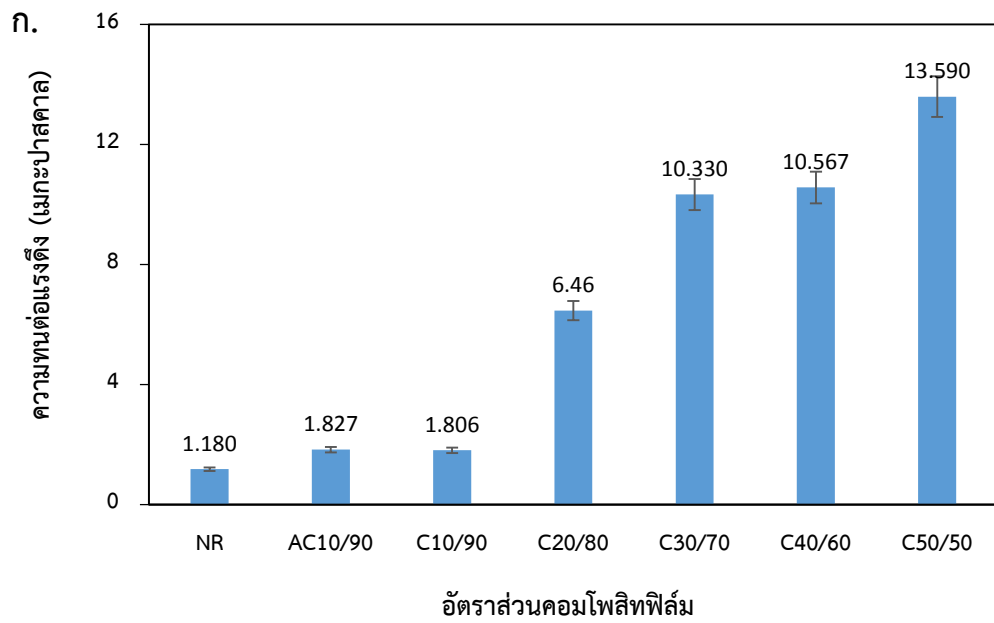
ตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของคอมโพสิตฟิล์ม

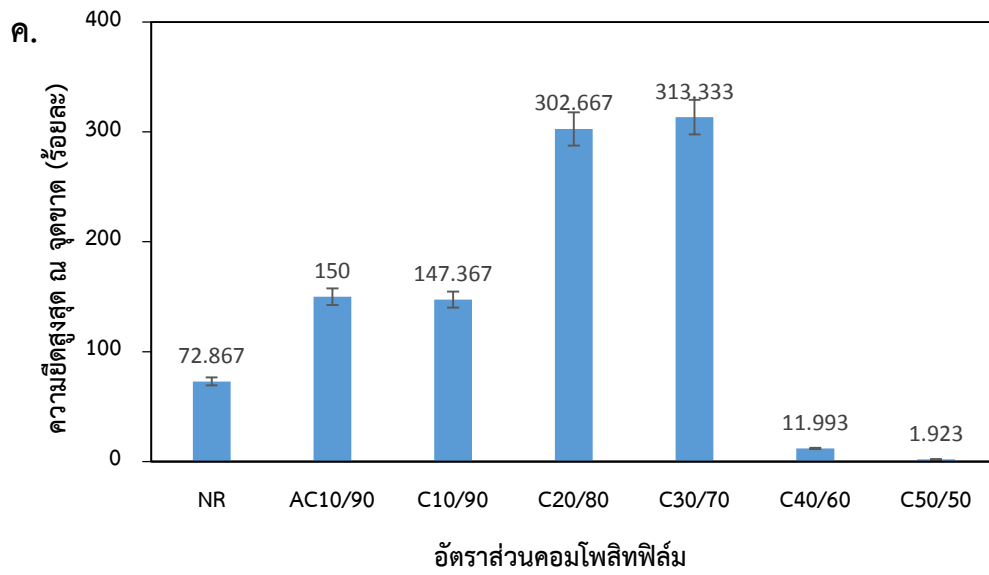
ตัวอย่าง	ความเป็นผลึก (%)
NR	0
AC10/90	1.43
C10/90	0.98
C20/80	3.40
C30/70	7.11
C40/60	10.56
C50/50	14.56
Cellulose	23.19

4.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทฟิล์ม

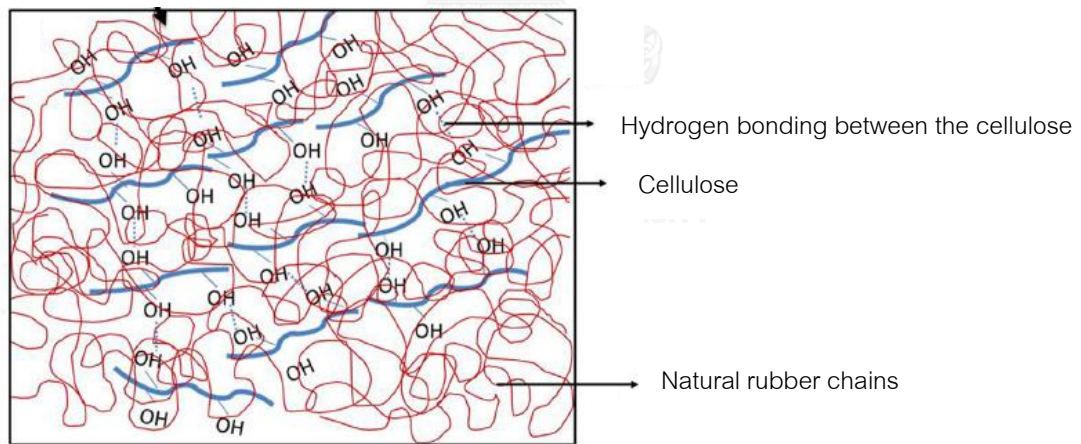
โดยทั่วไปสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติมีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังต่ำ แต่มีความยืดหยุ่นสูง ณ จุดขาดสูง การนำเซลลูโลสมาเสริมแรงยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงคอมโพสิทให้มีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังสูงขึ้น

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วน 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM D882 แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า ยางธรรมชาติมีความทนต่อแรงดึง 1.18 เมกะปาสคาล และมอดูลัสของยัง 3.29 เมกะปาสคาล แต่เมื่อเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส คอมโพสิทฟิล์มมีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 1.83 เมกะปาสคาล ถึง 13.59 เมกะปาสคาล และ 4.36 เมกะปาสคาล ถึง 1085.67 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น จึงมีแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้คอมโพสิทฟิล์มมีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองการเกิดแรงดึงดูดพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลสในเมทริกซ์และความยืดหยุ่นสูง ณ จุดขาด ของคอมโพสิทฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจเป็นผลมาจากอัลจินตที่ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความหนืด เข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของเซลลูโลสและยางธรรมชาติ จึงส่งผลให้คอมโพสิทฟิล์มมีความความยืดหยุ่นสูง ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ แต่เมื่อปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความความยืดหยุ่นสูง ณ จุดขาด ลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่มากขึ้น จึงส่งผลให้สายโซ่ของยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นน้อยลงเสมือนโดนขัดขวางด้วยแรงดึงดูดระหว่างพันธะไฮโดรเจนของเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Visakh และคณะ (2012) Rajisha คณะ (2014) และงานวิจัยของ Thomas และคณะ (2015) [37, 39, 45]





รูปที่ 4.9 แสดงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ปริมาณเซลล์ูโลสในอัตราส่วน 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ก.) ความทนต่อแรงดึง (ข.) โมดูลัสของยัง (ค.) ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด



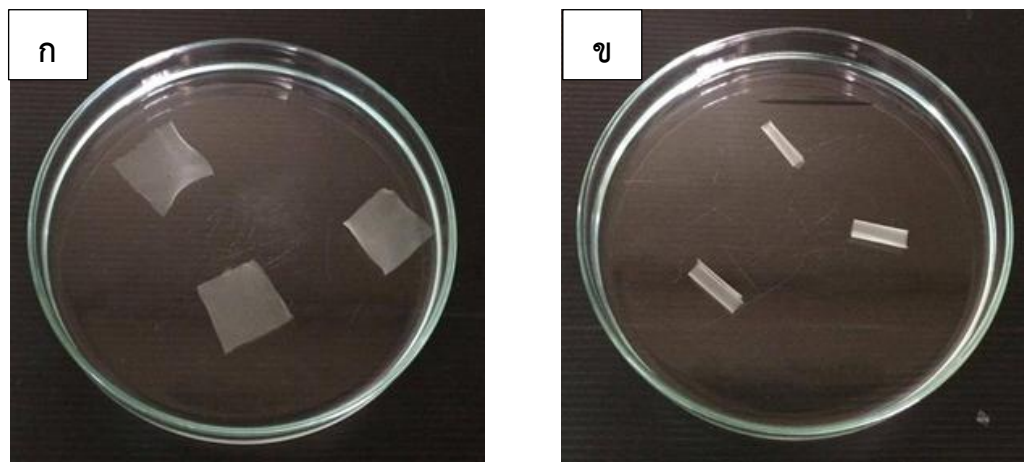
รูปที่ 4.10 แสดงภาพจำลองการเกิดแรงดึงดูดพันธะไฮโดรเจนของเซลล์ูโลสในเมทริกซ์[45]

4.5 ผลการศึกษาการบวมคอมโพสิทฟิล์มในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว

จากรูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการบวมของคอมโพสิทฟิล์มในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว คือ โทลูอิน พบว่า ในช่วง 1 – 2 ชั่วโมง คอมโพสิทฟิล์มมีลักษณะการบวมโทลูอินอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นการบวมคอมโพสิทฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สมดุล แต่ยางธรรมชาติจะบวมโทลูอินอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งหลังจากชั่วโมงที่ 4 น้ำหนักของยางธรรมชาติเริ่มลดลง (รูปที่ 4.12) เนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติไม่มีความเป็นขั้วจึงสามารถละลายในโทลูอินซึ่งเป็นตัวทำละลายไม่มีขั้วได้ แต่อย่างไรก็ตาม คอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น การบวมคอมโพสิทฟิล์มในโทลูอินจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ หลังจากนั้นจึงเข้าสู่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bendahou และคณะ (2010) ได้รายงานผลวิจัยการบวมโทลูอินของคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยนาโนเซลลูโลสเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยในช่วงสองชั่วโมงแรกคอมโพสิทเกิดการบวมโทลูอินอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นคอมโพสิทเกิดการบวมโทลูอินอีกเล็กน้อยก่อนที่จะเข้าสู่สมดุล และคอมโพสิทที่มีปริมาณความเข้มข้นของเซลลูโลสมากจะบวมโทลูอินได้น้อยลง[35]. นอกจากนี้ยังมีรายงานผลในทำนองเดียวกันในงานวิจัยของ Abraham และคณะ (2013) ซึ่งรายงานผลการแช่คอมโพสิทฟิล์มของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยนาโนเซลลูโลสในโทลูอินเป็นระยะเวลา 70 ชั่วโมง[42]

เมื่อเปรียบเทียบการบวมโทลูอินของคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักระหว่างคอมโพสิทฟิล์มที่แช่และไม่แช่กรดอะซิติก พบว่าในช่วง 3 ชั่วโมงแรก คอมโพสิทฟิล์มที่ไม่แช่กรด สามารถบวมโทลูอินได้มากกว่าคอมโพสิทฟิล์มที่แช่กรดอะซิติก และหลังจากชั่วโมงที่สาม คอมโพสิทฟิล์มทั้งสองมีน้ำหนักที่ลดน้อยลง เนื่องจากอาจมียางธรรมชาติบางส่วนละลายในโทลูอิน โดยสังเกตเห็นการลดลงของน้ำหนักหลังแช่โทลูอินในตัวอย่างจากฟิล์ม NR AC10/90 และ C10/90 แต่ไม่พบการลดลงของน้ำหนักในตัวอย่าง C20/80 C30/70 C40/60 และ C50/50 ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีองค์ประกอบของเซลลูโลสตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะทำให้ฟิล์มไม่ละลายในโทลูอิน

รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะทางกายภาพของคอมโพสิทฟิล์มที่แช่โทลูอินเป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าคอมโพสิทฟิล์มที่แช่กรดอะซิติก ลักษณะของแผ่นฟิล์มไม่ม้วน แต่คอมโพสิทฟิล์มที่ไม่แช่กรดมีการม้วนตัว อาจเนื่องมาจากกรดอะซิติกเกิดแรงดึงดูดของไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของคอมโพสิทรักษาสภาพได้ดีขึ้น ไม่เกิดการบิดงอหรือโค้งเมื่อแช่ในโทลูอิน



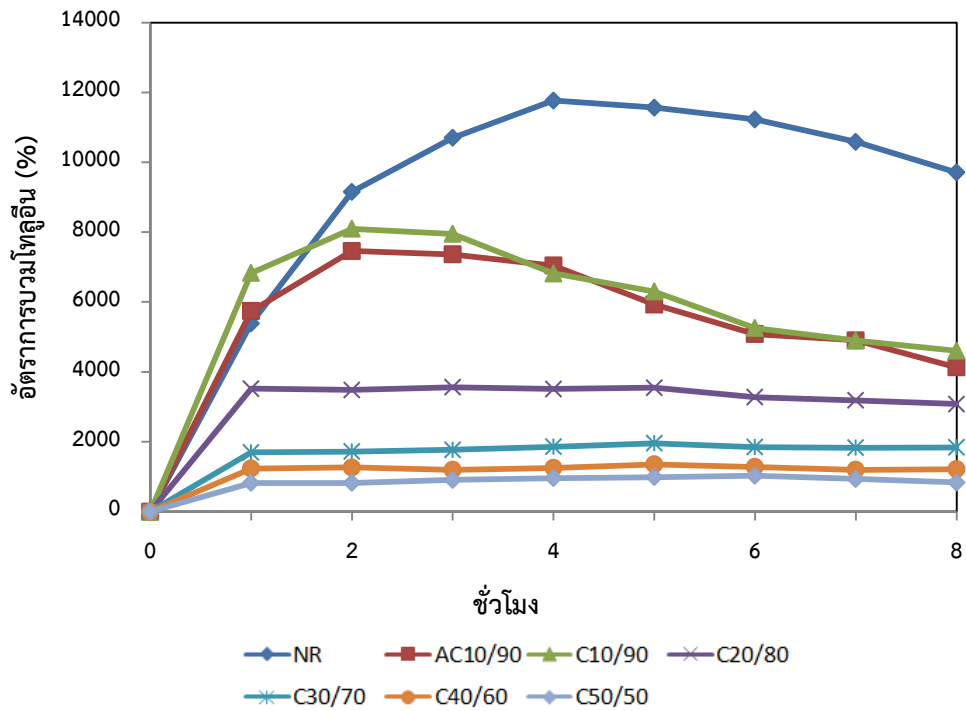
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะทางกายภาพของคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่แช่โทลูอีน ก. คอมโพสิทที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดอะซิติก ข. คอมโพสิทที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยกรดอะซิติก

4.6 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิทฟิล์ม

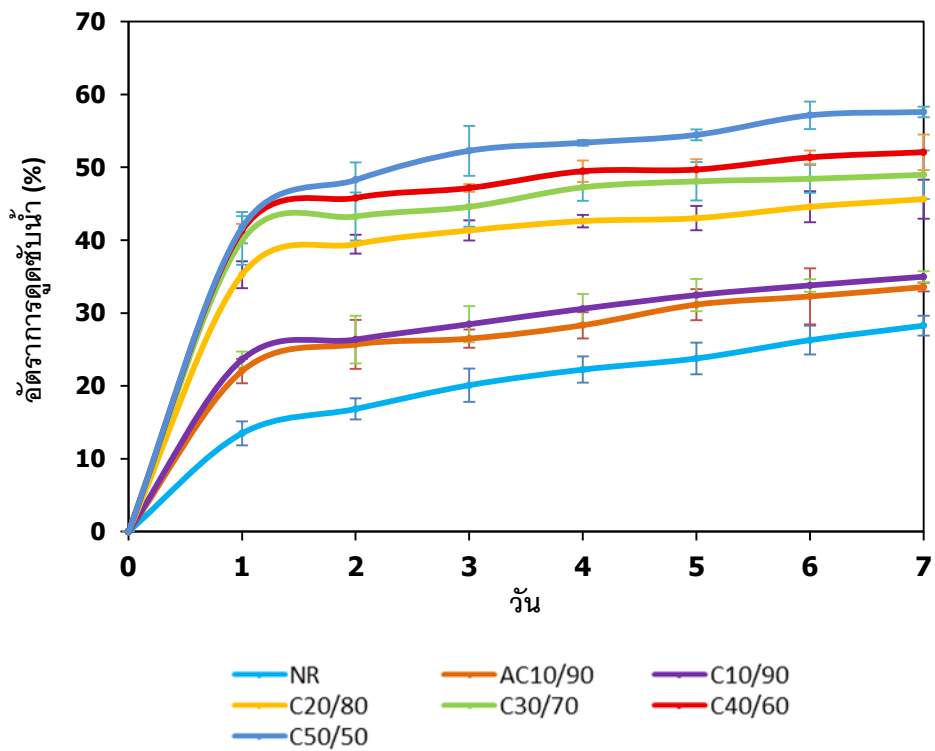
จากรูปที่ 4.13 แสดงความสามารถในการดูดซับน้ำของคอมโพสิทฟิล์ม พบว่า คอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุด เนื่องจากเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบจึงเป็นตัวดูดซับน้ำ ทำให้เซลลูโลสมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี[18]

และเมื่อเปรียบเทียบคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักระหว่างคอมโพสิทฟิล์มที่แช่และไม่แช่กรดอะซิติก พบว่า คอมโพสิทฟิล์มทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันในด้านของการดูดซับน้ำ เนื่องจากทั้งสองมีสัดส่วนปริมาณของเซลลูโลสซึ่งเป็นสารก่อให้เกิดการดูดซับน้ำในเมทริกซ์เท่ากัน

ในกรณีการแช่คอมโพสิทฟิล์มในน้ำ ไม่พบการลดลงของน้ำหนักระหว่าง 0 – 7 วันของการแช่ ซึ่งอาจแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มยางธรรมชาติและฟิล์มคอมโพสิทของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเซลลูโลสไม่ละลายในน้ำ



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การบวมโทลูอีนของคอมโพสิตฟิล์ม เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

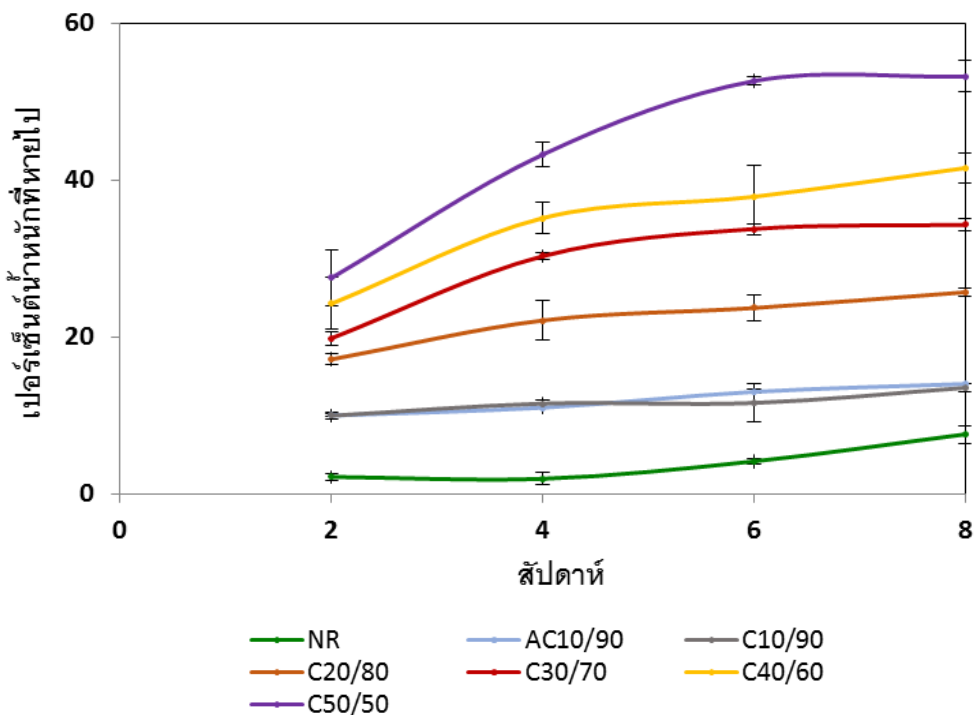


รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของคอมโพสิตฟิล์ม เป็นเวลา 7 วัน

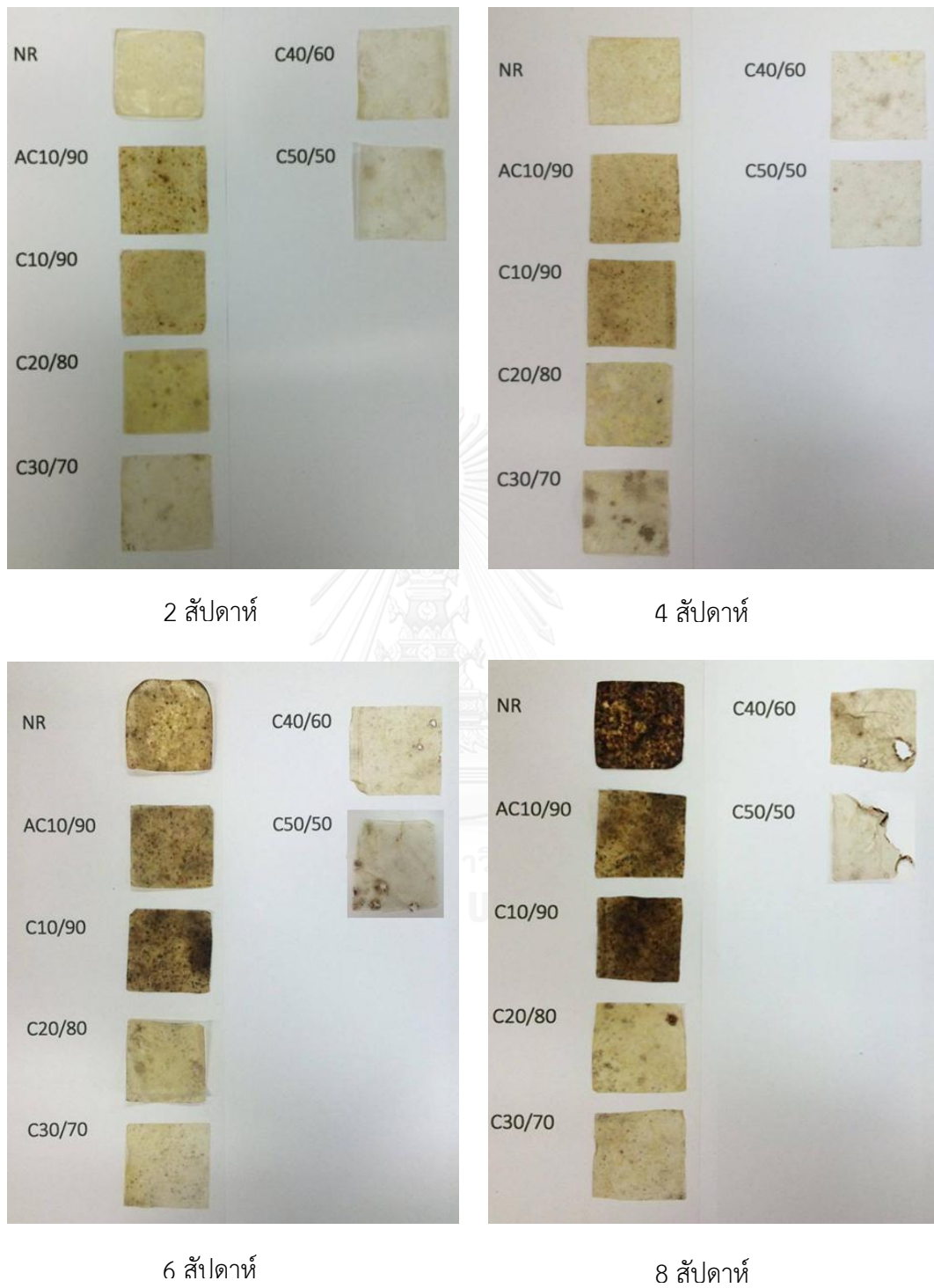
4.7 ผลการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์ม

ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์มที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เป็นระยะเวลา 2 เดือน ด้วยการเก็บตัวอย่างคอมโพสิตฟิล์มทุกๆ 2 สัปดาห์ เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิตฟิล์มที่ศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนของเซลลูโลสในช่วง 0 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิตฟิล์มกับระยะเวลา พบว่า ยางธรรมชาติมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตฟิล์ม โดยคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด แสดงถึงความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี และลักษณะของคอมโพสิตฟิล์มมีลักษณะเป็นรูพรุน เนื่องจากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินสามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้ดีกว่ายางธรรมชาติ ทำให้น้ำหนักของคอมโพสิตฟิล์มลดลงมากที่สุด ลักษณะโดยรวมของฟิล์มหลังผ่านการฝังดินในช่วงระยะเวลา 2 เดือน แสดงในรูปที่ 4.15

เมื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่แช่กรดและไม่แช่กรดอะซิติก พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิตฟิล์มทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นการแช่กรดอะซิติกไม่ส่งผลให้ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิตฟิล์มที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา 8 สัปดาห์



รูปที่ 4.15 ลักษณะของคอมโพสิทฟิล์มที่ผ่านการย่อยสลายทางชีวภาพในดินเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

4.8 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

4.8.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimetric analysis, DSC)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของยางธรรมชาติและผลของปริมาณเซลลูโลสในเมทริกซ์ ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ พบว่า ยางธรรมชาติมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วง -64 องศาเซลเซียส และคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสตั้งแต่ 10 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอยู่ในช่วง -63.4 ถึง -64.7 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.3 ดังนั้น ปริมาณของเซลลูโลสที่อยู่ในเมทริกซ์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วอย่างเด่นชัด เนื่องจากโมเลกุลของยางกับเซลลูโลสไม่เกิดอันตรกิริยาต่อกัน จึงส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากผลวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bendahou และคณะ (2010) และงานวิจัยของ Bras และคณะ (2010) [35, 36]

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของคอมโพสิทฟิล์ม

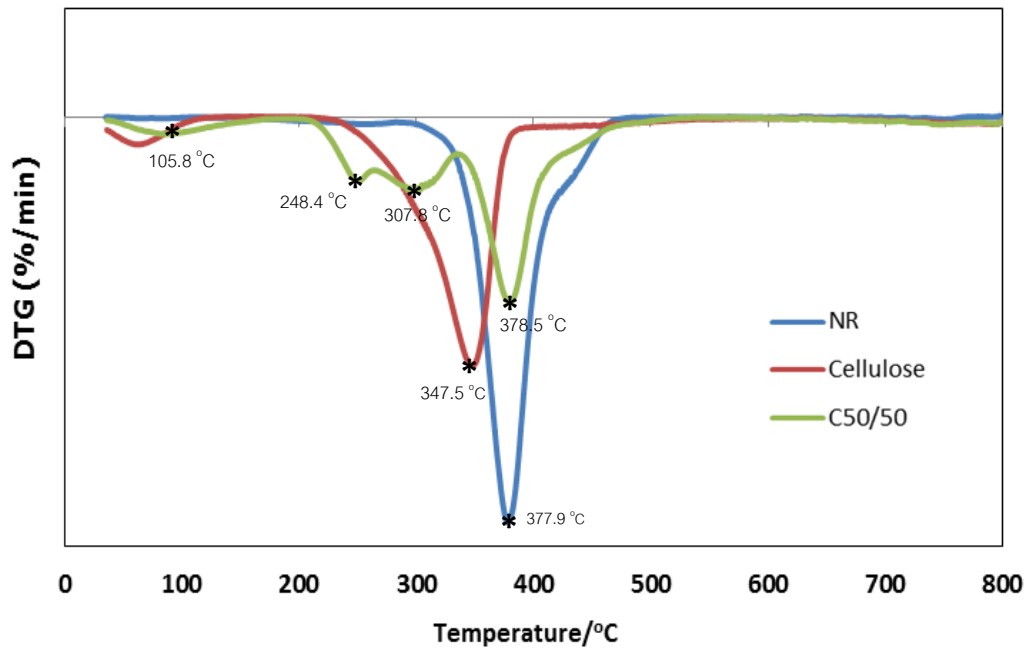
คอมโพสิทฟิล์ม	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (องศาเซลเซียส)
NR	- 64.7
AC10/90	- 64.6
C10/90	- 64.7
C20/80	- 64.4
C30/70	- 64.2
C40/60	- 64.3
C50/50	- 63.4

4.8.2 Thermo gravimetric analysis (TGA)

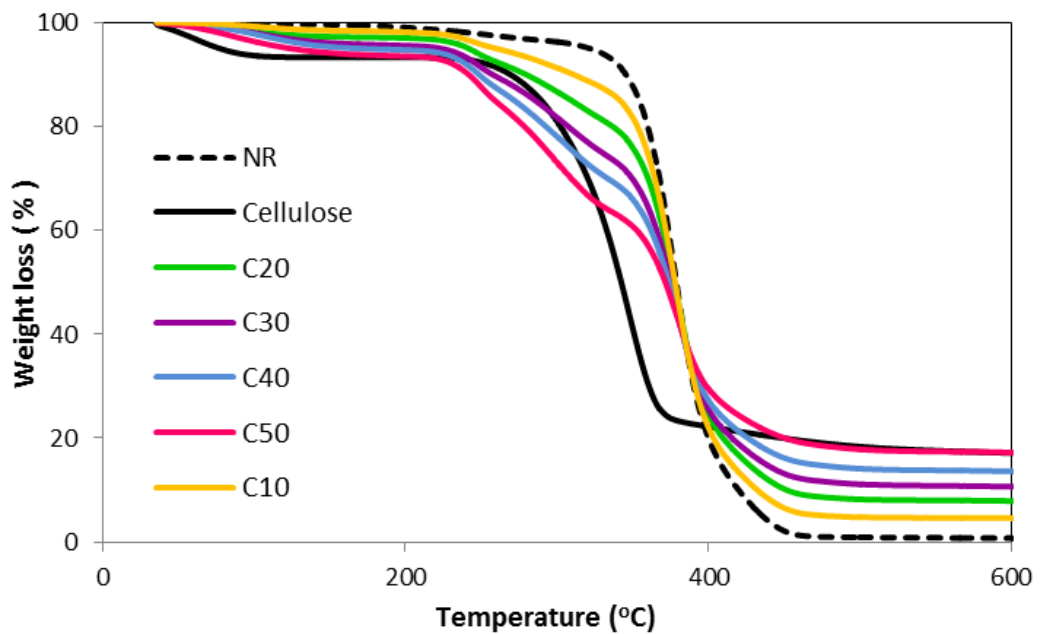
จากรูปที่ 4.16 วิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ของเซลลูโลส ยางธรรมชาติและคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ยางธรรมชาติและเซลลูโลสมีความเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 377.9 และ 347.5 องศาเซลเซียส ส่วนคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความเสถียรภาพทางความร้อนแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ในช่วงแรก ที่อุณหภูมิ 105.8 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในเซลลูโลส ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 248.4 องศาเซลเซียส แสดงถึงการสลายตัวของอัลจินต จากงานวิจัยของ Huqa และคณะ (2012) รายงานอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของอัลจินต 257 องศาเซลเซียส[21]. ในช่วงที่สามที่ของอุณหภูมิ 307.8 องศาเซลเซียส แสดงถึงการสลายตัวของเซลลูโลส และในช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิ 378.5 แสดงถึงการสลายตัวของยางธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature, Td) ที่การสูญเสียน้ำหนัก 10 เปอร์เซ็นต์ (Weight loss 10%) พบว่าคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 – 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 310.8 279.4 257.4 248.5 และ 241.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนจะลดลงเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าถ่าน (Char residue) พบว่า เมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น คอมโพสิทฟิล์มจะมีปริมาณเถ้าถ่านเหลือมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.17

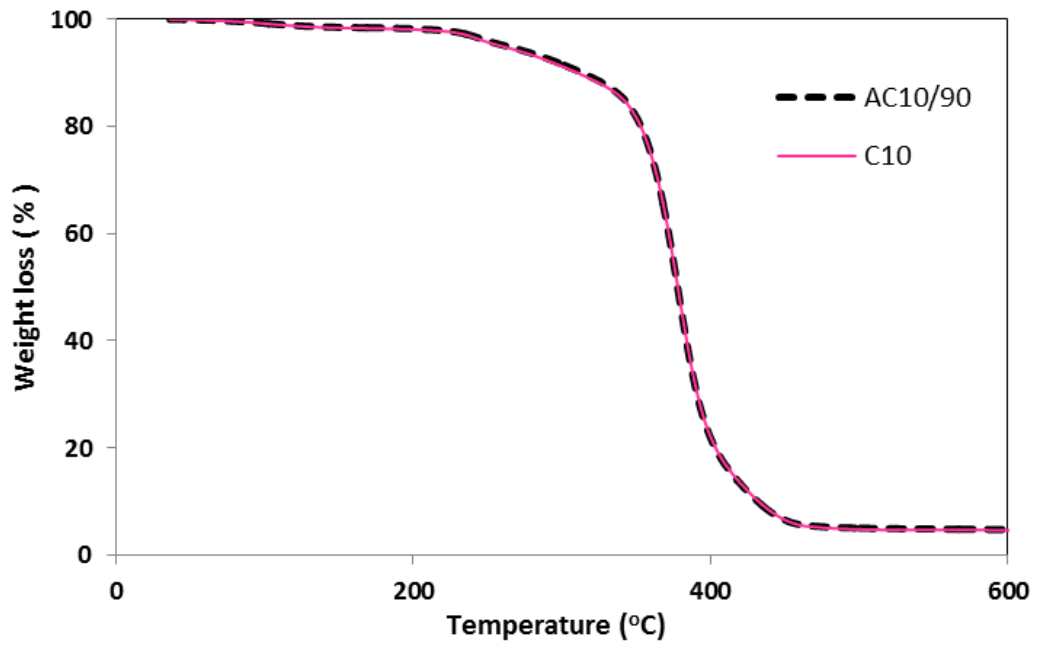
และจากการเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิทฟิล์มที่เสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลส 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่แช่กรดและไม่ได้แช่กรดอะซิติก พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ที่ 314 และ 310.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือ 2.01 และ 2.12 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดอะซิติกไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคอมโพสิทฟิล์ม เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนและปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือไม่มีความแตกต่าง แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 แสดงอนุกรมความเสถียรภาพทางความร้อนของเซลลูโลส ยางธรรมชาติและคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆของยางธรรมชาติ เซลลูโลสและคอมโพสิตฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสในอัตราส่วน 10 -50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.18 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆของคอมโพสิตฟิล์มที่ปริมาณเซลลูโลส ในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระหว่างคอมโพสิตที่แช่กรดและไม่แช่กรดอะซิติก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาปริมาณเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงยางธรรมชาติในอัตราส่วน 10 – 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ด้วยการบดเซลลูโลสด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล จนกระทั่งมีขนาดในช่วง 10 – 50 ไมโครเมตร (ค่าเฉลี่ย 26.5 ไมโครเมตร) ผสมเซลลูโลสและยางธรรมชาติตามอัตราส่วนที่กำหนดและขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยวิธีการหล่อแบบสารละลาย จากนั้นอบแผ่นฟิล์มด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติในด้านต่างๆ

5.1 จากการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเซลลูโลสในอัตราส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้มีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยัง ให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากคอมโพสิตมีความแข็งแรงและมีความเป็นผลึกที่เพิ่มมากขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเซลลูโลสตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักขึ้นไป ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากเซลลูโลสเริ่มเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม โดยจากภาพถ่ายของ Field emission scanning electron microscopy (FESEM) แสดงให้เห็นการรวมกันของเซลลูโลสภายในคอมโพสิตที่มีปริมาณเซลลูโลส 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2 การทดสอบโดยการแช่ในน้ำ พบว่าคอมโพสิตมีอัตราการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ดูดซับน้ำเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสในคอมโพสิตฟิล์มมากขึ้นจะส่งผลให้คอมโพสิตฟิล์มสามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้น โดยคอมโพสิตที่มีสัดส่วนเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์แสดงการดูดซับน้ำสูงสุด อย่างไรก็ตามคอมโพสิตที่สังเคราะห์ขึ้นทั้งหมดไม่ละลายน้ำ

5.3 การทดสอบโดยการแช่ในสารละลายไม่มีขี้ เช่น โทลูอีน พบว่าการเติมเซลลูโลสลงในคอมโพสิตมีผลให้อัตราการดูดซับสารละลายไม่มีขี้ เช่น โทลูอีนน้อยลง และพบว่าคอมโพสิตที่มีเซลลูโลสตั้งแต่ 20 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ไม่ละลายในโทลูอีน

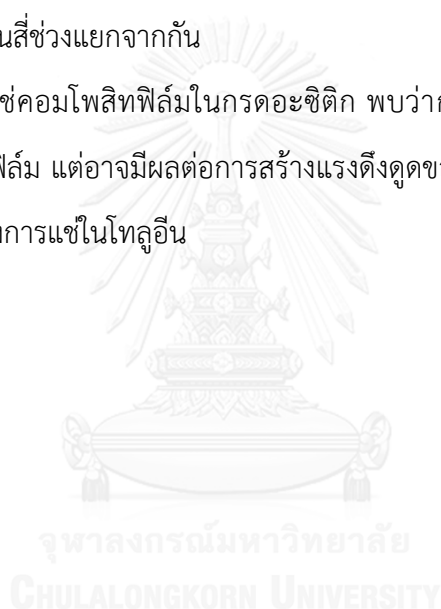
5.4 จากการตรวจสอบการเกิดหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR การเติมเซลลูโลสในเมทริกซ์ไม่ได้สร้างพันธะ หรือทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันใหม่ เพียงแต่ปริมาณของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงการมีหมู่ไฮดรอกซิลมากขึ้นและทำให้หมู่เมทิลและเมทิลีนของยางธรรมชาติลดลง

5.5 จากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิทฟิล์ม พบว่าปริมาณเซลลูโลสมีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยคอมโพสิทฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะถูกย่อยสลายได้ดีที่สุด

5.6 ปริมาณของเซลลูโลสในเมทริกซ์ ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของคอมโพสิทฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางธรรมชาติและคอมโพสิทฟิล์มจะอยู่ในช่วง - 64 องศาเซลเซียส

5.7 จากการตรวจสอบความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิทฟิล์ม พบว่า การผสมเซลลูโลส และยางธรรมชาติไม่ได้แสดงพันธะต่อกัน เนื่องจากคอมโพสิทฟิล์มแสดงความเสถียรภาพทางความร้อนแบ่งออกเป็นสี่ช่วงแยกจากกัน

5.8 จากการแช่คอมโพสิทฟิล์มในกรดอะซิติก พบว่ากรดอะซิติกไม่ได้ช่วยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคอมโพสิทฟิล์ม แต่อาจมีผลต่อการสร้างแรงดึงดูดของเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งฟิล์มสามารถคงสภาพไม่บิดโค้งระหว่างการแช่ในโพลูอิน



รายการอ้างอิง

1. สถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย. สถิติยางไทย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.rubberthai.com/statistic/thai/thai_stat.htm. (วันที่ค้นข้อมูล : 8 กรกฎาคม 2559).
2. Trovatti, E., et al., *Simple green approach to reinforce natural rubber with bacterial cellulose nanofibers*. *Biomacromolecules*, 2013. 14(8): p. 2667-74.
3. Nair, A.B. and R. Joseph, *Eco-friendly bio-composites using natural rubber (NR) matrices and natural fiber reinforcements*. 2014: p. 249-283.
4. Bai, W. and K. Li, *Partial replacement of silica with microcrystalline cellulose in rubber composites*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009. 40(10): p. 1597-1605.
5. Xu, S., et al., *Influence of nanocrystalline cellulose on structure and properties of natural rubber/silica composites*. *Polymer Composites*, 2015. 36(5): p. 861-868.
6. Hong Yao., e.a., *Effect of silane coupling agent on the fatigue crack propagation of silica-filled NR*. *Applied polymer science* 2015: p. 41980-41986.
7. Prasertsri, S. and N. Rattanasom, *Mechanical and damping properties of silica/natural rubber composites prepared from latex system*. *Polymer Testing*, 2011. 30(5): p. 515-526.
8. Parambath Kanoth, B., et al., *Biocomposites from Natural Rubber: Synergistic Effects of Functionalized Cellulose Nanocrystals as Both Reinforcing and Cross-Linking Agents via Free-Radical Thiol-ene Chemistry*. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015. 7(30): p. 16303-10.
9. Thakore, S., *Nanosized cellulose derivatives as green reinforcing agent*. *Applied polymer science*, 2014. 131(40632).
10. ดร.กษมา จารุกำจรและคณะ. (2555). การเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์. สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

11. บทความวิทยาศาสตร์. ยางธรรมชาติ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.electron.rmutphysics.com/science-news.../index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=0 (วันที่ค้นข้อมูล 10 มีนาคม 2559).
12. Nawamawat, K., et al., *Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011. 390(1-3): p. 157-166.
13. วิภาวดี พัฒนกุล. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. กลุ่มอุตสาหกรรมวิจัยยาง สถาบันวิจัยยาง. งานนิทรรศการพืชสวน เชียงใหม่ ตุลาคม 2554.
14. Lavoine, N., et al., *Microfibrillated cellulose - its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review*. Carbohydr Polym, 2012. 90(2): p. 735-64.
15. Lee, S.-Y., et al., *Nanocellulose reinforced PVA composite films: Effects of acid treatment and filler loading*. Fibers and Polymers, 2009. 10(1): p. 77-82.
16. Peng, B.L., et al., *Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: A nanotechnology perspective*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2011. 89(5): p. 1191-1206.
17. Nechyporchuk, O., M.N. Belgacem, and J. Bras, *Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances*. Industrial Crops and Products, 2016.
18. เกศินี โกศลเมธี. (2552). การเตรียมและสมบัติเชิงกลของยางคอมโพสิตเตรียมจากยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกผสมเส้นใยปอกระเจาะ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
19. Nanou Peelman., e.a., *Application of bioplastics for food packaging*. Food science & Technology, 2013. 32: p. 128-141.
20. Lee, K.Y. and D.J. Mooney, *Alginate: properties and biomedical applications*. Prog Polym Sci, 2012. 37(1): p. 106-126.
21. Huq, T., et al., *Nanocrystalline cellulose (NCC) reinforced alginate based biodegradable nanocomposite film*. Carbohydr Polym, 2012. 90(4): p. 1757-63.

22. Pawar, S.N. and K.J. Edgar, *Alginate derivatization: a review of chemistry, properties and applications*. *Biomaterials*, 2012. 33(11): p. 3279-305.
23. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหาร. กรดแอสติติก. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/581/acetid-%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B8%B%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81> (วันที่ค้นข้อมูล 10 มีนาคม 2559).
24. Hakkou, M., et al., *Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis*. *Polymer Degradation and Stability*, 2005. 89(1): p. 1-5.
25. Edeerozey, A.M.M., et al., *Chemical modification of kenaf fibers*. *Materials Letters*, 2007. 61(10): p. 2023-2025.
26. Chen, X., et al., *Effects of polymorphs on dissolution of cellulose in NaOH/urea aqueous solution*. *Carbohydr Polym*, 2015. 125: p. 85-91.
27. Zhang, J.Z.a.L., *Solubility of cellulose in NaOH ; Urea aqueous solution*. *Polymer journal*, 2000. 32(10): p. 866-870.
28. Soheilmoghaddam, M., M. Uzir Wahit, and N. Ibrahim Akos, *Regenerated cellulose/epoxidized natural rubber blend film*. *Materials Letters*, 2013. 111: p. 221-224.
29. Sengloyuan, K., et al., *Silica-reinforced tire tread compounds compatibilized by using epoxidized natural rubber*. *European Polymer Journal*, 2014. 51: p. 69-79.
30. Can Jiang et al., *Self-Crosslinkable Lignin; Epoxidized NR composites*. *Applied polymer science*, 2014. 131(41166).
31. Ismail, H., A. Rusli, and A.A. Rashid, *The Effect of Filler Loading and Epoxidation on Paper-Sludge-Filled Natural Rubber Composites*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2006. 45(4): p. 519-525.
32. Ismail, H. and F.S. Haw, *Effects of palm ash loading and maleated natural rubber as a coupling agent on the properties of palm-ash-filled natural rubber composites*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008. 110(5): p. 2867-2876.

33. Zeng, Z., et al., *Maleated natural rubber prepared through mechanochemistry and its coupling effects on natural rubber/cotton fiber composites*. Journal of Polymer Research, 2009. 17(2): p. 213-219.
34. Ismail, H., A. Rusli, and A.A. Rashid, *Maleated natural rubber as a coupling agent for paper sludge filled natural rubber composites*. Polymer Testing, 2005. 24(7): p. 856-862.
35. Bendahou, A., H. Kaddami, and A. Dufresne, *Investigation on the effect of cellulosic nanoparticles' morphology on the properties of natural rubber based nanocomposites*. European Polymer Journal, 2010. 46(4): p. 609-620.
36. Bras, J., et al., *Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites*. Industrial Crops and Products, 2010. 32(3): p. 627-633.
37. Visakh, P.M., et al., *Crosslinked natural rubber nanocomposites reinforced with cellulose whiskers isolated from bamboo waste: Processing and mechanical/thermal properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. 43(4): p. 735-741.
38. Abraham, E., et al., *X-ray diffraction and biodegradation analysis of green composites of natural rubber/nanocellulose*. Polymer Degradation and Stability, 2012. 97(11): p. 2378-2387.
39. Rajisha, K.R., et al., *Preparation and characterization of potato starch nanocrystal reinforced natural rubber nanocomposites*. Int J Biol Macromol, 2014. 67: p. 147-53.
40. Zhang, C., et al., *Thermal and Mechanical Properties of Natural Rubber Composites Reinforced with Cellulose Nanocrystals from Southern Pine*. Advances in Polymer Technology, 2014. 33(S1): p. n/a-n/a.
41. P.G. Dalev et al., *Biodegradation of chemically modified gelatin films in soil*. Journal of Applied Polymer Science, 2000. 78: p. 1341-1347.
42. Abraham, E., et al., *Green nanocomposites of natural rubber/nanocellulose: Membrane transport, rheological and thermal degradation characterisations*. Industrial Crops and Products, 2013. 51: p. 415-424.

43. Shamsuri, A., et al., *Influence of Surface Treatment on Tensile Properties of Low-Density Polyethylene/Cellulose Woven Biocomposites: A Preliminary Study*. *Polymers*, 2014. 6(9): p. 2345-2356.
44. al., A.e., *Cellulose nanofibre reinforced natural rubber latex bionanocomposites*. *Cellulose*, 2013. 20(1): p. 417-427.
45. Thomas, M.G., et al., *Nanocelluloses from jute fibers and their nanocomposites with natural rubber: Preparation and characterization*. *Int J Biol Macromol*, 2015. 81: p. 768-77.
46. Sirvio, J.A., et al., *Biocomposite cellulose-alginate films: promising packaging materials*. *Food Chem*, 2014. 151: p. 343-51.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์อัตราการบวมโทลูอินของคอมโพสิตฟิล์ม

$$W_{\text{uptake}} = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100$$

W_0 คือ น้ำหนักแห้งของคอมโพสิตฟิล์ม (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของคอมโพสิตฟิล์มขณะบวมโทลูอินที่เวลาใดๆ (กรัม)

2. การวิเคราะห์อัตราการบวมน้ำของคอมโพสิตฟิล์ม (Water absorption capacity ; WAC)

$$WAC(\%) = \left(\frac{W_t - W_0}{W_0} \right) \times 100$$

W_0 คือ น้ำหนักแห้งของคอมโพสิตฟิล์ม (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของคอมโพสิตฟิล์มขณะบวมน้ำที่เวลาใดๆ (กรัม)

3. การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิตฟิล์ม

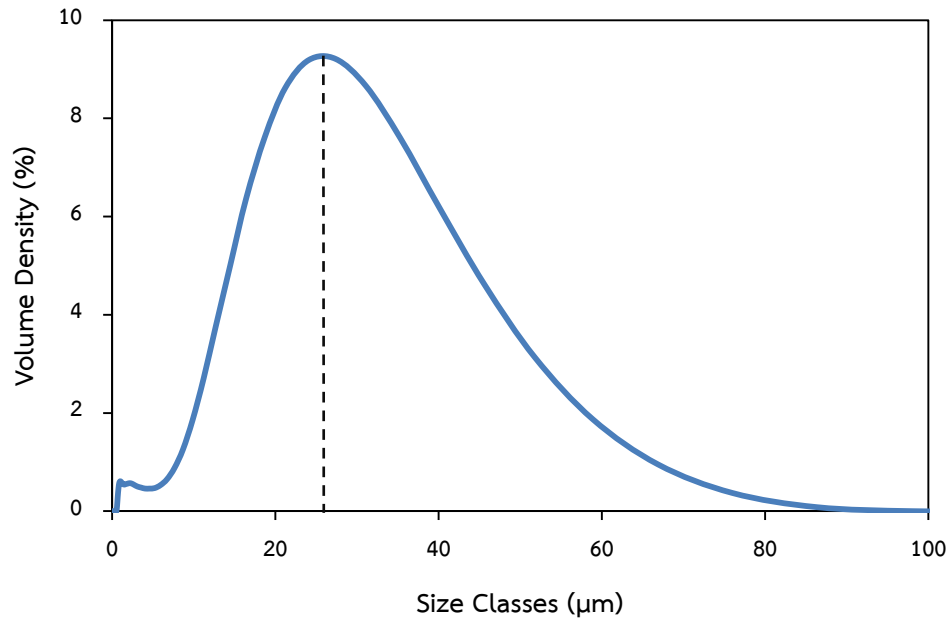
$$\text{Weight loss} = \left(\frac{W_0 - W_t}{W_0} \right) \times 100$$

W_0 คือ น้ำหนักแห้งของคอมโพสิตฟิล์มก่อนฝังดิน (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักแห้งของคอมโพสิตฟิล์มหลังจากการฝังดินที่เวลาใดๆ (กรัม)

ภาคผนวก ข
ข้อมูลการทดลอง

ข.1 ข้อมูลการกระจายตัวของขนาดของเซลล์โอส



เซลล์โอสมีขนาดอนุภาคค่าเฉลี่ย 26.5 ไมโครเมตร วัดด้วยเครื่อง Particle size distribution (PSD)

ข.2 ข้อมูลสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทฟิล์ม

ตารางที่ ข2.1 ความทนต่อแรงดึงของคอมโพสิทฟิล์ม

อัตราส่วน เซลลูโลส/ ยางธรรมชาติ	1	2	3	ค่าเฉลี่ย (เมกะ ปาสคาล)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
NR	3.036	3.769	3.068	3.291	0.41
AC10/90	4.445	4.373	4.262	4.360	0.09
C10/90	4.321	4.541	4.338	4.4	0.12
C20/80	9.34	10.13	10.13	9.867	0.46
C30/70	92.60	82.90	87.10	87.533	4.86
C40/60	508	545	533	528.667	18.88
C50/50	1081	1043	1133	1085.667	45.18

ตารางที่ ข2.2 มอดูลัสของยังของคอมโพสิทฟิล์ม

อัตราส่วน เซลลูโลส/ ยางธรรมชาติ	1	2	3	ค่าเฉลี่ย (เมกะ ปาสคาล)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
NR	1.172	1.134	1.233	1.180	0.05
AC10/90	1.737	1.871	1.873	1.827	0.08
C10/90	1.777	1.837	1.804	1.806	0.03
C20/80	6.26	6.60	6.52	6.46	0.18
C30/70	10.58	10.85	9.56	10.330	0.68
C40/60	10.74	10.75	10.21	10.567	0.31
C50/50	13.63	13.27	13.87	13.590	0.30

ตารางที่ ข.2.3 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของคอมโพสิต

อัตราส่วน เซลลูโลส/ ยางธรรมชาติ	1	2	3	ค่าเฉลี่ย (ร้อยละ)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
NR	69	77	72.6	72.867	4.01
AC10/90	147	153	150	150	3.00
C10/90	137	160	145.1	147.367	11.67
C20/80	304	302	302	302.667	1.15
C30/70	322	300	318	313.333	11.72
C40/60	10.92	12.26	12.80	11.993	0.97
C50/50	1.83	1.94	2.00	1.923	0.09

ตารางที่ ข.3 อัตราการบวมโทลูอินของคอมโพสิตฟิล์ม ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (ชม.)	อัตราการบวมโทลูอินของคอมโพสิตฟิล์ม						
	NR	AC10/90	C10/90	C20/80	C30/70	C40/60	C50/50
0	0	0	0	0	0	0	0
1	5385.94	5742.85	6829.66	3517.16	1692.26	1229.18	819.14
2	9153.58	7460.67	8097.98	3483.05	1714.36	1264.97	820.11
3	10700.47	7364.80	7950.81	3557.41	1768.41	1195.79	904.49
4	11767.47	7041.50	6819.20	3506.91	1856.30	1250.86	957.03
5	11564.95	5928.10	6301.55	3544.26	1957.05	1347.98	984.57
6	11225.66	5082.066	5252.796	3276.14	1846.19	1275.61	1026.17
7	10586.26	4901.673	4899.086	3184.504	1825.34	1194.19	934.37
8	9708.934	4126.901	4605.528	3075.697	1836.82	1214.41	831.641

ตารางที่ ข.4 อัตราการบวมตัวของคอมโพสิทฟิล์ม ระยะเวลา 1 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้อง

ตัวอย่าง	อัตราการบวมตัวของคอมโพสิทฟิล์ม						
	1	2	3	4	5	6	7
NR	11.818	15.524	17.552	20.420	21.748	24.476	27.203
	13.498	16.618	20.827	22.279	23.512	25.980	27.794
	15.136	18.373	21.913	24.021	26.054	28.389	29.819
ค่าเฉลี่ย	13.484	16.839	20.097	22.240	23.772	26.281	28.272
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.659	1.437	2.270	1.801	2.165	1.974	1.372
AC10	23.071	29.543	27.702	30.268	31.929	32.995	33.452
	20.084	24.281	25.193	28.001	28.741	28.118	34.197
	22.940	23.252	26.577	26.721	32.805	35.718	33.049
ค่าเฉลี่ย	22.032	25.692	26.491	28.330	31.158	32.277	33.566
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.688	3.375	1.257	1.796	2.139	3.851	0.582
C10	22.510	28.734	26.488	28.525	32.533	34.757	35.469
	24.703	27.723	27.652	32.522	34.653	33.471	35.390
	23.627	22.632	31.254	30.745	30.207	33.161	34.114
ค่าเฉลี่ย	23.613	26.363	28.464	30.597	32.465	33.796	34.991
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.096	3.271	2.485	2.003	2.224	0.846	0.760
C20	36.501	40.586	42.185	43.517	44.671	46.714	48.579
	36.146	39.702	42.101	42.514	43.093	44.582	44.996
	33.158	38.070	39.737	41.842	41.316	42.456	43.333
ค่าเฉลี่ย	35.268	39.453	41.341	42.624	43.027	44.584	45.636
ค่า	1.836	1.276	1.390	0.843	1.679	2.129	2.681

เบี่ยงเบน มาตรฐาน							
C30	43.732	46.793	47.376	48.834	50.729	50.000	52.770
	37.381	40.246	44.475	47.749	48.022	48.977	47.613
	38.736	42.720	41.896	45.192	45.467	46.291	46.566
ค่าเฉลี่ย	39.950	43.253	44.582	47.258	48.073	48.423	48.983
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.345	3.306	2.742	1.870	2.631	1.915	3.321
C40	41.031	45.650	46.724	50.161	49.517	51.772	54.350
	42.363	45.825	47.047	47.760	48.371	50.305	49.491
	40.550	45.933	47.727	50.478	51.196	52.033	52.392
ค่าเฉลี่ย	41.315	45.803	47.166	49.466	49.694	51.370	52.078
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.939	0.143	0.512	1.487	1.421	0.931	2.445
C50	39.242	46.867	54.292	53.623	54.089	57.876	58.444
	42.938	46.893	48.305	53.588	53.989	55.000	57.260
	42.985	51.046	54.209	52.908	55.296	58.546	57.082
ค่าเฉลี่ย	41.721	48.269	52.269	53.373	54.458	57.141	57.595
ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.147	2.405	3.433	0.403	0.727	1.884	0.740

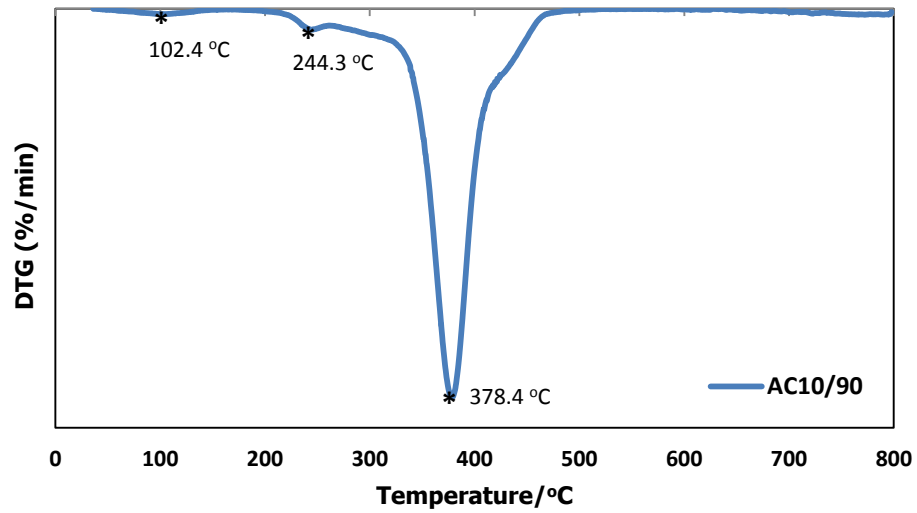
ตารางที่ ข.5 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิทฟิล์ม ระยะเวลา 2 เดือน ที่อุณหภูมิ
สิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างฟิล์ม	อัตราการย่อยสลายของคอมโพสิทฟิล์ม			
	2 สัปดาห์	4 สัปดาห์	6 สัปดาห์	8 สัปดาห์
NR	1.7410	2.1021	4.1327	6.6074
	2.0785	2.5272	3.8102	7.2963
	2.6134	1.0846	4.4668	8.8295
ค่าเฉลี่ย	2.1443	1.9046	4.1366	7.5777
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.4399	0.7413	0.3283	1.1375
AC10/90	10.0161	11.0233	13.2648	14.0152
	9.7736	10.8597	12.9545	13.9528
	10.1301	11.0312	12.7477	13.9984
ค่าเฉลี่ย	9.9733	10.9714	12.9890	13.9888
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.1821	0.0968	0.2603	0.0323
C10/90	10.3331	11.1010	13.4313	13.1582
	9.3961	11.8894	8.7434	13.2880
	10.1356	11.4971	12.5311	14.0745
ค่าเฉลี่ย	9.9550	11.4958	11.5686	13.5069
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.4939	0.3942	2.4878	0.4958
C20/80	16.6494	24.4372	22.6752	25.7108
	17.9312	19.4472	22.7703	26.1935
	16.8206	22.3973	25.5903	25.1521
ค่าเฉลี่ย	17.1337	22.0939	23.6786	25.6855
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.6959	2.5088	1.6562	0.5212
C30/70	19.9910	30.7972	33.8297	34.0232

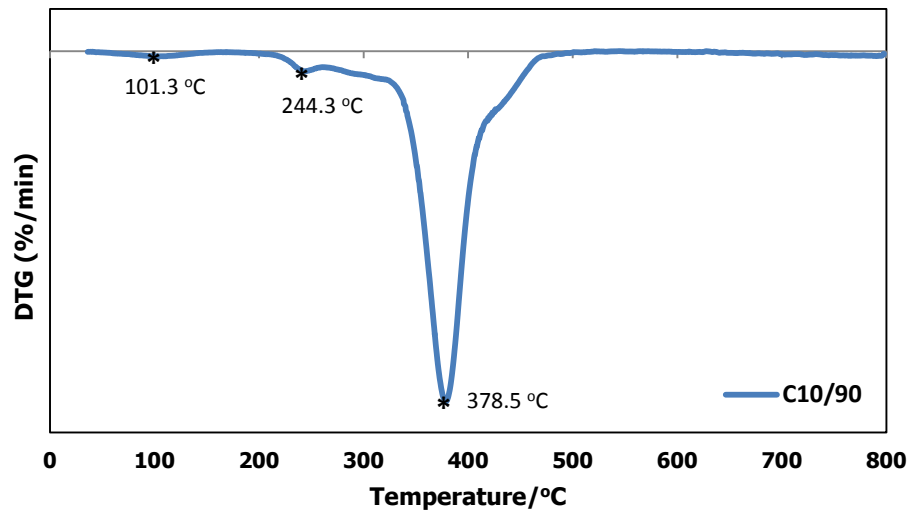
	18.8837	30.1818	34.4149	35.1363
	20.5759	29.8943	33.0266	33.7105
ค่าเฉลี่ย	19.8169	30.2911	33.7571	34.2900
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.8594	0.4613	0.6970	0.7494
C40/60	24.7216	33.5988	40.9639	39.4168
	20.6897	37.3143	39.2068	43.0439
	27.2581	34.5164	33.4142	42.1317
ค่าเฉลี่ย	24.2231	35.1431	37.8616	41.5308
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.3125	1.9354	3.9505	1.8867
C50/50	29.6938	41.4871	52.7905	52.4444
	29.3900	43.6630	52.0082	55.4248
	23.4586	44.5878	53.0558	51.6251
ค่าเฉลี่ย	27.5142	43.2460	52.6182	53.1648
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	3.5155	1.5918	0.5447	1.9997

ข.6 ข้อมูลสมบัติเชิงความร้อนของคอมโพสิตฟิล์ม

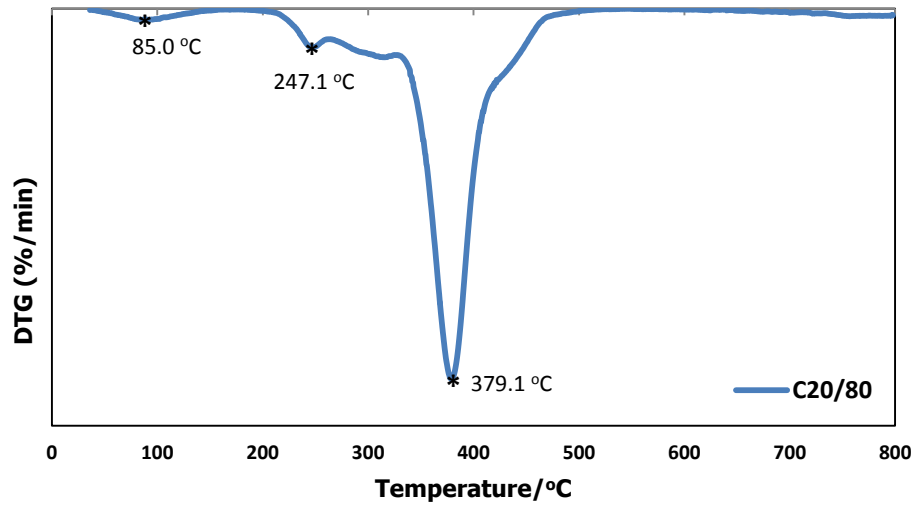
ภาพที่ ข6.1 ความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิต AC10/90



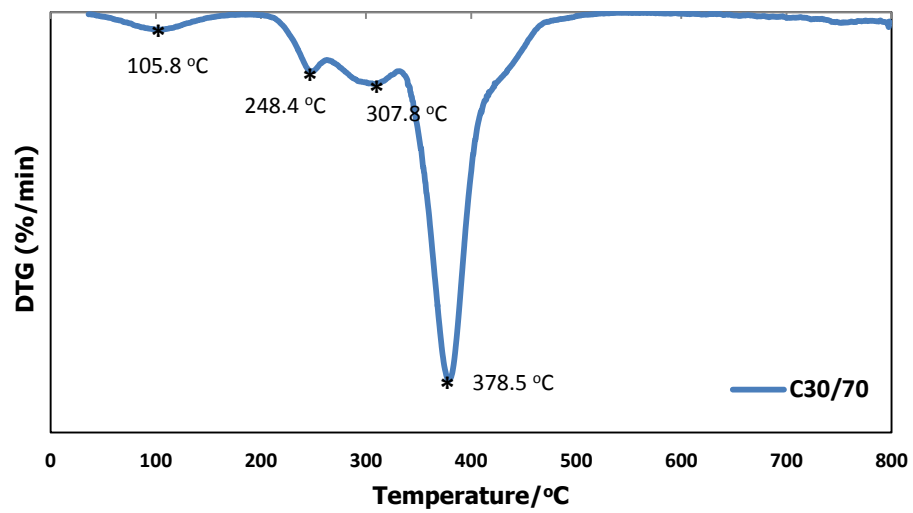
ภาพที่ ข6.2 ความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิต C10/90



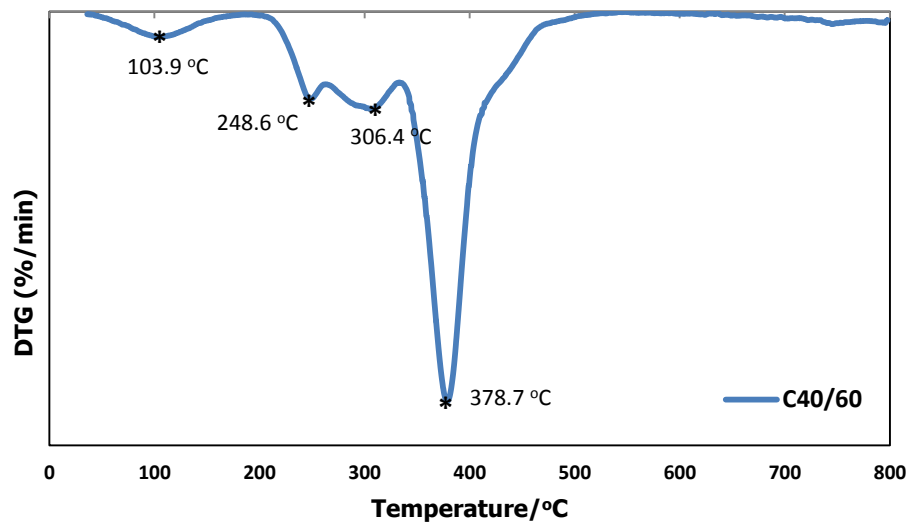
ภาพที่ ข6.3 ความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิต C20/80



ภาพที่ ข6.4 ความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิต C30/70



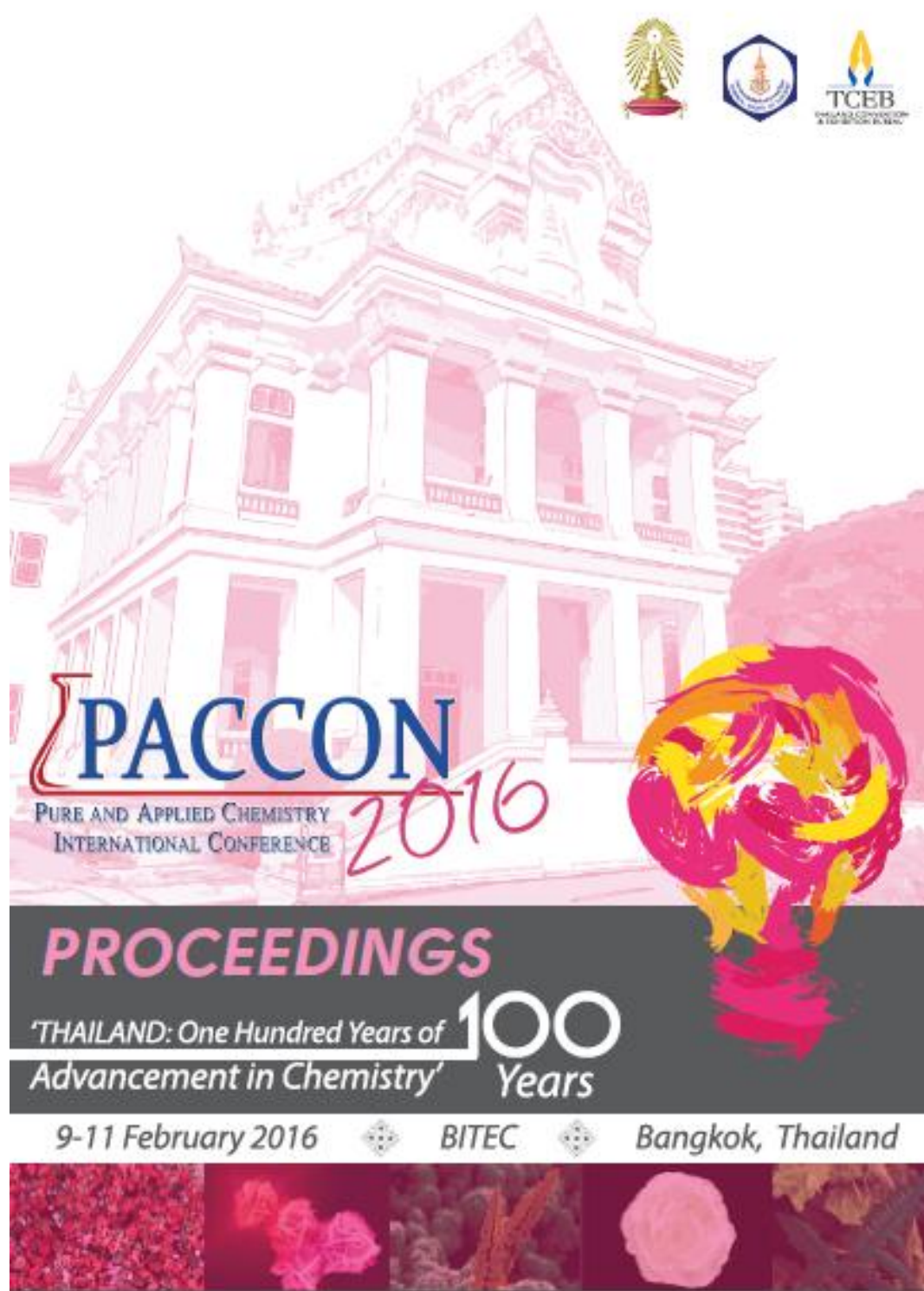
ภาพที่ ข6.5 ความเสถียรภาพทางความร้อนของคอมโพสิต C40/60



ภาคผนวก ค
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

Nanthaphak Varatkowpairote and Muenduen Phisalaphong. Microfibrillated cellulose reinforced natural rubber. Pure and applied chemistry international conference 2016 (PACCON2016). วันที่ 9 – 11 กุมภาพันธ์ 2559 ณ ไบเทค กรุงเทพฯ ประเทศไทย





Microfibrillated cellulose reinforced natural rubber

Nanthaphak Varatkowpairote, Muenduen Phisalaphong*

*Chemical Engineering Research Unit for Value Adding of Bioresources,
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand*

*e-mail: muenduen.p@chula.ac.th

Abstract:

Natural rubber (NR) is a biopolymer with a wide range of applications. NR has many good physical and mechanical properties; however raw NR has low tensile strength, low modulus and low abrasion resistant. In order to improve the mechanical properties of NR, NR was reinforced with microfibrillated cellulose (MFC). The advantages of MFC are renewable, cheap, acceptable specific strength, and biodegradable. The MFC reinforced NR (MFC-NR) was fabricated by casting solution method. The composite MFC-NR films were characterized for mechanical properties and chemical stability. MFC-NR morphology and dispersion of MFC in NR matrix were also investigated by Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). According to mechanical property analysis of MFC-NR films compared to NR films by a universal testing machine (UTM), young's modulus and tensile strength of the composite films were found to increase with increasing loads of MFC, whereas elongation at break relatively decreased. The rate of swelling in toluene of NR films was found to be significantly higher as compared to those of the composite MFC-NR films.

1. Introduction

Natural rubber (NR) is a renewable polymer type thermoplastic. In the current natural rubber is used in a wide range of applications because of its unique physical and chemical properties. The most important property of natural rubber is its high elasticity.^{1,4} However, NR also has some disadvantageous properties. NR is non-polar; therefore it can dissolve in non-polar solvents such as benzene, hexane and toluene. In addition, it has unstable physical property, which is strongly dependent on temperature. Therefore, some pretreatment or modification are required to improve the properties of NR, in order to extend its usage.⁵ Usually, properties of NR composites can be improved by the use of additives/fillers and by the change of the molecular structure of rubber into more polar.^{6,7}

Improved properties of NR reinforced with carbon black, silica, calcium carbonate, zinc oxide, magnesium oxide, talc, mica have been reported.^{8,9}

Carbon black is the most used reinforcing filler in rubber industry. However, carbon black is produced from the combustion of petroleum, which can be carcinogenic.^{10,11} Silica is not from the petroleum products, but it also has some disadvantages, such as high energy consumption to recovery and high density.^{12,13} Materials for the use as a reinforcement for NR should be environmentally friendly, using low energy consumption for preparation, biodegradability and non-toxicity.^{14,15} Therefore, the use of natural fibers as reinforcement material is a good alternative, because natural fibers are renewable and has benefits of specific strength, high availability, low density, low cost and biodegradability.¹⁶⁻¹⁸

The properties of NR can be improved by vulcanization process. It is the process of changing the molecular structure of rubber from a linear to cross-links between the chains. Addition of sulfur and heat can cause a covalent bond and improve mechanical properties.

However, vulcanization process consumes long time and high energy in a production of rubber products. Furthermore, the vulcanization process usually required the addition of sulfur.⁵ Immersion of NR product in organic acids can be an alternative way, which can improve the rubber properties such as tensile strength, tear resistance and abrasion resistance.

In this study, microfibrillated cellulose (MFC) reinforced NR was fabricated by casting solution method. Effect of MFC loading on the mechanical property and chemical stability of the NR composite was evaluated. Furthermore, MFC-NR composites were modified by crosslinking with acetic acid in order to improve the mechanical and chemical properties of matrix.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

NRL (60 DRC) purchased from the Rubber Research Institute of Thailand was used as the source of liquid NR. Cellulose sheet was kindly supported by the Teppatana Paper Mill Co., Ltd. Acetic acid was purchased from Sigma-Aldrich.

2.2 Preparation of MFC

Cellulose sheet was dried in oven at 80° C for 24 h to remove moisture and then was continuously dried in oven at 220 °C for 8 h. After that, it was crushed and grinded by crushing machinery. A sieve was used to obtain a particle size of about 54 micrometers.

2.3 Preparation of MFC-NR composites films

NR composite films were prepared by reinforcing NR with various contents of MFC ranging from 0 to 20 wt%. The mixture of MFC in deionized water was stirred for 45 minutes and then NRL was added into the mixture. The films were cast in a plastic tray and dried in oven at 40° C for 24 h.

2.4 Preparation of cross-linked MFC-NR composites films with acetic acid

MFC-NR composite films were immersed in 0.25 M acetic acid for 30

minutes at room temperature (30° C), and rinsed with deionized water until the pH became 7.0. After that, the films were dried in oven at 40° C for 12 h.

2.5 Characterization of MFC-NR composite films

Field emission scanning electron microscopy (FESEM) (JEOL JSM-7610F, Tokyo, Japan) was used to investigate morphologies, surface structures and dispersion of MFC within the NR matrix. Samples were quenched in liquid nitrogen, fractured, and subsequently vacuum-dried.

The maximum tensile strength, Young's modulus and elongation at break of NR composite films were determined with the Instron 5582 Universal Testing Machine. The test conditions followed ASTM D882. The average values were determined from 5 specimens and were reported with standard deviation showing the error range.

Toluene uptake was determined as follows. Sample films of 2.5x2.5x2.5 cm³ were dried and weighted using a balance and then were immersed in toluene at room temperature and weighted at 24, 48, 72 and 96 h. The toluene uptake was calculated by the following equation:

$$W_{\text{uptake}} = \left[\frac{W_t - W_0}{W_0} \right] \times 100$$

W_0 is the initial mass and W_t is the mass after immersion time.

3. Results & Discussion

3.1 Field emission scanning electron microscopy (FESEM)

Field emission scanning electron microscopy images of the surface of the MFC-NR composite films are shown in Fig.1. NR has a very smooth surface, whereas MFC20/NR80 and C-MFC20/NR80 had relatively rough surfaces due to uniform distribution of microfibrillated cellulose fibers (MCF) on the surfaces. It was shown that the cross-linked composite film of C-MFC20/NR80 had a structure very similar to that of MFC20/NR80.

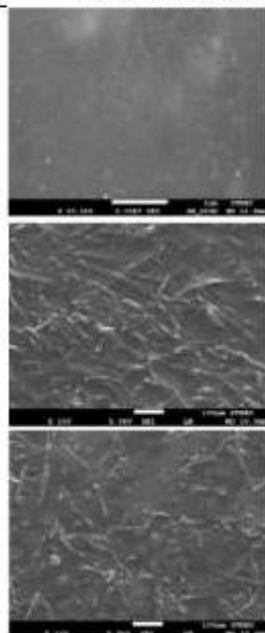


Figure 1. FESEM images of surfaces of NR-based films without/with the reinforcement with MFC: (a) NR (b) MFC20/NR80 and (c) C-MFC20/NR80.

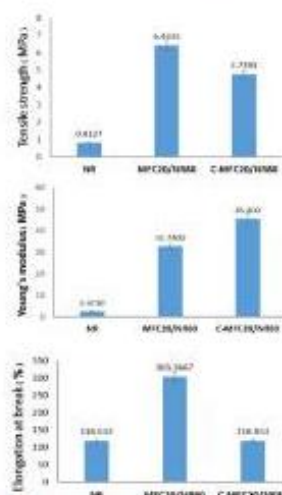


Figure 2. The Mechanical properties of NR and MFC/NR composite films (a) tensile strength, (b) Young's modulus and (c) elongation at break.

3.2 Mechanical properties

The Mechanical properties of NR and MFC/NR composite films were investigated. In general, pure NR has tensile strength, Young's modulus at low values, but has high elongation at break. The mechanical properties of pure NR could be considerably improved by reinforcement with MFC at 20 wt%. With this modification, the tensile strength was increased to 4.7-6.4 MPa (≈ 7 times), Young's modulus increased to 32.4 – 45.4 MPa (≈ 16 times). Relatively higher elongation at break as compared to NR was also observed from MFC20/NR80 but not from C-MFC20/NR80.

3.3 Toluene uptake

Toluene is a common solvent for NR. Figure 3 shows the toluene uptake as a function of time at room temperature of NR films compared to the composite MFC/NR films. The absorption of toluene could be divided into two time periods. In the first period, toluene is absorbed rapidly in NR, MFC20/NR80 and C-MFC20/NR80 during the immersion in toluene for 24 h; however, the uptake of toluene in NR was more than 2 times of the composite MFC/NR films. On the second time period, after the immersion more than 24 h, slightly more absorption of toluene was observed. However, significantly weight-loss of NR films was detected because NR was dissolved in toluene, whereas slight (or no) weight-loss was detected from samples of MFC20/NR80 and C-MFC20/NR80. The result showed that the reinforcement of NR with 20% MFC significantly improved the chemical resistance properties and structural stability of the composite films resulting in less swelling in a non-polar solvent as toluene and the composite films was not dissolved in toluene within 96-h Tests.

Figure 4 shows the comparison of MFC20/NR80 and C-MFC20/NR80 samples before and after the immersion in

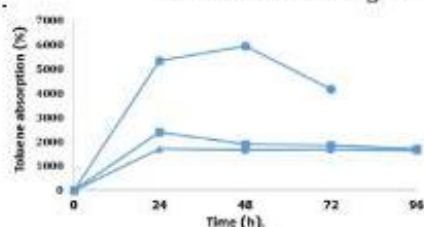


Figure 3. Toluene uptake as a function of time at room temperature for NR (●), MFC20/NR80 (■) and C-MFC20/NR80 (▲)

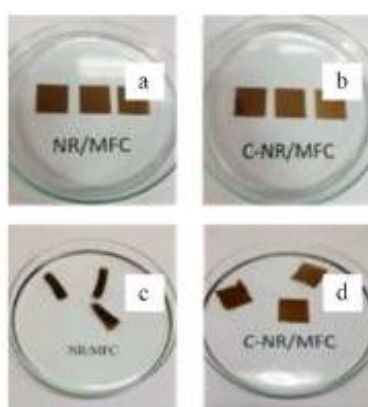


Figure 4. MFC/NR based composites immersed in toluene, before the immersion in toluene: MFC20/NR80 (a) and C-MFC20/NR80 (b); after the immersion in toluene for 96 h: MFC20/NR80 (c) and C-MFC20/NR80 (d).

toluene for 96 h. It was revealed that by cross-linking with acetic acid, the C-MFC/NR composite films could remain original shape, whereas without the crosslinking, the MFC/NR film, originally in a stretching form changed to a rolling form after the immersion in toluene for 96 h. Therefore, the cross-linking with acetic acid could improve structural stability of the C-MFC/NR films in non-polar solvents such as toluene.

4. Conclusion

In order to improve the mechanical properties of NR, microfibrillated cellulose

(MFC) was used as reinforcing agent for NR film, which was fabricated by casting solution method. The morphology studies of these composite films showed that the MFC were uniformly dispersed in NR matrix without aggregation. The addition of MFC at 20 % considerably improved the mechanical properties such as tensile strength and Young's modulus of the composite films. The reinforcement of NR with 20 % MFC also significantly improved the chemical resistance properties and structural stability of the composite films resulting in less swelling and the composite film was not dissolved in toluene. Moreover, the modification by crosslinking with acetic acid could improve structural stability of the C-MFC/NR films in non-polar solvents such as toluene.

Acknowledgements

The authors would like to thank the kindly support of cellulose sheet by Teppatana Paper Mill Co., Ltd. and the financial support from the Ratchadaphiseksomphot Endowment Fund of Chulalongkorn University for Project CU-57-032-Am.

References

1. Nair, A. B.; Joseph, R. Eco-friendly Bio-Composites using Natural Rubber (NR) Matrices and Natural Fiber Reinforcements. In *Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber*; Kohjiya, S.; Ikeda, Y., Eds. Woodhead Publishing: **2014**; pp 249–283.
2. Trovatti, E.; Carvalho, A. J. F.; Ribeiro, S. J. L.; Gandini, A. *Biomacromolecules* **2013**, *14*, 2667–2674.
3. Thakore, S. *Journal of Applied Polymer Science* **2014**, *131*, DOI: 10.1002/app.40632.
4. Bras, J.; Hassan, M. L.; Bruzesse, C.; Hassan, E. A.; El-Wakil, N. A.; Dufresne, A. *Ind. Crops Prod.* **2010**, *32*, 627–633.

PACCON Proceedings 2016: Polymer Chemistry (POL-2115)

5. Visakh, P. M.; Thomas, S.; Oksman, K.; Mathew, A. P. *Composites, Part A* 2012, 43, 735–741.
6. Jiang, C.; He, H.; Yao, X.; Yu, P.; Zhou, L.; Jia, D. *J. Appl. Polym. Sci.* 2014, DOI: 10.1002/app.41166.
7. Soheilmoghaddam, M.; Uzir Wahit, M.; Ibrahim Akos, N. *Mater. Lett.* 2013, 111, 221–224.
8. Al-Turaif, H. A. *Prog. Org. Coat.* 2013, 76, 477–481.
9. Ismail, H.; Haw, F. S. *J. Appl. Polym. Sci.* 2008, 110, 2867–2876.
10. Parambath Kanoth, B.; Claudino, M.; Johansson, M.; Berghund, L. A.; Zhou, Q. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015, 7, 16303–16310.
11. Bai, W.; Li, K. *Composites, Part A* 2009, 40, 1597–1605.
12. Xu, S.; Gu, J.; Luo, Y.; Jia, D.; Yan, L. *Polym. Compos.* 2015, 36, 861–868.
13. Prasertsri, S.; Rattanasom, N. *Polym. Test.* 2011, 30, 515–526.
14. Abraham, E.; Elbi, P. A.; Deepa, B.; Jyotishkumar, P.; Pothen, L. A.; Narine, S. S.; Thomas, S. *Polym. Degrad. Stab.* 2012, 97, 2378–2387.
15. Zhou, Y.; Fan, M.; Chen, L.; Zhuang, J. *Composites, Part B* 2015, 76, 180–191.
16. Pasquini, D.; Teixeira, E. d. M.; Curvelo, A. A. d. S.; Belgacem, M. N.; Dufresne, A. *Ind. Crops Prod.* 2010, 32, 486–490.
17. Bendahou, A.; Kaddami, H.; Dufresne, A. *Eur. Polym. J.* 2010, 46, 609–620.
18. Siqueira, G.; Tapin-Lingua, S.; Bras, J.; da Silva Perez, D.; Dufresne, A. *Cellulose* 2011, 18, 57–65.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว นันทศักดิ์ วัชรญ์ไคว้ไพโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2534 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย จังหวัด ศรีสะเกษ เมื่อปี พ.ศ. 2553 หลังจากนั้นได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2557 และได้ศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2557



