



รายงานการวิจัย

การใช้แกลบข้าวเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคอมโพสิต
(The use of Rice Husk as a filler for Natural Rubber Composites)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การใช้แกลบข้าวเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติคอมโพสิต
(The use of Rice Husk as a filler for Natural Rubber Composites)

ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธินาถ ศุภกาญจน์
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ร่วมวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร
สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2556
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2556 และได้รับการอำนวยความสะดวกด้านการใช้สถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือ รวมทั้งอุปกรณ์บางส่วนที่ใช้ในการทดลองจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวดาววรรณ ศรีสุวรรณ ขอขอบคุณบริษัท ซาแนล เคมีคอล จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับยาง ขอขอบคุณบริษัท หลุยส์ ดี เลียวโนเวนส์ (ประเทศไทย) จำกัดสำหรับความอนุเคราะห์สารคู่ควบไซเลน bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si69)



บทคัดย่อภาษาไทย

ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยแกลบข้าวซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวเป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับการเตรียมคอมโพสิตยางธรรมชาติ ขนาดเส้นใยแกลบข้าวที่ใช้มีขนาดระหว่าง 150-300 ไมโครเมตร การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวได้แก่ การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่าง และการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนนำมาใช้เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยแกลบข้าวต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัญญาณวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดุลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมโพสิตยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าการทนทานต่อแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด และค่าการทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวไม่มีผลต่อเวลาสกอรัซ และเวลาการคงรูปของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติแสดงให้เห็นการเกาะกลุ่มของเส้นใยแกลบข้าวในยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาจากสมบัติทางกลและราคาต้นทุนของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวที่เหมาะสมคือ 40 ส่วนใน 100 ส่วนของยางธรรมชาติ

เส้นใยแกลบข้าวถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดหรือสารละลายด่างที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน และทำการศึกษาสมบัติเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว เมื่อเปรียบเทียบกับผลของเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนและผลอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีของเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดไม่เปลี่ยนแปลง ในทางตรงกันข้าม ผลของการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกและอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีของเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่างแสดงการหายไปของเอมิเซลลูโลสและลิกนิน เวลาการปรับปรุงพื้นผิวไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดและสารละลายด่าง หลังจากนั้น เส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวนำมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติ เวลาการสกอรัซของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่างมีค่ามากกว่าเวลาการสกอรัซของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น เวลาการสกอรัซของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่างเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในขณะที่เวลาการคงรูปของคอมโพสิตทั้งสองชนิดมีค่าคงที่ ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่ามอดุลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่าการทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด และคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่างไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การ

ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายต่างแสดงประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติมากกว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายกรด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายต่าง คอมโพสิตของยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายต่างที่เวลา 2 ชั่วโมงแสดงสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุด

เส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายต่างเป็นเวลา 2 ชั่วโมงถูกนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 69 ที่ปริมาณต่างๆ เมื่อปริมาณสารคู่ควบไซเลน 69 เพิ่มขึ้น รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนไม่เปลี่ยนแปลง อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีสเปกตรัมของเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนยืนยันการติดอยู่ของสารคู่ควบไซเลนที่พื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าว สำหรับคอมโพสิตยางธรรมชาติ เวลาการสกอร์ชของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่ามากกว่าเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายต่าง เมื่อปริมาณสารคู่ควบไซเลน 69 เพิ่มขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเวลาการสกอร์ชของคอมโพสิตยางธรรมชาติ คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงค่าสูงสุดของค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ค่าการทนทานต่อแรงดึง และค่าการทนทานต่อการฉีกขาด



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ABSTRACT

In this study, rice husk fiber (RHF), as a byproduct from a rice milling process, was used as reinforcing filler for preparing natural rubber (NR) composites. RHF retained in sieve size ranging between 150-300 μm was used. RHF surface treatments, i.e., acid treatment, alkali treatment and silane treatment, were used to improve compatibility between RHF and NR matrix.

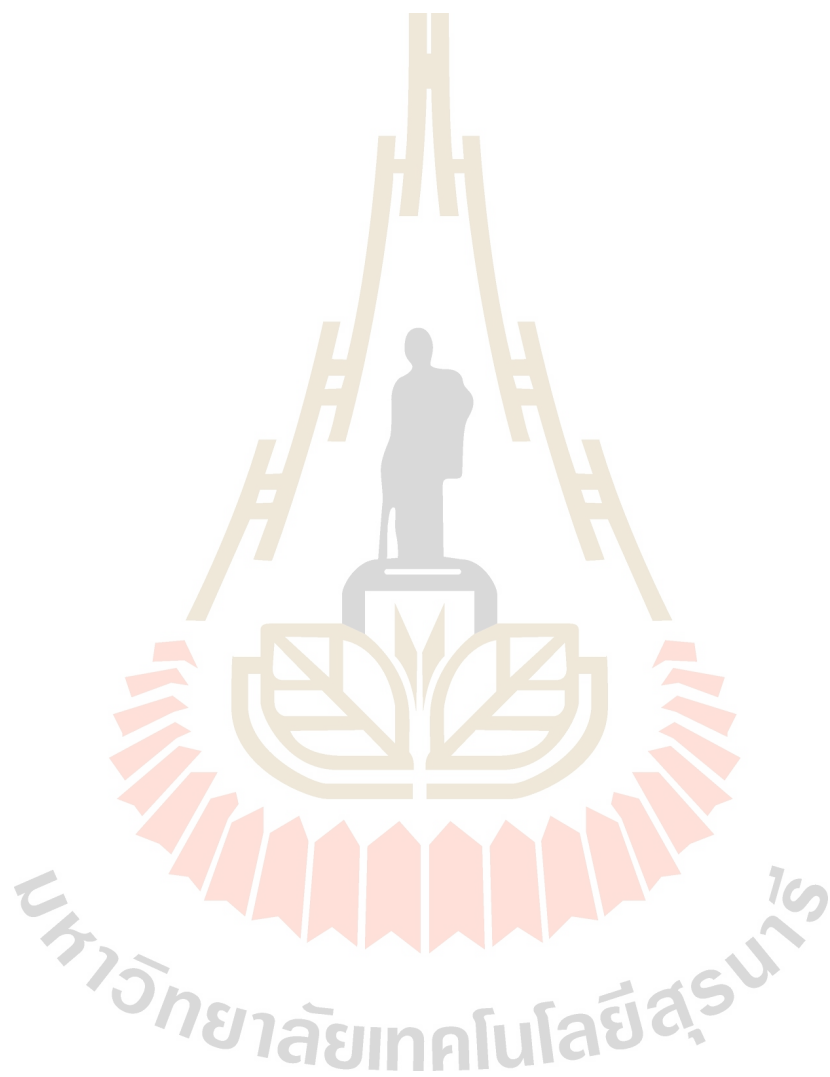
Effect of RHF content on cure characteristics, mechanical properties and morphological properties of RHF/NR composites was investigated. With increasing RHF content, modulus at 100% strain (M100) and modulus at 300% strain (M300) of the NR composites increased while elongation at break, tensile strength and tear strength decreased. Nonetheless, scorch time and cure time of RHF/NR composites were not affected by RHF content. SEM micrographs of RHF/NR composites showed RHF agglomeration in NR matrix. Based on the mechanical properties and material cost of the NR composites, the optimum content of RHF was 40 phr.

RHF was treated with acid or alkali solutions at various treatment times and the treated RHF was characterized. As compared with the corresponding results of untreated RHF (UT), thermal decomposition patterns and FTIR results of acid treated

RHF (ACT) were not changed. On the other hand, TGA and FTIR results of alkali treated RHF (ALT) showed the disappearance of hemicellulose and lignin. Treatment time insignificantly affected the properties of ACT and ALT. Then, the treated RHF was used as filler for producing NR composites. Scorch time of ALT/NR composites was longer than that of ACT/NR composites. With increasing treatment time, scorch time of ACT/NR and ALT/NR composites slightly changed whereas their cure time remained constant. M100, M300 and tear strength of ACT/NR and ALT/NR composites were insignificant difference. Alkali treatment showed more effective improvement in the mechanical properties of the NR composites than acid treatment. Among the ALT/NR composites, the NR composite containing ALT at 2 h treatment time showed the optimum mechanical properties.

RHF was pretreated with alkali solution for 2 h before treating RHF surface with Si69 at various Si69 contents. With increasing Si69 content, thermal decomposition patterns of silane treated RHF (ST) were not changed. FTIR spectra of ST confirmed that ST was attached on RHF surface. For NR composites, scorch time of ST/NR composites was longer than that of ALT/NR composites. With increasing Si69 content, there was no change in

scorch time of NR composites. ST/NR composites showed the maximum values of M100, M300, tensile strength and tear strength at Si69 content of 5 wt%.



สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4	การเตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยเคลือบข้าวกับยางธรรมชาติ.....	7
2.2.5	การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยเคลือบข้าวกับยางธรรมชาติ.....	9
2.2.5.1	ลักษณะการคงรูป.....	9
2.2.5.2	สมบัติทางกล.....	9
2.2.5.3	สัณฐานวิทยา.....	10
2.2.5.4	ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ.....	10
2.2.5.5	ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย.....	10
บทที่ 3	ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง.....	11
3.1	ผลของปริมาณเส้นใยเคลือบข้าวต่อสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยเคลือบข้าวกับยางธรรมชาติ.....	11
3.1.1	ลักษณะของการคงรูป.....	11
3.1.2	สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ.....	15
3.1.2.1	สมบัติทางด้านแรงดึง.....	15
3.1.2.2	สมบัติด้านการฉีกขาด.....	18
3.1.2.3	ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ.....	19
3.1.3	สัณฐานวิทยา.....	22
3.2	ผลการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยเคลือบข้าวด้วยกรดและด่างต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเคลือบข้าวและคอมโพสิทระหว่างเส้นใยเคลือบข้าวกับยางธรรมชาติ.....	23
3.2.1	เอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใย.....	23
3.2.1.1	สมบัติทางความร้อน.....	23
3.2.1.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	28
3.2.1.3	สัณฐานวิทยา.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1.4	อัตราส่วนระหว่างความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลาง	38
3.2.2	เอกลักษณ์เฉพาะของคอมโพสิต	40
3.2.2.1	ลักษณะของการคงรูป	40
3.2.2.2	สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ	46
3.2.2.2.1	สมบัติด้านแรงดึง	46
3.2.2.2.2	สมบัติด้านการฉีกขาด	50
3.2.2.2.3	ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ	51
3.2.2.3	สัณฐานวิทยา	54
3.3	ผลของปริมาณบิสโทรเอทอกซีไซลิลโพรพิลเททเธอรัลไฟด์ต่อสมบัติทางกายภาพ ของเส้นใยแก้วและคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติ	58
3.3.1	เอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใยแก้ว	58
3.3.1.1	สมบัติทางความร้อน	58
3.3.1.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	61
3.3.1.3	สัณฐานวิทยา	64
3.3.2	เอกลักษณ์เฉพาะของคอมโพสิต	68
3.3.2.1	ลักษณะของการคงรูป	68
3.3.2.2	สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ	70
3.3.2.2.1	สมบัติด้านแรงดึง	70
3.3.2.2.2	สมบัติด้านการฉีกขาด	73
3.3.2.2.3	ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ	74
3.3.2.3	สัณฐานวิทยา	77
3.3.2.4	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	78
บทที่ 4	สรุปผลการทดลอง	79
	บรรณานุกรม	81
	ประวัติคณะผู้วิจัย	87

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	ส่วนผสมของการเตรียมคอมโพสิทของเส้นใยกลบข้าวกับยางธรรมชาติ 8
3.1	การคงรูปของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน 14
3.2	สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน..... 21
3.3	อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน 27
3.4	ตำแหน่งของพีค FTIR ของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน 31
3.5	L/D ratio ของ UT, ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน 35
3.6	ลักษณะของการคงรูป ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน..... 45
3.7	สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน..... 53
3.8	อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน 60
3.9	ตำแหน่งพีค FTIR ของ 2ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน 63
3.10	ลักษณะของการคงรูปของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน..... 70
3.11	สมบัติทางกลและ crosslink density ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน 76
3.12	L/D ratio ก่อนและหลังการผสมของ UT/NR composites 2ALT/NR composites และ 5ST/NR composites 78

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ (1) สารคู่ควบไซเลน (Si69) และ (2) CBS.....	5
3.1 Scorch time และ cure time ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	12
3.2 Minimum torque และ maximum torque ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	13
3.3 Torque difference ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	14
3.4 Stress-strain curve ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	15
3.5 Modulus at 100% strain ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	16
3.6 Modulus at 300% strain ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	17
3.7 Elongation at break ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน	17
3.8 Tensile strength ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน.....	18
3.9 Tear strength ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน.....	19
3.10 Crosslink density ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน.....	20
3.11 SEM micrographs ของ (a) gum NR (b) 10RHF/NR composites (c) 20RHF/NR composites (d) 30RHF/NR composites (e) 40RHF/NR composites และ (f) 50RHF/NR composites	22
3.12 TGA (a) และ DTGA (b) thermograms ของ UT และ ACT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	25

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
3.13 TGA (a) และ DTGA (b) thermograms ของ UT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	26
3.14 FTIR spectra ของ UT และ ACT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	29
3.15 FTIR spectra ของ UT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	30
3.16 SEM micrographs ของพื้นผิวภายนอกของ (a) UT (b) 1ACT (c) 2ACT (d) 6ACT (e) 12ACT และ (f) 24ACT	33
3.17 SEM micrographs ของพื้นผิวภายในของ (a) UT (b) 1ACT (c) 2ACT (d) 6ACT (e) 12ACT และ (f) 24ACT	34
3.18 SEM micrographs ของพื้นผิวภายนอกของ (a) UT (b) 1ALT (c) 2ALT (d) 6ALT (e) 12ALT และ (f) 24ALT	36
3.19 SEM micrographs ของพื้นผิวภายในของ (a) UT (b) 1ALT (c) 2ALT (d) 6ALT (e) 12ALT และ (f) 24 ALT	37
3.20 Scorch time ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	41
3.21 Cure time ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	41
3.22 Minimum torque ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR Composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	43
3.23 Maximum torque ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	43
3.24 Torque difference ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	44
3.25 Modulus at 100% strain (M100) ของ UT/NR composites ACT/NR composites and ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	47
3.26 Modulus at 300% strain (M300) ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
3.27 Elongation at break ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	49
3.28 Tensile strength ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	50
3.29 Tear strength ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	51
3.30 Crosslink density ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน	52
3.31 SEM micrographs ของ (a) UT/NR composites (b) 1ACT/NR composites (c) 2ACT/NR composites (d) 6ACT/NR composites (e) 12ACT/NR composite และ (e) 24ACT/NR composites	55
3.32 SEM micrographs ของ (a) UT/NR composites (b) 1ALT/NR composites (c) 2ALT/NR composites (d) 6ALT/NR composites (e) 12ALT/NR composites and (f) 24ALT/NR composites.....	57
3.33 TGA (a) และ DTGA (b) thermograms ของ ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	59
3.34 FTIR spectra ของ 2ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	62
3.35 SEM micrographs ของพื้นผิวภายนอกของ (a) 2ALT (b) 2ST (c) 5ST และ (d) 10ST	64
3.36 SEM micrographs ของพื้นผิวภายในของ (a) 2ALT (b) 2ST (c) 5ST และ (d) 10ST.....	65
3.37 Scorch time ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	66
3.38 Cure time ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	67
3.39 Minimum torque ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	68

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
3.40 Maximum torque ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	68
3.41 Torque difference ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน	69
3.42 Modulus at 100% strain (M100) ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	71
3.43 Modulus at 300% strain (M300) ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	71
3.44 Elongation at break ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน	72
3.45 Tensile strength ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน	73
3.46 Tear strength ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	74
3.47 Crosslink density ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน.....	75
3.48 SEM micrographs ของ (a) 2ALT/NR composites (b) 2ST/NR composites (c) 5ST/NR composites และ (d) 10ST/NR composites.....	77

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบข่ายของการวิจัย	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	5
2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	5
2.2 การทดลอง	5
2.2.1 การเตรียมเส้นใยแกลบข้าว	5
2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าว	5
2.2.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายกรด	5
2.2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายต่าง	6
2.2.2.3 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน	6
2.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการ ปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว	6
2.2.3.1 สมบัติทางความร้อน	6
2.2.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน	7
2.2.3.3 สัณฐานวิทยา	7
2.2.3.4 ขนาดของเส้นใย	7

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาในงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) รายใหญ่ของโลก กว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติที่ส่งออกอยู่ในรูปของยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และน้ำยางข้น และยางธรรมชาติส่วนที่เหลือนำมาใช้ภายในประเทศเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยาง ยางธรรมชาติมีสมบัติที่น่าสนใจ ได้แก่ ความทนทานต่อการฉีกขาดสูง (high tear strength) ความทนทานการขัดถูสูง (high abrasion resistance) การกระดอนสูง (high resilience) และเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (strain-induced crystallization) (Muniandy, Ismail and Ohtman, 2012; Ostad-Movahed, Yasin, Ansarifar, Song and Hameed, 2008) เพราะสมบัติทางกลที่ดีของยางธรรมชาติ จึงมีการนำยางธรรมชาติมาใช้อุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน เช่น ยางรถยนต์ ท่อยาง เข็มขัดนิรภัย และยางรองคอสะพาน อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ยางเป็นเรื่องที่มีความสำคัญ เพื่อเป็นการเพิ่มการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

โดยทั่วไป สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางสามารถปรับปรุงได้หลายๆ วิธี ได้แก่ ระบบการคงรูป และการเติมสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) สำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลของยางธรรมชาติ คาร์บอนแบล็กและซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงดั้งเดิมที่ใช้มากในอุตสาหกรรมยางธรรมชาติ คาร์บอนแบล็กผลิตจากแหล่งพลังงานที่ไม่สามารถหาทดแทนใหม่ได้ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ ซิลิกาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อน แต่ซิลิกาจำเป็นต้องปรับปรุงพื้นผิวเพื่อลดการรวมตัวกันนำไปสู่ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น (Kohjiya and Ikeda, 2000) ไม่นานมานี้ มีความพยายามที่จะนำเส้นใยธรรมชาติจากการเกษตรได้แก่ ป่านศรนารายณ์ ปอกระเจา เส้นใยกล้วย ฟางข้าวสาเลี ผงไม้ และแกลบข้าว มาใช้เป็นสารตัวเติมทางเลือกสำหรับยางธรรมชาติ การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยางธรรมชาติมีความน่าสนใจ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรงจำเพาะสูงและมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ เส้นใยธรรมชาติยังมีจุดเด่นเหนือกว่าสารตัวเติมเสริมแรงดั้งเดิมในมุมมองของการนำกลับมาใช้ใหม่ การย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และราคาถูก (Nordin, Said and Ismail, 2007; Sarkawi and Aziz, 2003)

เส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ที่น่าสนใจคือ แกลบข้าว (rice husk, RH) แกลบข้าวพบมากในประเทศไทยซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการสีข้าว แกลบข้าวส่วนน้อยนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ วัสดุบุพื้น (bedding material) หรือเชื้อเพลิงภายในครัวเรือน ในขณะที่ แกลบข้าวส่วนใหญ่ถูกเผาในทุ่งโล่งนำไปสู่ปัญหามลภาวะในสิ่งแวดล้อม นักวิจัยหลายท่านพยายามขยายการใช้งานของแกลบข้าวโดยนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เป็นวัสดุ pozzolanic เพื่อเพิ่มการปรับปรุงดินขาวของปุ๋ย เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่ม

ความแข็งแรงการบีบอัดในปูนซีเมนต์ (cement) เป็นวัสดุสำหรับกระดาน (particleboard materials) และเป็นแอคทีเวทคาร์บอน (activated carbon) (Vempati, Musthyala, Mollah and Cocke, 1995) อีกหนึ่งทางเพื่อเพิ่มการใช้งานของแกลบข้าว คือ การใช้แกลบข้าวเป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยางธรรมชาติ แกลบข้าวประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 19 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 19.5 เปอร์เซ็นต์ และซิลิกา 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Marti-Ferrer, Vilaplana, Ribes-Greus, Benedito-Borras and Sanz-Box, 2006; Panthapulakkal, Law and Sain, 2005) นอกจากเซลลูโลสแล้ว แกลบข้าวมีซิลิกาในปริมาณสูงเมื่อเทียบกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ การมีอยู่ของทั้งเซลลูโลสและซิลิกาในแกลบข้าวน่าจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) โมดูลัส (modulus) และความแข็ง (hardness) นอกจากนี้ แกลบข้าวมีจุดเด่นหลายอย่างที่คล้ายกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ เช่น การย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก ความแข็งแรงสูง ความแข็งสูง และไม่มีสารก่อกวน (Nordin, Said and Ismail, 2007; Panthapulakkal, *et al.*, 2005) การใช้แกลบข้าวเป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยางธรรมชาติเป็นหนึ่งทางที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์เหลือใช้จากการเกษตร ยิ่งไปกว่านั้น การใช้แกลบข้าวเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติยังช่วยลดต้นทุนของวัสดุของการผลิตคอมโพสิตของยางธรรมชาติเช่นเดียวกันกับช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้

อย่างไรก็ตาม แกลบข้าวมีความไม่เข้ากันกับยางธรรมชาตินำไปสู่แรงยึดติดระหว่างผิวหน้า (interfacial adhesion) ระหว่างแกลบข้าวและยางธรรมชาติที่ต่ำ ความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและแกลบข้าวสามารถปรับปรุงได้หลายวิธี ได้แก่ การเติมสารช่วยประสาน (addition of compatibilizer) การปรับปรุงเมทริกซ์ (matrix modification) และการปรับปรุงพื้นผิวแกลบข้าว (Surface treatment of rice husk) (Bera and Kale, 2008; Yang, Kim, Park, Lee and Hwang, 2007) การปรับปรุงพื้นผิวแกลบข้าวสามารถทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพและทางเคมี การปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยรังสีด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam (EB) irradiation) การปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยการไอออนของก๊าซ (plasma treatment) และการปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยน้ำ (water treatment) และการปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ การปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยสารละลายกรด (acid treatment) การปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยสารละลายด่าง (alkali treatment) และการปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยสารซิลิโคน (silane treatment) นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อปรับปรุงพื้นผิวของแกลบข้าว (Lane, Ahmad, Dahlan and Abdullah, 2011; Kim, Kim and Kim, 2006; Kim, Kim, Kim and Yang, 2006)

ทั้งนี้ การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดและการปรับปรุงพื้นผิวดังกล่าวด้วยสารละลายด่างจะเป็นการขจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสิ่งสกปรกจากพื้นผิวแกลบข้าว และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความขรุขระบนพื้นผิวแกลบข้าว (Li, Tabil and Panigrahi, 2007; Ndazi, Karlsson, Tesha and Nyahumwa, 2007) วิธีการนี้ช่วยปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างแกลบข้าวและยางธรรมชาติเมทริกซ์ด้วยการประสานกันทางกล (mechanical interlocking) อย่างไรก็ตาม แรงกระทำระหว่างแกลบข้าวและยาง

ธรรมชาตินี้เป็นเพียงแรงกระทำทางกายภาพ หนึ่งวิธีของการเพิ่มแรงกระทำทางเคมีระหว่างสองวัสดุ คือ การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนนำมาใช้หลังจากปรับปรุงพื้นผิวแอลบข้าวด้วยการปรับปรุงด้วย สารละลายกรดหรือสารละลายต่าง ความขรุขระของพื้นผิวแอลบข้าวหลังจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีทาง กายภาพเพิ่มการแทรกซึมของสารคู่ควบไซเลนเข้าไปยังรูเล็กบนพื้นผิวของแอลบข้าว สารคู่ควบไซเลนมีหมู่ ฟังก์ชัน 2 หมู่ หมู่ฟังก์ชันแรกของสารคู่ควบไซเลนเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ของแอลบข้าวและเกิด พันธะโควาเลนต์บนผิวของแอลบข้าว ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันที่เหลือของไซเลนจะเกิดแรงกระทำกับพอลิเมอร์ เมทริกซ์โดยพันธะไฮโดรเจนหรือการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ (entanglement) ดังนั้นสารคู่ควบไซเลนกระทำตัวเหมือนดังเป็นสะพานเชื่อมระหว่างแอลบข้าวที่มีความเป็นขี้วและยางธรรมชาติที่ไม่มีขี้ว นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ interfacial adhesion ระหว่างทั้งสองวัสดุ (Maziad, El-Nashar and Sadek, 2009; Li *et al.*, 2007).

ในงานวิจัยนี้ คอมโพสิทระหว่างเส้นใยแอลบข้าว (rice husk fiber, RHF) กับยางธรรมชาติ ถูกเตรียม การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแอลบข้าวด้วยสารละลายกรด การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแอลบข้าวด้วยต่าง และการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลนนำมาใช้ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแอลบข้าวเพื่อปรับปรุง ความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยแอลบข้าวและยางธรรมชาติเมทริกซ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์ของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

- (1) เพื่อศึกษาผลของปริมาณเส้นใยแอลบข้าวต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแอลบข้าวกับยางธรรมชาติ
- (2) เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดและสารละลายต่างต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแอลบข้าวกับยางธรรมชาติ
- (3) เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแอลบข้าวกับยางธรรมชาติ

1.3 ขอบข่ายของการวิจัย

เส้นใยแอลบข้าวที่มีขนาดระหว่าง 150-300 ไมโครเมตรใช้เป็นสารตัวเติมในงานวิจัยนี้ และทำการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแอลบข้าวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) หรือสารคู่ควบไซเลน bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si69) สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดหรือต่าง เวลาที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแอลบข้าว คือ 1 2 6 12 และ 24 ชั่วโมง สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน เส้นใยแอลบข้าวถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดหรือต่างที่เวลาที่เหมาะสมก่อนนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยสาร

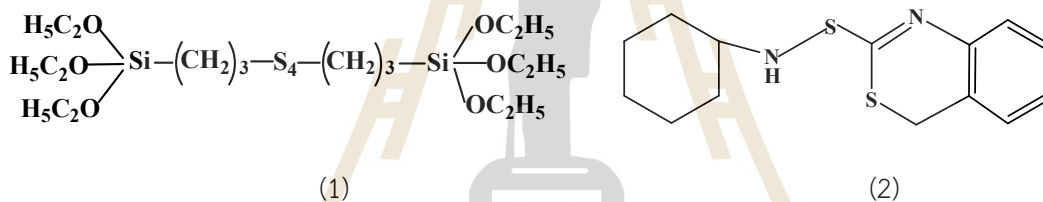
คู่ควบไซเลน ปริมาณสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิว คือ 2.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทั้ง 3 วิธี ได้แก่ เส้นใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด (acid treated RHF, ACT),) เส้นใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่าง (alkali treated RHF, ALT)) และเส้นใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane treated RHF, ST) สมบัติของเส้นใยแก้วที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและเส้นใยแก้วที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวตรวจสอบโดยใช้ เครื่องทดสอบเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analyzer, TGA) เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) เครื่องออปติคอลลไมโครสโคป (optical microscope, OM) และเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

คอมโพสิทระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติเตรียมบนเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง โดยใช้ระบบการคงรูปแบบกำมะถันดั้งเดิม (conventional sulfur vulcanization) ในงานวิจัยนี้เตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติที่ปริมาณเส้นใยแก้วต่าง ๆ และปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแก้วด้วยวิธีต่าง ๆ ศึกษาลักษณะการคงรูปของคอมโพสิทยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องทดสอบลักษณะการคงรูปของยางชนิดไม่มีโรเตอร์ (moving die rheometer, MDR) ทดสอบสมบัติทางกลโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (universal testing machine (UTM) และศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นยางเกรด STR 5L ผลิตจากบริษัทไทยฮั้ว ยางพารา จำกัด (มหาชน) แกลบข้าว (rice husk, RH) ซื้อมาจากโรงสีข้าวในจังหวัดนครราชสีมา กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรและโซเดียมไฮดรอกไซด์ผลิตจากบริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด สารคู่ควบไซเลน bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si69) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท หลุยส์ ดิเลียวโนเวนส์ (ประเทศไทย) จำกัด N-cyclohexyl-2-benzothiazole-2-sulphenamide (CBS) กรดสเตียริก (stearic acid) ซิงออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) และกำมะถัน (sulfur, S) ได้รับความอนุเคราะห์มาจากบริษัท ซาแนล เคมีคอล จำกัด โครงสร้างเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si69 และ CBS แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ (1) สารคู่ควบไซเลน (Si69) และ (2) CBS

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมเส้นใยแกลบข้าว

นำแกลบข้าวมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อขจัดดินและสิ่งสกปรกและตากทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นนำแกลบข้าวที่แห้งแล้วไปบดด้วยเครื่องบดสาร (RETSCH/ZM200) นำแกลบข้าวที่ผ่านการบดไปร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้เครื่องร่อนแบบเขย่า (RETSCH/AS200) และใช้เส้นใยแกลบข้าวที่มีขนาดระหว่าง 150-300 ไมโครเมตรเป็นสารตัวเติมในงานวิจัยนี้ หลังจากนั้น นำเส้นใยแกลบข้าวไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนผสมกับยางธรรมชาติ

2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าว

2.2.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายกรด

การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายกรดทำโดยนำเส้นใยแกลบข้าวแช่ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง ที่เวลาต่าง ๆ ได้แก่ 1 2 6

12 และ 24 ชั่วโมง โดยให้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยกลบและสารละลายเป็น 1 กรัมต่อสารละลาย 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้น นำเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดมากรอง ล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดกรดที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวเส้นใยและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรดที่เวลาต่าง ๆ เรียกว่า 1ACT 2ACT 6ACT 12ACT และ 24ACT

2.2.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายต่าง

การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกลบข้าวด้วยสารละลายต่างทำโดยนำเส้นใยกลบข้าวแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง ที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 1 2 6 12 และ 24 ชั่วโมง โดยให้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยกลบและสารละลายเป็น 1 กรัมต่อสารละลาย 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้น นำเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากรอง ล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวเส้นใยและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ เรียกว่า 1ALT 2ALT 6ALT 12ALT และ 24ALT

2.2.2.3 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน

ก่อนปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกลบข้าวด้วยสารคู่ควบไซเลน เส้นใยกลบข้าวต้องผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เวลาคงที่ค่าหนึ่งก่อน จากนั้นนำสารคู่ควบไซเลน Bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si69) ละลายในเอทานอล โดยปริมาณของสารคู่ควบไซเลน Si69 ที่ใช้มีค่าเป็น 2.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับน้ำหนักเส้นใยกลบข้าวและนำเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แช่ลงในสารละลายเอทานอลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยให้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยกลบข้าวและสารละลายเป็น เส้นใยกลบข้าว 1 กรัมต่อสารละลาย 15 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไซเลนมากรอง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 เรียกว่า 2ST 5ST และ 10ST

2.2.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใยกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

2.2.3.1 สมบัติทางความร้อน

ศึกษารูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนและถ่วงน้ำหนักของเส้นใยกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analyzer, TGA) (TA INSTRUMENT/SDT2960)) กราฟของ TGA และ DTGA ของเส้นใยกลบข้าวได้จากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจากอุณหภูมิห้องจนถึง 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10°C/min ในสภาวะที่เป็นก๊าซไนโตรเจน

2.2.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) (BRUKER/ VERTEX 70) โดยเชื่อมกับ MIRacle-single reflection attenuated total reflectance (ATR) ที่ติดตั้งอยู่กับ Platinum diamond crystal (TYPE A225/QL) วัดในช่วงจำนวนคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ที่ค่าความละเอียด 4 cm^{-1} และจำนวนครั้งของการวัด 64 ครั้ง

2.2.3.3 สัณฐานวิทยา

ศึกษาพื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าวเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope (SEM) (JEOL/JCM-5000)) โดยใช้งานที่ค่าพลังงานเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ และฉาบตัวอย่างด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ

2.2.3.4 ขนาดของเส้นใย

วัดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแกลบข้าวเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจำนวน 100 ตัวอย่าง โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope (OM) (NIKON/ELIPSE E600 POL))

2.2.4 การเตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ

การเตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติทำโดยอบเส้นใยแกลบข้าวในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนจะนำไปผสมกับยางธรรมชาติ ผสมเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 20 นาที เริ่มจากการบดยางธรรมชาติก่อนเป็นเวลา 5 นาที เพื่อลดความหนืดของยาง จากนั้น เติมกรดสเตียริก ซิงค์ออกไซด์ CBS เส้นใยแกลบข้าว และสุดท้ายผสมกำมะถัน (Sulfur) ส่วนผสมของการเตรียมคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของการเตรียมคอมโพสิตของเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)				
	10	20	30	40	50
Natural rubber	100	100	100	100	100
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Zinc oxide	5	5	5	5	5
CBS ^a	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Untreated RHF	-	x	-	-	-
Acid treated RHF	-	-	y	-	-
Alkali treated RHF	-	-	-	y	-
Silane treated RHF	-	-	-	-	y
Sulfur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

x:10, 20, 30, 40, 50 phr

y: optimum RHF content from the first experimental step

^a N-cyclohexyl-2-benzothiazole-2-sulphenamide

ขั้นตอนของการวิจัยมีดังนี้

- (1) ทำการเตรียมคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวต่าง ๆ ได้แก่ 10 20 30 40 และ 50 phr และศึกษาผลของปริมาณเส้นใยแกลบข้าวต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ จากนั้นพิจารณาสมบัติทางกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะได้ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวที่เหมาะสมซึ่งนำไปใช้เตรียมคอมโพสิตในการทดลองขั้นที่ 2 และ 3 ต่อไป
- (2) ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายกรดหรือสารละลายด่างที่เวลาต่างๆ ได้แก่ 1 2 6 12 และ 24 ชั่วโมงและนำมาใช้เพื่อเตรียมคอมโพสิต โดยให้ปริมาณของเส้นใยแกลบข้าวคงที่ และศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด

และสารละลายต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติ จากนั้นพิจารณาสมบัติทางกลของคอมโพสิตของยางธรรมชาติจะได้วิธีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแก้วและเวลาของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยซึ่งจะนำไปใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแก้วก่อนจะปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารคู่ควบไซเลน

- (3) ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแก้วด้วยสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณต่างๆ ได้แก่ 2.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและนำมาใช้เพื่อเตรียมคอมโพสิต โดยให้ปริมาณของเส้นใยแก้วคงที่ ศึกษาผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติ

2.2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์เฉพาะของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติ

2.2.5.1 ลักษณะการคงรูป

ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติและคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติศึกษาโดยใช้เครื่องทดสอบลักษณะการคงรูปของยางชนิดไม่มีโรเตอร์ ((moving die rheometer, MDR (GOTECH/GT-M200F)) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจสอบค่าระยะเวลาการสกรอช (scroch time) เวลาการคงรูป (cure time) แรงบิดสูงสุด (maximum torque) และแรงบิดต่ำสุด (minimum torque) ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ

2.2.5.2 สมบัติทางกล

ยางธรรมชาติและคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแก้วกับยางธรรมชาติขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (compression molding machine (LAB TECH/L320)) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาการคงรูปที่ได้จากเครื่อง MDR จากนั้น นำคอมโพสิตที่ได้มาตัดตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์และตัวอย่างสำหรับการทดสอบการฉีกขาดโดยใช้หัวตัดชนิด C (Type C)

สมบัติความแข็งแรงของแรงดึง (tensile properties) ของยางธรรมชาติและคอมโพสิตของยางธรรมชาติทดสอบตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Material (ASTM D 412-06a) ขณะที่สมบัติความทนทานของการฉีกขาดทดสอบตามวิธีมาตรฐานของ American Society for Testing and Material (ASTM D 624) โดยใช้เครื่องทดสอบการดึง (universal testing machine (UTM) (INSTRON/5569)) ใช้น้ำหนัก 5 กิโลนิวตัน และใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

2.2.5.3 สัณฐานวิทยา

การกระจายตัวของเส้นใยกลบข้าวในคอมโพสิตของยางธรรมชาติและสัณฐานวิทยาของขึ้นทดสอบหลังจากทดสอบความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตตรวจสอบโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM (JEOL/JCM-5000)) โดยขึ้นตัวอย่างจะต้องทำการฉาบทองก่อนนำไปทดสอบ

2.2.5.4 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density, V_e) ของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกลบข้าวกับยางธรรมชาติทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing and Material (ASTM D 6814) โดยการแช่คอมโพสิตของยางธรรมชาติในโทลูอีนที่ 27 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจนกระทั่งถึงจุดสมดุลของการบวมพอง ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะของตัวอย่างคำนวณจากสมการของ Flory-Rhener (Flory, 1953)

$$V_e = \frac{-[\ln(1-V_r) + V_r + \chi_1 V_r^2]}{V_1 [V_r^{1/3} - (V_r/2)]} \quad (2.1)$$

เมื่อ V_e คือจำนวนของสายโซ่ของยางในโครงสร้างร่างแหต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร. χ_1 ค่าคงที่ของ Flory-Huggines ของการเกิดปฏิกิริยาต่อกันระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (0.393 สำหรับโทลูอีน) V_1 คือปริมาตรโมลาร์ของตัวทำละลาย (106.2 สำหรับโทลูอีน) V_r คือสัดส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ในตัวอย่างที่บวมพองแล้วจนถึงสมดุลในตัวทำละลายและสามารถคำนวณจากสมการของ Ahmed, Nizami, Raza and Mahmood, 2012

$$V_r = \frac{\text{Weight of dry rubber} / \text{density of dry rubber}}{\frac{\text{Weight of dry rubber}}{\text{Density of dry rubber}} + \frac{\text{Weight of solvent absorbed by sample}}{\text{Density of solvent}}} \quad (2.2)$$

2.2.5.5 ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย Fiber length and diameter

นำคอมโพสิตระหว่างเส้นใยกลบข้าวกับยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านการคงรูปประมาณ 1 กรัมมาละลายในตัวทำละลายโทลูอีนเพื่อสกัดเส้นใยกลบข้าวออกมา หลังจากนั้นนำเส้นใยกลบข้าวที่สกัดออกมาประมาณ 100 ตัวอย่างไปวัดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM (NIKON/ELIPSE E600 POL))

บทที่ 3

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ผลของปริมาณเส้นใยแกลบข้าวต่อสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ

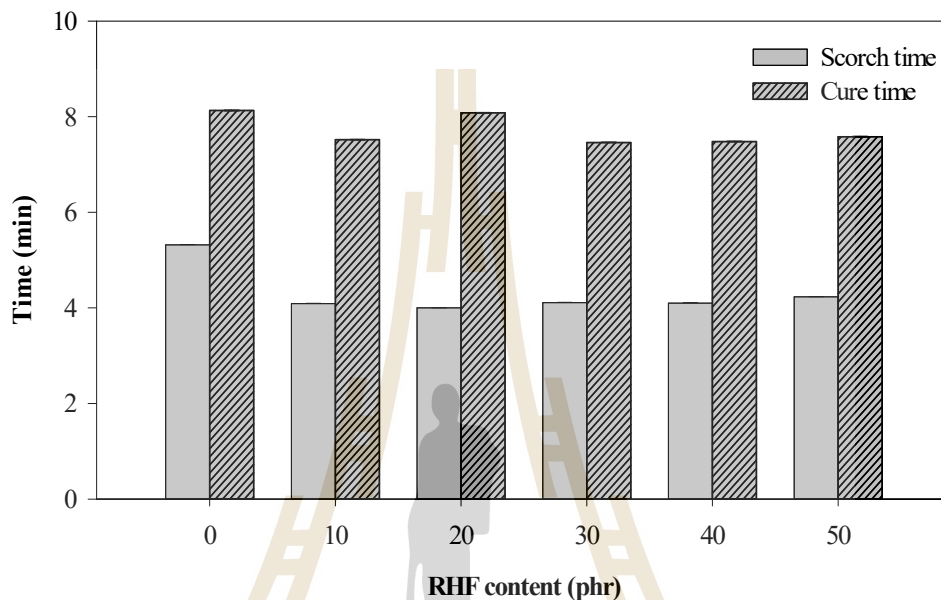
3.1.1 ลักษณะของการคงรูป

ลักษณะของการคงรูปของยางธรรมชาติที่ไม่เติมเส้นใยแกลบข้าว (gum NR) และคอมโพสิตระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ (RHF/NR composites) ได้แก่ ระยะเวลาการสกอ์ช (scorch time) ระยะเวลาการคงรูป (cure time) แรงบิดสูงสุด (maximum torque (S_{max})) แรงบิดต่ำสุด (minimum torque (S_{min})) และผลต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดและค่าแรงบิดต่ำสุด (torque difference ($S_{max} - S_{min}$)) แสดงในรูปที่ 3.1 - 3.3 และแสดงในตารางที่ 3.1.

จากรูปที่ 3.1 คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าว (RHF/NR composites) มี scorch time และ cure time ที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมเส้นใยแกลบข้าว (gum NR) งานวิจัยหลายงานได้รายงานผลที่เหมือนกับผลของลักษณะของการคงรูปของงานวิจัยนี้ในระบบของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยเปลือกมะพร้าว (coir fiber/NR composites) (Geethamma, Mathew, Lakshminarayanan and Thomas, 1995) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน (oil palm/NR composites) (Ismail, Rozman, Jaffri and Ishak, 1997), คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยป่านศรนารายณ์กับปาล์มน้ำมัน (short sisal fiber/oil palm/NR composites) (Jacob, Thomas and Varughese, 2004) หรือคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมผงแกลบข้าว (rice husk powder/NR composites) (Attharangsana, Ismail, Barkar and Ismail, 2012) นักวิจัยเหล่านั้นพบว่าการเติมเส้นใยธรรมชาติลงในยางธรรมชาติจะลดทั้ง scorch time และ cure time ของคอมโพสิตของยางธรรมชาติ (NR composites) Wang, Wu, Wang and Zhang, (2011) ให้คำอธิบายเรื่องการลดลงของ scorch time และ cure time ของ NR composites ว่าเกิดจากระยะเวลาการผสมของ NR composites ที่ยาวกว่า gum NR เมื่อเติมเส้นใยแกลบข้าวลงในยางธรรมชาติเวลาของการผสมเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความร้อนในระหว่างการผสมส่งผลให้เกิดการคงรูปในบางส่วน (premature crosslinking) เกิดขึ้นใน NR composites

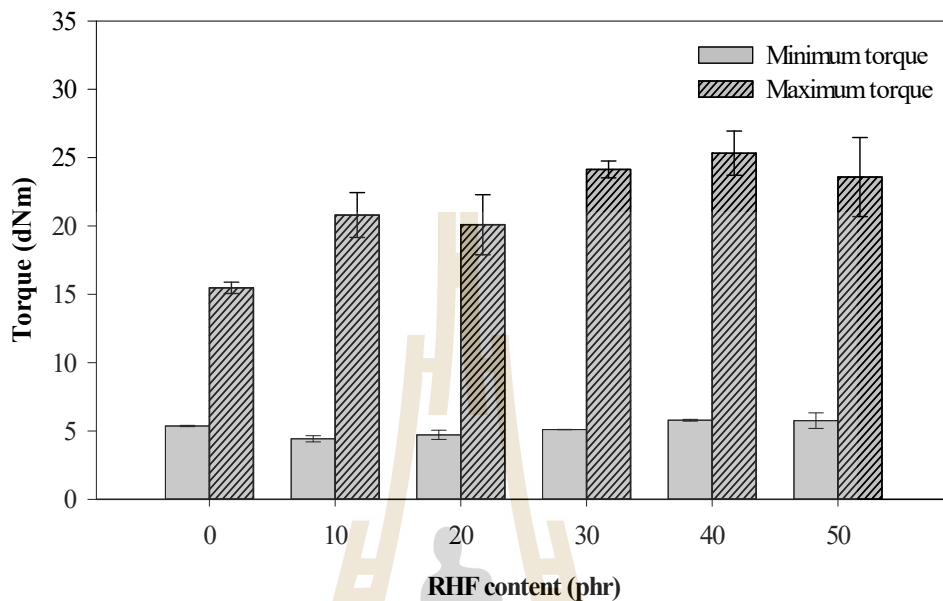
ในงานวิจัยนี้ เมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น scorch time และ cure time ของ NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ อาจเป็นเพราะการประนีประนอมกันระหว่างการดูดซับสารตัวเร่งของยางโดยหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าวและการเกิด premature crosslinking ใน NR composites นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญของ scorch time และ cure time ของคอมโพสิต องค์ประกอบหลักของเส้นใยแกลบข้าวคือ เซลลูโลสซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลหลายๆหมู่ และหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถดูดซับสารตัวเร่งของยางส่งผลให้ scorch time และ cure time ของ NR

composites ยาวขึ้น (Sae-oui, Sirisinha, Thepsuwan and Hatthapanit, 2004) ในทางตรงกันข้าม การเกิด premature crosslinking ใน NR composites น่าจะลด scorch time และ cure time ของคอมโพสิต



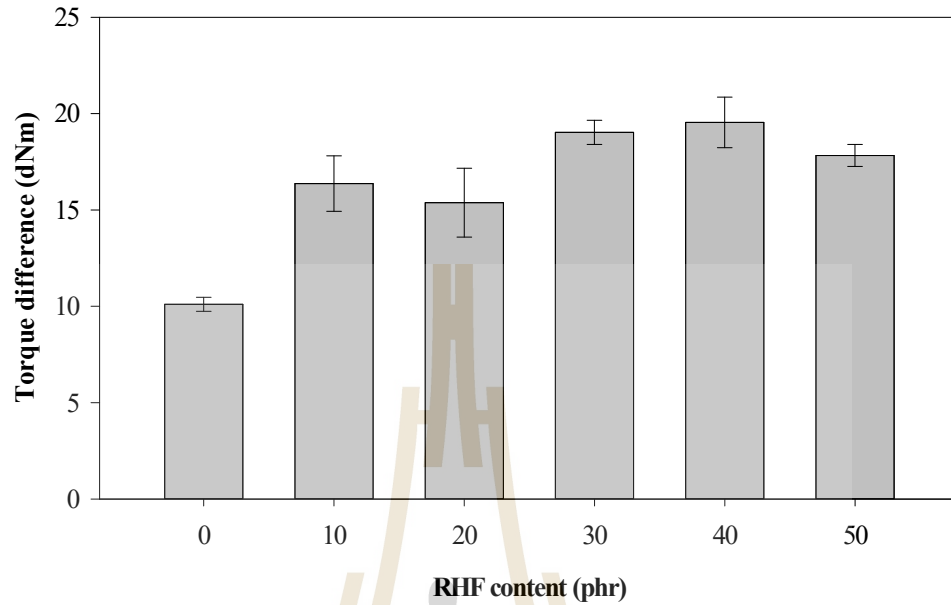
รูปที่ 3.1 Scorch time และ cure time ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน

Minimum torque และ maximum torque ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.2 minimum torque (S_{min}) สัมพันธ์กับความหนืดของยางคอมพาวด์ ในขณะที่ maximum torque (S_{max}) สัมพันธ์กับความแข็งของยางที่ผ่านการคงรูปอย่างสมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับ gum NR minimum torque และ maximum torque ของ NR composites เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากการเติมเส้นใยกลบข้าวลงในยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความหนืดของยางคอมพาวด์และขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของยางนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความแข็งของ NR composites (De, De and Adhikari, 2004) เมื่อปริมาณเส้นใยกลบข้าวเพิ่มขึ้น minimum torque และ maximum torque ของ NR composites เพิ่มขึ้น แนวโน้มที่เหมือนกันมีการรายงานโดย Ismail, Othman and Komethi, (2012), Ismail, Rozman, Jaffri and Ishak, (1997), และ Lopattananon, Panawarankul, Sahakaro and Ellis, (2006)



รูปที่ 3.2 Minimum torque และ maximum torque ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน

Torque difference ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.3 Torque difference เป็นผลต่างระหว่าง maximum torque และ minimum torque ($S_{max} - S_{min}$) คือการวัดขอบเขตของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density) ของคอมโพสิตยาง (Ismail and Chia, 1998) เมื่อเปรียบเทียบกับ gum NR RHF/NR composites แสดงการเพิ่มขึ้นของ torque difference เล็กน้อยเมื่อปริมาณเส้นใยกลบข้าวเพิ่มขึ้น Nordin, Said and Ismail, (2006) ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของ torque difference ของคอมโพสิตระหว่างผงกลบข้าวกับยางธรรมชาติเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ crosslink density ของ NR composites อย่างไรก็ตาม crosslink density ของ NR composites ที่มีเส้นใยกลบข้าวปริมาณแตกต่างกันในงานวิจัยนี้ (ตารางที่ 3.2) ไม่แตกต่างกัน ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของ torque difference ของ NR composites เกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยกลบข้าวและความแข็งของเส้นใยกลบข้าว



รูปที่ 3.3 Torque difference ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแก้วบดขี้ขาวแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.1 การคงรูปของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแก้วบดขี้ขาวแตกต่างกัน

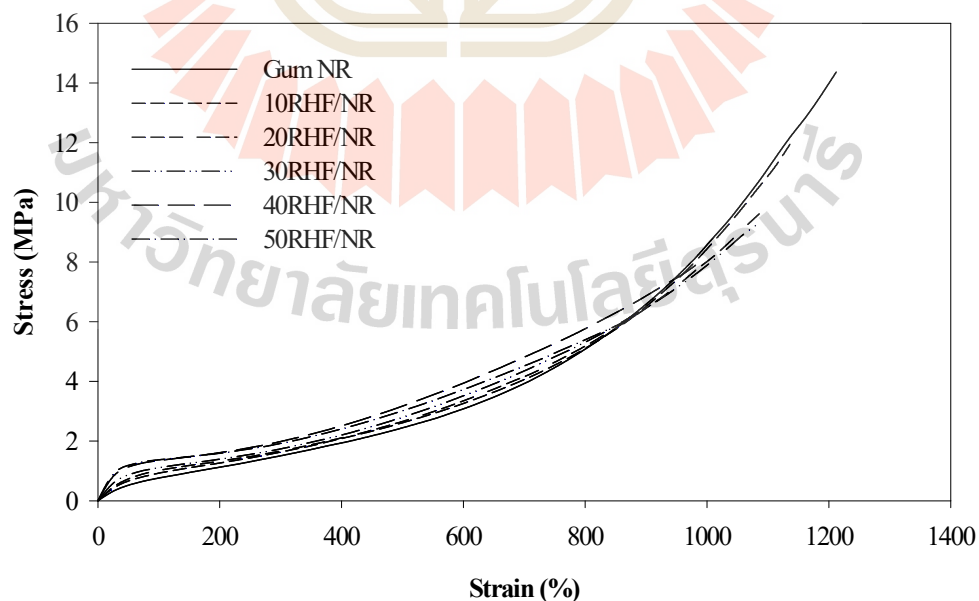
Designation	Scorch time (min)	Cure time (min)	S_{max} (dNm)	S_{min} (dNm)	$S_{max}-S_{min}$ (dNm)
NR	5.32	8.13	15.47	5.37	10.10
10RHF/NR	4.10	7.52	20.80	4.43	16.37
20RHF/NR	4.00	8.08	20.09	4.71	15.38
30RHF/NR	4.12	7.46	24.13	5.11	19.02
40RHF/NR	4.10	7.48	25.33	5.79	19.54
50RHF/NR	4.23	7.58	23.58	5.75	17.83

3.1.2 สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain curve), โมดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain (M100)) โมดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain (M300)) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break), ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density) ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 3.4-3.10 และแสดงในตารางที่ 3.2

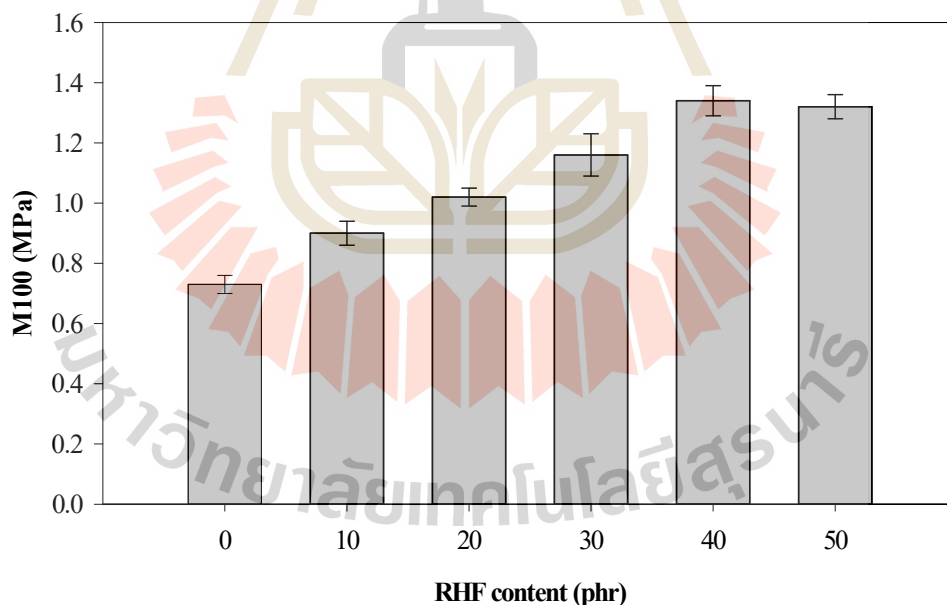
3.1.2.1 สมบัติทางด้านแรงดึง

ในรูปที่ 3.4 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าความเค้น (stress) ของ gum NR เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความเครียด (strain) gum NR มีค่า tensile strength (ค่าทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)) สูงกว่า NR composites Tensile strength ของยางธรรมชาติมีค่าสูงเนื่องจากความสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (strain-induced crystallization) ของยางธรรมชาติ (Jacob, Thomas and Varughese, 2004) เมื่อเติมเส้นใยกลบข้าวลงไปในยางธรรมชาติ เส้นใยกลบข้าวจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ยางธรรมชาติส่งผลให้ความสามารถในการเกิด strain induce crystallization ของยางธรรมชาติลดลง ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การลดลงของ tensile strength ของ NR composites เมื่อปริมาณเส้นใยกลบข้าวเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่เหมือนกันมีการรายงานโดย Jacob *et al.*, (2004) และ Joseph, Joseph and Thomas, (2006) ในระบบของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยป่านครนารายณ์/เส้นใยปาล์มน้ำมัน (sisal/oil palm/NR composites) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยปาล์มน้ำมัน (oil palm/NR composites)

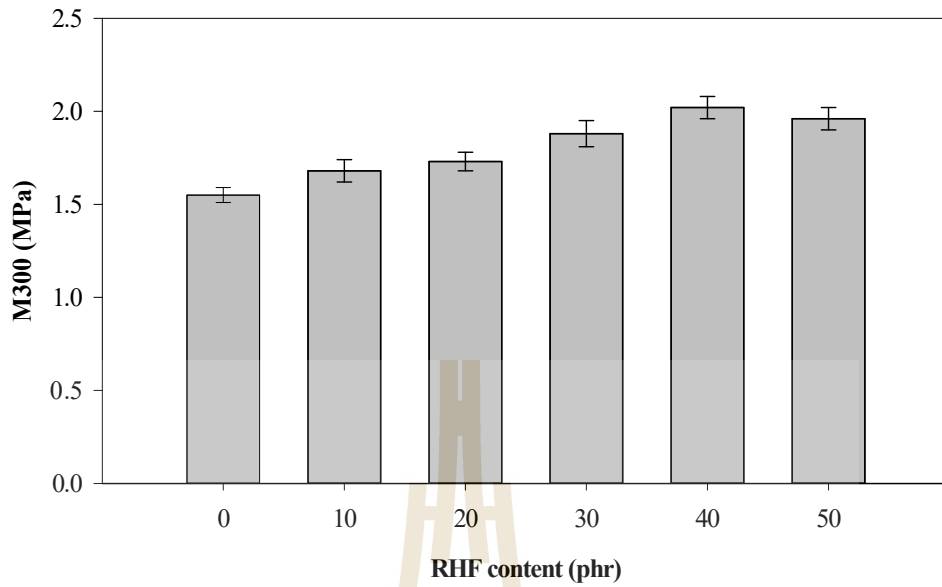


รูปที่ 3.4 Stress-strain curve ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน

M100 และ M300 ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกันแสดงในรูป 3.5-3.6 M100 และ M300 ของ NR composites มีค่าสูงกว่า gum NR เนื่องจากการเติมเส้นใยแกลบข้าวลงในยางธรรมชาติลดความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติ ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยเพิ่มความแข็งของ NR composites เมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น M100 และ M300 ของ NR composites มีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่เหมือนกันพบโดย De, De and Adhikari, (2004), Ismail, Othman and Komethi, (2012) และ Wang, Wu, Wang and Zhang, (2011) นักวิจัยเหล่านี้รายงานว่า มอดูลัสของคอมโพสิตยาง ได้แก่ คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยไผ่ (bamboo fiber/NR composites) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยจากหญ้า (grass fiber/NR composites) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมผงหวาย (rattan powder/NR composites) และคอมโพสิตยางสไตรีนบิวตะไดอีนที่เติมผงปอ (hemp hurd powder/styrene butadiene rubber (SBR) composites) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยในคอมโพสิตยางเพิ่มขึ้น Zao, Bi and Zao, (2011) แนะนำว่าการเปลี่ยนแปลงมอดูลัสของ NR composites เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ(crosslink density) ของ NR composites อย่างไรก็ตาม crosslink density ของ NR composites ในงานวิจัยนี้เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสของ NR composites น่าจะเกิดจากผลของปริมาณเส้นใยแกลบข้าว

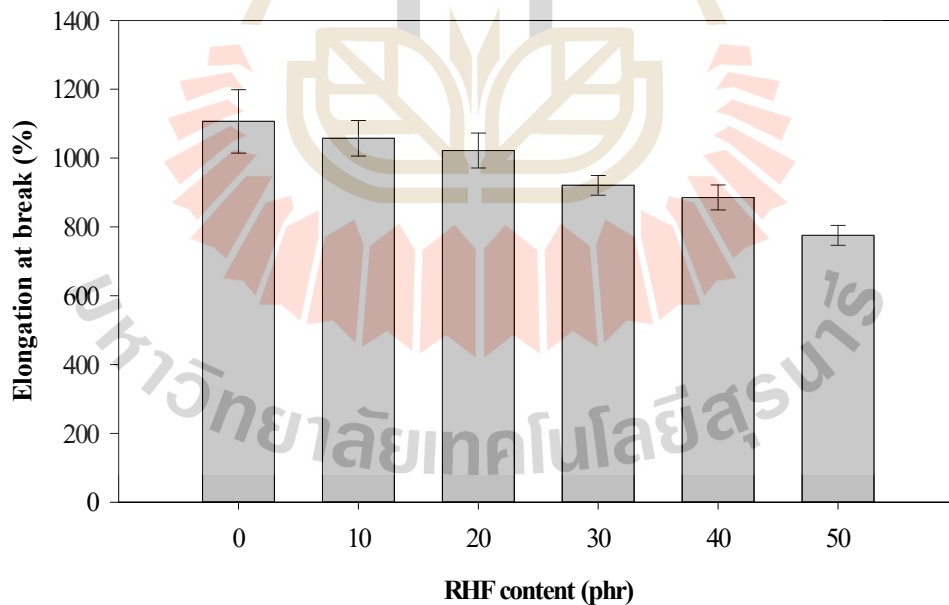


รูปที่ 3.5 Modulus at 100% strain ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน



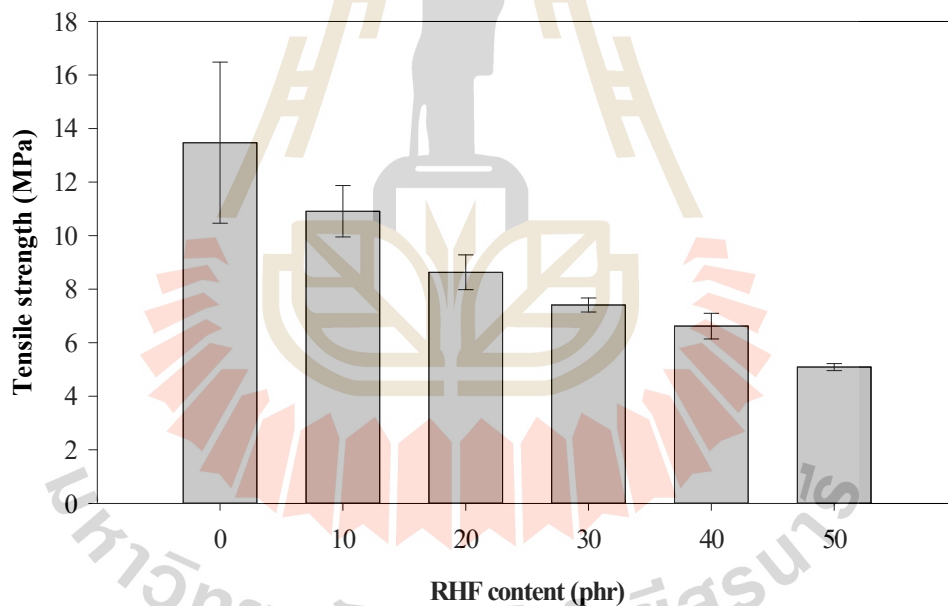
รูปที่ 3.6 Modulus at 300% strain ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน

Elongation at break ของ gum NR มีค่าสูงกว่า RHF/NR composites ดังแสดงในรูปที่ 3.7 Elongation at break ของ NR composites มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยกลบข้าวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมเส้นใยกลบข้าวลงในยางธรรมชาติช่วยเพิ่มความแข็งของ NR composites



รูปที่ 3.7 Elongation at break ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยกลบข้าวแตกต่างกัน

Tensile strength ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.8 tensile strength ของ gum NR มีค่าสูงที่สุดเนื่องจากผลของ strain-induced crystallization และ crosslink density ที่มีค่าสูงของยางธรรมชาติ เมื่อเติมเส้นใยลงในยางธรรมชาติ เส้นใยจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ยางธรรมชาตินำไปสู่การขัดขวางการเกิด strain-induced crystallization ของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ การลดลงของ tensile strength ของ NR composites น่าจะเกิดจากการดูดซับสารตัวเร่งโดยหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าวนำไปสู่การลดลงของ crosslink density ของคอมโพสิต (Wolff, 1996) ดังนั้น จึงส่งผลให้ tensile strength ของ RHF/NR composites ลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การลดลงของ tensile strength ของ NR composites อาจเกิดจากความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติซึ่งสามารถสังเกตเห็นโดยสัญญาณวิทยาในรูปที่ 3.11 แนวโน้มของผลการทดลองที่เหมือนกันมีการรายงานโดย Jacob *et al.*, (2004) และ Mathew and Joseph, (2007) ในระบบของ sisal/oil palm/NR composites และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยไอโซราแบบสั้น (short isora fiber/NR composites) ตามลำดับ

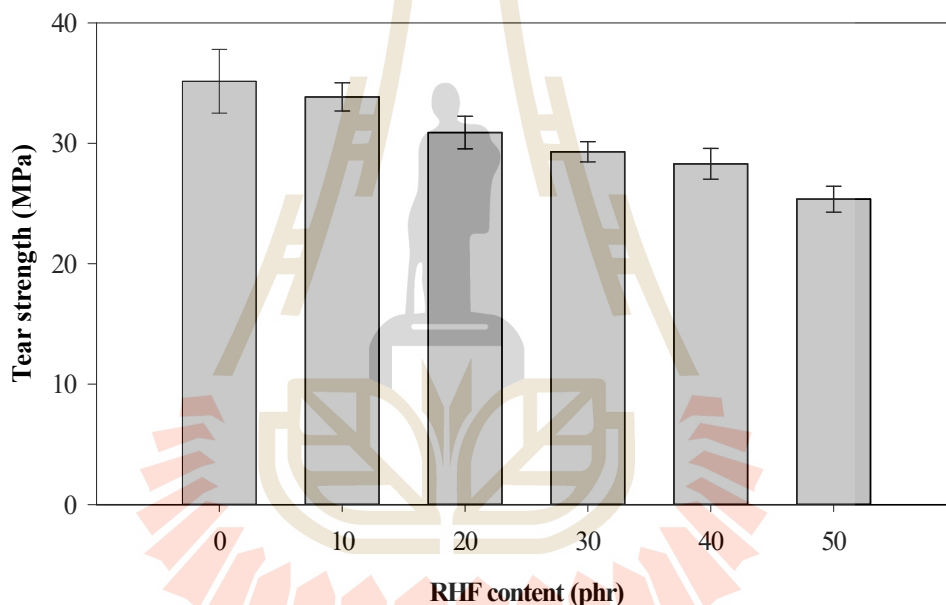


รูปที่ 3.8 Tensile strength ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน

3.1.2.2 สมบัติด้านการฉีกขาด

รูปที่ 3.9 แสดงค่าความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน gum NR แสดงค่า tear strength มากที่สุด tear strength ของ NR composites ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น การลดลงของ

tear strength น่าจะเกิดจากการการอัดตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ยาง เมื่อมีการให้แรงฉีก เส้นใยในยางธรรมชาติถูกอัดให้เข้าใกล้กันส่งผลให้เพิ่มการฉีกขาดและลดความทนทานต่อแรงฉีกขาดของคอมโพสิตยาง (Ismail, Rosnah and Rozman, 1997) นอกจากนี้ การลดลงของ tear strength ของ NR composites อาจเกิดเนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติ Sarkawi *et al.*, (2003) เสนอแนะว่าการลดลงของ tear strength ของคอมโพสิตระหว่างผงแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ (rice husk powder (RHP)/NR composites) เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของผงแกลบข้าวในเมทริกซ์ แนวโน้มของผลการทดลองที่เหมือนกันรายงานโดย Jacob, *et al.*, (2004) และ Sareena, Ramesan and Purushothaman, (2012) ในระบบของ sisal/oil palm/NR composites และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมผงเปลือกถั่ว (peanut shell powder/NR composites) ตามลำดับ

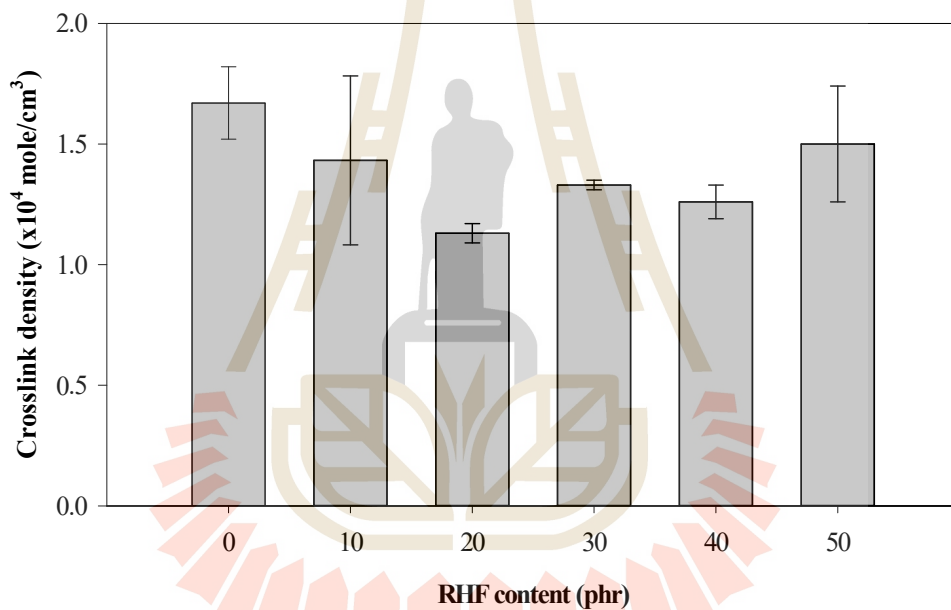


รูปที่ 3.9 tear strength ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกัน

3.1.2.3 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

เป็นที่รู้กันดีว่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density) มีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล ได้แก่ tensile strength elongation at break tensile modulus และ tear strength ของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว (Zhao *et al.*, 2011) crosslink density ของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.10 crosslink density ของ NR composites มีค่าต่ำกว่า gum NR เล็กน้อย ผลการศึกษาที่เหมือนกันมีการรายงานโดย Zeng *et al.*,

(2009) และ Hong, He, Jia and Zhang, (2011) ในระบบของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยฝ้าย (cotton fiber/NR composites) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมผงไม้ (wood flour/NR composites) นักวิจัยเหล่านี้เสนอแนะว่าการเติมเส้นใยจะไปขัดขวางการคงรูปของสายโซ่อย่างส่งผลให้ crosslink density ของ NR composites ลดลง นอกจากนี้ Wolff, (1996) พบว่าการลดลงของ crosslink density ในคอมโพสิตยางอาจเกิดการดูดซับสารตัวเร่งโดยหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของเส้นใยอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เมื่อปริมาณเส้นใยกล้วยข้าวเพิ่มขึ้น crosslink density ของ NR composites ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ NR composites ที่มีปริมาณเส้นใยกล้วยข้าวแตกต่างกันไม่ได้เกิดจากผลของ crosslink density



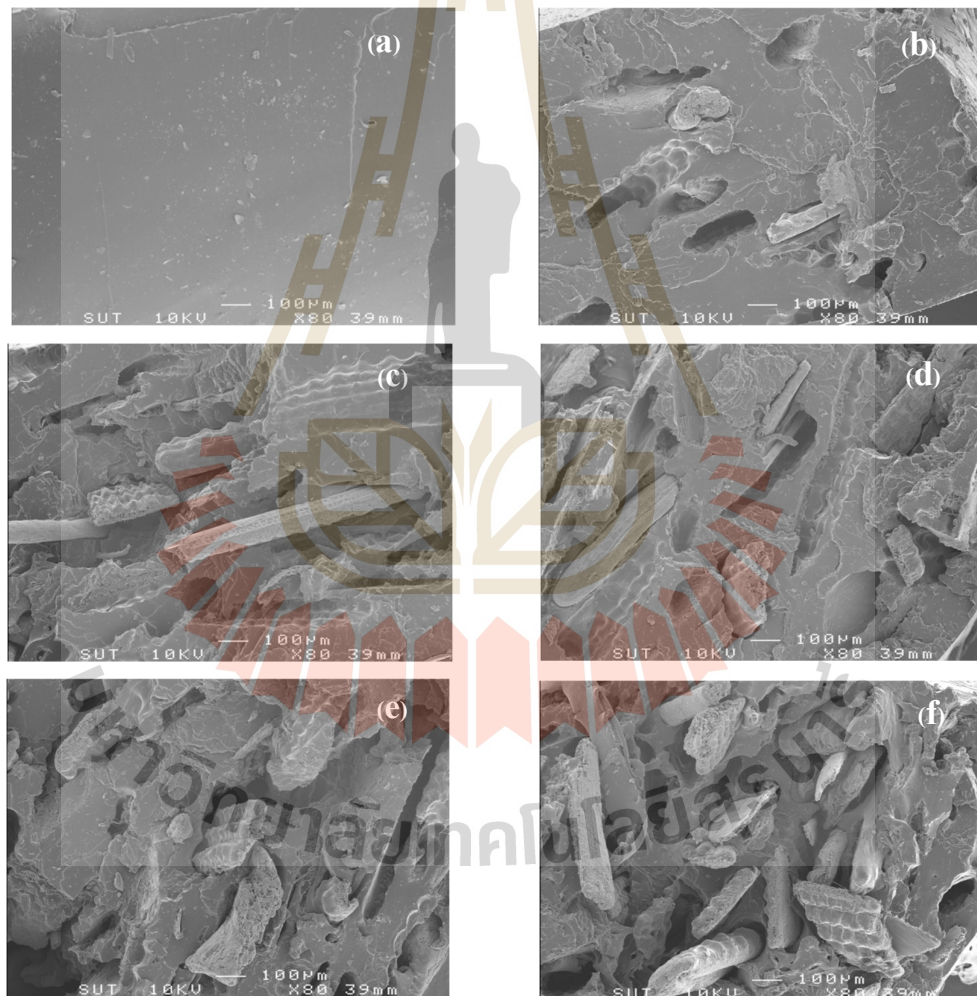
รูปที่ 3.10 Crosslink density ของ gum NR และ NR composites ที่มีปริมาณเส้นใยกล้วยข้าวแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะของ gum NR และ NR composites ที่ปริมาณเส้นใยแก้วแตกต่างกัน

Designation	M100 (MPa)	M300 (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Tear strength (kN/m)	Crosslink density ($\times 10^4$ mol/cm ³)
Gum NR	0.73 \pm 0.03	1.55 \pm 0.03	1106.54 \pm 92.18	13.47 \pm 3.01	35.15 \pm 2.65	1.67 \pm 0.15
10RHF/NR	0.90 \pm 0.04	1.68 \pm 0.06	1057.37 \pm 51.66	10.91 \pm 0.96	33.85 \pm 1.17	1.43 \pm 0.35
20RHF/NR	1.02 \pm 0.03	1.73 \pm 0.05	1022.12 \pm 50.71	8.63 \pm 0.65	30.89 \pm 1.35	1.13 \pm 0.04
30RHF/NR	1.16 \pm 0.07	1.88 \pm 0.06	920.79 \pm 28.72	7.41 \pm 0.26	29.29 \pm 0.83	1.33 \pm 0.02
40RHF/NR	1.38 \pm 0.05	2.02 \pm 0.06	885.55 \pm 36.20	6.62 \pm 0.48	28.29 \pm 1.28	1.26 \pm 0.07
50RHF/NR	1.32 \pm 0.04	1.96 \pm 0.05	775.40 \pm 28.72	5.09 \pm 0.13	25.36 \pm 1.08	1.50 \pm 0.24

3.1.3 สัณฐานวิทยา

SEM ของพื้นผิวของ gum NR และ NR composites ที่มีปริมาณแคลบข้าวแตกต่างกันที่ผ่านการทดสอบแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3.11 (a-f) gum NR ในรูปที่ 3.11 (a) มีพื้นผิวที่เรียบสม่ำเสมอ เมื่อเติมเส้นใยแคลบข้าวลงในยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.11 (b-f)) NR composites แสดงพื้นผิวที่ขรุขระ เมื่อปริมาณเส้นใยแคลบข้าวเพิ่มขึ้น การเกาะกลุ่มกันของเส้นใยแคลบข้าวในยางธรรมชาติจะสังเกตเห็นได้ชัดเจน นอกจากนี้ ทุกคอมโพสิตจะปรากฏรูจำนวนมากแสดงถึงเส้นใยแคลบข้าวที่ถูกดึงออกจากยางธรรมชาติ ผลนี้แสดงให้เห็นว่าแรงยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยแคลบข้าวและยางธรรมชาติมีค่าต่ำ SEM ของ NR composites สอดคล้องกับการลดลงของสมบัติด้านแรงดึงของ NR composites



รูปที่ 3.11 SEM micrographs ของ (a) gum NR (b) 10RHF/NR composites (c) 20RHF/NR composites (d) 30RHF/NR composites (e) 40RHF/NR composites และ (f) 50RHF/NR composites

จากผลการทดลองที่ผ่านมา ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวส่งผลต่อสมบัติทางกลของ NR composites เมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น tensile strength elongation at break และ tear strength ของ NR composites ลดลง ในขณะที่ M100 และ M300 เพิ่มขึ้น จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเตรียม NR composites ที่มีสมบัติทางกลที่เหมาะสมและมีราคาต้นทุนต่ำ ดังนั้น ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวที่เหมาะสมคือ 40 ส่วนใน 100 ส่วนของยางธรรมชาติ เนื่องจาก NR composites มีค่า M100 และ M300 ที่สูง ส่วนค่า tensile strength elongation at break และ tear strength ไม่สูงหรือต่ำเกินไป จึงเป็นปริมาณเส้นใยแกลบข้าวที่นำมาใช้เตรียม NR composites ในการทดลองขั้นต่อไป

3.2 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยกรดและด่างต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแกลบข้าวและคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ

จากหัวข้อที่ผ่านมา เส้นใยแกลบข้าวที่ 40 ใน 100 ส่วนของยางธรรมชาติได้รับเลือกมาใช้เตรียม NR composites ในส่วนนี้ อย่างไรก็ตาม เส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติมีความไม่เข้ากันเนื่องจากความชอบน้ำของเส้นใยแกลบข้าวและความไม่ชอบน้ำของยางธรรมชาติ ความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาตินำไปสู่สมบัติทางกลของ RHF/NR composites ที่ต่ำ ดังนั้น ในส่วนนี้จึงทำการปรับปรุงความเข้ากันระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติโดยการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายกรดหรือสารละลายด่าง

3.2.1 เอกลักษณะเฉพาะของเส้นใย

3.2.1.1 สมบัติทางความร้อน

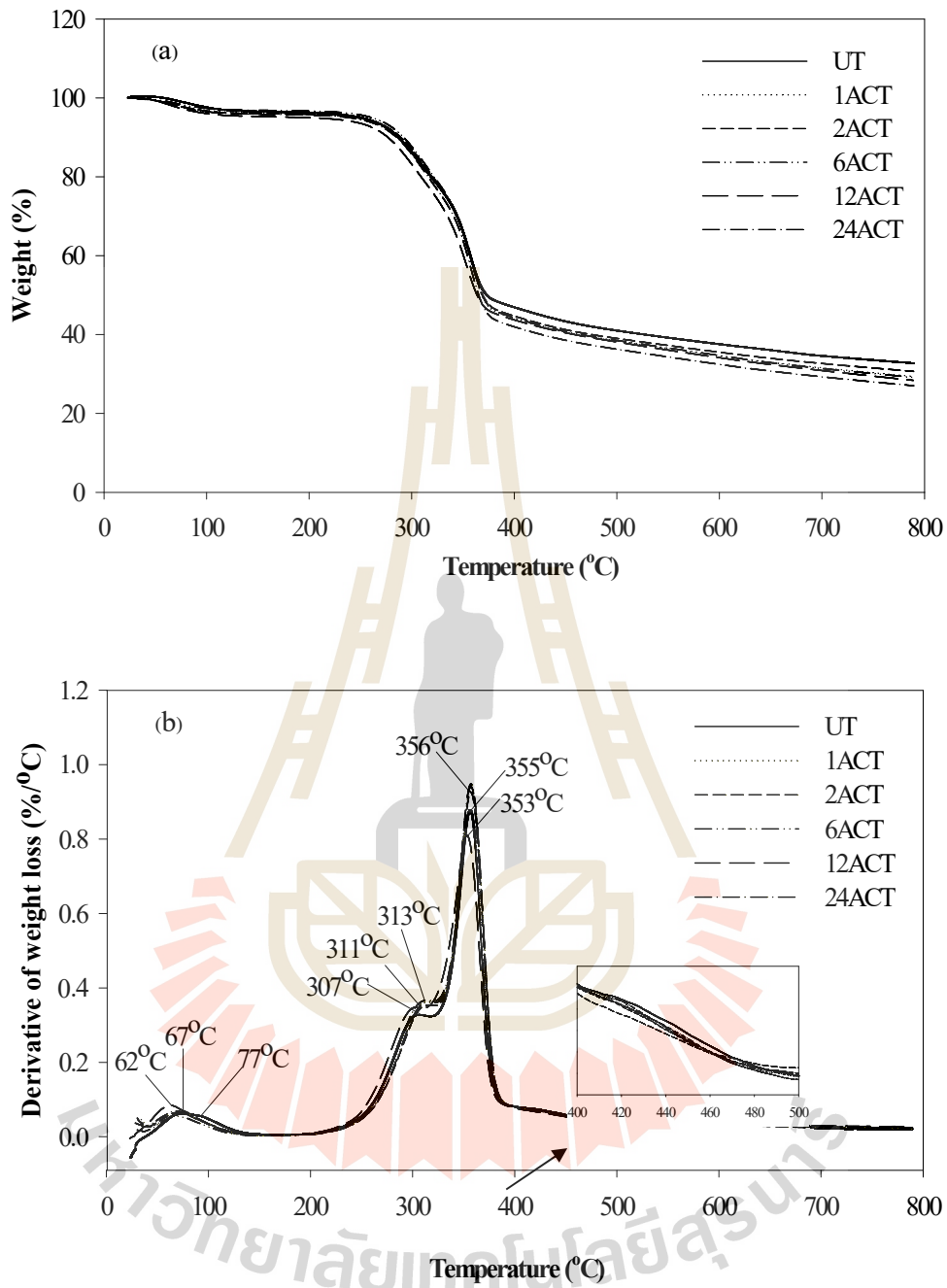
การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) และอนุพันธ์ของการวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก (DTGA) thermograms ของเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (untreated RHF (UT)) เส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายกรด (acid treated RHF (ACT)) และเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายด่าง (alkali treated RHF (ALT)) ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12-3.13 และแสดงตารางที่ 3.3 จากรูปที่ 3.12 UT ACT และ ALT แสดงการลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียสเนื่องจากการระเหยของน้ำบนพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าว การเสื่อมสลายทางความร้อนขั้นแรกของ UT แสดงพีคที่ 307 องศาเซลเซียส เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส พีคการเสื่อมสลายทางความร้อนขั้นที่สองของ UT สามารถสังเกตได้ที่ 355 องศาเซลเซียส เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายของเซลลูโลส การเสื่อมสลายทางความร้อนขั้นที่สามของ UT ปรากฏให้เล็กน้อยที่ประมาณ 426 องศาเซลเซียสแสดงถึงการเสื่อมสลายของลิกนิน ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส UT มีปริมาณเถ้าคงเหลือ 32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งประกอบด้วยซิลิกาและสารประกอบคาร์บอนปนกันอยู่ ผลที่เหมือนกันมีการรายงานโดยนักวิจัยหลายคน แกลบข้าวแสดงขั้นตอนการเสื่อมสลายทางความร้อน 3 ขั้นตอนดังนี้ การเสื่อมสลายของเฮมิเซลลูโลส (150-300 องศาเซลเซียส) การเสื่อมสลายของเซลลูโลส (300-350 องศาเซลเซียส) และการเสื่อมสลายของลิกนิน (400-500 องศา

เซลเซียส) (Ciannamea , Stefan and Ruseckaite, 2010; Luduena, Vazquez and Alvarez, 2011z; Mansaray and Ghaly, 1998)

สำหรับเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวได้แก่ ACT และ ALT รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของเส้นใยทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับวิธีการปรับปรุงพื้นผิวและเวลาการปรับปรุงพื้นผิว ทุกตัวอย่างของ ACT มีการเสื่อมสลาย 3 ขั้นตอนเหมือนกับ UT ACT แสดงการเสื่อมสลายของเฮมิเซลลูโลส การเสื่อมสลายของเซลลูโลส และการเสื่อมสลายของลิกนินที่ประมาณ 303-313 353-356 และ 424-429 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พิกการเสื่อมสลายของเฮมิเซลลูโลสยังสามารถสังเกตได้เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น ผลนี้แสดงให้เห็นว่าเฮมิเซลลูโลสไม่สามารถกำจัดออกได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดไฮดรอลิก Mishra, Mohanty, Drzal, Misra and Hinrichsen, (2004) เสนอแนะว่าเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเกิดการย่อย(hydrolyzed) ได้ช้าในสภาวะที่เป็นกรดที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาณเถ้าคงเหลือที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของ ACT มีค่าต่ำกว่า UT เล็กน้อย เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น ปริมาณเถ้าคงเหลือที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของ ACT มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ จากผลนี้แสดงให้เห็นว่าเวลาการปรับปรุงพื้นผิวไม่มีผลต่อน้ำหนักของเถ้าคงเหลือของ ACT

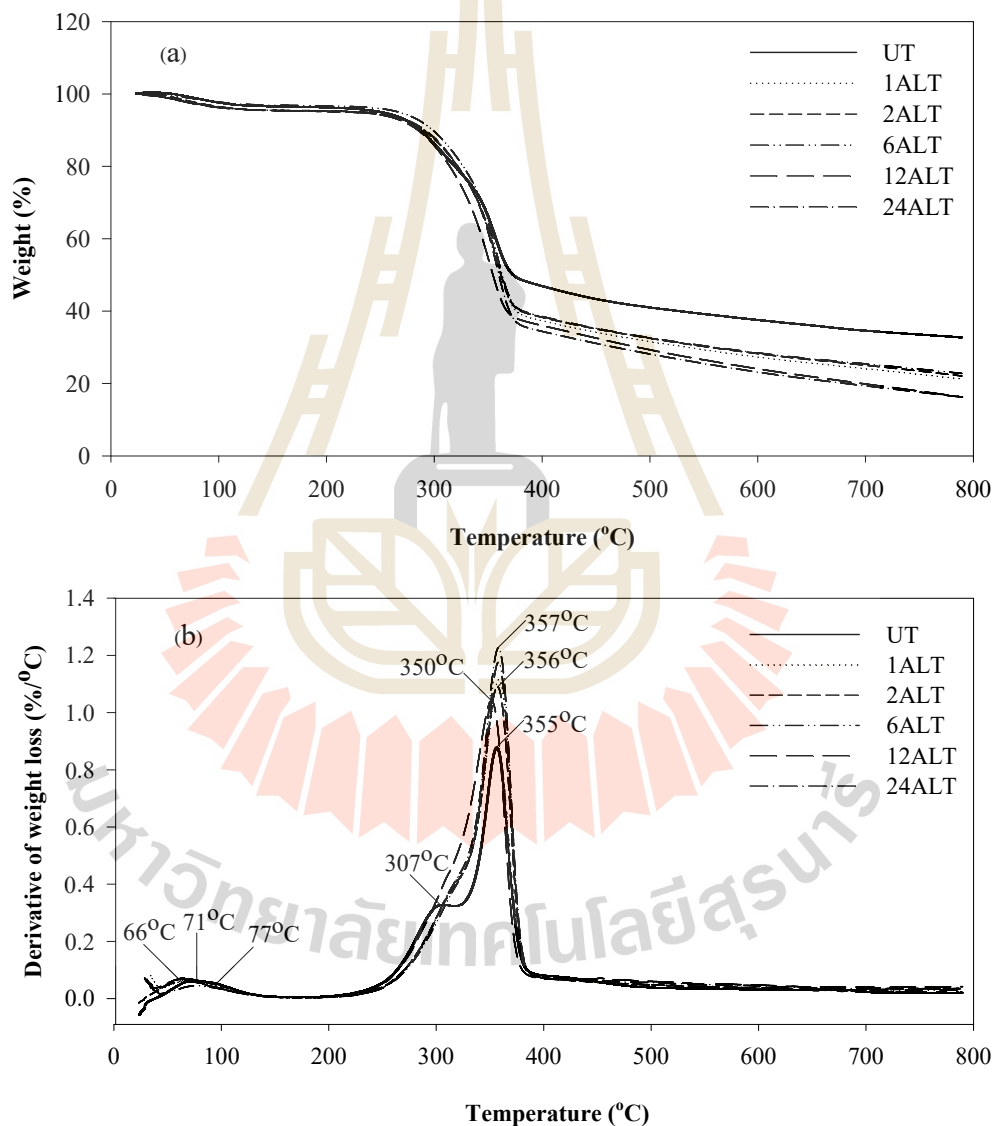


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.12 TGA (a) และ DTGA (b) thermograms ของ UT และ ACT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

สำหรับ ALT ทุกตัวอย่าง ไม่ปรากฏพีคเอมิเซลลูโลส ผลนี้ยืนยันว่าเอมิเซลลูโลส และลิกนินถูกกำจัดออกไปในระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวต่าง ALT แสดงการเสื่อมสลายเพียงขั้นตอนเดียวที่ ประมาณ 350-357 องศาเซลเซียสสัมพันธ์กับการเสื่อมสลายของเซลลูโลสเมื่อเปรียบเทียบกับ UT และ ACT ยิ่งไปกว่านั้น แก้วคงเหลือภายหลังจากการให้ความร้อนแก่ ALT ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำกว่า UT และ ACT การลดลงของแก้วคงเหลือของ ALT เกิดเนื่องจากซิลิกาในเส้นใยกลบข้าวถูกกำจัดไปบางส่วน ในระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง (Ndazi, Nyahumwa and Tesha, 2007) ปริมาณแก้วคงเหลือของ ALT ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.13 TGA (a) และ DTGA (b) thermograms ของ UT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

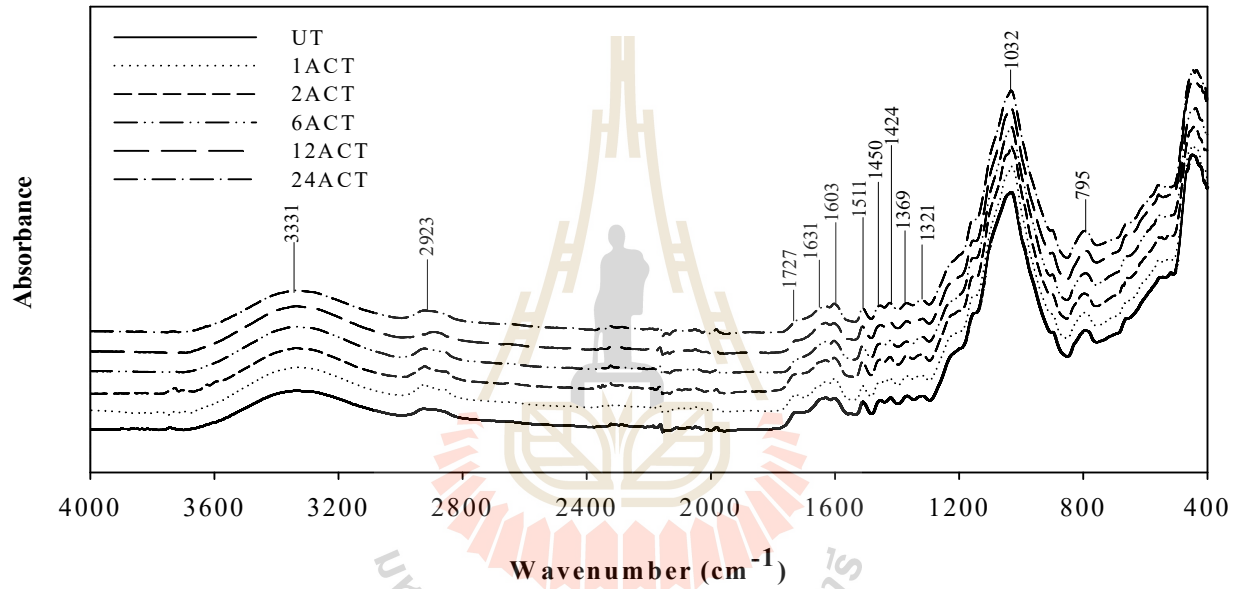
ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Treatment conditions	Water evaporation			Thermal decomposition temperature (°C)			Residue (wt%)
	Onset (°C)	Peak (°C)	Weight loss (%)	1 st step	2 nd step	3 rd step	
UT	57	77	3	307	355	426	32
1ACT	34	72	4	311	356	428	29
2ACT	30	71	4	313	356	429	30
6ACT	30	67	3	313	356	429	29
12ACT	30	62	4	303	353	424	28
24ACT	30	67	4	313	356	429	27
1ALT	34	71	4	-	357	-	22
2ALT	36	66	4	-	356	-	22
6ALT	36	77	3	-	356	-	22
12ALT	30	65	4	-	350	-	16
24ALT	28	65	4	-	357	-	16

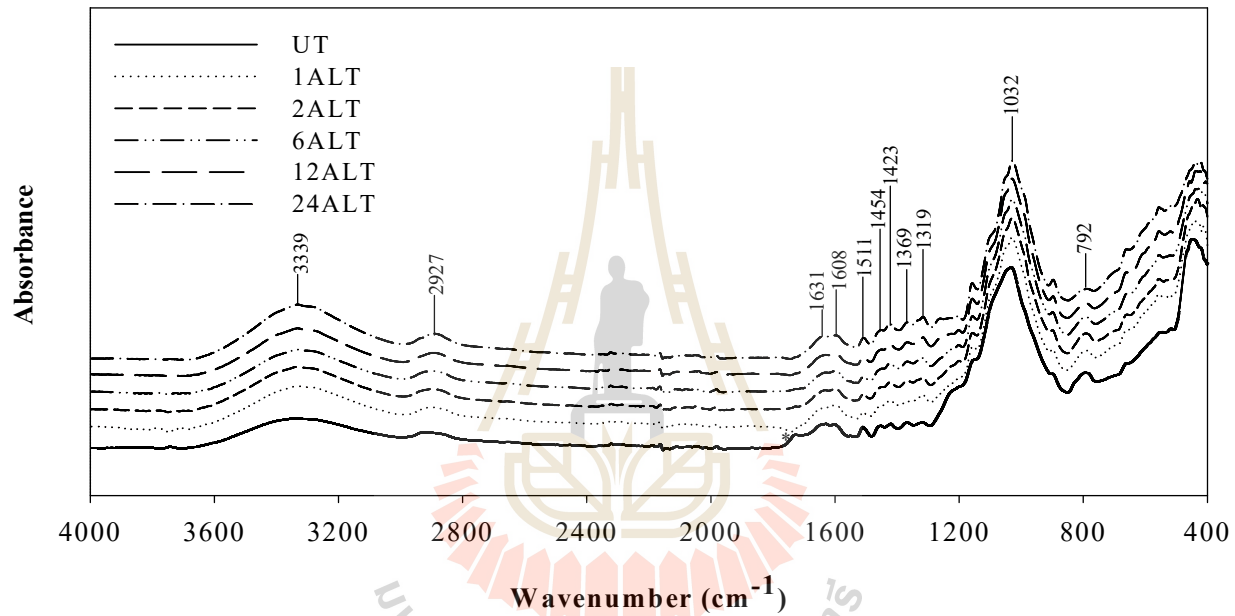
3.2.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

สเปกตร้าจากอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) ของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.14-3.15 และแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.4 ตามผล FTIR แถบการดูดกลืนที่สังเกตใน FTIR ของ UT และเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (treated RHF) เกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกลบข้าว ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน (Genieva, Turmanova, Dimitrova and Vlaev, 2008; Luduena, Fasce, Alvarez and Stefani, 2011; Markovska and Lyubchev, 2007) UT แสดงแถบการดูดกลืนแสงระหว่าง 3339 และ 2923 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของ -O-H และ -C-H stretching ของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน แถบการดูดกลืนแสงปรากฏที่ 1727 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของ C=O stretching ของหมู่เอสเทอร์ในเฮมิเซลลูโลสหรือหมู่กรดคาร์บอกซิลิกในลิกนิน แถบการดูดกลืนแสงที่ปรากฏที่ 1603 และ 1511 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของ C=C stretching ของวงอะโรมาติก (aromatic rings) ของลิกนิน นอกจากนี้ แถบการดูดกลืนของ -CH₂ bending และ -CH stretching ของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในเส้นใยกลบข้าวจะปรากฏเพิ่มเติมที่ 1450 1424 1369 และ 1321 cm^{-1} ยิ่งไปกว่านั้น แถบการดูดกลืนแสงปรากฏที่ 1032 และ 795 cm^{-1} เนื่องจาก C-O stretching ของเซลลูโลสและ Si-O-Si bonds ของซิลิกาในเส้นใยกลบข้าว หลังจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด สเปกตร้าของ ACT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันยังคงเหมือนกันกับ UT แสดงให้เห็นว่าส่วนของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกาไม่ได้ถูกกำจัดในระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด โดยผล FTIR ของเส้นใยกลบข้าวสอดคล้องกับผล TGA ที่แสดงในรูปที่ 3.12

หลังจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง สเปกตร้าของ ALT ยังคงเหมือนกันกับ UT ยกเว้นการหายไปของแถบการดูดกลืนแสงที่ 1727 cm^{-1} แสดงถึงการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเส้นใยกลบข้าวระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง นอกจากนี้ การปรากฏแถบการดูดกลืนแสงระหว่าง 793-783 cm^{-1} ใน ALT แสดงถึงการคงอยู่ของซิลิกาใน ALT (โดยมีปริมาณซิลิกาที่ลดลง เมื่อเทียบกับ UT และ ACT สอดคล้องกับผล TGA ที่แสดงในรูปที่ 3.13) เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น แถบการดูดกลืนแสงของ ALT มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 3.14 FTIR spectra ของ UT และ ACT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน



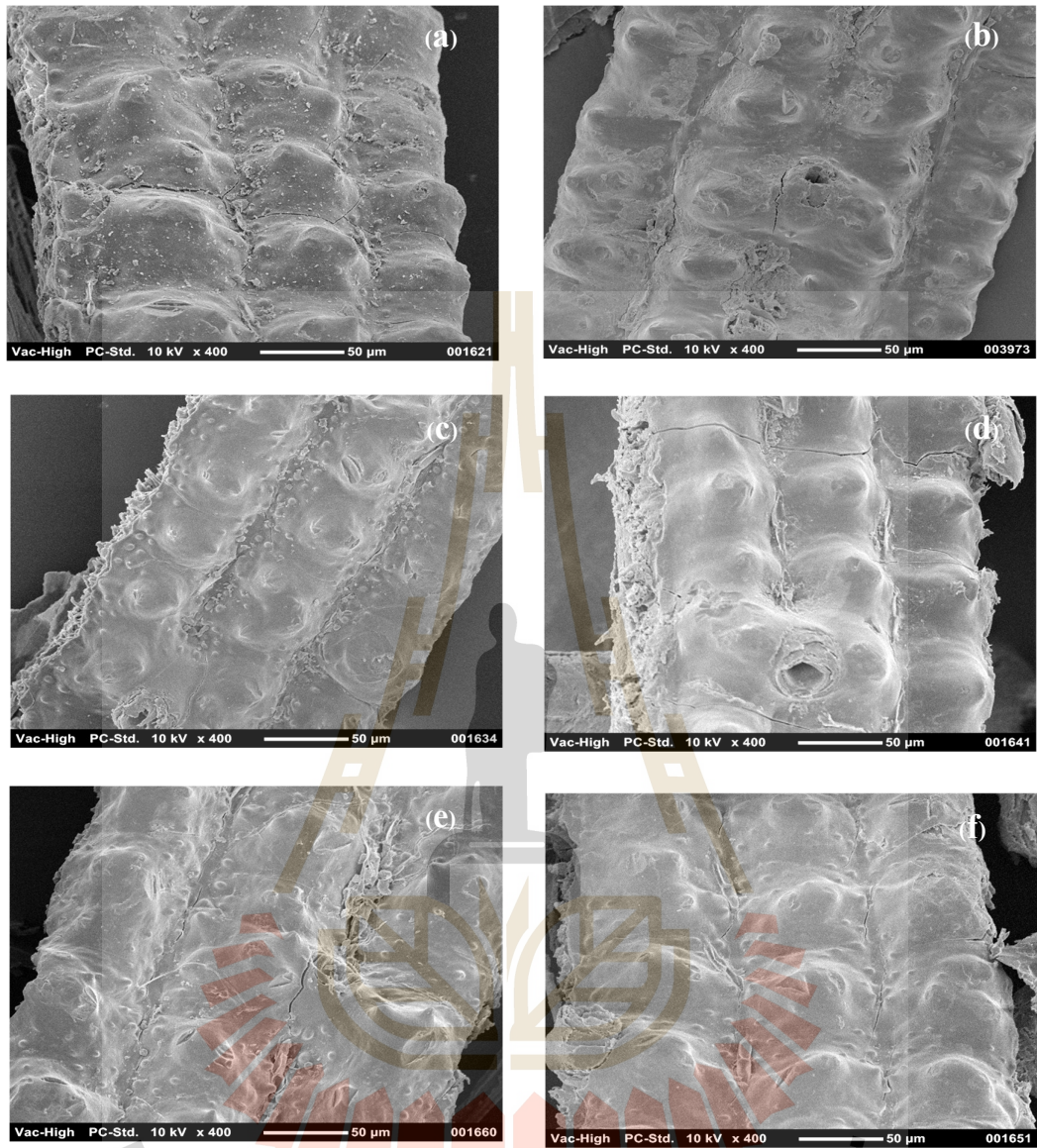
รูปที่ 3.15 FTIR spectra ของ UT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของพีค FTIR ของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน (Genieva *et al.*, 2008; Luduena *et al.*, 2011; Markovska *et al.*, 2007).

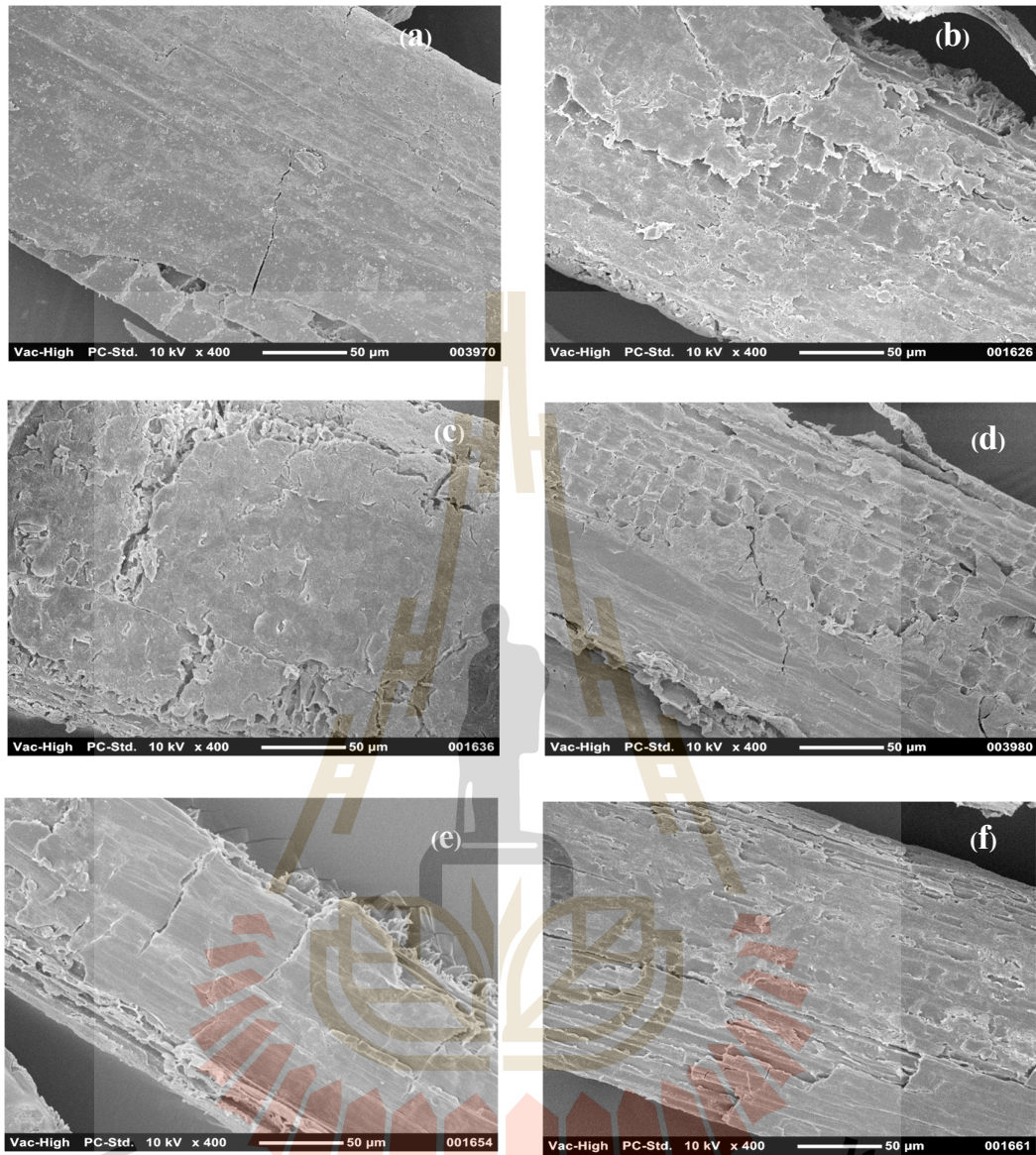
Wavenumber (cm ⁻¹)			Vibration	Source
UT	ACT	ALT		
3339	3339-3329	3334-3331	OH stretching	hemicellulose, cellulose, lignin, water
2927	2939-2921	2899-2893	C-H stretching	hemicellulose, cellulose, lignin
1729	1727	-	C=O stretching	lignin
1631	1631-1630	1633-1630	OH stretching	adsorbed water
1604	1604-1603	1601-1598	C=C stretching	lignin
1512	1512-1511	1512-1508	C=C stretching	aromatic ring
1454-1424	1453-1423	1448-1423	CH ₂ strain	hemicellulose, cellulose, lignin
1369-1320	1368-1318	1361-1316	CH bending	hemicellulose, cellulose, lignin
1034	1032-1030	1030-1029	C-O stretching	cellulose
795	797-790	793-789	Si-O-Si stretching	silica

3.2.1.3 สัณฐานวิทยา

SEM ของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.16 - 3.19 พื้นผิวภายนอกของ UT และ ACT แสดงในรูปที่ 3.16 (a-f) ในขณะที่พื้นผิวภายในของ UT และ ACT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.17 (a-f) ตามรูปที่ 3.16 (a) พื้นผิวภายนอกของ UT แสดงลักษณะโครงสร้างแบบสันและร่อง (ridged and furrow structures) โครงสร้างแบบ ridge ถูกแบ่งด้วยส่วนที่ยื่นออกมาเป็นรูปโดม (dome shape protrusions) บางงานวิจัยอธิบายว่าปริมาณซิลิกาที่สูงพบมากที่บริเวณ dome-shape protrusions และพื้นที่ลาดลงโดยรอบ (Park *et al.*, 2004) นอกจากนี้ สิ่งปนเปื้อน ได้แก่ ไขมัน และฝุ่นสามารถสังเกตได้บนพื้นผิวภายนอกของ UT หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด (รูปที่ 3.16 (b-f)) ACT มีพื้นผิวภายนอกที่สะอาดขึ้น ผลนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยเคลือบข้าวด้วยกรดจะกำจัดไขมันและฝุ่นบนพื้นผิวเส้นใยเคลือบข้าว อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น พื้นผิวภายนอกของ ACT ไม่เปลี่ยนแปลง แนวโน้มที่เหมือนกันพบในพื้นผิวภายในของเส้นใยเคลือบข้าว พื้นผิวภายในของ UT แสดงพื้นผิวที่เรียบ (รูปที่ 3.17 (a)) หลังการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยเคลือบข้าวด้วยสารละลายกรดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน (รูปที่ 3.17 (b-f)) พื้นผิวภายในของ ACT ไม่เปลี่ยนแปลงไป ผลนี้สอดคล้องกับผล TGA และ FTIR ของ ACT



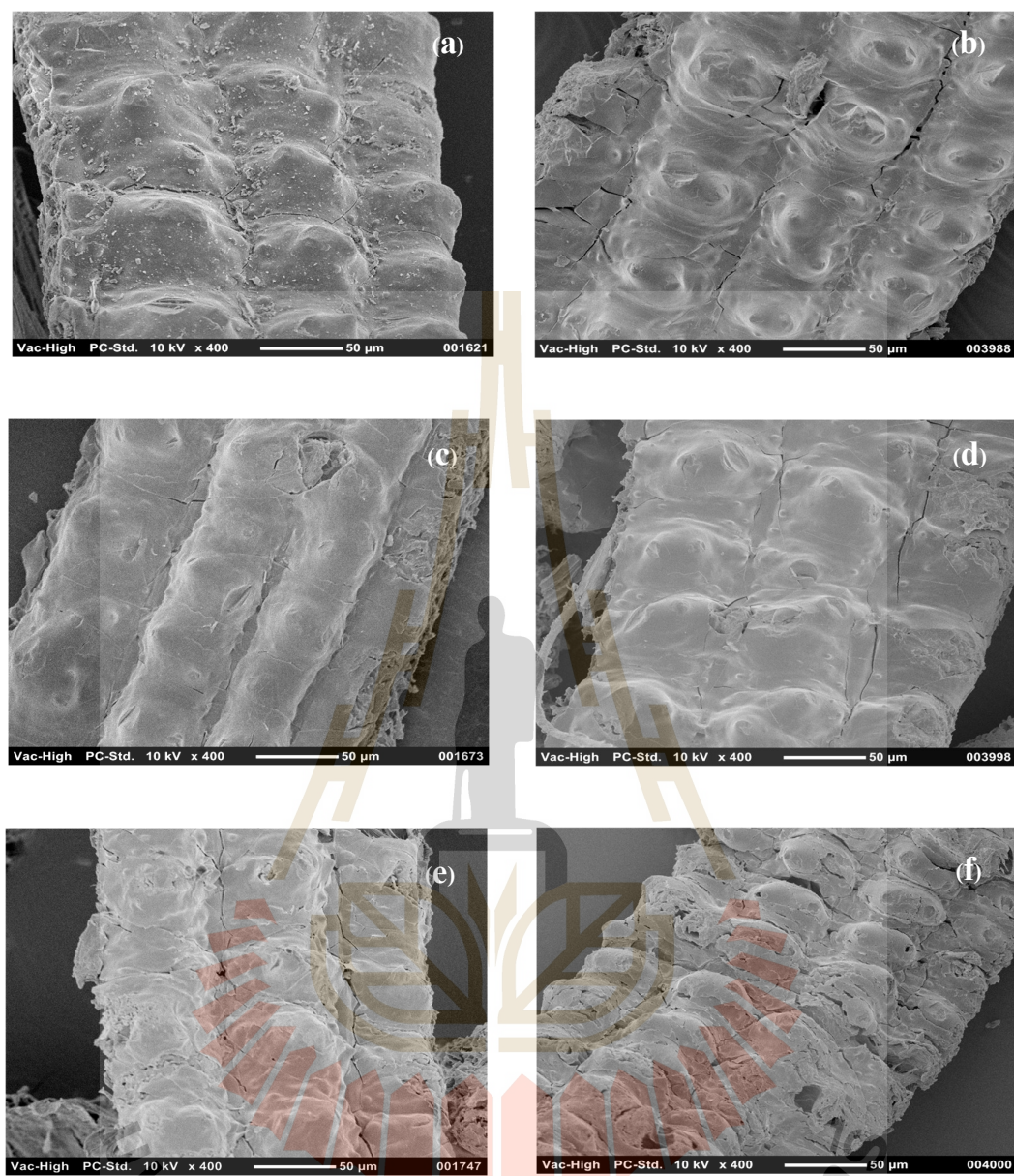
รูปที่ 3.16 SEM micrographs ของพื้นผิวภายนอกของ (a) UT (b) 1ACT (c) 2ACT (d) 6ACT (e) 12ACT และ (f) 24ACT



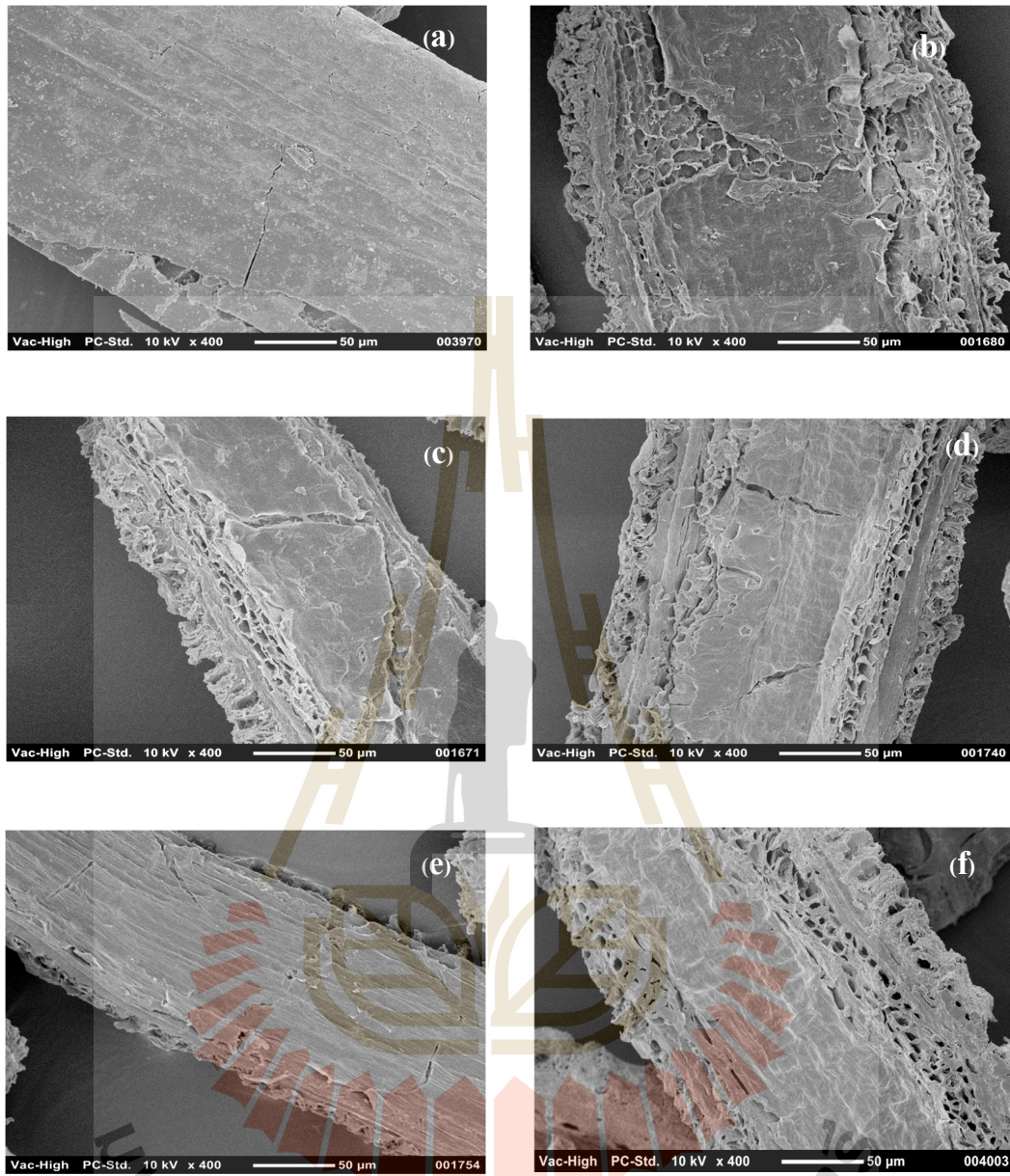
รูปที่ 3.17 SEM micrographs ของพื้นผิวภายในของ (a) UT (b) 1ACT (c) 2ACT (d) 6ACT (e) 12ACT และ (f) 24ACT.

SEM ของพื้นผิวภายนอกของ UT และ ALT แสดงในรูปที่ 3.18 (a-f) และพื้นผิวภายในของ UT และ ALT แสดงในรูปที่ 3.19 (a-f) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง (รูปที่ 3.18 (b-f)) สามารถสังเกตเห็นได้ว่าพื้นผิวภายนอกของ ALT สะอาดและขรุขระกว่า UT เกิดจากการถูกกำจัดของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซีฟิ่งบนพื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าวระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง การเพิ่มขึ้นของพื้นผิวที่ขรุขระของ ALT น่าจะช่วยเพิ่มการประสานทางกล (mechanical interlocking) ระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติ เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเข้าใกล้ 12-24 ชั่วโมง (รูปที่ 3.18 (e-f)) พื้นผิวภายนอกของ ALT แสดงให้เห็นพื้นผิวที่ขรุขระ การแยกของเส้นใยและการแตกของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อการแตกของเส้นใยของ ALT เพิ่มขึ้น ส่งผลในทางกลับกันต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2.2 อย่างไรก็ตาม พื้นผิวภายในของ ALT เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ UT พื้นผิวภายในของ ALT แสดงให้เห็นความไม่แตกต่างเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.19 (b-f)).





รูปที่ 3.18 SEM micrographs ของพื้นผิวภายนอกของ (a) UT (b) 1ALT (c) 2ALT (d) 6ALT (e) 12ALT และ (f) 24ALT



รูปที่ 3.19 SEM micrographs ของพื้นผิวภายในของ (a) UT (b) 1ALT (c) 2ALT (d) 6ALT (e) 12ALT และ (f) 24 ALT

3.2.1.4 อัตราส่วนระหว่างความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลาง

อัตราส่วนระหว่างความยาว/เส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ของเส้นใยคำนวณจากความยาวของเส้นใยหารด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย L/D ratio ของ UT ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 3.5 เมื่อเปรียบเทียบกับ UT L/D ratio ของ ACT แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการคงอยู่ของสารเชื่อม (cement component) ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเส้นใยแกลบข้าว เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นตัวประสานเส้นใยเพื่อป้องกันเส้นใยจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด (Johar, Ahmad and Durfresne, 2012)

L/D ratio ของ ALT เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ UT เพราะการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเส้นใยส่งผลให้เกิดการแยกตัวของเส้นใยและการแตกของเส้นใย (Hornsby, Hinrichsen and Tarverdi, 1997) การแยกตัวของเส้นใยและการแตกของเส้นใยทำให้เกิดการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแกลบข้าวนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของ L/D ratio ของ ALT L/D ratio ของ ALT เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ L/D ratio ของ ALT น่าจะช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้กับ ALT/NR composites อย่างไรก็ตาม ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิว 24 ชั่วโมง L/D ratio ของ ALT ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการแตกของเส้นใยนำไปสู่ความยาวที่ลดลงของ ALT การแตกของแกลบข้าวหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างมีการรายงานโดย Ndazi, Karlsson, Tesha and Nyahumwa (2007) นักวิจัยเหล่านี้พบว่า การแตกของเส้นใยจะเกิดในแนวตั้งและเริ่มเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของต่างมีค่าสูง (8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)



ตารางที่ 3.5 L/D ratio ของ UT, ACT และ ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Designation	L/D
UT	4.48±1.43
1ACT	4.17±1.95
2ACT	3.79±1.46
6ACT	4.42±1.30
12ACT	4.47±1.12
24ACT	5.13±2.58
1ALT	4.88±3.10
2ALT	6.58±3.36
6ALT	7.54±2.29
12ALT	8.52±2.79
24ALT	6.87±2.80



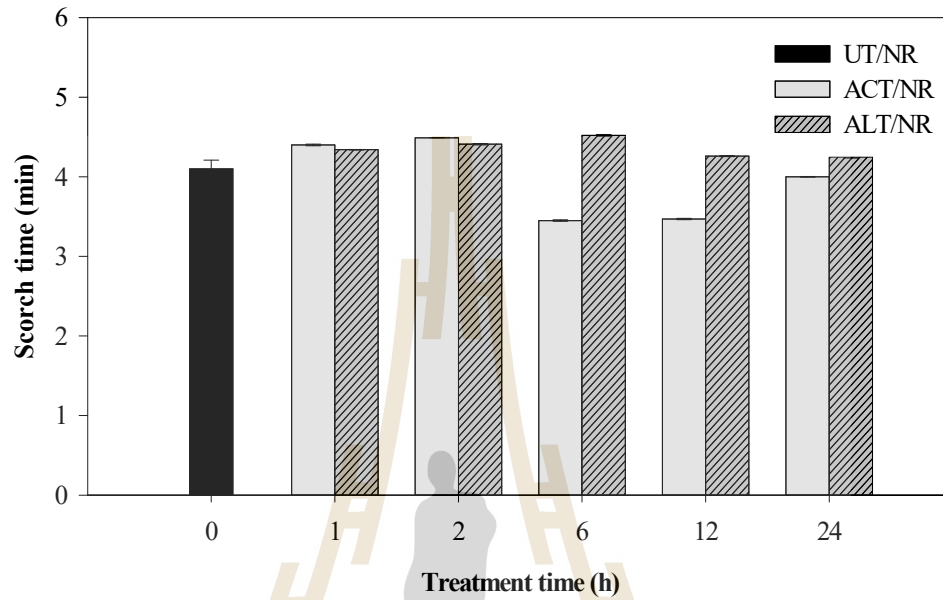
3.2.2 เอกลักษณะเฉพาะของคอมโพสิต

3.2.2.1 ลักษณะของการคงรูป

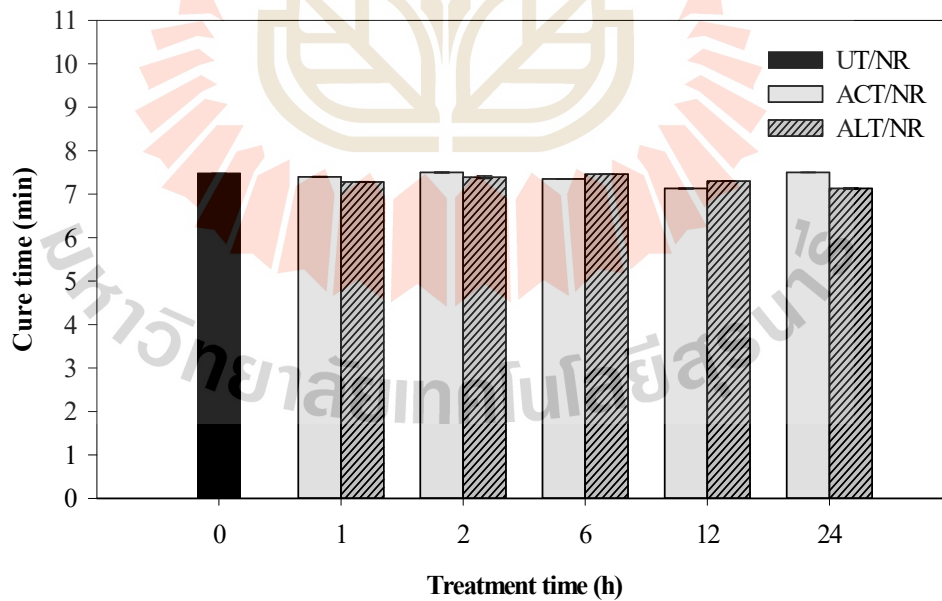
ลักษณะของการคงรูปของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (UT/NR composites) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด (ACT/NR composites) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่าง (ALT/NR composites) ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน ได้แก่ ระยะเวลาการสกอ์ช (scorch time) ระยะเวลาการคงรูป (cure time) แรงบิดต่ำสุด (minimum torque (S_{min})) แรงบิดสูงสุด (maximum torque (S_{max})) และผลต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด (torque difference ($S_{max} - S_{min}$)) แสดงในรูปที่ 3.20 – 3.24 และแสดงในตารางที่ 3.6

จากรูปที่ 3.20 สามารถสังเกตเห็นได้ว่า scorch time ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ UT/NR composites scorch time ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเวลาการปรับปรุงพื้นผิว 1 และ 2 ชั่วโมง เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้นจาก 2 ชั่วโมง ไปถึง 24 ชั่วโมง scorch time ของ ALT/NR composites ยาวกว่า scorch time ของ ACT/NR composites โดยทั่วไป ลักษณะของการคงรูปของยางคอมโพสิตขึ้นกับสมบัติของสารตัวเติม ได้แก่ พื้นผิว ปฏิริยาที่พื้นผิว ขนาดของอนุภาค ปริมาณความชื้น และปริมาณโลหะออกไซด์ (Ichazo, Hernández, Albano and González, 2006; Ismail, Rozman, Jaffri and Ishak, 1997) ความล่าช้าของ scorch time ของ ALT/NR composites น่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของเส้นใยแกลบข้าว โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายต่าง เมื่อปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายต่าง เหมิเซลลูโลสและลิกนินบนพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวถูกกำจัดออกส่งผลให้พื้นที่ผิวของเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นของ ALT จะขยาย scorch time ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ Cure time ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites แสดงแนวโน้มที่แตกต่างจาก scorch time ของคอมโพสิตยางธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 3.21 cure time ของคอมโพสิตทั้งหมดไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนวิธีการปรับปรุงพื้นผิวและเวลาการปรับปรุงพื้นผิว De, *et al.*, (2004) ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่างและน้ำต่อลักษณะของการคงรูปของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยหญ้า (grass fiber/NR composites) นักวิจัยเหล่านี้พบว่าคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยหญ้าที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยน้ำ (pH=5.1) มี scorch time และ cure time ที่ยาวกว่าคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยหญ้าที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่าง (pH=8.1) ผลนี้น่าจะเกิดจากความเป็นกรดและความเป็นด่างบนพื้นผิวของเส้นใยหญ้าที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ความเป็นกรดของเส้นใยหญ้าที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยน้ำขยายกระบวนการการคงรูปของยาง (vulcanization process) ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ แต่ความเป็นด่างของเส้นใยหญ้าที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่างจะเร่งกระบวนการคงรูปของคอมโพสิต ในงานวิจัยนี้ ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารละลายกรดและสารละลายด่างและล้างเส้นใยแกลบข้าวด้วยน้ำ

กลั่นจนกระทั่งเป็นกลาง ดังนั้น cure time ของคอมโพสิทยางธรรมชาติไม่ได้รับผลกระทบจากวิธีการปรับปรุงพื้นผิวและเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแก้วช้าว

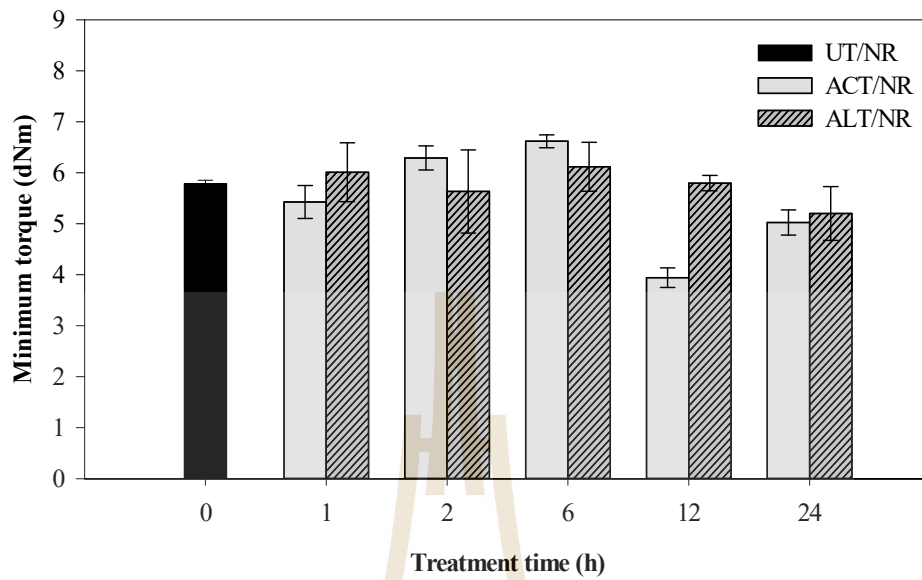


รูปที่ 3.20 Scorch time ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

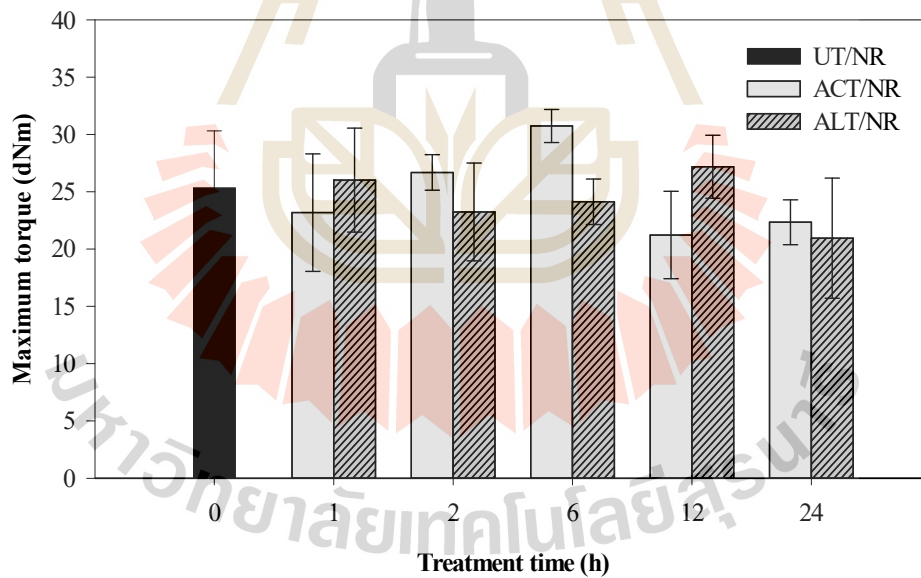


รูปที่ 3.21 Cure time ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Minimum torque และ maximum torque ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.22-3.23 minimum torque ของทั้ง ACT/NR composites และ ALT/NR composites แสดงค่าสูงสุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิว 6 ชั่วโมงและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น เป็นที่รู้กันว่า minimum torque ของคอมโพสิตยางแสดงให้เห็นถึงความนุ่มของยางก่อนการคงรูปสอดคล้องกับความเหนียวของคอมโพสิตยาง ความเหนียวของคอมโพสิตยางควบคุมโดยเวลาการผสม ชนิดของสารตัวเติม น้ำหนักโมเลกุลและการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Saramolee, Lertsuriwat, Hunyek and Sirisathitkul, 2010) ในงานวิจัยนี้ เวลาการผสมของคอมโพสิตทั้งหมดมีค่าเท่ากัน ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของ minimum torque ของคอมโพสิตยางธรรมชาติเกี่ยวข้องกับสมบัติของเส้นใยกลบข้าว ในกรณีของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยกรด การคงอยู่ของวัสดุเชื่อมประสาน (cement materials) ได้แก่ เอมิเซลลูโลส และลิกนินในเส้นใยกลบข้าวนำไปสู่ความแข็งของ ACT ซึ่งความแข็งของ ACT ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยางส่งผลให้ความเหนียวของคอมโพสิตยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มขึ้นของ minimum torque ของ ALT/NR composites ในงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวที่ดีขึ้นของเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในเมทริกซ์ยางธรรมชาติ ผลที่เหมือนกันพบโดย Hussain, Abdel-Kader and Ibrahim, (2010) ในคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมใยลินินที่เหลือใช้ (linen fiber waste/NR composites) แนวโน้มที่เหมือนกันพบใน maximum torque ของ ACT/NR composites แสดงค่ามากที่สุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 6 ชั่วโมง ในขณะที่ maximum torque ของ ALT/NR composites แสดงค่าสูงสุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่เวลา 12 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นของ maximum torque ของ ACT/NR composites เกิดจากความแข็งของ ACT ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มขึ้นของ maximum torque ของ ALT/NR composites เกิดเพราะพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใยกลบข้าวหลังจากจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติม (rubber-filler interaction) โดยกลไกการเชื่อมประสานทางกล (mechanical interlocking) ผลที่เหมือนกันมีการรายงานโดย Mathew and Joseph, (2007) Sareena, *et al.*, (2012) และ Wongsorat, (2009) นักวิจัยเหล่านี้พบว่า maximum torques ของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยธรรมชาติ ปรับปรุงได้โดยการทำอัลคาไลเซชัน เนื่องจากการยึดติดที่ผิวหน้า (interfacial adhesion) ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ยางธรรมชาติที่ดีขึ้น

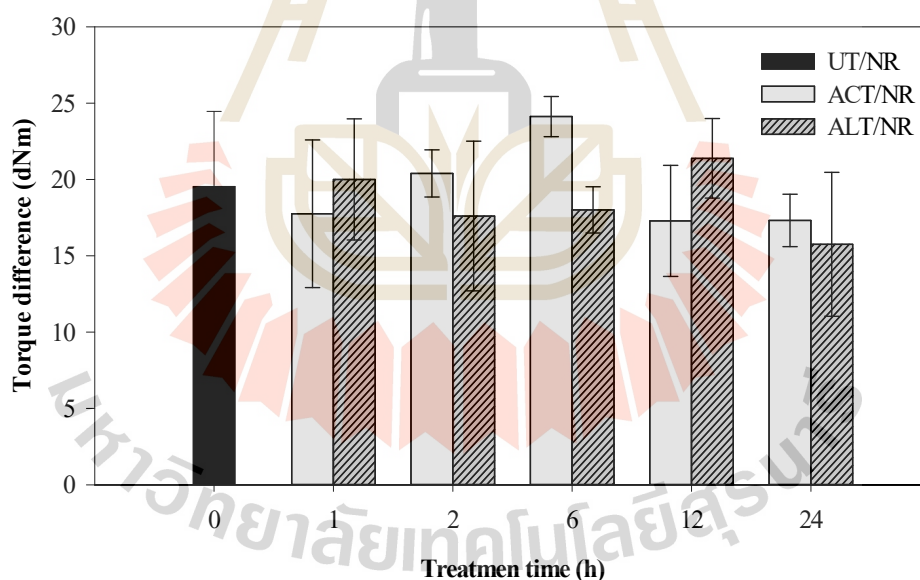


รูปที่ 3.22 Minimum torque ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน



รูปที่ 3.23 Maximum torque ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Torque differences ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.24 สามารถสังเกตเห็นได้ว่า torque difference ของ ACT/NR composites แสดงค่าสูงสุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 6 ชั่วโมง ในขณะที่ ALT/NR composites แสดง torque difference มากที่สุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 12 ชั่วโมง แนวโน้มนี้เหมือนกับ maximum torque ที่สังเกตได้ของคอมโพสิททางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม crosslink density ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites แตกต่างอย่างไม่มีความสำคัญ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของ torque difference ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites น่าจะเกิดจากสมบัติของเส้นใยหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและด่าง หลังการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยกรด ซึ่ฝั่งบนผิวเส้นใยเคลือบขาวจะถูกกำจัด ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกายังคงอยู่ การคงอยู่ของวัสดุเชื่อมประสาน (cement materials) ใน ACT น่าจะทำให้ ACT มีความแข็งที่มากกว่านำไปสู่ torque difference ของ ACT/NR composites ที่มากกว่า ในทางตรงกันข้าม การปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่างมีประสิทธิภาพมากกว่าในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซึ่ฝั่งบนพื้นผิวเส้นใยเคลือบขาวเป็นผลให้ ALT ที่ได้มีพื้นผิวที่ขรุขระและความแข็งที่ต่ำ ส่งผลให้ torque difference ของ ALT/NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 3.24 Torque difference ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.6 ลักษณะของการคงรูป ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Designation	Scorch time (min)	Cure time (min)	S_{max} (dNm)	S_{min} (dNm)	$S_{max}-S_{min}$ (dNm)
UT/NR	4.10	7.48	25.33	5.79	19.54
1ACT/NR	4.40	7.40	23.18	5.43	17.75
2ACT/NR	4.49	7.44	24.19	5.64	18.55
6ACT/NR	3.45	7.35	30.74	6.62	24.12
12ACT/NR	3.47	7.13	21.22	3.94	17.28
24ACT/NR	4.00	7.50	22.34	5.02	17.32
1ALT/NR	4.34	7.28	24.08	5.71	18.37
2ALT/NR	4.41	7.39	23.24	5.53	17.71
6ALT/NR	4.52	7.46	24.13	6.12	18.01
12ALT/NR	4.26	7.30	27.18	5.79	21.39
24ALT/NR	4.25	7.13	20.95	5.2	15.75

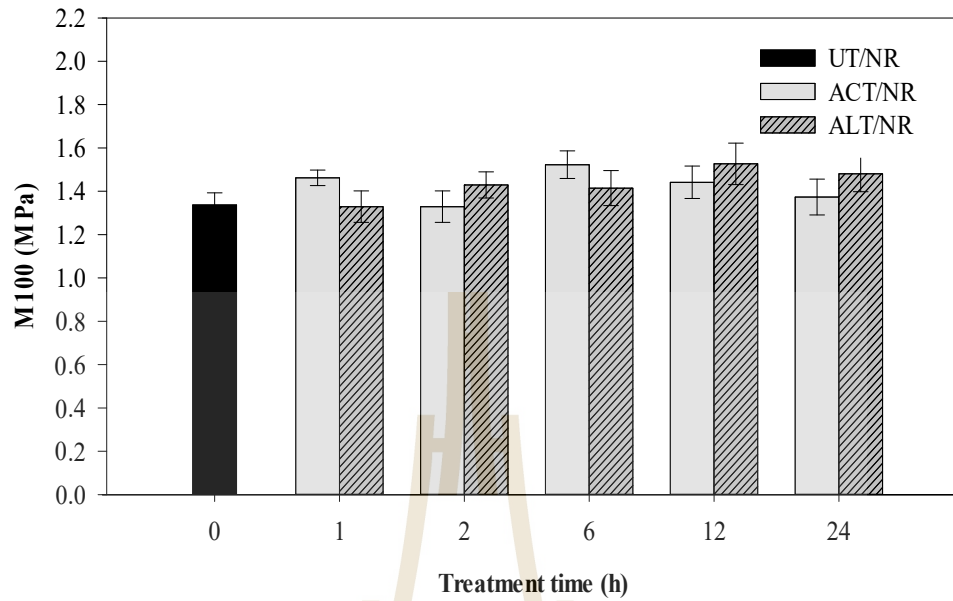
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.2.2 สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

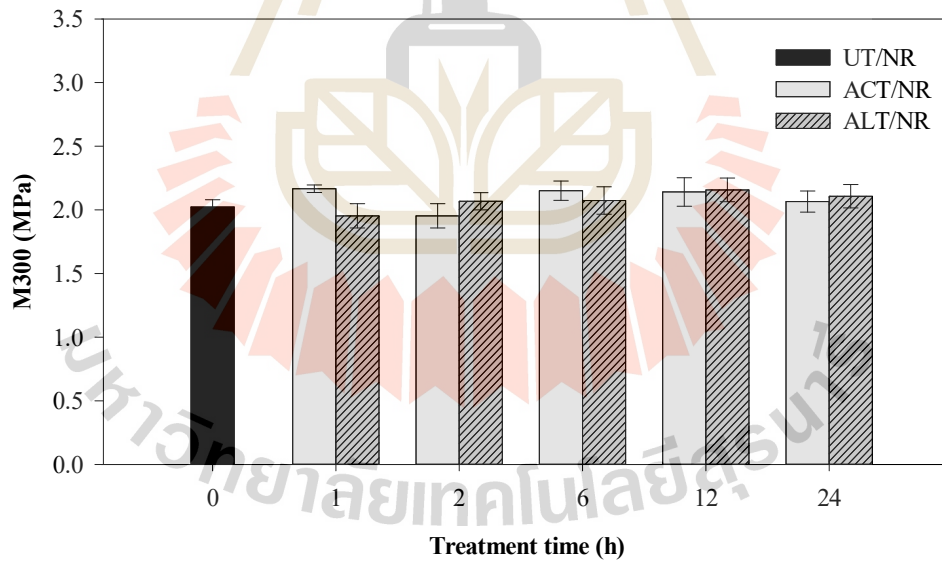
มอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain (M100)) มอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain (M300)) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break), ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength), ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density) ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.25-3.30 และแสดงในตารางที่ 3.7

3.2.2.2.1 สมบัติด้านแรงดึง

M100 และ M300 ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.25-3.26 ทั้ง M100 และ M300 ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ UT/NR composites ยิ่งไปกว่านั้น วิธีการปรับปรุงพื้นผิวและเวลาการปรับปรุงพื้นผิวไม่ส่งผลต่อ M100 และ M300 ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม Ismail, Norjulia and Ahmad, (2010) และ Sareena, *et al.*, (2012) พบว่าคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยปอ (kenaf fiber) และผงเปลือกถั่วลิสง (peanut shell powder) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างมีมอดูลัสสูงกว่าคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยทั่วไป มอดูลัสของคอมโพสิตยางสามารถควบคุมโดยปริมาณสารตัวเติม อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ การกระจายตัวของสารตัวเติม พื้นผิวของสารตัวเติม ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพื้นผิวสารตัวเติม และ crosslink density (Radovanovic', Markovic' and Radovanovic, 2008; Sareena, *et al.*, 2012) นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญของมอดูลัสของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites เนื่องจาก crosslink density ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ จากผลการศึกษานี้เสนอแนะว่าผลของปริมาณเส้นใยแกลบข้าวมีผลมากกว่าผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวต่อมอดูลัสของคอมโพสิตยางธรรมชาติ

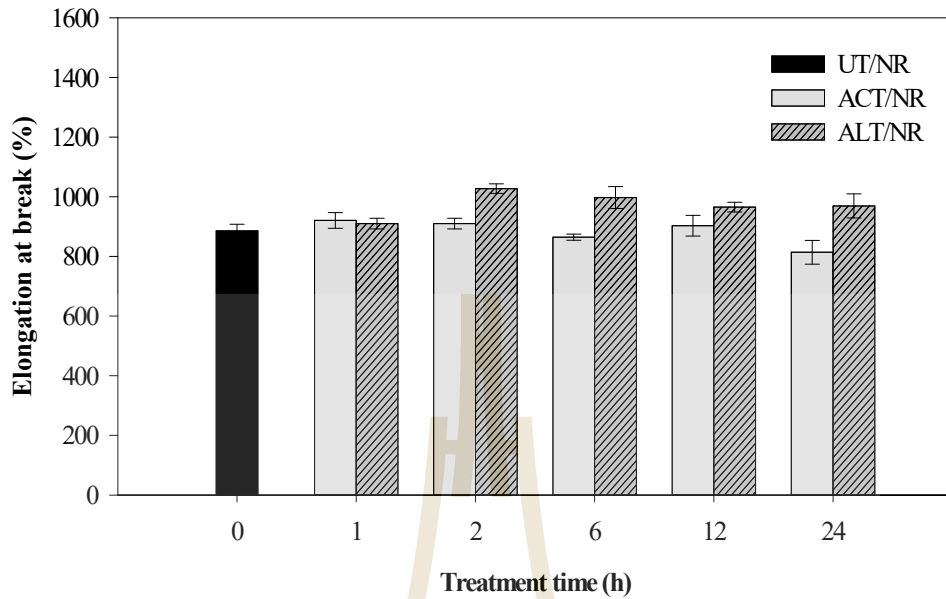


รูปที่ 3.25 Modulus at 100% strain (M100) ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน



รูปที่ 3.26 Modulus at 300% strain (M300) ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

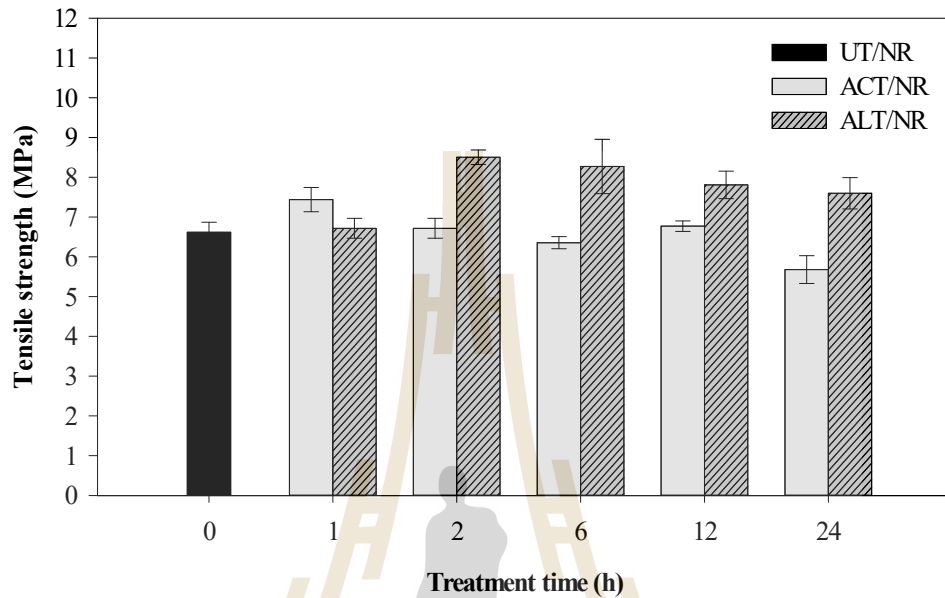
Elongation at break ของ UT/ NR composites ACT/ NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.27 Elongation at break ของ ACT/NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ UT/NR composites ในขณะที่ elongation at break ของ ALT/NR composites เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลที่เหมือนกันพบในคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยสับปะรด (pine apple fiber (PALF)/NR composites) ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยต่างโดย Lopattananon, Panawarankul, Sahakaro and Ellis, (2006) นักวิจัยเหล่านี้รายงานว่า การกำจัดเอมิเซลลูโลสใน PALF โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างส่งผลให้เกิดการปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ elongation at break ของ ALT/NR composites มีค่าสูงกว่า ACT/NR composites ผลนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและความขรุขระของ ALT นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติโดย mechanical interlocking Elongation at break ของคอมโพสิตยางธรรมชาติแสดงค่ามากที่สุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิว 2 ชั่วโมงสำหรับ ALT/NR composites และที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 1 ชั่วโมงสำหรับ ACT/NR composites เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น elongation at break ของทั้ง ACT/NR composites และ ALT/NR composites ลดลงเล็กน้อย การลดลงของ elongation at break ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites เกิดจากความแข็งของ ACT และการแตกของ ALT



รูปที่ 3.27 Elongation at break ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Tensile strength ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.28 สามารถสังเกตเห็นได้ว่า tensile strength ของ ACT/NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ tensile strength ของ ALT/NR composites เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ UT/NR composites นอกจากนี้ tensile strength ของ ALT/NR composites มีค่าสูงกว่า ACT/NR composites ผลนี้อาจเกิดจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างมีประสิทธิภาพในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซีฟิ่งบนพื้นผิวเส้นใย แกลบข้าวดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดนำไปสู่พื้นผิวขรุขระและ mechanical interlocking ระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น ผลสมบัติด้านแรงดึงสอดคล้องกับผล TGA และ FTIR ของ ACT และ ALT แสดงในรูปที่ 3.12-3.13 และรูปที่ 3.14-3.15 นอกจากนี้ การปรับปรุงสมบัติทางกลของ ALT/NR composites อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ L/D ratio ของ ALT แสดงในตารางที่ 3.5 ผลที่เหมือนกันมีการรายงานโดย Ismail, *et al.*, (2010) และ Mathew and Joseph, (2007) ในระบบของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยปอ (kenaf/NR composites) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยไอโซรา (short isora fiber/NR composites) tensile strength ของ ALT/NR composites แสดงค่ามากที่สุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิว 2 ชั่วโมง ในขณะที่ tensile strength ของ ACT/NR composites มีค่ามากที่สุดที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 1 ชั่วโมง tensile strength ของทั้ง ACT/NR composites และ ALT/NR composites มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น การ

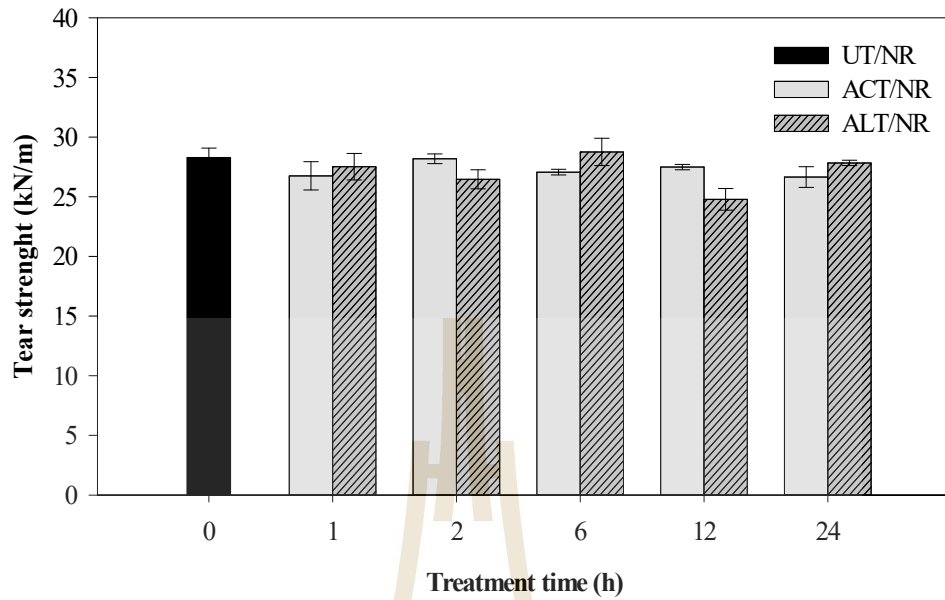
เปลี่ยนแปลงของ tensile strength ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites น่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลง L/D ratio ของ ACT และ ALT หลังจากการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกลบข้าว



รูปที่ 3.28 Tensile strength ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

3.2.2.2.2 สมบัติด้านการฉีกขาด

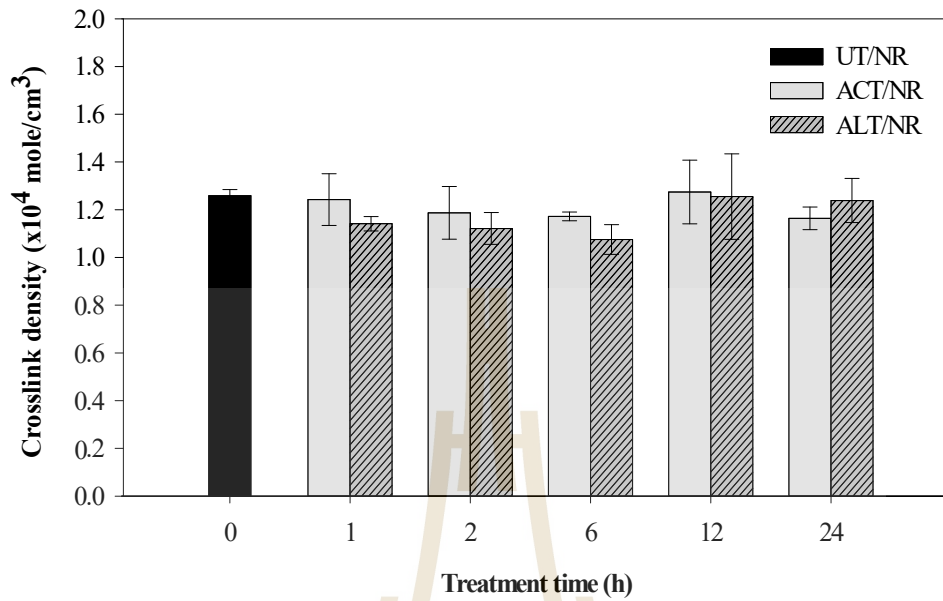
Tear strength ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.29 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของ tear strength ระหว่าง UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites นอกจากนี้ tear strength ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น ผลนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยและเวลาการปรับปรุงพื้นผิวไม่มีผลกระทบต่อสมบัติด้านการฉีกขาดของคอมโพสิตยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.29 Tear strength ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

3.2.2.2.3 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

Crosslink density ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.30 สามารถสังเกตเห็นได้ว่า crosslink density ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites มีค่าเท่ากับ UT/NR composites เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น Crosslink density ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ผลนี้แสดงถึงการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยกรดและการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่างไม่ส่งผลต่อ crosslink density ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลของคอมโพสิตยางธรรมชาติน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ interfacial adhesion ระหว่างเส้นใยกลบขาวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเมทริกซ์ยางธรรมชาติ



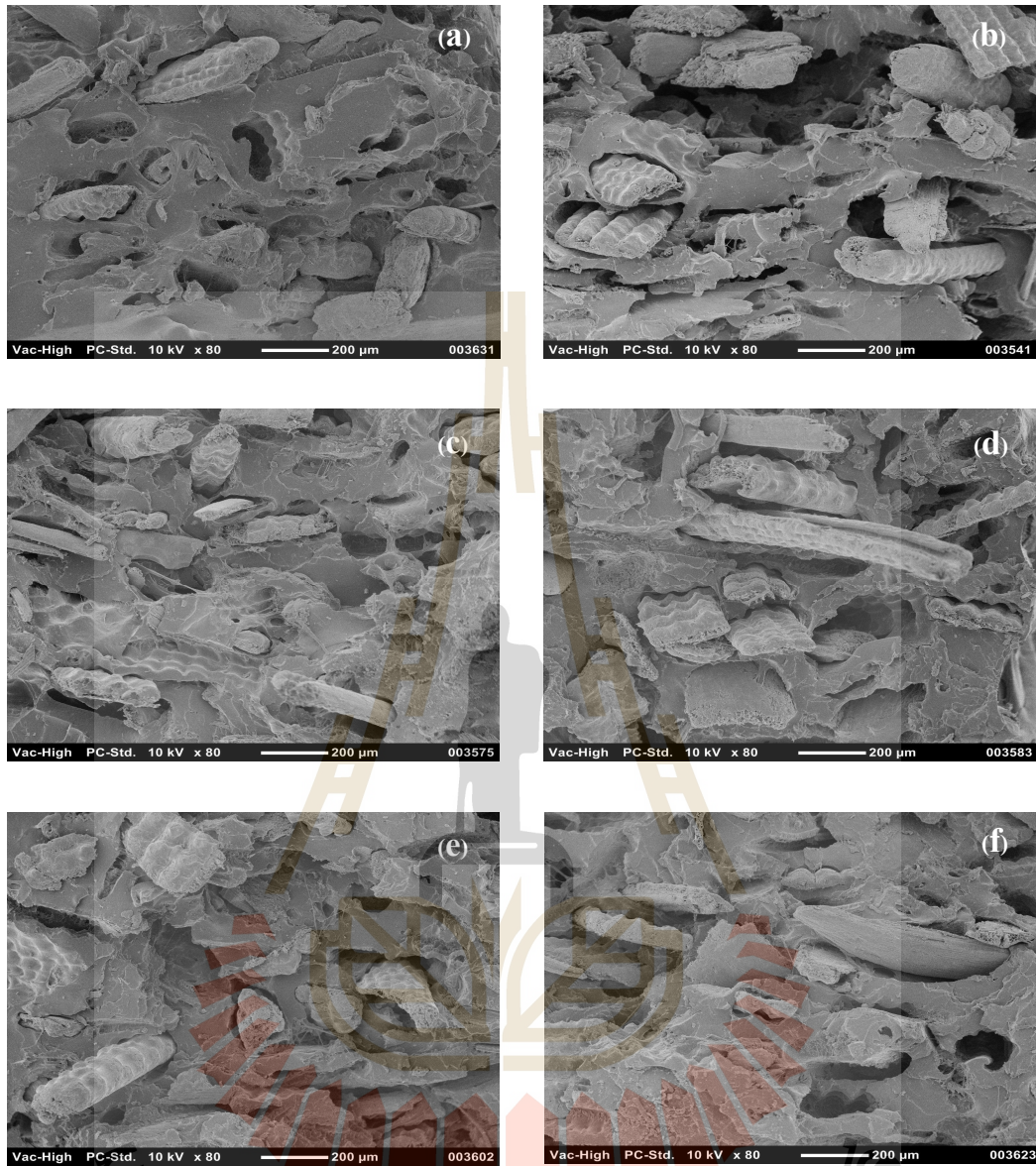
รูปที่ 3.30 Crosslink density ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

ตารางที่ 3.7 สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกัน

Designation	M100 (MPa)	M300 (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Tear strength (kN/m)	Crosslink density ($\times 10^4$ mol/cm ³)
UT/NR	1.34±0.06	2.02±0.06	885.55±22.07	6.62±0.26	28.29±0.78	1.26±0.03
1ACT/NR	1.46±0.04	2.17±0.03	920.57±26.06	7.44±0.30	26.75±1.18	1.24±0.11
2ACT/NR	1.33±0.07	1.95±0.09	909.94±17.74	6.72±0.25	28.19±0.41	1.19±0.11
6ACT/NR	1.52±0.06	2.15±0.08	864.59±10.45	6.36±0.15	27.06±0.24	1.17±0.02
12ACT/NR	1.44±0.08	2.14±0.11	902.73±34.72	6.77±0.13	27.49±0.36	1.27±0.13
24ACT/NR	1.37±0.08	2.07±0.08	813.83±39.97	5.68±0.35	26.65±0.87	1.16±0.05
1ALT/NR	1.33±0.07	1.95±0.09	909.94±17.73	6.72±0.25	27.51±1.11	1.14±0.03
2ALT/NR	1.43±0.06	2.07±0.07	1027.24±16.11	8.50±0.18	26.461±0.79	1.12±0.07
6ALT/NR	1.41±0.08	2.07±0.10	997.28±36.93	8.27±0.68	28.76±1.14	1.08±0.06
12ALT/NR	1.53±0.09	2.16±0.09	965.38±16.18	7.81±0.345	24.78±0.91	1.26±0.18
24ALT/NR	1.48±0.08	2.11±0.09	969.16±40.347	7.59±0.39	27.83±0.22	1.24±0.09

3.2.2.3 สัณฐานวิทยา

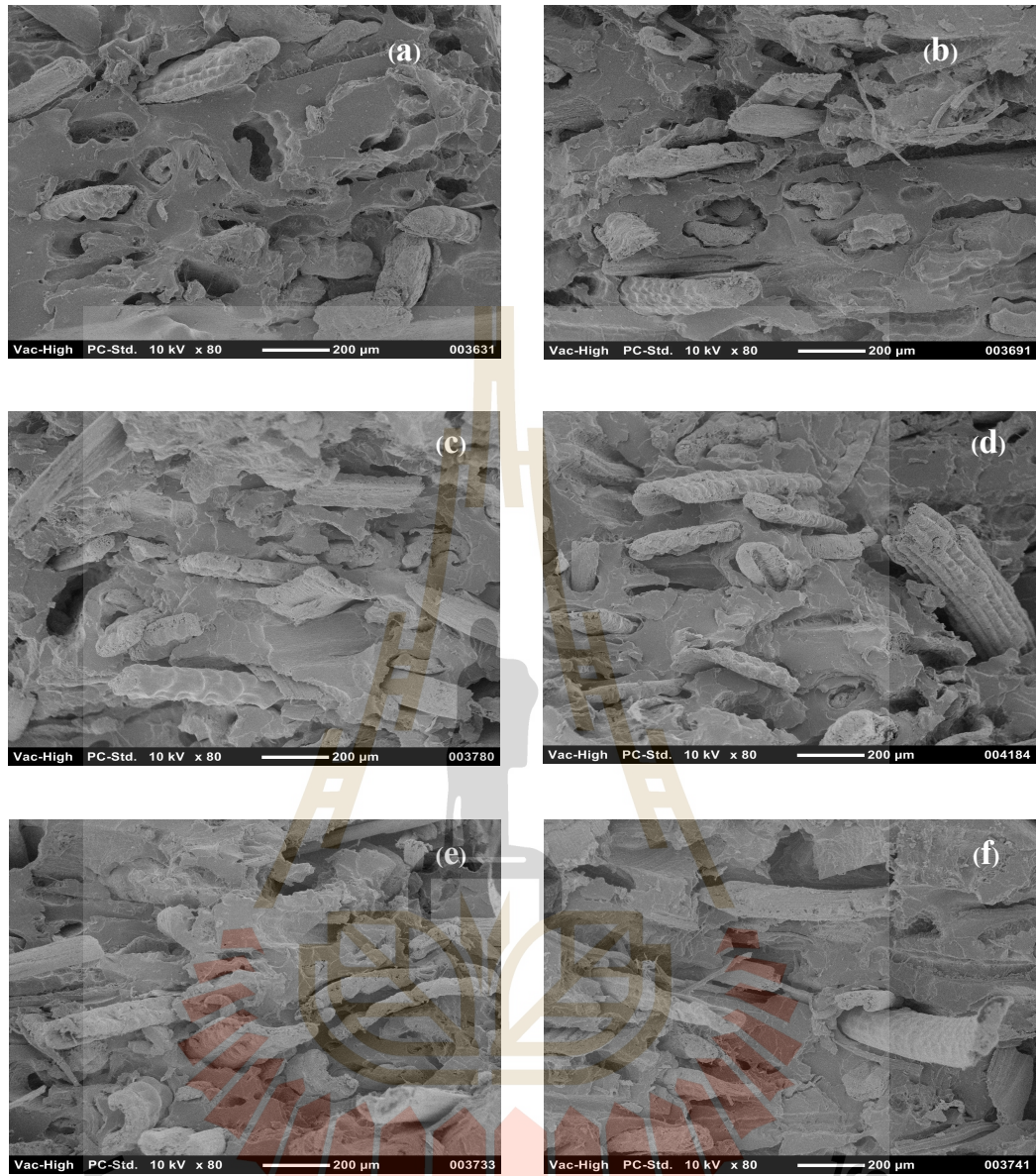
SEM ของ UT/NR composites ACT/NR composites และ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.31-3.32 micrograph ของ UT/NR composites ในรูปที่ 3.31 (a) ปรากฏรูจำนวนมากของเส้นใยแก้วที่ถูกดึงออกจากยางธรรมชาติ นอกจากนี้ ช่องว่างระหว่างเส้นใยแก้วข้าวและยางธรรมชาติสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน ผลนี้แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเส้นใยแก้วข้าวและยางธรรมชาติเนื่องจากความเป็นขี้ที่แตกต่างระหว่างเส้นใยแก้วข้าวและยางธรรมชาติ หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด รูและช่องว่างจำนวนมากสามารถสังเกตเห็นได้บนพื้นผิวของ ACT/NR composites (รูปที่ 3.31) ผลนี้แสดงให้เห็นว่าการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้วข้าวและยางธรรมชาติไม่สามารถปรับปรุงได้โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด ผลนี้สอดคล้องกับผล SEM ในส่วนของเอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใย (รูปที่ 3.16) สัณฐานวิทยาของ ACT และสัณฐานวิทยาของ ACT/NR composites พิสูจน์ว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดทำความสะอาดพื้นผิวของเส้นใยแก้วข้าวด้วยการกำจัดขี้ผึ้งและฝุ่นบนพื้นผิวเส้นใยแก้วข้าวเท่านั้นส่งผลให้สมบัติทางกลของ ACT/NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเวลาปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.31 (b-f)) พื้นผิวการแตกหักของ ACT/NR composites ไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.31 SEM micrographs ของ (a) UT/NR composites (b) 1ACT/NR composites (c) 2ACT/NR composites (d) 6ACT/NR composites (e) 12ACT/NR composite และ (e) 24ACT/NR composites

ในรูปที่ 3.32 (b-f) หลังการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยต่าง รูปร่างมากและ ช่องว่างบน ALT/NR composites ปรากฏน้อยกว่าบนผิวของ ACT/NR composites ผลนี้แสดงให้เห็นถึง การเพิ่มขึ้นของการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวและเมทริกซ์ยาง ธรรมชาตินำไปสู่สมบัติด้านแรงดึงของ ALT/NR composites ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาการ ปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น ALT/NR composites ปรากฏการแยกและการแตกหักของเส้นใยในเมทริกซ์ยาง ธรรมชาติ ผลนี้ส่งผลให้เกิดการลดลงของสมบัติด้านแรงดึงของ ALT/NR composites ที่เวลาการปรับปรุง พื้นผิวนานๆ

จากส่วนนี้ วิธีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกลบข้าวและเวลาการปรับปรุงพื้นผิว เส้นใยกลบข้าวส่งผลต่อสมบัติของเส้นใยกลบข้าวและ RHF/NR composites การปรับปรุงพื้นผิวด้วย ต่างเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และซีมีง บนเส้นใยกลบข้าวซึ่งแสดงให้เห็นโดยพื้นผิวที่ขรุขระและ L/D ratio ของ ALT ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างจะกำจัดซิลิกาบางส่วนบนพื้นผิวของเส้นใยกลบข้าว เมื่อพิจารณาจาก สมบัติทางกล คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติม ALT ที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 2 ชั่วโมงแสดงสมบัติทางกลที่ เหมาะสมที่สุดเนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยกลบข้าวและยางธรรมชาติและการ เพิ่มขึ้นของ L/D ratio ของ ALT ผลนี้พิสูจน์ว่าพื้นผิวที่ขรุขระและ L/D ratio ของเส้นใยหลังจากการ ปรับปรุงพื้นผิวส่งผลต่อสมบัติทางกลของคอมโพสิตยางธรรมชาติมากกว่าปริมาณซิลิกาในเส้นใยกลบข้าว ดังนั้น การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกลบข้าวด้วยต่างที่เวลา 2 ชั่วโมงจึงนำไปปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกลบข้าว ก่อนปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน



รูปที่ 3.32 SEM micrographs ของ (a) UT/NR composites (b) 1ALT/NR composites (c) 2ALT/NR composites (d) 6ALT/NR composites (e) 12ALT/NR composites and (f) 24ALT/NR composites

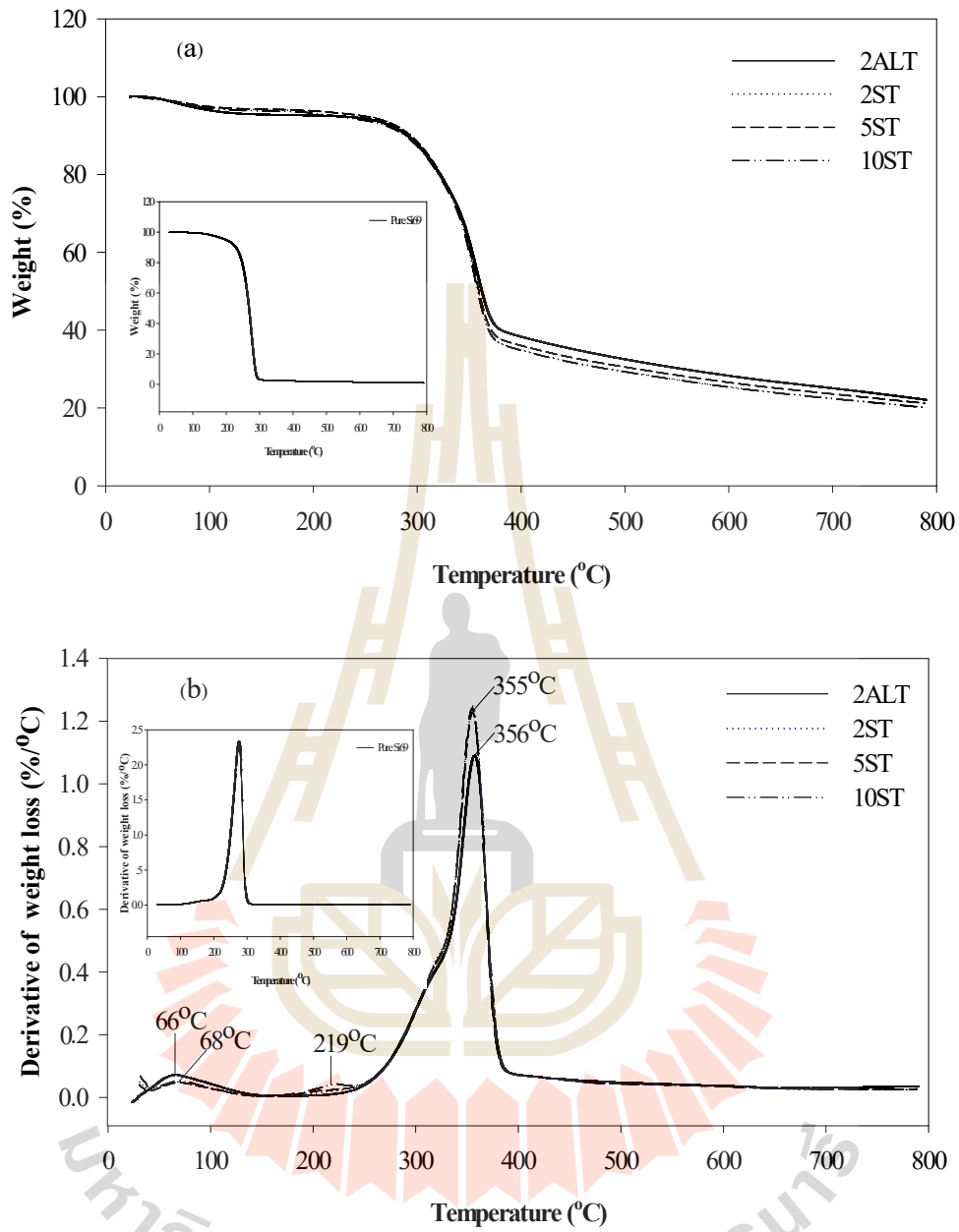
3.3 ผลของปริมาณบิสไตรเอททอกซีไซลิลโพรพิลเตตระซัลไฟด์ต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใย แกลบข้าวและคอมโพสิทระหว่างเส้นใยแกลบข้าวกับยางธรรมชาติ

ในส่วนนี้พื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวจะผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยต่างที่เวลาการปรับปรุงพื้นผิวที่ 2 ชั่วโมงนำมาใช้เพื่อปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวก่อนที่จะเคลือบเส้นใยแกลบข้าวด้วยสารคู่ควบไซเลนบิสไตรเอททอกซีไซลิลโพรพิลเตตระซัลไฟด์ (bis (trimethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Si69))

3.3.1 เอกลักษณ์เฉพาะของเส้นใยแกลบข้าว

3.3.1.1 สมบัติทางความร้อน

TGA และ DTGA thermograms ของเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างที่เวลา 2 ชั่วโมง (2ALT) และเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane treated RHF (ST)) ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.33 และแสดงในตารางที่ 3.8 ทั้ง ALT และ ST แสดงการลดลงของน้ำหนักเริ่มต้นที่อุณหภูมิระหว่าง 36 และ 100 องศาเซลเซียสสัมพันธ์กับการระเหยของน้ำ ตัวอย่าง ST แสดงการลดลงของน้ำหนักในส่วนนี้น้อยกว่าตัวอย่าง ALT แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวของ ST ดูดซับความชื้นน้อยกว่า ผลนี้น่าจะเป็นเพราะรูเล็กๆขนาดไมครอนที่ปรากฏบนผิวของ ALT ช่วยเพิ่มการแทรกซึมของสารคู่ควบไซเลนนำไปสู่การลดลงของการดูดซับความชื้นของเส้นใยแกลบข้าว (Singha and Thakur, 2009) หลังจากขั้นนี้ TGA thermograms ของตัวอย่าง ST แสดงไหล่เล็กที่อุณหภูมิ 219 องศาเซลเซียสซึ่งไม่ปรากฏในตัวอย่าง ALT ผลนี้เชื่อว่าเกิดจากการเสื่อมสลายของ Si69 ได้รับการยืนยันโดย TGA thermograms ของ pure Si69 แสดงในทางด้านล่างซ้ายของรูปที่ 3.3.3 Si69 thermogram แสดงการเสื่อมสลายเพียงขั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียสซึ่งแสดงให้เห็นพีคการเสื่อมสลายสูงสุดที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ทั้ง ALT และ ST แสดงพีคการเสื่อมสลายขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 355-356 องศาเซลเซียสเนื่องจากการเสื่อมสลายของเซลลูโลส ปริมาณเถ้าคงเหลือที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของ ALT และ ST เป็น 20-22 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งสอดคล้องกับปริมาณซิลิกาในเส้นใยแกลบข้าว ปริมาณ Si69 ที่ใช้บนพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นปริมาณ Si69 ไม่มีผลต่อปริมาณเถ้าคงเหลือที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของ ST เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้นรูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ST ไม่เปลี่ยนแปลง



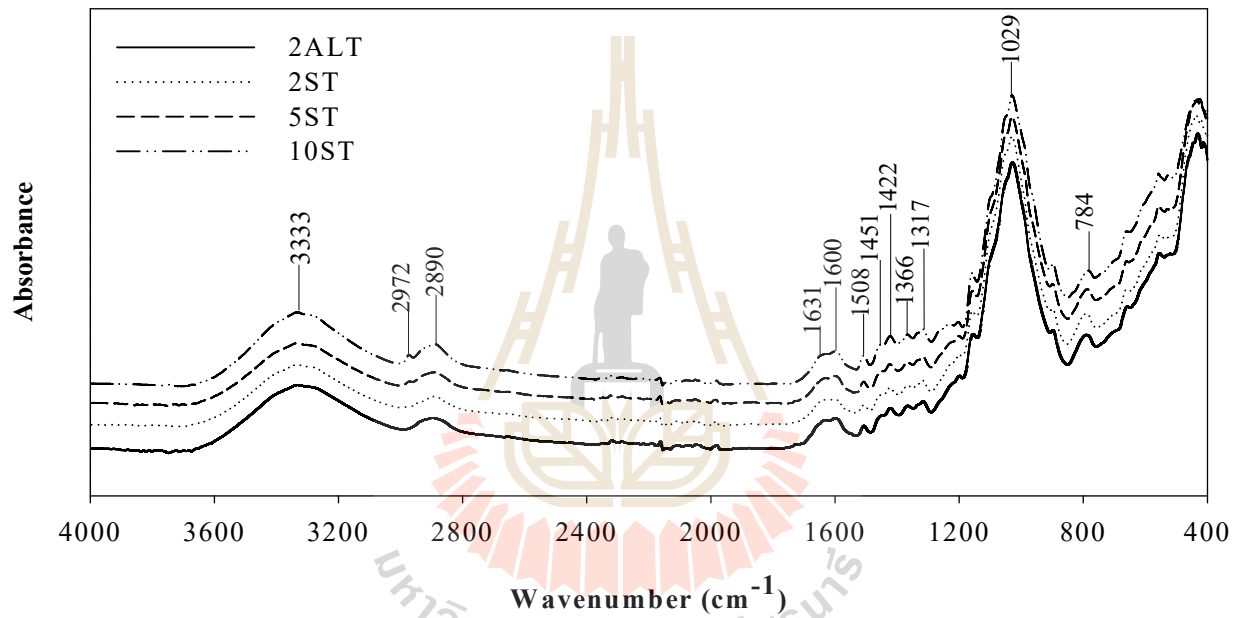
รูปที่ 3.33 TGA (a) และ DTGA (b) thermograms ของ ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.8 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 ต่างกัน

Treatment condition	Water evaporation			Thermal decomposition temperature (°C)			Residue (wt%)
	Onset (°C)	Peak (°C)	Weight loss (%)	1 st step	2 nd step	3 rd step	
2ALT	36	66	4	-	356	-	22
Pure Si69	30	-	-	274	-	-	0.9
2ST	31	69	1.4	219	356	-	20
5ST	31	68	1.2	219	355	-	21
10ST	31	68	1.5	219	355	-	20

3.3.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

FTIR spectra ของ 2ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 ต่างกันแสดงในรูปที่ 3.34 และแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.9 สำหรับ ALT แถบการดูดกลืนแสงที่ 3334 cm^{-1} สัมพันธ์กับ -O-H stretching ของเอมิเซลลูโลส เซลลูโลส และน้ำในเส้นใยแกลบข้าว แถบการดูดกลืนที่ 2898 cm^{-1} เกิดเนื่องจากการ $\text{-CH}_2\text{ stretching}$ ของเอมิเซลลูโลส และเซลลูโลสในเส้นใยแกลบข้าว แถบการดูดกลืนแสงที่ 1631 cm^{-1} เป็นผลมาจาก -O-H stretching ของน้ำที่ดูดซับไว้ของ ALT ไหลที่ 1602 และ 1508 cm^{-1} สัมพันธ์กับ C=C stretching ของวงอะโรมาติกในลิกนิน แถบการดูดกลืนที่ 1448 1423 1367 และ 1317 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับ $\text{-CH}_2\text{ bending}$ และ -CH stretching ของเอมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน นอกจากนี้ แถบการดูดกลืนที่ 1038 และ 792 cm^{-1} เกิดเนื่องจาก C-O stretching ของเซลลูโลสและ $\text{Si-O-Si stretching}$ ของซิลิกาที่ยังเหลืออยู่ในเส้นใยแกลบข้าวหลังจากการทำอัลคาไลเซชัน เมื่อ 2ALT ถูกปรับปรุงด้วย Si69 spectra ของตัวอย่าง ST มีความเหมือนกันกับของ ALT เมื่อเปรียบเทียบกับ 2ALT ST แสดงไหล่เล็กๆเพิ่มเติมที่ $2972\text{-}2969\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นถึงกลุ่มของ -CH_2 และ -CH_3 ของ Si69 (Lopattananon, Jitkalong and Seadan, 2011) จากแถบการดูดกลืนนี้ยืนยันการมีอยู่ของ Si69 บนพื้นผิว ALT อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น แถบการดูดกลืนแสงของ ST ไม่เปลี่ยนแปลง



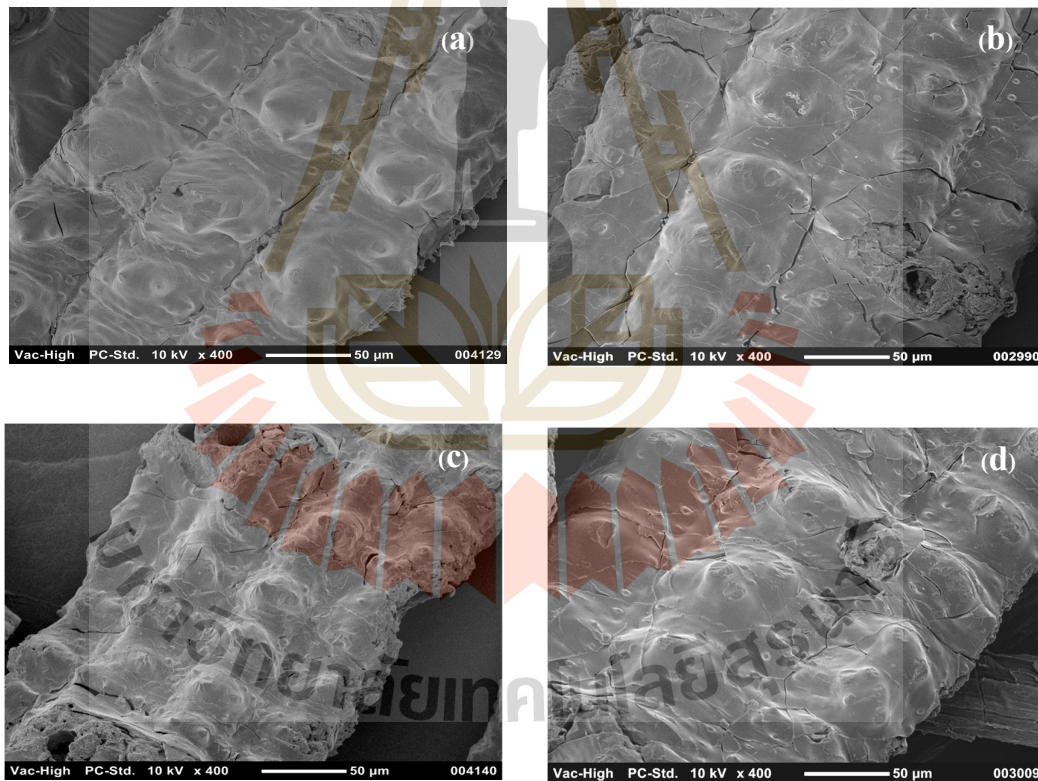
รูปที่ 3.34 FTIR spectra ของ 2ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.9 ตำแหน่งพีค FTIR ของ 2ALT และ ST ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน (Lopattananon *et al.*, 2011; Luduena, Fasce, Alverz and Stefani, 2011).

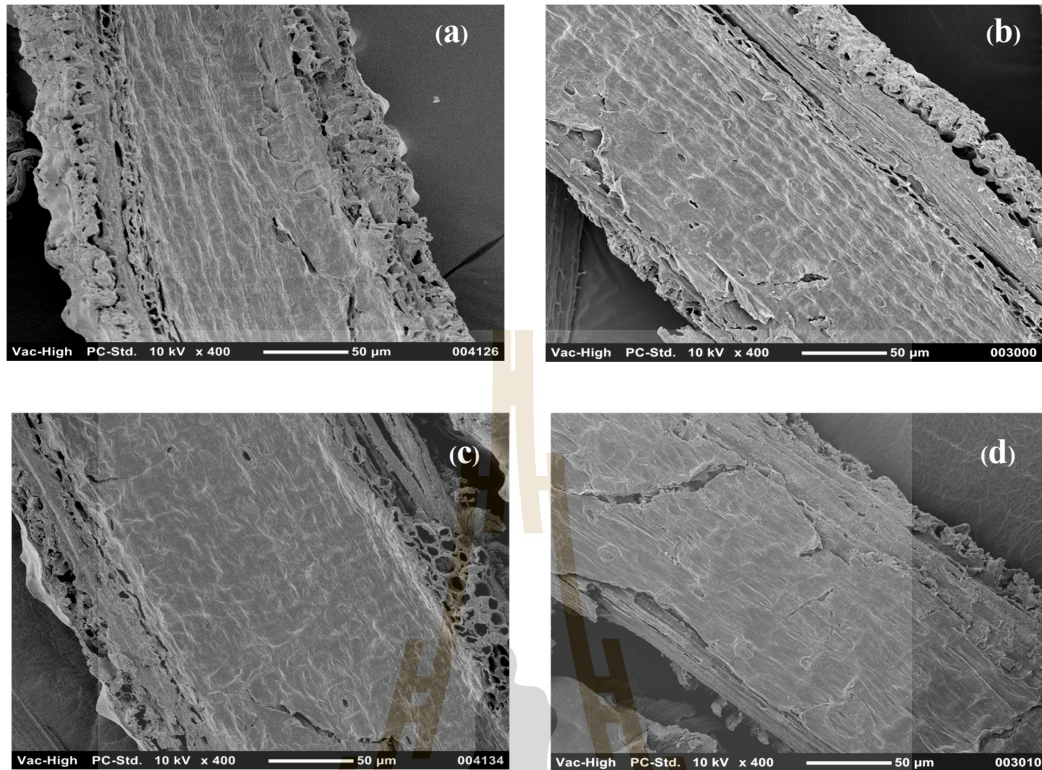
Wavenumber (cm ⁻¹)		Vibration	Source
ALT	ST		
3334	3334-3333	OH stretching	hemicellulose, cellulose, lignin, water
-	2972-2969	CH ₂ , CH ₃ stretching	Si69
2898	2891-2890	C-H stretching	hemicellulose, cellulose, lignin
1632	1631	OH stretching	adsorbed water
1602	1694-1600	C=C stretching	lignin
1508	1508-1506	C=C stretching	aromatic ring
1448-1423	1450-1422	CH ₂ strain	hemicellulose, cellulose, lignin
1367-1316	1367-1316	CH bending	hemicellulose, cellulose, lignin
1038	1030-1029	C-O stretching	cellulose
792	788-781	Si-O-Si stretching	silica

3.3.1.3 ลัทธิฐานวิทยา

SEM ของพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของ 2ALT และ ST ที่ ปริมาณ Si69 ต่างกันแสดงในรูปที่ 3.35 (a-d) และ รูปที่ 3.36 (a-d) ตามลำดับ จากรูปที่ 3.35 (a) สามารถสังเกตเห็นได้ว่าพื้นผิวภายนอกของ 2ALT แสดงพื้นผิวที่ขรุขระและรูเล็กๆขนาดไมครอนเนื่องจากการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และบางส่วนของซิลิกาจากพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าว (Ndazi, Nyahumwa and Tesha, 2007) หลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (รูปที่ 3.35 (b-d)) ST แสดงพื้นผิว ภายนอกที่เหมือนกับ 2ALT ความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญระหว่างพื้นผิวของ ST และ 2ALT เป็นเพราะ Si69 ที่ใช้แทรกซึมเข้าไปในรูเล็กๆ ขนาดไมครอนบนพื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าว ผลที่เหมือนกันพบในพื้นผิว ภายในของ 2ALT และ ST สามารถสังเกตเห็นได้ในรูปที่ 3.36 (a) 2ALT มีพื้นผิวภายในที่เรียบ หลังจากเคลือบด้วย Si69 (รูปที่ 3.36 (b-d)) พื้นผิวภายในของ ST ยังคงเรียบและเหมือนกันกับ 2ALT ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณ Si69 ไม่ส่งผลต่อพื้นผิวภายในของ ST



รูปที่ 3.35 SEM micrographs ของพื้นผิวภายนอกของ (a) 2ALT (b) 2ST (c) 5ST และ (d) 10ST



รูปที่ 3.36 SEM micrographs ของพื้นผิวภายในของ (a) 2ALT (b) 2ST (c) 5ST และ (d) 10ST

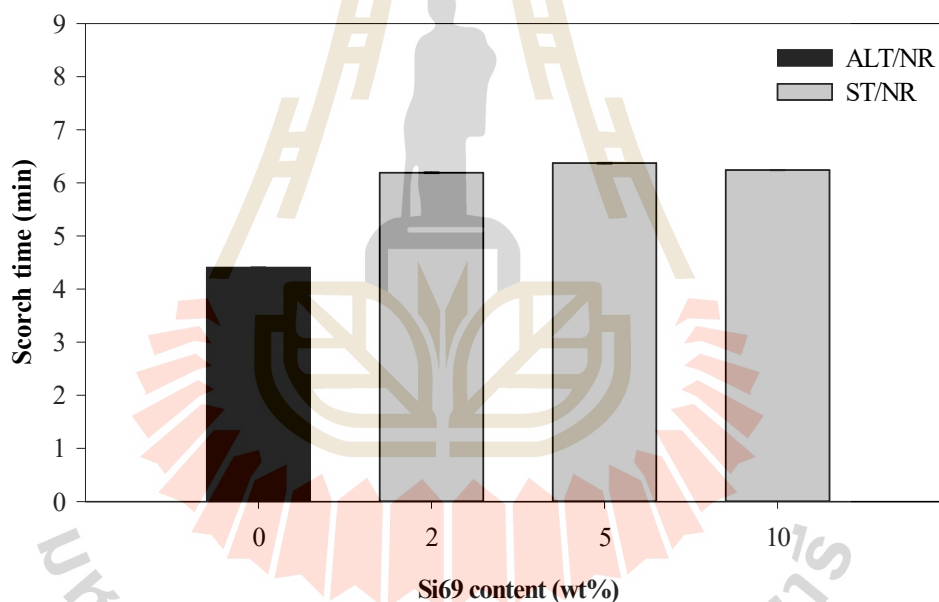
3.3.2 เวกลักษณะเฉพาะของคอมโพสิต

3.3.2.1 ลักษณะของการคงรูป

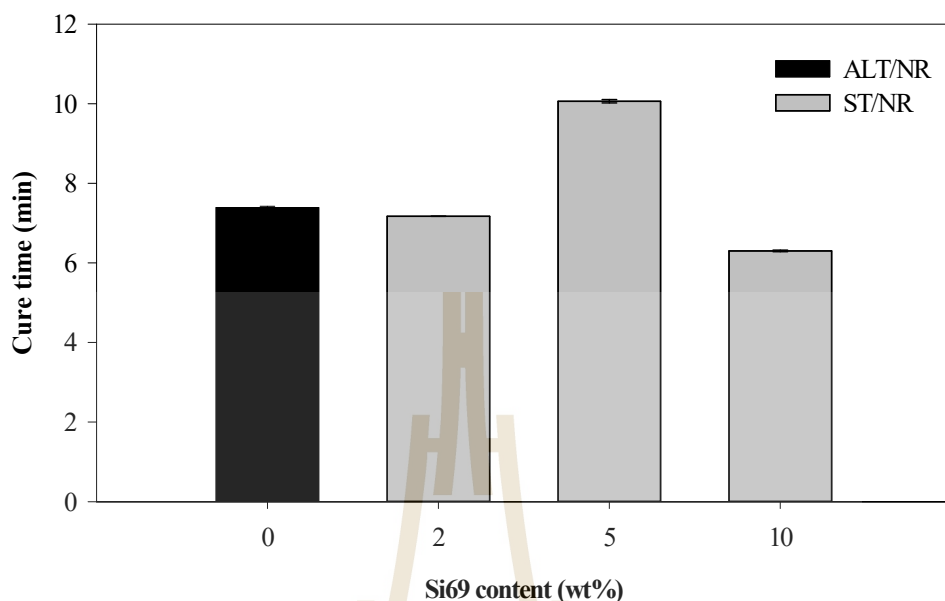
ลักษณะของการคงรูปของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง (alkali treated RHF (ALT)/NR) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (silane treated RHF (ST)/NR composites) ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน แสดงในรูปของระยะเวลาการสกอ์ช (scorch time) ระยะเวลาการคงรูป (cure time) แรงบิดสูงสุด (maximum torque (S_{max})) แรงบิดต่ำสุด (minimum torque (S_{min})) และผลต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (torque difference ($S_{max} - S_{min}$)) ดังแสดงในรูปที่ 3.37-3.41 และแสดงในตารางที่ 3.10

จากรูปที่ 3.37 สามารถสังเกตได้ว่า scorch time ของ ST/NR composites มีค่ายาวกว่า ALT/NR composites ผลนี้อาจเกิดจากการปรับปรุงของอันตรกิริยาของยางและสารตัวเติม (rubber-filler interaction) Si69 ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยกลบข้าวช่วยลดความชอบน้ำของเส้นใยกลบข้าวส่งผลให้เกิดการลดลงของการรวมตัวของเส้นใยกลบข้าวและการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกลบข้าวและยางธรรมชาติ นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของ scorch time ของ ST/NR composites อาจเกิดเพราะหมู่ tri-ethoxysilylpropyl ของ Si69 ยืดเวลาการ

เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink reaction) ของยางธรรมชาติ (Poh and Ng, 1998) เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น scorch time ของ ST/NR composites มีค่าคงที่ ในขณะที่ cure time เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 3.38 Cure time ของ ST/NR composite แสดงค่าสูงสุดที่ปริมาณ Si69 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น ผลนี้น่าจะเกิดจากการดูดซับสารกระตุ้นและสารตัวเร่งของยางโดยหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิซิลอกเซน (polysiloxane) บนพื้นผิวของเส้นใยแก้วข้าว (Thongpin, Sangnil, Suerkong, Pongpilaiprerti and Sombatsompop, 2009) การเพิ่มขึ้นของ scorch time และ cure time โดยการเติม Si69 มีการรายงานโดย De, *et al.*, (2004), Lopattananon, *et al.*, (2011), Poh and Ng, (1998) และ Thongsang and Sombatsompop, (2006) ในระบบของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยหญ้า (grass fiber/NR composites) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยเซลลูโลสและซิลิกา (cellulose fiber/silica/NR composites) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอย (fly ash silica/NR composites)

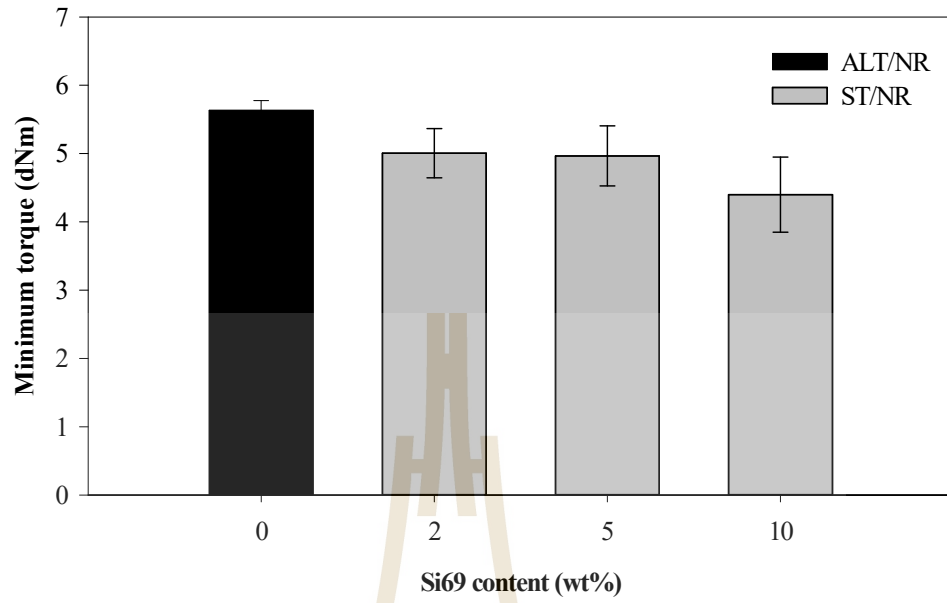


รูปที่ 3.37 Scorch time ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 ต่างกัน

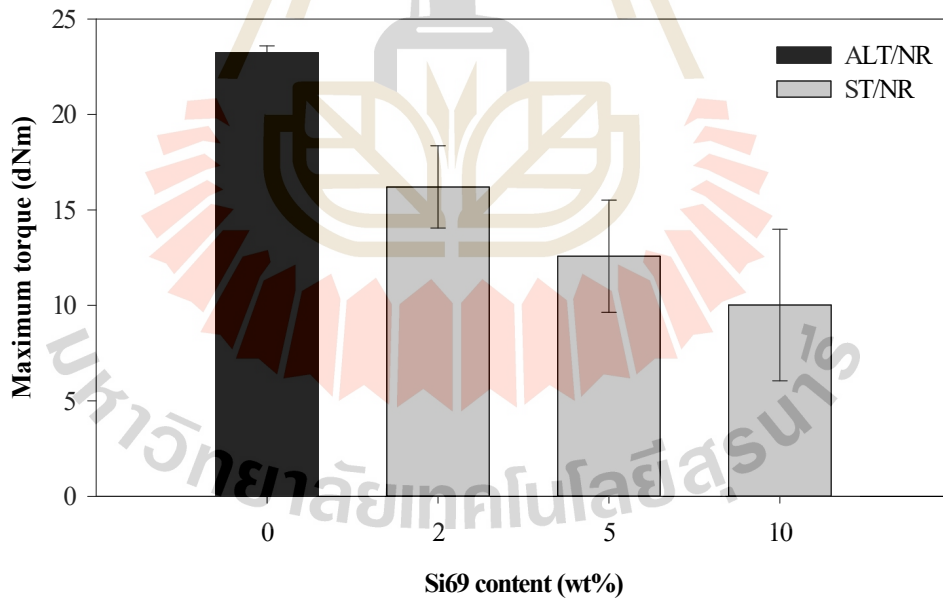


รูปที่ 3.38 Cure time ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 ต่างกัน

Minimum torque และ maximum torque ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 ต่างกันแสดงในรูปที่ 3.39-3.40 ตามลำดับ ดังที่ปรากฏ minimum torque ของ ST/NR composites มีค่าต่ำกว่า ALT/NR composites Minimum torque ของ ST/NR composites ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น การลดลงของ minimum torque ของ ST/NR composites เป็นเพราะความเป็นขั้วที่ต่ำของ Si69 ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของเส้นใยแก้วขาวในยางธรรมชาติ แนวโน้มที่เหมือนกันพบใน maximum torque ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.40) maximum torque ของ ST/NR composites ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ ALT/NR composites เมื่อปริมาณของ Si69 เพิ่มขึ้น maximum torque ของ ST/NR composites ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลนี้เป็นเพราะสารคู่ควบไซเลนที่มากเกินไปที่ปริมาณ Si69 สูงๆ ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ในยางธรรมชาตินำไปสู่การลดลงของความหนืดของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (Sae-oui, Sirisinha, Hatthapanit and Thepsuwan, 2005) ผลที่เหมือนกันพบโดย Thongpin, *et al.*, (2009) ในคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมพรีซิพิเทชันซิลิกา (precipitated silica/NR composites) อย่างไรก็ตาม นักวิจัยเหล่านี้เสนอแนะว่าการลดลงของ maximum torque ของคอมโพสิตยางธรรมชาติเกี่ยวข้องกับการรวมตัวของ polysiloxane บนพื้นผิวของซิลิกา โดย polysiloxane ที่รวมตัวกันจะดูดซับสารเคมียางนำไปสู่การขัดขวางสำหรับการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink reaction) ของยาง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ scorch time และ cure time และการลดลงของ maximum torque ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ

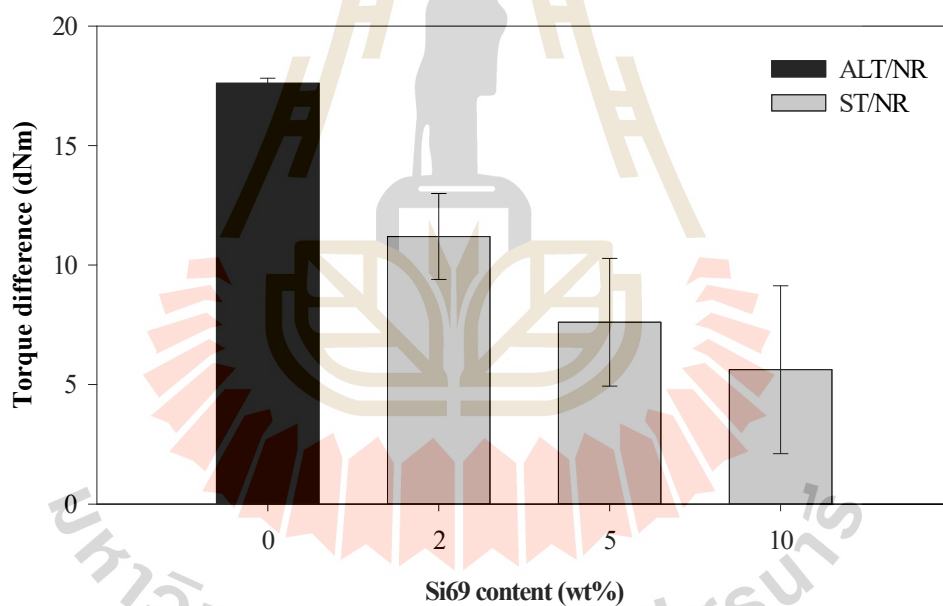


รูปที่ 3.39 Minimum torque ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน



รูปที่ 3.40 Maximum torque ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

Torque difference ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.41 Torque difference ของ ST/NR composites ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ ALT/NR composites เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น torque difference ของ ST/NR composites ลดลงเล็กน้อย Thongpin, *et al.*, (2009) ทำการศึกษาผลของปริมาณ Si69 ต่อลักษณะของการคงรูปของ precipitated silica/NR composites และรายงานว่าแรงบิด (torque) ของคอมโพสิตยางธรรมชาติลดลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น นักวิจัยเหล่านี้เสนอแนะว่าการลดลงของ torque เป็นเพราะจำนวนชั้นหลายๆชั้น (polylayers) ของ Si69 บนพื้นผิวของซิลิกาดูดซับสารเคมี ยางนำไปสู่การลดลงของ crosslink density ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ไม่มีความแตกต่างระหว่าง crosslink density ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ในงานวิจัยนี้ ดังนั้น การลดลงของ torque difference ของ ST/NR composites อาจจะเป็นเพราะผลของพลาสติกไซซิง (plasticizing effect) ของสารคู่ควบไซเลนที่มากเกินไปนำไปสู่การลดลงของความหนืดของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (Sae-oui, *et al.*, 2005)



รูปที่ 3.41 Torque difference ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

ตารางที่ 3.10 ลักษณะของการคงรูปของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

Designation	Scorch time (min)	Cure time (min)	S _{max} (dNm)	S _{min} (dNm)	S _{max} -S _{min} (dNm)
2AL/NR	4.41	7.39	23.24	5.63	17.61
2ST/NR	6.19	7.17	16.20	5.00	11.20
5ST/NR	6.37	10.06	12.58	4.97	7.60
10ST/NR	6.24	6.30	10.02	4.40	5.62

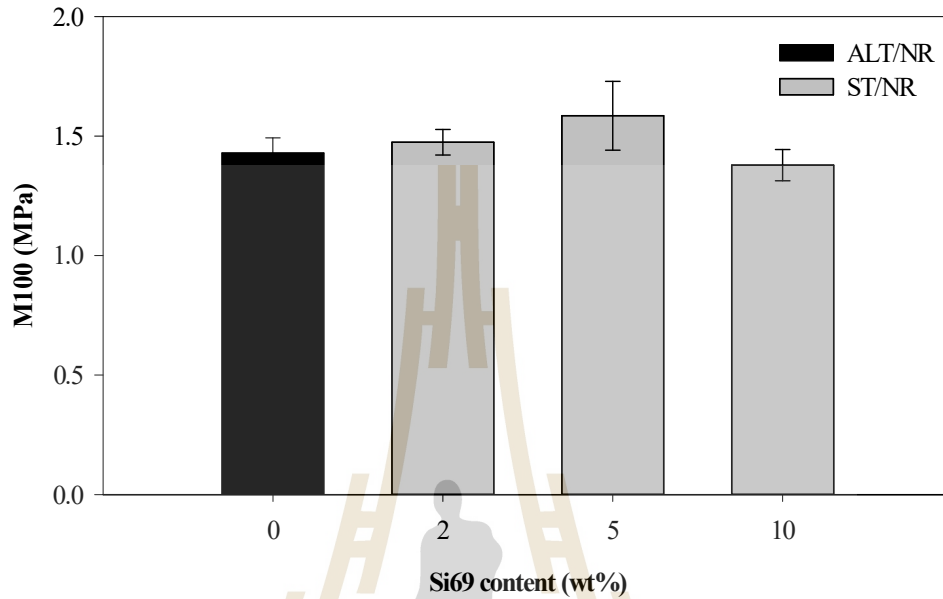
3.3.2.2 สมบัติทางกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

มอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 100% strain (M100)), มอดูลัสที่ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (modulus at 300% strain (M300)) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break), ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength), ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density) ของ ALT/NR composites ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.42-3.46 และแสดงในตารางที่ 3.11

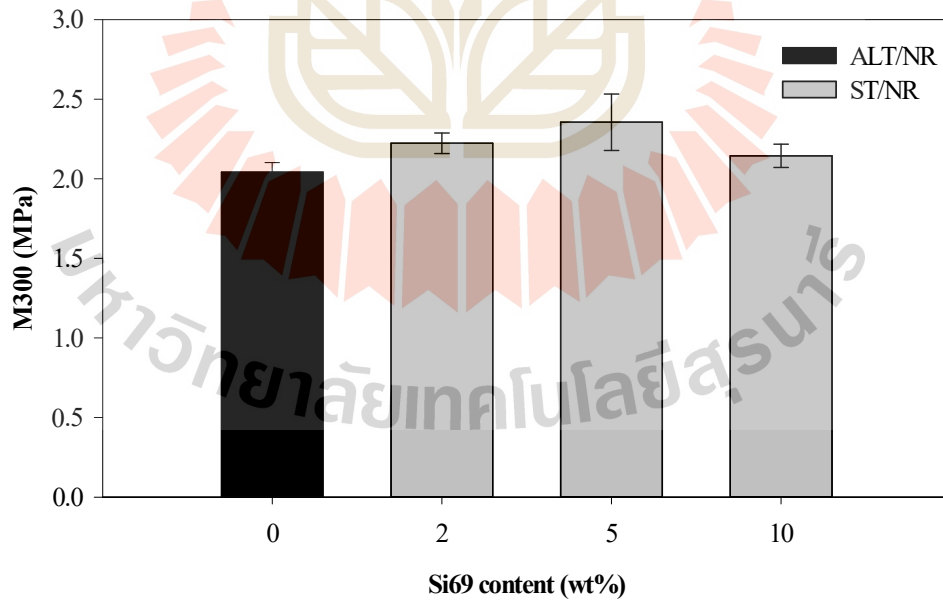
3.3.2.2.1 สมบัติด้านแรงดึง

รูปที่ 3.42 และ 3.43 แสดง M100 และ M300 ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน ทั้ง M100 และ M300 แสดงค่ามากที่สุดที่ปริมาณ Si69 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเริ่มลดลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสของคอมโพสิตยางธรรมชาติเกี่ยวข้องกับ rubber-filler interaction และการกระจายตัวของเส้นใยกลบข้าว ที่ปริมาณ Si69 ต่ำๆ การรวมตัวกันของ ST ในยางธรรมชาติเกิดน้อย ในขณะที่ ปริมาณ Si69 สูงๆ Si69 กระทำตัวเป็น plasticizer และก่อให้เกิดการลดลงของ M100 และ M300 ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (Thongsang and Sombatsompop, 2006) อย่างไรก็ตาม หลายงานวิจัยพบว่าการเติมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเส้นใยกลบข้าวช่วยเพิ่มมอดูลัสของคอมโพสิตยางเนื่องจาก การปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ยาง ผลนี้พบในระบบของคอมโพสิตยางสไตรีนบิวตะไดอีนที่เติมผงปอ (hemp hurd powder/styrene butadiene rubber (SBR) composites) (Wang, *et al.*, 2011) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมผงกลบข้าว (rice husk powder/NR composites) (Nordin, Said and Ismail, 2006) คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมผงหวาย (rattan powder/NR composites) (Ismail,

et al., 2012) และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยฝ้าย (cotton fiber/NR composites) (Zeng, et al., 2009)

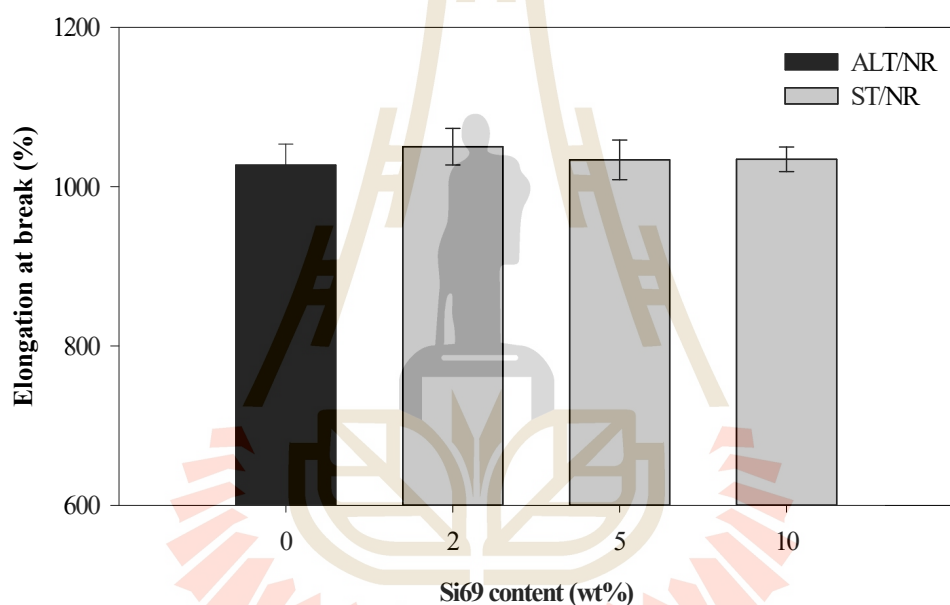


รูปที่ 3.42 Modulus at 100% strain (M100) ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน



รูปที่ 3.43 Modulus at 300% strain (M300) ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

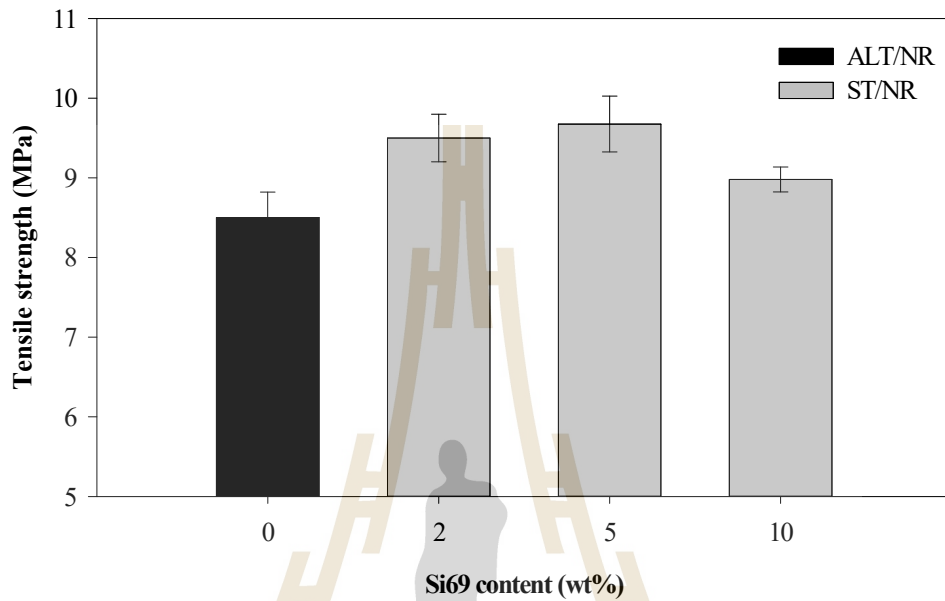
Elongation at break ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.44 Elongation at break ของ ST/NR composites เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ ALT/NR composites Elongation at break ของ ST/NR composites แสดงค่ามากที่สุดที่ปริมาณ Si69 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและหลังจากนั้นจะเริ่มคงที่เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น ผลนี้เป็นเพราะผลของพลาสติกไซเซชัน (plasticization) ของ polysiloxane บนพื้นผิวของ Si69 ผลที่เหมือนกันพบในคอมโพสิททางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนที่เติมซีลีเนียมและคาร์บอนแบล็ก (wood sawdust/carbon black/ethylene propylene diene rubber (EPDM) composites) และ cotton fiber/NR composites (Saramolee and Bunloy, 2009; Zeng, *et al.*, 2009)



รูปที่ 3.44 Elongation at break ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

จากรูปที่ 3.45 สามารถสังเกตเห็นได้ว่า tensile strength ของ ST/NR composites มีค่าสูงกว่า ALT/NR composites เล็กน้อย Tensile strength ของ ST/NR composites แสดงค่ามากที่สุดที่ปริมาณ Si69 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น ที่ปริมาณ Si69 ต่ำๆ การเพิ่มขึ้นของ tensile strength น่าจะมาจาก rubber-filler interaction ที่เพิ่มขึ้น และการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีขึ้น (Sae-oui, *et al.*, 2005) ผลนี้สอดคล้องกับ SEM micrographs ของ ST/NR composites ดังแสดงในรูปที่ 3.50-3.51 ที่ปริมาณ Si69 สูงๆ การลดลงของ tensile strength เกิดจาก polylayers ของ polysiloxane บนพื้นผิวของเส้นใยกลบข้าวเป็นผลจากปฏิกิริยาการ

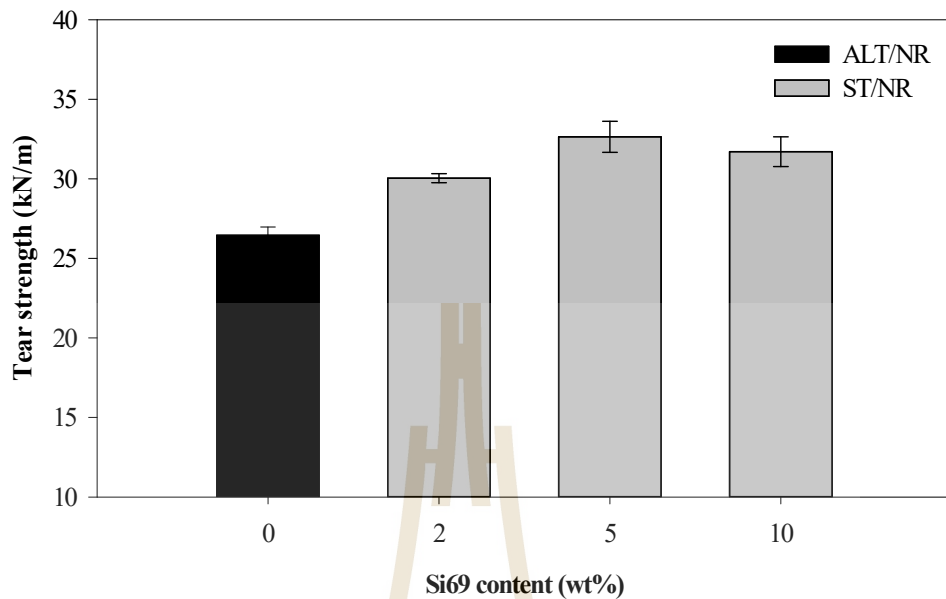
ควบแน่นตัวเองของโมเลกุล Si69 ทำหน้าที่เป็น plasticizer ระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและเมทริกซ์ยางธรรมชาติ (Thongpin, *et al.*, 2009; Thongsang and Sombatsompop, 2006)



รูปที่ 3.45 Tensile strength ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

3.3.2.2.2 สมบัติด้านการฉีกขาด

Tear strength ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.46 Tear strength ของ ST/NR composites มีค่าสูงกว่าของ ALT/NR composites tear strength ของ ST/NR composites แสดงค่าสูงสุดที่ปริมาณ Si69 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเริ่มลดลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ tear strength ของ ST/NR composites น่าจะมาจากการปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติ (Mathew and Joseph, 2007) ในทางตรงกันข้าม การลดลงของ tear strength ของ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 สูงๆ เนื่องมาจากผลของ plasticization ของ Si69

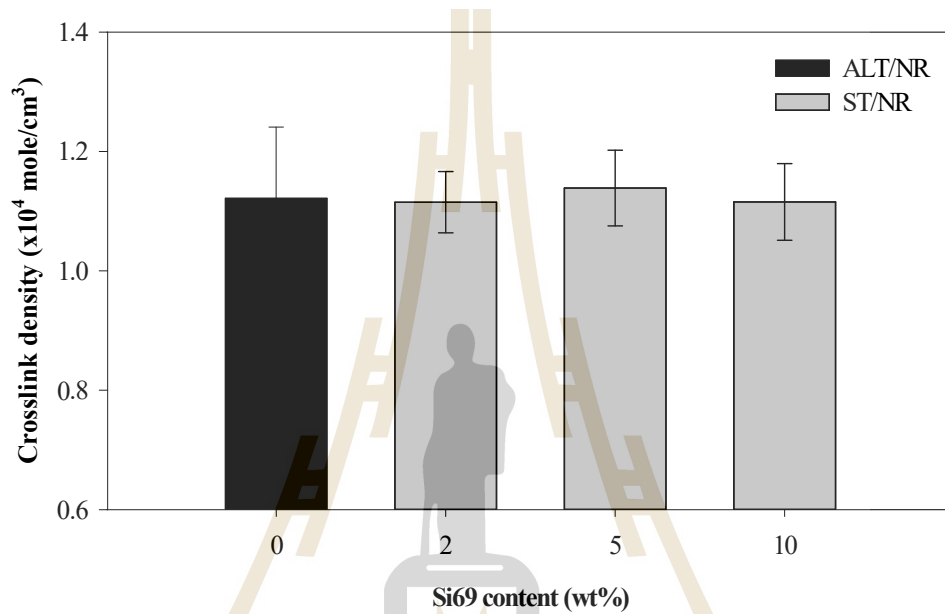


รูปที่ 3.46 Tear strength ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 ต่างกัน

3.3.2.2.3 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ

Crosslink density ของ ALT/ NR composites และ ST/ NR composites ที่ปริมาณ Si69 ต่างกันแสดงในรูปที่ 3.47 Crosslink density ของ ST/NR composites เปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ ALT/NR composites Crosslink density ของ ST/NR composites มีค่ามากที่สุดที่ปริมาณ Si69 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมีแนวโน้มคงที่เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น เป็นที่รู้กันดีว่ารูปแบบของการเชื่อมโยงพันธะของคอมโพสิตยางธรรมชาติที่มี Si69 สามารถเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ 2 แบบ ได้แก่ (1) โมเลกุลของยางธรรมชาติกับกำมะถันจาก crosslink agent และ (2) โมเลกุลของยางและกำมะถันจาก Si69 (Thongsang and Sombatsompop, 2006) อย่างไรก็ตาม รูปแบบของการเชื่อมโยงพันธะที่เกิดขึ้นในระบบนี้น่าจะเกิดตามปฏิกิริยาการคงรูปแบบแรกเท่านั้น เนื่องจาก crosslink density ของคอมโพสิตยางธรรมชาติไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น ผลนี้น่าจะเกิดจากผลของการกระจายตัวของกำมะถัน (sulfur distribution) Si69 มีกำมะถัน 4 อะตอมในโครงสร้าง โดยกำมะถันนี้สามารถถูกดึงเข้าสู่เมทริกซ์ยางธรรมชาติโดยสารตัวเร่งที่ว่องไว (active accelerator) ในระหว่างปฏิกิริยาการคงรูป ดังนั้น Si69 มีความว่องไวมากกว่าในระบบที่มี active accelerator ปริมาณสูงและมีปริมาณกำมะถันอิสระน้อย ได้แก่ ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization system) (Sae-oui, Thepsuwan and Hatthapanit, 2004) ในงานวิจัยนี้ ระบบการคงรูปกำมะถันแบบดั้งเดิม (conventional sulfur vulcanization) ซึ่งกำมะถันที่เติมเข้าไปมี

ปริมาณสูงใช้ในการคงรูปของคอมโพสิตยางธรรมชาติเป็นผลให้ประสิทธิภาพของ Si69 ในระบบลดลงและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของ crosslink density ของคอมโพสิตยางธรรมชาติอย่างไม่มีนัยสำคัญ จากผล crosslink density สามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงสมบัติทางกลของ ST/NR composites น่าจะเกิดจากรubber-filler interaction และการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีขึ้น

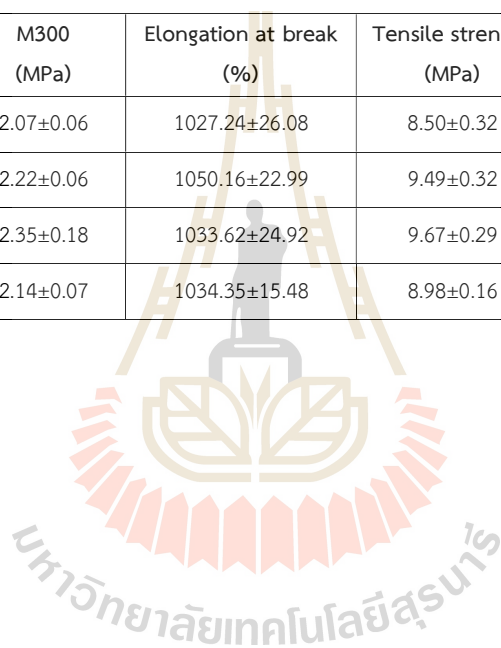


รูปที่ 3.47 Crosslink density ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

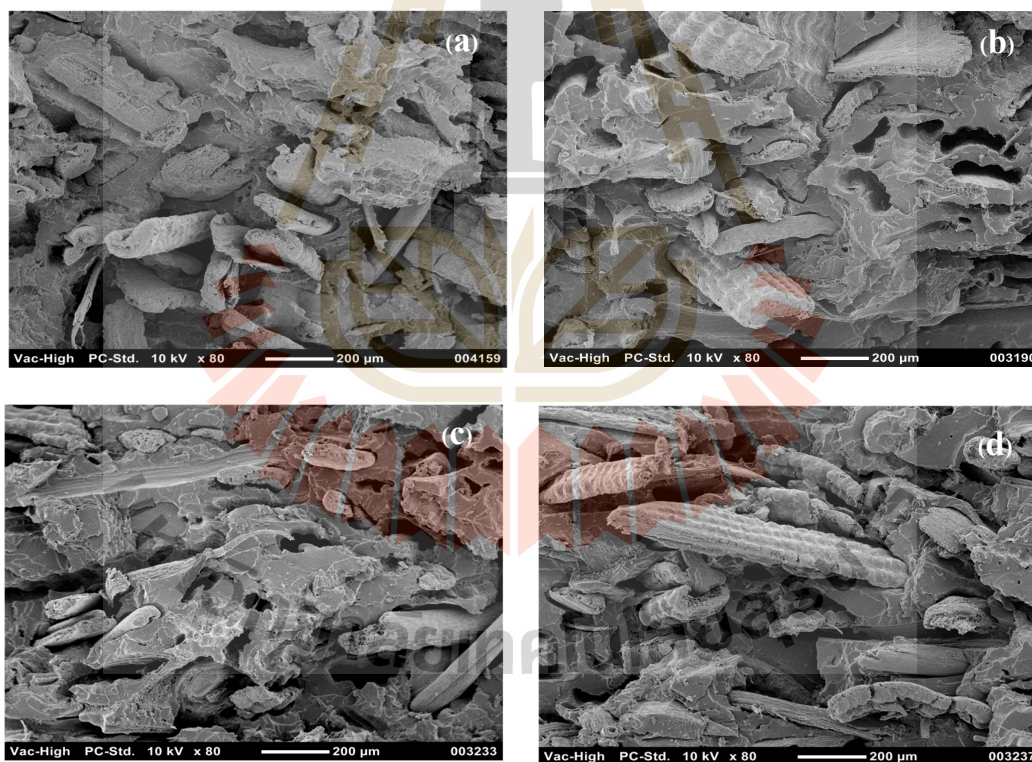
รูปที่ 3.11 สมบัติทางกลและ crosslink density ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกัน

Designation	M100 (MPa)	M300 (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Tear strength (kN/m)	Crosslink density ($\times 10^4$ mole/cm ³)
2ALT/NR	1.43 \pm 0.06	2.07 \pm 0.06	1027.24 \pm 26.08	8.50 \pm 0.32	26.46 \pm 0.51	1.12 \pm 0.12
2ST/NR	1.47 \pm 0.04	2.22 \pm 0.06	1050.16 \pm 22.99	9.49 \pm 0.32	30.04 \pm 0.28	1.11 \pm 0.05
5ST/NR	1.61 \pm 0.13	2.35 \pm 0.18	1033.62 \pm 24.92	9.67 \pm 0.29	32.64 \pm 0.98	1.14 \pm 0.06
10ST/NR	1.38 \pm 0.06	2.14 \pm 0.07	1034.35 \pm 15.48	8.98 \pm 0.16	31.71 \pm 0.94	1.12 \pm 0.06



3.3.2.3 สันฐานวิทยา

SEM ของ ALT/NR composites และ ST/NR composites ที่ปริมาณ Si69 แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 3.48 (a-d) จากรูปที่ 3.48 (a) 2ALT/NR composites ปรากฏหลังจากที่เส้นใยถูกดึงออกและการรวมตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ยางธรรมชาติ ผลนี้แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ผิวหน้าต่ำระหว่างเส้นใยกลบข้าวและยางธรรมชาติและการกระจายตัวที่ไม่ดีของของเส้นใยกลบข้าวในยางธรรมชาติ สำหรับ ST/NR composites (รูปที่ 3.48 (b-d)) คอมโพสิตปรากฏน้อยลงหลังจากที่เส้นใยถูกดึงออกจากเมทริกซ์และการกระจายตัวของเส้นใยในยางธรรมชาติที่ดีขึ้น นอกจากนี้ ST/NR composites ปรากฏช่องว่างระหว่างเส้นใยกลบข้าวและยางธรรมชาติที่เล็กกว่า 2ALT/NR composites ผลนี้แสดงให้เห็นว่า Si69 ช่วยเพิ่ม rubber-filler interaction และลดการรวมตัวของเส้นใยในเมทริกซ์ เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น เส้นใยที่ถูกดึงออกออกและช่องว่างระหว่างเส้นใยกลบข้าวและยางธรรมชาติยังคงปรากฏอยู่ ผลนี้แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุง rubber-filler interaction ที่น้อยส่งผลให้การปรับปรุงสมบัติทางกลอย่างไม่มีความสำคัญของ ST/NR composites



รูปที่ 3.48 SEM micrographs ของ (a) 2ALT/NR composites (b) 2ST/NR composites (c) 5ST/NR composites และ (d) 10ST/NR composites

3.3.2.4 อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ก่อนและหลังผสมของ UT/NR composites 2ALT/NR composites และคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (5ST/NR composites) แสดงในตารางที่ 3.12 โดยทั่วไป การแตกหักของเส้นใยหลังกระบวนการผสมเกี่ยวข้องกับชนิดของเส้นใย อัตราส่วน L/D เริ่มต้น ขนาดของความเค้นและความเครียดที่ได้รับมาก่อนหน้า (strain experience) (Jacob, *et al.*, 2004) L/D ratio ของ UT/NR composite ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญหลังผสมเพราะความแข็งของเส้นใยกลบข้าวต้านทานการแตกหักจากแรงเฉือนระหว่างการผสม ในทางตรงกันข้าม 2ALT/NR composites แสดงการลดลงของ L/D ratio หลังจากผสมเนื่องจากความแข็งที่ต่ำกว่าของ ALT การกำจัดเอมิเซลลูโลส ลิกนิน และซีฟิ่งบนพื้นผิวของเส้นใยกลบข้าวในระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่างส่งผลให้ความแข็งของ ALT ลดลงนำไปสู่การแตกหักของเส้นใยในระหว่างการผสม อย่างไรก็ตาม สำหรับ 5ST/NR composites L/D ratio ภายหลังจากผสมเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ผลนี้เป็นเพราะ Si69 ปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยกลบข้าวและยางธรรมชาติส่งผลให้ส่งผ่านแรงเฉือนจากเส้นใยไปยังเมทริกซ์นำไปสู่การแตกหักที่ลดลงของ 5ST จากผลนี้ การเปลี่ยนแปลง L/D ratio น่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของคอมโพสิตยางธรรมชาติ

ตารางที่ 3.12 L/D ratio ก่อนและหลังการผสมของ UT/NR composites 2ALT/NR composites และ 5ST/NR composites

Designation	L/D	
	Before	After
UT/NR	4.48±1.43	4.00±1.36
2ALT/NR	6.58±3.36	4.44±1.92
5ST/NR	6.30±2.81	5.42±2.31

จากผลนี้ พบว่าปริมาณ Si69 ส่งผลต่อสมบัติทางกลของ ST/NR composites คอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย Si69 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่า tensile strength M100 M300 และ tear strength สูงสุด เพราะการปรับปรุง rubber-filler interaction และการกระจายตัวที่ดีของเส้นใยในเมทริกซ์ยางธรรมชาติ

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

ผลของปริมาณเส้นใยแกลบข้าวต่อลักษณะการคงรูป สมบัติทางกล และสัณฐานวิทยาของ RHF/NR composites ถูกตรวจสอบ การเติมเส้นใยแกลบข้าวลงในยางธรรมชาติจะปลด scorch time และ cure time ของ NR composites M100 และ M300 ของ RHF/NR composites เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยแกลบข้าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ elongation at break tensile strength และ tear strength ลดลง SEM micrograph ของ RHF/NR composites แสดงการรวมตัวของเส้นใยแกลบข้าวในเมทริกซ์ยางธรรมชาติและรูจำนวนมากภายหลังเส้นใยแกลบถูกดึงออกจากเมทริกซ์ยางธรรมชาติแสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ไม่ดีที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและเมทริกซ์ยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาจากสมบัติทางกลและราคาต้นทุนของคอมโพสิตยางธรรมชาติ ปริมาณเส้นใยแกลบข้าวที่เหมาะสมคือ 40 ส่วนใน 100 ส่วนของยางธรรมชาติ

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดและด่างต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแกลบข้าวถูกตรวจสอบ รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ACT เหมือนกับ UT ในทางตรงกันข้าม TGA thermogram ของ ALT แสดงการเสื่อมสลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ACT ไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ALT แสดงการลดลงของปริมาณซิลิกา FTIR spectra ของ ACT เหมือนกัน UT เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม FTIR spectra ของ ALT แสดงการหายไปของแถบการดูดกลืนที่ 1727 cm^{-1} แสดงให้เห็นถึงการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในระหว่างการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่าง แถบการดูดกลืนแสงของ ALT มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น พื้นผิวยานอกของ ACT แสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญในขณะที่ ALT แสดงพื้นผิวที่ขรุขระ อย่างไรก็ตาม พื้นผิวยานอกของ ACT และ ALT ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาการปรับปรุงพื้นผิว scorch time ของ ALT/NR composites มีค่าต่ำกว่า ACT/NR composites อย่างไรก็ตาม วิธีการปรับปรุงพื้นผิวและเวลาการปรับปรุงพื้นผิวไม่ส่งผลต่อ cure time ของคอมโพสิตยางธรรมชาติ elongation at break และ tensile strength ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites ลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มขึ้น M100 M300 และ tensile strength ของ ACT/NR composites และ ALT/NR composites มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญคอมโพสิตยางธรรมชาติที่เติมเส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่างเป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีสมบัติทางกลที่สูงที่สุดเนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดที่ผิวหน้าระหว่างเส้นใยแกลบข้าวและยางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาจากสมบัติทางกล การปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่างที่เวลา 2 ชั่วโมงนำมาใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแกลบข้าวก่อนปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน

ผลของปริมาณ Si69 ต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใยแกลบข้าวถูกตรวจสอบ ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าวด้วยต่างเป็นเวลา 2 ชั่วโมง (2ALT) ก่อนปรับปรุงพื้นผิวด้วย Si69 เส้นใยแกลบข้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควาไซเลน (Silane treated RHF, (ST)) มีการดูดซับความชื้นที่ผิว ST ที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 2ALT เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น รูปแบบการเสื่อมสลายทางความร้อนของ ST ไม่มีการเปลี่ยนแปลง FTIR spectra ของ ST แสดงให้เล็กลง ๆ ที่ $2972-2969\text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นถึง $-\text{CH}_2$ stretching และ $-\text{CH}_3$ stretching ของ Si69 ที่ใช้ปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยแกลบข้าว แลบการดูดกลืนแสงของ ST ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณ Si69 ยังไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวภายในและพื้นผิวภายนอกของ ST scorch time ของ ST/NR composites มีค่ายาวกว่า ALT/NR composites เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ scorch time ของคอมโพสิททางธรรมชาติ ST/NR composites แสดง M100 M300 tensile strength และ tear strength ที่มากที่สุดที่ปริมาณ Si69 เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการปรับปรุง rubber-filler interaction และการกระจายตัวของเส้นใยแกลบข้าวในเมทริกซ์ยางธรรมชาติ



บรรณานุกรม

- Ahmad, I., Lane, C. E., Mohd, D. H., and Abdullah, I. (2012). Electron-beam-irradiated rice husk powder as reinforcing filler in natural rubber/ high- density polyethylene (NR/HDPE) composites. **Comp. Part B**. 43: 3069-3075.
- Attharangsarn, S., Ismail, H., Bakar, M. A., and Ismail, J. (2012). The effect of rice husk powder on standard malaysian natural rubber grade L (SMR L) and epoxidized natural rubber (ENR 50) composites. **Polym. Plast. Technol. Eng**. 51: 231-237.
- Bera, J., and Kale, D. D. (2008). Properties of polypropylene filled with chemically treated rice husk. **J. Appl. Polym. Sci**. 110: 1271-1279.
- Ciannamea, E. M., Stefani, P. M., and Ruseckaite, R. A. (2010). Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate- based adhesives. **Bioresource Technol**. 101: 818-825.
- De, D., De, D., and Adhikari, B. (2004). The effect of grass fiber filler on curing characteristics and mechanical properties of natural rubber. **Polym. Adv. Technol**. 15: 708-715.
- Flory, P. J. (1953). **Principles of polymer chemistry**. Ithaca, New York: Cornell University Press. p. 576.
- Geethamma, V. G., Joseph, R., and Thomas, S. (1995). Short coir fiber-reinforced natural rubber composites: Effects of fiber length, orientation, and alkali treatment. **J. Appl. Polym. Sci**. 55: 583-594.
- Genieva, S. D., Turmanova, S. C., Dimitrova, A. S., and Vlaev, L. T. (2008). Characterization of rice husks and the products of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere. **J. Therm. Anal. Calorim**. 93: 387-396.
- Hong, H., He, H., Jia, D., and Zhang, H. (2011). Effect of wood flour on the curing behavior, mechanical properties, and water absorption of natural rubber/ wood flour composites. **J. Macromol. Sci. B**. 50: 1625-1636.
- Hornsby, P. R., Hinrichsen, E., and Tarverdi, K. (1997). Preparation and properties of polypropylene composites reinforced with wheat and flax straw fibres: Part I Fiber characterization. **J. Mater. Sci**. 32: 443-449.
- Hussain, A. I., Abdel-Kader, A. H., and Ibrahim, A. A. (2010). Effect of modified linen fiber waste on physico-mechanical properties of polar and non-polar rubber. **Nature Sci**. 8: 82-91.

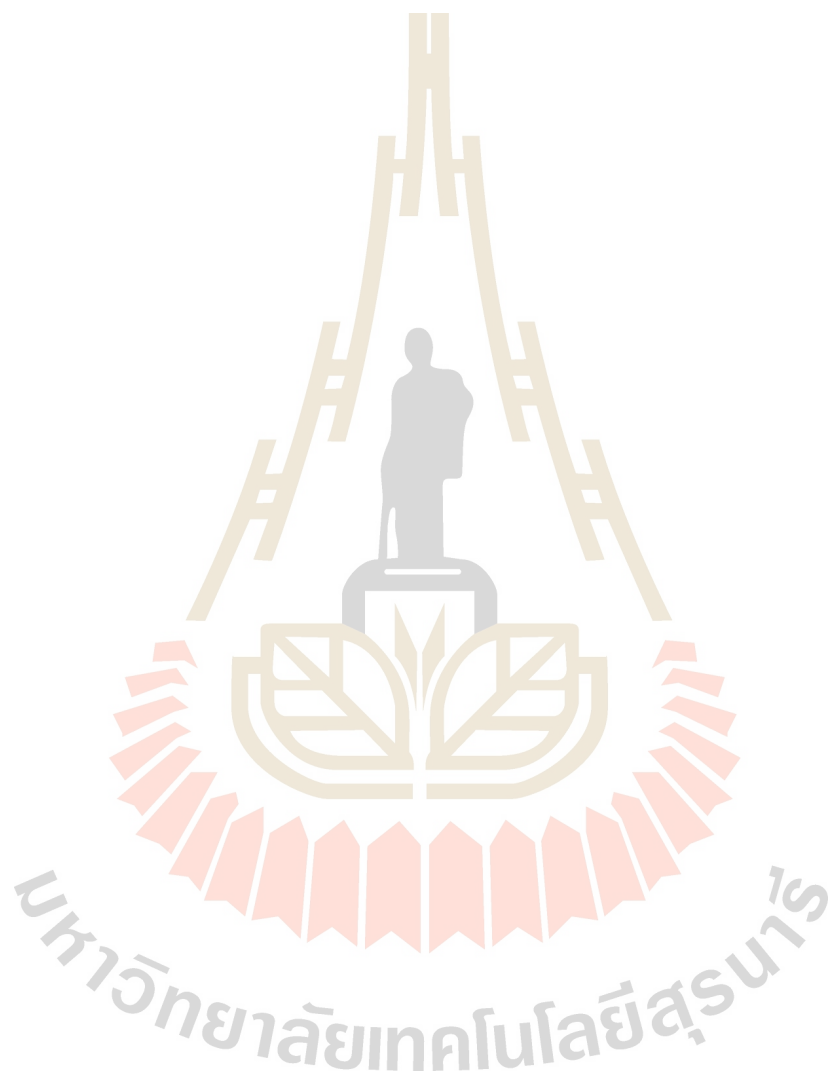
- Ichazo, M. N., Hernández, M., Albano, C., and González, J. (2006). Curing and physical properties of natural rubber/wood flour composites. **Macromol. Symp.** 239: 192-200.
- Ismail, H., and Chia, H. H. (1998). The effects of multifunctional additive and epoxidation in silica filled natural rubber compounds. **Polym. Test.** 17: 199-210.
- Ismail, H., Norjulia, A. M., and Ahmad, Z. (2010). The effects of untreated and treated kenaf loading on the properties of kenaf fibre-filled natural rubber compounds. **Polym. Plast. Technol. Eng.** 49: 519-524.
- Ismail, H., Othman, N., and Komethi, M. (2012). Curing characteristics and mechanical properties of rattan-powder-filled natural rubber composites as a function of filler loading and silane coupling agent. **J. Appl. Polym. Sci.** 123: 2805-2811.
- Ismail, H., Rosnah, N., and Rozman, H. D. (1997). Curing characteristics and mechanical properties of short oil palm fibre reinforced rubber composites. **Polymer.** 38: 4059-4064.
- Ismail, H., Rozman, H. D., Jaffri, R. M., and Ishak, Z. A. M. (1997). Oil palm wood flour reinforced epoxidized natural rubber composites: The effect of filler content and size. **Eur. Polym. J.** 33: 1627-1632.
- Jacob, M., Thomas, S., and Varughese, K. T. (2004). Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites. **Compos. Sci. Technol.** 64: 955-965
- Johar, N., Ahmad, I., and Dufresne, A. (2012). Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. **Ind. Crop. Prod.** 37: 93-99.
- Joseph, S., Joseph, K., and Thomas, S. (2006). Green composites from natural rubber and oil palm fiber: physical and mechanical properties. **Int. J. Polym. Mater.** 55: 925-945.
- Kohjiya, S., and Ikeda, Y. (2003). In situ formation of particulate silica in natural rubber matrix by the sol-gel reaction. **J. Sol-Gel Sci. Techn.** 26: 495-498.
- Lane, C. E., Ahmad, I., Mohd, D. H., and Abdullah, I. (2011). Effects of rice husk modification with liquid natural rubber and exposure to electron beam radiation on the mechanical properties of NR/HDPE/rice husk composites. **Sain Malaysia.** 40: 985-992.

- Li, X., Tabil, L., and Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. **J. Polym. Environ.**15: 25-33.
- Lopattananon, N., Jitkalong, D., and Seadan, M. (2011). Hybridized reinforcement of natural rubber with silane-modified short cellulose fibers and silica. **J. Appl. Polym. Sci.** 120: 3242-3254.
- Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K., and Ellis, B. (2006). Performance of pineapple leaf fiber- natural rubber composites: the effect of fiber surface treatments. **J. Appl. Polym. Sci.** 102: 1974-1984.
- Luduena, L., Fasce, D., Alvarez, V. A., and Stefani, P. M. (2011). Nanocellulose from rice husk following alkali treatment to remove silica. **BioRes.** 6:1440-1453.
- Mansaray, K. G., and Ghaly, A. E. (1998). Thermal degradation of rice husks in nitrogen atmosphere. **Bioresource Technol.** 65: 13-20.
- Markovska, I., and Lyubchev, L. (2007). A study on the thermal destruction of rice husk in air and nitrogen atmosphere. **J. Therm. Anal. Calorim.** 89: 809-814.
- Martí-Ferrer, F., Vilaplana, F., Ribes-Greus, A., Benedito-Borrás, A., and Sanz-Box, C. (2006). Flour rice husk as filler in block copolymer polypropylene: effect of different coupling agents. **J. Appl. Polym. Sci.** 99: 1823-1831.
- Mathew, L., and Joseph, R. (2007). Mechanical properties of short-isora-fiber-reinforced natural rubber composites: effects of fiber length, orientation, and loading; alkali treatment; and bonding agent. **J. Appl. Polym. Sci.** 103: 1640-1650.
- Maziad, N. A., El-Nashar, D. E., and Sadek, E. M. (2009). The effects of a silane coupling agent on properties of rice husk-filled maleic acid anhydride compatibilized natural rubber/low-density polyethylene blend. **J. Mater. Sci.** 44: 2665-2673.
- Mishra, S., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Misra, M., and Hinrichsen, G. (2004). A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites. **Macromol. Mater. Eng.** 289: 955-974.
- Ndazi, B. S., Karlsson, S., Tesha, J. V., and Nyahumwa, C. W. (2007). Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels. **Comp. Part A.** 38: 925-935.
- Ndazi, B. S., and Tesha, C. W. N. J. (2007). Chemical and thermal stability of rice husks against alkali treatment. **BioRes.** 3: 1267-1277.

- Nordin, R., Said, C. M. S., and Ismail, H. (2007). Properties of rice husk powder/natural rubber composites. **Solid State Sci. Technol.** 15: 83-91.
- Nordin, R., Said, C. S., and Ismail, H. (2006). The effect of filler loading and silane coupling agent on cure characteristics and mechanical properties of ric husk powder filled natural rubber compounds. In **Proceedings of the Technology and Innovation for Sustainable Development Conference**, Khon Kaen, Thailand.
- Ostad-Movahed, S., Yasin, K. A., Ansarifar, A., Song, M., and Hameed, S. (2008). Comparing effects of silanized silica nanofiller on the crosslinking and mechanical properties of natural rubber and synthetic polyisoprene. **J. Appl. Polym. Sci.** 109: 869-881.
- Panthapulakkal, S., Law, S., and Sain, M. (2005). Enhancement of processability of rice husk filled high-density polyethylene composite profiles. **J. Thermoplas. Compos.** 18: 445-458.
- Panthapulakkal, S., Sain, M., and Law, S. (2005). Effect of coupling agents on rice-husk-filled HDPE extruded profiles. **Polym. Int.** 54: 137-142.
- Park, B.-D., Wi, S. G., Lee, K. H., Singh, A. P., Yoon, T.-H., and Kim, Y. S. (2004). X-ray photoelectron spectroscopy of rice husk surface modified with maleated polypropylene and silane. **Biomass Bioenerg.** 27: 353-363.
- Poh, B. T., and Ng, C. C. (1998). Effect of silane coupling agents on the mooney scorch time of silica-filled natural rubber compound. **Eur. Polym. J.** 34: 975-979.
- Radovanović, B., Marković, G., and Radovanovic, A. (2008). Wood flour as a secondary filler in carbon black filled of styrene butadiene/chlorosulphonated polyethylene rubber blend. **Polym. Compos.** 29: 692-697.
- Sae-oui, P., Sirisinha, C., Hatthapanit, K., and Thepsuwan, U. (2005). Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system. **Polym. Test.** 24: 439-446.
- Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U., and Hatthapanit, K. (2004). Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in a conventional vulcanization system. **Polym. Test.** 23: 871-879.
- Sae-oui, P., Thepsuwan, U., and Hatthapanit, K. (2004). Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent. **Polym. Test.** 23: 397-403.

- Saramolee, P., and Bunloy, S. (2009). The curing characteristics and mechanical properties of wood sawdust/carbon black filled ethylene propylene diene rubber composites. **Walailak J. Sci. Tech.** 6: 255-271.
- Saramolee, P., Lertsuriwat, P., Hunyek, A., and Sirisathitkul, C. (2010). Cure and mechanical properties of recycled NdFeB-natural rubber composites. **Bull. Mater. Sci.** 33: 597-601.
- Sareena, C., Ramesan, M. T., and Purushothaman, E. (2012). Utilization of peanut shell powder as a novel filler in natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 125: 2322-2334.
- Sarkawi, S. S., and Aziz, Y. (2003). Ground rice husk as filler in rubber compounding **Jurnal Teknologi.** 39:135-148.
- Singha, A. S., and Thakur, V. K. (2009). Morphological, thermal, and physicochemical characterization of surface modified pinus fibers. **Int. J. Polym. Anal.** 14: 271-289.
- Thongpin, C., Sangnil, C., Suerkong, P., Pongpilaiprertti, A., and Sombatsompop, N. (2009). The effect of excess silane-69 used for surface modification on cure characteristic and mechanical properties of precipitated silica filled natural rubber (PSi/NR). **Adv. Compos. Mater.** 2171-2174.
- Thongsang, S., and Sombatsompop, N. (2006). Effect of NaOH and Si69 treatments on the properties of fly ash/natural rubber composites. **Polym. Compos.** 27: 30-40.
- Vempati, R. K., Musthyala, S. C., Mollah, M. Y. A., and Cocke, D. L. (1995). Surface analyses of pyrolysed rice husk using scanning force microscopy. **Fuel.** 74: 1722-1725.
- Wang, J., Wu, W., Wang, W., and Zhang, J. (2011). Effect of a coupling agent on the properties of hemp-hurd-powder-filled styrene-butadiene rubber. **J. Appl. Polym. Sci.** 121: 681-689.
- Wolff, S. (1996). Chemical aspects of rubber reinforcement by fillers. **Rubber Chem. Technol.** 69: 325-346.
- Wongsorat, W. (2009). **Effect of surface modification on physical properties of sisal fiber/ natural rubber composites.** M. Eng. thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Yang, H. S., Kim, H. J., Park, H. J., Lee, B. J., and Hwang, T. S. (2007). Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites. **Compos. Struct.** 77: 45-55.

Zeng, Z., Ren, W., Xu, C., Lu, W., Zhang, Y., and Zhang, Y. (2009). Effect of bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide on the crosslink structure, interfacial adhesion and mechanical properties of natural rubber/cotton fiber composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 111: 437-443.



ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาวนิธินาถ ศุภกาญจน์ ดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2536 จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา Macromolecular Science จาก Case Western Reserve University มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2543 สาขาวิชาที่มีความสนใจ Polymer Characterization และ Polymer Composites มีผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ เผยแพร่ในวารสารระดับนานาชาติ ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 38 บทความ และ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 5 ฉบับ

ผู้ร่วมวิจัย

นางสาวกษมา จารุกำจร ดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา จบการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2534 และ จบการศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา Polymer Engineering จาก University of Akron มลรัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา พ.ศ. 2543 สาขาวิชาที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blends and composites) ผลงานทาง วิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 20 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 8 ฉบับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี