โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์

Preparation of Natural Rubber Composite Filled with Fibers from Chula Zero Waste Paper Cup

ชื่อนิสิต นางสาว ชนมน บุญรอด **รหัสประจำตัวนิสิต** 6032604023

นางสาว ภัทรภร ธีรสุขพิมล **รหัสประจำตัวนิสิต** 6032629823

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ปีการศึกษา 2563

การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์

Preparation of Natural Rubber Composite Filled with Fibers from Chula Zero Waste Paper Cup

นิสิตผู้รับผิดชอบโครงการ

นางสาว ชนมน บุญรอด รหัสประจำตัวนิสิต 6032604023

นางสาว ภัทรภร ธีรสุขพิมล รหัสประจำตัวนิสิต 6032629823

รายงานโครงการวิทยาศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิจัย การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์
Preparation of Natural Rubber Composite Filled with Fibers from Chula Zero Waste Paper Cup

ผู้ดำเนินการวิจัย นางสาว ชนมน บุญรอด รหัสประจำตัวนิสิต 6032604023

นางสาว ภัทรภร ธีรสุขพิมล รหัสประจำตัวนิสิต 6032629823

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ

รองศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับว่าโครงการส่งเสริมประสบการณ์เรื่อง “การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์” เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

.....หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

(อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

ชื่อนิสิต 1. นางสาว ชนมน บุญรอด รหัสประจำตัวนิสิต 6032604023
2. นางสาว ภัทรภร ธีรสุขพิมล รหัสประจำตัวนิสิต 6032629823

ชื่อโครงการ การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ
รองศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด

บทคัดย่อ : โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เยื่อกระดาษจากการรีไซเคิลถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ต่อสมบัติของคอมโพสิตยางธรรมชาติ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เริ่มจากการเตรียมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ด้วยการปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้และบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล เส้นใยที่เตรียมมีอยู่ด้วยกัน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 เป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง ในขณะที่ชุดที่ 2 เป็นเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรงขนาด 50 เมช จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะของเส้นใยด้วยเครื่องมือวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช มีความยาวของเส้นใยมากกว่า และเส้นใยมีความโค้งงอ และดัชนีการหักงอ น้อยกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง ในส่วนที่ 2 นำน้ำเยื่อแต่ละชุดไปผสมกับน้ำยางธรรมชาติที่สัดส่วนยาง 100 ส่วนต่อเส้นใยแห้ง 1 ส่วน (1 phr) ทำการคนอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นยางด้วยวิธีหล่อแบบ และขึ้นแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมเส้นใยด้วยเพื่อเป็นการทดลองควบคุม นำแผ่นยางที่ได้ไปผสมกับสารเคมียางด้วยเครื่องผสมระบบปิดและเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง ทำการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องทดสอบการคงรูปยางแบบไร้โรเตอร์ ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส และขึ้นรูปยางด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด นำคอมโพสิตยางที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ทดสอบความต้านทานแรงดึง และทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด โดยจากการทดสอบพบว่าการเติมเส้นใยทั้งที่ผ่านการกรองและไม่ผ่านการกรองทำให้คอมโพสิตยางธรรมชาติมีสมบัติการคงรูปที่ดีขึ้น โดยคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองมีความสามารถในการคงรูปได้เร็วที่สุด และในการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าการเติมเส้นใยทำให้สมบัติการต้านทานแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: เส้นใย กระดาษ ยางธรรมชาติ คอมโพสิต

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต ชนมน บุญรอด
ลายมือชื่อนิสิต ภัทรภร ธีรสุขพิมล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาหลัก สมพร ชัยอารีย์กิจ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม กนกทิพย์ บุญเกิด

Student name Ms. Chanamon Boonrod ID No. 6032604023
Ms. Pattaraporn Teerasukpimol ID No. 6032629823

Project Preparation of Natural Rubber Composite Filled with Fibers from Chula Zero Waste Paper Cup

Project advisor Asst. Prof. Somporn Chaiareekij
Dr. Kuntinee Suvarnakich
Assoc. Prof. Dr. Kanoktip Boonkerd

Abstract: The objective of this senior project was to study the effects of fibers prepared from Chula zero waste paper cup on the properties of natural rubber composite. Firstly, the fibers were prepared by refining Chula zero waste paper cups with a fruit blender followed by a ball mill. There are two types of fiber including the one without screening and another screened with a 50 mesh sieve. Fiber morphology was analyzed using a fiber quality analyzer (FQA). The result showed that the fiber filtered with a 50 mesh sieve had a higher weight weighted average fiber length, mean curl, and kink index also. Then, pulp slurry from each group was added for the amount of 1 phr and mixed with natural latex to make rubber sheet by a casting method. The rubber sheet without pulp slurry was also prepared to use as a control experiment. Then, the obtained rubber sheets were mixed with rubber additives using an internal mixer and a two roll-mill. Vulcanization properties of the compound were tested using a moving die rheometer (MDR) at 155 °C and the composites were vulcanized using a compression molding machine. Mechanical properties of the composites such as tensile strength and tear strength were tested. The results indicated that vulcanization of the composite became better with the addition of unscreened and screened fibers. However, the fastest vulcanization rate was obtained in case of natural rubber composite filled with unscreened fibers. It was also found that adding fibers increased tensile strength and tear strength of natural rubber.

Keywords: Fiber, paper, natural latex, composite

Department: Imaging and Printing Technology

Academic year: 2020

Student signature .....Chanamon Boonrod.....

Student signature .....Pattaraporn Teerasukpimol.....

Advisor's signature.....Somporn Chai.....

Co-advisor's signature.....Kuntinee Suvarnakich.....

Co-advisor's signature.....Kanoktip Boonkerd.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ สำเร็จลุล่วงด้วยดีและบรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และบุคลากรหลายฝ่ายที่ให้ความช่วยเหลือ คณะผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทั้งสามท่านที่ช่วยชี้แนะแนวทางในการดำเนินการทดลอง คอยให้ข้อมูล ความคิดเห็น และแนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการปฏิบัติโครงการจนสำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ และภาควัสดุศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้อง และขอขอบพระคุณบุคลากรของภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ และภาควัสดุศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในห้องปฏิบัติการทุกด้าน และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานโครงการวิจัย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

สารบัญเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญ	ข
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เยื่อที่ใช้ในการผลิตกระดาษ	3
2.1.1 เยื่อเชิงกล	3
2.1.2 เยื่อเคมี	3
2.1.3 เยื่อกึ่งเคมี	3
2.1.4 เยื่อกระดาษรีไซเคิล หรือเยื่อกระดาษใช้ซ้ำสอง	3
2.2 การบดเยื่อ (Refining)	4
2.3 กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล	5

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญเรื่อง	หน้า
2.3.1 การกระจายเยื่อ (Pulping หรือ Repulping)	5
2.3.2 การคัดแยกขนาด (screening)	5
2.3.3 การทำความสะอาด (cleaning)	5
2.3.4 การลอยหมึกพิมพ์ (Flotation)	6
2.3.5 การล้างเยื่อ (Washing)	6
2.3.6 การกระจายหมึก (Dispersion)	6
2.3.7 การฟอกเยื่อ (Bleaching)	7
2.4 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ	7
2.4.1 การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใย (Fiber treatment)	7
2.4.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical method)	7
2.4.1.1.1 การทำอัลคาไลน์เซชัน (Alkalization)	7
2.4.1.1.2 การทำไซลาไนเซชัน (Silanization)	8
2.4.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical method)	9
2.4.1.2.1 การดัดแปรด้วยความร้อน (Heat treatment)	9
2.4.1.2.2 การดัดแปรโดยใช้โคโรนา (Corona treatment)	9
2.4.1.2.3 การดัดแปรเมทริกซ์ (Matrix modification)	9
2.4.1.2.4 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (Addition of compatibilizer)	9
2.5 การวัลคาไนซ์	10

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญเรื่อง	หน้า
2.5.1 ระบบกำมะถัน (Sulfur)	10
2.5.2 ระบบเพอร์ออกไซด์ (Peroxide)	10
2.5.3 ระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ	10
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2 วัตถุดิบและสารเคมี	16
3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง	16
3.3.1 การเตรียมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์	16
3.3.2 การขึ้นแผ่นยางจากน้ำยางธรรมชาติ	17
3.3.3. การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์	17
3.3.3.1 การผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer)	17
3.3.3.2 การผสมด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)	17
3.3.3.3. การอัดเบ้าชิ้นงานด้วยเครื่องอัดยางและพลาสติก (Compression Molding Machine)	18
3.3.4. การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	18
3.3.4.1 ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Properties)	18
3.3.4.2 ทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Strength)	18

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญเรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ตอนที่ 1 ผลการทดลองและการอภิปรายผลเกี่ยวกับเส้นใยที่เตรียมได้	19
4.2 ตอนที่ 2 สมบัติของยางธรรมชาติที่มีการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการกรอง และเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช	20
4.2.1 ผลของการเติมเส้นใยต่อสมบัติการคงรูปของยาง	20
4.2.2 ผลของการเติมเส้นใยต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของยาง	23
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	26
5.2 ข้อเสนอแนะ	26
เอกสารอ้างอิง	27
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ค่าการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใย	30
ภาคผนวก ข ค่าการทดสอบการคงรูปยาง	31
ภาคผนวก ค ค่าการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)	32
ภาคผนวก ง ค่าการทดสอบสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)	33
ภาคผนวก จ ภาพปฏิบัติการในการทดลอง	34

สารบัญตาราง

สารบัญตาราง หน้า

ตารางที่ 1 การใช้สารเคมี สัญลักษณ์ และการเรียกชื่อขั้นตอนการฟอก 7

ตารางที่ 2 การประยุกต์ใช้งานยางคอมโพสิทผสมเส้นใยธรรมชาติในอุตสาหกรรมต่าง ๆ 14

ตารางที่ 3 สูตรยางของยางธรรมชาติไม่เติมเส้นใย กับ ยางธรรมชาติเติมเส้นใย 18

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช 19

ตารางที่ 5 ค่าจากการทดสอบการคงรูปยางของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมเส้นใย 20

ตารางที่ 6 ค่า Tensile Strength ค่า Elongation และค่า Tear strength ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใยคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช 24

ตารางที่ ก.1 ค่าการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช 30

ตารางที่ ข.1 ค่าจากการทดสอบการคงรูปยางของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมเส้นใย 31

ตารางที่ ค.1 ค่า Tensile Strength ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย คอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช 32

ตารางที่ ง.1 ค่า Tear strength ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย คอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช 33

สารบัญภาพ

สารบัญภาพ หน้า

ภาพที่ 1 เครื่องทำความสะอาดแบบฟอเวิดและแบบรีเวิร์ซ 6

ภาพที่ 2 ภาพสแกนคอมโพสิทยางที่ผสมกับเส้นใยปอแก้ว 6% 11

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า MH-ML ระหว่างยางธรรมชาติ เทียบกับคอมโพสิตยาง เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองและคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง 20

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า Tc90 ระหว่างยางธรรมชาติ เทียบกับคอมโพสิตยาง เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองและคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง 21

ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque กับเวลา ของยางธรรมชาติ 22

ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque กับเวลา ของคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่าน การกรอง 22

ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque กับเวลา ของคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง 23

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า Tensile strength ระหว่างยางธรรมชาติไม่เสริมเส้นใย คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง 24

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า Tear strength ระหว่างยางธรรมชาติไม่เสริมเส้นใย คอมโพสิต ยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง 25

ภาพที่ จ.1 เยื่อที่เตรียมได้จากการปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ 34

ภาพที่ จ.2 เยื่อที่เตรียมได้จากการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล 34

ภาพที่ จ.3 การกระจายน้ำเยื่อในน้ำยางธรรมชาติด้วยเครื่องกวนสารแม่เหล็ก 35

ภาพที่ จ.4 การขึ้นแผ่นยางจากน้ำยางธรรมชาติ 35

ภาพที่ จ.5 แผ่นยางที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับน้ำเยื่อที่ไม่ได้กรองผ่านตะแกรงก่อนแห้งตัว 36

ภาพที่ จ.6 แผ่นยางที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับน้ำเยื่อที่กรองผ่านตะแกรงก่อนแห้งตัว 36

ภาพที่ จ.7 ยางที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด 37

ภาพที่ จ.8 ยางที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง 37

ภาพที่ จ.9 ยางที่ได้จากการอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดยาง 38

ภาพที่ จ.10 ตัวอย่างทดสอบ Tensile Strength 38

ภาพที่ จ.11 ตัวอย่างทดสอบ Tear Strength 38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

จากข้อมูลสถิติ [1, 2] แสดงให้เห็นว่าในแต่ละปีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งมีจำนวนนิสิตและบุคคลากรมากกว่า 40,000 คน ได้มีการผลิตขยะเป็นจำนวนมากถึง 2,000 ตัน นับเป็นแหล่งผลิตขยะขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานคร ทางมหาวิทยาลัยจึงได้ดำเนินการโครงการ CHULA Zero Waste ขึ้น โครงการบริหารจัดการพลาสติกชีวภาพอย่างครบวงจรเป็นหนึ่งในแผนงานการลดการเกิดขยะ ณ แหล่งกำเนิด โดยมีการร่วมมือกับบริษัทไทย เคเค อุตสาหกรรม จำกัด เพื่อพัฒนาและผลิตถ้วยกระดาษที่สามารถย่อยสลายได้ 100% และได้ถูกนำมาใช้จริงในโรงอาหาร 17 แห่ง ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งแต่เดิมภายในมหาวิทยาลัยมีปริมาณขยะแก้วพลาสติกถึง 2 ล้านใบต่อปี การเปลี่ยนมาใช้ถ้วยกระดาษเคลือบพลาสติกชีวภาพ (Zero-waste cup) ทำให้ลดปริมาณขยะประเภทแก้วพลาสติกได้ไม่น้อยกว่า 6,000 ใบต่อวัน [3-6]

ถ้วยกระดาษเคลือบพลาสติกชีวภาพนี้ผลิตเพื่อคุณสมบติพิเศษในด้านการย่อยสลาย โดยมีการใช้หมึกพิมพ์ถั่วเหลือง (Soy ink) ที่มีประสิทธิภาพในการพิมพ์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และลักษณะเด่นของถ้วยชนิดนี้คือมีการใช้สารเคลือบพลาสติกชีวภาพ PBS (Polybutylene Succinate) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบทางธรรมชาติ ได้แก่ พืชระยะสั้น หรือพืชที่มีอายุสั้น เมื่อเก็บผลผลิตแล้วพืชจะมีผลผลิตลดลงหรือตาย เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น สารเคลือบชนิดนี้สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เองที่อุณหภูมิปกติจากกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในกระบวนการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydro-biodegradable) ทำให้น้ำหนักโมเลกุลและสายโซ่สั้นลง จากนั้นจุลินทรีย์จะมาทำหน้าที่ในการย่อยสลายต่อไป นอกจากนี้สารเคลือบ PBS ยังมีความยืดหยุ่นและความเหนียวสูง ส่งผลให้มีศักยภาพในการขึ้นรูปที่ดี [7]

ยางพาราเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาประเทศอุตสาหกรรมใหม่บนพื้นฐานเกษตรกรรมอย่างประเทศไทย ผลผลิตจากต้นยางพารา คือ ยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติโดดเด่นหลายประการ ตั้งแต่สมบัติเชิงกล สมบัติความหนียว สมบัติความยืดหยุ่น สมบัติความต้านทานต่อการขัดถู และความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่นได้ดี [8, 9] สมบัติเหล่านี้ทำให้ยางธรรมชาติถูกนำไปแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการก่อสร้างและวิศวกรรม การผลิตอุปกรณ์และ

เครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้และพัฒนาเป็นอย่างมาก

จากการศึกษาที่ผ่านมา [10, 11] ทำให้ทราบว่า การนำเส้นใยธรรมชาติมาผสมกับยางธรรมชาติเพื่อเสริมแรงนั้น เป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลที่ดี และได้วัสดุคอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ราคาไม่แพง นอกจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในด้านการย่อยสลายทางชีวภาพแล้ว ยังรวมถึงขั้นตอนการผลิตด้วย กล่าวคือ ลดการสึกกร่อนของเครื่องจักรและไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพเหมือนการเสริมแรงด้วยการเติมสารอนินทรีย์อื่นๆ อย่างเส้นใยแก้ว

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของการใช้เยื่อกระดาษจากการรีไซเคิลถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ในการเสริมแรงคอมโพสิตยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะ การเพิ่มมูลค่าและส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาผลของการใช้เยื่อกระดาษจากการรีไซเคิลถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ในการเสริมแรงคอมโพสิตยางธรรมชาติ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลผลของการใช้เยื่อกระดาษจากการรีไซเคิลถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ในการเสริมแรงคอมโพสิตยางธรรมชาติ

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เยื่อที่ใช้ในการผลิตกระดาษ

2.1.1 เยื่อเชิงกล

สำหรับการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical pulping process) นั้น จะใช้พลังงานกลควบคู่ไปกับพลังงานความร้อนในการแยกเส้นใยออกมา [12] โดยชิ้นไม้จะถูกส่งเข้าเครื่องบดเพื่อบดชิ้นไม้ให้แหลกละเอียดเป็นเยื่อไม้ โดยเยื่อเชิงกลส่วนใหญ่จะได้เส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ มีการขาดและตัดเป็นท่อน ๆ นอกจากนี้ลิกนินในเยื่อกระดาษไม่ได้ถูกกำจัดออกไปเพียงแต่อ่อนตัวลงเท่านั้น จึงทำให้กระดาษเหลืองได้ง่าย แต่เยื่อกระดาษชนิดนี้จะให้กระดาษที่มีความทึบแสงและความเรียบสูง จึงเหมาะสำหรับการนำไปทำสื่อสิ่งพิมพ์ราคาถูก เช่น หนังสือพิมพ์

2.1.2 เยื่อเคมี

การผลิตเยื่อเคมี (Chemical pulping process) จะใช้เคมีและพลังงานความร้อน ในการทำให้เส้นใยจากกัน [13] โดยชิ้นไม้จะถูกส่งเข้าหม้อต้มเยื่อ (Digester) ร่วมกับสารเคมี เพื่อกำจัดหรือละลายลิกนินออกไป การผลิตเยื่อเคมีจะแบ่งตามสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ เยื่อซัลเฟต เยื่อซัลไฟต์ และ เยื่อโซดา โดยเยื่อเคมีจะให้ค่าผลผลิตต่ำกว่าเยื่อเชิงกล คือ ประมาณร้อยละ 40-50 เส้นใยที่ได้จะมีความสมบูรณ์ มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง

2.1.3 เยื่อกึ่งเคมี

การผลิตเยื่อกระดาษกึ่งเคมี (Semi-chemical pulpprocess) จะเป็นการผสมการผลิตเยื่อแบบเชิงกลและเคมีเข้าด้วยกัน โดยขั้นตอนแรกจะนำไปต้มพร้อมกับสารเคมี แต่จะใช้ปริมาณสารเคมีน้อยกว่าการผลิตเยื่อเคมีแล้วจึงมาใช้วิธีเชิงกลต่อ โดยการนำไม้ที่ต้มแล้วไปบดเพื่อแยกเส้นใยออก การผลิตเยื่อกึ่งเคมีจะช่วยลดปริมาณของลิกนินในเยื่อกระดาษได้เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบเชิงกล โดยกระดาษที่ได้จากกระบวนการนี้มักจะนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์

2.1.4 เยื่อกระดาษรีไซเคิล (Recycle Pulp) หรือ เยื่อกระดาษใช้ซ้ำสอง (Secondary Pulp)

การนำกระดาษที่ใช้แล้วมาทำเป็นเยื่อกระดาษจะต้องนำไปปั่นเพื่อแยกเส้นใยออกมาเสียก่อน หลังจากนั้นจะทำการแยกสิ่งแปลกปลอมออก เช่น น้ำหมึกและกาว จะได้เยื่อกระดาษรีไซเคิล ซึ่งเส้นใยที่ได้จะมีขนาดสั้นและ

ขาดง่าย มีสีคล้ำหรือสีน้ำตาล จึงมักจะนำไปทำเป็นชั้นในของกระดาษ และกล่องกระดาษ แต่ถ้าต้องการนำไปใช้ในงานพิมพ์ หรือกระดาษชำระ ควรนำไปกำจัดหมึกออก (Deinking) นำไปฟอกเพื่อกำจัดลิกนินให้ได้มากสุด (Bleaching) [14,15]

2.2 การบดเยื่อ (Refining)

การบดเยื่อหรือการตีเยื่อเป็นการใช้แรงกลเพื่อปรับสภาพของผนังเส้นใย (Cell wall) ให้มีความเหมาะสมในการผลิตกระดาษ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องบดเยื่อ (Refinder) ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นกรวย (Conical refinder) หรือเป็นจานบด (Disk refinder) โดยเส้นใยจะอยู่ในทิศทางขนานกับซี่บด หรือใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องตีเยื่อ (Beater) ซึ่งเส้นจะอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับซี่บด การบดเยื่อหรือการตีเยื่อจะเพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย การบวมน้ำของเส้นใย ทำให้เส้นใยอ่อนตัวลง เพื่อเพิ่มพันธะของเส้นใย ทำให้กระดาษแข็งแรงขึ้น กล่าวโดยละเอียด คือ เมื่อเส้นใยผ่านกระบวนการบดเยื่อจะทำให้ผนังของเส้นใยชั้น Primary ฉีกขาดส่งผลให้การดูดซึมน้ำของเส้นใยเพิ่มขึ้น ผนังชั้น Secondary ที่ดูดน้ำเข้าไปขยายตัวออกด้านข้างได้อย่างเต็มที่ เส้นใยเกิดการบวมตัว มีความยืดหยุ่นทำให้แนบตัวไปกับเส้นใยที่ติดกัน (Comformability) ได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสระหว่างเส้นใย และยังเพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยจากการแตกแขนงของผนังเส้นใย (Fibrillation) ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้เส้นใยแต่ละเส้น นอกจากนี้การบดเยื่อยังทำให้เส้นใยสั้นลง ทำให้การกระจายตัวของเส้นใยในแผ่นกระดาษ (Formation) ดียิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความแข็งแรงของเส้นใยก็จะลดลงไปด้วย ปัจจัยที่มีส่วนสำคัญคือ ความเข้มข้นของเยื่อ (Stock consistency) ขณะบดเยื่อ โดยการใช้ความเข้มข้นของน้ำเยื่อต่ำและใช้ระยะห่างระหว่างซี่บดแคบจะช่วยให้เส้นใยสัมผัสกับซี่บดโดยตรงทำให้เส้นใยถูกตัดสั้นได้ง่ายกว่า เกิด Fiber cutting แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นของน้ำเยื่อสูงและใช้ระยะห่างระหว่างซี่บดกว้างจะทำให้เกิด Fiber brushing คือ เกิดการเสียดสีกันของผนังเส้นใยแต่ละเส้น ผนังเส้นใยหยาบขึ้น เกิดการแตกแขนง เสริมพันธะระหว่างเส้นใย ทำให้เส้นใยไม่ค่อยถูกตัดความยาวลดลงไม่มาก และในการบดเยื่อยังทำให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กหรือชิ้นส่วนผนังเส้นที่หลุดออกมาที่เรียกว่า Fines ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติการระบายน้ำของเยื่อ (Drainage/ Freeness) โดยยิ่งเส้นใยผ่านการบดเยื่อเป็นเวลานานจะยิ่งทำให้เส้นใยมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ปริมาณ Fines มากขึ้น เส้นใยกักเก็บน้ำมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติการระบายน้ำลดลง นอกจากนี้หากนำน้ำเยื่อที่ได้จากการบดเยื่อไปหาน้ำหนักเยื่อแห้งและนำไปคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของเยื่อจะพบว่าค่าความเข้มข้นของเยื่อลดลงตามเวลาในการบดเยื่อ แต่ลดลงเพียงเล็กน้อย

การบดเยื่อมีผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ในด้านความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใย โดยการบดเยื่อมากจะทำให้เส้นใยเกิดการเสียหายมากส่งผลให้สมบัติกระดาษที่ขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใย เช่น

ความต้านทานการฉีกขาด เป็นต้น มีแนวโน้มลดลง ในส่วนของพันธะระหว่างเส้นใย การบดเยื่อจะช่วยทำให้พันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติกระดาษที่ขึ้นกับพันธะระหว่างเส้นใย เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงทะลุ เป็นต้น มีแนวโน้มสูงขึ้น

2.3 กระบวนการผลิตกระดาษรีไซเคิล

2.3.1 การกระจายเยื่อ (Pulping หรือ Repulping)

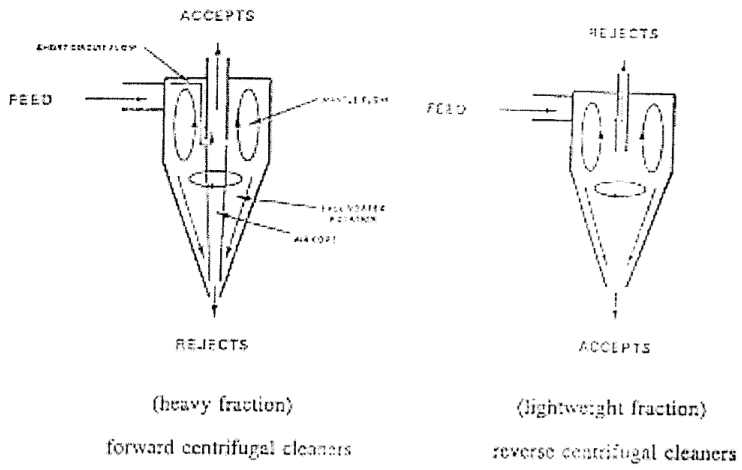
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ทำให้กระดาษกลายเป็นเยื่อกระดาษ โดยการนำเศษกระดาษใส่ลงไปในเครื่องกระจายเยื่อความเข้มข้นสูง (Pulper) ซึ่งเครื่องที่ใช้อาจจะเป็นแบบระบบลูกเดี่ยว (batch system) หรือ ระบบต่อเนื่อง (Continuous system) ก็ได้ แต่ทั่วไปนิยมใช้ระบบลูกเดี่ยวมากกว่า ต่อมาทำการเติมน้ำและสารเคมีลงไปปรับสภาวะให้ได้ตามที่กำหนด โดยทั่วไปใช้สภาวะความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 8-16 อุณหภูมิ 55-70 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-ด่าง 9-11 และเวลาที่ใช้ในการกระจายเยื่อ 15-45 นาที ซึ่งหลังจากเข้าเครื่องกระจายเยื่อ เศษกระดาษจะถูกตีให้กระจายตัวแยกออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยวหรือกลุ่มของเส้นใยและอนุภาคของหมึกพิมพ์จะแขวนลอยอยู่ในน้ำเยื่อ โดยสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนนี้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมซิลิเกต สารคีเลติง (Chelating agent) และสารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

2.3.2 การคัดแยกขนาด (Screening)

เป็นการแยกสิ่งสกปรกหรือเศษวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่โดยใช้ตะแกรงหยาบและละเอียด (Coarse and fine screen) ตะแกรงหยาบใช้สำหรับแยกสิ่งสกปรกขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์หรือเป็นแผ่น รูเปิดจะมีขนาดประมาณ 1.3-2.0 มิลลิเมตร ส่วนตะแกรงละเอียดใช้สำหรับแยกสิ่งสกปรกที่มีรูปร่างแบนยาวคล้ายๆ เส้นผม ความกว้างของรูเปิดมีขนาดประมาณ 0.25–0.46 มิลลิเมตร โดยตะแกรงที่ใช้คัดแยกขนาดในโรงงานส่วนใหญ่จะเป็นตะแกรงอัด (Pressure screen)

2.3.3 การทำความสะอาด (Cleaning)

เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดเล็กประมาณ 100-1000 ไมโครเมตร โดยอาศัยความถ่วงจำเพาะของสิ่งสกปรกที่แตกต่างกัน สำหรับสิ่งสกปรกที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1.0 จะถูกแยกออกโดยเครื่องทำความสะอาดแบบฟอร์เวิร์ด (Forward centrifugal cleaner) ส่วนสิ่งสกปรกที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1.0 จะถูกแยกออกโดยเครื่องทำความสะอาดแบบรีเวิร์ช (Reverse centrifugal cleaner) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องทำความสะอาดแบบฟอร์เวิร์ดและแบบรีเวิร์ช [14]

2.3.4 การลอยหมึกพิมพ์ (Flotation)

เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใย วิธีนี้จะใช้หลักการโดยการให้อากาศเข้าไปแยกอนุภาคของหมึกพิมพ์ออกจากน้ำเยื่อ ซึ่งต้องใช้กลไกทางเคมีและทางเชิงกลร่วมกัน วิธีการนี้ใช้ได้ดีกับการแยกอนุภาคของหมึกพิมพ์ที่มีขนาด 10-100 ไมโครเมตร โดยใส่สารเคมีที่เรียกว่า สารช่วยการรวบรวม (Collector) ในขั้นตอนการตีเยื่อเพื่อทำให้อนุภาคของหมึกพิมพ์อยู่ในสภาพที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic particle) ซึ่งการทำการลอยหมึกพิมพ์นี้จะทำในเครื่องแยกหมึกพิมพ์แบบลอยตัวหรือโฟลเทชั่นเซลล์ (Flotation cell)

2.3.5 การล้างเยื่อ (Washing)

เป็นการแยกอนุภาคของสิ่งสกปรกที่แขวนลอยอยู่กับเส้นใยในน้ำเยื่อให้หลุดลอดผ่านตะแกรงไปกับน้ำโดยอาศัยแรงไฮโดรลิก โดยต้องทำให้อนุภาคหมึกพิมพ์อยู่ในสภาพที่ชอบน้ำก่อน (Hydrophilic particle) โดยใช้สารช่วยในการกระจายตัว (Dispersant) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ช่วยในการแยกหมึกพิมพ์ออกจากเส้นใยและควรเติมสารดังกล่าวลงไปในขั้นตอนการตีเยื่อ

2.3.6 การกระจายหมึก (Dispersion)

เป็นขั้นตอนที่ทำให้ขนาดของอนุภาคสิ่งสกปรก เช่น หมึกพิมพ์ ไข หรือวานิช มีขนาดเล็กลงจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ในขั้นตอนนี้จะใช้ทั้งพลังงานความร้อนและพลังงานกล เพื่อให้อนุภาคของสิ่งสกปรกอ่อนนุ่มและแตกกระจายตัวผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี แต่จะไม่มีการกำจัดอนุภาคสกปรกนี้ทิ้งไป ซึ่งการทำให้สิ่งสกปรกมีขนาดเล็กลงจะเป็นการช่วยลดจำนวนจุดสกปรกที่ปรากฏบนผิวกระดาษลงได้เป็นอย่างมาก โดยการกระจายหมึก

จะทำที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อสูงมากถึงร้อยละ 25-30 เครื่องจักรที่ใช้ในการกระจายหมึกมีชื่อเรียกว่านีดดิ้งแมชชีน (Kneading machine)

2.3.7 การฟอกเยื่อ (Bleaching)

ตารางที่ 1 การใช้สารเคมี สัญลักษณ์ และการเรียกชื่อขั้นตอนการฟอก [13]

สารเคมี	สัญลักษณ์	ชื่อขั้นตอนการฟอก
Chlorine	C	chlorination stage
Sodium hydroxide	E	extraction stage
Calcium hypochlorite	H	hypochlorite stage
Chlorine dioxide	D	chlorinedioxide stage
Hydrogen peroxide	P	peroxide stage
Oxygen	O	oxygen stage
Ozone	Z	ozone stage
Acid	A	acid stage

การฟอกเยื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพทางด้านทัศนศาสตร์ เช่น ความขาวสว่าง ให้กับเยื่อกระดาษ โดยใช้สารเคมีในการฟอก ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรซัลไฟด์ ฟอร์มามิดีนซัลฟินิก แอสิก (Formamidine Sulfinic Acid : FAS) ออกซิเจน คลอรีน แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ คลอรีนไดออกไซด์ เป็นต้น (ตารางที่ 1) โดยระบบการฟอกจะเป็นแบบดั้งเดิมหรือแบบปราศจากคลอรีน (Total chlorine free, TCF) หรือแบบปราศจากธาตุคลอรีน (Elemental chlorine free, ECF) จะขึ้นกับชนิดของกระดาษที่โรงงานต้องการผลิต

2.4 การปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและยางธรรมชาติ

2.4.1 การดัดแปรพื้นผิวของเส้นใย (Fiber treatment)

2.4.1.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical method)

2.4.1.1.1 การทำอัลคาไลน์เซชัน (Alkalization)

ในการทำอัลคาไลน์เซชัน พื้นผิวของเส้นใยจะถูกทำความสะอาดและถูกดัดแปรให้มีการยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ได้ดีขึ้น โดยในการทำอัลคาไลน์เซชัน สารอัลคาไลน์ที่ใช้จะทำลายพันธะไฮโรเจน

ในโครงสร้างโครงข่ายของเส้นใย ทำให้พื้นผิวเส้นใยมีความหยาบมากยิ่งขึ้นส่งผลต่อการยึดเกาะของเส้นใยและยางที่ดีขึ้น

กษมา จารุกาจร และนิธินาถ ศุภกาญจน์ [16] ได้ทำการศึกษาผลของการดัดแปรเส้นใยด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิทยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ ผลการศึกษาพบว่าคอมโพสิตของยางและเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีสมบัติทางกลดีกว่าคอมโพสิตของยางและเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากในการทำอัลคาไลน์เซชันเมื่อเส้นใยถูกดัดแปรด้วยสารละลายด่าง เกิดการขจัดเฮมิเซลลูโลส ขี้ผึ้ง และสารปนเปื้อนที่มีในเส้นใย เป็นผลให้เส้นใยมีพื้นผิวที่ขรุขระ แรงยึดติดของเส้นใยและยางธรรมชาติเชิงกลเพิ่มขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความเค้นบริเวณ Interface ของเส้นใยและเมทริกซ์

Yuanita และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันที่มีต่อความเข้ากันได้ของเส้นใยและเมทริกซ์ในคอมโพสิตเส้นใยเสริมแรงธรรมชาติ โดยทำการอัลคาไลน์เซชันเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6% เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำมาผลิตคอมโพสิตร่วมกับ Polypropylene (PP) ที่อุณหภูมิ ระยะเวลา และเส้นใยที่แตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงทางเคมีบนพื้นผิวของเส้นใยถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy) แสดงให้เห็นว่า % การส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 3100-3600 cm^{-1} เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ บ่งชี้ว่า O-H group ในเส้นใยถูกทำลาย อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบเชิงขั้วของพลังงานพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันสูงกว่าเส้นใยที่ไม่ได้ทำการอัลคาไลน์เซชัน

2.4.1.1.2 การทำไซลาไนเซชัน (Silanization)

มีการใช้ตัวประสานไซเลน (Silane coupling agent) เป็นตัวเชื่อมระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ โดยที่ปลายด้านหนึ่งของตัวเชื่อมไซเลนจะเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยธรรมชาติและปลายอีกด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ ไซเลนยังมีหน้าที่ในการปรับสภาพความชอบน้ำบริเวณรอยต่อเส้นใยและเมทริกซ์

Ismail และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการดัดแปรเส้นใยไผ่ด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนชนิด Bis (triethoxysilyl propyl) tetra sulphide โดยใช้ปริมาณ 3 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วน (3 phr) ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นถึงสมบัติทางสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตจากเส้นใยไผ่ที่ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลนมีช่องว่างที่เกิดจากการหลุดของเส้นใยเมทริกซ์น้อยกว่าคอมโพสิตจากเส้น

ใยไผ่ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรด้วยตัวเชื่อมประสานไซเลน และยังพบว่ามีการติดกันของเส้นใยและเมทริกซ์ นั่นหมายถึงการยึดติดที่ดียิ่งขึ้นระหว่างพื้นผิวของเส้นใยและเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลให้คอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

2.4.1.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical method)

2.4.1.2.1 การดัดแปรด้วยความร้อน (Heat treatment)

เป็นการให้ความร้อนในระดับที่สูงกว่าอุณหภูมิในการอบแห้งแก่เส้นใยธรรมชาติ เพื่อทำให้เส้นใยหดตัวลงและดูดความชื้นได้น้อยลง ความร้อนยังส่งผลให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเส้นใยลดลง และเพิ่มการเกิดผลึกของเส้นใย

ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์ [19] ศึกษาพอลิเมอร์คอมโพสิตของพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ถูกดัดแปรด้วยความร้อนด้วยการอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ผลการวิจัยพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตของพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ถูกดัดแปรด้วยความร้อนมีค่าความทนต่อแรงดึง ค่าความเค้น ณ จุดคราก และค่ามอดูลัสของยังก์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่นก่อนขาดและค่าความทนต่อแรงกระแทกมีค่าน้อยลง โดยการดัดแปรด้วยความร้อนมีข้อดีที่ขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนและไม่ต้องใช้สารเคมี

2.4.1.2.2 การดัดแปรโดยใช้โคโรนา (Corona treatment)

เป็นการดัดแปรทางกลในอุณหภูมิต่ำลง ปรับปรุงสมบัติความชอบน้ำบนพื้นผิวของเส้นใยที่มีกลุ่มฟังก์ชันมีขั้วโดยใช้พลังโคโรนาเพิ่มพลังงานพื้นผิวอิสระ มีหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น

2.4.1.2.3 การดัดแปรเมทริกซ์ (Matrix modification)

การดัดแปรยางธรรมชาติให้เป็นยางอิพ็อกซิไดซ์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยการเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นกับปริมาณของโมเลกุลที่ถูกดัดแปร การดัดแปรนี้จะไปเพิ่มความเป็นขั้วของยาง ยางอิพ็อกซิไดซ์จึงเข้ากับเส้นใยธรรมชาติได้ดีกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

2.4.1.2.4 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (Addition of compatibilizer)

คอมโพสิตที่ไม่เข้ากันสามารถเพิ่มความเข้ากันด้วยการใส่สารช่วยให้เข้ากัน โดยสารช่วยให้เข้ากันจะเข้าไปอยู่บริเวณอินเทอร์เฟส (Interface) ระหว่างการผสม และช่วยลดแรงตึงผิว ทำให้คอมโพสิตมีสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

2.5 การวัลคาไนซ์

เป็นกระบวนการใช้สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) เพื่อเปลี่ยนสภาพจากยางที่อยู่ในสภาวะไม่คงตัวให้อยู่ในสภาวะที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะแข็งตึง (Stiffness) หรือยืดหยุ่น (Elastic) สารวัลคาไนซ์จะทำให้โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงที่จุดว่องไวต่อปฏิกิริยา การวัลคาไนซ์สามารถแยกประเภทตามสารเคมีที่ใช้ได้เป็น 3 ระบบใหญ่ ๆ

2.5.1 ระบบกำมะถัน (Sulfur)

เป็นระบบที่เป็นที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากการเกิดวัลคาไนซ์ใช้เวลาไม่มาก ต้นทุนต่ำ โดยพันธะเชื่อมโยงแต่ละพันธะจะมีอะตอมของกำมะถันอยู่หลายอะตอม (Polysulphidic crosslink) ทำให้ได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเชิงพลวัตและสมบัติทางกลดี และยังมีสมบัติต้านทานการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำได้ดีมาก ข้อเสียคือ การต้านทานการถดถอยของสมบัติหลังได้รับความร้อนไม่ดี สมบัติการต้านทานความเสื่อม การจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัด และความทนทานต่อความร้อนยังต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ได้จากระบบอื่น ๆ

2.5.2 ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)

เป็นระบบที่ไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากเดิมทีใช้ Benzoyl peroxide เป็นสารวัลคาไนซ์ แต่ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทางกลต่ำกว่าระบบกำมะถัน จนต่อมาเกิดการค้นพบ Di-t-butyl peroxide เมื่อนำมาใช้แทนแล้วได้ยางวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติดีขึ้น แต่สารชนิดนี้ระเหยเป็นไอทำให้ในการผสมต้องระวังเป็นพิเศษ ต่อมาจึงได้นำ dicumyl peroxide ซึ่งระเหยเป็นไอได้ต่ำมาใช้แทน และสามารถทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงได้ดี ระบบนี้จะให้ยางวัลคาไนซ์ที่ความโปร่งใสสูง เกิดการตกสีต่ำ แต่มีสมบัติทางกลส่วนใหญ่ต่ำกว่าระบบกำมะถัน

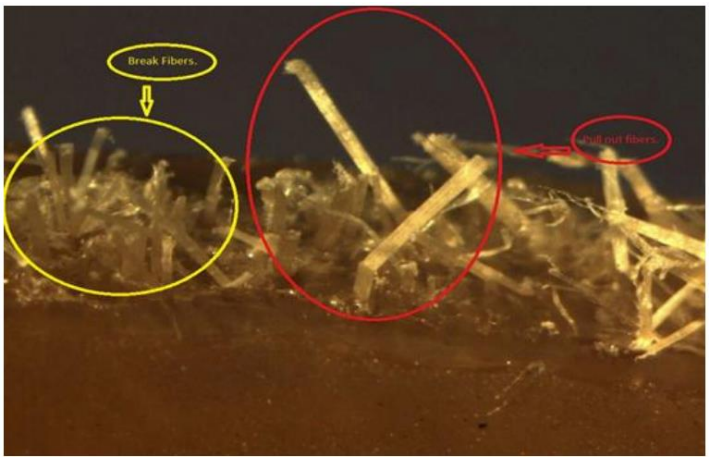
2.5.3 ระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

ระบบที่มีการใช้สารเคมีอื่น ๆ เป็นสารวัลคาไนซ์ เช่น โลหะออกไซด์ เรซิน เป็นต้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zulfadli และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาการเสริมแรงด้วยเส้นใยปอแก้วในคอมโพสิตยางธรรมชาติเพื่อการติดตั้งยางรองแท่นเครื่องยนต์ในยานยนต์ การเลือกใช้ยางธรรมชาติมาใช้ในการทำยางรองแท่นเครื่องยนต์ในยานยนต์ก็เพื่อลดการส่งผ่านการสั่นแบบไดนามิก เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการล้าที่โดดเด่น ความยืดหยุ่นสูง ความไวต่อผลกระทบความเครียดต่ำ ทนต่อความคืบหรือการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำได้ดี แต่ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง การสั่นสะเทือนของ

เครื่องยนต์ทำให้ยางเกิดการแข็งตัวและแตก จึงทดลองใส่เส้นใยปอแก้วเข้ากับยางธรรมชาติเพื่อเสริมแรงในสัดส่วนต่าง ๆ ได้แก่ 2 : 98, 4 : 96, 6 : 94 และยางธรรมชาติทั้งหมดคือ 0 : 100 โดยเส้นใยปอแก้วในการทดลองถูกบำบัดทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นที่แน่นอน จากการศึกษาพบว่าการผสมเส้นใยปอแก้ว 4% จะได้ความเค้นแรงดึง (Tensile stress) และค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงที่สุด เนื่องจากมีเส้นใยยึดติดกันมากและเพิ่มพันธะระหว่างปอแก้วและยางธรรมชาติ ส่วนการผสมเส้นใยปอแก้ว 6% (ดังแสดงในภาพที่ 2) พบว่า ความเค้นแรงดึงจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีปริมาณ Kenaf core fiber (KCF) มากเกินไปทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเมทริกซ์ เมื่อเติมเส้นใยเข้าไปเพิ่มจะทำให้คอมโพสิตยางที่ได้มีความเปราะ



ภาพที่ 2 ภาพสแกนคอมโพสิทยางที่ผสมกับเส้นใยปอแก้ว 6% [20]

จากผลการทดลองทั้งหมดจะเห็นได้ว่าการเติมเส้นใยปอแก้วช่วยเพิ่มค่าความทนต่อแรงดึงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติม ในขณะที่การผสมเส้นใยปอแก้ว 2% จะมีความเครียดตามแนวดึง (Tesile strain) สูงที่สุด และมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมเส้นใยปอแก้วค่อนข้างมาก นั่นแสดงว่าการผสมเส้นใยปอแก้ว 2% สามารถถูกดึงได้มากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมค่อนข้างมาก เส้นใยปอแก้วเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยางธรรมชาติและทำให้เกิดการแตกได้ยากขึ้นเมื่อถูกดึง ในส่วนของค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus) ซึ่งได้จากการคำนวณและกราฟพบว่ายางธรรมชาติมีค่าสูงกว่าคอมโพสิตยางที่ผสมเส้นใยปอแก้ว 2% นั่นหมายถึงยางธรรมชาติมีความแข็งมากกว่า และคอมโพสิตยางที่ผสมเส้นใยปอแก้ว 4% มีค่ามอดูลัสสภาพยืดหยุ่นสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมเส้นใยปอแก้ว และคอมโพสิตยางที่ผสมเส้นใยปอแก้ว 2 นั่นหมายถึงคอมโพสิตยางที่ผสมเส้นใยปอแก้ว 4% มีความแข็งมากกว่า ดังนั้นคอมโพสิตยางที่ผสมเส้นใยปอแก้วกับยางธรรมชาติในอัตราส่วน 4 :

96 จึงเหมาะสมกับการใช้เป็นยางรองแท่นเครื่องยนต์ เนื่องจากมีความแข็งมากกว่า จึงช่วยลดการเสียรูปเมื่อถูกแรงและการสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมเส้นใยปอแก้วช่วยเพิ่มค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum load) โดยการผสมเส้นใยปอแก้ว 4% มีค่าสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความทนต่อแรงดึง สุดท้ายการวิเคราะห์ด้วย Optical microscopic scanning โดยสังเกตเส้นใยบริเวณที่เกิดการแตก เห็นได้ว่าเส้นใยจะถูกดึงออกมาและแตกหัก จึงสามารถสรุปได้ว่าเส้นใยและยางธรรมชาติเกินพันธะกันจริง ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยได้ดูดซึมน้ำยาง ซึ่งเส้นใยปอแก้วมีการดูดซึมน้ำสูงจึงดูดซึมน้ำยางได้ดี เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ และจากภาพสแกนยังแสดงให้เห็นช่องอากาศระหว่างเส้นใยกับยางธรรมชาติซึ่งเกิดจากเส้นใยอัดกันแน่นทำให้น้ำยางไม่สามารถเข้าไปเติมเต็มพื้นที่เล็ก ๆ ระหว่างเส้นใยได้

กษมา จารุกาจร และนิธินาถ ศุภกาญจน์ [16] ได้ทำการศึกษาการเตรียมคอมโพสิตจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ โดยศึกษาผลของปริมาณเส้นใย ได้แก่ 10, 20 และ 30 ส่วนในยางธรรมชาติ 100 ส่วน (10, 20 และ 30 phr) ผลของการดัดแปรเส้นใยด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน ผลของสารช่วยให้เข้ากัน (Addition of compatibilizer) ได้แก่ ยางธรรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และผลของการใช้เส้นใย 2 ชนิด (Hybrid fibers) ได้แก่ เส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้ว ที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติการคงรูปของคอมโพสิทยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การดัดแปรเส้นใยด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันมีผลต่อสมบัติทางกลดังนี้ คอมโพสิตยางและเส้นใยทั้งที่ก่อนและหลังผ่านการดัดแปร เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดูลัส 100% และค่ามอดูลัส 300% สูงขึ้น เนื่องจากความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง ทำให้คอมโพสิตแข็ง (Rigid) ขึ้น ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อมีการผสมเส้นใย เป็นผลมาจากการที่เส้นใยไปรบกวนการเหนี่ยวนำให้ยางเกิดผลึกจากการดึงยืด (Strain induced crystallization) เมื่อผลึกเกิดน้อยลงเป็นเหตุให้ความทนทานต่อแรงดึงของคอมโพสิตต่ำกว่ายางธรรมชาติ และการเพิ่มปริมาณเส้นใยก็ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลงเช่นกัน เป็นผลมาจากการเกาะกลุ่มของเส้นใยขัดขวางการถ่ายเทความเค้น (Stress transfer) และรบกวนความสม่ำเสมอของเฟสเมทริกซ์ และการเพิ่มปริมาณเส้นใยยังทำให้ค่าการยืดตัวก่อนขาดมีแนวโน้มลดลง เพราะการเพิ่มปริมาณเส้นใยจะได้คอมโพสิตที่แข็งขึ้น แรงต้านทานต่อการยืดตัวลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่าคอมโพสิตของยางและเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่ามอดูลัส 100% และค่ามอดูลัส 300% สูงกว่าการใส่เส้นใยที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากการทำอัลคาไลน์เซชันได้ขจัดเฮมิเซลลูโลสขี้ผึ้ง และสารปนเปื้อนที่มีในเส้นใย เป็นผลให้เส้นใยมีพื้นผิวที่ขรุขระ แรงยึดติดของเส้นใยและยางธรรมชาติเชิงกลเพิ่มขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความเค้นบริเวณ interface ของเส้นใยและเมทริกซ์ ในส่วนของสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ค่านี้เพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยขวางแนวการฉีกขาด โดยการผสมเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าการผสมเส้นใยที่ไม่ผ่านการ

ดัดแปร ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของแรงยึดติดระหว่างเส้นใยและยางธรรมชาติ ในส่วนของสมบัติด้านความแข็ง การเพิ่มปริมาณเส้นใยจะทำให้คอมโพสิตมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยการผสมเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันจะมีความแข็งสูงกว่าการผสมเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปร ในส่วนของสมบัติการคงรูปพบว่าคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยก่อนและหลังการทำอัลคาไลน์เซชันไม่ได้ส่งผลต่อเวลาการสกอร์ชและเวลาการคงรูปมากนัก

จากการศึกษาการใส่สารช่วยให้เข้ากัน (Addition of compatibilizer) ได้แก่ ยางธรรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่า ในสมบัติทางกลการใส่สารช่วยให้เข้ากันช่วยเพิ่มค่ามอดูลัส 100% และค่ามอดูลัส 300% ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวก่อนขาด ซึ่งเป็นผลมาจากการเข้ากันได้ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และพันธะไฮโรเจนที่เกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใย รวมถึงส่วนมีขั้วในยางธรรมชาติ ทำให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์โดยยางธรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ดีขึ้น ที่สำคัญยางธรรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ลดแรงดึงบริเวณผิวและเพิ่มแรงยึดติดบริเวณพื้นผิว จึงเพิ่มความทนทานต่อแรงดึง และด้วยเหตุผลข้างต้นยังทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดและความแข็งของคอมโพสิตยางที่มีการเติมยางธรรรมชาติกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังเพิ่มสมบัติการคงรูปโดยมีเวลาสกอร์ชและเวลาการคงรูปสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากัน อันเป็นผลมาจากความเป็นกรดของกรดมาเลอิกและปฏิกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำอัลคาไลน์เซชันพบว่าการใส่สารช่วยให้เข้ากันช่วยเพิ่มสมบัติทางกลและสมบติการคงรูปที่ดีกว่า

จากการศึกษาผลของการใช้เส้นใย 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยป่านศรนารายณ์และเส้นใยปอแก้ว พบว่าการผสมเส้นใยปอแก้วลงไปเพิ่มอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อค่าค่ามอดูลัส 100% และค่ามอดูลัส 300% และค่าการยืดตัวก่อนขาด แต่มีผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและความแข็งสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติความทนทานต่อแรงดึงและความแข็งของเส้นใยปอแก้วที่สูงกว่าเส้นใยป่านศรนารายณ์ และยังเพิ่มความทนทานต่อการฉีกขาดของคอมโพสิตที่ได้ ในส่วนของสมบัติการคงรูปนั้นพบว่า การผสมเส้นใยปอแก้วไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเวลาสกอร์ชและเวลาการคงรูป

Sunardi และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาลักษณะทั่วไปของยางคอมโพสิตและการนำยางคอมโพสิตไปประยุกต์ใช้งาน โดยจากการศึกษาพบว่าจุดอ่อนหลักของการใช้เส้นใยธรรมชาติคือความชื้น เนื่องจากเส้นใยธรรมชาตินั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งทำให้เส้นใยมีความชอบน้ำ แล้วเมื่อนำมาทำยางคอมโพสิตอาจจะทำให้เกิดปัญหาระหว่างการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยที่ชอบน้ำและพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลและทางกายภาพที่อ่อนแอ และเมื่อมาดูการศึกษาการปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไล (NaOH) โดยใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 15% และ 20%) ในยางคอมโพสิตจากกล้วยและอีพ็อกซี่

จะเห็นว่ายางคอมโพสิตที่ได้รับการปรับสภาพผิวด้วย 1% NaOH จะมีสมบัติที่ดีกว่า เมื่อนำไปเทียบกับยางคอมโพสิตทั้งที่ได้ทำการปรับสภาพผิวและที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพผิว ในการศึกษาเรื่องการติดไฟ จะเห็นว่าการที่มีเซลลูโลสสูง จะมีโอกาสในการติดไฟได้มาก ดังนั้นการเคลือบสารหน่วงการติดไฟจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติการทนไฟ โดยสารหน่วงการติดไฟทั้งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) นั้นช่วยลดการติดไฟได้ แต่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นช่วยลดการติดไฟได้มากกว่า เมื่อได้ยางคอมโพสิตแล้ว ยางคอมโพสิตจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง ดังแสดงในตารางที่ 2 ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมรถยนต์ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ กีฬา การบินและอวกาศ เป็นต้น ซึ่งเหตุผลที่มีการนำมาใช้กันมากมายเป็นเพราะว่า ยางคอมโพสิตมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงสูง ต้นทุนการผลิตค่อนข้างต่ำและทนต่อการกัดกร่อนได้ดี

ตารางที่ 2 การประยุกต์ใช้งานยางคอมโพสิตผสมเส้นใยธรรมชาติในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [21]

Fiber	Application in building, construction, and others
Hemp fiber	Construction products, textiles, cordage, geotextiles, paper & packaging, furniture, electrical, manufacture bank notes, and manufacture of pipes
Oil palm fiber	Building materials such as windows, door frames, structural insulated panel building systems, siding, fencing, roofing, decking, and other building materials [14]
Wood fiber	Window frame, panels, door shutters, decking, railing systems, and fencing
Flax fiber	Window frame, panels, decking, railing systems, fencing, tennis racket, bicycle frame, fork, seat post, snowboarding, and laptop cases
Rice husk fiber	Building materials such as building panels, bricks, window frame, panels, decking, railing systems, and fencing
Bagasse fiber	Window frame, panels, decking, railing systems, and fencing
Sisal fiber	In construction industry such as panels, doors, shutting plate, and roofing sheets; also, manufacturing of paper and pulp
Stalk fiber	Building panel, furniture panels, bricks, and constructing drains and pipelines
Kenaf fiber	Packing material, mobile cases, bags, insulations, clothing-grade cloth, soilless potting mixes, animal bedding, and material that absorbs oil and liquids
Cotton fiber	Furniture industry, textile and yarn, goods, and cordage
Coir fibers	Building panels, flush door shutters, roofing sheets, storage tank, packing material, helmets and postboxes, mirror casing, paper weights, projector cover, voltage stabilizer cover, a filling material for the seat upholstery, brushes and brooms, ropes and yarns for nets, bags, and mats, as well as padding for mattresses, seat cushions
Ramie fiber	Use in products as industrial sewing thread, packing materials, fishing nets, and filter cloths. It is also made into fabrics for household furnishings (upholstery, canvas) and clothing, paper manufacture.
Jute fiber	Building panels, roofing sheets, door frames, door shutters, transport, packaging, geotextiles, and chip boards.

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ ยี่ห้อ PHILIPS รุ่น 600W 2L
2. เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill)
3. เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (Fiber quality analyzer, FQA)
4. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
5. เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)
6. เครื่องอัดยางและพลาสติก (Compression molding machine)
7. เครื่องตัดชิ้นงานทดสอบระบบไฮโดรลิกพร้อมชุดใบมีดตัดชิ้นงานทดสอบ (Hydraulic cutting machine)
8. เครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Electromechanical universal testing machine)
9. เครื่องทดสอบการคงรูปยาง (Moving die rheometer, MDR)
10. เครื่องวัดความชื้น (Moisture determination balance) ยี่ห้อ Kett รุ่น FD-600
11. ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ MMM รุ่น Venticell III R
12. เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน (Hotplate magnetic stirrers)
13. ตะแกรง 50 เมช
14. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล
15. ปั๊มลมสุญญากาศ (Vacuum pumps and compressor)
16. เครื่องวัดความหนาของยาง (Rubber thickness gauge)
17. แม่พิมพ์กระจกขึ้นแผ่นยาง
18. พาราฟิล์ม เอ็ม (Bemis® Parafilm M)
19. ขวดรูปชมพู่
20. บีกเกอร์
21. แท่งแก้วคน
22. ช้อน
23. กรรไกร

24. ถังน้ำพลาสติก
25. กระดาษกรอง (Filter paper)
26. ถุงซิปล็อค

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

1. ถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์
2. น้ำยางธรรมชาติ 60%
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide หรือ ZnO)
4. กรดสเตียริก (Stearic Acid)
5. สารตัวเร่ง 2,2 Dibenzthiazyl disulphide (MBTS)
6. เททระเบนซิลไทยูแรม ไดซัลไฟด์ (Tetrabenzylthiuram disulfide หรือ TBzTD)
7. กำมะถัน (Sulfur)
8. วิงสเตย์ แอล (Wing Stay L)

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์

นำถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ มาตัดให้ได้ขนาดประมาณ 1 x 1 เซนติเมตร แล้วนำกระดาษที่ตัดแล้วไปแช่น้ำทิ้งไว้ หลังจากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้เบอร์ 3 จำนวน 2 รอบ และเบอร์ 5 จำนวน 43 รอบ รอบละ 30 วินาที ต่อมานำไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง ทำซ้ำ 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ไม่ต้องกรองผ่านตะแกรง ส่วนชุดที่ 2 กรองผ่านตะแกรง 50 เมช แล้วหาความเข้มข้นเยื่อเพื่อนำไปคำนวณปริมาณในการผสมยางเพื่อขึ้นแผ่น จากนั้นนำเส้นใยทั้ง 2 ชุด ไปศึกษาลักษณะเส้นใยด้วยเครื่องมือวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (FQA)

3.3.2 การขึ้นแผ่นยางจากน้ำยางธรรมชาติ

เตรียมน้ำยางสำหรับขึ้นแผ่นยาง 3 ชุด ดังนี้

ชุดที่ 1 น้ำยางธรรมชาติ 500 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำเยื่อที่ไม่ได้กรองผ่านตะแกรง

ชุดที่ 2 น้ำยางธรรมชาติ 500 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำเยื่อที่กรองผ่านตะแกรง 50 เมช

ชุดที่ 3 น้ำยางธรรมชาติ 500 มิลลิลิตร

โดยในการเตรียมน้ำยางที่มีการผสมกับน้ำเยื่อ ให้นำน้ำยางธรรมชาติไปตั้งบนเครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็ก จากนั้นใส่น้ำเยื่อผสมลงไปทีละน้อยจนหมด โดยปริมาณน้ำเยื่อที่ใช้เท่ากับ 1 phr (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3) จากนั้นตั้งทิ้งไว้บนเครื่องกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็ก 1 ชั่วโมง คนให้ทั่ว แล้วเทลงในแม่พิมพ์ขึ้นแผ่นยางปริมาตรแผ่นละ 100 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง

3.3.3. การเตรียมยางธรรมชาติคอมโพสิตที่เติมเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์

3.3.3.1 การผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)

ตั้งอัตราการหมุนลูกกลิ้ง 50 รอบต่อนาที ตั้งอุณหภูมิลูกกลิ้งที่ 50 องศาเซลเซียส นำแผ่นยางใส่ลงไปในเครื่อง บดผสมเป็นเวลา 3 นาที แล้วทำการใส่ซิงค์ออกไซด์ลงไป ต่อมาใส่กรดสเตียริกในนาทีที่ 4 และใส่วิงสเตย์ แอลในนาทีที่ 5 ซึ่งปริมาณสารแต่ละชนิดที่ใส่นั้นปรากฏอยู่ในตารางที่ 3 หลังจากนั้นให้เครื่องทำการผสมต่อไปจนครบ 7 นาที นำยางออกมาจากเครื่องผสม ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้เย็นลง แล้วจึงไปผสมต่อด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง

3.3.3.2 การผสมด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

นำยางที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด มาบดด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 5 นาที โดยระหว่างการบดใส่ตัวเร่ง MTBs และเททระเบนซิลไทยูแรม ไดซัลไฟด์ ตามด้วยกำมะถัน โดยปริมาณสารแต่ละชนิดที่ใส่นั้นปรากฏอยู่ในตารางที่ 3 บดจนสารทั้งหมดเข้ากัน เมื่อครบ 5 นาที ให้ยางผ่านลูกกลิ้งอีก 10 ครั้ง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลง

ตารางที่ 3 สูตรยางของยางธรรมชาติไม่เติมเส้นใย กับ ยางธรรมชาติเติมเส้นใย

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	
	ยางธรรมชาติไม่เติมเส้นใย	ยางธรรมชาติเติมเส้นใย
ยางธรรมชาติ	100.0	100.0
เส้นใย	0.0	1.0
ZnO	5.0	5.0
Stearic Acid	2.0	2.0
MBTs	1.5	1.5
TBzTD	0.8	0.8
Sulfur	2.0	2.0
Wing Stay L	1.5	1.5
รวม	112.8	113.8

phr = part per hundred rubber

3.3.3.3 การอัดเบ้าชิ้นงานด้วยเครื่องอัดยางและพลาสติก (Compression molding machine)

ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่องทดสอบการคงรูปยาง (MDR) ที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส แล้ววัลคาไนซ์ยางด้วยเครื่องอัดยางและพลาสติกที่อุณหภูมิ 155 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาที่ได้จากการทดสอบหาเวลาคงที่ยางที่ 95 (T_{c95})

3.3.4. การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ตัดตัวอย่างชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดังนี้

3.3.4.1 ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37-1994(E) ด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ โดยใช้ความเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และหาค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ 5 ตัวอย่าง

3.3.4.2 ทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear Strength)

ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 34 (Angle test piece) ด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ เพื่อทดสอบหาค่าความต้านทานแรงฉีกขาด และหาค่าเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ 3 ตัวอย่าง

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 เป็นการเตรียมและการวิเคราะห์เส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ ตอนที่ 2 เป็นผลของการนำเส้นใยที่เตรียมได้ไปใช้ในการเสริมแรงในคอมโพสิตยางธรรมชาติ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1. ตอนที่ 1 ผลการทดลองและการอภิปรายผลเกี่ยวกับเส้นใยที่เตรียมได้

สำหรับการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ สามารถแบ่งเส้นใยที่เตรียมได้ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เส้นใยที่ไม่ผ่านการกรอง และเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช โดยมีผลการวิเคราะห์เส้นใย ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์เส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช

ประเภทของเส้นใยที่เตรียมได้	Weight weighted average fiber length (LWW) (mm)	Fines percent (<75 μm) (%)	Mean curl	Kink index	Fiber width (μm)
เส้นใยที่ไม่ผ่านการกรอง	0.489	76.852	0.233	2.334	22.2
เส้นใยที่ผ่านการกรอง	0.497	69.071	0.166	1.908	24.4

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยเครื่องวิเคราะห์สภาพเส้นใย (Fiber Quality Analyzer หรือ FQA) พบว่าเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช เส้นใยจะมีความโค้งงอ (Mean curl) และดัชนีการหักงอ (Kink index) น้อยกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการกรอง เส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองมีค่าความยาวของเส้นใย (Weight weighted average fiber length, LWW) ต่ำกว่าเส้นใยที่ผ่านการกรอง สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการที่เส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองจะยังมีเส้นใยและอนุภาคที่ขนาดเล็กว่า 75 ไมครอน (Fines percent) ปนอยู่มาก ส่งผลให้เมื่อนำความยาวของเส้นใยและอนุภาคที่เล็กกว่า 75 ไมครอนมาคิดค่าเฉลี่ยรวมกับเส้นใยขนาดอื่นๆที่

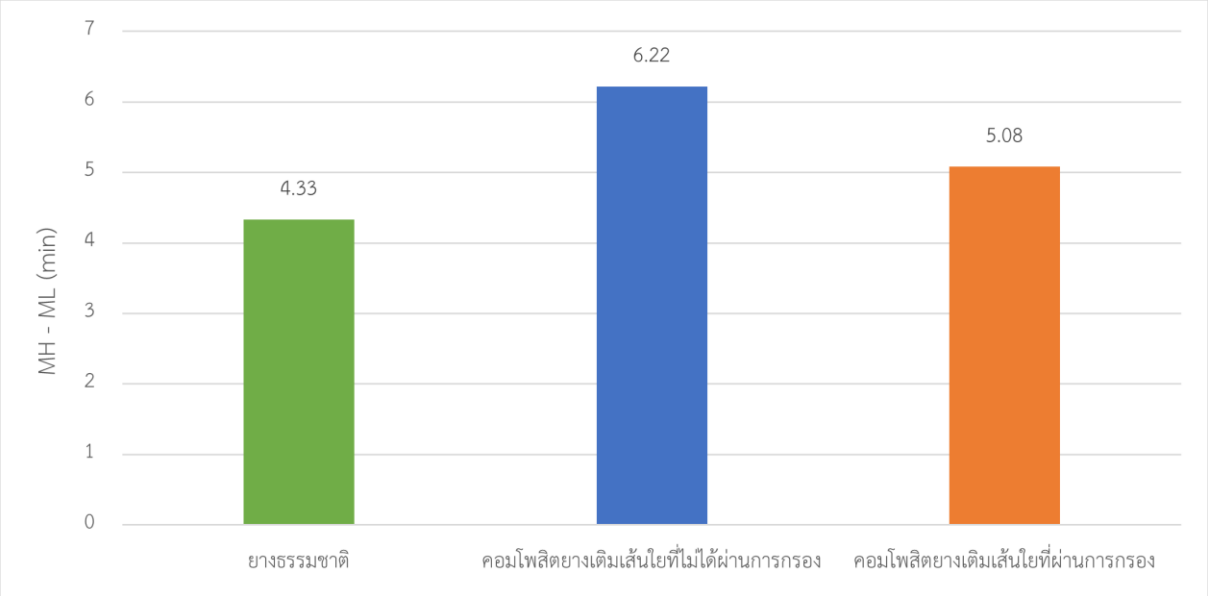
กระจายตัวในน้ำเยื่อจึงได้ค่าเฉลี่ยที่มีค่าต่ำกว่าเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยที่ผ่านการกรองยังมีค่าความกว้างของเส้นใย (Fiber width) สูงกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการกรอง ทั้งนี้อาจเป็นเหตุผลเดียวกับในกรณีของความยาวของเส้นใย กล่าวคือ เส้นใยที่ไม่ผ่านการกรองมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ๆ สูงกว่า ดังนั้นจึงดึงค่าเฉลี่ยของความกว้างของเส้นใยให้ต่ำลงมา

4.2. ตอนที่ 2 สมบัติของยางธรรมชาติที่มีการเติมเส้นใย

4.2.1 ผลของการเติมเส้นใยต่อสมบัติการคงรูปของยาง

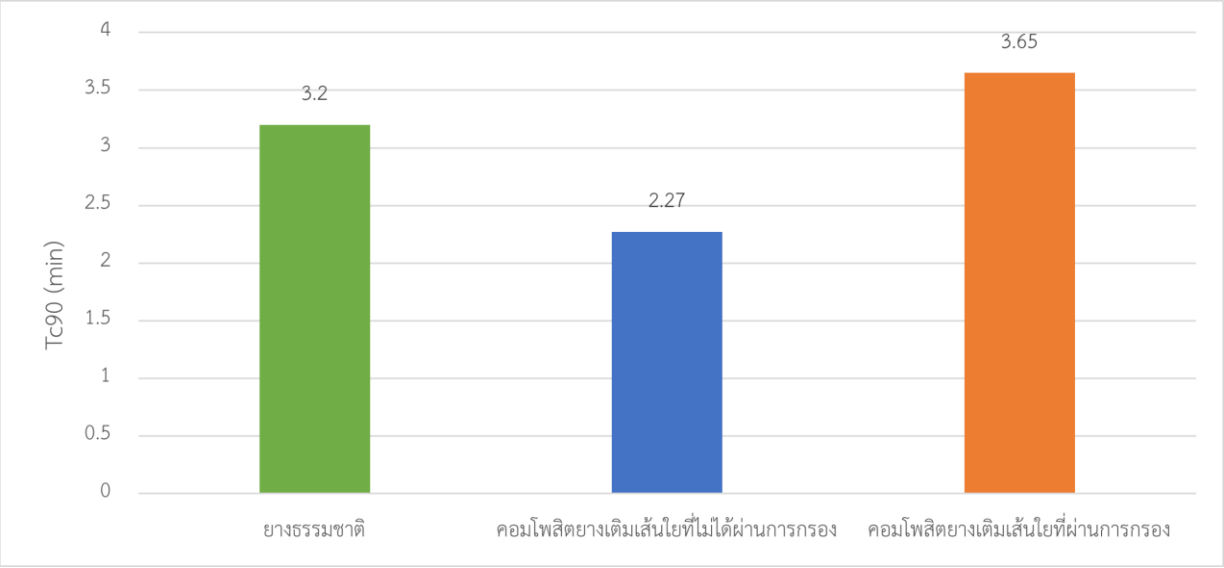
ตารางที่ 5 ค่าจากการทดสอบการคงรูปยางของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมเส้นใย

ตัวอย่าง	ML (min)	MH (min)	MH-ML (min)	Ts2 (min)	Tc90 (min)
ยางธรรมชาติ	2.89	7.22	4.33	0.98	3.2
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง	1.37	7.58	6.22	0.82	2.27
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง	2.54	7.62	5.08	1.02	3.65

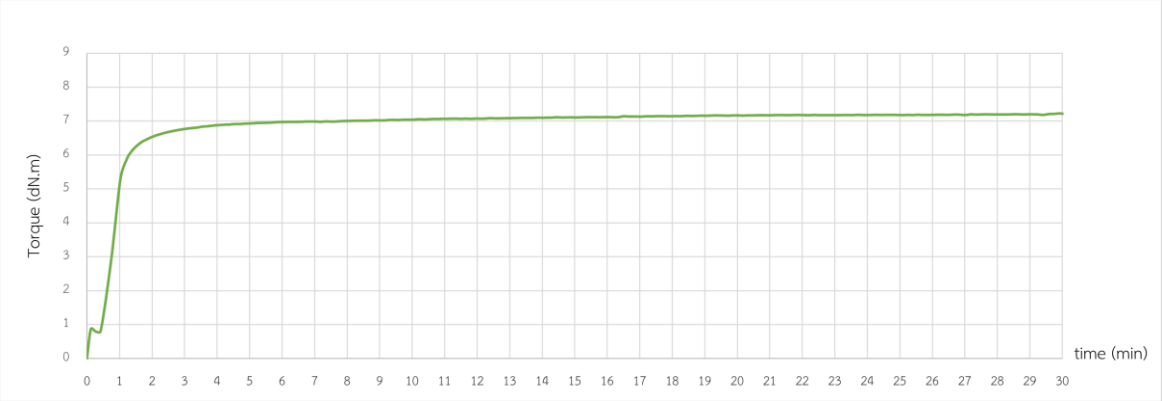


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า MH-ML ระหว่างยางธรรมชาติ เทียบกับคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองและคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง

จากผลการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช เทียบกับยางที่ไม่ได้เติมเส้นใย (ดังแสดงในตารางที่ 5 และในภาพที่ 3 ถึง ภาพที่ 7) พบว่า เมื่อพิจารณาผลต่างของค่าทอร์คสูงสุดและค่าทอร์คต่ำสุด (Torque Difference หรือ ΔT) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงความต้านทานของยางต่อแรงบิด พบว่าคอมโพสิตยางเติมเส้นใยทั้งที่ผ่านการกรองและไม่ได้ผ่านการกรองมีค่าผลต่างของค่าทอร์คสูงสุดและค่าทอร์คต่ำสุดมากกว่ายางที่ไม่มีการเติมเส้นใย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยมีผลทำให้ยางมีความคงรูปที่ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของเส้นใยที่ผ่านการกรองและไม่ได้ผ่านการกรองต่อผลต่างของค่าทอร์คสูงสุดและค่าทอร์คต่ำสุด พบว่าคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองมีค่าสูงที่สุด โดยมีค่าอยู่ที่ 6.22 dN.m โดยมีสาเหตุมาจากเส้นใยที่ไม่ได้กรองจะมีเส้นใยขนาดใหญ่หลงเหลืออยู่เมื่อนำไปเติมในยาง เส้นใยที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้จะทำให้ยางเคลื่อนที่ได้ยาก ดังนั้นผลต่างของค่าทอร์คสูงสุดและค่าทอร์คต่ำสุดจึงมีค่าสูงที่สุด

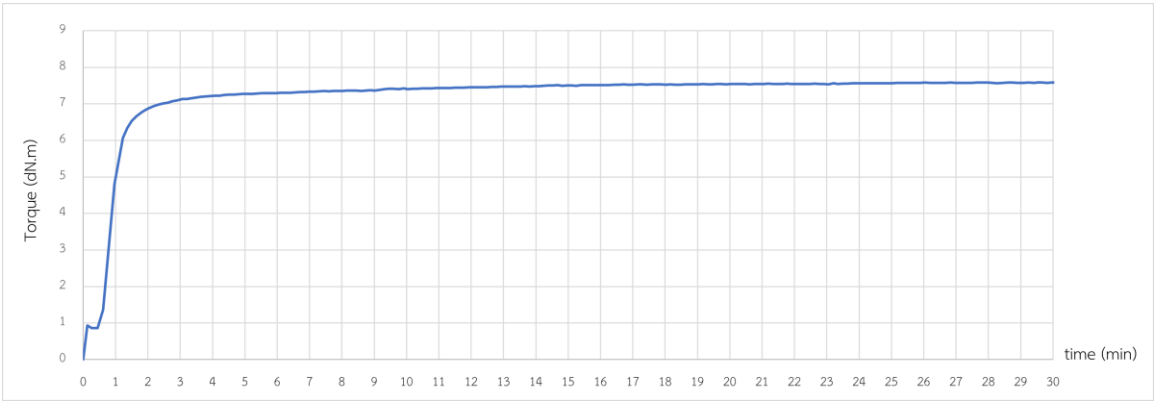


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า Tc90 ระหว่างยางธรรมชาติ เทียบกับคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองและคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง

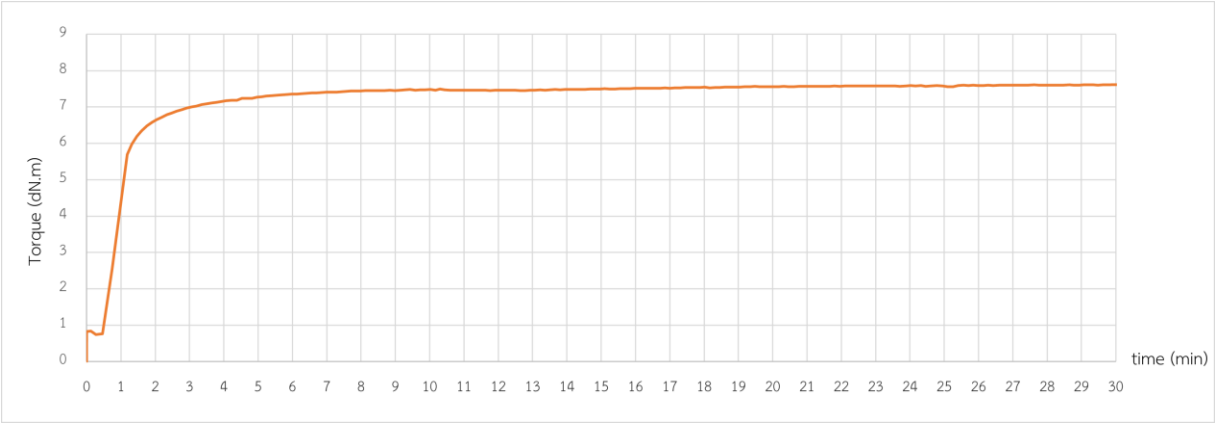


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque กับเวลา ของยางธรรมชาติ

และเมื่อพิจารณาเวลาในการคงรูป โดยทั่วไปเมื่อเติมเส้นใยลงไปในยาง จะทำให้ค่า Ts2 และ Tc90 มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยจะไปขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (crosslink) ของยางธรรมชาติ แต่จากการทดลองพบว่าคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง จะมีค่า Ts2 และค่า Tc90 ต่ำที่สุด หมายความว่าคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง มีความสามารถในการคงรูปได้เร็ว โดยผลข้างต้นอาจมีสาเหตุมาจากเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง จะมีพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบผิวกระดาษตกค้างอยู่ที่เส้นใยมากกว่าเส้นใยที่ผ่านการกรอง โดยพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบผิวกระดาษในที่นี้คือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate: PBS) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับกรดสเตียริก (Stearic acid) โดยกรดสเตียริกเป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น ดังนั้นการที่พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตมีโครงสร้างคล้ายกับกรดสเตียริกอาจเป็นการช่วยกระตุ้นให้การคงรูปยางด้วยกำมะถันเกิดได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque กับเวลา ของคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง



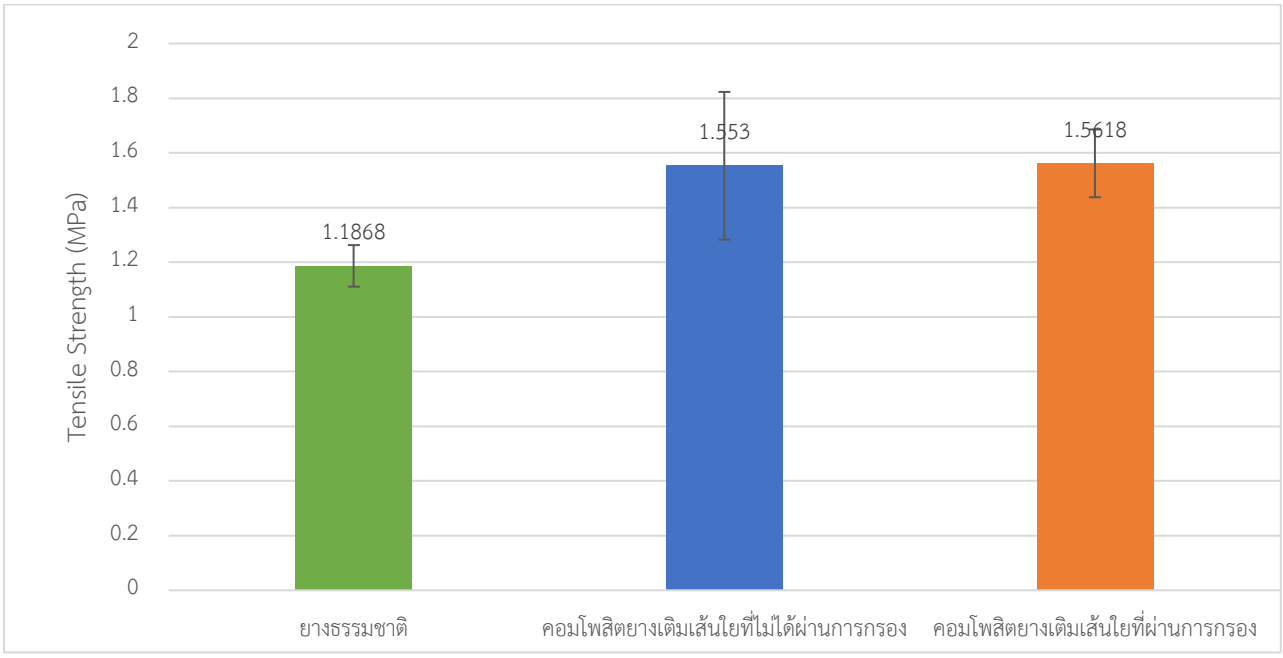
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Torque กับเวลา ของคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง

4.2.2 ผลของการเติมเส้นใยต่อสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) ของยาง

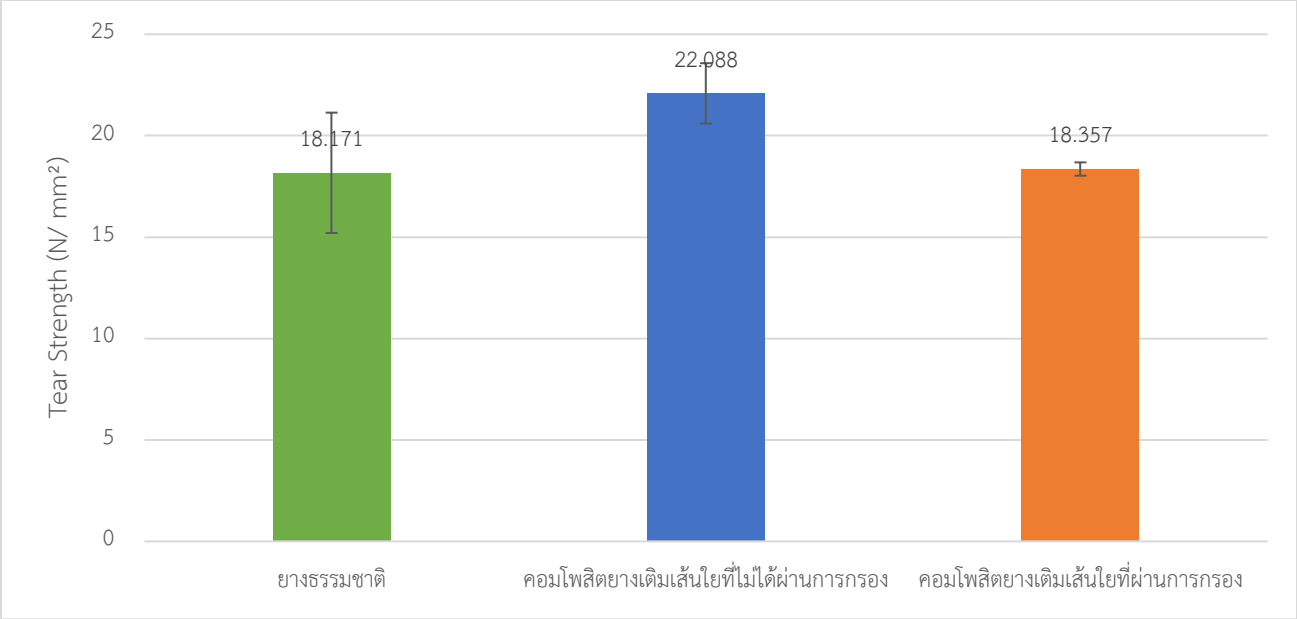
จากผลการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 6 และภาพที่ 8 ถึง ภาพที่ 9 จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงของคอมโพสิตยางเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมเส้นใย โดยเมื่อเทียบกับยางที่ไม่ได้เติมเส้นใย พบว่าคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เพิ่มขึ้น 30.8 % และมีค่าความต้านทานแรงฉีก (Tear strength) เพิ่มขึ้น 21.6 % ในขณะเดียวกันคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช มีค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น 31.6% และมีค่าความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น 1.0 % ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเส้นใยตัวเติมไปขวางแนวการฉีกขาดที่เกิดบนชิ้นงาน ทำให้การขยายของรอยแยกเกิดยากขึ้น กล่าวคือ ช่วยในการยับยั้งรอยขาดที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน โดยเฉพาะการเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองซึ่งจะมีเส้นใยที่ความยาวต่างกันปะปนกันอยู่ เส้นใยที่ยาวกว่าจะช่วยยับยั้งการขยายของรอยแยกได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการยืดตัว (Elongation) ของคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรองมีค่าต่ำกว่าคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองและยางที่ไม่ได้เติมเส้นใย สัมพันธ์กับสมบัติการคงรูปตามที่ได้กล่าวข้างต้น กล่าวคือ สมบัติการคงรูปที่มากจะลดความยืดหยุ่นของยาง

ตารางที่ 6 ค่า Tensile Strength ค่า Elongation และค่า Tear strength ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย คอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช

ตัวอย่าง	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Tear strength (N/ mm²)
ยางธรรมชาติ	1.187	155.006	18.171
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง	1.553	146.976	22.088
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง	1.562	156.351	18.357



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า Tensile strength ระหว่างยางธรรมชาติไม่เสริมเส้นใย คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์เปรียบเทียบค่า Tear strength ระหว่างยางธรรมชาติไม่เสริมเส้นใย คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1. สรุปผลการทดลอง

เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย พบว่าการเติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการกรองและเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช ส่งผลต่อสมบัติการคงรูปของยาง ได้แก่ ผลต่างค่าทอร์คสูงสุดและค่าทอร์คต่ำสุด (Torque Difference หรือ ΔT) มีค่าเพิ่มขึ้น และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ผ่านการกรองมีค่า Ts2 และค่า Tc90 ต่ำที่สุด นั่นคือ มีความสามารถในการคงรูปได้เร็วที่สุด นอกจากนี้การเติมเส้นใยยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง ได้แก่ สมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) โดยทำให้มีค่าเพิ่มขึ้น

5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองศึกษาการปรับสภาพผิวของเส้นใยที่มีความชอบน้ำให้เข้ากับยางธรรมชาติก่อนนำไปเตรียมคอมโพสิตยางธรรมชาติ

5.2.2 ทดลองศึกษาผลของปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิตยางธรรมชาติ

5.2.3 ทดลองศึกษาผลของพอลิเมอร์เคลือบผิวกระดาษต่อสมบัติของคอมโพสิตยางธรรมชาติ

บรรณานุกรม

1. จิตรา วาสนาดำรงดี, วรุณ วารัญญานนท์, กอปร ลิ้มสุวรรณ, และ จิรารัตน์ พวงทอง. (2562). **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาต้นแบบการจัดการขยะมูลฝอยและขยะอันตรายในพื้นที่เมือง (จุฬาฯ zero waste)** ปีที่ 3 (ตุลาคม 2561 – กันยายน 2562). 5-20.
2. ผู้จัดการออนไลน์. (2563). **3 กลวิธี เปลี่ยนจุฬาฯ เป็น Zero Waste Community**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จาก เว็บไซต์: https://m.mgronline.com/greeninnovation/detail/9630000116036
3. SCG Chemicals. (2563). **เงินทองจากกองขยะ ตอนที่ 2: ถอดบทเรียนการจัดการขยะตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน "CHULA Zero Waste"**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: https://www.scgchemicals.com/en/news-media/feature-story/detail/62
4. CHULAZEROWASTE. (2562). **แก้วนี้ดีใช้แล้วลดขยะพลาสติก Zero-waste cup**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: http://www.chulazerowaste.chula.ac.th/zero-waste-cup/
5. Thaipublica. (2562). **จุฬาฯ นำร่อง "Chula Zero Waste" ลดใช้แก้วพลาสติก 6 เดือนลดทะลุล้านใบ**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: https://thaipublica.org/2019/04/chula-zero-waste-10-4-2562/
6. วรุณ วารัญญานนท์. (ม.ป.ป.). **Chula Zero Waste "ความร่วมมือชาวจุฬาฯ จัดการปัญหาขยะในมหาวิทยาลัย"**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จาก เว็บไซต์: https://www.sdsymposium2020.com/pillar/chula-zero-waste/
7. โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2561). **บทที่ 8 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภท พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate)**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234853u.pdf
8. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (ม.ป.ป.). **ยางพารา (Para Rubber)**. สืบค้นเมื่อ 17 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/para/used/01-03.php
9. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. (2549). **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). 2549.

10. 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. **Macromolecular Materials and Engineering** 289: 955-974. 2004.
11. ขวัญกมล สุขสม และวารุณี อริยวิริยะนันท์. (2561). **การเตรียมแผ่นยางคอมโพสิทเพื่อลดความเมื่อยล้าจากยางธรรมชาติและเส้นใยมะพร้าว (รายงานผลการวิจัย)**. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
12. Officemate Admin. (2562). **รู้หรือไม่? กว่าจะเป็นกระดาษ...ต้องผ่านกระบวนการอะไรบ้าง**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: https://www.officemate.co.th/blog/กระบวนการผลิตกระดาษ/
13. PAPERLAND ONLINE KNOWLEDGE. (ม.ป.ป.). **กระบวนการผลิตกระดาษ**. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2563, จากเว็บไซต์: http://www.paperlandonline.com/knowledge.php?ID=7
14. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และ ธีระชัย รัตนโรจน์มงคล. (2542). **กระดาษรีไซเคิล (Recycling Paper)**. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 47(150), 1-5.
15. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และ ธีระชัย รัตนโรจน์มงคล. (2542). **กระดาษรีไซเคิล (Recycling Paper)**. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 47(151), 11-15.
16. กษมา จารุกำจร และนิธินาถ ศุภกาญจน. (2555). **การเตรียมคอมโพสิทจากยางธรรมชาติและเส้นใยป่านศรนารายณ์ (รายงานผลการวิจัย)**. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
17. Evana Yuanita, Mochamad Chalid, Myrna Ariati Mochtar, Rahma Lailani and Yuli Amalia Husnil. (2020). **The Effect of Alkalization Treatment on Fiber-Matrix Compatibility in Natural Fiber Reinforced Composite. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2020. 847: 28-33. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.847.28
18. Ismail, H., Edyham, M. R., and Wirjosentono, B. (2002). **Bamboo fibre filled natural rubber composites: The effects of filler loading and bonding agent**. Polym. Test. 21. 139-144.
19. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน และวิมลลักษณ์ สุตะพันธ์. (2554). **พอลิโพรพิลีนคอมโพสิทจากเส้นใยป่านศรนารายณ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อน (รายงานผลการวิจัย)**. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
20. A.M. Noor Azammi, D.A.Shahril and S.M. Zulfadli. (2017). **Reinforcement of Kenaf Fiber in Natural Rubber Composite for Automotive Engine Rubber Mounting**. Journal of Applied Engineering Research. Volume 12, 2017, p 14490-14494.

21. Arif Wahudiono, Mirza Pramudia, Mohamad Irkham Mamungkas, Redi Bintarto, Rudianto Raharjo, Teguh Dwi Widodo and Sunardi. (2018). **Effect of Alkalization Treatment on The Tensile Strength and Interface Character Matrix-Fibber of Bamboo Petung (Dendrocalamus Asper) Reinforced Polyester Resin Composite**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. 494: 1-9.

ภาคผนวก ก

ค่าการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใย

ตารางที่ ก.1 ค่าการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยจากถ้วยกระดาษจุฬาฯ ซีโรเวสต์ที่ไม่ผ่านการกรองและผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช

สมบัติของเส้นใย	**ค่าเฉลี่ย**	
	เส้นใยที่ไม่ผ่านการกรอง	**เส้นใยที่ผ่านการกรอง**
Average fiber length (LN) (mm)	0.301	0.317
Length weighted average fiber length (LW) (mm)	0.347	0.371
Weight weighted average fiber length (LWW) (mm)	0.489	0.497
Fine percent (<75 μm) (%)	76.852	69.071
Mean curl	0.233	0.166
Kink index	2.334	1.908
Fiber width (μm)	22.2	24.4

ภาคผนวก ข

ค่าการทดสอบการคงรูปยาง

ตารางที่ ข.1 ค่าจากการทดสอบการคงรูปยางของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมเส้นใย

ตัวอย่าง	ML (min)	MH (min)	MH-ML (min)	Ts2 (min)	Tc90 (min)	Tc95 (min)	Tc100 (min)
ยางธรรมชาติ	2.89	7.22	4.33	0.98	3.2	8.18	29.9
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง	1.37	7.58	6.22	0.82	2.27	5.01	6.22
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง	2.54	7.62	5.08	1.02	3.65	6.23	29.96

ภาคผนวก ค

ค่าการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

ตาราง ค.1 ค่า Tensile strength ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย คอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช

ตัวอย่าง	ชิ้นทดสอบที่	Elongation (%)	Tensile Strength (MPa)
ยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย	1	158.864	1.18
	2	141.603	1.085
	3	143.192	1.134
	4	165.472	1.233
	5	165.901	1.302
	เฉลี่ย	155.006	1.187
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง	1	111.116	1.228
	2	119.667	1.31
	3	145.473	1.551
	4	193.293	1.973
	5	165.331	1.703
	เฉลี่ย	146.976	1.553
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง	1	176.167	1.727
	2	148.972	1.485
	3	136.77	1.406
	4	173.599	1.687
	5	146.245	1.504
	เฉลี่ย	156.351	1.562

ภาคผนวก ง

ค่าการทดสอบสมบัติความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

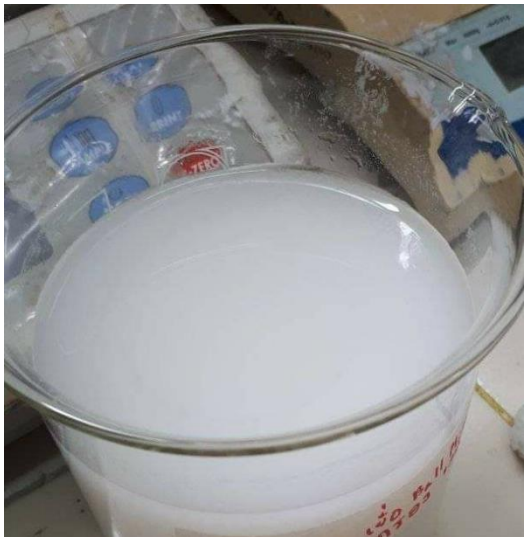
ตารางที่ ง.1 ค่า Tear strength ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย คอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง และคอมโพสิตยางที่เติมเส้นใยที่ผ่านการกรองด้วยตะแกรง 50 เมช

ตัวอย่าง	ชิ้นทดสอบที่	Tear Strength (N/ mm²)
ยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมเส้นใย	1	16.149
	2	21.576
	3	16.788
	เฉลี่ย	18.171
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ไม่ได้ผ่านการกรอง	1	20.73
	2	23.677
	3	21.859
	เฉลี่ย	22.088
คอมโพสิตยางเติมเส้นใยที่ผ่านการกรอง	1	18.279
	2	18.074
	3	18.718
	เฉลี่ย	18.357

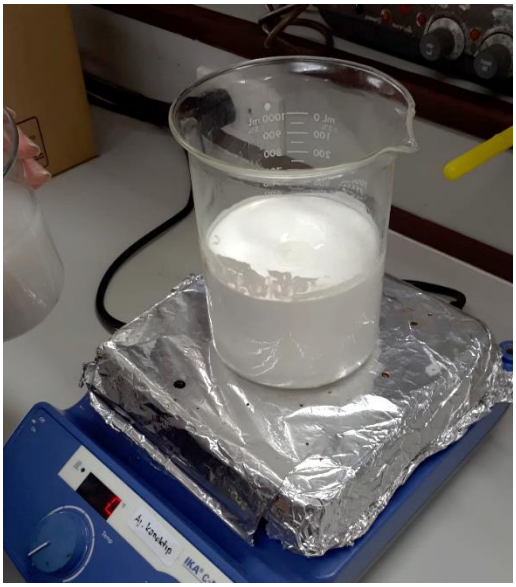
ภาคผนวก จ

ภาพปฏิบัติการในการทดลอง

ภาพที่ 1 เยื่อที่เตรียมได้จากการปั่นด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้



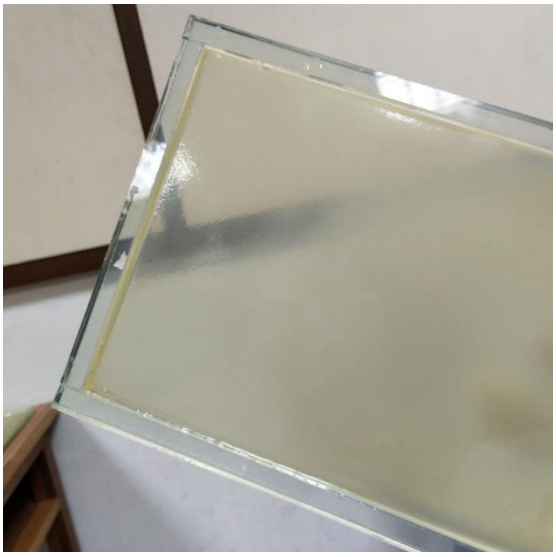
ภาพที่ 2 เยื่อที่เตรียมได้จากการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล



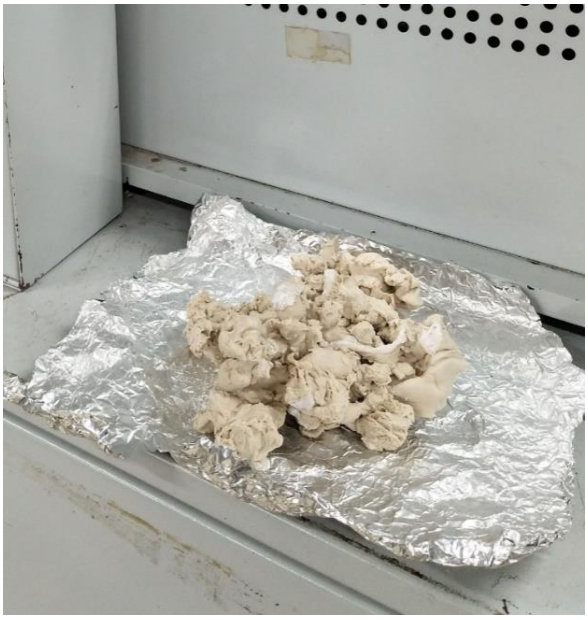
ภาพที่ 3 การกระจายน้ำเยื่อในน้ำยางธรรมชาติด้วยเครื่องกวนสารแม่เหล็ก

ภาพที่ 4 การขึ้นแผ่นยางจากน้ำยางธรรมชาติ

ภาพที่ 5 แผ่นยางที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับน้ำเยื่อที่ไม่ได้กรองผ่านตะแกรงก่อนแห้งตัว



ภาพที่ 6 แผ่นยางที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับน้ำเยื่อที่กรองผ่านตะแกรงก่อนแห้งตัว

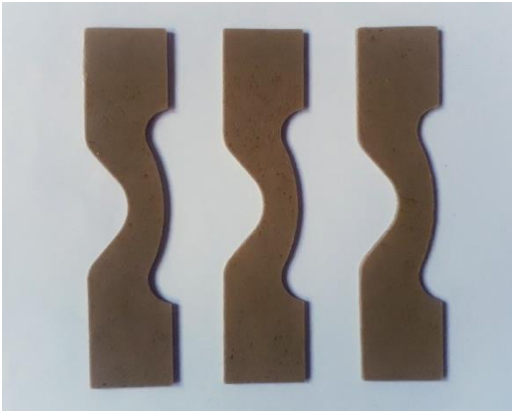


ภาพที่ 7 ยางที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด

ภาพที่ 8 ยางที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง

ภาพที่ 9 ยางที่ได้จากการอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดยาง

ภาพที่ 10 ตัวอย่างทดสอบ Tensile Strength



ภาพที่ 11 ตัวอย่างทดสอบ Tear Strength