



การศึกษาเบื้องต้นในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
Preliminary Study of Using Spent Coffee Ground as filler in Natural Rubber

นุชจรา บุรเพชร
Nudjara Buraphet

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การศึกษาเบื้องต้นในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
Preliminary Study of Using Spent Coffee Ground as filler in Natural Rubber

นุชจรา บุรเพชร
Nudjara Buraphet

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาเบื้องต้นในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
 ผู้เขียน นางสาวนุชจรา บุรเพชร
 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร.นัฐพงษ์ สุขวิวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง)

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัติ แซ่ตั้ง)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัติ แซ่ตั้ง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
 (ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่าผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิธินาท แซ่ตั้ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนูวัต แซ่ตั้ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ

(นางสาวนุชจรา บุรเพชร)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาวนุชจรา บุรเพชร)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเบื้องต้นในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
ผู้เขียน	นางสาวนุชจรา บุรเพชร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟที่ใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับโฟมยางปูพื้นภายในอาคาร สมบัติของโฟมยางปูพื้นที่ได้นี้จะเปรียบเทียบกับโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์ โดยศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคกากกาแฟเฉลี่ยที่ 80 ไมครอน และ 425 ไมครอน พร้อมทั้งใช้สารช่วยผสมเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 50 และศึกษาชนิดของยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ผลการวิจัย พบว่าระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงและปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด ที่ใช้ขนาดอนุภาคเล็กจะเพิ่มสูงกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ 30-50 % เมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณกากกาแฟทำให้ระยะเวลาในการสุกยาวนานขึ้น รวมถึงเพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง การใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสมแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเริ่มต้นการสุกสั้นลงแต่เวลาการสุกยาวนานกว่าเมื่อเทียบกับการไม่ใช้สารช่วยผสม ยิ่งกว่านั้นการใช้สารช่วยผสมยังช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น 35-40% และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น 20-15% ตามปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ได้ศึกษาชนิดของยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 แทนยางธรรมชาติเกรด STR5L ยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 50 ให้ระยะเวลาเริ่มสุกสั้นกว่า แต่ระยะเวลาสุกนานกว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 25 และยางธรรมชาติเกรด STR5L อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 50 ปรับปรุงสมบัติเชิงกลสูงขึ้นเพียง 10% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 25 ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมในการเตรียมโฟมยางปูพื้นคือสูตรยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 25 สารฟู (SUPERCELL EVA-B3) ที่ปริมาณ 5 phr ร่วมกับกากกาแฟ 25 phr ทำให้ขนาดเซลล์ของโฟมยางสม่ำเสมอ ให้ความหนาแน่น 45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางเชิงกลของโฟมยางกับโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์ (EVA45) โฟมยางเพิ่มสูงกว่าโฟมอีวีเอชนิด EVA45 30-50% และมีสมบัติการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดที่ต่ำกว่า 30% ดังนั้นโฟมยางที่เตรียมขึ้นในงานวิจัย แสดงให้เห็นว่าโฟมยางที่ใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมมีศักยภาพเทียบเคียงกับโฟมอีวีเอทางการค้าสำหรับปูพื้นภายในอาคาร และยังสามารถลดปัญหาขยะชีวมวลจากกากกาแฟ

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, ยางธรรมชาติอีพอกไซดร้อยละ 25, ยางธรรมชาติอีพอกไซดร้อยละ 50, กากกาแฟ, สารฟู, โฟมยางปูพื้นในอาคาร

Thesis title	Preliminary study of using spent coffee ground as filler in natural rubber
Author	Miss Nudjara Buraphet
Major	Department of Polymer Science and Technology
Year	2021

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effects of particle size and content of spent coffee ground (SCG) use as efficient filler for indoor flooring foam rubber. The properties of flooring foam rubber were compared with the commercial EVA foam. In this study, influence of the average of particle size at 80 μm and 425 μm with the SCG as filler, epoxidized natural rubber contain 25 and 50% mole of epoxide content (ENR50) as compatibilizer, type of ENR25 and ENR50 were investigated. The results showed that the cure time were increased with reducing the particle size and increasing of SCG content. The mechanical properties i.e., tensile strength, elongation at break and tear strength with a small particle size were 30-50% higher than larger particle size for increased SCG content. Increasing the SCG content provided a longer cure time. Also, the tensile strength, elongation at break, and tear strength tend to decrease. Using ENR50 as compatibilizer showed a shorter scorch time, but with longer cure time compared to not using a compatibilizer. Moreover, using compatibilizer improved the tensile strength by 30-50% and tear strengths were higher by 20-15% with increasing the SCG content, respectively. In addition, the type of ENR 25 and ENR50 were studied instead of natural rubber grade STR5L. The ENR50 gave a shorter scorch time but a longer cure time than ENR25 and STR5L. However, ENR50 improved the mechanical properties only 10% higher than ENR25. Therefore, the formula suitable for preparing flooring foam rubber was the ENR25. The blowing agent (Super cell EVA-B3) with 5 phr and SCG 25 phr resulted in a homogenous cell foam with density of 45 kg/m^3 . Comparing the mechanical properties of foam rubber with the commercial EVA foam (EVA 45), the tensile strength and tear strength of foam rubber between 30-50% higher. In addition, the rubber foam had the compression set change lower than 30%. The result revealed that the rubber foam use SCG as filler had the completion potential

with the commercial EVA foam for foam rubber flooring inside the building, and reduce the problem of biomass waste from spent coffee ground.

Keyword: Natural rubber, Epoxidized natural rubber-25, Epoxidized natural rubber-50, Spent coffee ground, blowing agent, indoor flooring Foam rubber

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องด้วยความดูแลเอาใจใส่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมถึงในทางการแก้ปัญหาที่ดีในการดำเนินงานวิจัยจาก รศ.ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง และ ผศ.ดร.อนุวัติ แซ่ตั้งอาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงคำแนะนำจากกรรมการสอบและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นโดยมีประธานกรรมการสอบ ดร.รัฐพงษ์ สุขวิวัฒน์ และรศ.ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากรประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและเจ้าหน้าที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่คอยให้การช่วยเหลือและคำแนะนำ ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ รุ่นพี่ เพื่อนและผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและการสนับสนุนตลอดมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย

นุชจรา บุรเพชร
ธันวาคม 2564

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(8)
สารบัญ	(9)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญรูป	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ยางธรรมชาติ	3
2.2 สารแอนติออกซิแดนท์	5
2.2.1 สารประกอบฟีนอลิก	6
2.2.2 สารประกอบเอมีน	7
2.3 กากกาแฟ	8
2.4 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการวิจัย	15
3.1 สารเคมี	15
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	16
3.2.1 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง	16
3.2.2 เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์	17
3.2.3 เครื่องทดสอบความหนืดมูนี่	17
3.2.4 เครื่องอัดเบ้าระบบไฮดรอลิก	18
3.2.5 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปตัวอย่าง	19
3.2.6 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความต้านทานต่อแรงดึง	19
3.2.7 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความต้านทานต่อการฉีกขาด	19
3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.9 เครื่องวัดความแข็ง	20
3.2.10 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา	20
3.2.11 เครื่องทดสอบขนาดอนุภาคของกากกาแฟ	21
3.2.12 โฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์	21
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	22
3.3.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม ในยางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ	22
3.3.1.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ	22
3.3.1.2 อิทธิพลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟ และยางธรรมชาติ	23
3.3.1.3 ศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 25 และร้อยละ 50	25
3.3.2 การเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม	25
3.3.2.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟู	25
3.3.2.2 เปรียบเทียบสมบัติของโฟมยางปูพื้นกับโฟมอีวีเอ เชิงพาณิชย์	26
3.3.3 การทดสอบ	27
3.3.3.1 การทดสอบความหนืดมูนี้	27
3.3.3.2 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์	28
3.3.3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบยางวัลคาไนซ์	28
3.3.3.4 การทดสอบความหนาแน่น	28
3.3.3.5 การทดสอบความแข็ง	29
3.3.3.6 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	29
3.3.3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด	30
3.3.3.8 การทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัด	30
3.3.3.9 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่ง	31
3.3.3.10 การทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบส่องกราด	31

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.3.11 การวัดขนาดอนุภาคของกากกาแฟโดยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer รุ่น Analyzette 22 Nanotec	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	33
4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม	33
4.1.1 ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ	33
4.1.1.1 ผลของขนาดอนุภาคของกากกาแฟต่อสมบัติ ของยางคอมพาวนด์	34
4.1.1.2 ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ ต่อสมบัติเชิงกล	36
4.1.2 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟและยางธรรมชาติ	39
4.1.3 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 และร้อยละ 50	44
4.2 ผลการศึกษาการเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนโดยใช้กากกาแฟ เป็นสารตัวเติม	49
4.2.1 ผลของปริมาณสารฟู	49
4.2.2 ผลเปรียบเทียบสมบัติโฟมยางกับโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	59
5.1 สมบัติเบื้องต้นการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ	59
5.1.1 ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ	59
5.1.1.1 ผลของกากกาแฟต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	59
5.1.1.2 ผลของกากกาแฟต่อสมบัติเชิงกล	59
5.1.2 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟและยางธรรมชาติ	59
5.1.2.1 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟและ ยางธรรมชาติต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	59
5.1.2.2 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟ และยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกล	60
5.1.3 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 และร้อยละ 50	60
5.1.3.1 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 และ ร้อยละ 50 ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	60

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.1.3.2 ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซค์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ต่อสมบัติเชิงกล	60
5.2 การเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม	60
5.2.1 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อการเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม	60
5.2.1.1 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	60
5.2.1.2 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติเชิงกล	61
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก	64
เรื่อง การเตรียมและสมบัติของโฟมยางจากยางธรรมชาติอิพอกไซค์ 25 ผสมร่วมกับกากกาแฟ	65
การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 52 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา	
ประวัติผู้เขียน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	สูตรยางผสมสารเคมีและกากกาแฟขนาด 150 ไมครอนและ 425 ไมครอน	23
3.2	สูตรยางผสมสารเคมีและกากกาแฟร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 50	23
3.3	สูตรยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 และร้อยละ 50 ผสมสารเคมีและกากกาแฟ	25
3.4	สูตรโฟมยางปูพื้นยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 ผสมกากกาแฟ	26
3.5	สมบัติของ Metro foam products ทางการค้าจากประเทศออสเตรเลีย	27
4.1	ผลของอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	34
4.2	ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณกากกาแฟต่อสมบัติทางเชิงกล	36
4.3	ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติ ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	40
4.4	ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติ ต่อสมบัติทางเชิงกล	41
4.5	ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 และร้อยละ 50 ต่อสมบัติ การวัลคาไนซ์	44
4.6	ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 และ 50 ต่อสมบัติทางเชิงกล	46
4.7	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์	49
4.8	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง	51
4.9	สมบัติของ Metro foam products ทางการค้าจากประเทศออสเตรเลีย	57

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	3
2.2	สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก	6
2.3	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารแอนดีออกซิแดนท์กลุ่มสารประกอบฟีนอลิก	7
2.4	แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารแอนดีออกซิแดนท์กลุ่มของสารประกอบเอมี	7
2.5	ส่วนประกอบของกากกาแฟเหลือใช้ โดยวัดจากผงกากกาแฟที่แห้ง	7
2.6	สูตรโครงสร้างของไซโลส	8
2.7	ลักษณะการเชื่อมโยงโมเลกุลของลิกนินกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส	8
2.8	ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส	9
2.9	สูตรโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันที่พบในกากกาแฟ	9
2.10	ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส	10
2.11	สูตรโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันที่พบในกากกาแฟ	11
2.12	ปฏิกิริยาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซดี	12
3.1	โครงสร้างทางเคมีของสารฟุซนิตซูปเปอร์เซลล์อีวีเอบี 3	16
3.2	เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง	17
3.3	เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์	17
3.4	เครื่องทดสอบความหนืดมูนี่	18
3.5	เครื่องอัดเบ้าระบบไฮดรอลิก	19
3.6	ลักษณะเบ้าขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง	19
3.7	เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง	20
3.8	เครื่องทดสอบความแข็ง	21
3.9	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21
3.10	เครื่องวัดขนาดอนุภาค	22
3.11	ลำดับและเวลาการผสมยาง สารเคมีและกากกาแฟ	24
3.12	แสดงลักษณะขึ้นตัวอย่างความต้านทานต่อแรงดึง	29
3.13	แสดงลักษณะขึ้นตัวอย่างความต้านทานการฉีกขาด	30
3.14	ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัด	31
4.1	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากกาแฟ	33

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ผสมกากกาแฟขนาดอนุภาค 150 ไมครอน	35
4.3	ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ผสมกากกาแฟ ขนาดอนุภาค 425 ไมครอน	35
4.4	การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ	37
4.5	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อแรงดึงในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ	37
4.6	การเปลี่ยนแปลงค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ	38
4.7	การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานการฉีกขาดในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ	39
4.8	ผลของการใช้สารช่วยผสมและปริมาณกากกาแฟต่อค่าความแข็ง	42
4.9	ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และปริมาณกากกาแฟต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง	42
4.10	ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และปริมาณกากกาแฟต่อระยะยืด ณ จุดขาด	43
4.11	ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้และปริมาณกากกาแฟต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด	43
4.12	การเกิดอันตรกิริยาของยางธรรมชาติอิพอกไซดรีออละ 50 กับกากกาแฟ	44
4.13	ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดรีออละต่อค่าความแข็ง	47
4.14	ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดรีออละต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง	47
4.15	ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดรีออละต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาด	48
4.16	ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดรีออละต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด	48
4.17	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์	50
4.18	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าความหนาแน่นของโฟมยาง	52
4.19	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง (กำลังขยาย 50 เท่า) (ก) ไม่ใส่สารฟู่ (ข) สารฟู่ 3 phr (ค) สารฟู่ 5 phr และ (ง) สารฟู่ 7 phr	53
4.20	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อความแข็งของโฟมยางก่อนและหลังบ่มเร่ง	53
4.21	กลไกการเกิดการเชื่อมขวางใหม่ของยางธรรมชาติหลังบ่มเร่ง	54
4.22	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโฟมยางก่อนและหลังบ่มเร่ง	54
4.23	ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดของโฟมยางก่อนและหลังบ่มเร่ง	55

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	ผลของปริมาณสารฟลูต่อค่าความต้านทานการซึมของโฟมยาง ก่อนและหลังปั๊มแรง	56
4.25	ผลของปริมาณสารฟลูต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดของโฟมยาง	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยสามารถปลูกได้ทุกภูมิภาคทั่วประเทศ ไทยโดยปริมาณของยางธรรมชาติที่ผลิตได้ต่อปีของยางพารากว่า 3 ล้านเมตริกตัน ซึ่งประเทศไทยได้ส่งออกยางธรรมชาติในรูปของวัตถุดิบเป็นส่วนใหญ่มากถึง 85% ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นมูลค่าแล้วพบว่าปริมาณที่ส่งออกที่มากถึง 85% กลับมีมูลค่าใกล้เคียงกับมูลค่าของยางธรรมชาติที่ส่งออกเป็นสินค้าซึ่งมีเพียง 14% [1] ซึ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการใช้สารตัวเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งให้ยางธรรมชาติ จึงมีการใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กผสมเข้าไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติทางเชิงกล สำหรับสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง คือ เขม่าดำและซิลิกา ส่วนสารตัวเติมกึ่งเสริมแรงได้แก่ เคลย์ แคลเซียมคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตามสารตัวเติมดังกล่าวก่อนนำมาใช้งานจะต้องนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีและใช้พลังงานในการผลิตค่อนข้างสูง เพื่อลดปัญหาด้านพลังงานและการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมจากสารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ สารตัวเติมจากธรรมชาติหรือจากขยะชีวมวลซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง ตัวอย่างเช่น เส้นใยจากกากมะพร้าว เส้นใยจากป่านศรนารายณ์ ซึ่งวัสดุที่ได้จากพืชมีส่วนประกอบหลักจากเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่หรือวัสดุจากสัตว์จำพวกเปลือกแข็งจากสัตว์ เช่น เปลือกไข่ไก่ เปลือกหอยและกระดูกสัตว์มีส่วนประกอบหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น [2] ซึ่งการนำวัสดุดังกล่าวมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติต้องนำวัสดุเหล่านั้นผ่านกระบวนการทำความสะอาด และบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงโดยจำเป็นต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เพื่อประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายจากการบดย่อยจึงมีการมองหาวัสดุเหลือใช้ที่มีขนาดอนุภาคเล็กพอที่สามารถนำมาใช้งานได้โดยตรง โดยในปัจจุบันมีการรายงานถึงการนำขี้เถ้าแกลบ ขี้เลื่อย มาเป็นสารตัวเติมในยางซึ่งอนุภาคของสารมีขนาด แต่ยังไม่มีการรายงานถึงการนำกากกาแฟมาผสมในยางเพื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้ โดยกากกาแฟเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 700 μm จึงไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการบดย่อยให้มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ในกากกาแฟยังมีส่วนประกอบของสารประกอบฟีนอลิกที่เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง [3, 4] ที่มีความสามารถในการต้านทานต่อการเสื่อมได้ และมีสารอนุพันธ์อื่น ๆ ที่สามารถกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้

ดังนั้น ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาสมบัติเบื้องต้นการใช้กากกาแฟเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ขนาดอนุภาคของกากกาแฟ ปริมาณสารตัวเติมกากกาแฟ การใช้สารช่วยผสม และการใช้ยางธรรมชาติอพอกไซต์ ร้อยละ 25 และยางธรรมชาติอพอกไซต์ร้อยละ 50 เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับกากกาแฟ เพื่อ

เพิ่มสมบัติทางเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ จากนั้นจึงทำการเตรียมเป็นโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มเพื่อใช้ในอาคาร โดยกำหนดให้คุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับโฟมอีวีเอทางการค้าที่ใช้ปูพื้นภายในอาคาร เพื่อเป็นการเพิ่มช่องทางการใช้งานยางธรรมชาติที่เป็นวัตถุดิบจากท้องถิ่น และการนำกากกาแฟที่เป็นวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์รวมถึงการลดปัญหาขยะจากกากกาแฟ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคกากกาแฟและปริมาณของกากกาแฟต่อสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางปูพื้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสมในยางธรรมชาติที่ผสมร่วมกับกากกาแฟต่อสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 ร่วมกับการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมต่อสมบัติวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล

1.2.4 เพื่อศึกษาการเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และกากกาแฟเป็นสารตัวเติม

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคกากกาแฟที่ใช้เป็นสารตัวเติมซึ่งมีขนาดคือ 150 ไมครอน และ 425 ไมครอน ที่ระดับของสารตัวเติม 0, 10, 30, 50 และ 70 phr

1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของยางส่งผลต่อสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล โดยใช้ยางธรรมชาติเกรด STR5L, ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 (ENR25) และยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 (ENR50)

1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสม สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 ในสัดส่วน 80:20 เพื่อปรับปรุงความเข้ากันของยางธรรมชาติกับสารตัวเติมกากกาแฟ

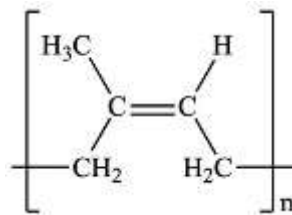
1.3.4 ศึกษาการเตรียมโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 โดยสารฟูนิกกลุ่ม Azo compound ชื่อทางการค้า SUPERCELL EVA-B3 ที่ระดับสารฟูนิก 0, 3, 5 และ 7 phr

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber) ชื่อทางเคมีคือ ซิส 1,4 พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4 poly isoprene) ในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มากกว่า 99% มาต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000,000 ถึง 3,000,000 g/mol และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก[3] ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ $-72 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งอาจมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต หากเป็นยางแผ่นธรรมดา T_g จะต่ำกว่ายางแท่ง เนื่องจากการผลิตยางแท่งผ่านกระบวนการย่อยยางแล้วส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางจะมีขนาดเล็กกลง จึงเป็นผลให้ค่า T_g จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยโดยโครงสร้างของยางธรรมชาติดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

สมบัติทั่วไปเด่นๆ ของยางธรรมชาติ ได้แก่ [3]

ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติด้านความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกมากระทำกับยางหมดไป โมเลกุลยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ซึ่งยางธรรมชาติรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้ดีแม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ (อุณหภูมิสูงกว่า T_g)

ความเหนียวติด (Tack) เป็นสมบัติเด่นในยางธรรมชาติซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

การเซ็ดตัวหลังการกดอัด (Compression set) ยางธรรมชาติมีค่าการเซ็ดตัวหลังการกดอัดหรือการยุบตัวค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางธรรมชาติจะมีค่าการยุบตัวที่สูงขึ้น เนื่องยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่ม

สูญเสียไป เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิสูงยางธรรมชาติจะไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการยุบตัวจึงสูงขึ้น

การกระเต็ง (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเต็งกระดอนสูงและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนได้น้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) โมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นสารประกอบของพอลิไอโซพรีนมีความเป็นระเบียบสูง ทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อแรงดึงสูงมากถึงแม้จะไม่ได้ผสมสารตัวเติมชนิดเสริมแรงเข้าไป แต่เมื่อหากเติมสารตัวเติมเสริมแรงเพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงในผลิตภัณฑ์ยางได้

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ในขณะถูกดึงให้ยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้นอีกด้วย

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ที่สูงมากด้วย จึงทำให้ยางธรรมชาตินิยมนำมาใช้ในงานในผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องรับแรงและความล้าที่สูง เช่นยางรองคอสพาน

ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} โอห์มต่อเซนติเมตร

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้ายางเกิดการคงรูปจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติในยางคงรูปจะขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเกิดแค่การบวมตัว (swelling) ในตัวทำละลายเหล่านั้นเท่านั้น แต่ยางจะสามารถทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความสามารถทนต่อการด่างและต่างเจือจางได้ดี แต่จะไม่ทนต่อการด่างในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะที่ไม่อิ่มตัว (พันธะคู่) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและสัมผัสกับโอโซนเป็นเวลานาน ๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง (Cracking)

อุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -70°C ถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน ยางอาจเกิดการเชื่อมขวางจากหมู่อัลดีไฮด์ (storage hardening) ซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่หากใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินไปสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ก็จะต้องย่ำแย่เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ

อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเติมสารเคมีใด ๆ หรือยางดิบยังคงมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางอ่อนตัวและเหนียวเมื่อได้รับความร้อน และแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยข้อด้อยดังกล่าวยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ และสารตัวเติมต่าง ๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสมยางและสารเคมีจนเข้ากันซึ่งเรียกยางที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วว่ายางคอมพาวนด์ (Rubber compound) และนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้ เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ จะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น [5] เมื่อได้ผลิตภัณฑ์และนำไปใช้งานแล้วผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องมีสมบัติดังต้องการใช้ช่วงอายุการใช้งาน ซึ่งอายุการใช้งานนี้อาจเสื่อมน้อยลงหลังการเปิดใช้งานครั้งแรกเนื่องจากผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอากาศ ความร้อน แสงแดด และมลภาวะมากมายซึ่งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในผลิตภัณฑ์ยาง สารเคมีที่สำคัญอย่างมากชนิดหนึ่งคือ “สารแอนติออกซิแดนท์” ซึ่งเติมในสูตรยางเพื่อยืดอายุการใช้งานและลดการเกิดการการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์

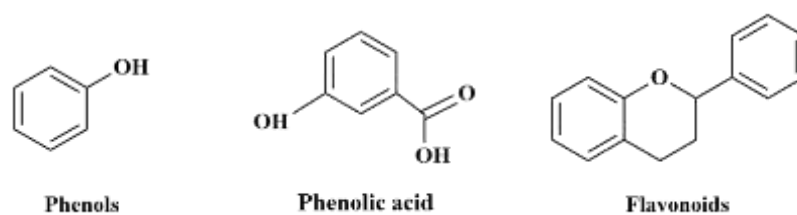
2.2 สารแอนติออกซิแดนท์

สารแอนติออกซิแดนท์ (anti-oxidant) หรือสารป้องกันการเสื่อมคือสารที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ยางเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากในโครงสร้างของยางมีส่วนไฮโดรคาร์บอนซึ่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การเติมสารป้องกันการเสื่อมเพื่อที่จะยับยั้งหรือชะลอการเกิดกระบวนการออกซิเดชันนั่นเอง สารแอนติออกซิแดนท์นี้จะทำงานใน 2 ลักษณะด้วยกัน คือ สำหรับสารต้านอนุมูลอิสระปฐมภูมิ กระบวนการต้านอนุมูลอิสระจะเกิดขึ้นโดยการเพิ่มอะตอมของอิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนให้กับสารอนุมูลอิสระทุติยภูมินั้นกระบวนการ

ต้านอนุมูลอิสระจะเกิดขึ้นโดยการกำจัดตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและการป้องกันการออกซิเดชัน โดยในช่วงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้น การเกิดออกซิเดชันส่งผลต่อปัจจัยบางประการที่ทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่พึงปรารถนา ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตสินค้ารวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ เนื่องด้วยสารแอนติออกซิแดนท์มีบทบาทในการยับยั้งและป้องกันการเกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว สารแอนติออกซิแดนท์จึงช่วยรักษาคุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ตลอดช่วงอายุการใช้งาน โดยมันทำหน้าที่ในด้านการคงไว้ซึ่งสี ความหนืด และคุณสมบัติการยืดเกาะ กล่าวโดยสรุปคือแอนติออกซิแดนท์เป็นสารที่ใส่ในพอลิเมอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ช่วยป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองในขั้นตอนการผลิตในขณะขึ้นรูป และช่วยยืดอายุการใช้งานของสินค้า [4, 5]

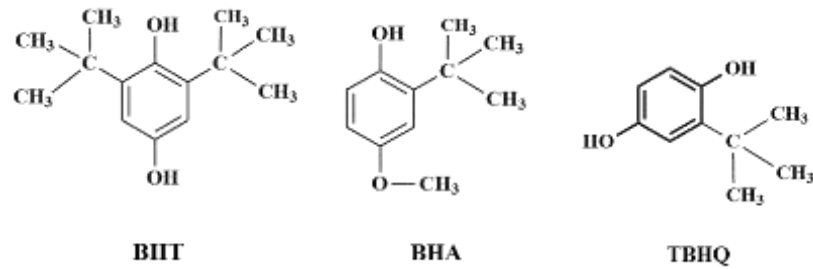
สารป้องกันการเสื่อมมีส่วนประกอบหลักที่สามารถจำแนกชนิดของแอนติออกซิแดนท์ได้สองประเภทคือ

1. สารประกอบฟีนอลิก มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน ที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซีน มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่ต่อกับสารประกอบฟีนอล สารประกอบฟีนอลที่พบในธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด และมีลักษณะสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (phenolic acids) ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ เช่น ลิกนิน (lignin) กลุ่มใหญ่ที่สุดที่พบ คือ สารประกอบฟลาโวนอยด์ (flavonoid) ดังแสดงสูตรโครงสร้างในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของสารประกอบฟีนอลิก

สารป้องกันการเสื่อมกลุ่มสารประกอบฟีนอลิกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง เช่น Butylated hydroxytoluene (BHT), Butylated hydroxyanisole (BHA) และ Tertiary Butyl Hydro Quinone (TBHQ) โดยมีโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 2.3



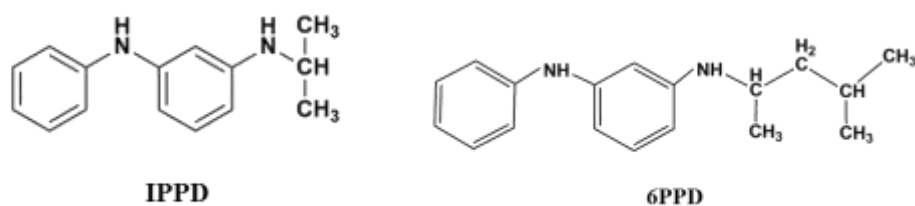
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารแอนติออกซิแดนท์กลุ่มสารประกอบฟีนอลิก

โดยสารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระ (free radical) และไอออนของโลหะที่สามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและโมเลกุลอื่น ๆ โดยใช้ตัวเองเป็นตัวรับอนุมูลอิสระ ทำให้สามารถยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีอนุมูลอิสระเป็นสาเหตุ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกเป็นแอนติออกซิแดนท์ที่ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ตกสีสามารถใช้ผสมในผลิตภัณฑ์ยางสีได้เพื่อช่วยป้องกันการเกิดการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยางโดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์



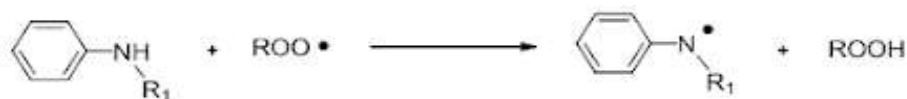
รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดปฏิกิริยายับยั้งอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอล

2. สารป้องกันการเสื่อมสารประกอบเอมีนสามารถละลายได้ในน้ำมัน อะซิโตน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ คาร์บอนซัลไฟด์ และเอทานอลและแทบไม่ละลายในเบนซีน เกิดการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสกับอากาศและแสงแดดมีความเป็นพิษต่ำ จุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 40-70 °C โดยสารป้องกันการเสื่อมกลุ่มอนุพันธ์เอมีนนิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์หรือยางล้อเครื่องบิน เช่น N-isopropyl-N'-phenyl-p-phenylene diamine (IPPD), N-(1, 3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene diamine (6PPD) โดยมีโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารแอนติออกซิแดนท์กลุ่มของสารประกอบเอมีน

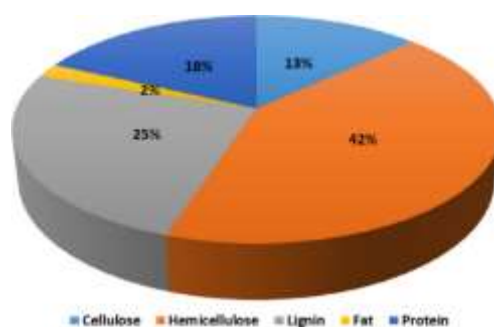
สารประกอบเอมีนเกิดการยับยั้งอนุมูลอิสระของเปอร์ออกซีทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์จากการรับไฮโดรเจน ซึ่งลักษณะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบเอมีน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดปฏิกิริยายับยั้งอนุมูลอิสระของสารประกอบเอมีน

2.2 กากกาแฟ

กากกาแฟ (Ground coffee) คือ เศษที่ได้จากการคั่วบดกาแฟแล้วนำไปชงดื่มเรียบร้อยแล้ว จะถูกทิ้งภายหลังจากการสกัดเพื่อให้ได้น้ำกาแฟออกมา แต่ในกากกาแฟจะยังคงเหลือสารอาหารสำคัญโดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ ในด้านเสริมความงามนิยมเอากากกาแฟมาใช้ในการดูแลผิว ด้วยการผสมกับส่วนผสมตามธรรมชาติใช้ขัดหรือพอกผิวหน้าหรือผิวกายล้วนช่วยดึงเอาสารพิษตกค้างทิ้งยังเต็มความสดใสให้ผิวสุขภาพดีได้ และกากกาแฟที่เหลือใช้นี้เป็นขยะที่มีปริมาณมากกว่า 7 ล้านตันปี โดยส่วนประกอบของสารต่าง ๆ ในกากกาแฟแสดงดังในรูปที่ 2.7



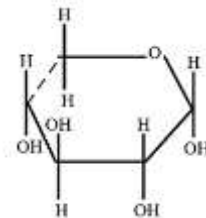
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของกากกาแฟเหลือใช้ โดยวัดจากผงกากกาแฟที่แห้ง [6]

โดยในกากกาแฟมีส่วนประกอบหลักคือ เฮมิเซลลูโลส 42% ลิกนิน 25% โปรตีน 18% เซลลูโลส 13% และกรดไขมัน 2% นอกจากส่วนประกอบหลักยังมีสารประกอบอื่นๆ รวมอยู่เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เป็นที่ทราบกันดีว่ากาแฟมี “สารต้านอนุมูลอิสระ” หรือที่ทางเคมีเรียก “สารป้องกันการเสื่อม” อยู่ในเมล็ดกาแฟ ซึ่งสารป้องกันการเสื่อมสภาพในกากกาแฟ คือ สารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบเอมีน โดยในกากกาแฟยังคงมีส่วนประกอบเหล่านี้อยู่หลังการสกัดคาเฟอีน ดังนั้นจากความแข็งแรงของเส้นใยและสารประกอบที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมของกากกาแฟ ผู้วิจัย

จึงมีแนวคิดที่จะใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงและความต้านทานต่อการเสื่อมในผลิตภัณฑ์ยาง

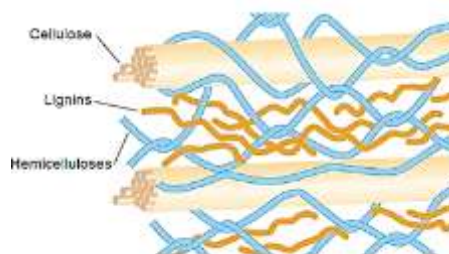
ส่วนประกอบหลักในกากกาแฟ มีรายละเอียด ดังนี้

1. เฮมิเซลลูโลส คือ พอลิแซคคาไรด์ของ D-xylose ที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ โดยไซโลส (xylose) เป็นน้ำตาลเพนโทสชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอน 5 อะตอมและมีหมู่ฟังก์ชัน คือ แอลดีไฮด์ไซโลสมีสูตรโมเลกุล คือ $C_5H_{12}O_5$ และมีสูตรโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.8 ถูกนำมาใช้เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลและเป็นวัตถุดิบในการผลิตไซลิตอล (Xylitol) การใช้ประโยชน์จาก Xylose และ Hemicellulose กำลังได้รับความสนใจในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากสารชีวมวล



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของไซโลส [7]

2. ลิกนิน คือ สารประกอบระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันจนกลายเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_{12}O_4$ ลิกนินมีสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่ยืดหยุ่นแต่มีความแข็งแรงทนทานสูง โดยลิกนินเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในผนังเซลล์พืชชั้นสูง (ทั้งพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืชใบเลี้ยงคู่) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เช่นลำต้น หน่กอ ฟางข้าวสาลี แกนผักขาวโพด ฯลฯ ซึ่งพบลิกนินในอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดและอายุของพืช นอกจากนี้ลิกนินยังมีโครงสร้างเป็นร่างแหเพื่อทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้ติดกันภายในผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างพืชมีความแข็งแรงทนทานสูง

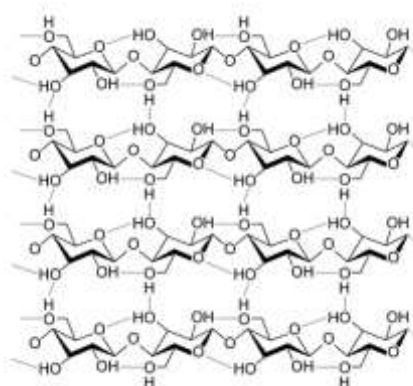


รูปที่ 2.9 ลักษณะการเชื่อมโยงโมเลกุลของลิกนินกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [8]

3. โปรตีน พบในเซลล์พืชที่กำลังเจริญเติบโตจะมีโปรตีนในผนังเซลล์ ประมาณ 5-10% ซึ่งประกอบด้วย เอนไซม์พวกไฮโดรเลส (Hydrolases) กลูคาเนส (Glucanase) เพคติน เมทิลเอสเตอเรส (Pectin Methylsterase) และเอทีพีเอส (ATPase) เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีโปรตีนที่เป็นโครงสร้างเป็นพวกไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ซึ่งประกอบด้วย ไฮดรอกซีโพรลีน (Hydroxyproline) เป็นส่วนใหญ่ โดยเกาะกับโพลีแซคคาไรด์แบบไม่เกิดพันธะโควาเลนต์

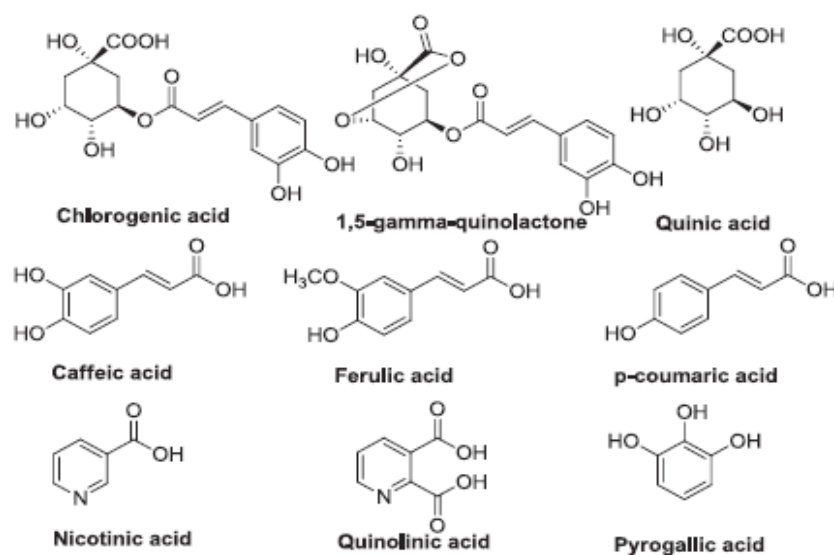
4. เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ประกอบด้วย สารคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ชนิดโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สำหรับโครงสร้างของเซลลูโลส ประกอบด้วย โมเลกุลของกลูโคส (Glucose) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นหมู่หลักมาเรียงต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่งบีต้า-1,4 (β (1-4glycosidic bond)) ได้เป็นสายยาวที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสกว่า 1,000 -10,000 โมเลกุลที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบแสดงดังในรูปที่ 2.10 โดยเซลลูโลสจะมีหน่วยซ้ำที่เรียกว่า เซลโลไบโอส (Cellobiose) และทุกหน่วยที่สองของกลูโคสที่ต่อกันในโมเลกุลของเซลลูโลสจะสามารถหมุนได้ 180 องศา เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลกลูโคสทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรง มีอุณหภูมิการหลอมตัวสูงและไม่สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป [9]

5. น้ำตาลที่พบในกากกาแฟคือน้ำตาลแมนโนส กาแลคโตส กลูโคส และอะราบิโนส ในสัดส่วนอะราบิโนส 7% กลูโคส 24% กาแลคโตส 32% และแมนโนส 37% น้ำตาลในเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลลูโลส [9]

6. กรดไขมัน ที่พบในกากกาแฟ ประกอบด้วย กรดลิโนเลอิก ราว 45% และกรดปาล์มิติก 34% และกรดไขมันอื่น ๆ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 สูตรโครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันที่พบในกากกาแฟ

โดยโครงสร้างของกรดไขมันส่วนใหญ่ที่ได้จากกากกาแฟมีส่วนประกอบที่คล้ายกัน คือ ส่วนที่เป็นโพลีฟีนอลซึ่งเป็นส่วนที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน [10, 11, 12] แต่อย่างไรก็ตามหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของกากกาแฟทำให้ความเข้าในการบด ผสมอาจเข้ากันได้ยากจึงจำเป็นต้องปรับปรุงความเข้ากันโดยใช้ยางธรรมชาติพอกไซต์เป็นสารช่วยผสม

ผลงานวิจัยของ Hyun Kyung Lee และคณะ ได้ศึกษาการใช้กากกาแฟที่ผ่านการบดย่อยขนาดโดยเครื่องบอลมิลล์จนได้ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 240 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ ผงเขม่าดำที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 110 นาโนเมตร เป็นสารตัวเติมในระดับ 1wt%, 2wt% และ 3wt% เพื่อการใช้กากกาแฟทดแทนผงเขม่าดำในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์พบว่าเมื่อผสมกากกาแฟกับ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่าสูตรที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับสารตัวเติมจากผงเขม่าดำ[13]

หากแต่พื้นผิวของกากกาแฟนั้นมีความเป็นขรุขระจึงมีการปรับปรุงลักษณะดังกล่าว โดยการดัดแปลงพื้นผิวผลงานวิจัยของ D.Garcia-Gracia และคณะ ที่ได้ศึกษาการเตรียมคอมโพสิตพอลิโพรพิลีนที่ไม่มีขั้วร่วมกับกากกาแฟที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวโดยใช้ปาล์มมิโทอิลคลอไรด์ (palmitoyl chloride) การใช้สารช่วยผสมชนิดพอลิโพรพิลีน กราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) รวมทั้งการใช้สารไฮดรอกซิล (3-Glycidyloxypropyl) trimethoxysilane (GLYMO) โดยใช้สัดส่วนของพอลิโพรพิลีน 80wt% และกากกาแฟ 20wt% ทั้งในกากกาแฟที่ไม่ผ่านการดัดแปลงกากกาแฟที่ผ่านการดัดแปลงโดยปาล์มมิโทอิลคลอไรด์ กากกาแฟที่ผ่านไฮลีนแซชันจาก GLYMO และกากกาแฟที่ไม่มีการดัดแปลงพื้นผิว 20wt% หากแต่ใช้ร่วมกับสารช่วยผสม (PP-g-MA) 2wt%

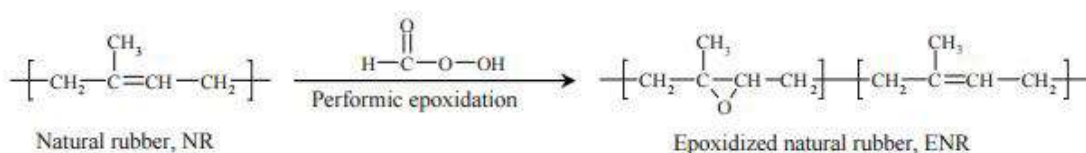
พบว่ากากกาแฟที่ใช้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 15-20 ไมครอน แต่หากเกิดการเกาะกลุ่มจะมีขนาดราว 60-80 ไมครอน ซึ่งผลของงานวิจัยแสดงสมบัติความแข็งแรงต่อการโค้งตัว และความแข็งแรงต่อการกระแทกลดลงจากพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ผสมกากกาแฟ แต่เมื่อใช้สารช่วยผสมกลับเพิ่มสมบัติเชิงกลได้ ซึ่งในงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าไม่ควรเติมกากกาแฟเกินร้อยละ 20 และการใช้สารช่วยผสมสามารถเพิ่มสมบัติของวัสดุคอมโพสิตได้ [14]

อีกทั้งงานวิจัยของ Vincenzo Alessandro Cataldo และคณะ ศึกษาการใช้กากกาแฟในการเตรียมฟิล์มเพคตินโดยใช้สารตัวเติมกากกาแฟขนาดอนุภาค 700 นาโนเมตร ที่ระดับ 10phr, 15phr, 30phr และ 40phr เกิดการปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าฟิล์มเพคตินที่ปราศจากสารตัวเติมกากกาแฟโดยเฉพาะความต้านทานต่อแรงดึงที่โดดเด่นจนสามารถใช้ทดแทนพลาสติกที่มาจากการผลิตปิโตรเคมี [15]

งานวิจัยของอนุชิต คงฤทธิ์ และจิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร ได้ศึกษาสมบัติของ คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิโพรพิลีนผสมกากกาแฟที่เติมสารช่วยผสมชนิด ไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน และพอลิโพรพิลีน กราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าการใช้สารช่วยผสมไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น และอุณหภูมิกักการหักงอจากความร้อนที่สูงสุด แต่สูตรที่ให้ค่าความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงกระแทกคือคอมโพสิตที่ใช้พอลิโพรพิลีน กราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม [16]

2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxydized natural rubber) เป็นยางดัดแปลงที่เตรียมจากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxydation reaction) ของยางธรรมชาติ โดยใช้กรดเปอร์อะซิติก หรือกรดเปอร์ฟอร์มิก ทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติตรงตำแหน่งของคาร์บอนพันธะคู่ในโมเลกุลยาง ซึ่งทำให้พันธะคู่จะแตกออกแล้วเปิดให้อะตอมของออกซิเจนมาจับจนเกิดเป็นวงแหวนออกซิเรน ซึ่งปฏิกิริยาการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ [17]

โดยสมบัติของยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติ และความเป็นขั้วจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของหมู่อีพอกไซด์ ทำให้สามารถทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้วได้ดี สามารถทนต่อโอโซนและทนต่อการซึมผ่านของอากาศได้ดี ยางธรรมชาติอีพอกไซด์จะมีค่า T_g ที่สูงกว่ายางธรรมชาติ จึงมีความแข็งแรงสูงกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ยังมีความ

เหนียวและความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันสูงกว่ายางธรรมชาติ จึงนิยมนำยางธรรมชาติ อีพอกไซดส์มาใช้เป็นสารยึดติด หรือนำไปผสมกับยางหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน พอลิอะคริลิกแอซิด เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ จะนิยมใช้ในอุตสาหกรรมกาวหรือสารยึดติด เช่น รองเท้า สี เป็นต้น แต่ยางธรรมชาติอีพอกไซดส์ก็จะมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางธรรมชาติ เช่น ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาดที่ลดลง

โดยงานวิจัยของ Sengloyluan et al ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดส์เพื่อเป็นสารช่วยผสมที่หม้ออีพอกไซดส์ระดับ 10%, 38% และ 51% ที่ปริมาณ 7.5-10.0phr เพื่อเป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกา ซึ่งการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดส์เป็นสารช่วยผสมสามารถปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมซิลิกากับยางธรรมชาติ ทำให้ซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดีส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณของหม้ออีพอกไซดส์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดส์ร้อยละ 51 ปริมาณ 7.5phr แสดงค่าสมบัติเชิงกลที่สูงสุด[18]

ปญญาณิช อินทรพัฒน์ (2555) [19] ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่มีการนำขี้มูลมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เช่น เส้นใยขี้มูล ไตแก เส้นใยกาบมะพร้าวและเส้นใยปาล์ม [16] จะให้ระยะเวลาการสุกก่อนกำหนด และเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางสั้นลง ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงในช่วง 6-13 MPa และให้ระยะยืด ณ จุดขาด 650-750 % และให้ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 45-66 Shore A นอกจากนี้ยังรายงานถึงการนำผงขี้มูลมาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง ไตแก ผงถั่วแกลบ ผงกระดองปลาหมึก และผงเปลือกไข่ไก่ [20,21] เป็นต้น พบว่าสมบัติทางเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ผงขี้มูลดังกล่าว จะมีสมบัติเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกไซดส์ โดยปริมาณหม้ออีพอกไซดส์เพิ่มขึ้นจะให้สมบัติเพิ่มสูงขึ้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wu, et al. (2015) [22] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติวัสดุคอมโพสิตชีวภาพจาก พอลิแลคติกผสมกากกาแฟ (spent coffee ground:SCG) โดยทำการกราฟต์มาลิลิคแอนไฮไดรึบนพอลิแลคติก (PLA-g-MA) และใช้กากกาแฟที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิล ออโรซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate, TEOS) เรียกว่า TSCG เพื่อเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากพอลิแลคติกผสมกับกากกาแฟที่ปรับปรุงพื้นผิวใช้ชื่อ (PLA-g-MATSCG) เปรียบเทียบกับพอลิแลคติกผสมกากกาแฟ (PLA/SCG) พบว่าการผสมกากกาแฟจะช่วยลดอุณหภูมิการแปรรูปให้ลดต่ำลง โดย PLA-g-MATSCG จะมีอุณหภูมิที่หลอมต่ำ และความต้านทานต่อน้ำได้ดีกว่า PLA/SCG โดยวัสดุคอมโพสิตทั้ง 2 ชนิดยังคงสมบัติการเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ และอัตราเร็วในการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟทั้งแบบที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงพื้นผิว

Siriwong, et al (2018) [23] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของกากกาแฟ เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางเปรียบกับสูตรที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิว โดยทำการศึกษาปริมาณกากกาแฟที่ปริมาณ 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 phr โดยเทคนิคแรกที่ทำกรปรับปรุงพื้นผิวของกากกาแฟ คือ การปรับปรุง

ด้วยตัวไซเลนชนิดบิส ไตรเอท็อกซีซิลิลโพรพิล เตตระซัลไฟด์ (*bis(triethoxysilylpropyl) tetrasulfide, TESPT*) โดยใช้ไซเลน 8% ของปริมาณกากกาแฟ (NR/SCG) เทคนิคที่สอง คือ การผสมร่วมกับยางธรรมชาติอีพอกไซต์ (ENR50) ในรูปสารละลาย (LENR-SCG) ผลการศึกษาพบว่าเวลาเริ่มต้นการสุก (scorch time) และเวลาการวัลคาไนซ์ลดลงต่ำกว่า 50% โดย TESPT-SCG ใช้เวลาการคงรูปสั้นที่สุด ซึ่งเวลาดังกล่าวสั้นกว่าคอมโพสิตของ LENR-SCG และ NR/SCG ผู้วิจัยได้อธิบายถึงองค์ประกอบของกากกาแฟที่มีส่วนผสมของโปรตีน และสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในกากกาแฟช่วยกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้พบว่าปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มสูงขึ้นเห็นได้จากความชันกราฟทอร์ค ทั้งนี้เป็นเพราะไซเลนมีส่วนประกอบของกำมะถัน จึงส่งผลให้ปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงในองค์ประกอบของกากกาแฟก็ยังมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ เช่น MgO ช่วยเสริมให้ปริมาณการเชื่อมขวางเพิ่มสูงขึ้น 21% และสมบัติทางเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น โดยค่า 100% โมดูลัสสูงสุด 0.43 MPa (เพิ่มขึ้น 13.5%) ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด 23 MPa (เพิ่มขึ้น 15%) และความแข็งสูงสุด 35 shore A (เพิ่มขึ้น 5.8%)

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือและวิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ลักษณะเป็นแท่งยางแห้งสีเหลืองใสขนาด 30 กิโลกรัม มีความถ่วงจำเพาะ 0.92 ไม่มีสิ่งปนเปื้อนตามมาตรฐานยางแท่ง ผลิตโดยบริษัทฉลองอุตสาหกรรม น้ำยางข้น ประเทศไทย

3.1.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 หรือเกรด ENR25 และ ENR50 ซึ่งใช้เป็นสารช่วยผสม ผลิตโดยบริษัทเมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) จังหวัด สุราษฎร์ธานี ประเทศไทย

3.1.3 สารกระตุ้นชนิดซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เป็นสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะผลึกสีขาวขนาดเล็ก น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 81.38 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 5.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1975 °C มีหน้าที่เป็นสารกระตุ้นให้สารตัวเร่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบในยาง โดยบริษัทแลนเซสส์ ประเทศไทย

3.1.4 สารกระตุ้นกรดสเตียริก

กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นกรดไขมันที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $C_{18}H_{36}O_2$ ลักษณะเป็นผลึกสีขาว ผิวมันวาว ไม่ละลายน้ำ มีน้ำหนักโมเลกุล 284.48 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 70°C จุดหลอมเหลวที่ 383 °C ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบในยาง โดยบริษัทแลนเซสส์ ประเทศไทย

3.1.5 สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันชนิดไอโซโพรพิลฟีนิลีนไดเอมีน

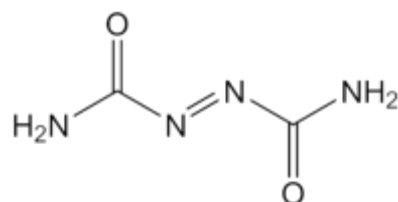
ไอโซโพรพิลฟีนิลีนไดเอมีน (N-Isopropyl-N'-phenyl-1,4-phenylenediamine; IPPD) (N-Isopropyl-N'-phenyl-1, 4-phenylenediamine; IPPD) ซึ่งมีลักษณะเม็ดสีน้ำตาลเข้ม น้ำหนักโมเลกุล 226.31 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวที่ 76°C จุดเดือด 161 °C ที่ระดับ 760 มิลลิเมตรปรอท โดยบริษัทแลนเซสส์ ประเทศไทย

3.1.6 สารตัวเร่งชนิดเทอร์เชียรีบิวทิลเบนโซไทอาซอลซัลโฟนาไมด์

เทอร์เชียรีบิวทิลเบนโซไทอาซอลซัลโฟนาไมด์ (N-Tertiarybutyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS) สูตรทางเคมี $C_{11}H_{14}N_2S_2$ น้ำหนักโมเลกุล 238.35 กรัมต่อโมล มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวเทา ความหนาแน่นในช่วง 1.26-1.32 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยบริษัทแลนเซสส์ ประเทศไทย

3.1.7 สารฟลูซูปเปอร์เซลล์อีวีเอบี 3

สารฟลูซูปเปอร์เซลล์อีวีเอบี 3 (Supercell EVA-B3) ซึ่งเป็นสารประกอบ อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide) ลักษณะเป็นผงสีเหลือง อุณหภูมิการสลายตัวที่ 133-139 °C ให้ปริมาตรแก๊ส 147-157 มิลลิลิตรต่อกรัม สูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.1 ผลิตโดยบริษัทเอ.เอฟ.ซูปเปอร์เซลล์ จำกัด



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของสารฟลูซูปเปอร์เซลล์อีวีเอบี 3

3.1.8 สารวัลคาไนซ์กำมะถัน

กำมะถัน (Sulfur) มีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลือง น้ำหนักโมเลกุล 32.065 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 2.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวเท่ากับ 115.21 °C จุดเดือด 444.6 °C ผลิตโดยสยามเคมีคอลพับบลิค Siam Chemicals Public ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) เป็นเครื่องผสมยางแบบเปิดใช้เพื่อผสมยางสารและสารเคมีเข้าด้วยกัน โดยลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1:1.2 รุ่น YFM 160 B ประเทศจีน ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery Co., Ltd แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

3.2.2 เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (Moving Die Rheometer, MDR) ใช้เพื่อหาเวลาในการวัลคาไนซ์ (Cure time) โดยเครื่องดังกล่าวไม่มีโรเตอร์ ประกอบด้วยตาย (die) ด้านบนคงที่ ส่วนด้านล่างเคลื่อนที่ทำมุมบิด 2° ผลิตโดยบริษัท Alpha technologies Services Inc รุ่น 36AIG 2953 ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

3.2.3 เครื่องทดสอบความหนืดมูนี่

เครื่องทดสอบความหนืดมูนี่ (Mooney viscometer, MV2000) ใช้วัดความหนืดของยางดิบและยางผสมสารเคมี วัดความหนืดจากแรงบิด (Torque) ที่เกิดบนจานโลหะขณะหมุนในเนื้อยางด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาที หน่วยของความหนืดคือ Mooney Viscosity (MV) จากเครื่อง Mooney Viscosity ;MV2000 รุ่น 24 SIE 2338 ผลิตโดยบริษัท Alpha technologies Services Inc ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความหนืดมูนิ

3.2.4 เครื่องอัดเบ้าระบบไฮดรอลิก

เครื่องอัดเบ้าระบบไฮดรอลิก (Compression molding) ใช้เพื่ออัดยางคอมพาวนด์เข้าเบ้าพิมพ์โดยระบบไฮดรอลิก ซึ่งให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า โดยสามารถให้ความดันสูงสุด 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แทนวงเบ้าขนาด $45 \times 45 \text{ cm}^2$ โดยเครื่องอัดเบ้าที่ใช้เป็นรุ่น LCC ผลิตโดยบริษัท TANG-MASTER CO., Ltd. ประเทศไต้หวัน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดเบ้าระบบไฮดรอลิก

3.2.5 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นตัวอย่าง

แม่พิมพ์เบ้าทำจากเหล็กกล้า ประกอบด้วย 3 ชั้น คือ ฝาบน ชั้นกลาง และฝาล่าง โดยเบ้าชั้นกลางมีขนาด $13 \times 13 \text{ cm}^2$ มีความหนา 0.2 cm และความหนา 0.9 cm เพื่อใช้ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะเบ้าขึ้นรูปชิ้นตัวอย่าง ด้านซ้ายหนา 0.2 cm และด้านขวาหนา 0.9 cm

3.2.6 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความต้านทานต่อแรงดึง

ชุดตัดตัวอย่างใช้สำหรับตัดชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ในรูปดัมเบลล์แบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412 เพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

3.2.7 เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างความต้านทานต่อการฉีกขาด

ชุดตัวอย่างใช้สำหรับตัดชิ้นตัวอย่างแบบมุม (Angle) ตามมาตรฐาน ASTM D624 เพื่อทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) มอดูลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ของยางวัลคาไนซ์ โดยใช้โหลดเซลล์ (load cell) ขนาด 1000 นิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเครื่อง Universal testing machine รุ่น 3365 ผลิตโดยบริษัท Instron ประเทศสหรัฐอเมริกา ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

3.2.9 เครื่องวัดความแข็ง

เครื่องวัดความแข็ง Shore Durometer ชนิด Shore A ที่ใช้วัดความแข็งของยางหลังผ่านการวัลคาไนซ์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ใช้เครื่องทดสอบรุ่น Frank GmbH ผลิตโดยประเทศเยอรมัน แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.2.10 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทดสอบสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยใช้ชิ้นตัวอย่างจากชิ้นทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ซึ่งชิ้นตัวอย่างถูกทำให้แห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ และหักชิ้นตัวอย่างในขณะที่ไนโตรเจน เหลวเพื่อผิวชิ้นตัวอย่างที่เรียบ เพื่อดูการกระจายตัวของรูพรุนในโฟมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่กำลัง ขยาย 50 เท่า

โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-5800LV ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.2.11 เครื่องทดสอบขนาดอนุภาคของกากกาแฟ

เครื่องทดสอบขนาดอนุภาคของกากกาแฟเป็นเครื่องทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคกากกาแฟ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคได้ตั้งแต่สารขนาด 0.01 ไมครอน ถึง 2000 ไมครอน สามารถวิเคราะห์สารได้ในลักษณะของสารแขวนลอยในของเหลว หรือของแข็งที่เป็นผงขนาดเล็ก ตามมาตรฐาน ISO 13320-1(1999) โดยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer รุ่น Analysette 22 Nanotec ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Analyzer)

3.2.12 โฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์

แผ่นยางปูพื้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมประเทศไทย 2378-2559 แสดงข้อกำหนดของแผ่นยางปูพื้นความแข็งตั้งแต่ 50-90 shore A หากแต่ในการปูพื้นภายในอาคารมักใช้ยางปูพื้นที่ความแข็งต่ำกว่า 50 shore A โฟมอีวีเอที่ใช้ในการปูพื้นภายในอาคาร Metro foam

products เป็นแผ่นโฟมปูพื้นที่มีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร ความหนา 6 เซนติเมตร จากประเทศออสเตรเลีย

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นการใช้กากกาแฟเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3.1.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟที่ใช้เป็นสารตัวเติมที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr นำกากกาแฟมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อผ่านการอบแล้วจึงนำมาร้อนแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 150 และ 425 เมช ซึ่งจะได้กากกาแฟที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 ไมครอนและเล็กกว่า 425 ไมครอนจากนั้นเก็บในภาชนะที่ปิดสนิทและแห้ง โดยก่อนใช้งานจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นบดผสมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้องกำหนดปริมาณยางและสารเคมี (batch size) เท่ากับ 800 กรัม ตามสูตรในตารางที่ 3.1 มีลำดับขั้นตอนและเวลาในผสมดังแสดงในรูปที่ 3.7 หลังจากนั้นนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์โดยเครื่องทดสอบลักษณะการสุกของยาง และนำไปขึ้นรูปโดยการอัดแบบพิมพ์ด้วยความร้อนเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล

ตารางที่ 3.1 สูตรยางผสมสารเคมีและกากกาแฟขนาด 150 และ 425 ไมครอน

Ingredients	Function	Weight (phr)
STR5L	Rubber	100
ZnO	Activator	5
Stearic Acid	Activator	1
TBBS	Accelerator	1
IPPD	Antioxidant	1
SCG (size 150 μ m/ 425 μ m)	Filler	0, 10, 30, 50 and 70
Sulfur	Vulcanizing agent	2.5

(Batch size 800 g)

3.3.1.2 อิทธิพลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติ

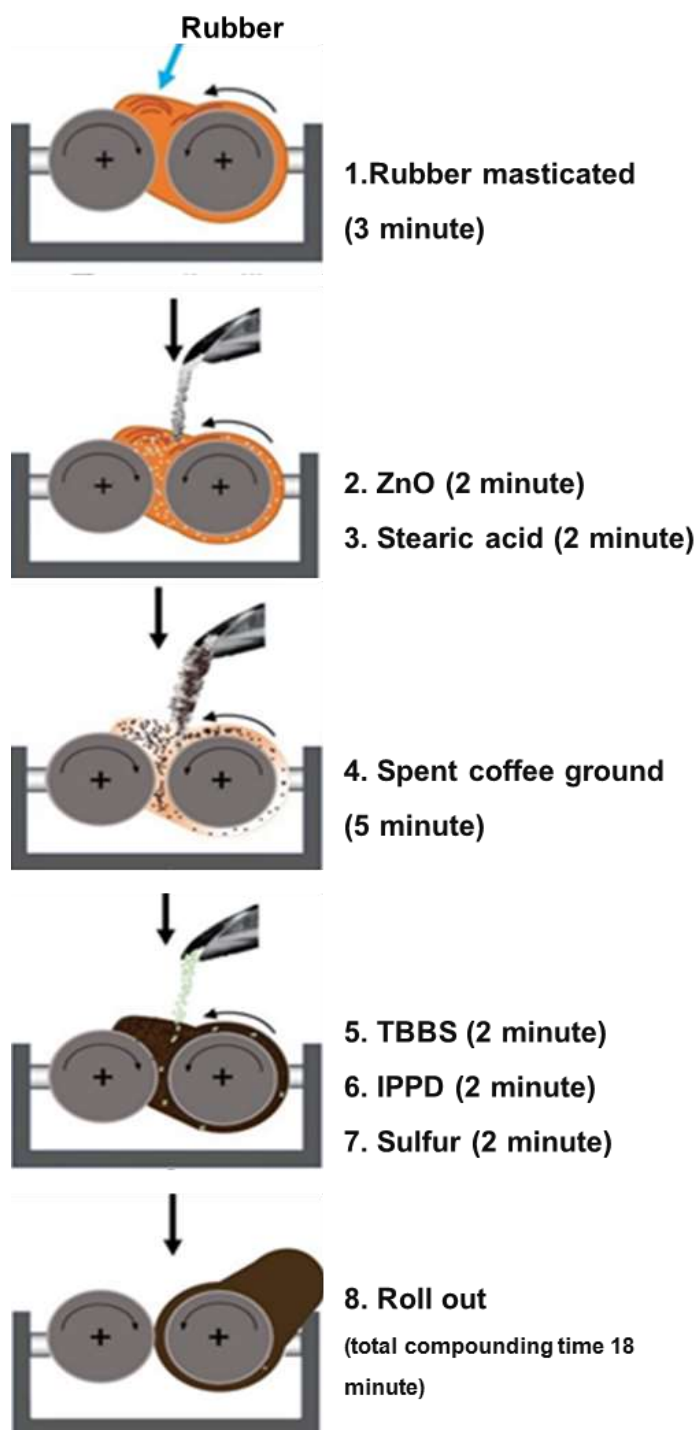
การปรับปรุงความเข้ากันโดยใช้ยางธรรมชาติกับกากกาแฟขนาด 425 ไมครอน ด้วยยางธรรมชาติอีพอกไซด ร้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) โดยเลือกใช้สัดส่วนของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพอกไซด 50 ที่สัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งศึกษาปริมาณกากกาแฟที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr กำหนดปริมาณยางและสารเคมี เท่ากับ 800 กรัม ตาม

สูตรในตารางที่ 3.1 มีลำดับขั้นตอนและเวลาในผสมดังแสดงในรูปที่ 3.7 และทำการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์โดยเครื่องทดสอบลักษณะการสุกของยาง และนำไปขึ้นรูปโดยการอัดแบบพิมพ์ด้วยความร้อนเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล

ตารางที่ 3.2 สูตรยางผสมสารเคมีและกากกาแฟที่ใช้ ENR50 เป็นสารช่วยผสม

Ingredients	Function	Weight (phr)
STR5L	Rubber	80
ENR50	Compatibilizer	20
ZnO	Activator	5
Stearic Acid	Activator	1
TBBS	Accelerator	1
IPPD	Antioxidant	1
SCG (425 μ m)	Filler	0,10,30,50 and 70
Sulfur	Vulcanizing agent	2.5

(Batch size 800 g)



รูปที่ 3.11 ลำดับและเวลาการผสมยาง สารเคมีและกากกาแฟ

3.3.1.3 ศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50

ศึกษาชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 พร้อมทั้งศึกษาปริมาณของกากกาแฟขนาด 425 ไมครอน ที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr โดยกำหนดปริมาณยางและสารเคมีเท่ากับ 800 กรัม ตามสูตรในตารางที่ 3.3 มีลำดับขั้นตอนและเวลาในผสมดังแสดงในรูปที่ 3.7 และทำการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์โดยเครื่องทดสอบลักษณะการสุกของยาง และนำไปขึ้นรูปโดยการอัดเข้าแบบพิมพ์ด้วยความร้อนเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล

ตารางที่ 3.3 สูตรยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 ผสมสารเคมีและกากกาแฟ

Ingredients	Function	Weight (phr)	
		ENR25	ENR50
ENR25	Rubber	100	-
ENR50	Rubber	-	100
ZnO	Activator	5	5
Stearic Acid	Activator	1	1
TBBS	Accelerator	1	1
IPPD	Antioxidant	1	1
SCG (425 μ m)	Filler	10,30,50 and 70	10,30,50 and 70
Sulfur	Vulcanizing agent	2.5	2.5

(Batch size 800 g)

3.3.2 การเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม

3.3.2.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟู

ศึกษาผลของปริมาณสารฟู SUPERCELL ชนิด EVA-B3 ที่ระดับ 0, 3, 5 และ 7 phr โดยใช้ยาง ENR25 ใช้กากกาแฟขนาด 425 ไมครอน ที่ปริมาณ 25 phr โดยกำหนดปริมาณยางและสารเคมี เท่ากับ 800 กรัม ตามสูตรในตารางที่ 3.4 มีลำดับขั้นตอนและเวลาในผสมดังแสดงในรูปที่ 3.7 และทำการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์โดยเครื่องทดสอบลักษณะการสุกของยาง และนำไปขึ้นรูปโดยการอัดแบบพิมพ์ด้วยความร้อนเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล

ตารางที่ 3.4 สูตรโฟมยางปูพื้นยางธรรมชาติอีพอกไซค์ร้อยละ 25 ผสมกากกาแฟ

Ingredients	Function	Weight (phr)
ENR25	Rubber	100
ZnO	Activator	5
Stearic Acid	Activator	1
TBBS	Accelerator	1
IPPD	Antioxidant	1
SCG (425 µm)	Filler	25
SUPERCELL EVA-B3	Blowing agent	0, 3, 5 and 7
Sulfur	Vulcanizing agent	2.5

(Batch size 800 g)

3.3.2.2 เปรียบเทียบสมบัติของโฟมยางปูพื้นกับโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์

สำหรับแผ่นยางปูพื้นชนิดนี้ใช้งานภายในอาคารตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 2378-2559 ครอบคลุมแผ่นยางปูพื้นที่ใช้งานทั่วไปและใช้ภายในอาคาร มีข้อกำหนดค่าความแข็งตั้งแต่ 50-90 Shore A แต่ไม่มีข้อกำหนดของยางปูพื้นที่มีความแข็งต่ำกว่า 50 Shore A โดยโฟมอีวีเอที่ใช้ปูพื้นภายในอาคารส่วนใหญ่มีความแข็งต่ำกว่า 50 Shore A และโฟมอีวีเอที่จัดจำหน่ายเชิงพาณิชย์นั้นยังไม่มีข้อกำหนดตามมาตรฐานสากล หรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่คุณสมบัติของโฟมอีวีเอจะเป็นคุณสมบัติที่กำหนดจากผู้ผลิตจัดจำหน่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ข้อมูลทางการค้าของโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์ ที่ชื่อ Metro foam products จากประเทศออสเตรเลียซึ่งมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์ Metro foam products จากประเทศออสเตรเลีย[24]

Properties	Test Method	EVA30	EVA45	EVA60	มอก. 2377-2559
Density (Kg/m ³)	ASTM D 3575	28-33	42-48	55-65	ไม่กำหนด
Hardness (Read after 2 sec.)	Shore A	15-20	20-25	25-30	50 -90 Shore A
Tensile strength (KPa)	ASTM D412	450	700	800	4000
Tear strength (KN/m)	ASTM D624	2.5	4.0	4.5	ไม่กำหนด
Elongation at break (%)	ASTM D412	200-250	250-300	250-300	150
Compression set (22h at 25 °C +24h)	ASTM D3575	<5	<5	<5	ไม่กำหนด
Compression set (22h at 70 °C 72h)	ASTM D3575	-	-	-	<40
Compressive strength (25%) (KPa)	ASTM D3575	30	45	60	ไม่กำหนด
Thermal conductivity (W/m. °C)	ASTM C518	0.040	0.042	0.043	ไม่กำหนด

3.3.3 การทดสอบ

3.3.3.1 การทดสอบความหนืดมูนี่

การทดสอบสมบัติความหนืดของยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนี่ (Mooney viscometer, MV2000) ทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D 1646 โดยการตัดยางคอมพาวนด์ 100 กรัมมาผ่านลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง 10 ครั้ง แต่ทุกครั้งให้ม้วนยางเป็นก้อนแน่นแล้วใส่ผ่านลูกกลิ้งใหม่ เมื่อผ่านยางในครั้งที่ 10 ให้ออกยางเป็นแผ่น พักยางไว้ 30 นาที ก่อนนำไปทดสอบ ซึ่งจะนำไปตัดเป็นตัวอย่างทดสอบ 2 ชิ้น ลักษณะวงกลมแบน โดยมีน้ำหนักชิ้นละ 12.5 กรัม ชิ้นตัวอย่างชิ้นหนึ่งเจาะรูตรงกลาง อุณหภูมิเครื่องและโรเตอร์ก่อนทดสอบ 30 นาที จากนั้นนำตัวอย่างประกบกับโรเตอร์ชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูนำไปประกบตรงด้านล่าง ชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้เจาะรูวางไว้ด้านบน จากนั้นนำตัวอย่างและโรเตอร์ใส่ในตัวเครื่อง เครื่องจะบันทึกผลออกมาอยู่ในรูปค่าความหนืดมูนี่ตามสมการ (3.1)

การคำนวณ

		ความหนืดมูนี่	=	ML(1+4), 100 °C	(3.1)
เมื่อ	M	คือ		Mooney viscosity ของยาง	
	L	คือ		โรเตอร์ทดสอบขนาดใหญ่ (ถ้าใช้โรเตอร์ขนาดเล็กใช้สัญลักษณ์ S)	
	1	คือ		เวลาที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนทดสอบ	
	4	คือ		เวลาที่ใช้ในการทดสอบหลังอุ่นยาง	
	100	คือ		อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ	

3.3.3.2 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์

การทดสอบพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ ทำ การทดสอบด้วยเครื่อง Moving die rheometer, MDR2000 ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-95 โดยการตัดชิ้นตัวอย่าง เป็นรูปวงกลมให้มีน้ำหนักชิ้นตัวอย่างประมาณ 4.5 กรัม จากนั้นตั้งค่าการทดสอบแล้วอุ่นเครื่อง MDR 15 นาที เครื่องบันทึกผลค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ค่าเวลาเริ่มต้นวัลคาไนซ์ (scorch time, t_{s2}) เวลาการวัลคาไนซ์ (cure time, t_{c90}) และดัชนีการวัลคาไนซ์ (CRI)

3.3.3.3 การเตรียมชิ้นทดสอบยางวัลคาไนซ์

การเตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบสมบัติทางเชิงกล โดยกระบวนการกดอัดเข้าแบบพิมพ์ด้วยเครื่องอัดชนิดมีความดัน (Compression molding) โดยใช้เบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.2$ cm³ จะใช้ยางคอมพาวนด์แต่ละสูตรประมาณ 37 กรัม ในยางคอมพาวนด์ที่เป็นชิ้นตัวอย่างแบบยางตัน ส่วนชิ้นตัวอย่างที่ต้องขึ้นรูปเป็นโฟมยางต้องขึ้นรูปกับเบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.9$ cm³ จะใช้ยางคอมพาวนด์ในการขึ้นรูปตัวอย่างขึ้นละ 62 กรัม คิดเป็นร้อยละ 40 ของน้ำหนักชิ้นตัวอย่าง อุ่นเครื่องอัดเบ้าและเบ้าขึ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ที่ซึ่งไว้นำใส่เบ้าแล้วขึ้นรูปตามเวลาวัลคาไนซ์ (t_{c90}) ที่ได้จากการทดสอบ MDR

3.3.3.4 การทดสอบความหนาแน่น

เตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบความหนาแน่นของโฟม ENR25 ตามมาตรฐาน ASTM D 1056 type 2 Class A โดยตัวอย่างมีขนาด $13 \times 13 \times 0.9$ cm³ โดยคำนวณปริมาตรของโฟมยาง วัดขนาดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ซึ่งใช้ตัวอย่างสูตรละ 3 ชิ้น และชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง คำนวณหาค่าความหนาแน่นตามสมการ (3.2)

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} \quad D = m/v \quad (3.2)$$

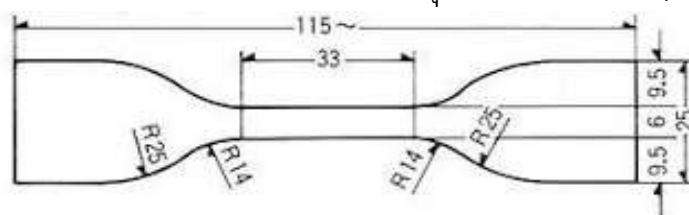
เมื่อ m คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่าง
 v คือ ปริมาตรในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3.3.5 การทดสอบความแข็ง

เตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบทรงกระบอกมีความหนา 9 mm. ทดสอบโดยเครื่อง Durometer หน่วยวัดแบบ Shore A ทำตามมาตรฐาน ASTM 2240-97 การวัดจำนวน 3 จุด บนชิ้นตัวอย่างโดยบริเวณของจุดทดสอบต้องไม่อยู่บริเวณขอบชิ้นงานและรายงานเป็นค่าเฉลี่ย

3.3.3.6 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

เตรียมชิ้นตัวอย่างชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลด้วย Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ตัดชิ้นตัวอย่างละ 5 ชิ้น ทดสอบโดยเครื่อง Universal testing machine ใช้ความเร็วในการดึงตัวอย่าง 500 มิลลิเมตร/นาที และคำนวณค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100%, 300%, 500%, ความต้านทานต่อแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ตามสมการ (3.3) – (3.5)



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะชิ้นตัวอย่างความต้านทานต่อแรงดึง

การคำนวณ

$$\text{Modulus (MPa)} = F/A \quad (3.3)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างยืดที่ 100, 300 และ 500% (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่างก่อนทดสอบ (mm^2)

$$\text{Tensile strength (MPa)} = F/A \quad (3.4)$$

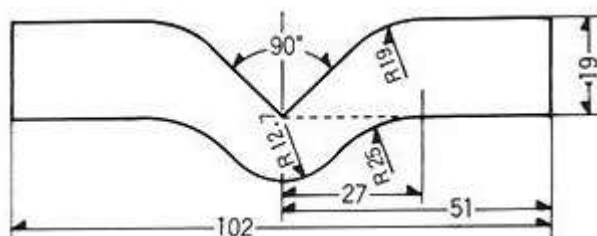
เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างขาด (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นตัวอย่างก่อนทดสอบ (mm^2)

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times (L - L_0) / L_0 \quad (3.5)$$

เมื่อ L คือ ระยะยืดหลังดึง (cm)
 L_0 คือ ระยะยืดก่อนดึง (cm)

3.3.3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

เตรียมชิ้นตัวอย่างขึ้นทดสอบเป็นแบบมุม (angle) ตามมาตรฐาน ASTM D 624 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตัดชิ้นตัวอย่างละ 5 ชิ้น นำมาทดสอบโดยเครื่อง Universal testing machine ใช้ความเร็วในการดึงตัวอย่าง 500 มิลลิเมตร/นาที และคำนวณความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามสมการ (3.6)



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะชิ้นตัวอย่างความต้านทานการฉีกขาด

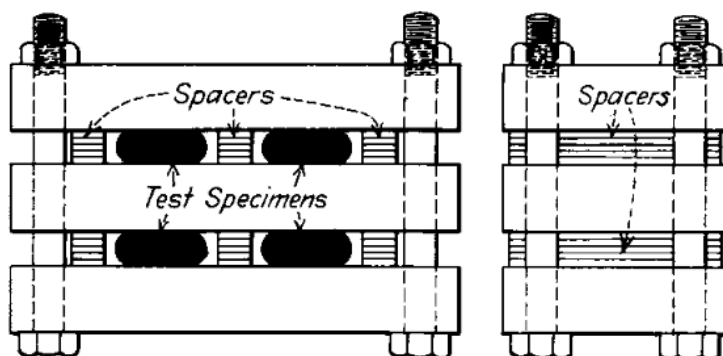
การคำนวณ

$$\text{Tear strength (N/mm)} = F/D \quad (3.6)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงให้ตัวอย่างฉีกขาด (N)
 D คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่างก่อนทดสอบ (mm)

3.3.3.8 การทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัด

เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ เป็นทรงกระบอกที่มีความสูง 12.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 29.5 mm ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดตามมาตรฐาน ASTM D1056 ตัดชิ้นตัวอย่างละ 5 ชิ้น นำตัวอย่างใส่ในชุดอุปกรณ์ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยใช้แท่งเหล็กกั้นระหว่างแผ่นชั้นกดเพื่อให้ขึ้นทดสอบยุบตัวลง 50% จากความสูงเดิม จากนั้นนำชุดทดสอบเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิที่ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาตามกำหนดนำชิ้นตัวอย่างออกจากชุดทดสอบแล้วพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้ววัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง แล้วคำนวณค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัด ตามสมการ (3.7)



รูปที่ 3.14 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัด
การคำนวณ

$$\text{Compression set (\%)} = \frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_n)} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ	t_0	คือ	ความหนาก่อนทดสอบ (mm)
	t_1	คือ	ความหนาหลังการทดสอบ (mm)
	t_n	คือ	ความหนาของแท่งคั้น (6.3mm)

3.3.3.9 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่ง

ทดสอบสภาวะการทดสอบการบ่มเร่งตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยใช้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 แบบ die C และตามมาตรฐาน ASTM D624 ชิ้นตัวอย่างแบบมุ่มนำตัวอย่างทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อน เมื่อครบกำหนดตามเวลา นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็ง จากนั้นนำมาคำนวณการเปลี่ยนแปลงหลังผ่านการบ่มเร่ง (P) ดังสมการ (3.8)

การคำนวณ

$$P (\%) = \frac{[A-B]}{B} \times 100 \quad (3.8)$$

เมื่อ	P	คือ	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง
	A	คือ	สมบัติของยางหลังการบ่มเร่ง
	B	คือ	สมบัติของยางก่อนบ่มเร่ง

3.3.3.10 การทดสอบสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

การตรวจลักษณะทางสัญญาณวิทยของพื้นผิวกากกาแฟ และฟองน้ำยางปูพื้นที่เตรียมได้ โดยการเตรียมชิ้น ทดสอบของโฟมขนาด 6 × 6 มิลลิเมตร จากนั้นทากาวติดเทปกาวใสลงบนแท่งทองเหลือง (Stub) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดชิ้นตัวอย่างเตรียมมาวางลงไปโดยการหันด้านที่ต้องการทดสอบไว้ด้านบน จากนั้นนำตัวอย่างไปฉาบผิวด้วยทอง เพื่อให้ผิวของชิ้นตัวอย่างมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง (Sputter coater) โดยทำการฉาบทองเป็นเวลา 120

วินาที ความหนาของผิวฉาบควร อยู่ระหว่าง 10-20 นาโนเมตร เพื่อให้ได้รายละเอียดของภาพที่ชัดเจนและป้องกันเกิดแสงสว่างจ้าเป็นจุดๆ ในภาพ แล้วนำชิ้นตัวอย่างของโฟมที่ฉาบผิวด้วยทองแล้วไปตรวจสอบตรวจ ลักษณะทางสัญญาณวิทยาโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.3.3.11 การวัดขนาดอนุภาคของกากกาแฟ

การวัดขนาดอนุภาคของกากกาแฟโดยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer รุ่น Analysette 22 Nanotec ซึ่งเตรียมกากกาแฟที่ผ่านการกรองผ่านตะแกรง 150 เมช และ 425 เมช ตามมาตรฐาน ISO 13321 ทำให้แห้งสนิทจากการอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกากกาแฟใส่ในช่องใส่ตัวอย่างให้ลำแสงเลเซอร์ส่องผ่านให้กระทบกับตัวอย่างที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหรืออากาศขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง โดยลำแสงนั้นจะกระเจิงออกไปหลายทิศทางในแบบคงที่ (Laser Diffraction-Static Light Scattering) โดยใช้ตัววัดแสงซึ่งติดตั้งคงที่ ณ มุมต่างๆ (Fixed Angle Detectors) ทำการวัดความเข้มแสงในทุกมุม จากนั้นคำนวณขนาดอนุภาคจากการกระเจิงแสงหรือการเลี้ยวเบนของลำแสงมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ หาขนาดและการกระจายตัว (Particle Size Distribution) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ตั้งแต่ 0.01 ไมครอนถึง 2000 ไมครอน

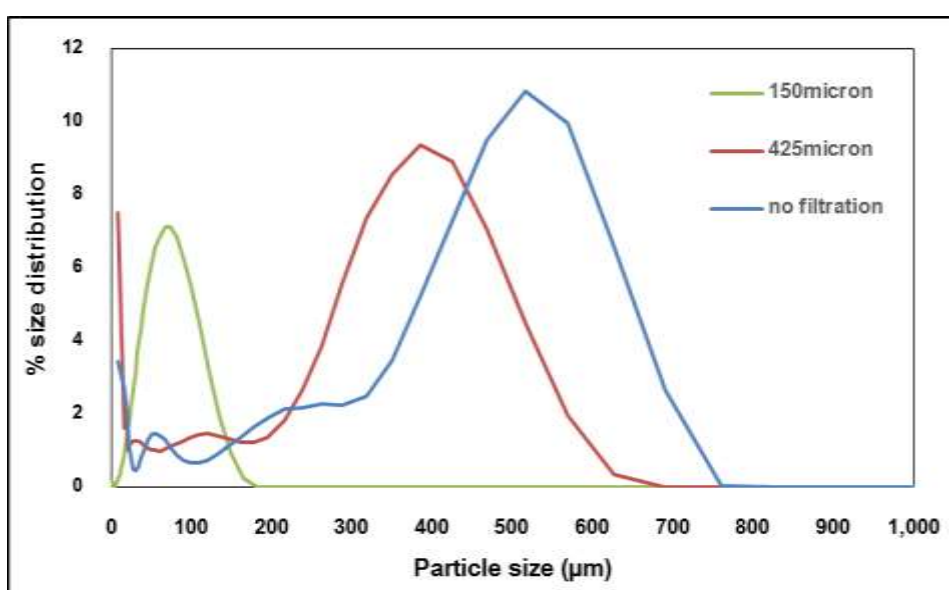
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาเบื้องต้นในการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม

4.1.1 ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ

จากการนำกากกาแฟที่อบแห้งร้อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมครอน และ 425 ไมครอน ได้นำกากกาแฟมาตรวจวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกากกาแฟ ผลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากกาแฟ

จากการทดสอบหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของกากกาแฟ พบว่ากากกาแฟก่อนกรองแยกขนาดจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 520 ไมครอน เมื่อผ่านการกรองผ่านตะแกรง 2 ขนาด คือ 150 ไมครอน และ 425 ไมครอน โดยกากกาแฟที่ผ่านการกรองที่ขนาดตะแกรง 425 ไมครอน พบกากกาแฟมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 425 ไมครอน ส่วนในกากกาแฟที่ผ่านการกรองที่ 150 ไมครอน พบขนาดอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 80 ไมครอน แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ในการร่อนแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมครอนจะได้ปริมาณกากกาแฟค่อนข้างน้อยและใช้เวลาถึง 3 ชั่วโมงได้ปริมาณกากกาแฟผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมครอน ปริมาณ 20% ของปริมาณกากกาแฟ ในขณะที่กากกาแฟผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน จะให้ปริมาณกากกาแฟปริมาณ 60% ของปริมาณกากกาแฟ

4.1.1.1 ผลของอนุภาคของกากกาแฟต่อสมบัติของยางคอมพาวนด์

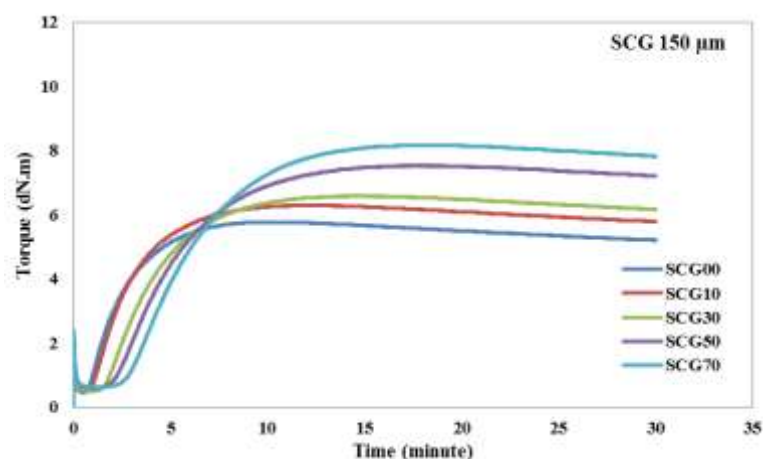
ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟที่ใช้เป็นสารตัวเติมที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

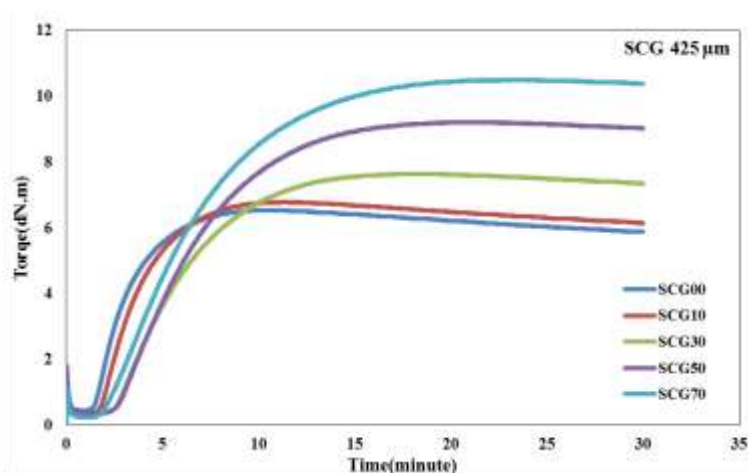
SCG	Formulas	Δt_{s1} (min)	Δt_{c90} (min)	ΔM_L (dN.m)	ΔM_H (dN.m)	$\Delta M_H - M_L$ (dN.m)	ΔCRI (min ⁻¹)	ΔM_{L1+4} (100°C)
Particle size (150 μ m)	SCG10	0.13	0.86	0.08	0.52	0.44	-3.74	-3
	SCG30	0.62	2.29	0.12	0.95	0.83	-7.15	-5
	SCG50	1.31	4.22	0.13	1.75	1.62	-10.25	-15
	SCG70	2.10	5.13	0.16	2.40	2.24	-10.49	-16
Particle size (425 μ m)	SCG10	1.55	2.02	-0.13	0.05	0.18	-2.62	-2
	SCG30	1.61	4.81	-0.09	1.11	1.20	-11.07	-1
	SCG50	1.65	5.99	-0.07	2.68	2.75	-12.96	-3
	SCG70	1.76	6.82	-0.21	3.96	4.17	-13.91	-6

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิที่ 150 °C ของยางคอมพาวนด์ที่ใช้กากกาแฟที่มีขนาดอนุภาค 150 และ 425 ไมครอน พบว่าการเติมกากกาแฟจะส่งผลให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ยาวนานเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องด้วยพื้นผิวของกากกาแฟมีหมู่ไฮดรอกซิลกรุป (-OH) ทำให้บริเวณพื้นผิวกากกาแฟเกิดการดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์ ส่งผลให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์นานขึ้น [25] สอดคล้องกับงานวิจัยของ POH และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากกาแฟขนาดอนุภาค 150 และ 425 ไมครอน พบว่าขนาดกากกาแฟ 425 ไมครอน จะทำให้เวลาในการวัลคาไนซ์ยาวนานกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใช้กากกาแฟที่ขนาดอนุภาค 150 ไมครอน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากกากกาแฟที่ขนาดอนุภาคเล็ก 150 ไมครอน มีพื้นผิวสัมผัสมากเกิดการเกาะกลุ่มรวมกัน (agglomerate) ได้ง่าย ทำให้พื้นผิวสัมผัสลดลง เกิดการดูดซับสารเคมีกลุ่มสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้น้อยกว่า จึงส่งผลให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางสั้นกว่าเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบความหนืดมูนี้ พบว่าความหนืดตั้งต้นของยางที่ไม่เติมกากกาแฟไม่เท่ากัน เนื่องจากแท่งเกรด STR5L ที่ใช้มีความต่างในเรื่องของเวลาในการเก็บรักษา ยาง และมาจากต่างบริษัทจึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนี้ได้โดยตรง แต่อย่างไรก็ตามหากทำการเปรียบเทียบความต่างของความหนืดมูนี้ก่อนและหลังการเติมกากกาแฟ โดยความต่างของหนืดมูนี้เริ่มต้นที่ไม่เติมกากกาแฟ 150 ไมครอน (48 MU) กับปริมาณกากกาแฟ 70phr (32 MU) ความหนืดมูนี้ลดลงจากเดิมไป 16 หน่วย ในขณะที่ความต่างของหนืดมูนี้ที่ไม่เติมกากกาแฟ 425 ไมครอน (35 MU)

กับที่ปริมาณกากกาแฟ 70phr (29 MU) ความหนืดมูนี้ลดลงจากเดิมไป 6 หน่วย การที่ความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวนด์ที่เติมกากกาแฟขนาด 150 ไมครอน ลดลงมากกว่าการเติมกากกาแฟ ขนาด 425 ไมครอน ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากากกาแฟ ขนาดอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่าขนาดอนุภาคใหญ่ ส่งผลให้การบดผสมให้กระจายตัวในยางทำได้ยากกว่า อีกทั้งกากกาแฟขนาด 150 ไมครอนจะเกาะเป็นกลุ่มก้อนทำให้ต้องเพิ่มแรงเฉือนขณะบดผสม (ปรับระยะห่างของลูกกลิ้งให้แคบลง) ให้มากขึ้น เพื่อให้กากกาแฟกระจายตัวในยางได้ดีตามระยะเวลาที่กำหนดของสภาวะการบดผสมแต่ละครั้ง โดยควบคุมเวลาการบดผสมให้เท่ากันและใช้ปริมาณยางและสารเคมีโดยรวมให้มีน้ำหนัก 800 กรัม จากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นสาเหตุให้ความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวนด์ที่ผสมกากกาแฟขนาดอนุภาค 150 ไมครอนที่ปริมาณ 70phr มีความหนืดมูนี้ที่เปลี่ยนแปลงไปมากกว่าการผสมด้วยกากกาแฟ ขนาดอนุภาค 425 ไมครอนที่ปริมาณ 70 phr



รูปที่ 4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ผสมกากกาแฟขนาดอนุภาค 150 ไมครอน



รูปที่ 4.3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ผสมกากกาแฟขนาดอนุภาค 425 ไมครอน

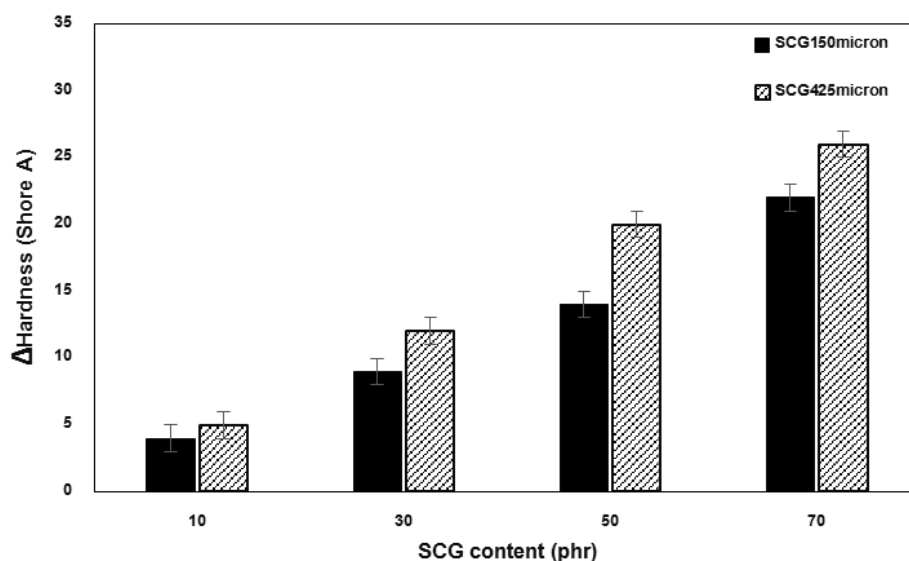
4.1.1.2 ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟต่อสมบัติทางเชิงกล

เมื่อนำยางคอมพาวนด์มาทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดเข้าเบ้าแบบใช้ความดันที่อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลาการสุก (t_{c90}) และทำการทดสอบความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

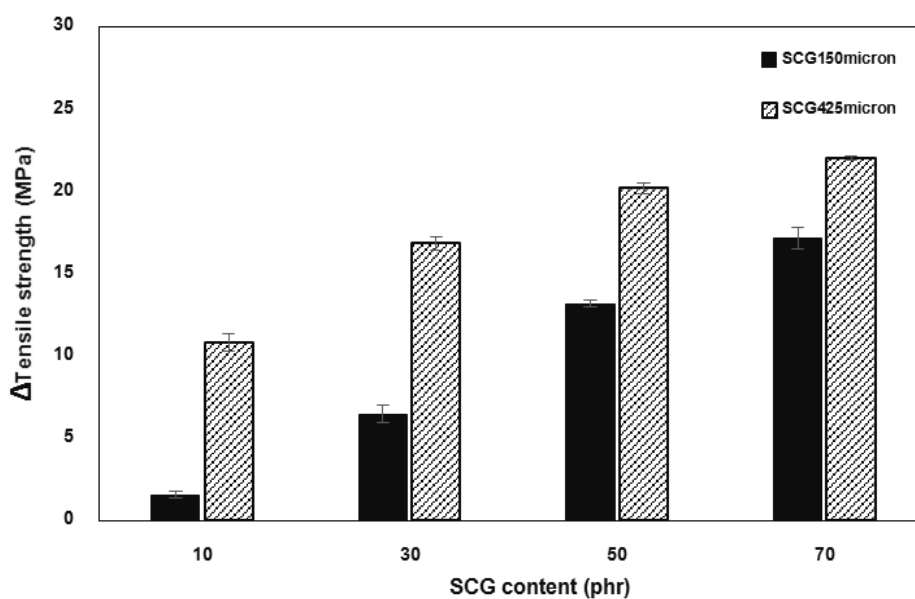
ตารางที่ 4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงของขนาดอนุภาคและปริมาณกากกาแฟต่อสมบัติทางเชิงกล

SCG	Formulas	Δ Hardness (shore A)	Δ Tensile Strength (MPa)	Δ Elongation at break (%)	Δ Tear (N/mm)
Particle size (150 μ m)	SCG10	4 \pm 1	-1.56 \pm 0.21	-76 \pm 30	-2.86 \pm 2.37
	SCG30	9 \pm 1	-6.48 \pm 0.51	-92 \pm 38	-10.27 \pm 1.73
	SCG50	14 \pm 1	-13.19 \pm 0.17	-162 \pm 57	-13.93 \pm 1.99
	SCG70	22 \pm 1	-17.15 \pm 0.64	-202 \pm 32	-14.61 \pm 1.36
Particle size (425 μ m)	SCG10	5 \pm 1	-10.80 \pm 0.52	-55 \pm 42	-3.60 \pm 0.92
	SCG30	12 \pm 1	-16.84 \pm 0.38	-46 \pm 97	-12.11 \pm 0.92
	SCG50	20 \pm 1	-20.19 \pm 0.36	-52 \pm 28	-12.67 \pm 0.59
	SCG70	26 \pm 1	-22.03 \pm 0.13	-187 \pm 40	-15.89 \pm 1.19

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 พบว่าผลของขนาดกากกาแฟมีผลต่อค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์เพียงเล็กน้อยโดยที่ระดับกากกาแฟที่ปริมาณ 10 phr ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป 4-5 shore A จากสูตรเริ่มต้นที่ไม่มีการเติมกากกาแฟ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟที่ 30, 50 และ 70phr ค่าความแข็งของยางที่ผสมกากกาแฟขนาดอนุภาค 150 ไมครอน จะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 9, 14 และ 22 shore A ซึ่งต่ำกว่ากากกาแฟขนาด 425 ไมครอนที่มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น 12, 20 และ 26 shore A เนื่องจากสาร ตัวเติมขนาดใหญ่สามารถเพิ่มความแข็งได้มากกว่าสารตัวเติมชนิดเดียวกันที่มีขนาดเล็กกว่า อีกทั้งการเพิ่มปริมาณกากกาแฟจะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น



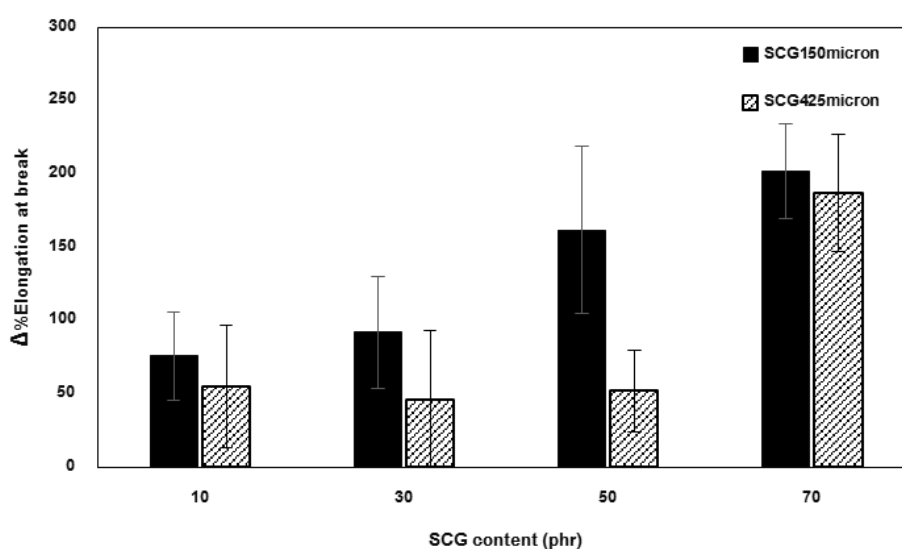
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งในยางธรรมชาติที่ผสมร่วมกับกากกาแฟ



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่อแรงดึงในยางธรรมชาติที่ผสมร่วมกับกากกาแฟ

ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟมีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงในยางที่ไม่มี การเติมกากกาแฟมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงถึง 23.31 MPa และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น โดยที่ระดับกากกาแฟ 10, 30, 50 และ 70phr จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง

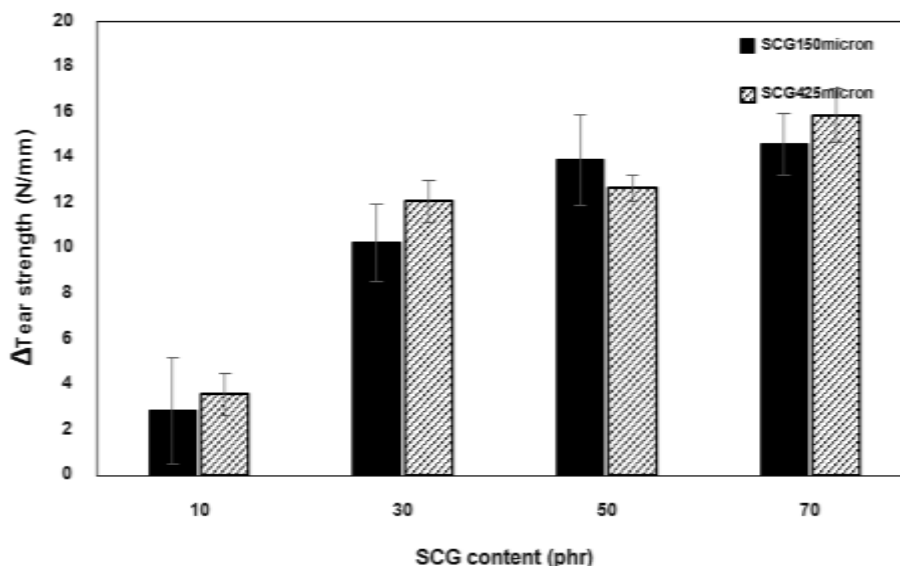
1.56, 6.48, 13.19 และ 17.15 MPa ส่วนในกากกาแฟที่ขนาดอนุภาค 425 ไมครอน จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงจากสูตรที่ไม่มีการเติมกากกาแฟ 10.80, 16.84, 20.19 และ 22.03 MPa ซึ่งเห็นได้ว่ากากกาแฟที่ขนาดใหญ่จะมีสมบัติต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าขนาดอนุภาคเล็ก ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่ากากกาแฟมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกไซด์ที่ความเป็นขั้ว ในขณะที่ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงเกิดอันตรกิริยาระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติต่ำ และมีความเข้ากันได้ยาก จึงส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดกากกาแฟ พบว่าสูตรที่ใช้กากกาแฟขนาดอนุภาค 425 ไมครอน มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าสูตรที่ใช้กากกาแฟขนาดอนุภาค 150 ไมครอน สอดคล้องทฤษฎีที่อธิบายไว้ว่าขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะสามารถเสริมแรงในยางได้ดีกว่าสารตัวเติมขนาดอนุภาคใหญ่ เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่ามีโอกาสดังกล่าวอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมได้มากกว่า จนมีความเข้ากันได้มากกว่าส่งผลให้สมบัติทางเชิงกลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้สารตัวเติมที่ขนาดอนุภาคเล็ก



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเพิ่มปริมาณกากกาแฟส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่าระยะยืดตัว ณ จุดขาดในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ โดยเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะมีค่าในช่วง 600%-800% ซึ่งเมื่อที่ระดับกากกาแฟเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการยืดของยางวัลคาไนซ์ลดต่ำลง และการใช้กากกาแฟขนาด 150 ไมครอนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปสูงกว่ากากกาแฟ ขนาด 425 ไมครอน เช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดอนุภาค

กากกาแฟ 150 ไมครอน และ 425 ไมครอน พบว่ากากกาแฟที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดใกล้เคียงกับกากกาแฟขนาดเล็กดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการฉีกขาดในยางธรรมชาติผสมกับกากกาแฟ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของกากกาแฟขนาดอนุภาคเล็กจะช่วยให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นกว่ากากกาแฟที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ส่วนสมบัติด้านพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดไม่มีผลแตกต่างกันนัก อีกทั้งในการเตรียมกากกาแฟให้มีขนาดอนุภาคเล็กนั้นใช้เวลานานและให้ร้อยละผลผลิตค่อนข้างต่ำ จึงเลือกใช้กากกาแฟขนาดอนุภาค 425 ไมครอน ในการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ถัดไป

4.1.2 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติ

การปรับปรุงความเข้ากันโดยใช้ยางธรรมชาติกับกากกาแฟขนาด 425 ไมครอน ด้วยยางธรรมชาติอีพอกไซต์ร้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสม โดยเลือกใช้สัดส่วนของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพอกไซต์ 50 ที่สัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก พร้อมทั้งศึกษาปริมาณกากกาแฟที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางเชิงกล

ตารางที่ 4.3 ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

SCG (425 μ m)	Formulas	t _{s1} (min)	t _{c90} (min)	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)	CRI (min ⁻¹)	ML1+4 (100°C)
Without ENR50	SCG00	1.51	5.52	0.44	6.54	6.10	24.94	35
	SCG10	3.06	7.54	0.31	6.59	6.28	22.32	33
	SCG30	3.12	10.33	0.35	7.65	7.30	13.87	34
	SCG50	3.16	11.51	0.37	9.22	8.85	11.98	35
	SCG70	3.27	12.34	0.23	10.50	10.27	11.03	29
With ENR50	SCG00	1.14	5.4	0.43	6.15	5.72	23.47	31
	SCG10	1.20	5.44	0.47	6.76	6.29	23.58	31
	SCG30	1.38	7.16	0.33	7.92	7.59	17.30	32
	SCG50	1.50	7.57	0.47	9.19	8.73	16.47	39
	SCG70	2.29	9.19	0.63	8.20	7.57	14.49	39

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติ จะให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากความเป็นขี้ของหมู่อีพอกไซดจากสารเพิ่มความเข้ากันได้ สามารถเข้ากันได้กับกากกาแฟที่มีความขี้ ทำหน้าที่เคลือบผิวของกากกาแฟช่วยลดการดูดซับสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ ทำให้สารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ได้ทำหน้าที่อย่างเต็มที่ จึงใช้เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการใช้ไซเลนเป็นสารคู่ควบในการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล เช่นเดียวกัน การใช้ไซเลนร่วมจะช่วยลดการดูดซับสารตัวเร่งและทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์สั้นลง [25] และเมื่อใช้ปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น พบว่าระยะเวลาการวัลคาไนซ์ยาวนานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้มีการควบคุมปริมาณคงที่กับยางธรรมชาติที่ระดับ 20:80 ส่วน โดยน้ำหนัก ทุกระดับปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสารเพิ่มความเข้ากันได้อาจไม่สามารถเคลือบผิวกากกาแฟได้อย่างทั่วถึงเมื่อปริมาณของกากกาแฟเพิ่มขึ้น จึงยังคงมีการดูดซับสารตัวเร่งได้เพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ยาวนานขึ้น

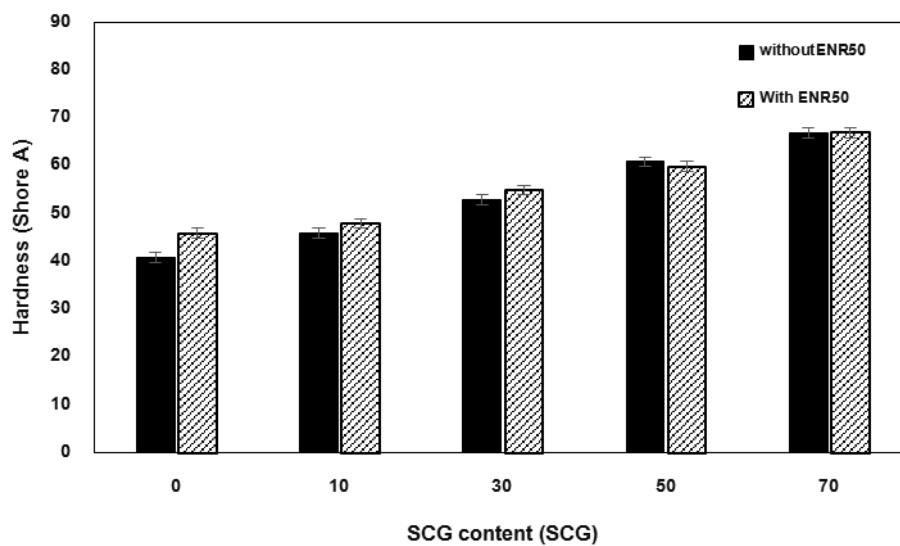
เมื่อเปรียบเทียบความหนืดมูนี้ พบว่าการเพิ่มปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเติมกากกาแฟที่มีอนุภาคแข็งเข้าไปในยางธรรมชาติ ทำให้ยางคอมพาวนด์มีแรงต้านการบิดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนี้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 ผลของการใช้สารช่วยผสมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 50 ปรับปรุงการกระจายตัวของกากกาแฟกับยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกล

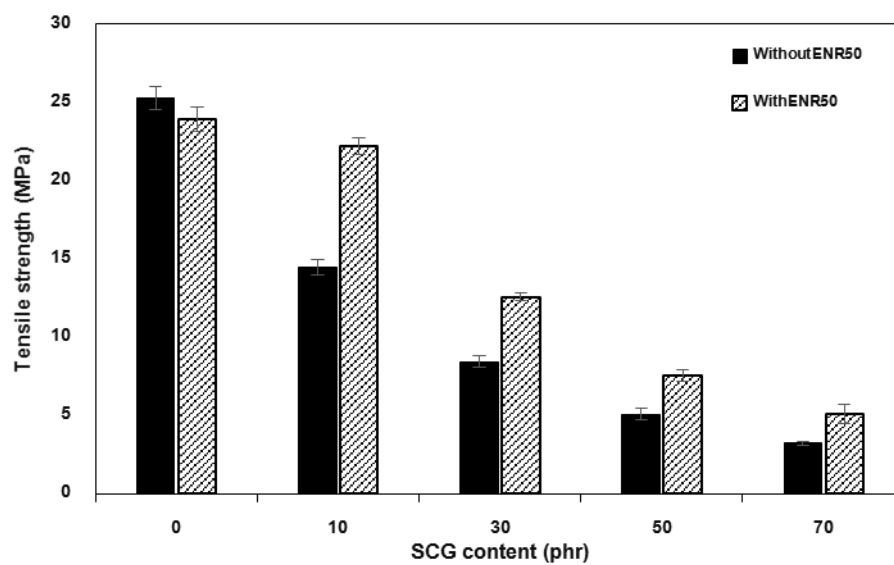
SCG (425 μ m)	Formulas	Hardness (Shore A)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear (N/mm)
Without ENR50	SCG00	41 \pm 1	25.28 \pm 0.72	792 \pm 74	33.88 \pm 2.26
	SCG10	46 \pm 1	14.48 \pm 0.52	737 \pm 41	30.28 \pm 0.92
	SCG30	53 \pm 1	8.44 \pm 0.38	746 \pm 97	21.77 \pm 0.92
	SCG50	61 \pm 1	5.09 \pm 0.36	740 \pm 28	21.21 \pm 0.59
	SCG70	67 \pm 1	3.25 \pm 0.13	605 \pm 40	17.99 \pm 1.19
With ENR50	SCG00	46 \pm 1	23.96 \pm 0.78	694 \pm 46	30.56 \pm 1.06
	SCG10	48 \pm 1	22.22 \pm 0.53	664 \pm 49	24.23 \pm 1.81
	SCG30	55 \pm 1	12.60 \pm 0.28	623 \pm 76	24.03 \pm 0.23
	SCG50	60 \pm 1	7.56 \pm 0.36	655 \pm 86	22.41 \pm 0.39
	SCG70	67 \pm 1	5.14 \pm 0.62	691 \pm 78	20.83 \pm 0.21

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าการใช้กับไม่ใช้สารช่วยผสม ไม่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มปริมาณกากกาแฟจะส่งผลให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มอนุภาคกากกาแฟที่แข็งเข้าไปในเนื้ออย่างส่งผลให้แรงต้านการกดเพิ่มขึ้น ให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น

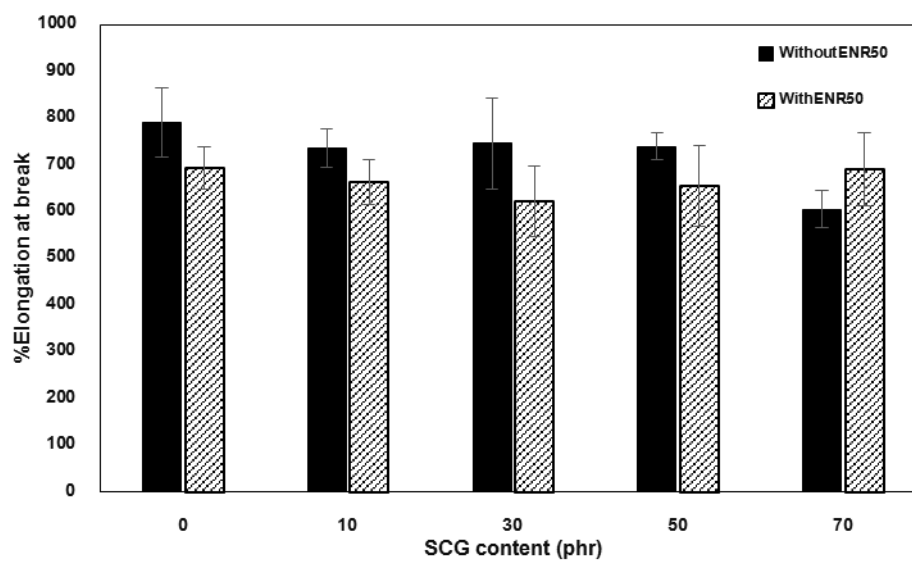
จากรูปที่ 4.8-4.10 การใช้สารช่วยผสมจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ปริมาณกากกาแฟในช่วง 10-30 phr ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่าการใช้สารช่วยผสมจะทำหน้าที่ผสมระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติช่วยให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพื้นผิวของกากกาแฟมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ต่างจากสาร ประกอบในยางธรรมชาติที่เป็นสารไฮโดรคาร์บอน และปริมาณสารช่วยผสมใช้ในปริมาณคงที่เมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น จึงทำให้แนวโน้มการเกิดอันตรกิริยาระหว่างกากกาแฟและยางธรรมชาติมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง อีกทั้งสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสัมพันธ์กับระยะยืด ณ จุดขาด เมื่อความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ายางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ผลระยะยืด ณ จุดขาดจะลดลง เมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น



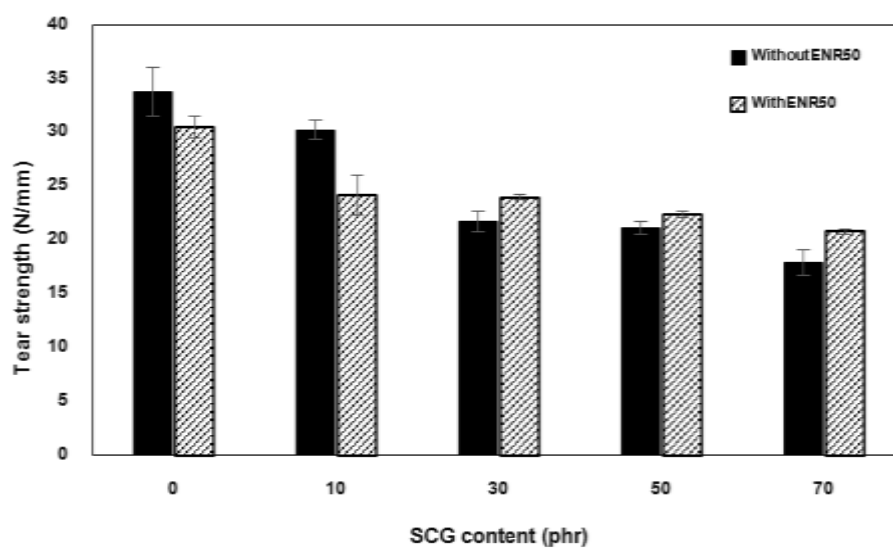
รูปที่ 4.8 ผลของการใช้สารช่วยผสมและปริมาณกากกาแฟต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.9 ผลของการใช้สารช่วยผสมและปริมาณกากกาแฟต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง

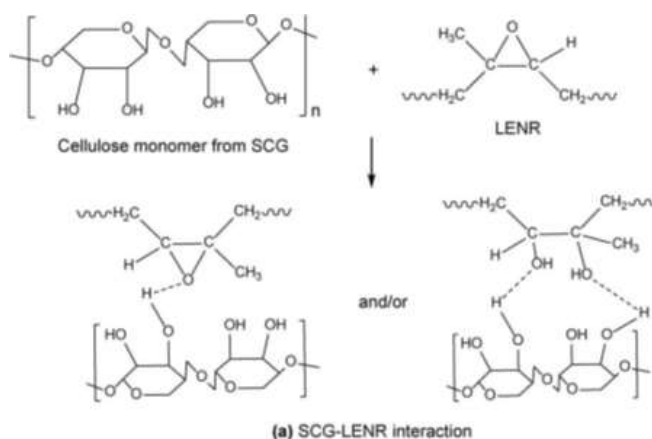


รูปที่ 4.10 ผลของการใช้สารช่วยผสมและปริมาณกากกาแฟต่อระยะยืด ณ จุดขาด



รูปที่ 4.11 ผลของการใช้สารช่วยผสมและปริมาณกากกาแฟต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

โดยลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของกากกาแฟร่วมกับยางธรรมชาติ ซึ่งมีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ร้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสมดังรูปที่ 4.12 ซึ่งเมื่อเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับกากกาแฟแล้วจะทำให้พื้นผิวที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิลมีความว่องไวที่ลดลง



รูปที่ 4.12 การเกิดอันตรกิริยาของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 50 กับกากกาแฟ[23]

4.1.3 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50

ผลของการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 25 และ 50 แทนยางธรรมชาติชนิด STR5L ที่ใช้กากกาแฟที่ขนาด 425 ไมครอน ที่ปริมาณกากกาแฟระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

Rubber	Formulas	t_{s1} (min)	t_{c90} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	CRI (min^{-1})	ML1+4 (100°C)
NR (non-modified)	SCG00	1.51	5.52	0.44	6.54	6.10	24.94	35
	SCG10	3.06	7.54	0.31	6.59	6.28	22.32	33
	SCG30	3.12	10.33	0.35	7.65	7.30	13.87	34
	SCG50	3.16	11.51	0.37	9.22	8.85	11.98	33
	SCG70	3.27	12.34	0.23	10.50	10.27	11.03	29
ENR25	SCG10	3.00	9.12	0.36	5.40	5.04	16.34	14
	SCG30	3.02	8.48	0.44	5.33	4.89	18.31	13
	SCG50	3.02	8.5	0.38	5.73	5.35	18.24	13
	SCG70	5.01	13.3	0.49	4.08	3.59	12.06	19

ตารางที่ 4.5 ผลชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ (ต่อ)

Rubber	Formulas	t_{s1} (min)	t_{c90} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	CRI (min^{-1})	ML1+4 (100°C)
ENR50	SCG10	1.36	5.45	0.34	5.50	5.16	18.34	21
	SCG30	1.42	7.42	0.40	4.65	4.25	16.67	22
	SCG50	4.03	18.07	0.25	3.28	3.03	7.12	16
	SCG70	4.42	20.56	0.27	3.42	3.15	6.20	21

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 จะให้ระยะเวลาเริ่มต้นการสุกสั้นกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าจำนวนหมู่อีพอกไซดร์ที่มีมากกว่าสามารถเคลือบผิวของกากกาแฟได้ดีกว่า จึงช่วยลดการดูดซับสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ทำให้ระยะเวลาเริ่มต้นการสุกจึงสั้นกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 แต่เมื่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น พบว่าอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์และระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 มีปริมาณน้อยกว่า ซึ่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวเร่งจะเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ถัดจากพันธะคู่ (allylic bond) ดังนั้นการที่ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 มีปริมาณพันธะคู่ลดลง ทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาและเวลาการวัลคาไนซ์ช้าลงกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 ที่มีปริมาณพันธะคู่ที่สูงกว่า และการเพิ่มปริมาณกากกาแฟจะทำให้ระยะเวลาเริ่มต้นการสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์นานขึ้น ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

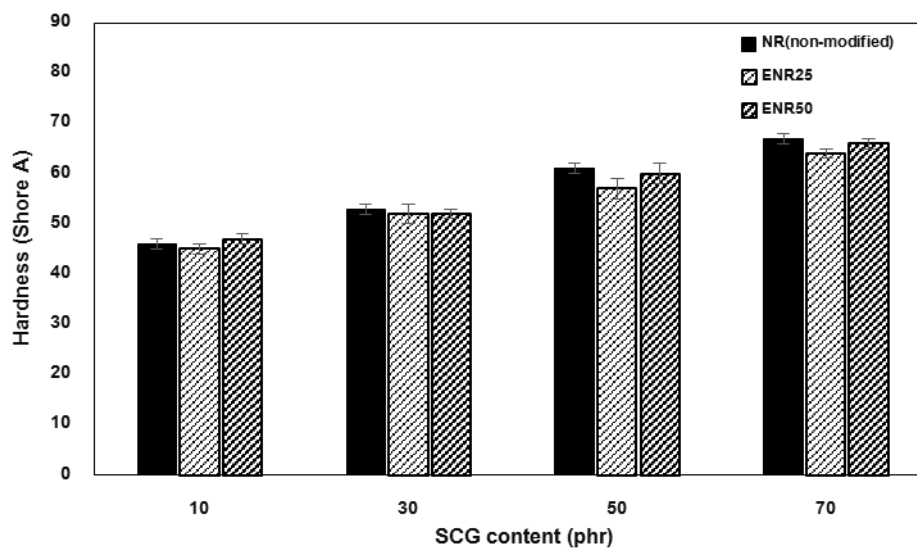
เมื่อเปรียบเทียบความเหนียวนี้พบว่าทั้งยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 ไม่มีส่งผลให้ค่าความเหนียวนี้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ความเหนียวนี้มีผลจากการเพิ่มปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเหนียวนี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นเป็นผลจากกากกาแฟที่มีอนุภาคแข็งเข้าไปในยางธรรมชาติ ทำให้ยางคอมพาวนด์มีแรงต้านการบิดเพิ่ม ขึ้นความเหนียวนี้จึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.6 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 และ 50 ต่อสมบัติทางเชิงกล

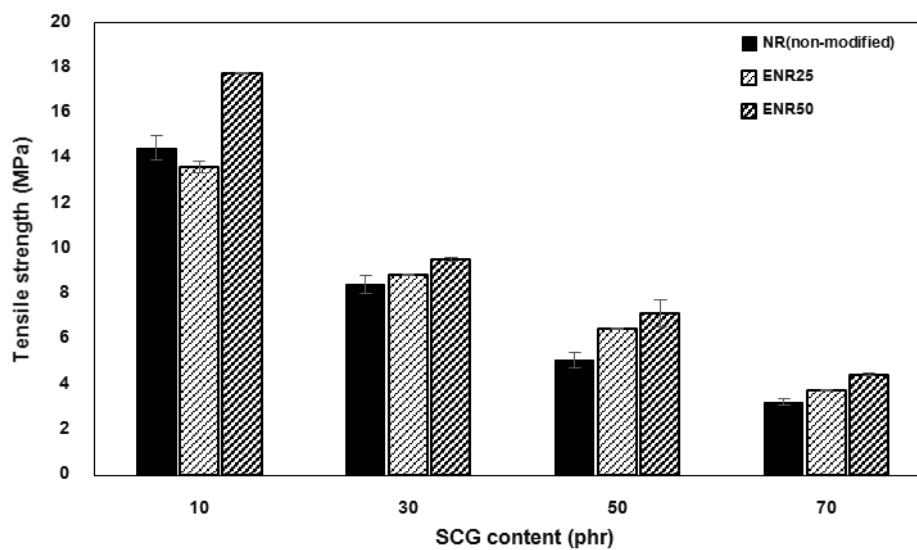
Rubber	Formulas	Hardness (Shore A)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear (N/mm)
NR	SCG00	41±1	25.28±0.72	792±74	33.88±2.26
(Non- modified)	SCG10	46±1	14.48±0.52	737±42	30.28±0.92
	SCG30	53±1	8.44±0.38	746±97	21.77±0.92
	SCG50	61±1	5.09±0.36	740±28	21.21±0.59
	SCG70	67±1	3.25±0.13	605±40	17.99±1.19
	ENR25	SCG10	45±1	13.63±0.25	670±87
SCG30		52±2	8.85±0.03	650±53	15.50±0.14
SCG50		57±2	6.47±0.04	670±21	14.74±1.30
SCG70		64±1	3.77±0.04	665±89	10.48±0.33
ENR50	SCG10	47±1	17.77±0.03	670±54	20.24±1.67
	SCG30	52±1	9.55±0.06	650±52	16.42±0.72
	SCG50	60±2	7.15±0.60	600±54	15.79±0.42
	SCG70	66±1	4.45±0.05	600±53	13.54±0.79

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 พบว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 จะให้สมบัติทางเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 25 เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.11-4.14 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าความเป็นขั้วที่ของยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละ 50 ที่มากกว่าช่วยเพิ่มการเกิดอันตรกิริยากิริยาระหว่างกากกาแฟกับยางธรรมชาติได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางเชิงกลสูงกว่า

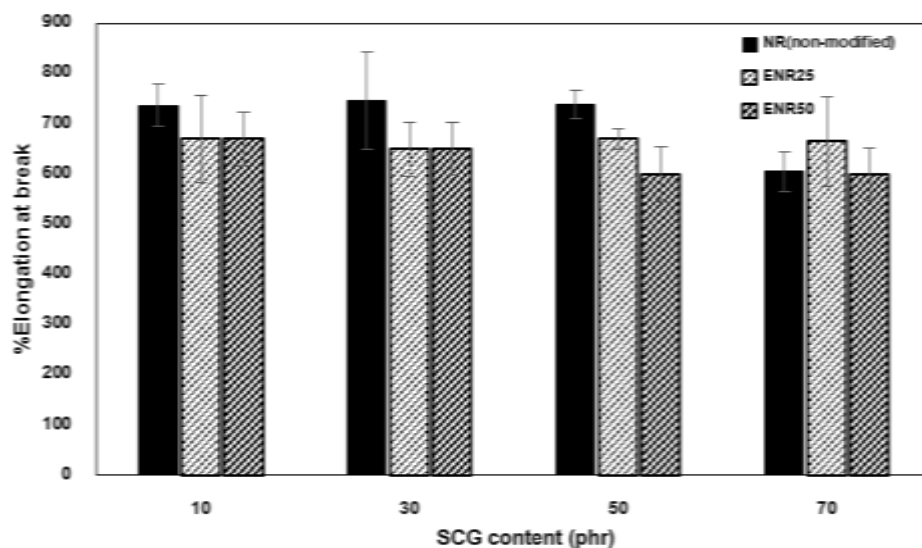
เมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่อง มาจากเพิ่มอนุภาคกากกาแฟเป็นอนุภาคที่แข็งเมื่อใส่เข้าไปในเนื้ออย่างส่งผลให้แรงต้านการกดเพิ่มขึ้น ให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจมาจากขนาดอนุภาคของกากกาแฟที่มีขนาดอนุภาคใหญ่และถึงแม้ยางธรรมชาติอีพอกไซดร์้อยละจะมีองค์ประกอบของหมู่อีพอกไซดร์้อยละในโครงสร้างที่มีความเป็นขั้วแต่ก็ยังมีส่วนของโครงสร้างที่เป็นองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว มีความไม่เข้ากันกับกากกาแฟจึงผลให้เมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น สมบัติทางเชิงกลจึงลดต่ำลง



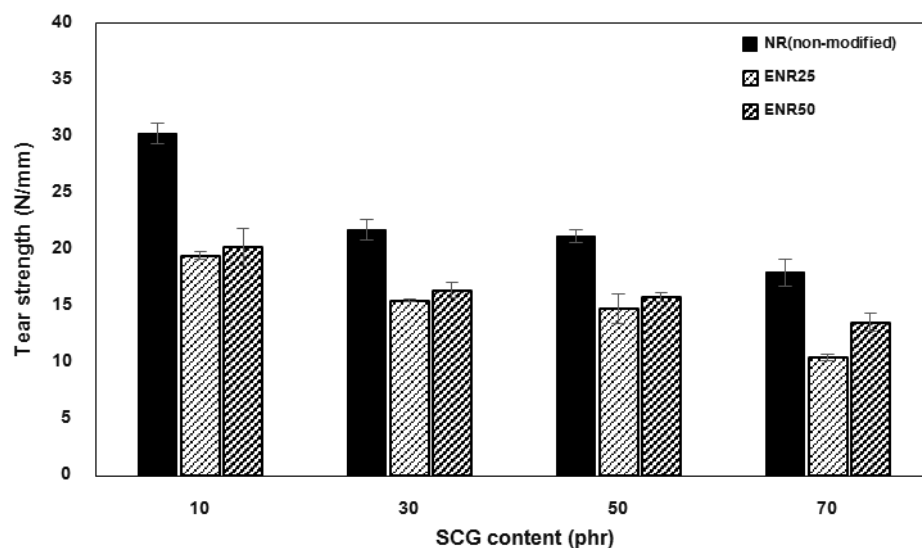
รูปที่ 4.13 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.14 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง



รูปที่ 4.15 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาด



รูปที่ 4.16 ผลของชนิดยางธรรมชาติอีพอกไซด์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 จะให้สมบัติทางเชิงกลดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติ ซึ่งยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 50 จะให้สมบัติทางเชิงกลเฉลี่ยสูงกว่า 10% ของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 25 แต่จุดด้อยของยางวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ร้อยละ 50 จะใช้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ค่อนข้างนาน กว่าโดยเฉพาะเมื่อใช้ปริมาณกากกาแฟเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไม่ก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องการ

ระคายเคือง ไม่มีความพิษต่อเซลล์ [26] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกยางธรรมชาติ อีพอกไซดรี้อยละ 25 ในการเตรียมโฟมยางปูพื้นภายในอาคาร เปรียบเทียบกับโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์ มีชื่อว่า Metro foam products

4.2 ผลการศึกษาการเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม

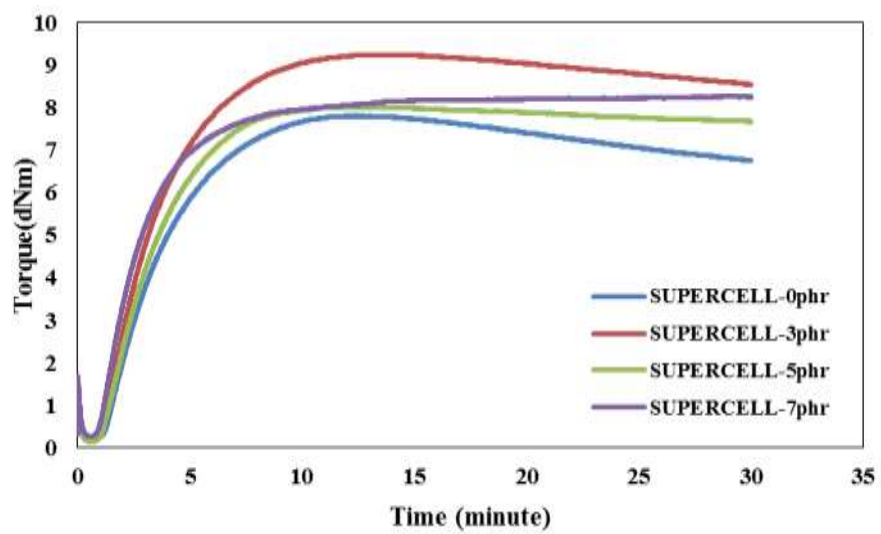
4.2.1 ผลของปริมาณสารฟู

ผลของปริมาณสารฟูชนิด Super cell EVA-B3 ที่ระดับ 0, 3, 5 และ 7 phr โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 25 ผสมรวมกากกาแฟขนาด 425 ไมครอนเป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ 25 phr ต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางเชิงกล

ตารางที่ 4.7 ผลของปริมาณสารฟู (SUPERCELL) ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

Formulas	t_{s1} (min)	t_{c90} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	CRI	ML 1+4 (100°C)
SUPERCELL- 0phr	1.30	7.16	0.39	7.97	7.58	19.34	19.52
SUPERCELL- 3phr	1.26	7.07	0.32	9.36	9.04	17.89	19.20
SUPERCELL- 5phr	1.28	6.31	0.37	8.24	7.87	21.05	19.83
SUPERCELL- 7phr	1.15	6.24	0.40	8.39	7.99	20.49	20.50

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้น เวลาที่ยางเริ่มสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์จะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาสารฟูนั้นจะมีการคายความร้อนออกมา ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มสุก เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง และดัชนีการวัลคาไนซ์สูงขึ้น นอกจากนี้ก๊าซดังกล่าวยังทำให้ยางมีความเป็นรูพรุนเกิดขึ้นหรือเรียกว่า การเกิดเซลล์ขนาดเล็ก (microbubbles) โดยความเป็นรูพรุนในเนื้อยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารฟูที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้แรงต้านการเฉือนระหว่างยางกับตาข่ายมีค่าลดลง ทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดลดต่ำลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของคณะผู้วิจัยก่อนหน้านี้ ที่รายงานถึงการเพิ่มปริมาณสารฟูชนิด Supercell เพิ่มขึ้น จะให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์สั้นลง [28] สำหรับของปริมาณสารฟูต่อค่าความหนืดมูนี้ จะมีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.17 ผลของปริมาณสารฟูลเลอร์ต่อการวัลคาไนซ์

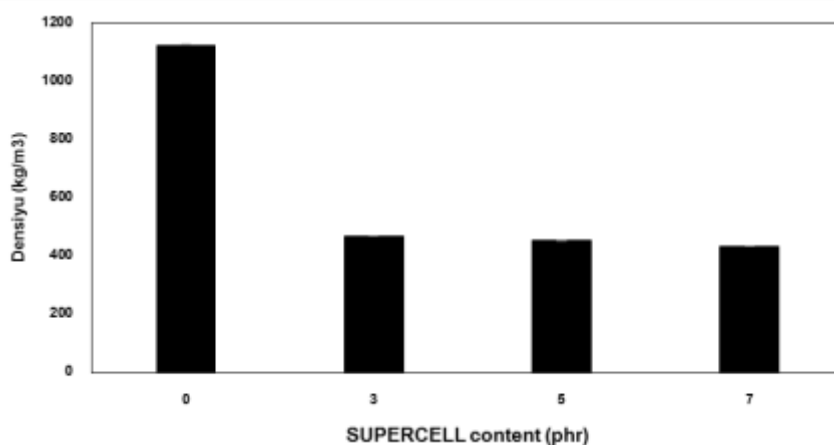
ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณสารฟลู (SUPERCELL) ต่อสมบัติเชิงกลก่อนและหลังป่นแร่

Formulas	Density (kg/m ³)	Hardness (Shore A)		Tensile strength (MPa)		Elongation at break (%)		Tear strength (N/mm)		Compression Set (%)
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	
SUPERCELL	1100.20	50±2	55±2	9.94	11.54	652.03	589.18	25.68	31.42	38
-0phr	±1.01			±0.11	±0.27	±31.23	±20.54	±0.74	±0.51	
SUPERCELL	47.00	14±1	17±1	1.33	1.56	526.70	571.14	7.85	9.79	34
-3phr	±0.77			±0.13	±0.12	±37.19	±40.96	±0.02	±0.25	
SUPERCELL	45.34	14±1	17±1	1.04	1.25	511.41	545.98	7.89	8.18	28
-5phr	±0.65			±0.13	±0.19	±40.30	±54.37	±0.44	±0.15	
SUPERCELL	43.42	14±1	19±1	0.89	1.08	494.83	468.30	7.31	8.49	22
-7phr	±0.98			±0.02	±0.17	±34.94	±88.17	±0.59	±0.06	

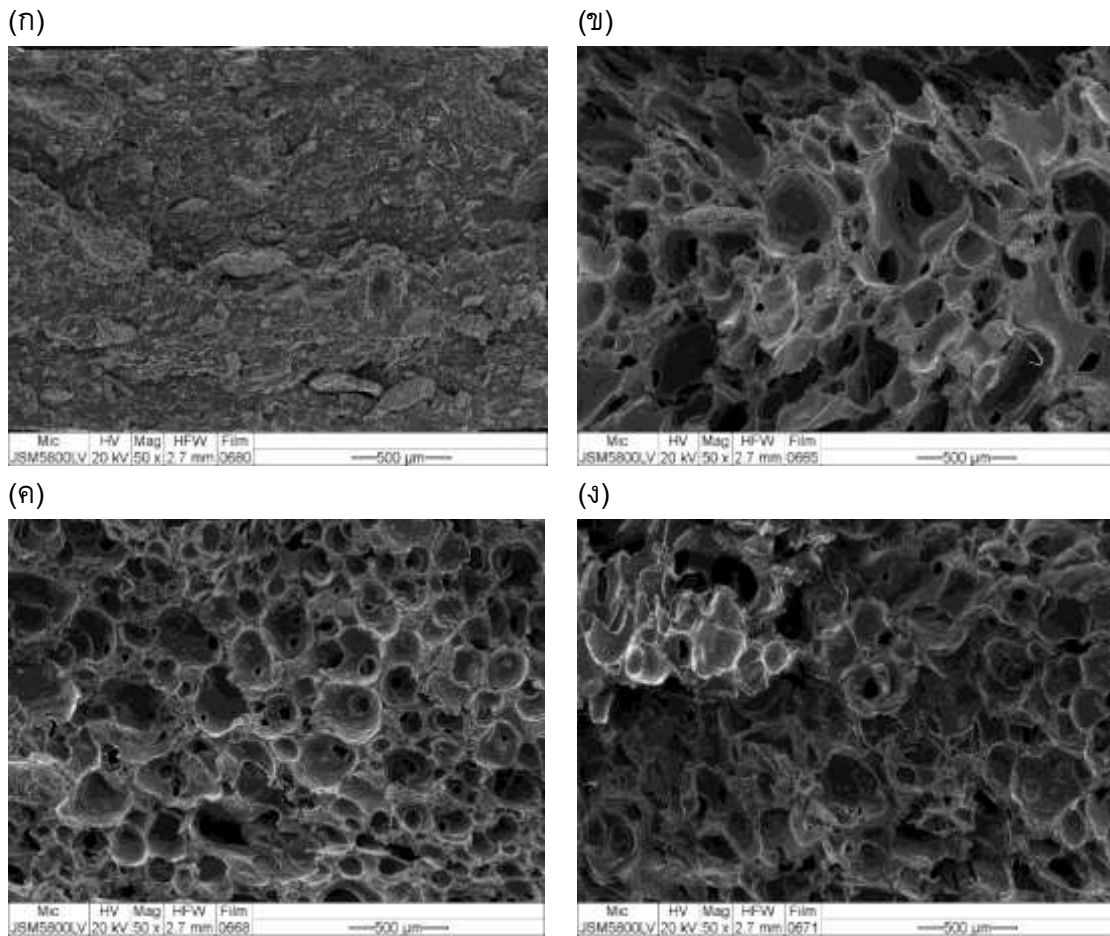
Before = before ageing

After = after ageing

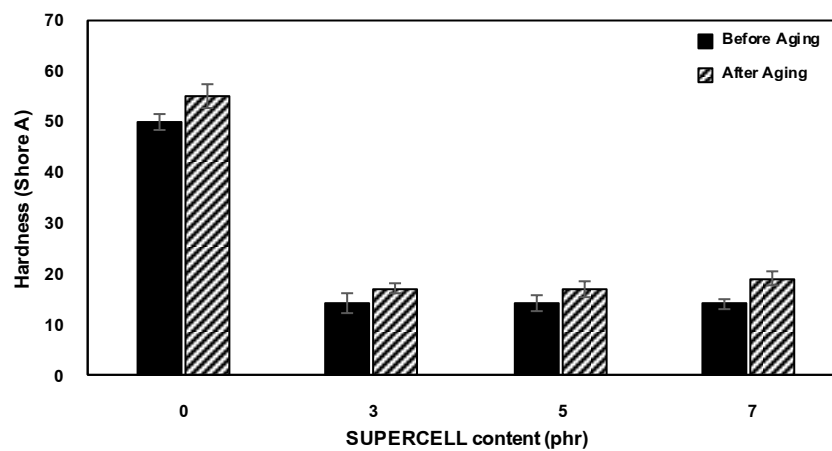
จากตารางที่ 4.8 แสดงผลของปริมาณสารฟลูตอสุมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง โดยสมบัติความหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าสูตรที่ใส่สารฟลูจะมีความหนาแน่นลดต่ำกว่าสูตรที่ไม่ได้ใส่สารฟลูอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในเนื้อยางวัลคาไนซ์ที่มีการใส่สารฟลูจะมีความเป็นรูพรุนในเนื้อยาง ทำให้ที่ปริมาตรของชั้นทดสอบที่เท่ากันมีน้ำหนักที่น้อยลงส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง การเพิ่มปริมาณสารฟลูส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโพนยางลดลง โครงสร้างความเป็นรูพรุนของยางสูตรที่ใส่สารฟลู สามารถยืนยันได้จากผลการตรวจวัดลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าสูตรที่ไม่ใส่สารฟลูจะมีลักษณะพื้นผิวสม่ำเสมอ ในขณะที่สูตรที่ใส่สารฟลูจะมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุน และมีลักษณะโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด ขนาดเซลล์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารฟลูจะปล่อยก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อนขณะขึ้นรูป เมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้นจะให้ปริมาณของก๊าซที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นหรือเรียกว่ามีขนาดเซลล์ที่ใหญ่ขึ้นสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโพนยางที่ลดลงเมื่อปริมาณฟลูเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 ผลของปริมาณสารฟลูตอค่าความหนาแน่นของโพนยาง

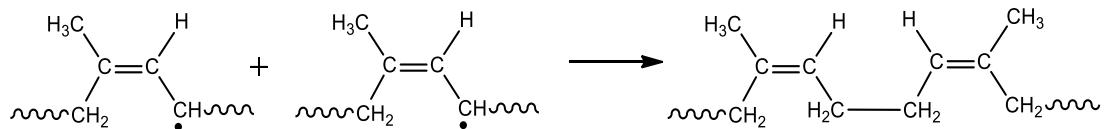


รูปที่ 4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง (กำลังขยาย 50 เท่า) (ก) ไม่ใส่สารฟลู (ข) สารฟลู 3 phr (ค) สารฟลู 5 phr และ (ง) สารฟลู 7 phr

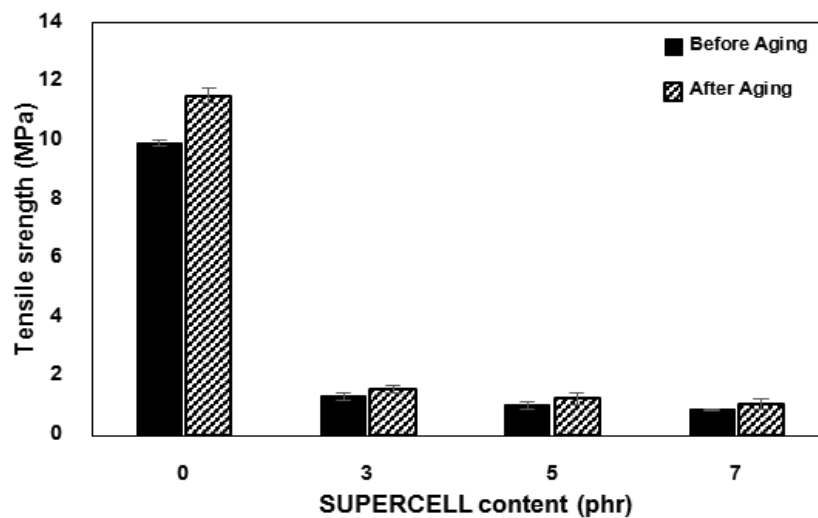


รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณสารฟลูต่อความแข็งของโฟมยางก่อนและหลังปมเร่ง

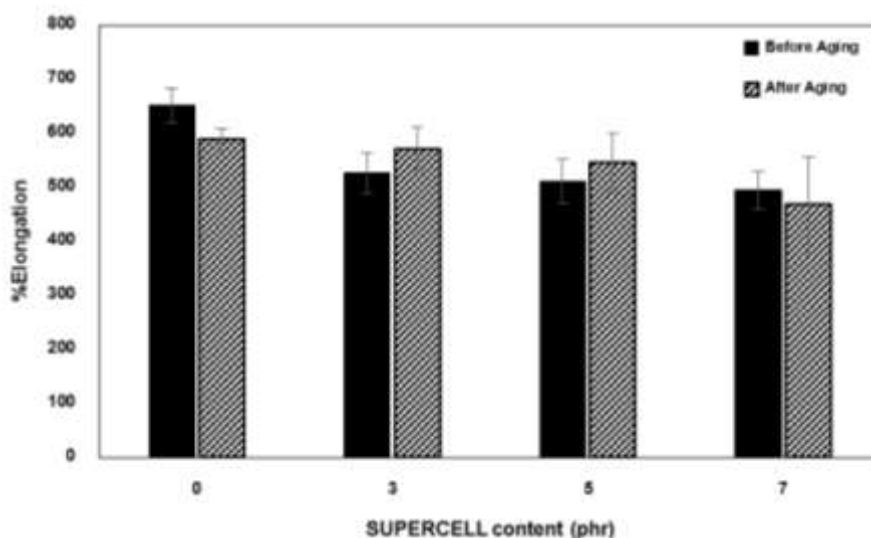
ความแข็งแรงของโพลียางก่อนและหลังบ่มแรงแสดงในรูปที่ 4.19 สมบัติก่อน บ่มแรงของสูตรที่ใส่สารฟลูจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าที่ไม่ได้ใส่สารฟลู ทั้งนี้เป็นเพราะสารฟลูทำให้น้อย่างเป็นรูปพรุณส่งผลให้ความต้านทานต่อการกดจึงลดลง และเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้นความแข็งแรงของโพลียางมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับผลทดสอบค่าความหนาแน่นของโพลียางที่เพิ่มปริมาณสารฟลู ส่วนค่าความแข็งแรงหลังบ่มแรงพบว่าค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากโครงสร้างพอลิโอไซพรีนที่อยู่ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์ได้รับความร้อนจากการบ่มแรงจะเกิดการขาดของสายไซโมเลกุลของยางแล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระ โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถนำไปสู่การเชื่อมขวางใหม่อีกครั้ง (re-crosslinking) [28] ดังแสดงรูปที่ 4.21 โดยเมื่อเกิดการเชื่อมขวางใหม่อีกครั้งสายไซโมเลกุลยางที่เกิดขึ้นใหม่จะเกิดเป็นสายไซที่สั้นลง ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของโพลียางมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 4.21 กลไกการเกิดการเชื่อมขวางใหม่ของยางธรรมชาติหลังบ่มแรง [28]



รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณสารฟลูต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลียางก่อนและหลังบ่มแรง

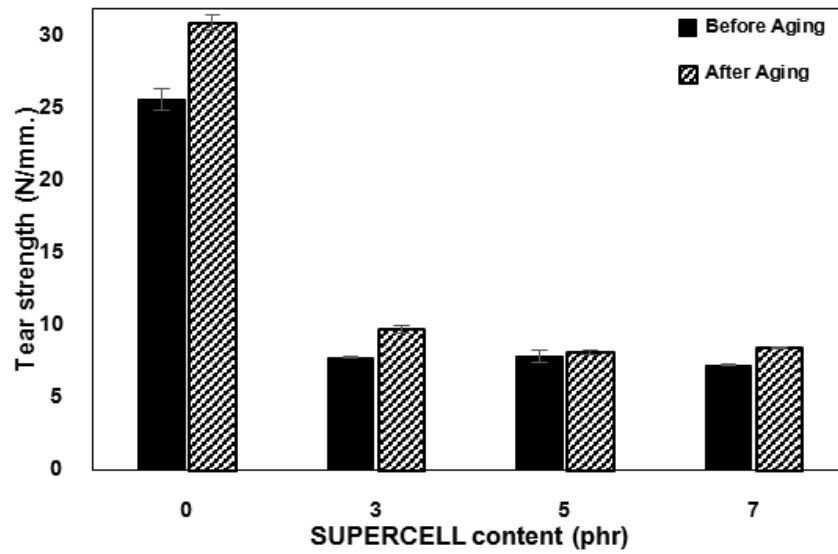


รูปที่ 4.23 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดของโพลียางก่อนและหลังบ่มเร่ง

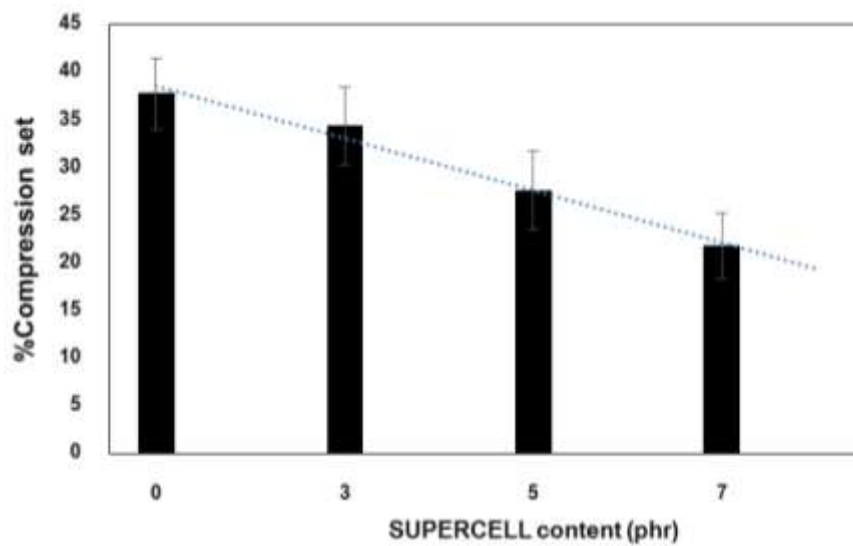
ความต้านทานต่อแรงดึงของโพลียางก่อนและหลังบ่มเร่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 สมบัติก่อนบ่มเร่งของสูตรที่ใส่สารฟู่จะมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าที่ไม่ได้ใส่สารฟู่ เป็นผลจากลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของยาง จากที่เป็นเนื้อเดียวกันเปลี่ยนเป็นโพลียางที่ภายในเนื้อยางโครงสร้างแบบรูพรุนหลังจากใส่สารฟู่ ส่งผลให้ความแข็งแรงของยางลดลง ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง และเมื่อปริมาณสารฟู่เพิ่มขึ้นความต้านทานการฉีกขาด ของโพลียางมีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับผลทดสอบค่าความหนาแน่นของโพลียางที่เพิ่มปริมาณสารฟู่ ซึ่งยืนยันว่าโครงสร้างของโพลียางมีความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงหลังบ่มเร่งพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยทั้งนี้อาจเนื่องจากโครงสร้างพอลิไอโซพรีนที่อยู่ในยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดการเชื่อมขวางใหม่อีกครั้งสายโซ่โมเลกุลยางที่เกิดขึ้นใหม่จะเกิดเป็นสายโซ่ที่สั้นลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงของโพลียางเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยสอดคล้องกับผลทดสอบค่าความแข็งแรง

จากรูปที่ 4.23 ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่ง ทำให้ ผลการทดสอบทำนองเดียวกันกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือการใช้สารฟู่และการเพิ่มปริมาณสารฟู่จะค่าระยะยืด ณ จุดขาดก่อนบ่มเร่งมีแนวโน้มลดลง แต่สมบัติหลังบ่มเร่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความต้านทานต่อการฉีกขาดของโพลียางก่อนและหลังบ่มเร่ง ดังรูปที่ 4.24 สมบัติก่อนบ่มเร่งของสูตรที่ใส่สารฟู่จะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่าที่ไม่ได้ใส่สารฟู่ สอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง และเมื่อปริมาณสารฟู่เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของโพลียางมีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังผ่านการบ่ม

เร่งพบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังเหตุผลเดียวกันที่ได้ อธิบายไว้ในสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึง



รูปที่ 4.24 ผลของปริมาณสารฟูลต่อค่าความต้านทานการฉีกขาดของโฟมยางก่อนและหลังบ่มเร่ง



รูปที่ 4.25 ผลของปริมาณสารฟูลต่อการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดของโฟมยาง

จากรูปที่ 4.25 พบว่าการใส่สารฟูและการเพิ่มปริมาณสารฟูจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดลดลง แสดงผลของโฟมยางที่เพิ่มปริมาณสารฟูเพิ่มมากขึ้นจะสามารถคืนรูปกลับมาได้ใกล้เคียงกับระยะก่อนการกดอัด ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นเซลล์ และมีปริมาณเซลล์ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารฟูที่เพิ่มมากขึ้น โครงสร้างเซลล์ดังกล่าวจะช่วยกระจายแรงกดอัดได้ดีกว่า และเมื่อปล่อยแรงกระทำดังกล่าวทำให้สามารถคืนรูปกลับมาได้ดีกว่า

จากผลการทดลองเรื่องปริมาณสารฟู สามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารฟูที่ระดับ 5 phr ให้ลักษณะขนาดเซลล์ที่สม่ำเสมอ ส่วนสมบัติทางเชิงกลโดยเฉพาะสมบัติการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดที่ปริมาณสารฟู 5 phr เปลี่ยนไปต่ำกว่า 30% จึงเลือกสูตรโฟมยางที่ระดับ 5 phr เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับโฟมอีวีเอทางการค้าในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ผลเปรียบเทียบสมบัติโฟมยางกับโฟมอีวีเอเชิงพาณิชย์

โฟมยางธรรมชาติที่ใช้กากกาแฟเป็นตัวเติมที่ใช้ปริมาณสารฟู 5 phr จากผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ นำมาเปรียบเทียบกับสมบัติทางเชิงกลกับโฟมอีวีเอ Metro foam products ที่ผลิตจากประเทศออสเตรเลียดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมบัติของ Metro foam products ทางการค้าจากประเทศออสเตรเลีย[24]

Properties	ENR25-5	EVA30	EVA45	EVA60	มอก. 2377-2559
Density (Kg/m ³)	45	28-33	42-48	55-65	ไม่กำหนด
Hardness (Shore A)	14	15-20	20-25	25-30	50 -90
Tensile strength (KPa)	1040	450	700	800	4000
Tear strength (KN/m)	7.9	2.5	4.0	4.5	ไม่กำหนด
Elongation at break (%)	510	200-250	250-300	250-300	150
Compression set 22h at 70 °C 72 h recovery (%)	28	-	-	-	<40

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติของโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซค์ร้อยละ 25 ที่ใช้ปริมาณกากกาแฟ 25phr และปริมาณสารฟู 5phr จะให้คุณสมบัติใกล้เคียงกับโฟมอีวีเอเกรด EVA45 ที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่ความแข็งของโฟมยางที่เตรียมขึ้นมีความแข็งต่ำกว่าโฟมอีวีเอ แต่สมบัติด้านเชิงกลอื่น ๆ ได้แก่ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด สูงกว่าโฟมอีวีเอทางการค้า และจากสมบัติการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดที่ต่ำกว่า 30% ของโฟมยางที่เตรียมขึ้นในงานวิจัย แสดงให้เห็นว่าสามารถนำ โฟมยาง

ธรรมชาติอิพอกไซค์ร้อยละ 25 ผสมกากกาแฟมาใช้งานในการปูพื้นภายในอาคาร โดยมีสมบัติทาง
เชิงกลที่ดีเยี่ยมสามารถแข่งขันกับโฟมอีวีเอเกรด EVA45 ทางการค้าได้ และยังช่วยลดปัญหา
ขยะชีวมวลจากกากกาแฟมาใช้ประโยชน์ได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สมบัติเบื้องต้นการใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

5.1.1 ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของกากกาแฟ

กากกาแฟที่ผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอนมีขนาดเฉลี่ย 400 ไมครอน คิดเป็น 60% ของปริมาณกากกาแฟ และกากกาแฟที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 ไมครอนมีขนาดเฉลี่ย 80 ไมครอน คิดเป็น 20% ของปริมาณกากกาแฟ

5.1.1.1 ผลของกากกาแฟต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์

กากกาแฟที่ขนาดอนุภาคเล็กให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่ช้ากว่ากากกาแฟที่ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า และการใช้ปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานเพิ่มขึ้น

5.1.1.2 ผลของกากกาแฟต่อสมบัติเชิงกลของยางคอมพาวนด์

กากกาแฟขนาด 150 ไมครอน ปรับปรุงความต้านต่อแรงดึงที่สูงกว่ากากกาแฟขนาด 425 ไมครอน กว่า 30-50 % ตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น แต่ผลของขนาดกากกาแฟจะส่งต่อความแข็งและความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แต่สมบัติต้านความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง

5.1.2 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟและยางธรรมชาติ

5.1.2.1 ผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างกากกาแฟและยางธรรมชาติต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

การใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซดรี้อยละ 50 เป็นสารช่วยผสมระหว่างยางธรรมชาติกับกากกาแฟขนาด 425 ไมครอน ลดเวลาการเริ่มต้นการสุกแต่ระยะเวลาการสุกจะใช้เวลาช้านานกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารช่วยผสมแต่ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนี้

5.1.2.2 ผลของการใช้สารช่วยผสมระหว่างกากกาแฟและยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกล

ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากกาแฟ และความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นคิดเป็น 35-40 % และ 20-15 % ตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 และ ร้อยละ 50

5.1.3.1 ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

การใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 แทนยางธรรมชาติเกรด STR5L ร่วมกับกากกาแฟ โดยยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 50 จะให้เวลาเริ่มต้นการสุกที่สั้นกว่า แต่เวลาการวัลคาไนซ์ยาวนานกว่ายางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 และยางธรรมชาติ

5.1.3.2 ผลของชนิดยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 และร้อยละ 50 ต่อสมบัติเชิงกล

ยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 50 จะให้สมบัติทางเชิงกลเฉลี่ยสูงเพิ่มขึ้นเพียง 10% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 แต่เนื่องด้วยต้องการ วัลคาไนซ์ในระบบกำมะถันเพื่อให้โฟมเกิดการคงรูปที่เหมาะสม ดังนั้นยางธรรมชาติอิพอกไซดร์้อยละ 25 จึงเหมาะสมในการนำมาขึ้นรูปเพื่อเตรียมโฟมยางปูพื้นภายในอาคาร เปรียบเทียบกับโฟมอีวีเอเชิงพานิชย์

5.2 การเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม

5.2.1 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อการเตรียมโฟมยางปูพื้นชนิดอ่อนนุ่มโดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม

5.2.1.1 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

การใช้ปริมาณสารฟู่จะให้ความหนาแน่นและความแข็งของแผ่นยางปูพื้นลดลงอย่างชัดเจน โดยการใช้ปริมาณสารฟู่ 5 phr ร่วมกับการใช้ปริมาณกากกาแฟ 25 phr ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 425 ไมครอน จะให้ขนาดเซลล์ของโฟมยางสม่ำเสมอ

5.2.1.2 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติเชิงกล

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชิงกลกับโฟมอีวีเอเกรด EVA45 ที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่โฟมยางที่เตรียมได้จะค่อนข้างนุ่มกว่า แต่สมบัติด้านเชิงกลอื่น ๆ ได้แก่ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ระยะยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด เพิ่มสูงกว่าโฟมอีวีเอทางการค้า 30–50% และมีสมบัติการเปลี่ยนรูปหลังกดอัดที่ต่ำกว่า 30%

ดังนั้นโฟมยางที่เตรียมขึ้นในงานวิจัย มีสมบัติทางเชิงกลที่ดีเยี่ยมสามารถแข่งขันกับโฟมอีวีเอเกรด EVA45 เชิงพานิชย์ได้ และยังช่วยลดปัญหาขยะชีวมวลจากกากกาแฟได้

บรรณานุกรม

- [1] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. การส่งออกยางพารา./(ค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2561), จาก http://www.moc.go.th/index.php/rubber-service-all-/category/category_product_004-copy-2.html.
- [2] ผศ.ดร.บุญธรรม นิธิอุทัย. (2530). ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และคุณสมบัติ. แผนกวิชาเทคโนโลยีโพลีเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- [3] พงษ์ธร แซ่อูย. (2548). ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [4] พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). สารเคมีสำหรับยาง **Additives For Rubber**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [5] บริษัท เวสเชิล เคมีเคิล จำกัด. /สารกันเสื่อมหรือสารแอนติออกซิแดนซ์หรือสารต้านอนุมูลอิสระ (**Antioxidant**)./ (ค้นเมื่อ 20 เมษายน 2561), จาก <http://www.vessel-chemical.com/>
- [6] Karmee Sanjib Kumar. (2018). **A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites**. Waste Management 72 (2018) 240–254. Waste Management.
- [7] Material selection e-library. /ไซโลส (**XYLOSE**)./(ค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2561), จาก <http://asp.plastics.or.th:8001/ArticleKnowledgeListDetail.aspx?id=44>
- [8] Material selection e-library. /ลิกนิน (**LIGNIN**)./(ค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2561), จาก <http://asp.plastics.or.th:8001/ArticleKnowledgeListDetail.aspx?id=47>
- [9] Material selection e-library. /เซลลูโลส (**CELLULOSE**)./(ค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2561), จาก <http://asp.plastics.or.th:8001/ArticleKnowledgeListDetail.aspx?id=46>
- [10] Antonio Zuorro, Roberto Lavecchia. (2012). Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy, **Journal of Cleaner Production**, 34 Page 49-56.
- [11] Alessia Panusa, Antonio Zuorro, Roberto Lavecchia, Giancarlo Marrosu, and Rita Petrucci. (2013). Recovery of Natural Antioxidants from Spent Coffee Grounds, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 61, 4162-4168.

- [12] รัตนา ดันท์เทอดธรรม วุฒินันท์ คงทัด และกล้าณรงค์ ศรีรอด. (2553). “การศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยกาบมะพร้าวและปาล์มน้ำมัน”. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2553. หน้า 523-529.
- [13] Hyun Kyung Lee, Young Gi Park, Taikyeong Jeong, Young Seok Song. (2015). Green nanocomposites filled with spent coffee grounds, **JOURNAL OF Applied Polymer Science**, DOI: 10.1002/APP.42043.
- [14] Ishak Z.A.M. and Bakar, A.A. (1995). “An investigation on the potential of rice husk ash as fillers for epoxidized natural rubber (ENR)”. **European Polymer Journal**, 31: 259-269.
- [15] Vincenzo Alessandro Cataldo, Giuseppe Cavallaro, Giuseppe Lazzara, Stefana Milioto, Filippo Parisi. (2017). “Coffee ground as filler for pectin: Green composites with competitive performances dependent on the UV irradiation”. **Carbohydrate Polymer**, 170 (2017), 198-205
- [16] อนุชิต คงฤทธิ์ และ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร. (2561). “ผลกระทบของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตพอลิพรพีลีนผสมกากกาแฟ” วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ., 11(1),18-28
- [17] Pornsawan Chamnanvatchakit. (2010) “**Effect of Epoxidized Natural Rubber (ENR) on Properties of Bovine Gelatin Film**” IR979-RK77M-MCUGS-KF74J.
- [18] Karnda Sengloyluan, Kannika Sahakaro, Wilma K. Dierkes and Jacques W.M. Noordermeer. “**Use of Epoxidized Natural Rubber as a Compatibilizer in Silica-filled Natural Rubber Compounds**”
- [19] ปุญญาณิช อินทรพัฒน์. (2555). สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 14(1).
- [20] รักษา แก้วคาชาติ. (2553). อิทธิพลของสารตัวเติมจากเปลือกไข่ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์. สารนิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [21] ปุญญาณิช อินทรพัฒน์. (2554). การใช้เปลือกไข่เหลือทิ้งเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์. รายงานการวิจัย: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [22] Wu, C. S. (2015). Renewable resource-based green composites of surface-treated spent coffee grounds and polylactide: Characterisation and biodegradability. **Polymer Degradation and Stability**, 121, 51-59.

- [23] Chomsri Siriwong, Supparoeek Boopasiri, Vanichaya Jantarapibun, Boonsong Kongsook, Sirichai Pattanawanidchai, Pongdhorn Sae-Oui. (2018). Properties of natural rubber filled with untreated and treated spent coffee grounds. **Journal of Applied Polymer Science**. DOI: 10.1002/app.46060
- [24] EVA foam specifications: Metro foam, (2013). **Ultra E.V.A. copolymer foam, Australia**, <https://www.scribd.com/doc/151492484/Eva-Foam-Specifications> (Accessed 28 November 2021)
- [25] 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. Polymer. J.** 34(7), 975-979, PII: S0014-3057(97)00211-5
- [26] อรสา ภัทรไพฑูรย์ชัย, (2556), รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการต้นแบบยางทางทันตกรรมเพื่อลดทำความสะอาดเหงือก. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (รหัสโครงการ RDG5450081)
- [27] นิธินาถ แซ่ตั้ง. (2557). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์การเตรียมและสมบัติของยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้ง. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ทุนงบประมาณแผ่นดิน (ยุทธศาสตร์รัฐบาล).
- [28] Manaila E, Stelescu MD, Craciun G. (2018), Degradation Studies Realized on Natural Rubber and Plasticized Potato Starch Based Eco-Composites Obtained by Peroxide Cross-Linking. **International Journal of Molecular Sciences**, 19(10), 2862.

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

นุชจรรยา บุรเพชร นิธินาถ แซ่ตั้ง และอนัญติ แซ่ตั้ง. “การเตรียมและสมบัติของโฟมยางจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 ผสมร่วมกับกากกาแฟ” การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 52 บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยบูรพา



การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 52
The 52nd National Graduate Research Conference

การเตรียมและสมบัติของโฟมยางจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25
ผสมร่วมกับกากกาแฟ
Preparing and properties of Epoxide natural rubber 25 foam blend with
Spend coffee ground

นุชจรรยา บุรเทพสร¹, รศ.ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง¹ และ ผศ.ดร.อนุวัติ แซ่ตั้ง²

¹ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดปัตตานี

*ผู้ติดต่อ: E-mail: nudjaira@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% (ENR25) ที่ใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมร่วมกับสารฟู ชนิด Supercell EVA-B3 ทำหน้าที่ให้เกิดโครงสร้างเป็นรูพรุน เพื่อให้ได้โฟมยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักเบา ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณสารฟูที่ระดับ 0, 3, 5 และ 7 phr และศึกษาผลของระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและสารตัวเร่งแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ต่อค่าความหนาแน่น ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด ก่อนและหลังปฏิกิริยาของโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% ผลการศึกษาพบว่าที่ปริมาณสารฟู 3 phr เหมาะสมที่สุดในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% ความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติที่เตรียมได้อยู่ในช่วง 43 – 47 kg/cm³ และการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและสารตัวเร่งแบบปกติให้สมบัติทางเชิงกลสูงที่สุด ส่วนระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถันและสารตัวเร่งแบบประสิทธิภาพให้โฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% มีความทนทานต่อความร้อนได้ดีที่สุด มีอัตราการเปลี่ยนแปลงหลังปฏิกิริยาต่ำที่สุด

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25, กากกาแฟ, สารฟู, โฟมยางปูพื้น

Abstract

In this study, epoxide natural rubber-25 (ENR25) foam was prepared using spent coffee ground as a filler with Supercell EVA-B3 as blowing agent to obtain lightweight natural rubber foam. The effects of the blowing agent content at levels 0, 3, 5 and 7 phr were studied on the density, hardness, tensile strength and tear resistance. In addition, the effects of the sulfur and accelerator vulcanization systems such as convention system, semi-efficient vulcanization, and efficient vulcanization were studied on mechanical properties before and after ageing of ENR25 foam. The results showed that the blowing agent content at 3 phr was the best condition for the preparation of ENR25 foam. The density of ENR25 foam was in the range of 43 - 47 kg/cm³. The ENR25 foam with the convention system gave the highest mechanical properties, whereas the ENR25 foam with



the efficient vulcanization gave a good heat resistance and the lowest rate of change after accelerated ageing.

Keyword: Epoxidized natural rubber-25, Spent coffee ground, Blowing agent, Foam rubber flooring

1. บทนำ

ปัจจุบันกาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศไทย โดยเฉพาะการบริโภคกาแฟสดที่คนไทยหันมานิยมบริโภคเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณกากกาแฟ (spent coffee ground, SCG) มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น สำหรับวิธีการกำจัดกากกาแฟนั้น ส่วนใหญ่จะนำไปทิ้ง หรืออาจมีบางที่มารับซื้อไป จึงมีการมองหาวิธีการนำกากกาแฟดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำไปทำปุ๋ยใส่ต้นไม้ เนื่องจากมีธาตุไนโตรเจนสูง และมีฤทธิ์เป็นกรด สามารถนำมาบำรุงต้นไม้ที่ชอบดินที่เป็นกรด มีการนำมาใช้ในการเสริมความงาม เช่น นำมาขัดผิว การนำมาย้อมสี การกำจัดกลิ่น เป็นต้น โดยกากกาแฟมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า 425 ไมครอน[1] มีส่วนประกอบหลักคือ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, โปรตีน, ไขมัน, และสารอื่นปริมาณเล็กน้อย[2] ส่วนประกอบของกากกาแฟประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส 42% ลิกนิน 25% โปรตีน 18% เซลลูโลส 13% และ กรดไขมัน 2% นอกจากส่วนประกอบหลักยังมีสารประกอบอื่น ๆ รวมอยู่เช่น สารประกอบฟีนอลิกและสารประกอบเอมีน สารดังกล่าวสามารถทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อม ด้วยคุณสมบัติและองค์ประกอบของกากกาแฟตามที่กล่าวมานี้ จึงมีการนำกากกาแฟมาใช้เป็นสารตัวเติมในการเตรียมวัสดุคอมโพสิต[3,4] และสารตัวเติมในยาง แต่ด้วยกากกาแฟมีส่วนผสมของเซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีขี้ ควรเลือกใช้ร่วมกับยางที่มีขี้หรือการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ในกรณีที่ใช้กับยางที่ไม่มีขี้ โดย Siriwong และคณะ [5] ได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติของกากกาแฟที่ปรับพื้นผิวด้วยไซเลน (3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (TESPT) กับกากกาแฟที่ปรับพื้นผิวด้วยยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 25% (มีปริมาณหมู่อีพอกไซค์ที่ 25%) ในตัวทำละลายโทลูอีน โดยทำการศึกษาที่ปริมาณกากกาแฟ 0-10 phr เพื่อเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตแบบแห้ง ก่อนนำมาผสมในยางธรรมชาติ พบว่ากากกาแฟที่ปรับพื้นผิวด้วยไซเลนจะให้สมบัติทางเชิงกลเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการปรับพื้นผิวด้วยยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 25% แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานถึงการนำกากกาแฟมาใช้เป็นสารตัวเติมในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติเพื่อใช้งานเป็นแผ่นยางปูพื้น โดยโฟมยางทั่วไปจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 15-40 kg/m³[6] คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเตรียมโฟมยางธรรมชาติชนิดความหนาแน่นต่ำ (<15 kg/m³) จากยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 25% โดยใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติม ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาปริมาณของสารฟู และระบบการวัลคาไนซ์แบบใช้กัมมันต์ร่วมกับสารตัวเร่ง ที่มีผลต่อพฤติกรรมการณ์การวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง เป็นต้น เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นโฟมยางปูพื้น อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ขยะที่เกิดจากกากกาแฟมาใช้ประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

2.1 เพื่อศึกษาปริมาณของสารฟูชนิด Supercell EVA-B3 ที่ส่งผลต่อการเตรียมและสมบัติโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซค์ 25% ที่ผสมกากกาแฟ



2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่ส่งผลต่อการขึ้นรูปโฟมยางธรรมชาติอิพอกไซส์ 25 ที่ผสมกากกาแฟ

3. วิธีดำเนินการ

1. ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของกากกาแฟ โดยทำการวัดขนาดของประกอบของกากกาแฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM-EDX) และวัดขนาดอนุภาคของกากกาแฟด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Laser Particle Sizer Model Analysette 22)

2. ในงานวิจัยนี้ใช้ Supercell EVA-B3 เป็นสารฟู และทำการแปรปริมาณสารฟูที่ระดับ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr ตามลำดับ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันแบบปกติ และทำการศึกษาระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันและสารตัวเร่งแบบปกติ (Conventional Vulcanizing, CV) แบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficient Vulcanizing, Semi-EV) และแบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanizing, EV) ตามสูตรในตารางที่ 1 ทำการบดผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง มีขั้นตอนการบดผสมดังแสดงในรูปที่ 1 นำยางคอมพาวนด์ที่ได้มาวัด ความหนืดมูนิ ลักษณะการวัลคาไนซ์ ตามวิธีการทดสอบในหัวข้อที่ 3.3.4 แล้วทำการขึ้นรูปยางคอมพาวนด์ด้วยเทคนิคการอัดเป่าใช้เป่ารูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในการคงรูป 90% (t_{90}) หลังจากนั้นทำการตัดเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความหนาแน่น ค่า 100% , 300% , 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด ค่าการเสียรูปหลังการกด

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมพาวด์สำหรับเตรียมโฟมยาง

Ingredients	Function	Weight (phr)	
ENR25	Rubber	100	100
ZnO	Activator	5	5
Stearic Acid	Activator	1	1
TBBS	Accelerator	1	1, 0.5, 3.0
IPPD	Antioxidant	1	1
SCG	Filler	25	25
Super cell EVA-B3	Blowing agent	0, 3, 5, 7	3
Sulfur	Vulcanizing agent	2.5	2.5, 1.5, 0.5

*หมายเหตุ Batch size 800 กรัม



รูปที่ 1 ลำดับและเวลาการบดผสมยางและสารเคมี



ความหนาแน่น

ตัวอย่างขึ้นทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 1056 type 2 Class A โดยตัวอย่างมีขนาด $13 \times 13 \times 0.9$ cm³ ซึ่งใช้ตัวอย่างสุตรละ 3 ชิ้น และชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง คำนวณหาค่าความหนาแน่น

ความแข็ง

ตัวอย่างขึ้นทดสอบทรงกระบอกมีความหนา 9 mm. ซึ่งทดสอบ 3 จุดบนชิ้นตัวอย่างโดยบริเวณของจุดทดสอบต้องไม่อยู่ในบริเวณขอบชิ้นงานและรายงานเป็นค่ากลาง ทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความแข็งคูโรมิเตอร์ชนิด Shore A ตามมาตรฐาน ASTM 2240-97

ความต้านทานต่อแรงดึง

ตัดชิ้นตัวอย่างแบบคิมเบล ด้วย Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412 ตัวอย่างละ 5 ชิ้น นำมาทดสอบโดยเครื่อง Universal testing machine ใช้ความเร็วในการดึงตัวอย่าง 500 มิลลิเมตร/นาที และรายงานค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 100%, 300%, 500%, ความต้านทานต่อแรงดึง, เปรอริเซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

ความต้านทานการฉีกขาด

ตัดชิ้นตัวอย่างแบบมุม (angle) ด้วย Die C ตามมาตรฐาน ASTM D624 ตัวอย่างละ 5 ชิ้น นำมาทดสอบโดยเครื่อง Universal testing machine ใช้ความเร็วในการดึงตัวอย่าง 500 มิลลิเมตร/นาที รายงานค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด

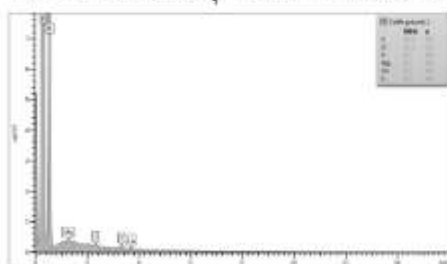
การบ่มเร่ง

สภาวะการทดสอบการบ่มเร่งตามมาตรฐาน ASTM D573 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้ขึ้นทดสอบความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด จากนั้นนำมาคำนวณการเปลี่ยนแปลง

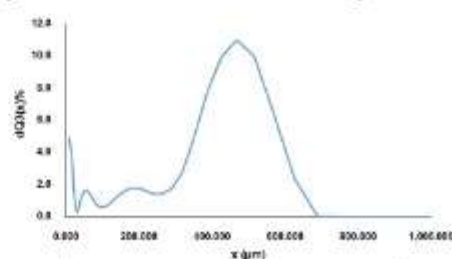
4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. สมบัติทางกายภาพของกากกาแฟ

ธาตุองค์ประกอบหลักของกากกาแฟประกอบด้วยธาตุคาร์บอน 62.3% ออกซิเจน 37.3% ดังแสดงในรูปที่ 2 และเมื่อวัดขนาดอนุภาคของกากกาแฟมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 500 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ธาตุองค์ประกอบของอนุภาคกากกาแฟ จากเครื่อง SEM EDX



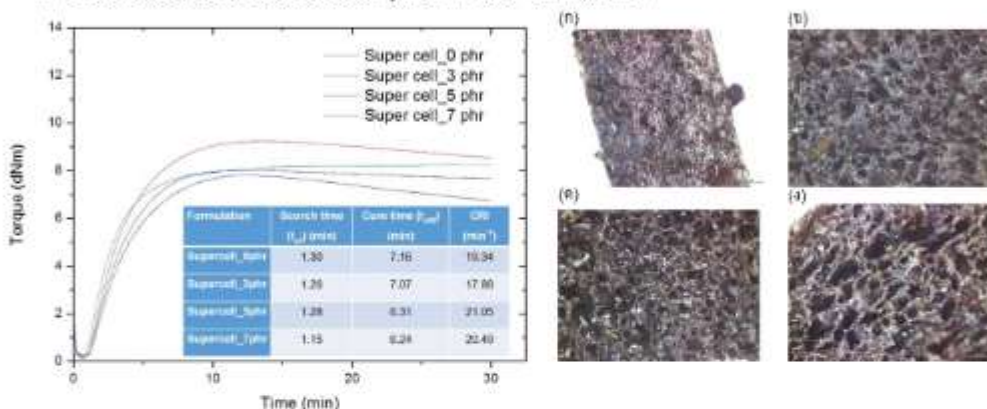
รูปที่ 3 ขนาดอนุภาคของกากกาแฟจากเครื่อง Laser Particle Sizer Model Analysette 22



2. ผลของปริมาณสารฟลูและระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันและสารตัวเร่งต่อสมบัติเชิงกล

ผลของปริมาณสารฟลูต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้น เวลาที่ยางเริ่มสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์จะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายตัวให้ก๊าซออกมาซึ่งสารฟลูนั้นจะมีการคายความร้อนออกมาช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มสุก เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง และดัชนีการวัลคาไนซ์สูงขึ้น

ในการบดผสมยางและสารเคมีทุกสูตรมีการกำหนดขนาดปริมาณยางและสารเคมี (Batch size) และเวลาการบดผสมให้เท่ากันทุกสูตร โดยค่าความหนืดมูของยางคอมพาวด์ที่ปริมาณสารฟลู 0, 3, 5 และ 7 phr มีค่า 19.52, 19.20, 19.83 และ 20.50 MV(ML 1+4, 100 °C) ตามลำดับ



รูปที่ 4 ผลของปริมาณสารฟลูต่อลักษณะการวัลคาไนซ์

รูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของโฟมยางที่ปริมาณสารฟลูของโฟมยางคอมพาวด์ (ก) 0 phr (ข) 3 phr (ค) 5 phr (ง) 7 phr

ตารางที่ 2 สมบัติทางเชิงกลของโฟมยางยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 ที่ปริมาณสารฟลูระดับต่าง ๆ

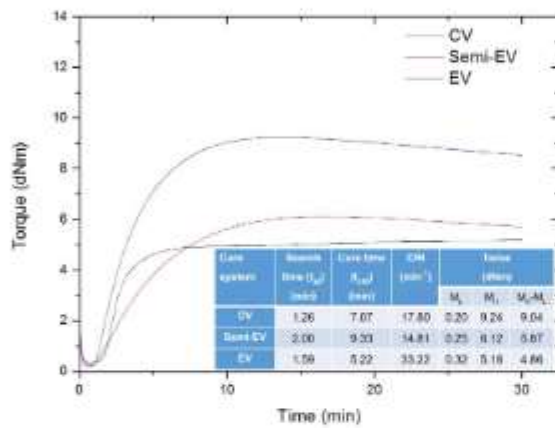
Formulation	Density (kg/m ³)	Hardness (Shore A)	Tensile strength(MPa)	Tears strength (N/mm)
Supercell_0phr	110.20±1.01	50±2	9.94±0.11	25.68±0.74
Supercell_3phr	47.00±0.77	14±1	1.33±0.13	7.85±0.02
Supercell_5phr	45.34±0.65	14±1	1.04±0.13	7.89±0.44
Supercell_7phr	43.42±0.98	14±1	0.89±0.02	7.31±0.59

สมบัติทางเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นของโฟมยางมีแนวโน้มลดลง โดยการใส่สารฟลู 3 phr ช่วยให้ความหนาแน่นของโฟมยางลดลง 57% ทั้งนี้เป็นผลมาจากสารฟลูจะทำให้เกิดก๊าซภายในเนื้อยาง ทำให้ยางเกิดรูพรุนหรือเรียกว่าการเกิดเซลล์ขนาดเล็ก (microbubbles) โดยความเป็นรูพรุนในเนื้อยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารฟลูที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใส่สารฟลูช่วยให้ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ลดลงจาก 50 shore A เหลือ 14 shore A เมื่อใส่ปริมาณสารฟลู 3 phr แต่เมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ค่าความแข็งเปลี่ยนแปลง สอดคล้อง



กับสมบัติด้านการตั้งและการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารฟลูที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโฟมยางจะมีขนาดเซลล์ใหญ่ขึ้นและมีปริมาณเซลล์เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารฟลูที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงลักษณะพื้นผิวของโฟมยางธรรมชาติ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ที่กำลังขยาย 50 เท่า เซลล์ของโฟมยางที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเซลล์ปิด ขนาดเซลล์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้น และสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มของกากกาแฟในชั้นของเนื้อยาง ทั้งนี้อาจเนื่องจากกากกาแฟมีขนาดอนุภาคใหญ่และพื้นผิวมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความว่องไวสูงทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองได้ง่าย

ดังนั้นจากผลการทดสอบดังกล่าวจึงเลือกใช้ปริมาณสารฟลู 3 phr ในการศึกษาระบบการวัลคาไนซ์ตัวกำมะถันและสารตัวเร่ง เนื่องจากการใส่ปริมาณสารฟลูเพิ่มมากกว่า 3 phr ให้สมบัติทางเชิงกลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



รูปที่ 6 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ตัวกำมะถันและสารตัวเร่งต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของโฟมยางคอมพาวด์

รูปที่ 7 ลักษณะพื้นผิวของโฟมยางของระบบวัลคาไนซ์(ก) CV (ข) Semi-EV (ค) EV

จากรูปที่ 6 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของโฟมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25% ที่ปริมาณสารฟลู 3 phr พบว่าโฟมยางคอมพาวด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ จะมีค่าระยะเวลาที่ยาวเริ่มสุกใกล้เคียงกัน และใช้เวลาานานกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพมีปริมาณสารตัวเร่งที่มากกว่าแบบปกติ โดยสารตัวเร่งที่ใช้ในการทดลองนี้คือ TBBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่มีซิลิโคนที่มีช่วงระยะเวลาเริ่มสุกค่อนข้างนาน ส่งผลให้เวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะให้ค่าแรงบิดสูงสุดที่สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการช่วงแรกของระยะเวลาการเริ่มสุกของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่สั้นกว่าทำให้เซลล์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีพันธะการเชื่อมโยงที่มากกว่าระบบอื่น ทำให้ขณะการขยายตัวของก๊าซเกิดขึ้นได้ยากกว่า จึงให้ค่าแรงบิดสูงสุดสูงกว่า ส่วนค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าใกล้เคียงกันทุกระบบการวัลคาไนซ์ สอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของโฟมยางธรรมชาติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีขนาดเซลล์ที่เล็ก มีผนังเซลล์ที่หนา ในขณะที่พื้นผิวของโฟมยางธรรมชาติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพที่มี

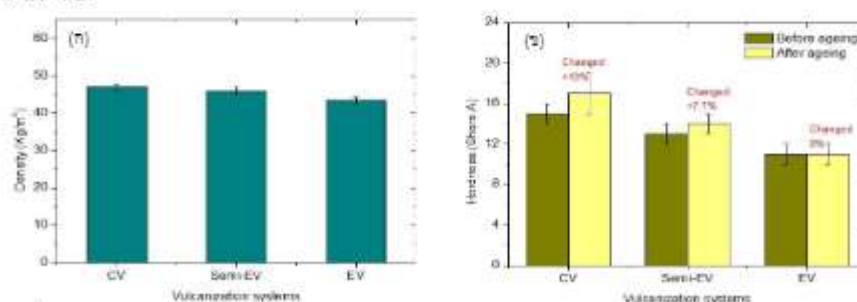


ขนาดเซลล์ใหญ่กว่า และผนังเซลล์ที่บางกว่าตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7 ผลของขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นส่งผลต่อค่าความหนาแน่นและความแข็งของโฟมยางธรรมชาติ โดยโฟมยางธรรมชาติในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีความหนาแน่นและความแข็งสูงกว่าโฟมยางธรรมชาติในระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ ๓ และรูปที่ ๘

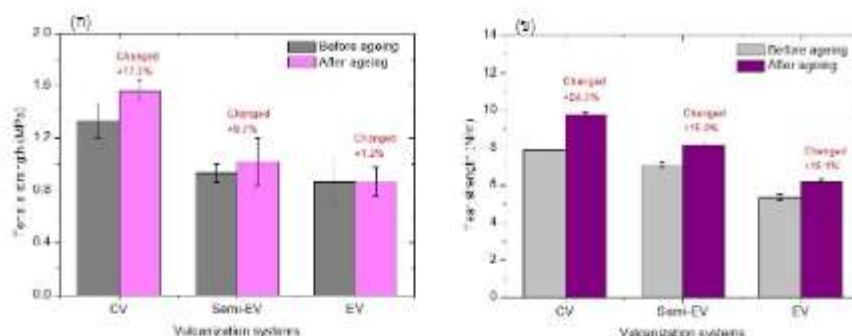
ตารางที่ 3 สมบัติทางเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ 25 ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันและสารตัวเร่งแบบต่าง ๆ

Formulation	Density (kg/m ³)	Hardness (Shore A)		Tensile strength (MPa)		Tears strength (N/mm)	
		Before	Ageing	Before	Ageing	Before	Ageing
CV	47.08±0.77	15±1	17±2	1.33±0.13	1.56±0.08	7.85±0.03	9.76±0.15
Semi-EV	45.96±0.83	13±1	12±1	0.93±0.07	1.02±0.18	7.09±0.12	8.15±0.17
EV	43.40±0.88	11±1	11±1	0.86±0.18	0.87±0.11	5.36±0.16	6.17±0.16

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งก่อนและหลังปฏิกิริยา พบว่าหลังปฏิกิริยาของโฟมยางธรรมชาติระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนปฏิกิริยาสูงที่สุด สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ มีค่าการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนปฏิกิริยาเป็น +13%, +7.7% และ 0% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการปฏิกิริยาปฏิกิริยาให้ความร้อนเป็นเวลานานเพิ่มขึ้นสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ๒ รูปแบบ [7] คือ อาจเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (Crosslinking reaction) เพิ่มขึ้น (อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นบวก) และอาจเกิดปฏิกิริยาการเสื่อม (Degradation reaction) เกิดการตัดขาดของพันธะโมเลกุล (อัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นลบ) และการที่โฟมยางธรรมชาติระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการวัลคาไนซ์แบบปกติทำให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลไฟดิก (-S-S-) มีพลังงานพันธะ 206 kJ/mol ต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบโมโนซัลไฟดิกและไดซัลไฟดิก (-C-S-) มีพลังงานพันธะ 279 kJ/mol สูงกว่า ส่งผลให้โฟมยางธรรมชาติระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีความต้านทานการเสื่อมด้วยความร้อนต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ



รูปที่ 8 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันและสารตัวเร่งต่อสมบัติของโฟม (ก) ความหนาแน่น (ข) ความแข็งก่อน-หลังปฏิกิริยา



รูปที่ ๑ ผลของระบบการวัดคาไนซ์ด้วยกัมมะถันและสารตัวเร่งต่อสมบัติของโพลิเมอร์ก่อน-หลังปฏิกิริยา
(ก) ความต้านทานต่อแรงดึง (ข) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

จากรูปที่ ๑ แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาดก่อนและหลังปฏิกิริยา พบว่าความต้านทานต่อการดึงและความต้านทานการฉีกขาดก่อนปฏิกิริยาของโพลิเมอร์ชนิดนี้จะระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติสูงกว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพตามลำดับ แต่สมบัติหลังปฏิกิริยาของโพลิเมอร์ชนิดนี้จะระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด สูงกว่าโพลิเมอร์ชนิดนี้จะระบบการวัดคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากากกาแฟสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในการเตรียมยางปูพื้นได้ โดยให้ความหนาแน่นในช่วง 43 – 47 kg/cm³ การใช้กากกาแฟเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ถือเป็นอีกหนึ่งวิธีในการจัดการกับกากกาแฟที่แนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี และก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดกากกาแฟ นอกจากการใช้งานเป็นยางปูพื้นแล้ว ยังสามารถนำกากกาแฟมาเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มช่องทางการนำยางธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์ภายในประเทศ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

1. ปริมาณสารฟลูที่เหมาะสม คือที่ปริมาณ ๓ phr และระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติจะให้สมบัติทางเชิงกลที่ดีกว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ
2. โพลิเมอร์ชนิดนี้จะระบบการวัดคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้สมบัติด้านการทนความร้อนและมีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบปกติ ตามลำดับ
3. โพลิเมอร์ชนิดนี้มีค่าความหนาแน่นในช่วง 43 – 47 kg/cm³ โดยโพลิเมอร์ชนิดนี้จะระบบการวัดคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

หน่วยวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพาราและนวัตกรรม (SCIRU63002) และทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Antonio Zuurro, Roberto Lavecchia. (2012). **Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy**, *Journal of Cleaner Production* 34 Page 49-56.
- [2] Karmee Sanjib Kumar. (2018). **A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites**. *Waste Management* 72 (2018) 240–254. Waste Management.
- [3] Hyun Kyung Lee, Young Gi Park, Taikyeong Jeong, Young Seok Song. (2015). **Green nanocomposites filled with spent coffee grounds**, *JOURNAL OF Applied Polymer Science*, DOI: 10.1002/APP.42043
- [4] García-García, D., Carbonell, A., Samper, M.D., García-Sanoguera, D., Balart, R. (2015). **Green composites based on polypropylene matrix and hydrophobized spend coffee ground (SCG) powder**, *Composites Part B* 78:256-265.
- [5] Chomsri Siriwong, Supparoeek Boopasiri, Vanichaya Jantarapibun, Boonsong Kongsook, Sirichai Pattanawanidchai, Pongdhom Sae-Oui. (2018). **Properties of natural rubber filled with untreated and treated spent coffee grounds**. *Journal of Applied Polymer Science*. DOI: 10.1002/app.46060
- [6] Skews BW, Levy AVI, Levi-Hevroni D. **CHAPTER 15.1 - Shock Wave Propagation in Porous Media**. In: Ben-Dor G, Igra O, Elperin TOV, editors. *Handbook of Shock Waves*. Burlington: Academic Press; 2001. p. 545-96.
- [7] Manaila E, Stelescu MD, Craciun G. **Degradation Studies Realized on Natural Rubber and Plasticized Potato Starch Based Eco-Composites Obtained by Peroxide Cross-Linking**. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018; 19(10):2862.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวนุชจรา บุรเพชร
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010220106
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม ยางพารา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี	2559

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการการศึกษา)

- หน่วยวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพาราและนวัตกรรม (SCIRU63002)
- ทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

"การเตรียมและสมบัติของโฟมยางจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์ 25 ผสมร่วมกับกากกาแฟ"
 การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 52
 มหาวิทยาลัยบูรพา