



การปรับปรุงสมบัติและการลดต้นทุนการเตรียมไม้ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์
ระหว่างยางธรรมชาติรีเคลมกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

Properties Improvement and Cost Reduction of Artificial Slatted Woods
from Reclaimed Natural Rubber/ Ethylene-Vinyl Acetate Blends

อัจฉรวาดี ชูเกตุ

Adjarawadee Chookate

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การปรับปรุงสมบัติและการลดต้นทุนการเตรียมไม้ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์
ระหว่างยางธรรมชาติรีเคลมกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท
Properties Improvement and Cost Reduction of Artificial Slatted Woods
from Reclaimed Natural Rubber/ Ethylene-Vinyl Acetate Blends

อัจจรวาดี ชูเกต
Adjarawadee Chookate

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
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

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติและการลดต้นทุนการเตรียมไม้ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์
 เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติรีเคลมกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

ผู้เขียน นางสาวอัจฉราวดี ชูเกตุ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิญ กาลกรณ์สุรปราณี) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิญ กาลกรณ์สุรปราณี)
 (ดร.ลดาวัลย์ สงทิพย์)

.....กรรมการ
 (ดร.ลดาวัลย์ สงทิพย์)

.....กรรมการ
 (ดร.เยี่ยมพล นัครามนตรี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และ
 เทคโนโลยีพอลิเมอร์

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

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวอัจฉราวดี ชูเกต)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวอัจฉราวดี ชูเกต)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติและการลดต้นทุนการเตรียมไม้ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์
ระหว่างยางธรรมชาติรีไซเคิลกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

ผู้เขียน นางสาวอัจฉราวดี ชูเกตุ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติรีไซเคิลกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ (RR/EVA) เพื่อประยุกต์ใช้เป็นไม้ระแนงเทียมต้นทุนต่ำ สามารถเตรียมได้สำเร็จ ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมโดยมีสภาวะการผสมที่เหมาะสมที่สุด คือการใช้อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อนาที ยืนยันสภาวะที่เหมาะสมได้จากสมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยา (วิเคราะห์ผลจากการดัดแปลงสมการของ Scherrer) นอกจากนี้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ทุกชนิด (ENR-25, ENR-50 และอีวีเอดัดแปรด้วยสารประกอบฟีนอลิก (Ph-EVA)) การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ปริมาณ 3 phr ให้สมบัติ (สมบัติเชิงกลและเชิงความร้อน) เหมาะสมที่สุด ระแนงเทียมที่ถูกเตรียมขึ้นจากสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในงานนี้ ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าในด้านสมบัติการต้านทานต่อจุลชีพและการต้านทานต่อน้ำมากกว่าไม้จริงและระแนงเทียมที่มีจัดจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้ เป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้เป็นระแนงเทียมต้นทุนต่ำสำหรับการใช้งานเป็นคอกแพะหรือปศุสัตว์

คำสำคัญ ยางธรรมชาติรีไซเคิล เอทิลีนไวนิลอะซิเตท อีวีเอดัดแปรด้วยสารประกอบฟีนอลิก ไม้ระแนงเทียม

Thesis Title	Properties Improvement and Cost Reduction of Artificial Slatted Woods from Reclaimed Natural Rubber/ Ethylene-Vinyl Acetate Blends
Author	Miss Adjarawadee Chookate
Major Program	Polymer Science and Technology
Academic Year	2018

ABSTRACT

Thermoplastic natural rubber (TPNR) based on reclaimed natural rubber (RR)/ethylene-vinyl acetate (EVA) for low cost artificial slatted wood was successfully prepared by using melt mixing technique. The optimum mixing conditions were using temperature of 140 °C for 15 min with rotor speed of 30 rpm. This was confirmed by mechanical and morphological (i.e., modified from Scherer equation's analysis) properties. Furthermore, the properties of the blend can be enhanced by using all compatibilizers (ENR-25, ENR-50 and phenolic compound modified EVA.). Addition of phenolic compound modified EVA (Ph-EVA) 3 phr as a compatibilizer in the blends provided suitable properties (i.e., mechanical and thermal properties). The artificial slatted wood prepared based on optimum condition from this work gave better performance in term of anti-microorganisms and water resistant properties than those of real and commercial artificial slatted woods. The obtained knowledge from this study is benefits to apply as the low cost artificial slatted wood for goat or livestock shed's flooring applications.

Key words: Reclaimed natural rubber, Ethylene-vinyl acetate, Phenolic compound modified EVA, Artificial slatted woods

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาและช่วยเหลือจาก ผศ.ดร. เอกวิญญู กาลกรณ์สุรปราณี ดร.ลดาวัลย์ สงทิพย์ และดร.เยี่ยมพล นัครามนตรี ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยเสมอมา อีกทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการเขียนวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ลดาวัลย์ สงทิพย์ และที่รับเป็นกรรมการสอบ กรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน รวมถึงพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกท่านในภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจที่ดีในการทำวิจัยครั้งนี้ตลอดมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณทุนวิจัยประเภทสิ่งประดิษฐ์ ปีงบประมาณ 2560 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในหลักสูตรปริญญาโทเป็นระยะเวลา 2 ปี ในปีการศึกษา 2560 และขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิสุทธิ์ แก้วสกุล ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำต่าง ๆ และเป็นแรงบันดาลใจที่ดีในการวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ และภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุน คอยเป็นกำลังใจและให้การอบรมสั่งสอนที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย

อัจฉราวดี ชูเกตุ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของโครงการ	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ยางธรรมชาติ	6
2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง	7
2.1.2 สมบัติยางธรรมชาติ	7
2.2 ยางธรรมชาติรีเคลม	8
2.3 ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์	10
2.4 ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก	12
2.4.1 ความเข้ากันได้ของการผสมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก	12
2.4.2 การดัดแปลงโมเลกุลพอลิโอลิฟินส์ด้วยฟีนอลิกเรซิน	13
2.4.3 การปรับปรุงสมบัติของการผสมยางธรรมชาติกับอีวีเอ	15
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง	22
3.1 สารเคมี	22
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	29
3.3 วิธีการทดลอง	37
3.3.1 การศึกษาสภาวะในกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วยกในการผสม	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ใน พอลิเมอร์เบลนด์	39
3.3.3 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	45
4.1 ผลของการแปรสภาวะในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ต่อสมบัติต่าง ๆ	45
4.1.1 ผลของการแปรสภาวะในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ต่อสมบัติเชิงกล	45
4.1.2 ผลของการแปรสภาวะในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา	48
4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่าง RR/EVA ต่อสมบัติต่าง ๆ	53
4.2.1 ผลการศึกษาชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่าง RR/EVA	53
4.2.2 ผลการศึกษาปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ระหว่าง RR/EVA	57
4.3 ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของระแนงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	67
4.3.1 ผลการทดสอบความต้านทานในน้ำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	67
4.3.2 ผลการทดสอบความต้านทานในปัสสาวะเทียม จากวัสดุชนิดต่าง ๆ	70
4.4 ผลการทดสอบสมบัติของระแนงจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	74
4.4.1 ผลการทดสอบความต้านทานในน้ำ	74
4.4.2 ผลการทดสอบความต้านทานในปัสสาวะเทียม	77
4.4.3 ผลการศึกษาการยืดเกาะของเชื้อแบคทีเรีย	79
4.4.4 ผลการศึกษาความต้านทานต่อการสึกหรอ	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	84
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก.	89
ภาคผนวก ข.	100
ภาคผนวก ค.	103
ภาคผนวก ง.	106
ภาคผนวก จ.	112
ประวัติผู้เขียน	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	37
3.2	38
4.1	45
4.2	50
4.3	53
4.4	58
4.5	61
4.6	62
4.7	63
4.8	65
4.9	67
4.10	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) จากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณต่างกัน	72
4.12 ผลเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในน้ำจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	75
4.13 ผลเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในปัสสาวะเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	78
4.14 เปรียบเทียบผลการทดสอบการยึดเกาะของเชื้อ <i>S. aureus</i> และ <i>E. coli</i> ของระแนงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	80
ค.1 เปรียบเทียบสมบัติและราคาของระแนงเทียมที่เตรียมได้กับระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์และไม่จริงในปริมาตรที่เท่ากัน คือ 1 m^2	104
ง.1 สูตรสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA	108
ง.2 สูตรยางและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีเคลมบลนด์กับอีวีเอ	110

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	6
2.2	ปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางธรรมชาติ	11
2.3	กลไกการดัดแปลงโมเลกุลของ LLDPE ด้วยไดเมทิลฟีนอลิกเรซิน (Ph-LLDPE)	14
2.4	การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง LLDPE/EVA ด้วย Ph-LLDPE ในการเพิ่มความเข้ากันได้	14
3.1	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	22
3.2	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ	23
3.3	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์	23
3.4	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก	24
3.5	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ Bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (TESPT)	24
3.6	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันชนิดอะโรมาติก	25
3.7	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพาราฟินแว็กซ์	25
3.8	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไฮดรอกซีเมทิลฟีนอลิกเรซิน	26
3.9	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ 2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ)	27
3.10	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ N-(1,3-Dimethylbutyl)-n'-phenyl-phenylenediamine (6PPD)	27
3.11	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ Diphenyl guanidine (DPG)	27
3.12	ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS)	28
3.13	เครื่องบดผสมแบบปิด	29
3.14	เครื่องบดผสมชนิดสองลูกกลิ้ง	30
3.15	เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง	30
3.16	เครื่องอัดเข้าขึ้นรูปยาง	31
3.17	เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง	32
3.18	เครื่องวัดความแข็ง	33
3.19	เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.20	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	35
3.21	เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	35
3.22	เครื่องทดสอบมุมสัมผัส	36
3.23	เครื่องทดสอบการสึกหรอ	44
4.1	ผลของการแปรสภาวะในการผสมพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA	46
4.2	ผลของการแปรสภาวะในการผสมพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA	48
4.3	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเทคนิค AFM ของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่มีการแปรสภาวะในการผสม	49
4.4	ความต้านทานต่อแรงดึงของ RR/EVA ที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างชนิดกัน	54
4.5	ความแข็งแรงของ RR/EVA ที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างชนิดกัน	54
4.6	อันตรกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนดที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด	56
4.7	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเทคนิค AFM ของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่าง ๆ	57
4.8	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้	58
4.9	ผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เติมในพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ต่อสมบัติเชิงกล	64
4.10	ผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ต่อค่าความแข็งแรง	68
4.11	ลักษณะที่เป็นไปได้บริเวณระหว่างภูมิภาคของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณที่แตกต่างกัน	68
4.12	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้าได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณต่างกัน	69
4.13	TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้าได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณต่างกัน	71
4.14	ผลเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในน้ำ	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	องค์ประกอบทางเคมีของไม้	76
4.16	เปรียบเทียบผลการทดสอบการยึดเกาะของเชื้อ <i>Staphylococcus aureus</i> และ <i>Escherichia coli</i> ของระแนงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ	79
4.17	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA และ RR/EVA	80
4.18	ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ที่นำไปทดลองติดตั้งใช้งานเป็นพื้นปูคอกแพะจริงเพื่อเปรียบเทียบการใช้งานกับไม้จริง	81
4.19	ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ที่นำไปทดลองติดตั้งใช้งานเป็นพื้นปูคอกแพะจริงเพื่อเปรียบเทียบการใช้งานกับไม้จริง	82
ค.1	ต้นแบบระแนงเทียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ RR/EVA ที่นำไปติดตั้งเป็นพื้นปูคอกแพะที่โรงเรือนจริง	105
ง.1	เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของ NR/EVA ที่เตรียมได้กับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA จากการศึกษาท่อน้ำ	109
ง.2	เปรียบเทียบความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ที่เตรียมได้กับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA จากการศึกษาท่อน้ำ	109
ง.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนยางธรรมชาติรีเคลมที่ผสมกับค่าความแข็งแรงเชิงกล	111
จ.1	FT-IR spectrum ของสารเพิ่มความเข้าได้ ชนิดอีวีเอตดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Ph-EVA)	113

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตสินค้าทางการเกษตรที่สำคัญของโลกตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากความเหมาะสมทางด้านภูมิศาสตร์ สภาพอากาศ และความอุดมสมบูรณ์ของดินและน้ำ โดยประเทศไทยได้ดุลการค้าจากผลผลิตทางการเกษตรประมาณ 9.2 แสนล้านบาท อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการส่งออกและนำเข้าสินค้านอกการเกษตร พบว่าประเทศไทยยังเสียดุลการค้าโดยรวมประมาณ 6.5 แสนล้านบาท [1] ดังนั้นการส่งเสริมและเร่งผลักดันให้เกษตรกรสามารถผลิตสินค้าและผลิตภัณฑ์ในปริมาณสูงและมีคุณภาพมากขึ้น รวมทั้งการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิตให้สูงขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น

สำหรับแพะเนื้อนั้นถือเป็นสัตว์เศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่เกษตรกรให้ความสนใจ และนิยมเลี้ยงเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในเขตพื้นที่ชายแดนภาคใต้ ได้แก่ ยะลา ปัตตานี สงขลา และนราธิวาส เนื่องจากชาวไทยมุสลิมนิยมนำเนื้อและนมแพะมาประกอบอาหาร ทั้งรับประทานในครัวเรือนและใช้ในการประกอบพิธีกรรมทางศาสนา นอกจากนี้แพะเนื้อยังเป็นสัตว์ที่เลี้ยงและดูแลง่าย สามารถกินอาหารได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นหญ้า วัชพืชในเรือกสวนไร่นา วัสดุเศษเหลือจากการเกษตร และสามารถปล่อยลงแทะเล็มในทุ่งหญ้าสาธารณะ ทำให้มีต้นทุนค่าอาหารต่ำ อีกทั้งเป็นสัตว์ที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และปรับตัวให้เข้ากับสภาวะนั้น ๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้แพะเนื้อสามารถเจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีช่องทางในการจำหน่ายได้หลายรูปแบบ เช่น การเลี้ยงแพะเพื่อการขยายพันธุ์ หรือจำหน่ายเป็นพ่อแม่พันธุ์ การจำหน่ายเนื้อแพะ รวมถึงผลพลอยได้อื่น ๆ เช่น หนังแพะ ขนและมูลแพะ เป็นต้น โดยเนื้อแพะสามารถนำมาใช้ทำอาหารได้หลากหลายชนิด แพะจึงเป็นสัตว์ทางการเกษตรที่สำคัญต่อเศรษฐกิจอีกชนิดหนึ่ง โดยการเลี้ยงแพะเนื้อส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้และภาคกลางของประเทศไทย และมีปริมาณการเลี้ยงเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในช่วงปี 2549-2554 มีการขยายการเลี้ยงแพะจาก 324,150 ตัว ในปี 2549 เป็น 427,567 ตัว ในปี 2554 หรือเพิ่มขึ้นในอัตราร้อยละ 2.72 ต่อปี แต่เนื้อแพะยังไม่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคโดยทั่วไปในประเทศ นอกจากผู้ที่นับถือศาสนาอิสลาม สภาพการเลี้ยงส่วนใหญ่เกษตรกรจึงเลี้ยงเป็นอาชีพเสริมหรืออาชีพรอง แต่การเลี้ยงแพะเนื้อสามารถพัฒนาเป็นอาชีพหลักที่มีความมั่นคงได้ เนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการเลี้ยงแพะและพัฒนาทั้งด้านการผลิตและการตลาด รวมทั้งมีนโยบายส่งเสริมการผลิตและส่งออกอาหารฮาลาล ซึ่งจะทำให้แพะเนื้อเป็นที่ต้องการของตลาดมากขึ้น ทางกรมปศุสัตว์

จึงได้มีการกำหนดแผนส่งเสริมการพัฒนาการเลี้ยงแพะสู่เชิงพาณิชย์ในรูปแบบฟาร์มที่มีมาตรฐานมากขึ้นจากเดิมที่เลี้ยงในระดับครัวเรือน โดยนอกจากมีเป้าหมายให้แพะเป็นสินค้าเศรษฐกิจภายในประเทศแล้ว ยังวางแผนเพื่อส่งออกต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศที่มีประชากรผู้นับถือศาสนาอิสลามหนาแน่น ได้แก่ กลุ่มประเทศในประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน เช่น มาเลเซีย อินโดนีเซีย บรูไน พม่า และสิงคโปร์ เป็นต้น อินเดีย ปากีสถาน จีน รวมทั้งประเทศแถบตะวันออกกลาง [2]

สำหรับโรงเรือนและอุปกรณ์ในการเลี้ยงแพะนั้น มีความคล้ายกันกับการเลี้ยงสัตว์ประเภทอื่น คือจะต้องมีสถานที่ไว้สำหรับพักอาศัยหลบแดด หลบฝน หรือเป็นที่สำหรับนอนในเวลากลางคืน ในการสร้างโรงเรือนที่ใช้เลี้ยงแพะนั้น ควรยกระดับจากพื้นดิน ทางขึ้นลงของโรงเรือนยกระดับไม่ควรลาดเอียงเกินกว่า 45 องศา และทางขึ้นลงควรมีไม้ตอกเสริมขวางเป็นขั้น ๆ เว้นระยะพื้นให้เป็นร่อง โดยใช้ไม้หนาขนาด 1 นิ้ว กว้าง 2 นิ้ว ปูพื้นให้เว้นร่องระหว่างไม้แต่ละอันห่างกันประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร เพื่อให้มูลแพะหล่นร่วงลงด้านล่างของโรงเรือน ทำให้ทำความสะอาดง่าย ไม่เกิดการหมักหมมของเชื้อโรค และสามารถเก็บมูลแพะสำหรับเตรียมปุ๋ยคอกใช้ในการปลูกพืชผักได้ โดยผนังพื้นใช้ไม้ตอกกันให้สูงประมาณ 1-1.5 เมตร [3] ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระแนงที่ใช้ปูพื้นโรงเรือนเลี้ยงแพะ

ในงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาวัสดุปูพื้นโรงเรือนที่ใช้เลี้ยงแพะ ซึ่งต้องการคอกที่ถูกสุขลักษณะ ปราศจากเชื้อโรค มีการระบายอากาศที่ดี และเอื้ออำนวยให้แพะสามารถดำรงชีวิตอย่างสบายในทุกอิริยาบถ เพื่อสามารถผลิตแพะที่มีคุณภาพทั้งเนื้อและนม ปัจจุบัน ฟาร์มแพะที่มีมาตรฐานนิยมสร้างแบบยกพื้นสูง เพราะเป็นรูปแบบที่ทำให้แพะมีสุขลักษณะที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับโรงเรือนแพะบนพื้นดินหรือพื้นคอนกรีต [4] พื้นโรงเรือนแพะที่มีการยกสูงจากพื้นดิน จะต้องใช้วัสดุที่รักษาความแห้งได้ดี ไม่ชื้น เนื่องจากความชื้นจะเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรคต่าง ๆ ซึ่งก่อให้เกิดโรคในแพะได้ ปัจจุบันพื้นดังกล่าวมีการปูด้วยไม้ระแนง โดยพบว่า ไม้ระแนงมีความแข็งแรง แต่มีปัญหาสำคัญ คือ ผุร่อนง่าย เนื่องจากการสัมผัสกับของเหลวที่มีขี้ เช่น การสัมผัสกับน้ำในขั้นตอนการล้างคอกและของเสียที่

ขับถ่ายจากแพะ จึงทำให้ไม้ระแนงที่เป็นพื้นโรงเรือนแพะมีอายุการใช้งานเพียง 2-3 ปี เท่านั้น ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุปูพื้นโรงเรือนสัตว์จากพลาสติกและมีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้ว ซึ่งพลาสติกชนิดหลักที่ใช้คือโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เช่น Plastic pig slat floor E-036 ผลิตโดยบริษัท Qingdao Xinbaofeng Industrial Trade Co.Ltd ประเทศจีน [5] และ Thickening plastic slatted floor SLB2 ผลิตโดยบริษัท Henan Fangda Machinery Equipment Co.,Ltd ประเทศจีน [6] เป็นต้น แต่ผลิตภัณฑ์วัสดุปูพื้นโรงเรือนสัตว์ทางการค้าดังกล่าว ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับคอกเลี้ยงสุกร เมื่อนำมาใช้ในการเลี้ยงแพะพบว่า มูลแพะไม่สามารถหล่นลงสู่ด้านล่างของโรงเรือนได้อย่างสะดวก จึงเกิดการหมักหมมและก่อให้เกิดโรคในแพะได้ รวมถึงไม้ระแนงที่ใช้ในปัจจุบัน ยังมีข้อด้อยในเรื่องของการไม่ทนทานต่อน้ำและความชื้น ทำให้เป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรคและจุลินทรีย์ต่าง ๆ ผู้ร่อนง่าย จึงทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้น รวมถึงไม่สามารถดูดซับแรงหรือพลังงานได้ แรงที่เกิดขึ้นจึงส่งผลกระทบต่อแพะได้โดยตรงทั้งหมด จึงอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บในแพะได้

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของคณะผู้วิจัยเตรียมวัสดุปูพื้นโรงเรือนแพะจากวัสดุประเภทพอลิเมอร์ โดยเน้นการใช้ยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก เพื่อใช้แทนไม้ระแนงในรูปแบบเดิมสามารถแก้ไขปัญหาการร่อนของวัสดุที่ใช้ปูพื้นโรงเรือนแพะและยังสามารถออกแบบให้พื้นมีรูปทรงและสมบัติที่ต้องการสำหรับโรงเรือนเลี้ยงแพะ ซึ่งวัสดุประเภทยางนั้นมีสมบัติเด่นหลายประการโดยเฉพาะด้านความยืดหยุ่น ความสามารถในการหักงอ มีความแข็งแรง ทนทานต่อน้ำและความชื้น จึงไม่เป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรค รวมถึงความสามารถในการดูดซับแรงและพลังงานที่เกิดจากเสียงหรือการสั่นสะเทือน รวมถึงการใช้อีวีเอซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก ยังช่วยเพิ่มสมบัติด้านความแข็งที่ให้สมบัติเหมาะสมยิ่งขึ้นในการใช้งานเสมือนไม้จริง พื้นปูโรงเรือนแพะจากยางธรรมชาติจึงน่าสนใจและความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นอุปกรณ์ที่มีอายุการใช้งานนานขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทไม้ระแนง นอกจากนี้อาจขยายการผลิตสู่เชิงพาณิชย์ได้

อย่างไรก็ตาม วัสดุที่เตรียมได้นั้นยังข้อด้อยในเรื่องของการมีต้นทุนในการผลิตที่สูง การแข่งขันในตลาดเกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงสนใจลดต้นทุนของการเตรียมวัสดุดังกล่าวที่ยังคงประสิทธิภาพเทียบเท่าสูตรเดิม งานวิจัยจึงทำการศึกษาการเตรียมวัสดุปูพื้นโรงเรือนแพะจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติรีไซเคิล (Reclaimed natural rubber, RR) ร่วมกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ (Ethylene-vinyl acetate, EVA) (RR/EVA) เพื่อลดต้นทุน ซึ่งสนใจการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ดังกล่าวโดยศึกษาสภาวะการผสมที่เหมาะสม ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติรีไซเคิลกับอีวีเอ โดยคาดหวังว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นจะมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า แต่ให้สมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าวัสดุระแนงเทียมที่เตรียมจากกระบวนการ

แบบเดิม นอกจากนี้ยังสนใจเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุที่เตรียมขึ้นเทียบกับประเภทที่ใช้อยู่เดิม โดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำและปัสสาวะเทียม รวมถึงสามารถลดการยืดเกาะหรือการยึดเกาะของจุลชีพ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปต่อสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ในการผสม
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติรีคอมผสมกับอีวีเอ โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด ได้แก่ อีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Phenolic compound modified EVA, Ph-EVA) และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25 และ ENR-50)
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติเชิงความร้อน ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำและปัสสาวะเทียม รวมถึงความต้านทานต่อการเจริญเติบโตของจุลชีพ ระหว่างระแนงเทียมจากพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติดั้งเดิม ไม้ระแนงจริง และระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาสภาวะในกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์กับสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วรอบในการผสม
- 1.3.2 ศึกษาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด ได้แก่ อีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Ph-EVA) และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่ระดับการมีหมู่อีพ็อกไซด์ 2 ระดับ (ENR-25 และ ENR-50) เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ให้เทียบเท่าหรือดีกว่ายางธรรมชาติผสมกับอีวีเอ
- 1.3.3 ทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุที่เตรียมได้
 - 1.3.3.1 สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็ง
 - 1.3.3.2 สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก และเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์
 - 1.3.3.3 ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำ
 - 1.3.3.4 ความต้านทานต่อของเหลวในปัสสาวะเทียม ได้แก่ ปัสสาวะแพะ
 - 1.3.3.5 ความต้านทานต่อจุลชีพ
 - 1.3.3.6 ความต้านทานต่อการสึกหรอ (DIN abrasion)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

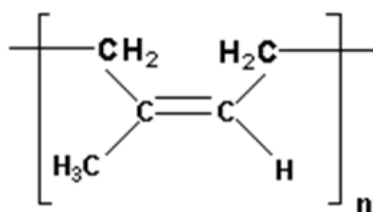
- 1.4.1 สามารถลดต้นทุนของระแนงเทียม โดยยังคงสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าสูตรก่อนหน้า
- 1.4.2 ทราบอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีไซเคิลต่อสมบัติต่าง ๆ ที่ให้ต้นทุนเหมาะสม
- 1.4.3 ทราบชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมต่อสมบัติต่าง ๆ
- 1.4.4 ลดปริมาณและเพิ่มคุณประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้มาจากยางของต้นพืชรubber ในตระกูล *Hevea brasiliensis* โดยยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตรทางเคมีเป็น C_5H_8 ที่มีชื่อเรียกว่า ไอโซพรีน (Isoprene) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 200,000-400,000 กรัมต่อโมล โดยการจัดเรียงตัวของยางธรรมชาติเป็นแบบ *cis*-1,4-polyisoprene [7] มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [7]

โดยแหล่งผลิตยางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในโลกคือ แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คิดเป็นร้อยละ 90 ของแหล่งผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือมาจากแอฟริกากลาง ซึ่งพันธุ์ยางที่ปลูกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คือ พันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) น้ำยางที่กรีดได้จากต้นจะเรียกว่าน้ำยางสด (Field latex) น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีลักษณะเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว มีสภาพเป็นคอลลอยด์ มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 27-48 มี pH 6.5-7 น้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความหนืด 12-15 เซนติพอยส์ ส่วนประกอบในน้ำยางสดแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65 เปอร์เซ็นต์ [7]

2.1.1 ส่วนประกอบของน้ำยาง [7]

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อกรีตมาจากต้นยางมีปริมาณของเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25-45 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารที่เป็นของแข็งและสารที่เป็นเนื้อยางแห้งประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ [8]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	27-48
เนื้อยางแห้ง	25-45
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-1.25
ซีเล้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

2.1.2 สมบัติยางธรรมชาติ [9]

ยางธรรมชาติเป็นยางที่มีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการขีดถู ความเหนียวติดกัน และสมบัติเชิงพลวัต เป็นต้น ทำให้เหมาะในการนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ถังมือ ถังยางอนามัย เป็นต้น รวมถึงงานในเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง โดยสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ ได้แก่ มีความยืดหยุ่นสูง (Elasticity) ในขณะที่มีความร้อนสะสม (Heat build-up) ขณะใช้งานที่ต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดที่ดีจึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น นอกจากนี้ ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงที่สูง (Tensile strength) เนื่องจาก สามารถเกิดผลึกเมื่อได้รับแรงดึง ซึ่งช่วยให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงได้ดี

นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ที่สูง ที่เป็นผลจากการเกิดผลึกในแนวเดียวกับแรงดึงและตั้งฉากกับรอยฉีกขาด เมื่อได้รับแรงดึง ทำให้ขัดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี (Dynamic properties) ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน มีความทนทานต่อการขีดถูที่ดี (Abrasion

resistance) มีสมบัติการกระด้างกระดอนที่สูงมาก (Rebound resilience) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีการสูญเสียพลังงานที่ต่ำ เมื่อถูกใช้ในงานทางไดนามิกส์ยางธรรมชาติจะมีความร้อนสะสมที่ต่ำด้วย ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะสำหรับการผลิตยางล้อรถที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น ด้านสมบัติทางกายภาพ ยางธรรมชาติมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ 20 °C เท่ากับ 0.934 และมีค่าเพิ่มขึ้นถ้ายางถูกแช่แข็งหรือถูกยืด ค่าความร้อนจำเพาะที่ 20 °C เท่ากับ 0.502 มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -70 °C มีความต้านทานไฟฟ้าเท่ากับ 1×10^{15} - 2×10^{15} Ohms-cm ซึ่งใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี [7]

สำหรับพฤติกรรมในตัวทำละลาย ยางธรรมชาติสามารถเกิดการบวมพองและในบางกรณีสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ยางธรรมชาติที่เกิดการเชื่อมขวางแล้วจะบวมพองในตัวทำละลายได้น้อยมาก ขึ้นอยู่กับชนิดตัวทำละลายและระดับการเชื่อมขวาง ดังนั้นการเชื่อมขวางทางเคมีจะช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการบวมพองในตัวทำละลายของยางธรรมชาติได้ แม้ว่ายางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีป้องกันการเสื่อมเพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขั้ว น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารที่ไม่มีขั้วได้ แต่สามารถทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ [9]

2.2 ยางธรรมชาติรีไซเคิล [10]

เนื่องจากจำนวนประชากรโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ยางจึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้ขยะยางมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกัน การจัดการกับขยะเหล่านี้ถือเป็นเรื่องที่ยากลำบากเพราะยางที่ผ่านการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ถือเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซตที่มีโมเลกุลเกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ผ่านปฏิกิริยาคัลคาไนเซชัน จึงไม่สามารถนำยางไปหลอมขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนเช่นพลาสติกบางชนิด อีกทั้งการย่อยสลายตามธรรมชาติก็ใช้เวลานานนับร้อยปี ด้วยเหตุนี้ขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางเก่าจึงทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม หากไม่ได้รับการแก้ปัญหาอย่างถูกวิธีก็จะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้นในอนาคต ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่สามารถนำขยะยางกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นเรื่องสำคัญและได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการอุตสาหกรรมยางและนักอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั่วโลก โดยทั่วไปการกำจัดขยะยางอย่างถูกวิธีต้องทำให้ขยะยางกลับมามีประโยชน์หรือใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งในอดีตการนำ

ขยะไปถมที่เป็นวิธีที่นิยมใช้ แต่ในปัจจุบันมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะหากเกิดเพลิงไหม้ บริเวณที่เก็บขยะจะทำให้เกิดควันดำและมีการปลดปล่อยสารพิษปริมาณมากสู่สิ่งแวดล้อมและแม้ไม่เกิดเพลิงไหม้ สารเคมีบางชนิดในยางก็อาจถูกน้ำชะเข้าสู่ดินหรือแหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียงได้ หรือการจัดการขยะยางวิธีอื่นคือการใช้เป็นเชื้อเพลิง การสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis) การแปรรูปให้เป็นยางผงและการรีไซเคิล ซึ่งการรีไซเคิลนั้นหมายถึงกระบวนการเปลี่ยนยางเก่าที่เป็นเทอร์โมเซตเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้และสามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้เหมือนยางดิบหรือยางคอมพาวด์ทั่วไป เรียกว่าที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลนี้ว่ายางรีไซเคิล (Reclaimed rubber, RR) การรีไซเคิลด้วยวิธีนี้นอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะยางแล้วยังช่วยประหยัดทรัพยากรปิโตรเคมีอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การนำยางรีไซเคิลไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ยางมีเพิ่มมากขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน

การผลิตยางรีไซเคิลมีด้วยกันหลายวิธีโดยวิธีการรีไซเคิลขยะสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้ [11]

1) การรีไซเคิลแบบดั้งเดิม โดยนำขยะยางไปบดให้เป็นผง จากนั้นผสมกับน้ำมันและสารเคมีที่เรียกว่าสารรีไซเคิล (Reclaiming agent) พร้อมทั้งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200-280 °C และความดันเป็นเวลาหลายชั่วโมง สารรีไซเคิลที่เติมจะเร่งกระบวนการทำลายพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากกำมะถัน ทำให้ยางรีไซเคิลมีลักษณะนิ่ม สามารถหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ ตัวอย่างที่สำคัญของสารรีไซเคิลที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ไดโซลีนไดซัลต์ ไดอัลลิลไดซัลไฟต์และไดเอริลไดซัลไฟต์ ในเชิงเทคนิคเรียกปฏิกิริยาทำลายพันธะการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลนี้ว่า ปฏิกิริยาดิวลคาไนเซชันหรือปฏิกิริยาดิวลคาไนเซชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาดิวลคาไนเซชัน

2) การรีไซเคิลด้วยสารเคมีดีลิงค์ (Delink) ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีการรีไซเคิลขึ้นใหม่ โดยใช้สารเคมีที่มีชื่อทางการค้าว่า ดีลิงค์ ในปริมาณเล็กน้อย 2-10% โดยน้ำหนักของยางผง ไปผสมกับยางผงที่มีขนาดในช่วง 20-40 เมช สารเคมีเหล่านี้จะเข้าไปทำลายพันธะระหว่างกำมะถันกับกำมะถันในยาง ทำให้โครงสร้างตาข่ายสามมิติถูกทำลาย ด้วยเหตุนี้ สารเคมีนี้จึงเหมาะสำหรับรีไซเคิลยางผงที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันเท่านั้น

3) การรีไซเคิลด้วยคลื่นไมโครเวฟ เมื่อยางได้รับคลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงระหว่าง 915 และ 2,450 เมกะเฮิร์ตซ์ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลยางเกิดการเคลื่อนที่หรือหมุนตัวเพื่อให้ประจุที่มีอยู่ในโมเลกุลเกิดการจลน์ตามทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แกว่งไปมาด้วยความถี่สูง การเคลื่อนที่หรือหมุนตัวตามความถี่ที่สูงดังกล่าว ทำให้โมเลกุลยางเกิดการขัดสีกันส่งผลให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว วิธีนี้ถือเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูง เทคนิคนี้ใช้ได้สำหรับการรีไซเคิลยางที่ได้รับการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและยางที่สามารถตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดี ได้แก่ ยางที่มีขั้วสูงหรือยางที่ไม่มีขั้วแต่มีการใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณมาก

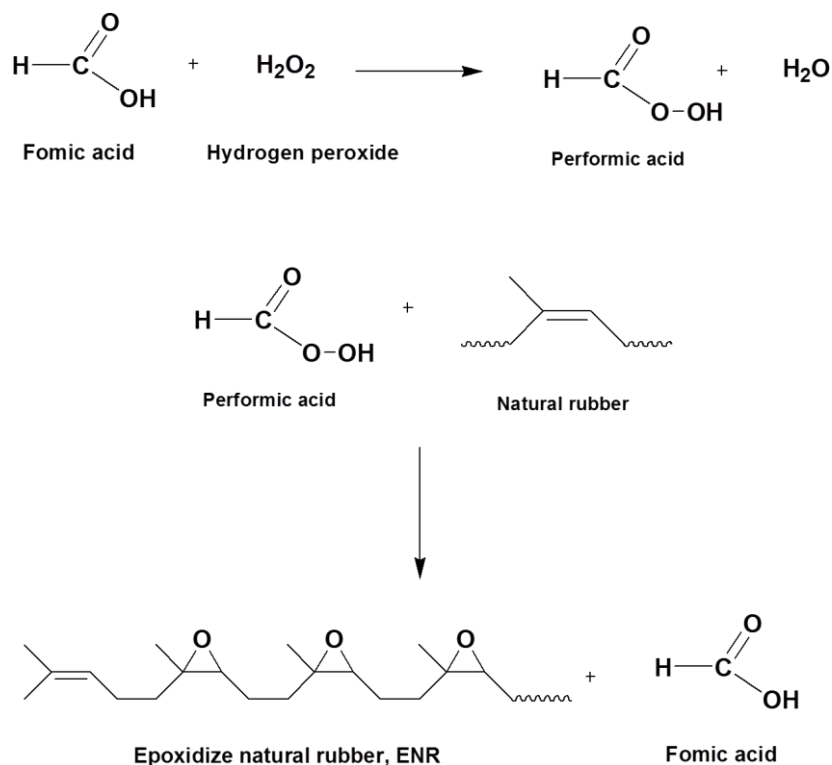
4) การรีเคลมด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ซึ่งคลื่นชนิดนี้เป็นคลื่นที่มีความถี่สูงประมาณ 20-50 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อผ่านคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความเข้มของพลังงานสูงกว่า 1,000 วัตต์เข้าไปในยางอย่าง ต่อเนื่องจะทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ เพราะพลังงานคลื่นจะเข้าไปทำลายพันธะระหว่างคาร์บอน กับกำมะถัน และกำมะถันกับกำมะถันที่มีอยู่ในยาง โดยทั่วไปการใช้คลื่นอัลตราโซนิกกับความ ร้อนและความดัน สามารถทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็ว วิธีการนี้เป็นวิธีการรีไซเคิล ที่ง่าย สะดวก มีประสิทธิภาพสูง ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีและให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเทคนิคอื่น แต่อาจทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ด้วยเช่นกันเมื่อยางได้รับคลื่นอัลตราโซนิกนานเกินไปจะให้ สมบัติเชิงกลด้อยลง

5) การรีเคลมด้วยเทคโนโลยีชีวภาพ ปัจจุบันได้มีการจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการนำแบคทีเรีย Chemolithiotrope ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำไปย่อยยางผง โดยการย่อยสลายจะเกิดเฉพาะที่บริเวณ พื้นผิวของยางเท่านั้น เมื่อนำยางผงที่ผ่านการย่อยสลายไปผสมกับยางใหม่ พบว่าโมเลกุลของยางใหม่ สามารถแพร่เข้าไปในยางผงได้ดียิ่งขึ้น ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางผงและยางใหม่สูงขึ้น การ ดีวัลคาไนซ์ยางด้วยการแช่ในสารแขวนลอยของแบคทีเรีย Chemolithiotrope ภายใต้สภาวะที่มี อากาศจะทำให้พันธะซัลฟิดิกที่มีอยู่ในยางเกิดการย่อยสลายเป็นธาตุกำมะถันและกรดซัลฟิวริก การย่อยสลายด้วยแบคทีเรียชนิดนี้จึงทำให้ได้ยางรีเคลมและธาตุกำมะถัน

จากแนวโน้มของการมีปริมาณขยะจากผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่สูงขึ้นนี้ ทางผู้ผลิตจึงเริ่มหันมา เลือกใช้วัสดุดังกล่าว อย่างเช่นยางรีเคลม เพื่อใช้ในการลดต้นทุนและทำให้สามารถแข่งขันได้ในตลาด ได้ง่ายขึ้น โดยยางรีเคลมนี้นำมาใช้งานแทนที่ได้ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ในการผลิต ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ยางล้อ แผ่นรองนั่ง ชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้ถ้าราคาของยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ยิ่งสูงขึ้น ก็จะทำให้มีปริมาณการใช้ยางรีเคลมมากขึ้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มี ปริมาณการใช้ยางรีเคลมทั่วโลกเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2 เป็นร้อยละ 4.5 โดยเฉพาะในทวีปเอเชียที่มี อัตราเฉลี่ยการใช้ยางรีเคลมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก [10]

2.3 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์หรือยาง Epoxidized natural rubber (ENR) เป็นยางที่ปรับสภาพโดย การเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลยางตรงบริเวณพันธะคู่และเกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์โดยผ่าน ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) เพื่อทำให้ยางมีความเป็นขั้วเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปในการเตรียมยาง ธรรมชาติอีพอกไซด์ทำได้โดยการใช้กรดเปอร์อะซิติก [12, 13] กรดเปอร์ฟอร์มิก [14, 15] ซึ่ง ก่อให้เกิดเป็นกรดเปอร์แอซิดในขณะที่ทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชันก็ได้ เรียกว่า ปฏิกิริยาแบบอินซิตู (*In-situ* reaction) หรืออาจเตรียมเป็นกรดเปอร์แอซิด (Peracid) ก่อนทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาอีพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ [16]

สำหรับกลไกการเกิดปฏิกริยาอีพอกซิเดชันเริ่มด้วยอะตอมออกซิเจนในหมู่เปอร์ออกไซด์ของกรดเปอร์ฟอร์มิกที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโตรฟิลิก (Electrophilic) ในการเหนี่ยวนำอะตอมของคาร์บอนพันธะคู่ของยางธรรมชาติที่มีความเป็นนิวคลีโอฟิลิก (Nucleophilic) ทำให้เกิดการฟอร์มตัวอยู่ในสภาวะไซคลิก ทรานซิชัน (Cyclic transition state) โดยพันธะเดี่ยวระหว่างอะตอมออกซิเจน (O-O bond) ของหมู่เปอร์ออกไซด์จะแตกออก เกิดเป็นพันธะ C=O ขึ้นมาใหม่ ในขณะที่พันธะคู่เดิมระหว่างคาร์บอนและออกซิเจนอะตอม (C=O) แตกออกไปสร้างพันธะใหม่กับอะตอมไฮโดรเจน เกิดเป็นพันธะ O-H ทำให้เกิดเป็นกรดคาร์บอกซิลิกขึ้น ส่วนพันธะคู่ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ กลายเป็นวงแหวนอีพอกซิขึ้นในผลิตภัณฑ์สุดท้าย

ปฏิกริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) ทำให้เกิดวงแหวนอีพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) ตรงตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งพันธะคู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติเป็นตำแหน่งที่ทำให้โมเลกุลยางมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกริยาเคมี การดัดแปรโมเลกุลด้วยวิธีการนี้ ทำให้สมบัติเฉพาะของยางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถปรับปรุงหรือเพิ่มสมบัติความทนต่อน้ำมัน และความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แพร่หลายมาก

2.4 ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [17]

ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic natural rubber, TPNR) หรือเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) เป็นวัสดุพอลิเมอร์กลุ่มใหม่ที่น่าสนใจ กล่าวคือเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยสองวัฏภาค คือ วัฏภาคยางและวัฏภาคพลาสติก ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จึงมีสมบัติและการประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่ยืดหยุ่นได้แบบยาง แต่สามารถหลอมและไหลได้เมื่อได้รับความร้อนจากวัฏภาคพลาสติกในขณะแปรรูป ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถใช้กระบวนการแปรรูปเหมือนกับการแปรรูปพลาสติกทั่วไปได้ ซึ่งมีความสะดวกและรวดเร็วกว่ากระบวนการผลิตยางรูปแบบเดิม (Conventional process) ลักษณะเด่นอีกประการคือ เมื่อปล่อยให้เกิดการเย็นตัวลงจะมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นเหมือนยางวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ยังสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปซ้ำได้ (Recycle) หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปมาแล้ว ซึ่งจะช่วยลดของเสียและต้นทุนการผลิตในระดับโรงงานอุตสาหกรรมได้ ทั้งนี้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ องค์ประกอบส่วนที่เป็นวัฏภาคแข็ง (Hard phase) ที่อุณหภูมิห้องและองค์ประกอบส่วนที่นิ่ม (Soft phase หรือ elastomeric phase) หรือ อีลาสโตเมอร์ ซึ่งมีสมบัติความยืดหยุ่นและไหลได้ โดยองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ทั้ง 2 ส่วน มีหน้าที่ดังนี้คือ

1) วัฏภาคแข็ง (Hard phase) ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไม่ให้วัฏภาคอีลาสโตเมอร์เกิดการไหลอย่างอิสระเมื่อถูกแรงกระทำ เมื่อวัฏภาคดังกล่าวได้รับความร้อน วัฏภาคแข็งจะหลอมและไหลเมื่อให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมของพลาสติกที่ใช้เป็นวัฏภาคแข็งหรือละลายในตัวทำละลาย ซึ่งเมื่อทำให้เย็นหรือระเหยตัวทำละลายออกไป วัฏภาคแข็งจะกลับสู่สภาพที่แข็งแรงอีกครั้ง นอกจากนี้การใช้พลาสติกเป็นวัฏภาคแข็งทำให้สามารถแปรรูปโดยใช้กระบวนการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติกทั่วไปได้

2) วัฏภาคอีลาสโตเมอร์ (Elastomeric หรือ Soft phase) ให้สมบัติทางด้านความสามารถในการโค้งงอหรือหักงอ (Flexibility) กล่าวคือ แสดงลักษณะทางด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) เช่นความสามารถในการยืดและความสามารถในการคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เป็นต้น

2.4.1 ความเข้ากันได้ของการเบลนด์ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก [18]

ความเข้ากันได้ (Compatibilization) ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกหรือพอลิเมอร์เบลนด์นั้น หมายถึงการเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมหรืออาจเกิดการเข้ากันได้บางส่วนซึ่งเกิดจากการแยกวัฏภาคพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ซึ่งหากมีความเข้ากันได้ไม่ดีจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ดังกล่าวได้ ดังนั้นการปรับปรุงความเข้ากันได้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์คือ อุณหภูมิของการเบลนด์ศาสตร์ของ

กระบวนการเบลนด์และการมีสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้อยู่ในระบบเป็นต้น โดยในภายหลังการเบลนด์ จะมีโอกาสเกิดลักษณะทาง สันฐานวิทยาได้ 3 ลักษณะ ได้แก่

1) ความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (Miscibility) เป็นลักษณะของพอลิเมอร์ 2 ชนิด ที่ผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดที่นำมาผสม โดยความเข้ากันได้จะต้องมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสอง เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจน หรือการเกิดผลึกร่วมกัน (Co-crystallization) เป็นต้น

2) ความเข้ากันได้บางส่วน (Semi-compatibility) โดยทั่วไป พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันทั้งทางด้านเคมีและฟิสิกส์ ที่ทำให้ไม่เกิดการเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์แต่ลักษณะเกิดเป็นลักษณะของการแยกวัฏภาคขึ้น โดยพอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่าจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Co-continuous phase) และพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่าจะทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย (Disperse phase)

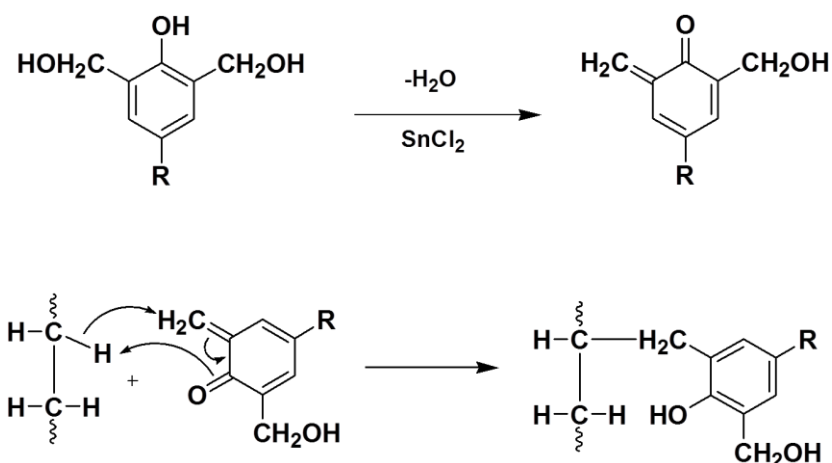
3) ความเข้ากันได้ไม่ได้ (Incompatibility) พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความไม่เข้ากัน ส่งผลให้มีสมบัติที่ไม่ดี เนื่องจากเกิดการแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคที่ต่ำ ก่อให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ทำให้สมบัติเชิงกลไม่ดี โดยทั่วไปความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์เบลนด์นี้เกิดจากความไม่เข้ากันด้านความหนืด

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์อย่างธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกที่มีความเข้ากันได้ พบว่า มีการศึกษาการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ในพลาสติกต่าง ๆ เช่น การเติม PP [19] HDPE [20] และ LLDPE [21] ตามลำดับ เพื่อปรับปรุงข้อจำกัดเรื่องของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคที่ต่ำ ซึ่งการเติมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้จึงเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคและยังทำให้ลักษณะของวัฏภาคกระจายมีขนาดเล็กลง สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่นิยมนำมาใช้จะต้องประกอบไปด้วย 2 ส่วน เพื่อให้สามารถเกิดความเข้ากันได้กับแต่ละองค์ประกอบของพอลิเมอร์เบลนด์

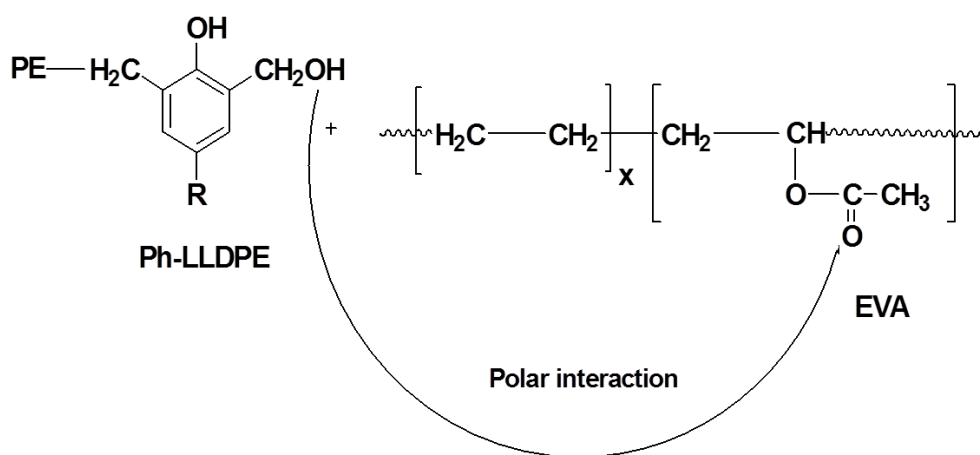
2.4.2 การดัดแปลงโมเลกุลพอลิโอฟีนส์ด้วยฟีนอลิกเรซิน [22]

สารเพิ่มความเข้ากันได้สามารถเตรียมได้จากการนำฟีนอลิกเรซินมาดัดแปลงโมเลกุลของพอลิโอฟีนส์ ซึ่งฟีนอลิกเรซินที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ ไดเมทิลอลฟีนอลิกเรซิน (Dimethylol phenolic resin) เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิโอฟีนส์ และยังมีหมู่เมทิลอลที่สามารถเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกที่มีขั้วที่สามารถทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วได้ เช่น อีวีเอ อยาธรรมชาติอีพ็อกไซด์ เป็นต้น โดยวิธีการดัดแปลงพอลิโอฟีนส์ด้วยฟีนอลิกเรซิน นิยมเตรียมในสถานะด้วยเครื่องบดผสมแบบปิดระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีการใช้

สแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride, SnCl_2) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยกลไกการดัดแปลงโมเลกุลของ LLDPE ด้วยไดเมทิลฟีนอลิกเรซิน (Ph-LLDPE) และการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-LLDPE ในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง LLDPE/EVA แสดงดังรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 กลไกการดัดแปลงโมเลกุลของ LLDPE ด้วยไดเมทิลฟีนอลิกเรซิน (Ph-LLDPE) [22]



รูปที่ 2.4 การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง LLDPE/EVA ด้วย Ph-LLDPE ในการเพิ่มความเข้ากันได้ [22]

การเพิ่มความเข้ากันได้ยังสามารถนำไปใช้ระหว่างพอลิโอเลฟินส์กับยางที่ไม่มีขั้วได้ เช่น ยางธรรมชาติ [23] โดยเตรียมได้จากการเบลนดระหว่าง NR/HDPE และใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่

เตรียมจากการดัดแปลงโมเลกุล HDPE ด้วยพีนอลิกเรซินชนิด SP-1045 และ HRJ-10518 โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เมทิลอลของพีนอลิกเรซินกับพันธะคู่ของ NR และ HDPE ทำให้เกิดการเชื่อมประสานระหว่างสองวัสดุ

2.4.3 การปรับปรุงสมบัติของการเบลนดอย่างธรรมชาติกับอีวีเอ

ในปี 2017 Ramarad และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาการเบลนดอย่างธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ โดยการใช้การฉายรังสีด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam irradiation) เพื่อศึกษาทอร์คการเบลนด สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิเมอร์เบลนด พบว่า ทอร์คการเบลนดของพอลิเมอร์เบลนดมีค่าต่ำกว่าอีวีเอ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการแปรรูปที่ดีกว่า และการเติมอีวีเอยังช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการฉายรังสี โดยการเสริมให้เกิดพันธะเชื่อมขวางและปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคยางให้มีขนาดที่เล็กลงในเมทริกซ์อีวีเอ ทำให้สมบัติเชิงกลพลวัตเพิ่มขึ้น แต่พบว่าสมบัติเชิงความร้อนของพอลิเมอร์เบลนดลดลง เนื่องจากการเติมยางธรรมชาติรีเคลมทำให้การผลึกช้าลงและยังไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกอีวีเอ

ในปี 2008 Ismail และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการเบลนดอย่างธรรมชาติกับอีวีเอที่ผสมอ็อกโซโนเคลย์ นาโนคอมโพสิต เพื่อศึกษาผลของลำดับการเบลนดและผลของปริมาณการเติม อ็อกโซโนเคลย์ ที่มีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การเสื่อมสภาพทาง ความร้อน ความสามารถในการติดไฟ และการดูดซับน้ำ โดยพบว่าพอลิเมอร์เบลนดที่มีการเติมเคลย์ ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น และสามารถต้านทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อน การดูดซับน้ำและการติดไฟ ซึ่งค่าความสามารถในการติดไฟมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเคลย์เพิ่มขึ้น โดยใช้เคลย์ในปริมาณ 2 phr ให้สมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากที่สัดส่วนนี้ให้ลักษณะที่เป็นวัฏภาครวม โดยการมีสมบัติที่ดีขึ้นของยางเบลนดที่มีการเติมเคลย์ เป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเคลย์กับ วัสดุของอีวีเอ

2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Asaletha *et al.* (1999) [26] ได้ทำการเบลนดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) โดยเตรียมด้วยเทคนิควัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์เพื่อศึกษาอัตราส่วนการเบลนด สภาวะในการขึ้นรูป และระบบวัลคาไนซ์ พบว่าอัตราส่วนการเบลนดที่มีปริมาณของวัฏภาคยางธรรมชาติมากขึ้น ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง ในขณะที่ให้ค่าความต้านทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้น และสำหรับการเบลนดด้วยเทคนิควัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ที่ใช้ระบบผสมกำมะถันกับเปอร์ออกไซด์ ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด เนื่องจากวัฏภาคกระจายมีขนาดอนุภาคที่เล็กและมีความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง

ที่สูง ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ระบบก้ำมะกัณฑ์ให้ค่าความต้านทานต่อการกระแทกต่ำที่สุด พอลิเมอร์เบลนด์ที่วัลคาไนซ์จะให้สมบัติเชิงกลและความแข็งที่สูงกว่าในพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่วัลคาไนซ์

Mohamad *et al.* (2005) [27] ได้เตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR-50) กับอีวีเอ โดยศึกษาอัตราส่วนการเบลนด์ พบว่าเมื่อปริมาณอีวีเอเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า การเบลนด์ ENR-50/EVA ที่อัตราส่วน 40/60 และ 50/50 มีลักษณะเป็นวัฏภาคร่วม (Co-continuous phase) และสมบัติเชิงกลพลวัต แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ ENR-50 มีความเข้ากันได้กับอีวีเอ มากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า วัฏภาคของยาง ENR-50 สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของอีวีเอได้ และเนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่เหนือกว่า นอกจากนี้ ยังพบว่า ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 50/50 มีความเสถียรทางความร้อนสูงที่สุด

Thitithammawong *et al.* (2007) [28] ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เพื่อศึกษาความสมดุลระหว่างปริมาณการเชื่อมขวางของวัฏภาคยางธรรมชาติและการเสื่อมสภาพของวัฏภาค PP โดยศึกษาชนิดของเปอร์ออกไซด์ ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง ได้แก่ 2,5-dimethyl-2,5-di(tert-butylperoxy) hexyne-3 (DTBPHY), 2,5-dimethyl-2,5-di(tert-butylperoxy) hexane (DTBPH), di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (DTBPIB) และ Dicumyl peroxide (DCP) ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางธรรมชาติกับ PP เท่ากับ 60/40 โดยเทคนิคการเบลนด์แบบหลอมที่อุณหภูมิการเบลนด์เป็น 160 °C และ 180 °C พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ DTBPIB และ DCP ที่อุณหภูมิการเบลนด์เป็น 160 °C ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ได้แก่ ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด และค่าการ เสียรูปหลังการกด (Compression set) ซึ่งสันนิษฐานว่า เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 180 °C แต่มีข้อเสียในเรื่องของกลิ่นเหม็น และสำหรับที่อุณหภูมิ 180 °C ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง

Zurina *et al.* (2008) [29] ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่ผ่านการฉายรังสีจากลำอิเล็กตรอน (Irradiated epoxized natural rubber) กับอีวีเอ เพื่อศึกษาการใช้ N,N'-m-phenylene dimaleimide (HVA-2) ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางที่มีอนุโมลิสระ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยพบว่าการเติม HVA-2 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมขวางในวัฏภาคของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มากกว่าในวัฏภาคอีวีเอ นอกจากนี้ ยังช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิเมอร์เบลนด์ เนื่องจาก HVA-2 สามารถช่วยในการ

ปรับปรุงความกันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์และช่วยให้มีการยึดเกาะระหว่างวัสดุที่ขึ้น ที่สามารถ ยืนยันได้จากเทคนิค SEM

Abdullah *et al.* (1995) [30] ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low density polyethylene, LLDPE) เพื่อศึกษาอัตราส่วนการเบลนด์ อุณหภูมิต่างๆที่ใกล้เคียงอุณหภูมิการหลอมของ LLDPE และอัตราเร็วในการเบลนด์ที่แตกต่างกัน พบว่า สภาพการแปรรูปที่ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 135 °C และอัตราเร็วในการเบลนด์เป็น 55 รอบต่อ นาที นอกจากนี้ยังสนใจศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติเหลว (liquid natural rubber, LNR) ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่า ที่อัตราการเบลนด์ยางธรรมชาติกับ LLDPE เท่ากับ 50/50 และ ปริมาณของ LNR เป็น 10-15% โดยน้ำหนัก ให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวที่ดี ของวัสดุพลาสติกในเมทริกซ์ยาง ซึ่งสามารถยืนยันความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ เติม LNR ได้จากเทคนิค SEM และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DMA พบว่า ปรากฏอุณหภูมิเปลี่ยน สภาพแก้ว (T_g) ของวัสดุยางธรรมชาติค่าเดียวคือที่อุณหภูมิ -55 °C โดยการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นบน พื้นผิวระหว่างวัสดุยางธรรมชาติ และ LLDPE เป็นผลมาจากการมีหมู่วงไว บนสายโซ่ของ LNR ที่ ก่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุทั้งสอง

Jansen *et al.* (1995) [31] ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับอีวีเอเพื่อศึกษา อัตราส่วนการเบลนด์และผลของการปรับปรุงสมบัติความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรโมเลกุลของอีวีเอ ด้วยเมอร์แคปโต คือ กรดเมอร์แคปโตอะซิดิก (EVA modified with sulfhydryl (SH) groups, EVASH) ที่ปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก โดยจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า ที่อัตราส่วนการเบลนด์ยางธรรมชาติกับอีวีเอ เท่ากับ 60/40 ร่วมกับการเติม EVASH มีลักษณะเป็น วัสดุคร่ำว ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงความแข็งและความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบลนด์ เนื่องมาจาก EVASH สามารถเกิดการเชื่อมขวางของหมู่ซัลไฟไฮไดรลในโครงสร้างของ EVASH กับ พันธะคู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ การวัดปริมาณผลึกด้วยเทคนิค DSC พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ ดังกล่าวที่มี EVASH เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ทำให้ปริมาณผลึกลดลง

Jansen *et al.* (1996) [32] ได้ทำการศึกษาใช้ EVASH ที่ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในเทอร์โมพลาสติกยางธรรมชาติของการเบลนด์ยางธรรมชาติกับอีวีเอร่วมกับไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ที่ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางโดยการเตรียมด้วยเทคนิควัลคาไนเซชัน แบบไดนามิกส์ โดยอัตราส่วนการเบลนด์ยางธรรมชาติกับอีวีเอ เท่ากับ 80/20 phr ปริมาณ EVASH เท่ากับ 5 phr และศึกษาปริมาณของ DCP ที่ใช้ โดยพบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการใช้ EVASH ร่วมกับ DCP ในปริมาณที่มากที่สุดในการศึกษา เท่ากับ 0.74 phr ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและ ความแข็ง (Shore A) สูงที่สุดตามปริมาณของ DCP เนื่องจาก DCP ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาที่

ทำให้เกิดการเข้ากันได้ของ EVASH การเชื่อมขวางในวิทยาศาสตร์ยางธรรมชาติเป็นผลมาจากการเติม EVASH ร่วมกับ DCP หรือ DCP ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ของวิทยาศาสตร์ยางธรรมชาติเลื่อนในทิศทางที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งยืนยันด้วยเทคนิค DSC นอกจากนี้ ยังส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าลดลง

Oommen *et al.* (1997) [33] ได้ทำการศึกษาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับพอลิเมทิลเมทาคริเลท (Poly(methyl methacrylate), PMMA) โดยใช้ยางธรรมชาติกราฟต์โคพอลิเมอร์กับ PMMA (NR-g-PMMA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของยาง โดยที่อัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PMMA เท่ากับ 60/40 ให้ค่าความหนืดที่สูงที่สุด รวมถึงความหนืดในการหลอมเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ของ NR-g-PMMA เพิ่มขึ้นจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวิทยาศาสตร์ การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ดังกล่าวยังช่วยลดขนาดของอนุภาคของวิทยาศาสตร์กระจายและช่วยคงสภาพของลักษณะทางสัณฐานวิทยา นอกจากนี้ยังกล่าวได้ว่าการกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์เป็นผลมาจากสภาวะการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์และการเอ็กซ์ทรูดขึ้นรูป ผลจากการสร้างกราฟของอัตราการเฉือนและอุณหภูมิ ที่อัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/PMMA เท่ากับ 50/50 โดยแปรปริมาณความเข้มข้นของ NR-g-PMMA พบว่า ให้ค่าที่สูงกว่าทฤษฎีซึ่งค่าเบี่ยงเบนเชิงบวกนี้ ไม่เพียงแต่เกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวิทยาศาสตร์เท่านั้น แต่ยังเกิดจากความหนืดที่แตกต่างกันของทั้งสองวิทยาศาสตร์

Nair *et al.* (2006) [34] ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 10/90 ที่มีการใช้บล็อกโคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติและพอลิยูรีเทน (NR/PU block copolymer) 1.5 % โดยน้ำหนัก เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งสมบัติเชิงกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้การเติมยางธรรมชาติ 10 ส่วนในพอลิเมอร์เบลนด์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง อย่างไรก็ตาม สามารถทำการปรับปรุงด้วยการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ 1.5 % โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด รวมถึงช่วยปรับปรุงความต้านทาน การกระแทกของ PVC และให้ค่าการยืดเกาะที่ดีระหว่างวิทยาศาสตร์ยางธรรมชาติและวิทยาศาสตร์ PVC ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีของวิทยาศาสตร์ยางธรรมชาติในเนื้อพื้นที่เป็น PVC

Nakason *et al.* (2007) [35] ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เพื่อศึกษาอัตราส่วนการเบลนด์ ที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดฟีนอลิก (Phenolic compatibilizer) คือ Active hydroxymethyl (methylol) groups (HRJ-10518) และ Dimethylol phenolic resin (SP-1045) หรือใช้ยางธรรมชาติเหลว (liquid natural rubber, LNR) ซึ่งเป็นยางธรรมชาติที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล

พบว่า ค่าทอร์คการเบลนด์ ความเค้นแรงเฉือน และความหนืดแรงเฉือนของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของวัฏภาคยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดฟีนอลิก พบว่า ทำให้มีความเข้ากันได้หรือเข้ากันได้บางส่วน ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ LNR มีความไม่เข้ากัน ในกรณีพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ฟีนอลิก พบว่า ที่อัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 40/60 มีความเป็นวัฏภาคร่วม และที่อัตราส่วนนี้ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด HRJ-10518 การใช้ไขมันพาราฟินิกในพอลิเมอร์เบลนด์มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงแต่ให้ ค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

Nakason *et al.* (2012) [36] ได้ทำการเบลนด์เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากอีวีเอกับยางธรรมชาติต่างชนิด โดยใช้สารดัดแปลงโมเลกุลของอีวีเอด้วยฟีนอลิก ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ยาง ENR (Epoxidized natural rubber) มีการกระจายตัวที่ดีของวัฏภาคระยะยาวและมีความเป็นวัฏภาคร่วมมากกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ยาง MNR (Maleated natural rubber) และยางธรรมชาติ ส่งผลให้มีความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่า ส่วนพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ยางธรรมชาติ ให้ค่าความสามารถในการยืดหยุ่นที่ดีที่สุด (Extensibility) ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงลักษณะโมเลกุลในแง่ของมวลโมเลกุลและระดับในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่จากการยืนยันด้วยเทคนิค DSC พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสามชนิดยังให้ค่าความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากส่วนของอีวีเอ มีความต้านทานต่อความร้อนสูง โดยพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ยาง ENR ให้ค่าความเสถียรทางความร้อนสูงที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลและระหว่างวัฏภาคที่สูง รวมถึงการมีปริมาณผลึกที่สูงที่สุด

ในปี 2558 วิสุทธิ์ แก้วสกุล และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอ โดยศึกษาปริมาณสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ ได้แก่ เชมดำและซิลิกา รวมถึงปริมาณน้ำมันช่วยในการแปรรูปที่เหมาะสมในยางคอมพาวด์ เพื่อหาสูตรที่คาดว่าจะสามารถ ให้สมบัติที่ใกล้เคียงกับยางในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งสมบัติที่สำคัญคือ โมดูลัส ความแข็ง และความแข็งแรง จากนั้นจึงนำคอมพาวด์มาผสมกับพลาสติกชนิดอีวีเอ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัฏภาคระยะยาวโดยยางธรรมชาติเป็นวัฏภาคหลัก เพื่อให้สามารถแปรรูปด้วยเครื่องมือแปรรูปยางได้ ศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอและเกรดของอีวีเอที่เหมาะสม รวมถึงการศึกษานำปริมาณสารตัวเติมชนิดไซเลนที่ทำให้การเสริมแรงของซิลิกาในพอลิเมอร์เบลนด์ดีที่สุด สมบัติที่ใช้ในการประเมินเพื่อเลือกวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับใช้ผลิตไม้ระแนงเทียม คือ สมบัติด้านการแปรรูป ได้แก่ ความหนืดมูนิและลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด สมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความแข็ง และความต้านทานต่อการบวมพองด้วยน้ำ ผลจากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติเหมาะสมในด้านการแปรรูป ความแข็ง ความแข็งแรงเชิงกล และระดับการ

บวมพองในน้ำ คือ พอลิเมอร์เบลนด์ที่ประกอบด้วยสารตัวเติมผสมระหว่างเซมาและซิลิกาในสัดส่วน 1:1 เท่ากับ 120 phr ใช้ไขมันช่วยในการแปรรูป 17.2 phr อัตราส่วนการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับ EVA เท่ากับ 80/20 phr และใช้อีวีเอชนิดที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตท 28 % โดยน้ำหนัก (EVA-28) และการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิด TESPT ในปริมาณ 5.4 phr โดยการใช้สารตัวเติมในปริมาณดังกล่าว ให้ค่าสมบัติสมบัติต่าง ๆ เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดถึง 13.5 MPa ค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงถึง 350 % ค่าทอร์ควัลคาไนซ์เหมาะสมที่สุดเป็น 45 dN.m และให้ค่าความแข็งสูงถึง 90 Shore A รวมถึงช่วยปรับปรุงสมบัติการแปรรูปของยางคอมพาวด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือความเหนียวของยางคอมพาวด์มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ในปริมาณอื่น ๆ และเมื่อทำการเปรียบเทียบระดับการบวมพองในน้ำของพอลิเมอร์เบลนด์กับไม้ระแนง พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์มีระดับการบวมพองในน้ำที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งอาจช่วยส่งเสริมให้มีอายุการใช้งานที่นานกว่า

นอกจากนี้การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ร่วมกับการใช้ Software Nanoscope III 5.12r3 ซึ่งให้ภาพวัฏภาค (Phase image) เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของวัฏภาค (Phase distribution) ของพอลิเมอร์เบลนด์นั้น โดยใช้หลักการความชอบน้ำที่แตกต่างกัน (Local hydrophilicity differences) [38, 39] โดยพื้นที่ของวัฏภาคที่ไม่ชอบน้ำ จะแสดงเป็นส่วนสีขาวที่สามารถสังเกตได้จากภาพ Phase image การใช้โปรแกรม Software Nanoscope III 5.12r3 สามารถวิเคราะห์การกระจายตัวระหว่างวัฏภาค โดยแสดงผลแบบ Bimodal distribution รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างวัฏภาค (Phase contrast) จากการวัดระยะห่างระหว่างยอดพีกการแยกวัฏภาคของสองวัฏภาค ถือได้ว่าเป็นการวิเคราะห์หนึ่ง ที่สามารถช่วยยืนยันความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัน (Co-continuous phase) ของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองวัฏภาค โดยในงานวิจัยของ Liu *et al.* (2009) [38] ได้มีการใช้เทคนิค AFM ร่วมกับการใช้ Software Nanoscope III 5.12r3 ในการวิเคราะห์การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์โลสที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ที่การบ่มด้วยเอนไซม์เพื่อให้เกิดการย่อยสลายในระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยแสดงผลความสัมพันธ์ระหว่าง Phase (Degree) กับ Phase-bearing-area probability densities (1/degree) โดยแสดงผลการกระจายตัวแบบ Bimodal distribution โดยพีกที่ต่ำกว่า (Low peak) แสดงถึงส่วนที่เป็นช่วงว่างระหว่างเส้นใยไมโคร (Microfibrils) ของเซลล์โลสหลังจากเกิดการไฮโดรไลซิส และพีกที่สูงกว่า (High peak) แสดงถึงส่วนของพื้นผิวของเส้นใยไมโคร ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถใช้ Phase-bearing-area probability densities วัดเชิงปริมาณได้จากค่าความเข้มของพีก (Intensity) และค่าความกว้างของพีกที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (Full-width half maximum, FWHM)

โดยจากความสัมพันธ์พบว่า Phase-bearing-area probability densities ของ Low peak มีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงใน High peak ตามระยะเวลาในการเกิดไฮโดรไลซิสที่เพิ่มขึ้น โดยการเกิดช่องว่างที่เพิ่มขึ้นระหว่างเส้นใยไมโคร เนื่องจากการลดลงของพื้นผิวที่ปกคลุมเส้นใยไมโคร จากการไฮโดรไลซิส และการเกิดการทำลายส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ชั้นนอก รวมทั้งเกิดการแตกหักของเส้นใยไมโครให้เป็นอนุภาคขนาดเล็ก (Fragmentation) ด้วยเหตุนี้ทำให้พื้นผิวของเส้นใยไมโครลดลง จึงส่งผลให้ Phase-bearing-area probability densities ของ High peak มีค่าลดลง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วย software Nanoscope III 5.12r3 มีความสอดคล้องกับภาพจุลภาคที่ได้ ซึ่งเป็นยืนยันว่าการใช้เทคนิค AFM สามารถวิเคราะห์การแยกวัฏภาคได้ โดยสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับสมการของ Scherrer (Scherrer equation) [39] โดยจากความสัมพันธ์ในสมการของ Scherrer ที่ใช้สำหรับการคำนวณขนาดของจุลผลึก (Crystallite size) นั่นคือ ขนาดของความหนาแน่น มีค่าแปรผกผันกับความกว้างของพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (Full-width half maximum, FWHM) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวจึง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของวัฏภาคอย่างธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอในพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากเทคนิค AFM ร่วมกับโปรแกรม Gwyddion 2.50 โดยใช้ค่า FWHM ในหน่วยองศา (Degree) ที่วัดได้จากภาพวัฏภาค (Phase image) กล่าวคือขนาดของการกระจายตัวของวัฏภาคจะมีค่าแปรผกผันกับค่าความกว้างของพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่งของแต่ละวัฏภาครวมทั้งสามารถวิเคราะห์ค่าความแตกต่างระหว่างวัฏภาค (Phases contrast) ในหน่วยองศา ได้จากการวัดระยะห่างระหว่างยอดพีคการแยกวัฏภาคของยางและอีวีเอ ที่บ่งบอกได้ถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Co-continuous phase) ของพอลิเมอร์เบลนด์ ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้เทคนิค AFM เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์และยืนยันการกระจายตัวของวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ของยางธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอ

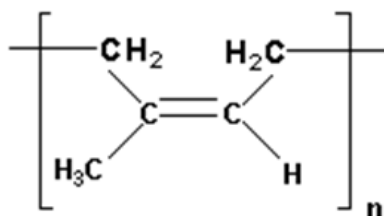
บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติชนิดแท่งเกรด STR 5L ใช้สำหรับเตรียมเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ร่วมกับอีวีเอ ผลิตโดยบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น จำกัด จังหวัดสงขลา ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมี แสดงดังรูปที่ 3.1



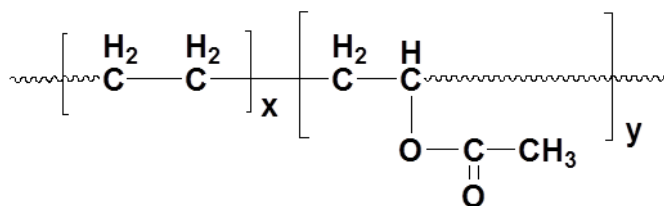
รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

3.1.2 ยางธรรมชาติรีเคลม (Reclaimed natural rubber, RR)

ยางธรรมชาติรีเคลมที่ได้มาจากหน้ายางล้อรถบรรทุกซึ่งเป็นส่วนของยางธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงสีดำ ขนาดอนุภาคประมาณ 40 เมช ใช้สำหรับเตรียมเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ร่วมกับอีวีเอเพื่อลดต้นทุน ผลิตโดยบริษัท Union commercial development จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย

3.1.3 เอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ (Ethylene-vinyl acetate copolymer, EVA)

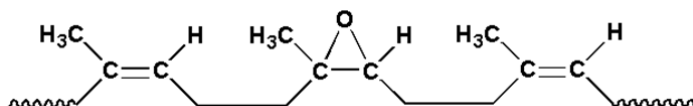
เอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท มีไวนิลอะซิเตท 28 % โดยน้ำหนัก (EVA-28) มีลักษณะเป็นเม็ดของแข็งสีขาวใส มีความหนาแน่นประมาณ 0.92-0.93 g/cm³ ใช้สำหรับเตรียมเป็นพอลิเมอร์เบลนด์ร่วมกับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติรีเคลม และใช้เป็นพอลิเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอีวีเอตัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน ผลิตโดยบริษัท ทีพีไอ (มหาชน) จำกัด จังหวัดระยอง ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ

3.1.4 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR)

ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25 และ ENR-50) สำหรับใช้เป็นสารปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.3



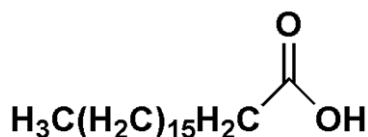
รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอีพอกไซด์

3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารเติมแต่งอนินทรีย์สำหรับพอลิเมอร์ต่าง ๆ ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีลักษณะเป็นผงสีขาวที่ไม่ละลายในน้ำ มีความหนาแน่นเท่ากับ 5.61 g/cm³ โดยใช้สำหรับเป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย

3.1.6 กรดสเตียริก (Stearic acid)

กรดสเตียริก (Commercial grade) เกิดจากการผสมกันของกรดไขมันอิ่มตัวที่สำคัญ ได้แก่ กรดสเตียริก (Octadecanoic) และกรดปาล์มมิก (Hexadecanoic or Palmitic Acid) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น มันเงา มีกลิ่นหืนของไขมัน มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.94 g/cm³ โดยใช้สำหรับเป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.4

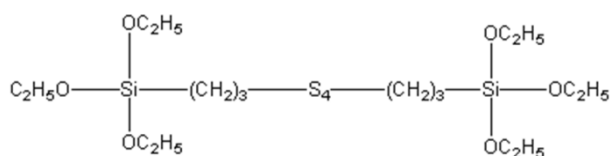


รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก

ซิลิกา มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.65 g/cm^3 โดยใช้ซิลิกาเกรด Ultrasil VN3 พื้นที่ผิว $175 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็นเกรดแบบเสริมแรงและกระจายตัวสูง สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้แก่พอลิเมอร์เบลนด์ ผลิตโดยบริษัท Evonik industries ประเทศเยอรมนี

3.1.8 Bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (TESPT)

สารคู่ควบไซเลนเลน (Silane coupling agent) ที่เป็นสารประกอบของ organosulfur โมเลกุลประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ (Bifunctional) ของ trialkoxysilyl propyl ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ polysulfide เป็น สารประกอบของเหลวหนืด ไม่มีสี สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปเช่น โทลูอีน มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.08 g/cm^3 ใช้สำหรับเป็นสารเชื่อมประสานระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายและยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น ผลิตโดยบริษัท Evonik industries ประเทศเยอรมนี โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.5



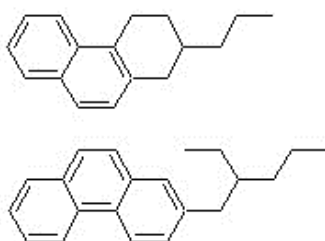
รูปที่ 3.5 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ Bis (triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (TESPT)

3.1.9 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำมีลักษณะเป็นผงสีดำ มีความหนาแน่นประมาณ 1.70 g/cm^3 โดยใช้เขม่าดำเกรด N-330 สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้แก่พอลิเมอร์เบลนด์ ผลิตโดยบริษัท สยามคาร์บอนประเทศไทย

3.1.10 น้ำมันชนิดอะโรมาติก (Aromatic oil)

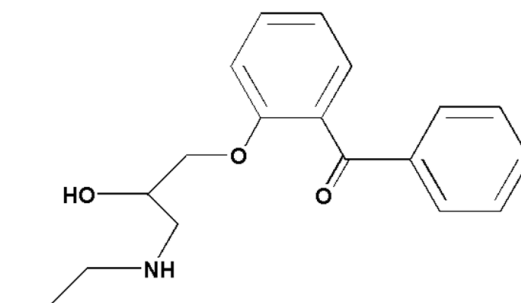
น้ำมันชนิดอะโรมาติกมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ Unsaturated single และ Multiple-ring compounds มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้ม โดยจะมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติก 65-85 % มีความหนาแน่นประมาณ 0.98 g/cm^3 ใช้สำหรับเป็นน้ำมันช่วยในการแปรรูป (Processing aid) ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันชนิดอะโรมาติก

3.1.11 พาราฟินแวกซ์ (Paraffin Wax)

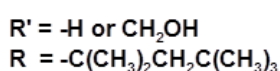
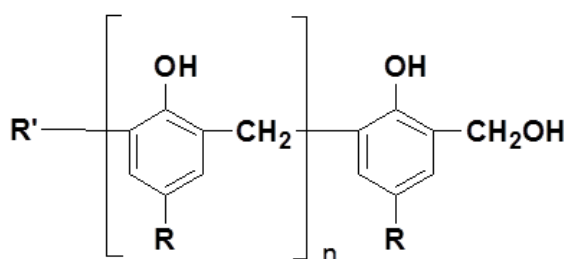
พาราฟินแวกซ์เป็นสารประกอบประเภทไฮโดรคาร์บอน เป็นแว็กซ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มปิโตรเลียมแว็กซ์ มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายน้ำมันพาราฟินหนักแต่น้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงเปลี่ยนสภาพกลายเป็นของแข็ง พาราฟินแวกซ์เกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือมีจุดหลอมเหลวต่ำสามารถใช้เป็นสารทำให้ยางนิ่มหรือเป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตได้ ส่วนพาราฟินแวกซ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนิยมใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวขุ่น มีความหนาแน่นประมาณ 0.90 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของพาราฟินแวกซ์

3.1.12 ไฮดร็อกซีเมทิลฟีนอลิกเรซิน (Hydroxymethylol phenolic resin, Ph)

ฟีนอลิกเรซิน ชนิดไฮดร็อกซีเมทิลฟีนอลิกเรซิน เกรด HRJ-10518 มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีเหลืองอำพัน เป็นสารพวกฟีนอลิกเรซินชนิดรีโซล (Resol) ที่มีหมู่เมทิลอลอยู่ในช่วง 6-9 % มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.05 g/cm^3 ใช้สำหรับเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ชนิดอีวีเอดัดแปรโมเลกุลด้วยฟีนอลิกเรซินและใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ ผลิตโดยบริษัท Schenectady International Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.8



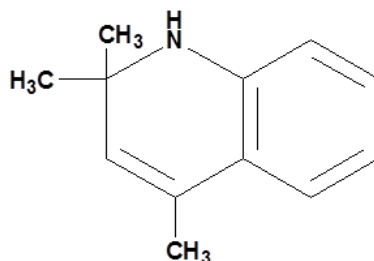
รูปที่ 3.8 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของไฮดร็อกซีเมทิลฟีนอลิกเรซิน

3.1.13 สแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride, SnCl_2)

ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ของปฏิกิริยาระหว่างหมู่เมทิลอลกับโมเลกุลอีวีเอ ในการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 225.63 g/mol มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.71 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว $37-38^\circ\text{C}$ มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศฝรั่งเศส

3.1.14 2,2,4-ไตรเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline, TMQ)

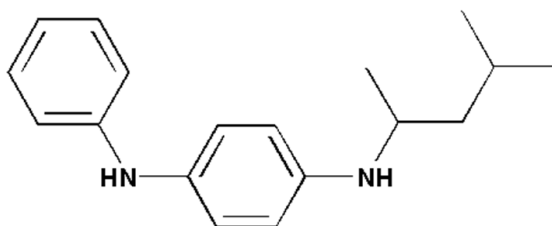
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ใช้เป็นสารช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ มักใช้ในปริมาณ 1-3 phr มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีน้ำตาลเข้ม มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.1 g/cm^3 ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันในกลุ่มเอมีนสำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ 2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline (TMQ)

3.1.15 ไดมethylบิวทิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-(1,3-Dimethylbutyl)-n'-phenyl-p-phenylenediamine, 6PPD)

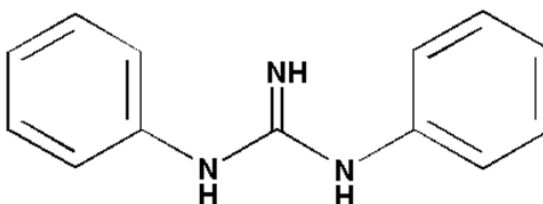
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ใช้เป็นสารช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ มีลักษณะเป็นเม็ดสีดำขุ่น มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.0 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 60°C ทำหน้าเป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันในกลุ่มเอมีน ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ N-(1,3-Dimethylbutyl)-n'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD)

3.1.16 ไดฟีนิล กัวนิดีน (Diphenyl guanidine, DPG)

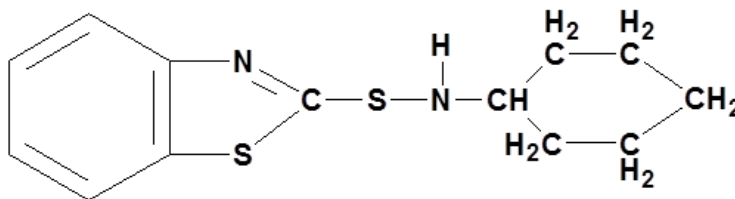
สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มกัวนิดีน (guanidines) ใช้เป็นสารตัวเร่งทุติยภูมิในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบกำมะถัน มีลักษณะเป็นเม็ดของแข็งสีขาวขุ่น มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.15 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ Diphenyl guanidine (DPG)

3.1.17 บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟิनाไมด์ *N*-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide , CBS)

สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มเบนโซไธอะโซลซัลฟิनाไมด์ (benzothiazole sulfenamide) ใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาในปฏิกิริยาลูกโซ่ในซังยาง มีลักษณะเป็นเม็ดของแข็งสีขาวขุ่นผลิตโดยบริษัท Lanxess ประเทศไทย โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ *N*-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS)

3.1.18 กำมะถัน (Sulfur, S)

กำมะถันใช้เป็นสารวัลคาไนซังยาง โดยกำมะถันมีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีความหนาแน่นประมาณ 1.96 g/cm³ ผลิตโดยบริษัท Siam Chemicals Public ประเทศไทย

3.1.19 อะซิโตน (Acetone)

ใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการสกัดแบบซ็อกซ์เลต (Soxhlet extraction) สำหรับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอีวีเอตดแปรโมเลกุลด้วยฟีนอลิกเรซิน เพื่อสกัดอีวีเอที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกมีสูตรโมเลกุล คือ C₃H₆O มีจุดเดือดที่ 56.53 °C มีความหนาแน่นประมาณ 0.790-0.792 g/cm³ ผลิตโดยบริษัท RCI Labscan Limited ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer)

ใช้เพื่อทำการบดผสมยางและสารเคมีร่วมกับสารเคมีต่าง ๆ ขนาด $3,000 \text{ cm}^3$ โดยภายในห้องผสมประกอบไปด้วยโรเตอร์จำนวน 2 โรเตอร์ เพื่อให้สามารถเกิดแรงเฉือนระหว่างโรเตอร์กับโรเตอร์และระหว่างโรเตอร์กับผนังห้องผสมในระหว่างการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร ประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องบดผสมแบบปิด

3.2.2 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

ใช้เพื่อทำการบดผสมยางมาสเตอร์แบทช์ร่วมกับสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ เนื่องจากหลีกเลี่ยงและป้องกันการเกิดยางสุกในเครื่องบดผสมแบบปิดที่อาจทำให้เกิดความเสียหายของเครื่อง ใช้เพื่อทำการบดผสมยางมาสเตอร์แบทช์ร่วมกับสารตัวเร่งและสารวัลคาไนซ์ โดยลูกกลิ้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูกกลิ้ง หมุนเข้าหากัน โดยอัตราเร็วของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1:1.2 ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery รุ่น YFM 160 B ประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องบดผสมชนิดสองลูกกลิ้ง

3.2.3 เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง (Moving die rheometer, MDR)

ใช้สำหรับหาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ ทั้งระยะเวลาการสุก (Scorch time) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (Curing time) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของยางคอมพาวด์ที่ ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูป โดยจำเป็นจะต้องออกสูตรยางคอมพาวด์ให้มีเวลาการสุกที่ยาวพอที่ทำให้ยางไหลได้เต็มเข้าพิมพ์ รวมถึงควรให้มีระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่สั้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการขึ้นรูป ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies Services Inc. รุ่น 36AIG 2953 ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง

3.2.4 เครื่องอัดเข้าขึ้นรูปยาง (Compression molding)

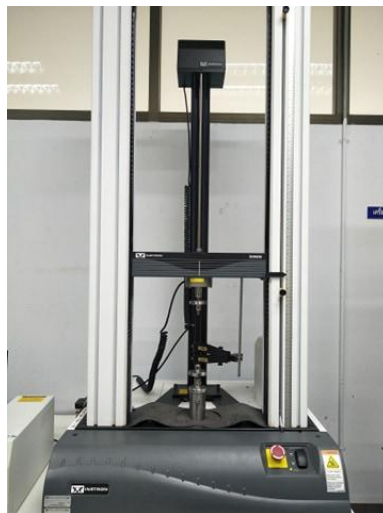
ใช้ในการอัดขึ้นรูปยางคอมพาวด์สำหรับเตรียมตัวอย่างในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็ง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางความร้อน รวมทั้งใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบระแนงเทียม โดยเครื่องอัดขึ้นรูปยางเข้าเข้าพิมพ์ด้วยความร้อนร่วมกับการใช้ระบบไฮดรอลิก โดยมีความดันสูงสุด เท่ากับ 200 kg/cm^2 และมีฐานรองเข้าพิมพ์ขนาด 18×18 นิ้ว รุ่น LCC 140 ผลิตโดยบริษัท TANG-MASTER ประเทศไต้หวัน แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เครื่องอัดเข้าขึ้นรูปยาง

3.2.5 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (Universal testing machine)

ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ โดยทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้ามาตัดเป็นรูปดรัมเบล (Dumbbell) โดยทำการจับยึดที่ปลายของตัวอย่างทั้งสองข้างด้วยระยะคงที่ กำหนดอัตราเร็วในการดึงและโหลดเซลล์ (Load cell) ตามมาตรฐานกำหนด ก่อนทำการดึงยืดชิ้นตัวอย่างและมีการบันทึกและวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบ ผลิตโดยบริษัท Instron[®] รุ่น 3365 ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง

3.2.6 เครื่องวัดความแข็ง (Shore Durometer)

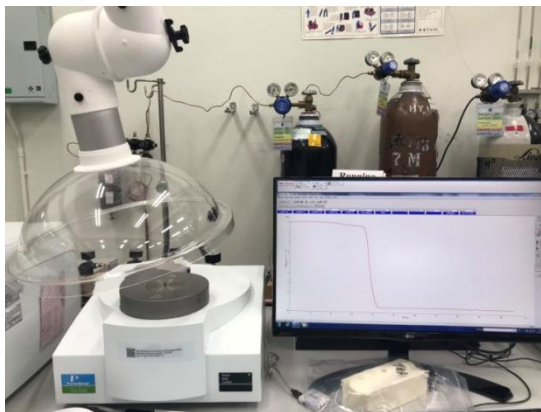
ใช้วัดความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าขนาดความหนาของชิ้นงาน เท่ากับ 3 มม. ทำการทดสอบได้ที่อุณหภูมิห้อง หลักการวัดความแข็งของยางแบบ Shore durometer คือมีการใช้สปริงที่ส่งน้ำหนักไปยังหัวเข็มกด ซึ่งกดลงบนพื้นผิวของตัวอย่าง ความต้านทานต่อการเกิดรอยกดของพื้นผิวขึ้นทดสอบสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากหน้าปัด Durometer ในรูปของ Shore scale การวัดความแข็งจะได้ค่าจากความลึกของรอยกด โดยจะเริ่มจาก 100 ที่ความลึกรอยกดเท่ากับศูนย์ จนถึงค่าความแข็งเท่ากับศูนย์ที่ความลึกรอยกด 0.1 นิ้ว โดยน้ำหนักที่กระทำกับหัวเข็มกดจะแปรผกผันกับความลึกของรอยกด ซึ่งใช้ Shore durometer ชนิด Shore A ยี่ห้อ PTC instruments รุ่น MODEL 471 แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 เครื่องวัดความแข็ง

3.2.7 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

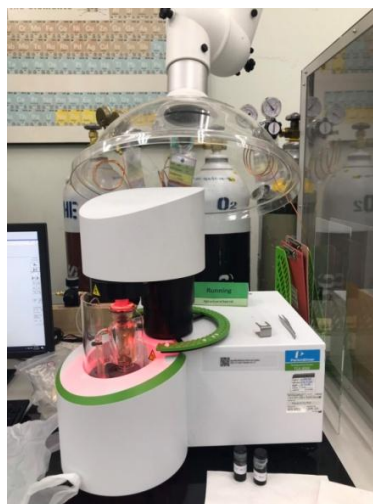
เป็นเครื่องที่ใช้ในการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง ตัวอย่างจะถูกลวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดการเสื่อมสภาพแบบออกซิเดชันที่อาจรบกวนระบบขณะทำการทดสอบ โดยทำการศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (The onset temperature of thermal decomposition, T_{onset}) อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัว (The temperature of thermal decomposition, T_d) และอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัว (The final temperature of thermal decomposition, T_f) ในช่วงอุณหภูมิ 25-800 °C ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด ผลการทดสอบที่ได้จะมีการบันทึกและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบ ซึ่งใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก รุ่น STA8000 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก

3.2.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

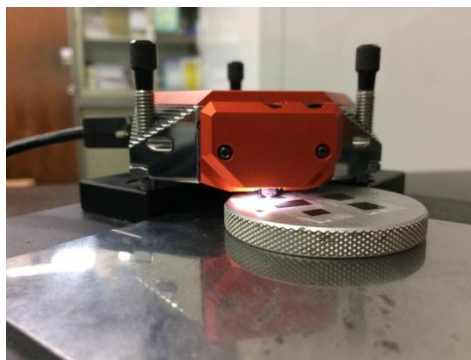
เป็นเทคนิคที่ใช้ทดสอบค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของพอลิเมอร์เบลนด์เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อป้องกันการเกิดการเสื่อมสภาพแบบออกซิเดชันที่อาจรบกวนระบบขณะทำการทดสอบ โดยทำการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติรีเคลมของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ผลการทดสอบที่ได้จะมีการบันทึกและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องทดสอบ ซึ่งใช้เครื่องรุ่น DSC8500 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.2.9 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)

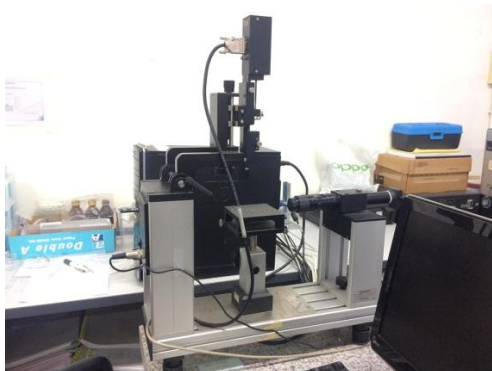
การวิเคราะห์การแยกเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งให้ภาพวัฏภาค (Phase image) เพื่อสามารถตรวจสอบการกระจายตัวของวัฏภาค (Phase distribution) ของพอลิเมอร์คู่เบลนด์ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม Gwyddion 2.50 จากประเทศเยอรมนี แสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

3.2.10 เครื่องทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle meter)

ใช้ในการวัดมุมสัมผัสของพื้นผิวตัวอย่างกับของเหลวที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ความมีผิวของตัวอย่างพอลิเมอร์เบลนด์ รวมทั้งยังสามารถใช้ SCA20 Software ในการวิเคราะห์ค่าพลังงานพื้นผิวของพอลิเมอร์เบลนด์เพื่อยืนยันและเปรียบเทียบสภาพผิวของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ทำการทดสอบ ซึ่งใช้เครื่องรุ่น OCA 15EC ยี่ห้อ Dataphysic ประเทศเยอรมนี แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 เครื่องทดสอบมุมสัมผัส

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการเตรียมยางคอมพาวด์

ชั่งยางและสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 3.1 เตรียมยางธรรมชาติรีเคลมเบลนด์กับอีวีเอ (RR/EVA) โดยใช้สารเคมีเช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [37] ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 3.1 สูตรยางและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสภาวะกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ

Ingredients	phr*
Reclaimed natural rubber (RR)	80
EVA-28	20
ZnO	5
Stearic acid	1
Silica Ultrasil VN3	60
TESPT	5.4
Carbon black N-330	60
Aromatic oil	17.2
Paraffin wax	5
Phenolic resin	10
TMQ	1
6-PPD	1
Compatibilizer	Vary types and contents
DPG	1
CBS	1.5
Sulfur	2

โดยใช้วิธีการผสมแบบหลอม (Melt mixing) ด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด มีลำดับในการบดผสม ดังนี้คือ ในช่วงแรกนั้นทำการผสมยางธรรมชาติรีเคลมเป็นเวลา 2 นาที ก่อนเติมอีวีเอ และทำการบดต่อเนื่องอีก 2 นาที จึงทำการเติมครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมดของ ซิลิกา เหมาดำ สารคู่ควบไซเลน น้ำมันช่วยในการแปรรูปและแวกซ์ ทำการบดต่อเนื่องอีก 3 นาที ก่อนเติมครั้งที่เหลือของสาร

ดังกล่าว รวมถึงฟีนอลิกเรซิน บดต่อเนื่องอีก 3 นาที ก่อนทำการเติมซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก ทีเอ็มคิว 6พีพีดี บดต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำจึงเติมสารเพิ่มความเข้ากันแต่ละชนิด บดต่อเนื่องเป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบเวลาจึงนำยางคอมพาวด์ที่ได้ออกจากเครื่องผสมเพื่อพักให้เย็นที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ก่อนทำการบดผสมสารวัลคาไนซ์ที่เหลือโดยใช้เครื่องบดผสมแบบสอง ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเวลา 2 นาที ก่อนทำการรีดแผ่นออกมา จากนั้นนำพอลิเมอร์เบลนด์ ที่ได้ไปขึ้นรูปเข้าเบ้าพิมพ์ด้วยความร้อนก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

3.3.1 ศึกษาสภาวะกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์

โดยใช้สภาวะในกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ที่อุณหภูมิ 140 °C เวลาในการผสม เป็น 15 นาที และความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อนาที (rpm) เป็นสภาวะหลักในการแปรแต่ละ ปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย เพื่อหา สภาวะการเบลนด์ที่ให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุด โดยทำการแปรสภาวะ ต่าง ๆ ที่ละปัจจัย คือ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ในการผสมของแต่ละสูตร ดังในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะการผสมที่แปรปัจจัยต่าง ๆ ที่ละปัจจัย คือ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ ในการผสม

Conditions	Temperature (°C)	Time (min)	Rotor speed (rpm)
Vary temperature	130, 140*, 150, 170, 180	15	30
Vary time	140	10, 15*, 20, 25, 30	30
Vary rotor speed	140	15	10, 30*, 60

* สภาวะการผสมคงที่หลัก

กล่าวคือ หากต้องการศึกษาผลของการแปรอุณหภูมิ กำหนดให้เวลาและความเร็วโรเตอร์ คงที่เท่ากับ 15 นาที และ 30 rpm หากต้องการศึกษาผลของการแปรเวลา กำหนดให้อุณหภูมิและความเร็วโรเตอร์คงที่เท่ากับ 140 °C และ 30 rpm และหากต้องการศึกษาผลของการแปรความเร็ว โรเตอร์ กำหนดให้อุณหภูมิและเวลาคงที่เท่ากับ 140 °C และ 15 นาที

3.3.2 ศึกษาผลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนด์

ทำการศึกษาชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด ได้แก่ อีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Ph-EVA) และยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีหมู่อีพ็อกไซด์ 2 ระดับ ได้แก่ ENR-25 และ ENR-50 โดยควบคุมปริมาณการเติมที่เท่ากันคือ 3 phr โดยใช้สูตรยางและสารเคมีเช่นเดียวกับสูตรในตารางที่ 3.1 ในขั้นตอนการบดผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ใช้วิธีการผสมเช่นเดียวกับในขั้นตอนการเตรียมคอมพาวด์ข้างต้น ก่อนนำไปขึ้นรูปเข้าเบ้าพิมพ์ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ก่อนนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่องทดสอบ MDR และวัดสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อความสึกหรอ (DIN abrasion) ความแข็ง (Shore durometer) ทดสอบความเป็นขั้วด้านความชอบน้ำด้วยการทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำและพลังงานพื้นผิว รวมถึงทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA และวัดค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยางด้วยเทคนิค DSC

เมื่อได้ชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ทำให้สมบัติทางเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนที่ดีที่สุด จึงนำสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดนั้น มาทำการศึกษาผลของปริมาณในขั้นตอนถัดไป

3.3.3 ศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนด์

ทำการศึกษาปริมาณของ Ph-EVA ที่ระดับ 0, 1, 3, 5, 8 และ 12 phr โดยใช้สูตรยางและสารเคมีเช่นเดียวกับสูตรในตารางที่ 3.1 โดยควบคุม Batch size ให้เท่ากันแต่ละสูตร ในขั้นตอนการบดผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ใช้วิธีการผสมเช่นเดียวกับในขั้นตอนการเตรียมคอมพาวด์ข้างต้น ก่อนนำไปขึ้นรูปเข้าเบ้าพิมพ์ด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ก่อนนำไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่องทดสอบ MDR และวัดสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อความสึกหรอ (DIN abrasion) ความแข็ง (Shore durometer) ทดสอบความเป็นขั้วด้านความชอบน้ำด้วยการทดสอบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำและพลังงานพื้นผิว รวมถึงทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA และวัดค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยางด้วยเทคนิค DSC

3.3.4 ศึกษาสมบัติของไม้ระแนงเทียมจากยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับไม้ระแนงเทียมเชิงพาณิชย์

เมื่อได้สูตรที่ดีที่สุดจากการเตรียมพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติรีเคลมจากการศึกษาในส่วนก่อนหน้าแล้ว จึงนำมาทำการขึ้นรูปเป็นไม้ระแนงเทียม ที่มีขนาดเท่ากับ $44.5 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ โดยนำระแนงเทียมที่เตรียมได้มาทำเปรียบเทียบสมบัติกับไม้ระแนงเทียมเชิงพาณิชย์ ทำการทดสอบสมบัติ

เชิงกล ได้แก่ สมบัติความแข็ง (Shore durometer) ความต้านทานต่อการสึกหรอ (DIN abrasion) รวมถึงสมบัติด้านการยึดเกาะของจุลชีพบนพื้นผิวของวัสดุ (Microbial adhesion)

3.3.5 การทดสอบสมบัติ

3.3.5.1 ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

ทำทดสอบด้วยเครื่องวัดลักษณะการวัลคาไนซ์แบบ Moving Die Rheometer หรือ MDR โดยเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ 4-4.5 กรัม อุณหภูมิการวัลคาไนซ์ 150 °C เวลาการวัลคาไนซ์ 20 นาที

3.3.5.2 ทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.5.2.1 ความต้านทานต่อแรงดึง

ตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดรัมเบลล์ โดยใช้เครื่องตัดชิ้นทดสอบแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยกำหนดช่วง gauge length ยาว 20 mm วัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนาเฉลี่ย 3 จุดในช่วง gauge length ก่อนทำการทดสอบวัดความต้านทานต่อแรงดึงด้วยอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min. โหลดเซลล์ (Load cell) 1 kN สามารถคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึง ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$\text{Tensile strength (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงยึดชิ้นทดสอบจนขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนการดึงยึด (mm²)

3.3.5.2.2 ความแข็ง

ทำการทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Shore durometer ชนิด Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยวัดค่าความแข็งเฉลี่ย 3 จุดของชิ้นทดสอบ

3.3.5.3 สมบัติเชิงความร้อน

3.3.5.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC)

ทำการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมได้ ในช่วงอุณหภูมิ 30-800 °C ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.3.5.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA)

ทำการวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัว (The onset temperature of thermal decomposition, T_{onset}) และอุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัว (The maximum temperature of thermal decomposition, T_{max}) และอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัว (The final temperature of thermal decomposition, T_f) ทำศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30-800 °C ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.3.5.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการตรวจสอบลักษณะของพื้นผิวชั้นทดสอบที่เตรียมให้มีขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) โดยวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายเข็มแหลมกับพื้นผิวของตัวอย่าง ในขณะที่สแกนบนพื้นผิวถูกนำมาแปลงสัญญาณและประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพสามมิติของพื้นผิวของกำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (Monitor)

ใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 ในการวิเคราะห์การแยกเฟส (Phase distribution) ของตัวอย่าง ร่วมกับการเชื่อมโยงโดยใช้ความสัมพันธ์จากสมการของ Scherrer [39] ที่ดัดแปลงมาจากเทคนิคของ Liu *et al.* (2009) [38] ดังแสดงในสมการที่ (3.2)

$$d = K\lambda/\beta\cos\theta \quad (3.2)$$

โดยที่	d	คือ ขนาดความหนาของระนาบ
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่หักเห
	θ	คือ ตำแหน่งมุมหักเหของฟิค
	K	คือ Shape factor
	β	คือ ความกว้างของฟิคที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูง (องศา)

จากความสัมพันธ์ในสมการของ Scherrer จะเห็นว่า ขนาดของความหนาของระนาบมีค่าแปรผกผันกับความกว้างของฟิคที่ความสูงครึ่งหนึ่งหรือคือค่า Full-width half maximum (FWHM) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวดังสมการ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของเฟสยางและอีวีเอในพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จากเทคนิค AFM ร่วมกับโปรแกรม Gwyddion 2.50 โดยใช้ค่า FWHM ในหน่วยองศา (degree) ที่วัดได้จากภาพเฟส (Phase image) รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ค่าความแตกต่างระหว่างเฟส (Phases contrast) ในหน่วยองศา ได้จากการวัดระยะห่าง

ระหว่างยอดฟิสิกการแยกเฟสของเฟสยางและอีวีเอที่บ่งบอกได้ถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Co-continuous phase) ของพอลิเมอร์เบลนด์

3.3.5.5 การทดสอบสภาพความเป็นขั้ว

3.3.5.5.1 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle)

ตัดชิ้นทดสอบขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ติดบนกระจกผิวเรียบ โดยหยดน้ำกลั่น ปริมาตร $2 \mu\text{l}$ ก่อนนำไปทดสอบและวิเคราะห์ผลด้วยเครื่อง Contact angle meter เมื่อหยดน้ำอยู่บนพื้นผิวของชิ้นทดสอบและไม่เกิดการแพร่ของหยดน้ำ มีการคงรูปและทำมุมองศา (θ) กับพื้นผิวของชิ้นทดสอบ เรียกว่ามุมสัมผัส (Contact angle) เป็นลักษณะของแรงตึงผิวระหว่างผิวของเหลวกับผิวของชิ้นทดสอบ ดังนั้น มุมสัมผัสที่สมดุลจะเป็นตัววัดความสามารถในการเปียกของชิ้นทดสอบโดยของเหลวหรือเรียกว่าปรากฏการณ์การโค้งงอของผิวของเหลว จากปรากฏการณ์นี้จะเห็นว่าผิวของเหลวกับผิวของชิ้นทดสอบ ณ จุดสัมผัส เรียกว่ามุมสัมผัส ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-180 องศา เมื่อของเหลวอยู่บนพื้นผิวของชิ้นทดสอบนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยด ไม่ทำให้พื้นผิวเปียกหรือแผ่กระจาย โดยที่มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง 0-90 องศา ของเหลวจะแผ่กระจายและเปียกพื้นมุมสัมผัสที่มีค่าระหว่าง 90-180 องศา ของเหลวจะเป็นก้อนและไม่เปียกพื้น

3.3.5.5.2 การทดสอบพลังงานพื้นผิว (Surface energy)

การวัด Surface energy ทำได้โดยการหยดสารละลายที่มีความเป็นขั้วที่ต่างกันอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่ น้ำ เอทิลีนไกลคอล และฟอร์มามิดลงบนผิวของชิ้นทดสอบ โดยใช้ SCA20 software ในการคำนวณหาค่า surface energy

3.3.5.6 ความต้านทานต่อการบวมพอง

3.3.5.6.1 ความต้านทานต่อการบวมพองในน้ำ

เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ และมีความหนาประมาณ 1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ทำการบันทึกน้ำหนักของชิ้นทดสอบเริ่มต้นก่อนนำไปแช่ในน้ำที่บรรจุในขวด โดยกำหนดปริมาณน้ำที่เท่ากันทุกขวดเท่ากับ 10 มิลลิลิตร เพื่อบันทึกน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาต่างกัน ได้แก่ 1, 3, 5, 7 และ 10 วัน ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ผล

3.3.5.6.2 ความต้านทานต่อการบวมพองในปัสสาวะเทียม

เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ และมีความหนาประมาณ 1 mm ที่อุณหภูมิห้อง ทำการบันทึกน้ำหนักของชิ้นทดสอบเริ่มต้นก่อนนำไปแช่ในปัสสาวะเทียม โดยปกติปัสสาวะของสัตว์กินพืชจะมีฤทธิ์เป็นด่าง ในปัสสาวะประกอบไปด้วยน้ำประมาณร้อยละ 95 ยูเรียร้อยละ 2 ที่เหลือเป็นสารอื่น ๆ ได้แก่ น้ำตาล โซเดียม คลอไรด์ แคลเซียมและแมกนีเซียม เป็นต้น [40] โดยเตรียมจากสารละลายยูเรีย โซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้มีค่า pH เป็นด่างในช่วงที่ใกล้เคียงกับปัสสาวะจริง โดยสามารถทำการเตรียมให้มีค่า pH ประมาณ 11 ทำการบรรจุของเหลวที่เตรียมได้ในขวดที่กำหนดปริมาตรเท่ากันทุกขวดเท่ากับ 10 ml บันทึกน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลาต่างกันได้แก่ 1, 3, 5, 7 และ 10 วัน ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิเคราะห์ผล โดยสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การบวมพองในปัสสาวะเทียมปัสสาวะแพะ ตามสมการที่ (3.3)

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{W_{\text{swelling}} - W_{\text{initial}}}{W_{\text{initial}}} \times 100 \quad (3.3)$$

โดยที่ W_{swelling} คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่ในปัสสาวะเทียม
 W_{initial} คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ในปัสสาวะเทียม

3.3.5.7 ความต้านทานต่อจุลชีพ

การตรวจนับจุลชีพหรือเชื้อแบคทีเรียโดยมาตรฐาน [41] เป็นการนับปริมาณโคโลนี (Colony) ซึ่งมาจากเซลล์ของจุลชีพหรือแบคทีเรียที่ถูกตรึงอยู่กับที่โดยมีการเจริญเติบโตและแบ่งตัวจากเซลล์เดียวเป็นหลาย ๆ เซลล์อยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยค่าที่ได้จากการตรวจนับจุลชีพหรือเชื้อแบคทีเรียมาตรฐานคือ Colony forming unit (CFU) ในการทดสอบความต้านทานต่อจุลชีพหรือการทดสอบการยึดเกาะของเชื้อแบคทีเรียบนพื้นผิวชิ้นทดสอบ (Inhibition of bacterial adhesion on surfaces) สามารถเตรียมแผ่นทดสอบโดยตัดให้มีขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ก่อนนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดัน (Autoclave) เพื่อกำจัดเชื้อแบคทีเรียหรือจุลชีพที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบมาแล้วก่อนหน้า ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ในส่วนของเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ คือ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) และ *Escherichia coli* (*E. coli*)

นำแผ่นทดสอบที่ฆ่าเชื้อแล้วใส่ลงในหลอดที่มีอาหาร Mueller-Hinton broth ปริมาตร 10 ml จากนั้นเติมเชื้อที่เตรียมไว้ใส่ลงในหลอดที่มีแผ่นทดสอบ โดยให้มีเชื้อจำนวน $1.0 \times 10^6 \text{ CFU/ml}$ บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นทดสอบล้างด้วย

น้ำเกลือและนำไปหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เชื้อที่ติดบริเวณแผ่นทดสอบหลุดออกมา เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำสารละลายตัวอย่างมา 100 μL และทำการเจือจางความเข้มข้นเชื้อลง โดยใช้เทคนิคเจือจางให้ความเข้มข้นลดลง 10 เท่า (Ten-fold serial dilution) จากนั้น นำเชื้อที่ถูกเจือจางมาเลี้ยงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็ง โดยจุดสารละลายในหลอดที่ทดสอบแต่ละหลอดปริมาตร 10 μL หยดลงบนจานเพาะเชื้อ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง นับจำนวนที่อยู่บนจานเพาะเชื้อระหว่าง 10-100 โคโลนีต่อจาน [42]

3.3.5.8 ความต้านทานต่อการสึกหรอ

ทำการทดสอบเปรียบเทียบความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุที่เตรียมเป็นระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์จากสูตรก่อนหน้าและที่เตรียมขึ้น โดยในการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุประเภทยาง DIN Abrasion และทำการเตรียมตัวอย่างทดสอบเป็นทรงกระบอกที่มีความหนาประมาณ 6 mm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 16 mm ตามมาตรฐาน DIN 53516, ISO4649



รูปที่ 3.23 เครื่องทดสอบการสึกหรอ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

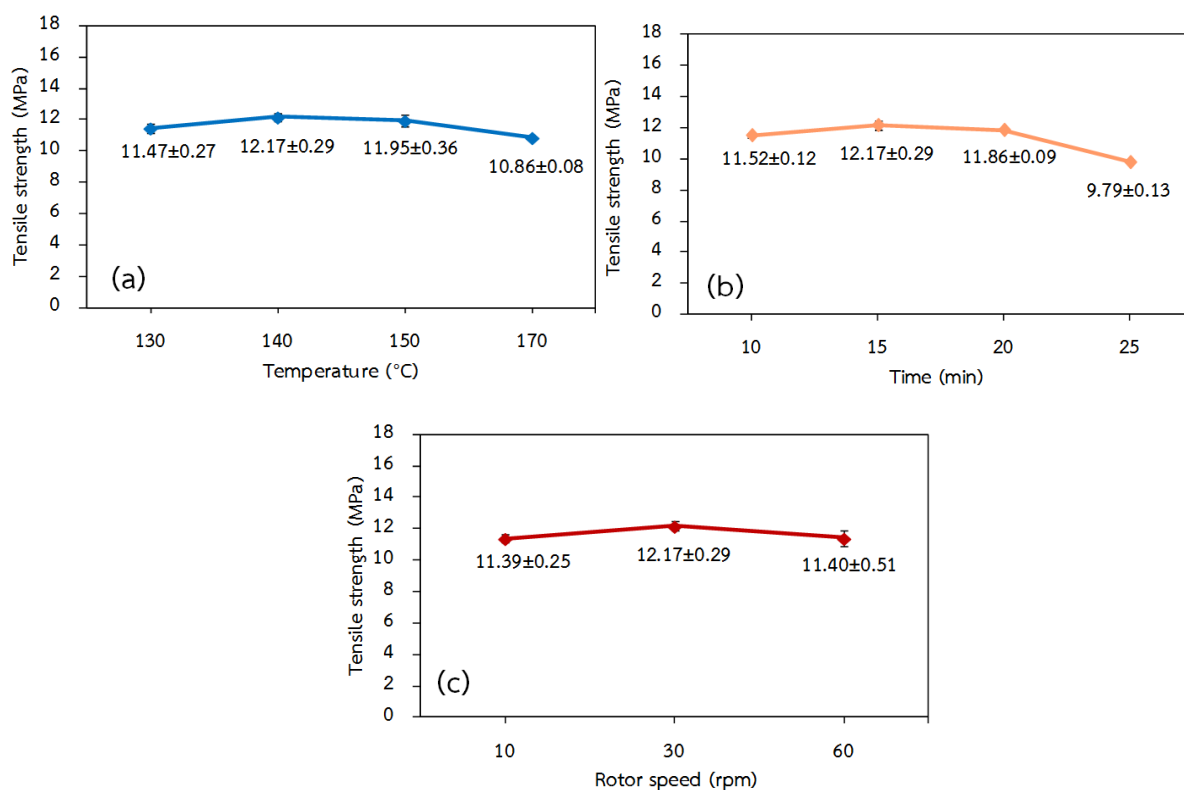
4.1 ผลของสภาวะกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์

4.1.1 ผลต่อสมบัติเชิงกล

นำพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA มาทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผสม โดยการศึกษาผลของการแปรสภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3.1 ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของสภาวะกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ต่อสมบัติเชิงกล

Conditions		Tensile strength (MPa)	Hardness (Shore A)
Temperature (°C)	130	11.47 ± 0.27	86.67 ± 0.58
	140	12.17 ± 0.29	83.33 ± 0.58
	150	11.95 ± 0.36	87.67 ± 0.58
	170	10.86 ± 0.08	87.33 ± 0.58
Time (min)	10	11.52 ± 0.12	83.33 ± 0.58
	15	12.17 ± 0.29	83.33 ± 0.58
	20	11.86 ± 0.09	82.67 ± 0.58
	25	9.79 ± 0.13	87.33 ± 0.58
Rotor speed (rpm)	10	11.39 ± 0.25	82.67 ± 0.58
	30	12.17 ± 0.29	83.33 ± 0.58
	60	11.40 ± 0.51	87.67 ± 0.58

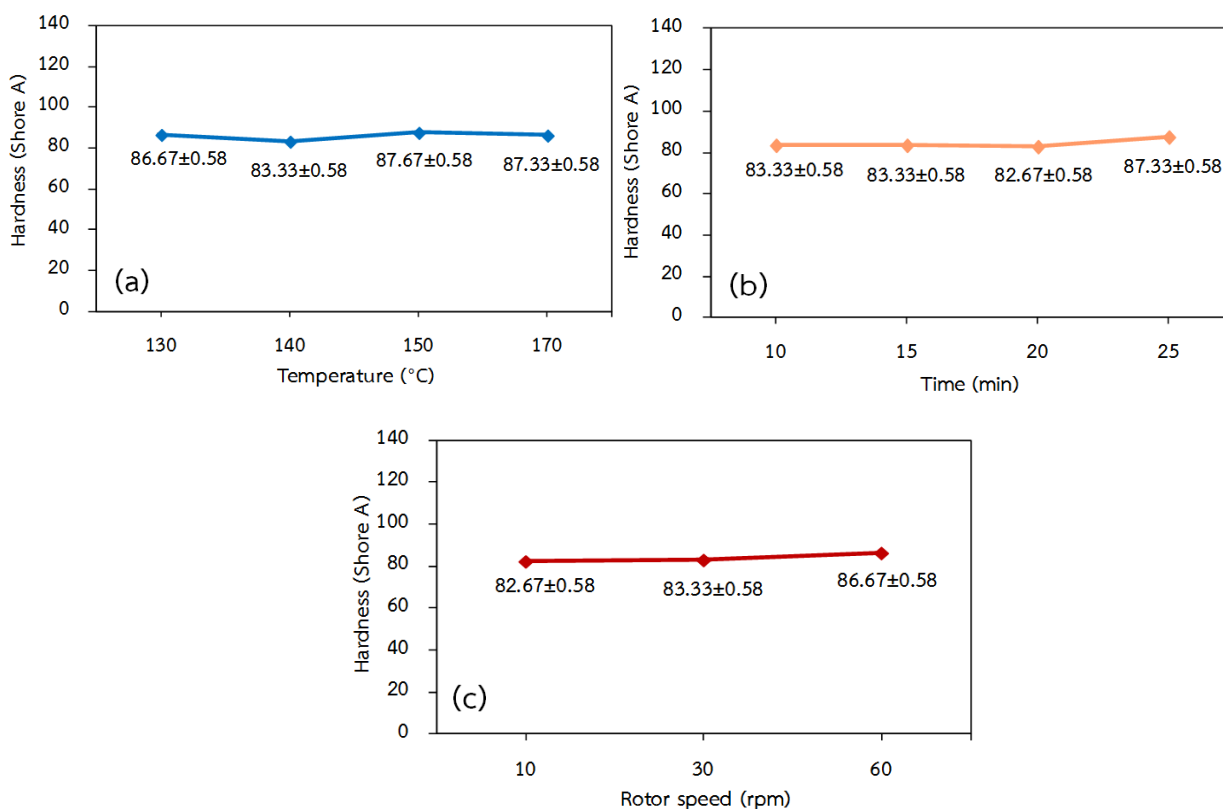


รูปที่ 4.1 ผลของสภาวะกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ได้แก่ (a) อุณหภูมิการผสม (b) เวลาการผสม และ (c) ความเร็วโรเตอร์ ต่อสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.1(a) พบว่าที่อุณหภูมิการผสมสูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิการผสมเท่ากับ 140 °C ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งถือเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการผสมเข้ากันได้ดีที่สุด อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิการผสมสูงขึ้น ทำให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ลดลง ส่งผลให้มีปริมาตรอิสระเพิ่มขึ้น สารเคมีต่าง ๆ จึงสามารถการกระจายตัวได้ดี ทำให้มีพอลิเมอร์เบลนด์มีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิการผสมสูงขึ้นจนถึง 170 °C ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเสื่อมสภาพ ความแข็งแรงของพอลิเมอร์จึงมีค่าลดลง ขณะเดียวกันการผสมที่ใช้อุณหภูมิต่ำเกินไป (130 °C) อาจทำให้การกระจายตัวระหว่างวัฏภาคเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากความร้อนไม่เพียงพอต่อการลดความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ จากการทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเชื่อมจนมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่งผลให้การกระจายตัวเกิดได้ไม่ดีและมีอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคต่ำ จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และจากผลของการแปรเวลาในการผสม (รูปที่ 4.1(b)) พบว่าที่เวลาการผสมเป็น 15 นาที ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาการผสมนานเกินไปจนถึง 25 นาที พอลิเมอร์เบลนด์สัมผัส

กับความร้อนและแรงเฉือนนานเกินไป ทำให้สมบัติเชิงกลลดต่ำลง เช่นเดียวกับผลของการแปรความเร็วโรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (c) พบว่าการผสมที่ใช้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น โดยที่ความเร็ว โรเตอร์ที่ 30 rpm มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งเป็นอัตราการให้แรงเฉือนที่ทำให้เกิดการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคที่ดีของพอลิเมอร์เบลนด์ อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วโรเตอร์ที่สูงเกินไป (60 rpm) จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากแรงเฉือนที่มากเกินไปทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดขาดมากเกินไป ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง รวมถึงความร้อนสะสมและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นในขณะผสมดังกล่าวถูกดูดซับเข้าไปทำให้ฮีเล็คตรอนในส่วนของโมเลกุลนั้นยกระดับพลังงานในตัวเองขึ้น ซึ่งเรียกว่า ภาวะถูกกระตุ้น (Excited state) โดยส่วนใหญ่แล้วพลังงานที่ถูกดูดซับไป จะถูกใช้ไปกับการหมุนและการสั่นของพันธะต่าง ๆ และส่วนที่เหลือก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ ที่ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง

กระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ การที่ส่วนใดส่วนหนึ่งในโมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์เกิดการแตกตัวเป็นแรดิคอล (Radical) ที่เป็นกลุ่มทางเคมีที่มีฮีเล็คตรอนโดดเดี่ยวอยู่หนึ่งตัวและแรดิคอลที่เกิดขึ้นนี้อาจจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์สั่นลง (Chain scission) เนื่องด้วยกระบวนการเหล่านี้ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการเสื่อมสภาพ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลง [43] ที่ความเร็วโรเตอร์ 60 rpm ขณะเดียวกันการใช้ความเร็วโรเตอร์ที่ต่ำ (10 rpm) อาจส่งผลให้เกิดการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคต่ำ จึงส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากการกระจายตัวและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับการศึกษาสถานะในการเตรียมยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ดังรายงานของ Kalkornsurapranee *et al.* (2012) [44] นอกจากนี้ ผลการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์โดยใช้สภาวะการผสมต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.2



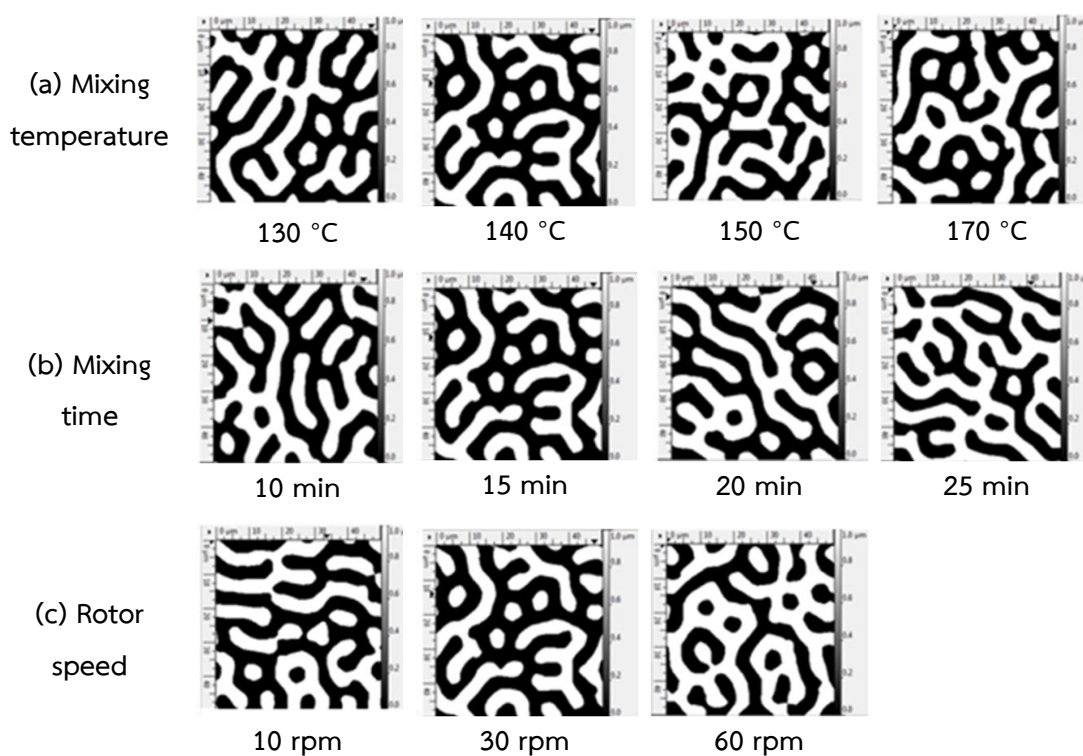
รูปที่ 4.2 ผลของสภาวะกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ได้แก่ (a) อุณหภูมิการผสม (b) เวลาการผสม และ (c) ความเร็วโรเตอร์ ต่อสมบัติความแข็ง

จากรูปที่ 4.2 พบว่าผลของการแปรสภาวะการผสมให้ค่าความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการทดสอบความแข็งนั้น ทำการวัดค่าที่ได้จากบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างทดสอบเท่านั้น จึงไม่สามารถวัดระดับความแข็งที่เกิดจากความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นบริเวณระหว่างวิภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ ดังนั้นหากพิจารณาสมบัติเชิงกลร่วมกับสมบัติด้านความแข็ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น คือการผสมที่อุณหภูมิที่ 140°C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 rpm

4.1.2 ผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของการกระจายตัวของวิภาคทั้งสองวิภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA สามารถวัดได้โดยใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 ที่ดัดแปลงมาจากงานวิจัยของ Liu *et al.* (2009) [38] โดยสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์กับสมการของ Scherrer [39] ที่แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของวิภาคทางธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอ โดยจากสมการบ่งบอกขนาดของความหนาแน่นมีค่าแปรผกผันกับความกว้างของพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่ง (Full-width half maximum,

FWHM) ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอในพอลิเมอร์เบลนด์ร่วมกับโปรแกรม Gwyddion 2.50 โดยใช้ค่า FWHM ในหน่วยองศา (Degree) ที่วัดได้จากภาพวัฏภาค (Phase image) จากเทคนิค AFM กล่าวคือ ขนาดของการกระจายตัวของวัฏภาคจะมีค่าแปรผกผันกับค่าความกว้างของพีคที่ความสูงครึ่งหนึ่งของแต่ละวัฏภาครวมทั้งสามารถวิเคราะห์ค่าความแตกต่างระหว่างวัฏภาค (Phases contrast) ในหน่วยองศา ได้จากการวัดระยะห่างระหว่างยอดพีคการแยกวัฏภาคของยางรีเคลมและอีวีเอ ที่บ่งบอกได้ถึงความเป็นเนื้อเดียวกัน (Co-continuous phase) ของพอลิเมอร์เบลนด์ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการแยกวัฏภาคพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่การแปรสภาวะการผสมต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 ภาพวัฏภาค (Phase image) จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากเทคนิค AFM ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการแปรสภาวะในการผสม ได้แก่ (a) อุณหภูมิการผสม (b) เวลาการผสม และ (c) ความเร็วโรเตอร์

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะของการกระจายตัวจากการวิเคราะห์ค่า Full-width half maximum (FWHM) และ Phase contrast ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่แปรสภาวะในการผสม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาและความเร็วโรเตอร์ในการผสม

AFM results		Conditions										
		Temperature (°C)				Time (min)				Rotor speed (rpm)		
		130	140	150	170	10	15	20	25	10	30	60
FWHM (Degree)	EVA phase	1.8	2.0	2.2	2.4	1.6	2.0	2.1	2.2	1.2	2.0	2.1
	NR phase	4.7	2.8	2.1	1.7	3.3	2.8	2.2	1.6	3.6	2.8	2.1
Phase contrast (Degree)		17.4	17.2	17.2	17.1	23.5	17.2	17.1	17.1	23.4	17.2	9.1

โดยจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการความชอบน้ำที่แตกต่างกันของเทคนิค AFM ในรูปที่ 4.3 แสดงพื้นที่สีขาวซึ่งบ่งบอกถึงวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมและพื้นที่สีดำบ่งบอกถึงวัฏภาคของอีวีเอ ที่ทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย จากการใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 วิเคราะห์การแยกวัฏภาคจากภาพวัฏภาคที่ได้จากเทคนิค AFM ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า สภาวะการผสมที่ใช้อุณหภูมิสูงขึ้น ให้ค่าของความกว้างของความสูงครึ่งหนึ่งของพีการกระจายตัวของทั้งสองวัฏภาค (Full-width half maximum, FWHM) ของวัฏภาคอีวีเอที่เพิ่มขึ้นและค่า FWHM ของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมที่ลดลง ตามสมการของ Scherrer [39] ซึ่งให้เห็นถึงการมีขนาดของวัฏภาคอีวีเอที่เล็กลงเมื่อค่า FWHM เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันขนาดของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมใหญ่ขึ้นจากการให้ค่า FWHM ที่ลดลงอันเป็นผลมาจากการมีขนาดของวัฏภาคอีวีเอที่เล็กลง ทำให้ขนาดพื้นที่ของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมเพิ่มขึ้น แสดงถึงการมีการกระจายตัวที่ดีของวัฏภาคอีวีเอในวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลม รวมถึงการมีค่าความคมชัดของการแยกวัฏภาค (Phase contrast) ที่วัดได้จากระยะห่างระหว่างพีการกระจายตัวของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอที่ลดลง บ่งบอกถึงความเด่นชัดของการแยกวัฏภาคลดลงหรือมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการผสมสูงสุดถึง 170 °C พบว่า บ่งบอกถึงการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับการผสมที่อุณหภูมิอื่น ๆ เนื่องจากให้ค่า FWHM ของวัฏภาคอีวีเอที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 2.4 องศา และค่า FWHM ของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมมีค่าน้อยที่สุดคือ 1.7 องศา รวมถึงมีค่า Phase contrast น้อยที่สุดคือ 17.1 องศา แสดงให้เห็นถึงการมีขนาดของการกระจายตัวเล็กลงมากที่สุดของวัฏภาคอีวีเอในวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลม จึงส่งผลให้มีการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคที่ดีที่สุด โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำให้การกระจายตัวของวัฏภาคทั้งสองเกิดได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงกลที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการผสมอาจส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเสื่อมสภาพ จึงเป็นอิทธิพล

ร่วมที่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง ขณะเดียวกัน พบว่าการใช้อุณหภูมิต่ำเกินไป (130°C) ให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ต่ำที่สุด คือมีค่า FWHM ของวงภาคอีวีเอที่ต่ำคือ 1.8 องศา และค่า FWHM ของวงภาคยางธรรมชาติรีเคลมที่สูงคือ 4.7 องศา รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 17.4 องศา ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำเช่นเดียวกัน เนื่องจากการกระจายตัวที่แย่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างวงภาคเกิดขึ้นน้อย และจากผลของการแปรเวลาในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่าการใช้เวลาเพิ่มขึ้น การกระจายตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิการผสม โดยใช้เวลาการผสมสูงสุดถึง 25 นาที ให้ค่าการกระจายตัวที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับการผสมที่เวลาอื่น ๆ กล่าวคือ มีค่า FWHM ของวงภาคอีวีเอสูงที่สุดคือ 2.2 องศา และค่า FWHM ของวงภาคยางธรรมชาติรีเคลมต่ำที่สุดคือ 1.6 องศา รวมถึงมีค่า Phase contrast ต่ำเท่ากับ 17.1 องศา เนื่องจากการให้เวลาในการให้ความร้อนและแรงเฉือนในการลดความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ที่นานขึ้น แต่ที่เวลาดังกล่าวอาจนานเกินไปจนทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการเสื่อมสภาพได้ การกระจายตัวที่ดีนี้จึงไม่ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ขณะเดียวกัน การให้เวลาการผสมต่ำเกินไป (10 นาที) อาจไม่เพียงพอในการเกิดการกระจายตัวที่ดี เห็นได้จากค่า FWHM ของวงภาคอีวีเอที่ลดลงคือ 1.6 องศา และค่า FWHM ของวงภาคยางธรรมชาติรีเคลมที่เพิ่มขึ้นคือ 3.3 องศา รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 23.5 องศา จึงให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำ นอกจากนี้อิทธิพลของความเร็วโรเตอร์ ส่งผลต่อการกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์เช่นกัน จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าเมื่อความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวดีขึ้น โดยที่ 60 rpm ให้ค่าการกระจายตัวที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการผสมที่ความเร็วโรเตอร์อื่น ๆ กล่าวคือ มีค่า FWHM ของวงภาคอีวีเอสูงที่สุดคือ 2.1 องศา และค่า FWHM ของวงภาคยางธรรมชาติรีเคลมต่ำที่สุดคือ 2.1 องศา รวมถึงมีค่า Phase contrast ต่ำที่สุดเท่ากับ 9.1 องศา ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการแปรสภาวะของอุณหภูมิและเวลาในการผสม แต่ผลการกระจายตัวที่ดีที่ความเร็วโรเตอร์สูงสุดดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดขาดมากเกินไปจากการเกิดการตัดสายโซ่ (Chain scission) เมื่อมีความร้อนสะสมจากการให้แรงเฉือนที่สูงเกินไป ขณะเดียวกัน การใช้ความเร็วโรเตอร์ที่ต่ำเกินไป (10 rpm) อาจไม่เพียงพอให้เกิดการกระจายตัวที่ดี จากการให้ค่า FWHM ของวงภาคอีวีเอที่ลดลง คือ 1.2 องศา และค่า FWHM ของวงภาคยางธรรมชาติรีเคลมที่เพิ่มขึ้นคือ 3.6 องศา รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 23.4 องศา จึงให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำ จากผลการทดลองในขั้นตอนนี้ สามารถยืนยันการมีความสามารถในการกระจายตัวที่แตกต่างกันของสภาวะการผสมที่แตกต่างกันได้ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ อุณหภูมิการผสมที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวอย่างระหว่างวงภาคอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การใช้เวลาและความเร็วโรเตอร์ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การกระจายตัวระหว่างวงภาคดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติเชิงกลควบคู่ เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น

ดังนั้นเมื่อพิจารณาการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคร่วมกับสมบัติเชิงกล พบว่าสภาวะการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ให้การกระจายตัวเหมาะสมและส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดที่แสดงดังหัวข้อก่อนหน้า คือที่อุณหภูมิการผสมเป็น 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 rpm

ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA สามารถทำการศึกษาได้ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ ดังนี้

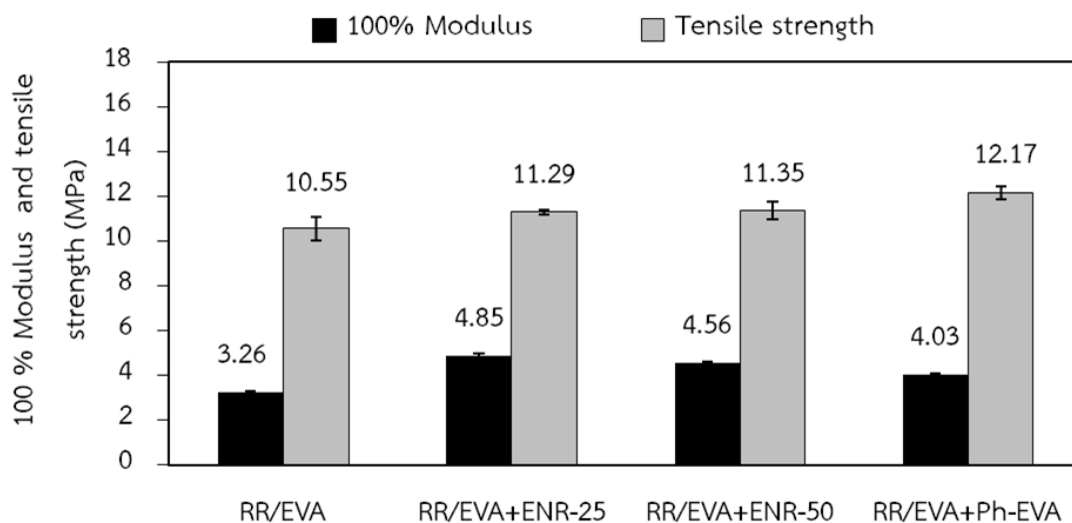
4.2 ผลของชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

4.2.1 ผลต่อสมบัติเชิงกล

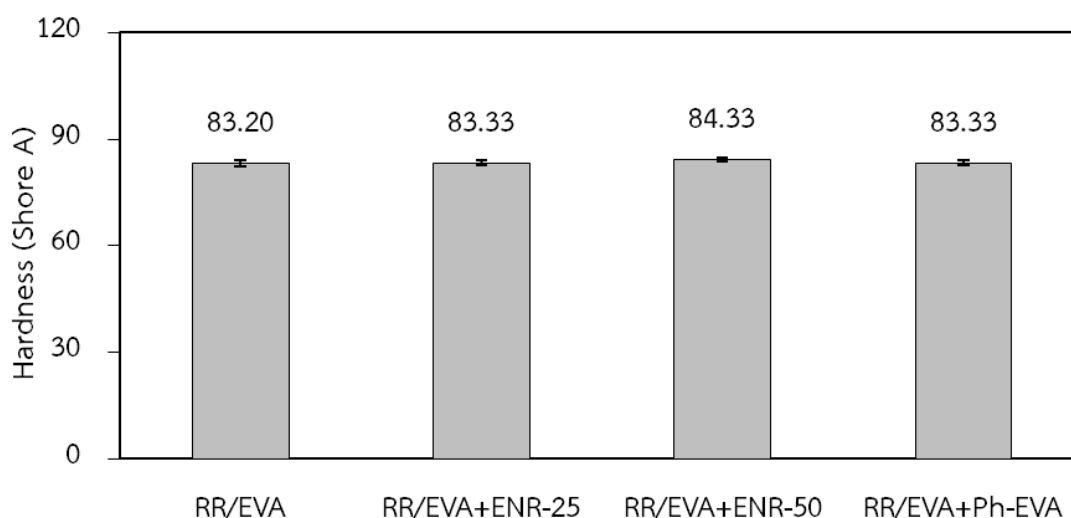
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการแปรชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ 2 ระดับ คือ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25 และ ENR-50) และอีวีเอที่ดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Phenolic compound modified EVA, Ph-EVA) โดยกำหนดให้มีปริมาณการเติมที่เท่ากัน คือ 3 phr ผลของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4-4.5

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการแปรชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด

Samples	100% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Hardness (Shore A)
RR/EVA	3.26 ± 0.04	10.55 ± 0.54	83.20 ± 0.84
RR/EVA+ENR-25	4.85 ± 0.15	11.29 ± 0.12	83.33 ± 0.58
RR/EVA+ENR-50	4.56 ± 0.07	11.35 ± 0.38	84.33 ± 0.58
RR/EVA+Ph-EVA	4.03 ± 0.07	12.17 ± 0.29	83.33 ± 0.58



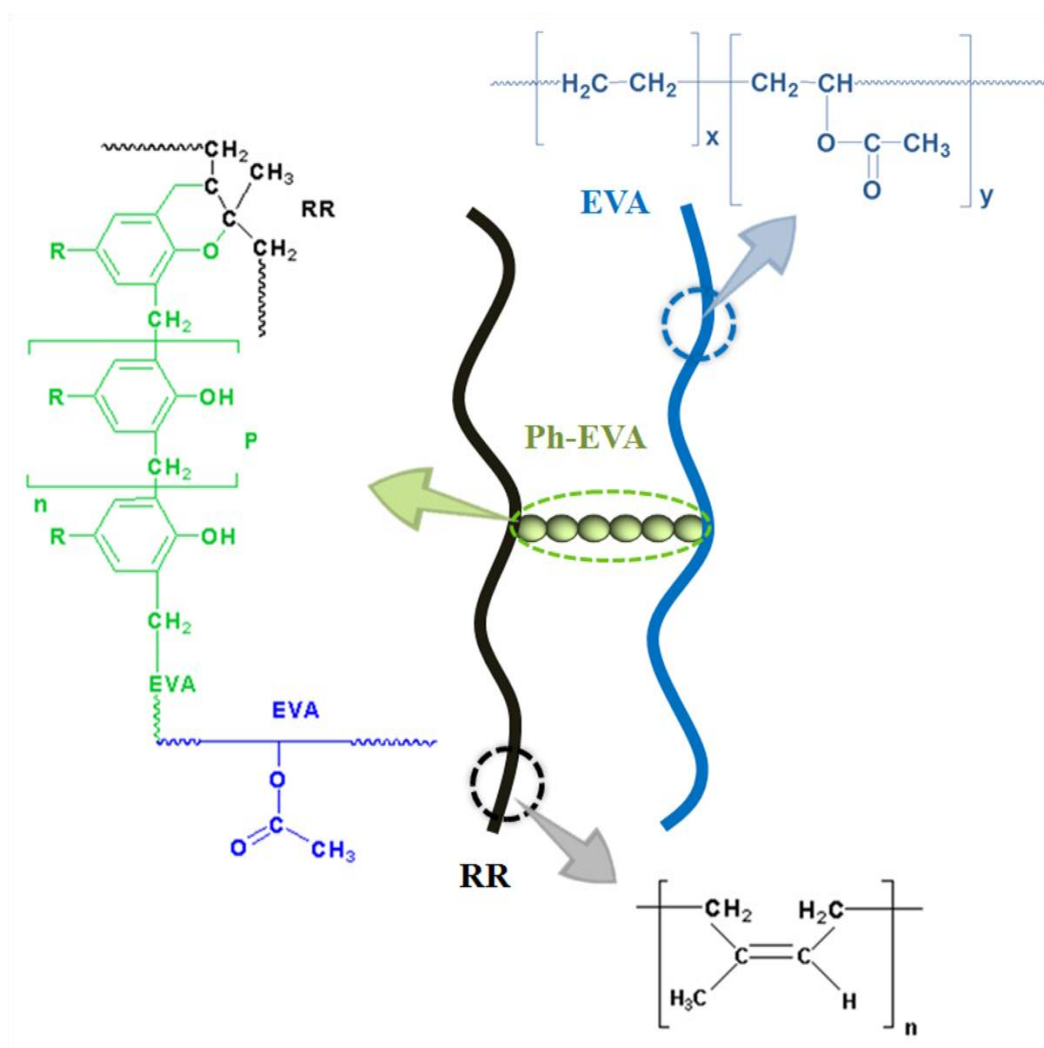
รูปที่ 4.4 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์เบเลนดระหว่าง RR/EVA
ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างชนิดกัน



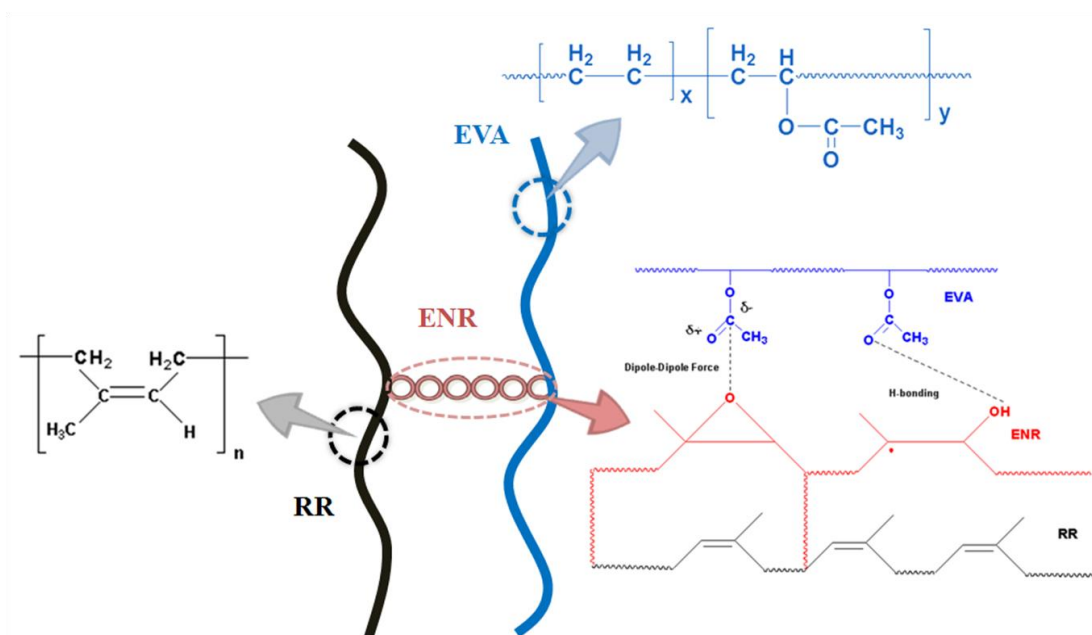
รูปที่ 4.5 ความแข็งของพอลิเมอร์เบเลนดระหว่าง RR/EVA
ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างชนิดกัน

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าพอลิเมอร์เบเลนดระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 2 ชนิด มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้นมากกว่า RR/EVA ที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.55 ± 0.54 MPa โดยที่ RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด เท่ากับ 12.17 ± 0.29 MPa และการใช้ ENR-50 และ ENR-25 ให้ค่า

ความต้านทานต่อแรงดึงเท่ากับ 11.35 ± 0.38 และ 11.29 ± 0.12 MPa รองลงมาตามลำดับ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก Ph-EVA มีโครงสร้างในหน่วยซ้ำ (Repeating unit) ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดการเชื่อมขวางปฏิกิริยาจากหมู่เมทิลอลและหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของพีนอลิกเรซินกับคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่บนสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติรีเคลมภายใต้การให้ความร้อนที่สูง ดังรายงานของ Fisher *et al.* 2010 [45] บริเวณระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งมีโอกาสเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ที่ให้ความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR-25 และ ENR-50 ที่สามารถเกิดเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่บริเวณระหว่างวัฏภาค โดยการเติม ENR-50 มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ที่มากกว่าใน ENR-25 ส่งผลให้มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาบริเวณระหว่างวัฏภาคได้มากกว่า ENR-25 จึงส่งผลให้ต้องใช้แรงดึงที่มากขึ้น สอดคล้องให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่า และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์เบลนด์ของ RR/EVA ที่มีการเติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ทั้งที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ มีค่าความแข็งแรงที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเทคนิคการวัดความแข็งแรงรายงานผลจากบริเวณผิวของวัสดุที่ทำการทดสอบเท่านั้น จึงไม่สามารถวัดระดับความแข็งแรงที่เกิดจากความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นบริเวณระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ ดังนั้นหากพิจารณาสมบัติเชิงกลร่วมกับสมบัติด้านความแข็งแรง พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ใช้ Ph-EVA เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ เป็นสถานะที่ดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



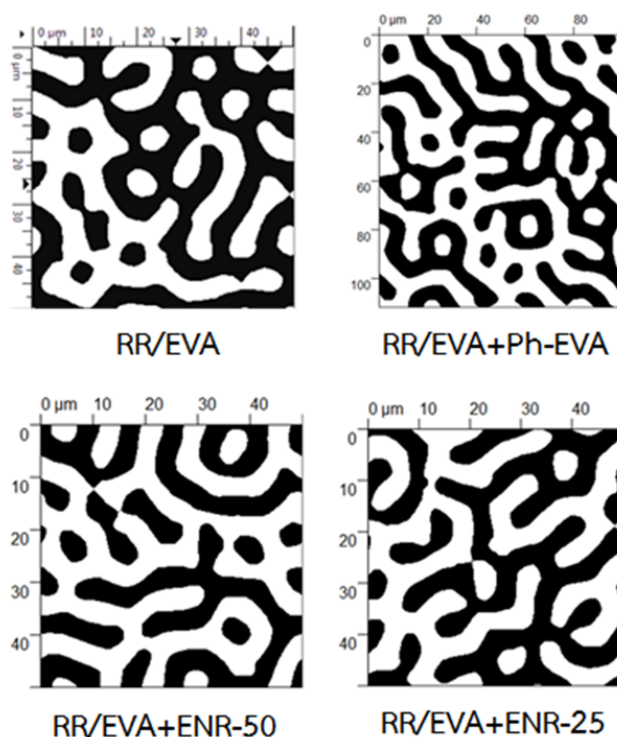
รูปที่ 4.6 อันตรกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้
ชนิด Ph-EVA [22, 36]



รูปที่ 4.7 อันตรกิริยาที่เป็นไปได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้
ชนิด ENR (ENR-25 และ ENR-50) [22, 36]

4.2.2 ผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของการกระจายตัวของวัฏภาคทั้งสองวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.8 ภาพวัฏภาค (Phase image) จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากเทคนิค AFM ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบลักษณะของการกระจายตัวจากการวิเคราะห์ค่า Full-width half maximum (FWHM) และ Phase contrast ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดต่าง ๆ

AFM results		RR/EVA with compatibilizers			
		Without compatibilizer	ENR-25	ENR-50	Ph-EVA
FWHM	EVA phase	0.6	1.6	1.8	2.0
(Degree)	NR phase	3.5	3.4	3.8	2.8
Phase contrast (Degree)		22.9	22.8	23.3	17.2

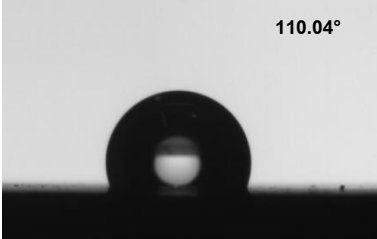
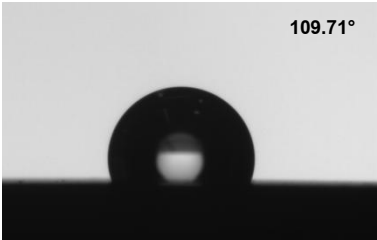
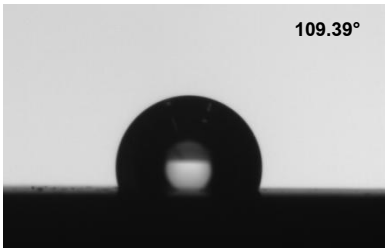
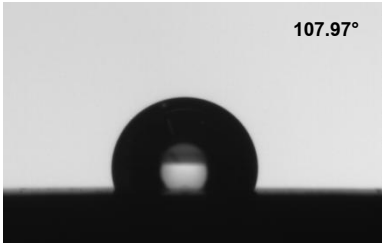
จากหลักการวิเคราะห์ความขบ้น้ำที่แตกต่างกันในรูปที่ 4.8 แสดงพื้นที่สีขาวซึ่งบ่งบอกถึงวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมและพื้นที่สีดำบ่งบอกถึงวัฏภาคของอีวีเอที่กระจายในวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลม โดยจากรูปดังกล่าวสามารถสังเกตเบื้องต้นได้ว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิก (Ph-EVA) ให้การกระจายตัวของวัฏภาคอีวีเอในเนื้อพื้นยางธรรมชาติรีเคลมที่ดีกว่าการเติม ENR-25 และ ENR-50 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงในรูปที่ 4.4 โดยจากค่าตัวเลขของการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 จากภาพวัฏภาคที่ได้จากเทคนิค AFM ร่วมกับการเชื่อมโยงความสัมพันธ์จากสมการของ Scherrer ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 2 ชนิด ให้ค่า FWHM ของวัฏภาคอีวีเอที่เพิ่มขึ้นและค่า FWHM ของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมธรรมชาติรีเคลมที่ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ตามสมการของ Scherrer ซึ่งให้เห็นถึงการมีขนาดของวัฏภาคอีวีเอที่เล็กลงเมื่อค่า FWHM เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันขนาดของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมใหญ่ขึ้นจากการให้ค่า FWHM ที่ลดลง อันเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA เมื่อมีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ซึ่งทำให้มีแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นจากการที่วัฏภาคอีวีเอซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายมีขนาดที่เล็กลง ทำให้ขนาดพื้นที่ของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมเพิ่มขึ้น รวมถึงการมีค่า Phase contrast ที่ลดลง บ่งบอกถึงความเด่นชัดของการแยกวัฏภาคลดลงหรือมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อพิจารณาทั้งค่า FWHM และ Phase contrast พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติม Ph-EVA เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ มีการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคที่ดีที่สุด กล่าวคือ มีค่า FWHM ของวัฏภาค อีวีเอที่มากที่สุดคือ 2.0 degree และมีค่า FWHM ของวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมที่น้อยที่สุดคือ 2.8 degree รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่ลดลงมากที่สุดเท่ากับ 17.2 degree เนื่องจากการใช้ Ph-EVA สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงระหว่างวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ จากความเป็นไปได้ในการเกิดพันธะโควาเลนต์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายใต้การให้ความร้อนระหว่างกระบวนการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ที่อาจเกิดขึ้นระหว่างหมู่เมทิลอลของฟีนอลิกเรซินกับพันธะคู่ที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งอะโลลิคในโครงสร้างหลักของสายโซ่ยางธรรมชาติรีเคลม [45] ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีผลทำให้การกระจายตัวของวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์เบลนด์เกิดขึ้นได้ดีที่สุด ขณะที่การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR-25 และ ENR-50 มีค่า FWHM ของวัฏภาคอีวีเอที่น้อยกว่า Ph-EVA โดยพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม ENR-25 มีค่า FWHM ของวัฏภาคอีวีเอและวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมเท่ากับ 1.6 และ 3.4 degree ตามลำดับ และพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม ENR-50 มีค่า FWHM ของวัฏภาคอีวีเอและวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมเท่ากับ 1.8 และ 3.8 degree ตามลำดับ

ซึ่งทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคเกิดได้ในปริมาณที่น้อยกว่าหรือชนิดของแรงระหว่างขั้วเช่น แรงไดโพล-ไดโพล มีความแข็งแรงที่น้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งแรงระหว่างขั้วดังกล่าว มีความแข็งแรงที่น้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติม Ph-EVA จึงทำให้มีการกระจายตัวของทั้งสองวัฏภาคในพอลิเมอร์เบลนด์ที่น้อยกว่าหรือสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ได้น้อยกว่า

4.2.3 ผลต่อพลังงานพื้นผิว

จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบค่ามุมสัมผัส (Contact angle) และพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ของเหลวที่เป็นน้ำ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม SCA20 software ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 มุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Samples	Water contact angle image
RR/EVA	
RR/EVA+ENR-25	
RR/EVA+ENR-50	
RR/EVA+Ph-EVA	

ตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Samples	Surface energy (J.m^{-2})
RR/EVA	9.05 ± 0.12
RR/EVA+ENR-25	9.10 ± 0.11
RR/EVA+ENR-50	9.21 ± 0.06
RR/EVA+Ph-EVA	9.22 ± 0.11

จากตารางที่ 4.5 พบว่า พอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ มีค่ามุมสัมผัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งยืนยันให้เห็นว่าสารเพิ่มความเข้าได้ที่ใช้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่สามารถเกิดอันตรกิริยาหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่บริเวณระหว่างภูมิภาคของทั้งสององค์ประกอบหลักได้ โดยจะเห็นว่าพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA มีค่ามุมสัมผัสที่ลดลงมากที่สุด แสดงถึงการมีสภาพความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 2 ชนิด โดย Ph-EVA อาจมีสภาพความเป็นขั้วของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วในการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะที่มีความแข็งแรงระหว่างภูมิภาคของยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอที่ต่ำกว่ากรณีการเติมยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (ENR-25 และ ENR-50) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ จึงทำให้มุมสัมผัสมีค่าลดลง การลดลงของมุมสัมผัสของ RR/EVA ที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ นั้นยังให้ค่าที่สูงกว่า 90° ซึ่งถือว่ายังคงความไม่ชอบน้ำได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

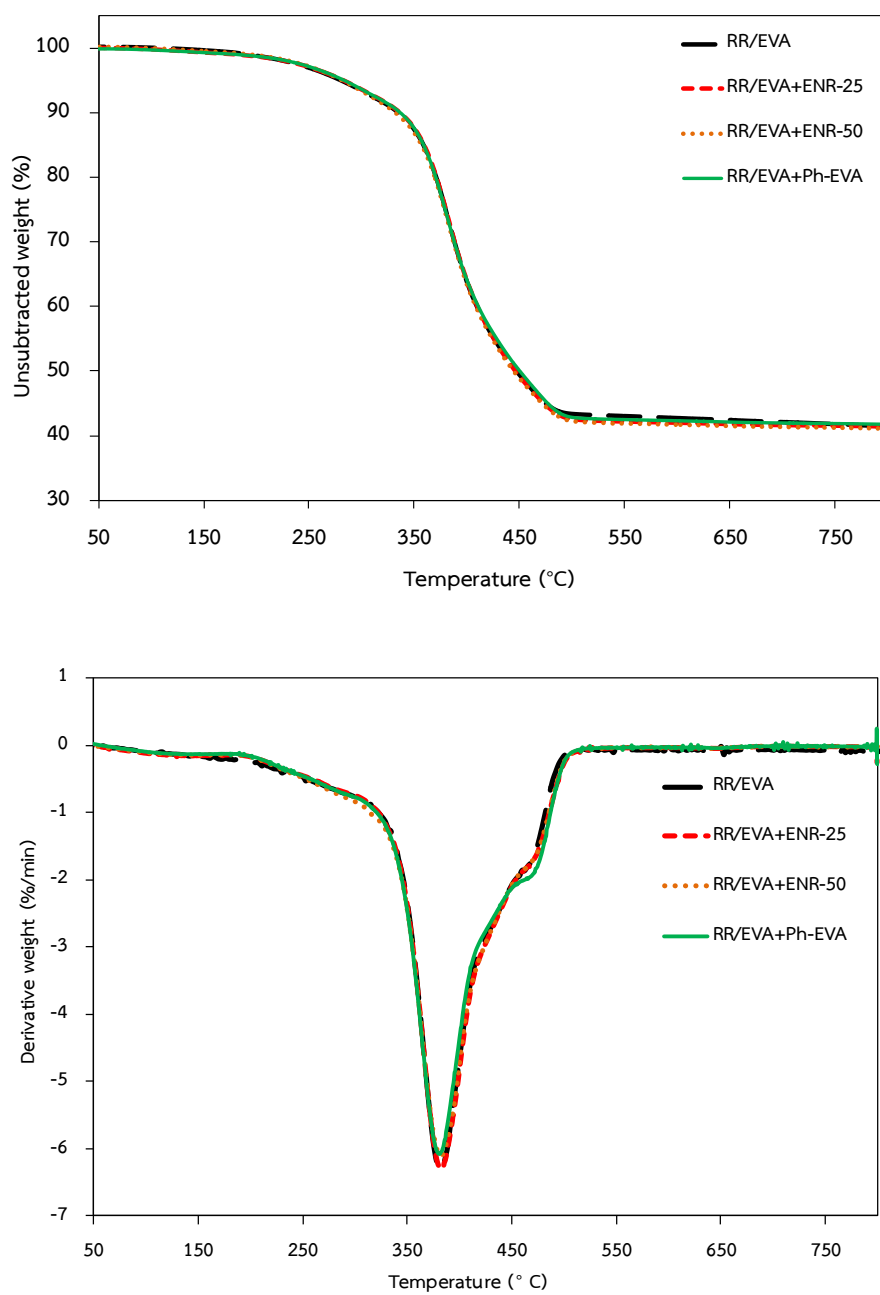
นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) จากค่ามุมสัมผัสที่ได้ โดยใช้โปรแกรม SCA20 software เพื่อทำการยืนยันค่าความเป็นขั้วจากการมีแรงดึงดูดหรือค่าพลังงานพื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์เบลนดกับหยดน้ำที่มีความสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสข้างต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า พอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA มีค่าพลังงานพื้นผิวที่สูงที่สุดเท่ากับ $9.22 \pm 0.11 \text{ J.m}^{-2}$ ซึ่งสอดคล้องกับการมีความเป็นขั้วที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง RR/EVA ที่เติม ENR-50 ENR-25 และ RR/EVA ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ เท่ากับ $9.21 \pm 0.06 \text{ J.m}^{-2}$, $9.10 \pm 0.11 \text{ J.m}^{-2}$ และ $9.05 \pm 0.12 \text{ J.m}^{-2}$ ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่ามุมสัมผัสที่แสดงตารางที่ 4.5 ดังการให้เหตุผลข้างต้น

4.2.4 ผลต่อสมบัติเชิงความร้อน

การวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (The onset temperature of thermal decomposition, T_{onset}) อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัว (The temperature of thermal decomposition, T_d) และอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัว (The final temperature of thermal decomposition, T_f) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ำยแก้ว (T_g) จากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนจากเทคนิค TGA ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Samples	T_{onset} (°C)	T_d (°C)	T_f (°C)	Weight loss (%)
RR/EVA	206.60	378.93	488.40	58.61
RR/EVA+ENR-25	233.50	378.94	529.50	58.65
RR/EVA+ENR-50	249.60	379.46	531.90	58.92
RR/EVA+Ph-EVA	246.00	379.33	542.40	58.23



รูปที่ 4.9 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

ตารางที่ 4.8 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) จากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

Samples	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
RR/EVA	-62.99
RR/EVA+ENR-25	-61.86
RR/EVA+ENR-50	-60.68
RR/EVA+Ph-EVA	-61.49

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 2 ชนิด มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสุดท้าย (T_f) พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ให้ค่าอุณหภูมิที่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงกว่าการเกิดอันตรกิริยาของ ENR-25 และ ENR-50 ในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA เช่น การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเกิดเป็นโครงสร้าง Chroman ring [45] ระหว่างหมู่เมทิลอลและหมู่ไฮดรอกซิลของฟีนอลิกเรซินกับพันธะคู่ที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งอะไลลิกในโครงสร้างหลักของสายโซ่ยางธรรมชาติรีเคลม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีความแข็งแรงที่มากกว่าการเกิดแรงระหว่างขั้วแบบไดโพล-ไดโพลหรือพันธะไฮโดรเจนในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR-25 และ ENR-50 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR-50 ให้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (T_{onset}) และอุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัว (T_d) ที่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ ENR-50 มีปริมาณของหมู่ฟีนอกไซด์ที่สูง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ ENR-50 ด้วยกันเอง (Self-crosslinking) [46] ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงขึ้นในการสลายพันธะการเชื่อมขวางดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสุดท้าย (T_f) พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติม Ph-EVA ให้ค่าสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีโครงสร้าง Chroman ring ที่มีความเสถียรทางความร้อนที่สูง จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม ENR-25 และ ENR-50

นอกจากนี้ ผลจากการทดสอบการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์หรือเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติรีเคลม ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ทุกชนิดในพอลิเมอร์เบลนด์ส่งผลให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น ยืนยันได้ว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการกระจายตัวที่ดีระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยการทำให้เกิดอันตรกิริยาและพันธะระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ทำให้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่สูงขึ้นในการทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติรีเคลมในพอลิเมอร์เบลนด์เริ่มเกิดการสั่นหรือเคลื่อนไหว จึงทำให้มีค่า T_g ที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น โดยการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR-50 ให้ค่า T_g สูงที่สุด ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA ที่การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ในพอลิเมอร์เบลนด์มีความเสถียรทางความร้อนสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเป็นไปได้ของโอกาสในการเกิดการเชื่อมขวางภายในโครงสร้างของ ENR-50 กันเอง เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวในปริมาณที่มากภายในโครงสร้างทางเคมี นอกเหนือจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ จึงส่งผลให้ต้องใช้พลังงานความร้อนในการสั่นหรือการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้มีค่า T_g ของยางธรรมชาติรีเคลมเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด แต่ทั้งนี้พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA อาจมีความได้เปรียบในเรื่องของความแข็งแรงของชนิดการเกิดอันตรกิริยาที่มากกว่าดังที่ให้เหตุผลไปแล้วก่อนหน้านี้ จึงทำให้แม้จะมีค่า T_g ที่น้อยกว่าสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด ENR-50 เพียงเล็กน้อย แต่ผลดังกล่าวส่งผลทำให้มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสุดท้าย (T_d) สูงที่สุด ซึ่งพิจารณาให้พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA มีความเสถียรทางความร้อนดีที่สุด ซึ่งยังถือเป็นการยืนยันการเกิดอันตรกิริยาและพันธะที่เป็นไปได้ ที่อาจเกิดขึ้นได้จริงระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA เมื่อพิจารณาทั้งสมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สภาพขั้วและสมบัติทางความร้อนทั้งหมดควบคู่กัน จึงพิจารณาให้พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA มีสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในส่วนต่อไป

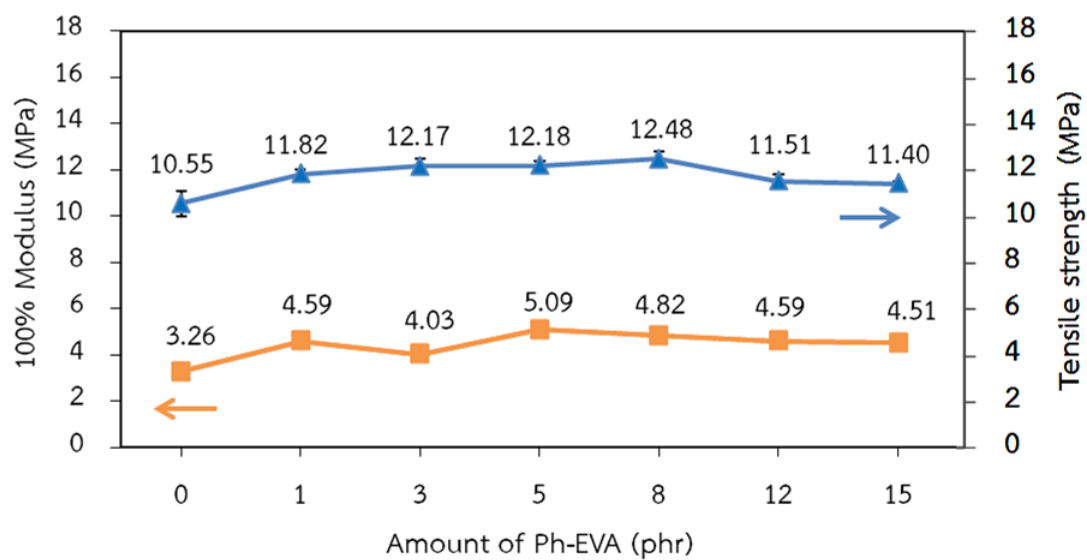
4.3 ผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้

4.3.1 ผลต่อสมบัติเชิงกล

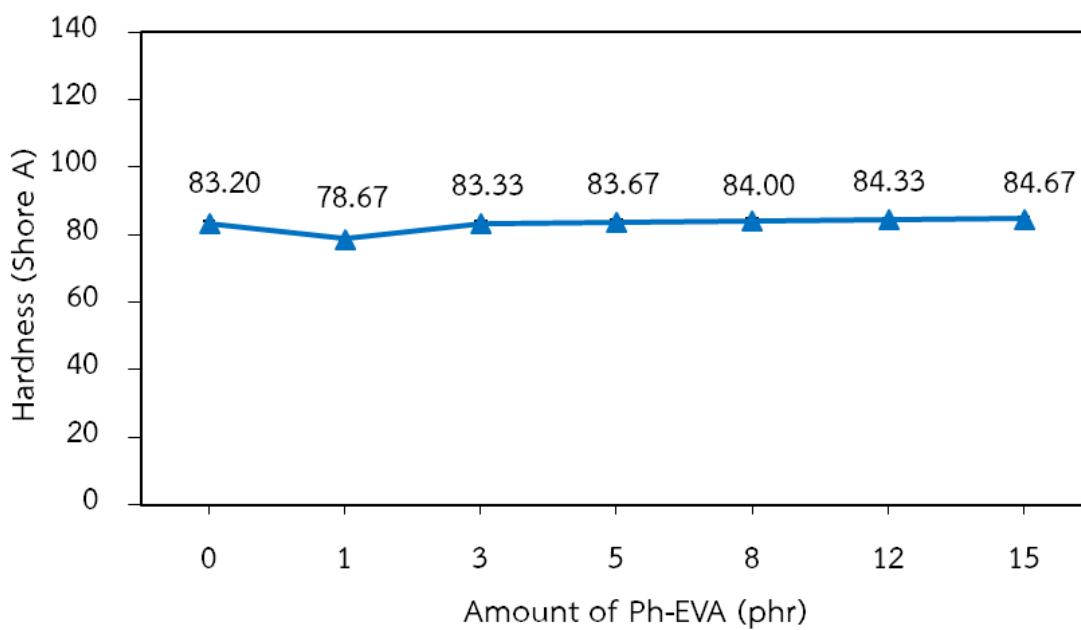
จากการพิจารณาผลการทดลองในส่วนของการศึกษาชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 2 ชนิด เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงความร้อน ได้ทำการเลือกชนิดที่ให้สมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมที่สุดคือ Ph-EVA และนำมาศึกษาหาปริมาณที่น้อยที่สุดที่ให้สมบัติที่เหมาะสมที่สุด ที่มีการใช้สภาวะในการผสมเดียวกัน โดยผลการทดสอบค่าสมบัติเชิงกลและค่าความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 รูปที่ 4.10 และ 4.11

ตารางที่ 4.9 ความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการแปรปริมาณของ Ph-EVA

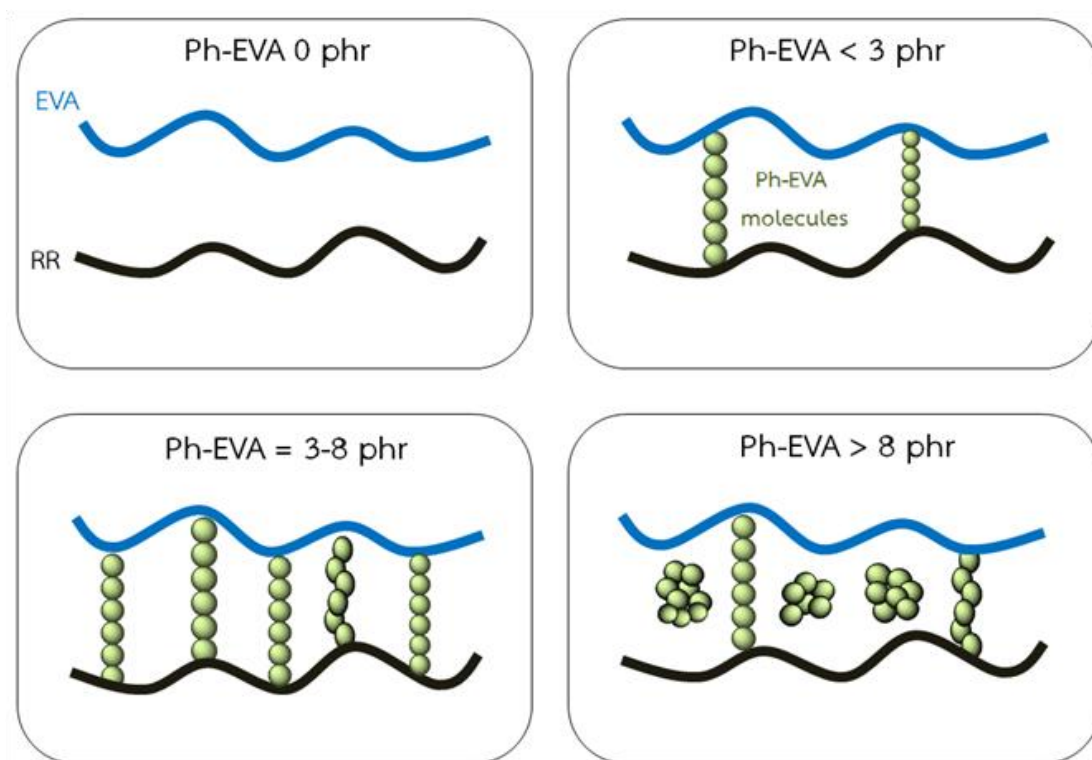
Compatibilizer contents (phr)	100% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Hardness (Shore A)
0	3.26 ± 0.04	10.55 ± 0.54	83.20 ± 0.84
1	4.59 ± 0.04	11.82 ± 0.18	78.67 ± 0.58
3	4.03 ± 0.07	12.17 ± 0.29	83.33 ± 0.58
5	5.09 ± 0.20	12.18 ± 0.20	83.67 ± 0.58
8	4.82 ± 0.06	12.48 ± 0.32	84.00 ± 1.00
12	4.59 ± 0.06	11.51 ± 0.30	84.33 ± 0.58
15	4.51 ± 0.08	11.40 ± 0.08	84.67 ± 0.58



รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนדרะหว่าง RR/EVA
ต่อสมบัติเชิงกล



รูปที่ 4.11 ผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนדרะหว่าง RR/EVA
ต่อค่าความแข็ง



รูปที่ 4.12 ลักษณะที่เป็นไปได้บริเวณระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA .ในช่วงปริมาณ 3-8 phr เป็นช่วงปริมาณการเติมที่ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเป็นปริมาณที่มีหมู่ฟังก์ชันเหมาะสมที่สุดในการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะระหว่างวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ สามารถจำลองความเป็นไปได้ของลักษณะของสารเพิ่มความเข้ากันได้บริเวณระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จากการเติม Ph-EVA ที่ปริมาณ 3-8 phr ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ทั้งค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความแข็งแรง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ในขณะที่การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณที่มากเกินไป (> 8 phr) ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ในโครงสร้างทางเคมีของสารเพิ่มความเข้ากันได้ ประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้วและไม่มีขั้วทั้งสองข้างของปลายสายโซ่โมเลกุล เมื่อมีปริมาณมากเกินไปในการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะระหว่างวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมและอีวีเอ จึงมีโอกาสดังกล่าวการรวมตัวกันเองระหว่างสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหลือจากการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะที่บริเวณระหว่างวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ จึงอาจส่งผลให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอในพอลิเมอร์เบลนด์

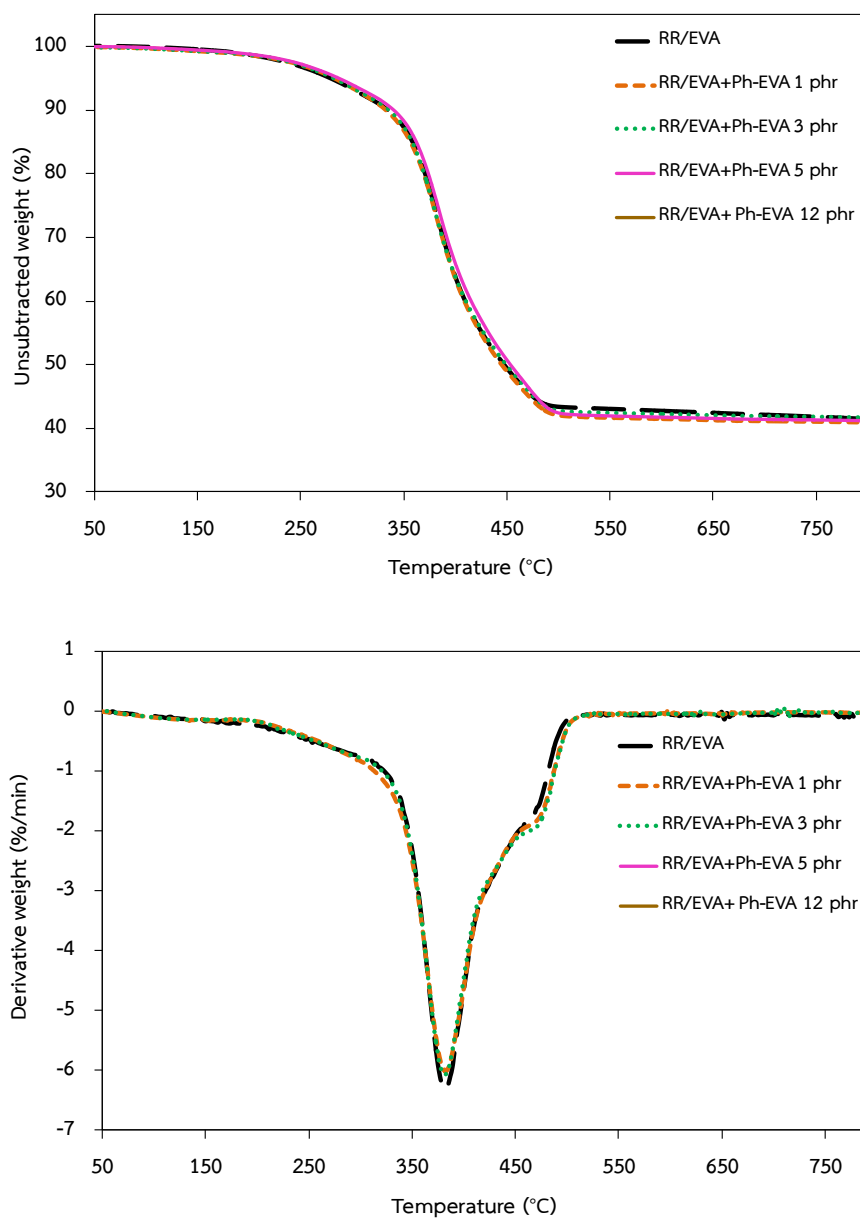
ทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลง แต่สำหรับการเติม Ph-EVA ในปริมาณที่น้อยเกินไป (< 3 phr) ก็อาจไม่เพียงพอในการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ นอกจากนี้ จากการทดสอบความแข็งแรงของพอลิเมอร์เบลนด์ ในรูปที่ 4.11 พบว่า การเติม Ph-EVA 1 phr .ให้ค่าความแข็งแรงที่ต่ำที่สุด ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA เป็นระบบแบบเติม ดังนั้นหากพิจารณาสมบัติเชิงกลร่วมกับสมบัติด้านความแข็งแรงในการเลือกปริมาณการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ที่น้อยที่สุดที่ยังคงประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ให้แก่พอลิเมอร์เบลนด์ พบว่า ปริมาณ Ph-EVA ที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA คือที่ 3 phr

4.3.2 ผลต่อสมบัติเชิงความร้อน

จากการวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ศึกษาปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (T_{onset}) อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัว (T_d) และอุณหภูมิสุดท้ายในการสลายตัว (T_f) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 25-800 °C ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ด้วยเทคนิค TGA ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.10 ค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนจากเทคนิค TGA ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณต่างกัน

Compatibilizer contents (phr)	T_{onset} (°C)	T_d (°C)	T_f (°C)	Weight loss (%)
0	206.60	378.93	552.30	58.61
1	232.40	379.22	545.10	59.01
3	246.00	379.33	542.40	58.23
5	254.60	380.73	551.70	58.87
12	248.00	380.76	540.50	59.84



รูปที่ 4.13 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้าได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) จากเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณต่างกัน

Compatibilizer contents (phr)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
0	-62.99
1	-60.53
3	-61.49
5	-61.95
12	-62.70

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.13 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะของสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ ทำให้มีความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับสมบัติเชิงกล และทำให้ความต้านทานต่อความร้อนสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มากเกินไป (12 phr) อาจทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเองระหว่างสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหลือจากการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะที่บริเวณระหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนในพอลิเมอร์เบลนด์ ส่งผลให้มีความต้านทานต่อความร้อนที่ลดลง

นอกจากนี้ ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ศึกษาปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA เพื่อศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติรีเคลม ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่เติม Ph-EVA ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า T_g ของยางธรรมชาติรีเคลมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาหรือพันธะของสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวและยึดหยุ่นได้ยากขึ้น ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่ยางธรรมชาติรีเคลม ดังนั้นจึงทำให้มีค่า T_g ที่เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลร่วมกับสมบัติเชิงความร้อน พบว่า ปริมาณการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ในพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA คือ 3 phr เป็นปริมาณน้อยที่สุดที่ให้ค่า

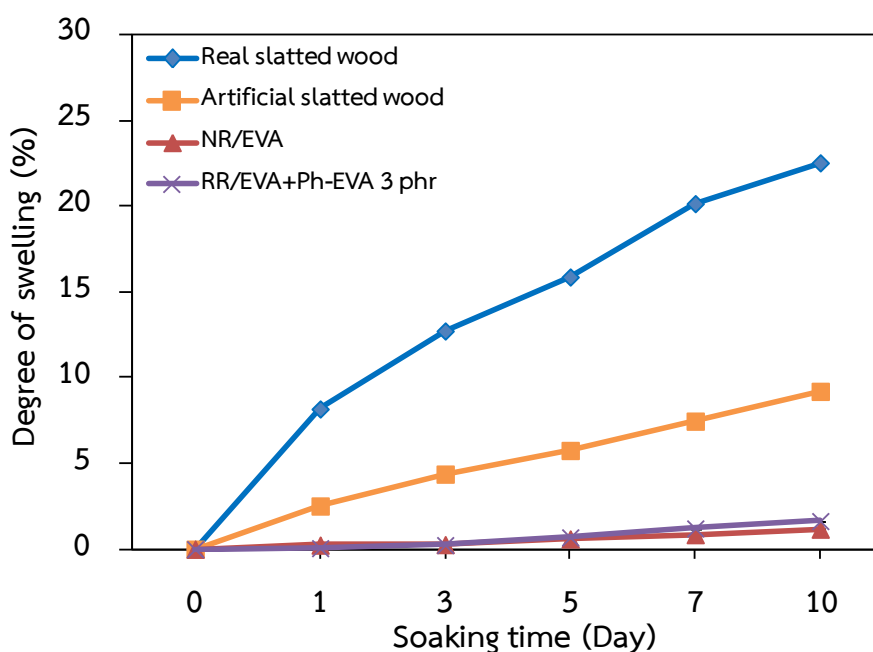
สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดและยังคงมีความทนทานต่อความร้อนที่เหมาะสม ดังนั้น ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA ที่ปริมาณ 3 phr ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA

4.4 ผลการทดสอบสมบัติของระแนงจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ โดยเลือกใช้พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ได้จากสภาวะที่ดีที่สุดกับระแนงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้แก่ พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ไม้จริง และระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์

4.4.1 ผลการทดสอบความต้านทานในน้ำ

จากการศึกษาในส่วนก่อนหน้าได้ทำการเลือกพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่ได้จากสภาวะที่ดีที่สุด คือ RR/EVA ที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA 3 phr ซึ่งเป็นสูตรที่พิจารณาว่าให้สมบัติต่าง ๆ เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเป็นระแนงเทียม เปรียบเทียบระดับการบวมพองในน้ำกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ในสูตรก่อนหน้า รวมทั้งไม้จริงและระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.12

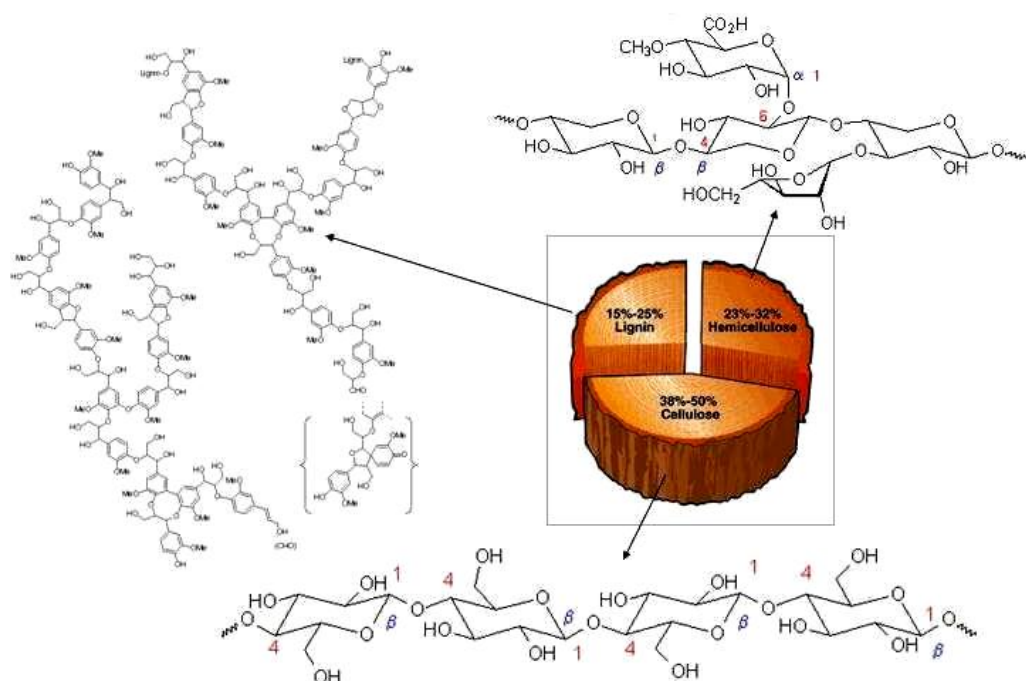


รูปที่ 4.14 ผลเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในน้ำ

ตารางที่ 4.12 ผลเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในน้ำจากวัสดุชนิดต่าง

Samples	Time (Day)					
	0	1	3	5	7	10
Real slatted wood	0.00 ± 0.04	8.18 ± 0.03	12.73 ± 0.04	15.88 ± 0.04	20.16 ± 0.06	22.54 ± 0.05
Artificial slatted wood	0.00 ± 0.05	2.52 ± 0.04	4.38 ± 0.06	5.76 ± 0.05	7.47 ± 0.05	9.21 ± 0.02
NR/EVA	0.00 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.27 ± 0.01	0.60 ± 0.01	0.85 ± 0.01	1.17 ± 0.01
RR/EVA+Ph-EVA 3 phr	0.00 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.24 ± 0.01	0.69 ± 0.02	1.21 ± 0.02	1.46 ± 0.03

จากตารางที่ 4.12 และ รูปที่ 4.14 พบว่า การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติ กับอีวีเอทั้ง NR/EVA และ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr มีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองในน้ำที่ต่ำเมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีการบวมพองในของเหลวที่มีขี้ผึ้งได้น้อยกว่าที่เป็นผลมาจากการมีสภาพความเป็นขี้ผึ้งที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทไม้จริงและระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์ จะเห็นว่าวัสดุประเภทไม้จริงนั้น มีการเปอร์เซ็นต์การบวมพองในน้ำที่สูงที่ชัดเจนมากกว่าวัสดุประเภทอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากองค์ประกอบหลักภายในของไม้ประกอบไปด้วยโครงสร้างทางเคมีที่มีขี้ผึ้ง ดังแสดงใน รูปที่ 4.15 [47] ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ที่มีส่วนที่มีขี้ผึ้งจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการบวมพองในน้ำได้มากที่สุด แสดงให้เห็นถึงการมีระดับการบวมพองใน น้ำรวมทั้งของเหลวที่มีขี้ผึ้งที่ดี และสำหรับระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์นั้น จะเห็นว่ามีการบวมพองในน้ำที่สูงรองลงมาจากไม้จริง ทั้งนี้เนื่องมาจากยังมีองค์ประกอบที่เป็นส่วนของเนื้อไม้จริง บางส่วนที่นำมาผสมกับวัสดุประเภทอื่น เช่น เทอร์โมพลาสติก จึงทำให้ยังคงมีการบวมตัวในของเหลว ที่มีขี้ผึ้งได้สูง แต่สำหรับพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งสองสูตรทั้ง NR/EVA และ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr นั้น มีส่วนประกอบหลักที่เป็นยางซึ่งไม่มีขี้ผึ้ง จึงเกิดการบวมตัวในของเหลวที่มีขี้ผึ้งเช่นน้ำได้น้อย จึงสามารถ ยืนยันความทนทานต่อน้ำและความชื้นในการนำไปใช้งานเป็นระแนงเทียมแทนไม้จริงปูพื้นคอกแพะ ในสภาวะจริงได้



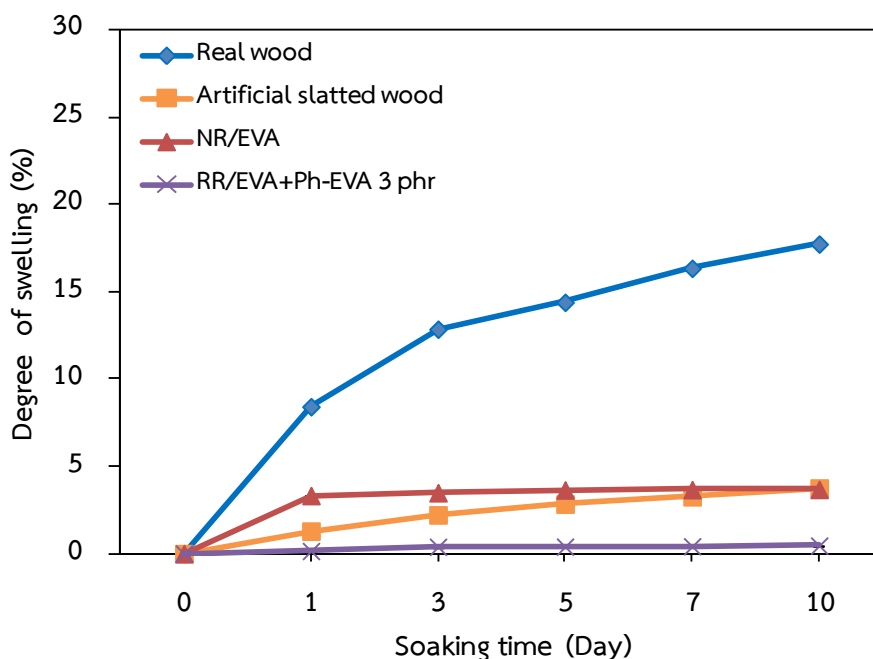
รูปที่ 4.15 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ [47]

4.4.2 ผลการทดสอบความต้านทานในปัสสาวะเทียม

ทำการเตรียมปัสสาวะเทียมตามหัวข้อที่ 3.3.5.6.2 และเปรียบเทียบความต้านทานในปัสสาวะเทียมของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ที่ได้จากสภาวะที่ดีที่สุดกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ในสูตรก่อนหน้า รวมทั้งไม้จริงและระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในสภาวะปัสสาวะเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

Samples	Time (Day)					
	0	1	3	5	7	10
Real slatted wood	0.00 ± 0.05	8.42 ± 0.06	12.86 ± 0.04	14.40 ± 0.06	16.35 ± 0.06	17.74 ± 0.06
Artificial slatted wood	0.00 ± 0.08	1.29 ± 0.09	2.22 ± 0.03	2.84 ± 0.09	3.26 ± 0.08	3.76 ± 0.09
NR/EVA	0.00 ± 0.01	3.33 ± 0.01	3.49 ± 0.01	3.65 ± 0.01	3.67 ± 0.01	3.68 ± 0.01
RR/EVA+Ph-EVA 3 phr	0.00 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.39 ± 0.01	0.40 ± 0.03	0.42 ± 0.02	0.46 ± 0.03



รูปที่ 4.16 ผลเปรียบเทียบระดับการบวมพองของวัสดุในสภาวะปัสสาวะเทียม

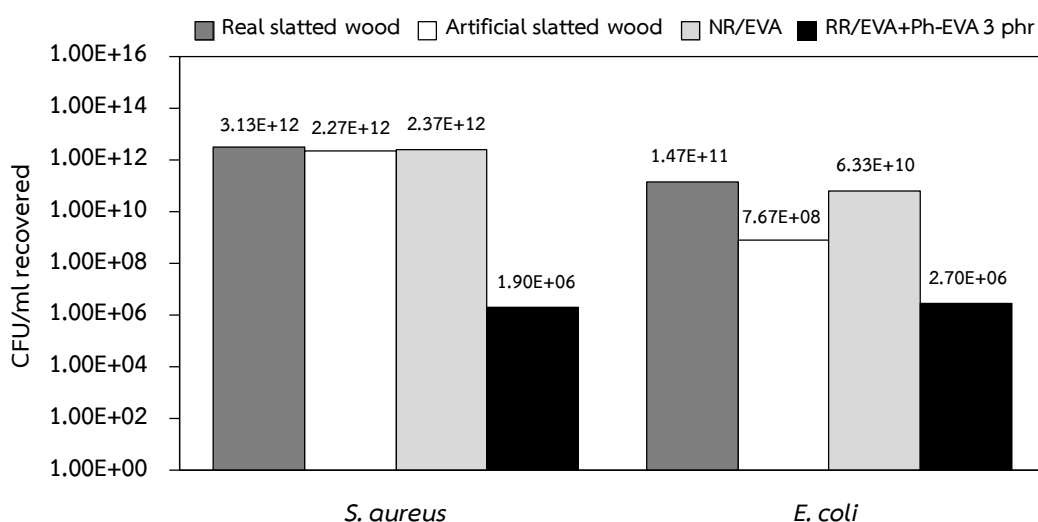
จากรูปที่ 4.16 ให้ผลที่สอดคล้องกับค่าความต้านทานในน้ำในรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นว่าการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับอีวีเอทั้ง NR/EVA และ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr รวมถึงระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์ มีแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในปัสสาวะเทียมที่ต่ำเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ มีการดูดซับของเหลวที่มีไขมันน้อยซึ่งเป็นผลมาจากการมีสภาพความเป็นไขมันที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทไม้จริง ดังการให้เหตุผลเช่นเดียวกับการบวมพองในน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีความต้านทานในน้ำรวมทั้งของเหลวที่มีไขมันอย่างปัสสาวะเทียมที่ดี สามารถยืนยันความทนทานน้ำและความขึ้นของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ในการนำไปใช้งานเป็นระแนงเทียมปูพื้นคอกแพะในสภาวะจริง

4.4.3 ผลการศึกษาการยึดเกาะของเชื้อแบคทีเรีย

จากผลการทดสอบการยึดเกาะของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* และ *E. coli* บนพื้นผิวทดสอบของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ที่ได้จากสภาวะที่ดีที่สุดเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ในสูตรก่อนหน้า รวมทั้งไม้จริงและระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์ ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการทดสอบการยึดเกาะของเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ของระแนงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

Samples	Type of bacterial (CFU/ml recovered)	
	<i>S. aureus</i>	<i>E. coli</i>
Real slatted wood	3.13E+12	3.47E+11
Artificial slatted wood	2.27E+12	7.67E+08
NR/EVA	2.37E+12	6.33E+10
RR/EVA+Ph-EVA 3 phr	1.90E+06	2.70E+06



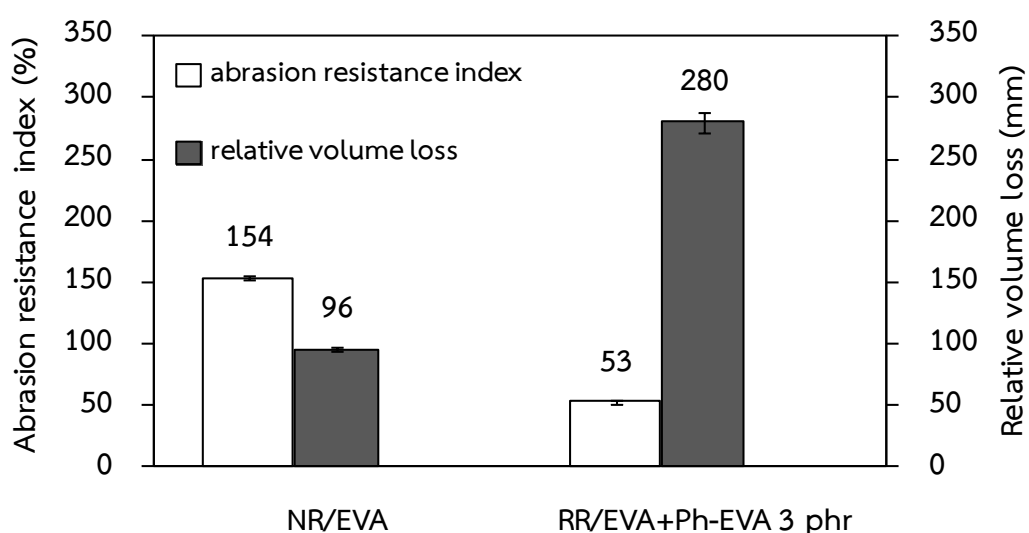
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลการทดสอบการยึดเกาะของเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ของระแนงเทียมจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.14 รูปที่ 4.17 พบว่า แผ่นทดสอบของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr มีจำนวนเชื้อที่สะสมน้อยกว่าตัวอย่างชนิดอื่น ๆ ทั้งเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ในสูตรก่อนหน้า รวมทั้งไม้จริงและระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr มีการใช้ยางธรรมชาติเรซินซึ่งยังคงมีองค์ประกอบของสารเคมีต่าง ๆ ในสูตรยางที่มีสมบัติในการต้านหรือลดการยึดเกาะของเชื้อแบคทีเรีย เช่น ซิงค์ออกไซด์ที่เป็นสารกระตุ้น

ปฏิกิริยาล้างค่าไนซ์ของยางธรรมชาติและมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งการมีปริมาณของสารเคมีดังกล่าวเพิ่มขึ้นมาจากการนำยางธรรมชาติรีไซเคิลมาใช้งานนี้ อาจมีผลทำให้การยืดเกาะของเชื้อแบคทีเรียมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุไม้ระแนงประเภทอื่น ๆ ซึ่งจากผลการทดสอบเปรียบเทียบนี้ ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ที่เตรียมขึ้นได้นั้น สามารถลดการยืดเกาะของจุลชีพต่าง ๆ อย่างเห็นได้ชัดเจน ที่ส่งผลต่อการลดการเกิดโรคในแพะได้

4.4.4 ผลการศึกษาความต้านทานต่อการสึกหรอ

เปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ที่ได้จากสภาวะที่ดีที่สุดกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ในสูตรก่อนหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA และ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr มีค่าดัชนีความต้านทานต่อการสึกหรอน้อยกว่าและมีค่าปริมาณชิ้นทดสอบที่สูญเสียในการขัดถูที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการยางธรรมชาติรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปเช่นในยางธรรมชาติรีเคลม จึงส่งผลให้มีดัชนีความต้านทานต่อการสึกหรอน้อยกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.19 ของระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ที่นำไปทดลองติดตั้งใช้งานเป็นพื้นปูคอกแพะจริงเพื่อเปรียบเทียบการใช้งานกับไม้จริง พบว่าจะสังเกตเห็นถึงความสึกหรอของไม้จริงที่สูงกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ในขณะที่ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ยังคงสภาพเดิมก่อนการทดลองใช้งาน



รูปที่ 4.19 ระแนงเทียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ที่นำไปทดลองติดตั้งใช้งานเป็นพื้นปูคอกแพะจริงเพื่อเปรียบเทียบการใช้งานกับไม้จริง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การแปรสภาวะในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ต่อสมบัติต่าง ๆ

สามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับอีวีเอ เท่ากับ 80/20 phr ได้สำเร็จ โดยสภาวะการผสมที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด คือที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อนาที (rpm)

5.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้

สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA โดยใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อีพ็อกไซด์ 25 และ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25 และ ENR-50) และอีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Ph-EVA) โดย Ph-EVA ให้ผลดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าที่การเติม Ph-EVA เท่ากับ 3 phr ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นการกระจายตัวระหว่างวัฏภาคที่ดี รวมทั้งส่งผลให้มีความต้านทานต่อความร้อนของวัสดุที่เพิ่มขึ้น

5.3 การทดสอบสมบัติของระแนงจากวัสดุชนิดต่าง ๆ

พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA+Ph-EVA 3 phr มีความต้านทานต่อของเหลวที่มีขี้ผึ้งได้ดี ได้แก่ น้ำและปัสสาวะเทียม รวมทั้งมีการยึดเกาะของจุลชีพต่าง ๆ ที่ น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ไม่จริงและระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศปี 2555
- [2] กรมปศุสัตว์. สรุปข้อมูลและสถิติจำนวนแพะและเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะประจำปี 2555
- [3] คำแนะนำการเลี้ยงแพะ โครงการพัฒนาปศุสัตว์ภาคใต้เพื่อการส่งออก กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 2556
- [4] Faerevik, G., Andersen, I. L. and Bøe, K. E., Preferences of sheep for different types of pen flooring. *Applied Animal Behaviour Science*. 2005, 90(3-4), 265-276.
- [5] <http://www.alibaba.com/productdetail/>, สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2560.
- [6] <http://www.alibaba.com/products/>, สืบค้นเมื่อ 2 พฤษภาคม 2560.
- [7] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2549. ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). หน้า 14-18.
- [8] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR). *ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน*, กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2547, หน้า 11-12.
- [9] จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณีย์. สมบัติของยางธรรมชาติ. *เทคโนโลยียางธรรมชาติ (Natural rubber technology) ความรู้ใหม่เกี่ยวกับยางธรรมชาติ จากโครงสร้างทางเคมีถึงการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม*, กรุงเทพฯ : เทคโนโนบิช คอมมิวนิเคชั่นส์, 2553, หน้า 39-41
- [10] ชินรัตน์ ลาภพูลธนอนันต์. ยางรีเคลม: การเปลี่ยนขยะยางล้อเก่าให้กลายเป็นวัสดุที่มีค่า ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง, <http://mahidolrubber.org/files/reclaim.pdf>, สืบค้นเมื่อ 24 มิถุนายน 2560.
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. เทคโนโลยีการรีไซเคิลยาง (Rubber recycling technology). ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/269_40-50.pdf, สืบค้นเมื่อ 23 มิถุนายน 2560.
- [12] Davies, C. K. L., Wolfe, S. V., Gelling, I. R. and Thomas, A. G., Strain crystallization in random copolymers produced by epoxidation of *cis* 1,4-polyisoprene. *Polymer* 1983, 24, 107-113.
- [13] Baker, C. S. L., Gelling, I. R. and Newell, R., Epoxidized Natural Rubber. *Rubber Chemistry and Technology* 1985, 58, 67-85.

- [14] Bradbury, J. H. and Perera, M. C. S., Epoxidation of natural rubber studied by NMR spectroscopy. *Applied Polymer Science* 1985, 30, 3347-3364.
- [15] Roy, S., Bhattacharjee, S. and Gupta, B. R., Hydrogenation of epoxidized natural rubber. *Applied Polymer Science* 1993, 49, 375-380.
- [16] Baker, C. S. L. and Gelling, I. R., Epoxidized Natural Rubber. *Developments in Rubber Technology* 1987, 4, 87-117.
- [17] Holden, G., Thermoplastic elastomers and their applications. *Applied Polymer Science: 21st Century* 2000, 520, 231-256.
- [18] Paul, D. R., Barlow, J. W. and Keskkula, H., "Polymer Blends" in *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering* 1988, 10, 399-461.
- [19] Nair, M. N. R. and Nair, M. R. G., Compatibility studies and characterization of a PVC/NR blend system using NR/PU block copolymer. *Polymer Bulletin* 2006, 56(6), 619-631.
- [20] Nakason, C., Jamjinno, S., Kaesaman, A. and Kiatkamjornwong, S., Thermoplastic elastomer based on high-density polyethylene/natural rubber blends: rheological, thermal, and morphological properties. *Polymers for Advanced Technologies* 2007, 19(2), 85-98.
- [21] Abdullah, I., Ahmad, S. and Sulaiman, C. S., Blending of natural rubber with linear low-Density polyethylene. *Applied Polymer Science* 1995, 58(7), 1125-1133.
- [22] Moly, K. A., Bhagawan, S. S. and Thomas S., Melt elasticity behaviour and extrudate characteristics of LLDPE/EVA blends: effect of blend ratio, compatibilisation and dynamic cross-linking. *Materials Letters* 2002, 53, 346-352.
- [23] Nakason, C., Nuansomsri, K., Kaesaman, A. and Kiatkamjornwong, S., Dynamic vulcanization of natural rubber/high-density polyethylene blends: Effect of compatibilization, blend ratio and curing system. *Polymer Testing* 2006, 25, 782-796.
- [24] Ramarad, S.; Ratnam, C. T.; Khalid, M.; Chuah, A. L. and Hanson, S., Improved crystallinity and dynamic mechanical properties of reclaimed waste tire rubber/EVA blends under the influence of electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry* 2017, 130, 362-370.

- [25] Ismail, H., Munusamy, Y., Jaafar, M. and Retnam, C. T., Preparation and characterization of ethylene vinyl acetate (EVA)/natural rubber (SMR L)/organoclay nanocomposites: effect of blending sequences and organoclay loading. *Polymer-Plastic Technology and Engineering* 2008, 47, 752-761.
- [26] Asaletha, R., Kumaran, M. G. and Thomas, S., Thermoplastic elastomers from blends of polystyrene and natural rubber: morphology and mechanical properties. *European Polymer Journal* 1999, 35(2), 253-271.
- [27] Mohamad, Z.; Ismail, H. and Thevy, R., Characterization of epoxidized natural rubber/ethylene vinyl acetate (ENR-50/EVA) blend : effect of blend ratio. *Applied Polymer Science* 2005, 99(4), 1504-1515.
- [28] Thitithammawong, A.; Nakason, C.; Sahakaro, K. and Noordermeer, J.W.M., NR/PP thermoplastic vulcanizates: Selection of optimal peroxide type and concentration in relation to mixing conditions. *Applied Polymer Science* 2007, 106(4), 2204-2209.
- [29] Zurina, M.; Ismail, H. and Ratnam, C.T., The effect of HVA-2 on properties of irradiated epoxidized natural rubber (ENR-50), ethylene vinyl acetate (EVA), and ENR-50/EVA blend. *Polymer Testing* 2008, 27(4), 480-490.
- [30] Abdullah, I.; Ahmad, S. and Sulaiman, C.S., Blending of natural rubber with linear low-Density polyethylene. *Applied Polymer Science* 1995, 58(7), 1125- 1133.
- [31] Jansen, P.; Amorim, M.; Gomes, A.S. and Soares, B.G., Use of EVA-containing mercapto groups in natural rubber-EVA blends. I. Mechanical, thermal, and morphological properties. *Applied Polymer Science* 1995, 58(1), 101-107.
- [32] Jensen, P.; Gomes, A.S. and Soares, B.G., The use of EVA-containing mercapto groups in natural rubber-EVA blends. II. The effect of curing system on mechanical and thermal properties of the blends. *Applied Polymer Science* 1996, 61(4), 591-598.
- [33] Oommen, Z. and Thomas, S., Melt rheological behavior of natural rubber/poly(methyl methacrylate)/natural rubber-g-poly(methyl methacrylate) blends. *Polymer* 1997, 38(22), 5611—5621.

- [34] Nair, M.N.R. and Nair, M.R.G., Compatibility studies and characterization of a PVC/NR blend system using NR/PU block copolymer. *Polymer Bulletin* 2006, 56(6), 619–631.
- [35] Nakason, C.; Jamjinno, S.; Kaesaman, A. and Kiatkamjornwong, S., Thermoplastic elastomer based on high-density polyethylene/natural rubber blends: rheological, thermal, and morphological properties. *Polymers for Advanced Technologies* 2007, 19(2), 85-98.
- [36] Nakason, C.; Kaewsakul, W. and Kaesaman, A., Thermoplastic natural rubbers based on blending of ethylene-vinyl acetate copolymer with different types of natural rubber. *Journal of Elastomers and Plastics* 2012, 44(1), 89-111.
- [37] วิสุทธิ์ แก้วสกุล และ เอกวิฏ กาลกรณ์สุรปราณี. รายงานโครงการฟื้นฟูระบบนิเวศน์ของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอผสมสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 2015, สืบค้นเมื่อ 19 เมษายน 2560.
- [38] Liua, H.; Fua S.; Zhuh, J.Y.; Li, H. and Zhana, H., Visualization of enzymatic hydrolysis of cellulose using AFM phase imaging. *Enzyme and Microbial Technology* 2009, 45, 274–281.
- [39] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ. การวัดขนาดอนุภาคนาโนเมตร ด้วยเทคนิค X-ray diffraction. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 62 ฉบับที่ 194. 2557, สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2561.
- [40] มหัทศจรณ์ปัสสาวะ. จัดพิมพ์โดย สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักงานกิจการโรงพิมพ์ องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก, สืบค้นเมื่อ 13 พฤษภาคม 2561.
- [41] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์. วิธีตรวจนับจุลินทรีย์มาตรฐาน. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (Food network solution), สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2561.
- [42] ปิยกุลขุฑู ทองบุญ สุวิทย์ สุวรรณโณ และ สุธีรา เสาวภาคย์. ประสิทธิภาพสารสกัดน้ำของส้มแขกในการยับยั้งแบคทีเรีย. *Journal of Community Development Research* 2012; 5(1), 54-55.
- [43] พลาสติกที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC). 2540, สืบค้นเมื่อ 2 มิถุนายน 2561.
- [44] Kalkornsurapranee, E.; Nakason, C.; Kummerlöwe, C. and Vennemann, N., Development and preparation of high-performance thermoplastic vulcanizates

based on blends of natural rubber and thermoplastic polyurethanes. *Applied Polymer Science* 2012, 128 (4), 2358-2367.

- [45] Fisher, J. D., Alkyl phenol resins in adhesive and rubber applications. *Phenolic resins: A century of progress* 2010, 439-450.
- [46] Gelling, I. R., Epoxidised natural rubber. *Epoxidised natural rubber*. Malaysian Rubber Producers' Research Association, Brickendonbury, Hertford SG13 8NL, UK, 271-297.
- [47] Brostow, W. and Datashvili, T., Wood and wood derived materials. *Journal of Materials Education* 2010, 32(3-4), 125-138.

ภาคผนวก ก.

ต้นฉบับบทความวิจัย

Chookate , A., Kaewsakul W. and Kalkornsurapranee E. 2018. Preparation of Super Rigid Rubber Based on Reclaimed Natural Rubber/Ethylene-Vinyl Acetate Blends for Flexible Artificial Slatted Wood Application

การเตรียมยางแข็งพิเศษสำหรับประยุกต์ใช้เป็นไม้ระแนงเทียมยืดหยุ่นจากยางธรรมชาติ
รีไซเคิลเบลนด์กับเอทิลีนไวนิลอะซิเตท

Preparation of Super Rigid Rubber Based on Reclaimed Natural Rubber/
Ethylene-Vinyl Acetate Blends for Flexible Artificial Slatted Wood Application

อัจฉราวดี ชูเกตุ¹ วิสุทธิ์ แก้วสกุล² และ เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี^{1*}

Adjarawadee Chookate¹ Wisut Kaewsakul² and Ekwipoo Kalkornsurapranee^{1*}

บทคัดย่อ

ยางแข็งพิเศษจากการเบลนด์ยางธรรมชาติรีไซเคิลกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทร่วมกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการเบลนด์แบบปกติโดยการใช้สภาวะในการผสมที่เหมาะสม ทำการศึกษาสภาวะที่ให้สมบัติที่ดีที่สุด ได้แก่ ผลของอุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ในการผสมต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางแข็งพิเศษที่ให้สมบัติเชิงกลสูงสุด คือการผสมที่ 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อ (> 80 Shore A) นอกจากนี้จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ซึ่งสามารถยืนยันการกระจายตัวที่ดีของทั้งสองเฟสได้โดยผลที่ได้จากการศึกษาเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในการเตรียมเป็นไม้ระแนงเทียมต้นทุนต่ำสำหรับพื้นคอกแพะหรือปศุสัตว์

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติรีไซเคิล, เอทิลีนไวนิลอะซิเตท, ความเข้ากันได้, ผสม, ไม้ระแนงเทียม

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

¹ Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90110

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอีสเทิร์น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

² Faculty of Engineering and Elastomer Technology Twente University, Netherlands

* Corresponding author; e-mail address: ekwipoo.k@psu.ac.th

560

Abstract

Super rigid rubber based on blending of reclaimed rubber (RR) and Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) with compatibilizer was successfully prepared by using simple blend technique suitable mixing condition. An optimum mixing condition including mixing temperature, time and rotor speed on properties were investigated. It was found that mixing temperature of 140 °C for 15 min with rotor speed of 30 rpm provided the highest mechanical properties for super rigid rubber (> 80 Shore A). Furthermore, morphology has been also observed by using atomic force microscope (AFM). This technique confirmed the well dispersion between both phases. The obtained result from this study is benefits to apply as the low cost artificial slatted wood for goat or livestock shed's flooring.

Key Words: reclaimed natural rubber, ethylene-vinyl acetate, compatibilizer, blends, artificial slatted wood

บทนำ

ปัจจุบันยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Natural Rubber, TPNR) ถูกให้ความสนใจในหลายอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ที่เกิดจากการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกที่มีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเฟสแข็ง (Hard phase) ที่อุณหภูมิห้อง และเฟสนิ่มหรือเฟสอีลาสโตเมอร์ (Soft phase or Elastomeric phase) ซึ่งแสดงสมบัติด้านความยืดหยุ่นได้แบบยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกสามารถแปรรูปซ้ำได้ตามเทคนิคของเทอร์โมพลาสติกทั่วไปคือสามารถอ่อนตัวและหลอมเมื่อได้รับความร้อนและจะกลับมาแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลง โดยเทอร์โมพลาสติกเหล่านี้สามารถนำมาหลอมซ้ำได้ด้วยการให้ความร้อนใหม่ รวมถึงวัสดุนี้ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติและขยายขอบเขตการใช้งานของยางธรรมชาติ ที่ผ่านมามีหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกเพื่อให้ได้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติเด่นหลากหลายตามความต้องการของการนำไปประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ในงานของ Asaletha *et al.* (1999) ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) งานวิจัยของ Nair *et al.* (2006) ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) และงานวิจัยของ Thitithammawong *et al.* (2007) ได้เตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) นอกจากนี้เอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอ (Ethylene-Vinyl Acetate, EVA) เป็นเทอร์โมพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผสมกับยางธรรมชาติ เนื่องจากอีวีเอช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและความยืดหยุ่นขณะหลอมให้แก่พอลิเมอร์เบลนด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเบลนด์ยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกชนิดต่างๆ ให้มีคุณสมบัติดีจะเป็นต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย เนื่องจากยาง

งานประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6

“นวัตกรรมและเทคโนโลยีเพื่อคุณภาพชีวิตและสังคมที่ยั่งยืน”

Innovation and Technology for Quality of Life and Sustainable Society

ธรรมชาติมีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ *cis*-1,4-polyisoprene ที่มีความว่องไวต่อความร้อนและการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) อันเนื่องมาจากการมีพันธะไม้อิ่มตัวในโครงสร้าง จึงทำให้เสื่อมสภาพได้ง่าย ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงในการแปรรูป ดังรายงานของ Kalkorn *et al.* (2012) ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติเบลนด์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ส่งผลให้มีค่าสมบัติที่ดีที่สุด คือการผสมที่อุณหภูมิ 190 °C เป็นเวลา 6 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 100 รอบต่อนาที กล่าวคือ จะต้องให้สภาวะการผสมมีความสมดุลกันทั้งในเรื่องของอุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ เนื่องจากการให้อุณหภูมิที่ต่ำเกินไปส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกเกิดการหลอมที่ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่การให้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ ในส่วนของเวลาการผสม หากมีการให้เวลาที่สั้นเกินไปอาจทำให้การกระจายตัวไม่ดีของพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อให้เวลาการผสมที่นานขึ้นอาจทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ความเร็วโรเตอร์ในการให้แรงเฉือนมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ เมื่อให้ความเร็วโรเตอร์ต่ำเกินไป ส่งผลให้การกระจายตัวไม่ดีของพอลิเมอร์เบลนด์ เนื่องจากยังมีขนาดของการกระจายตัวที่ใหญ่ ขณะที่การให้ความเร็วโรเตอร์สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการตัดขาดสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ (Chain scission) ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ด้อยลง ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าสภาวะในการเบลนด์จึงเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก รวมทั้งสมบัติด้านความแข็งแรง เพื่อให้ได้ยางเบลนด์ที่มีค่าความแข็งแรงที่เทียบเคียงกับไม้จริง ซึ่งส่วนนี้เป็นผลที่ติดจากการใช้สภาวะการผสมที่เหมาะสมในการทำให้สารเคมีต่างๆ มีการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเนื้อยาง รวมทั้งสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพที่ใช้ในปริมาณที่สูง ที่ช่วยเสริมในเรื่องของความแข็งแรงและความแข็งแรงของยางเบลนด์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสภาวะได้แก่ ผลของอุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกของการเบลนด์ยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีไอที่ให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นไม้ระแนงเทียมสำหรับคอกบคุสัตว์ นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังสนใจการศึกษาการกระจายตัวของการเบลนด์ด้วยจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) เพื่อสังเกตการกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ รวมถึงการใช้สมการของ Scherrer Monshi *et al.* (2012)) เพื่อช่วยในการชี้วัดการกระจายตัว

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผสม

ทำการศึกษาปัจจัยที่สำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ในการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด โดยกำหนดอุณหภูมิที่ 140 °C และใช้เวลาเป็น 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อนาที (rpm) เป็นสภาวะการผสมหลัก ทำการแปรปัจจัยต่าง ๆ ที่ละปัจจัยโดยคงสภาวะอีก 2 ปัจจัย

ไว้ (ดังตารางที่ 1) ทำการผสมยางและสารเคมีที่ใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติรีไซเคิลกับ อีวีเอเป็น 80/20 แสดงดังตารางที่ 2

Table 1 Processing parameters of the RR/EVA blends with different mixing conditions

Conditions	Temperature (°C)	Time (min.)	Rotor speed (rpm)
Vary temperature	130, 140*, 150, 170	15	30
Vary time	140	10, 15*, 20, 25	30
Vary rotor speed	140	15	10, 30*, 60

* Main condition

Table 2 Rubber formulation for artificial slatted wood

Ingredients	phr*	Role
Reclaimed rubber	80	Elastomer
EVA-28	20	Thermoplastic
EVA modified phenolic resin	3	Compatibilizer
ZnO	5	Activator
Stearic acid	1	Activator
Silica Ultrasil VN3	60	Reinforcing filler
TESPT	5.4	Coupling agent
Carbon black N-330	60	Reinforcing filler
Aromatic oil	17.2	Processing aid
Paraffin wax	5	Antiozonant
Phenolic resin	10	Hardness modifier
TMQ	1	Antioxidant
6-PPD	1	Antioxidant
DPG	1	Accelerator
CBS	1.5	Accelerator
Sulfur	2	Vulcanizing agent

*phr = Part per hundred of rubber

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D412 โดยเตรียมตัวอย่างเป็นรูปดรัมเบลและใช้อัตราเร็วในการดึง 500 mm/min ด้วยเครื่อง Universal testing machine และทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Shore A durometer ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อยืนยันการกระจายตัวของยางเบลนด์โดยการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) โดยใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 ใช้เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของเฟสที่ได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยหลักการของความชอบน้ำที่แตกต่างกัน (Hydrophilicity) (Hao Lin et al., 2009) และพิจารณาจากค่า Full-width half maximum หรือ FWHM ซึ่งเป็นค่าของความกว้างของความสูงครึ่งหนึ่งของพีคการกระจายตัวของทั้งสองเฟส สามารถบอกขนาดของเฟสในแต่ละพีคได้ นั่นคือถ้าค่า FWHM เพิ่มขึ้น แสดงว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีขนาดของเฟสที่เล็กลง ตามสมการของ Scherrer สำหรับค่า Phase contrast หรือความคมชัดของการแยกเฟสที่วัดได้จากระยะห่างระหว่างพีคการกระจายตัวของเฟสยางและเฟสของอีวีเอ สามารถบอกการกระจายตัวของทั้งสองเฟสในพอลิเมอร์เบลนด์ได้ กล่าวคือ เมื่อเกิดการแยกเฟสหรือความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Co-continuous phase) ค่า Phase contrast จะสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงระยะห่างระหว่างพีคทั้งสองมีองศาที่ห่างกันมากขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความเข้ากันได้ดี Phase contrast จะต่ำลง แสดงถึงการมีการกระจายตัวที่ดี

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลของการแปรสภาวะต่าง ๆ ในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ต่อสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของการแปรสภาวะต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาและความเร็วโรเตอร์ในการเบลนด์ยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ ผลการทดลองแสดงดังแสดงในรูปที่ 1

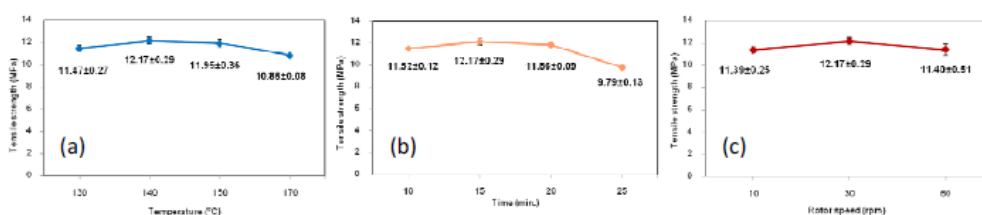


Figure 1 Effect of processing parameter with various mixing temperature (a) mixing time (b) and rotor speed (c) of the blends on tensile strength

จากรูปที่ 1a พบว่าที่อุณหภูมิการผสมสูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิการผสมเท่ากับ 140 °C ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุดซึ่งถือเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้ออลิเมอร์เบลนด์เกิดการผสมเข้ากันได้ดีที่สุด อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดในการผสมลดลง ส่งผลให้ออลิเมอร์เบลนด์มีปริมาตรอิสระที่เพิ่มขึ้น สารเคมีต่าง ๆ จึงสามารถเกิดการกระจายตัว ที่ดีและนอกจากนี้การเกิดอันตรกิริยากันระหว่างเฟสของออลิเมอร์เบลนด์ที่อุณหภูมิดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้ดี อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิการผสมสูงมากขึ้นจนถึง 170 °C ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเสื่อมสภาพ ขณะเดียวกันการผสมที่ใช้ อุณหภูมิต่ำเกินไป (130 °C) อาจทำให้การกระจายตัวระหว่างเฟสเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์เนื่องจากความร้อนไม่ เพียงพอต่อการลดความหนืดของออลิเมอร์เบลนด์และส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสต่ำ จึงส่งผลให้ สมบัติเชิงกลลดลง และจากผลของการแปรเวลาในการผสม (รูปที่ 1b) พบว่าที่เวลาการผสมเป็น 15 นาที ให้ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการผสมนานเกินไปจนถึง 25 นาที ออลิเมอร์เบลนด์ สัมผัสกับความร้อนและแรงเฉือนนานเกินไป ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เช่นเดียวกับผลของการแปรความเร็ว โรเตอร์ พบว่าการผสมที่ใช้ความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น โดยที่ความเร็วโร เตอร์เป็น 30 rpm มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งเป็นอัตราการให้แรงเฉือนที่ทำให้เกิดการกระจาย ตัวระหว่างเฟสที่ดีของออลิเมอร์เบลนด์ อย่างไรก็ตามเมื่อความเร็วโรเตอร์ที่สูงเกินไป (60 rpm) จะให้ความ ต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากแรงเฉือนที่มากเกินไปทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดขาด มากเกินไป ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง รวมถึงความร้อนสะสมและแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นในขณะผสมดังกล่าว ถูกดูดซับเข้าไปทำให้อิเล็กตรอนในส่วนของโมเลกุลนั้นยกระดับพลังงานในตัวเองขึ้น ซึ่งเรียกว่า ภาวะถูก กระตุ้น (Excited state) โดยส่วนใหญ่แล้วพลังงานที่ถูกดูดซับไปจะถูกใช้ไปกับการหมุนและการสั่นของพันธะ ต่าง ๆ และส่วนที่เหลือก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของออลิเมอร์เบลนด์ กระบวนการ ที่สำคัญอันหนึ่งก็คือ การที่ส่วนใดส่วนหนึ่งในโมเลกุลของออลิเมอร์เบลนด์เกิดการแตกตัวเป็นแรดิคอล (Radical) ที่เป็นกลุ่มทางเคมีที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวอยู่หนึ่งตัวและแรดิคอลที่เกิดขึ้นนี้เองอาจจะทำให้โมเลกุล ของออลิเมอร์เบลนด์สั้นลง (Chain scission) เนื่องด้วยกระบวนการเหล่านี้เองทำให้ออลิเมอร์เบลนด์เกิดการ เสื่อมสภาพ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลง (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), 2540) ขณะเดียวกันการใช้ความเร็วโรเตอร์ที่ต่ำ (10 rpm) อาจส่งผลให้การกระจายตัวระหว่างเฟสที่ต่ำ จึงส่งผลให้ ความแข็งแรงลดลง เนื่องจากการกระจายตัวและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับ การศึกษาสถานะในการเตรียมยางธรรมชาติเบลนด์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ดังรายงานของ Kalkornsurapranee *et al.* (2012) นอกจากนี้จากการทดสอบความแข็งแรงของออลิเมอร์เบลนด์พบว่าผลของ การแปรสภาวะการผสมที่ได้ให้ค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นหากพิจารณา สมบัติเชิงกลร่วมกับสมบัติด้านความแข็งแรง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมออลิเมอร์เบลนด์ดังที่

กล่าวมาข้างต้นคือการผสมที่อุณหภูมิที่ 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อนาที

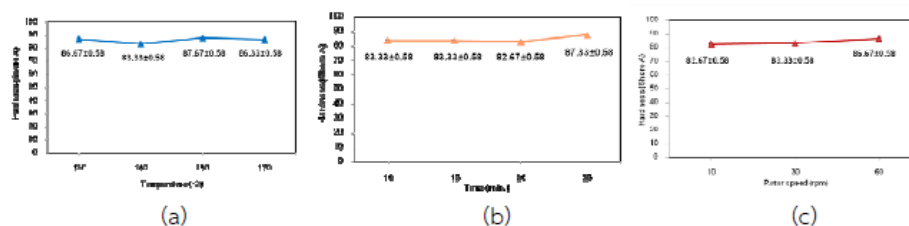


Figure 2 Effect of processing parameter with various mixing temperature (a) mixing time (b) and rotor speed (c) of the blends on hardness

ผลของสภาวะต่าง ๆ ในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของการกระจายตัวของเฟสทั้งสองเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยใช้โปรแกรม Gwyddion 2.50 ช่วยวิเคราะห์ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่การแปรสภาวะการผสมต่าง ๆ แสดงให้เห็นการกระจายตัวของเฟสยางและอีวีเอ แสดงในรูปที่ 3

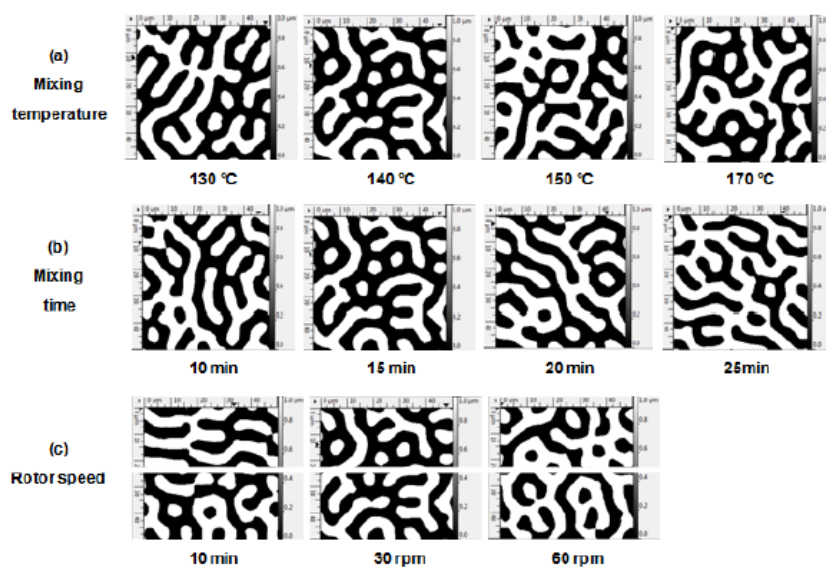


Figure 3 AFM image of the blend with different processing parameter by various mixing temperature (a) mixing time (b) and rotor speed (c)

โดยจากหลักการวิเคราะห์ความชอบน้ำที่แตกต่างกันในรูปที่ 3 แสดงพื้นที่สีขาวซึ่งบ่งบอกถึงเฟสยาง และพื้นที่สีดำบ่งบอกถึงเฟสของอีวีเอ และจากการวิเคราะห์ผลโดยการใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์การแยกเฟส ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าสภาวะการผสมที่ใช้อุณหภูมิสูงขึ้น ให้ค่า FWHM ของเฟสอีวีเอที่เพิ่มขึ้นและค่า FWHM ของเฟสยางที่ลดลง ตามสมการของ Scherrer ซึ่งให้เห็นถึงการมีขนาดของเฟสอีวีเอที่เล็กลงเมื่อค่า FWHM เพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันขนาดของเฟสยางใหญ่ขึ้นจากการให้ค่า FWHM ที่ลดลงอันเป็นผลมาจากการมีขนาดของเฟสอีวีเอที่เล็กลง ทำให้ขนาดพื้นที่ของเฟสยางเพิ่มขึ้น แสดงถึงการมีการกระจายตัวที่ดีของเฟสอีวีเอในเฟสยาง รวมถึงการมีค่า Phase contrast ที่ลดลง บ่งบอกถึงความเด่นชัดของการแยกเฟสลดลงหรือมีความเป็นเนื้อเดียวกันที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าทั้งค่า FWHM และ Phase contrast พบว่าที่อุณหภูมิการผสมสูงสุดถึง 170 °C บ่งบอกถึงการกระจายตัวระหว่างเฟสที่ดีที่สุด เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวสามารถช่วยลดความเหนียวของพอลิเมอร์เบลนด์ ทำให้การกระจายตัวของเฟสทั้งสองเกิดได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลที่ได้ไม่สอดคล้องกับผลการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงเกินไปในการผสมอาจส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการเสื่อมสภาพ จึงเป็นอิทธิพลร่วมที่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง ขณะเดียวกันพบว่าการใช้อุณหภูมิต่ำเกินไป (130 °C) ให้การกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์ต่ำที่สุด คือมีค่า FWHM ของเฟสอีวีเอที่ลดลงและค่า FWHM ของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลต่ำเช่นเดียวกัน เนื่องจากการกระจายตัวที่แย่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างเฟสเกิดขึ้นน้อย และจากผลของการแปรเวลาในการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ พบว่าการใช้เวลาเพิ่มขึ้น การกระจายตัวมีแนวโน้มที่ดีขึ้นเช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิการผสม โดยการใช้เวลาการผสมสูงสุดถึง 25 นาที ให้ค่าการกระจายตัวที่ดีที่สุด กล่าวคือ มีค่า FWHM ของเฟสอีวีเอสูงที่สุดและค่า FWHM ของเฟสยางต่ำที่สุด รวมถึงมีค่า Phase contrast ต่ำที่สุด เนื่องจากการให้เวลาในการให้ความร้อนและแรงเฉือนในการลดความเหนียวของพอลิเมอร์เบลนด์ที่นานขึ้น แต่ที่เวลาดังกล่าวอาจนานเกินไปจนทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เกิดการเสื่อมสภาพได้ การกระจายตัวที่ดีนี้จึงไม่ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ขณะเดียวกัน การให้เวลาการผสมต่ำเกินไป (10 นาที) อาจไม่เพียงพอในการเกิดการกระจายตัวที่ดี เห็นได้จากค่า FWHM ของเฟสอีวีเอที่ลดลงและค่า FWHM ของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่เพิ่มขึ้น จึงให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำ นอกจากนี้อิทธิพลของความเร็วโรเตอร์ส่งผลต่อการกระจายตัวของพอลิเมอร์เบลนด์เช่นกัน จากผลทำให้ทราบว่าเมื่อความเร็วโรเตอร์เพิ่มขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวดีขึ้น โดยที่ 60 rpm ให้ค่าการกระจายตัวที่ดีที่สุด กล่าวคือ มีค่า FWHM ของเฟสอีวีเอสูงที่สุดและค่า FWHM ของเฟสยางต่ำที่สุด รวมถึงมีค่า Phase contrast ต่ำที่สุด ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการแปรสภาวะของอุณหภูมิและเวลาในการผสม แต่ผลการกระจายตัวที่ดีที่ความเร็วโรเตอร์สูงสุดดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางถูกตัดขาดมากเกินไปจากการเกิด Chain scission เมื่อมีความร้อนสะสมจากการให้แรงเฉือนที่สูงเกินไป ขณะเดียวกันการใช้ความเร็วโรเตอร์ที่ต่ำเกินไป (10 rpm) อาจไม่เพียงพอให้เกิดการกระจายตัวที่ดี จากการให้ค่า FWHM ของเฟสอีวีเอที่ลดลงและค่า FWHM ของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น รวมถึงมีค่า Phase contrast ที่เพิ่มขึ้น จึงให้สมบัติเชิงกลที่ต่ำ จากผลการทดลองในตอนนี้สามารถ

ยืนยันความสามารถในการกระจายตัวที่ต่างกันของสภาวะการผสมที่ต่างกันได้ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ อุณหภูมิการผสมที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวอย่างระหว่างเฟสอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการใช้เวลาและความเร็วโรเตอร์ที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การกระจายตัวระหว่างเฟสดีขึ้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติเชิงกลควบคู่เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น

ดังนั้นเมื่อพิจารณาการกระจายตัวระหว่างเฟสร่วมกับสมบัติเชิงกล พบว่าสภาวะการผสมที่ให้การกระจายตัวเหมาะสมที่สุดส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดคือที่อุณหภูมิการผสมเป็น 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 rpm

Table 3 Comparisons of characteristics of the distribution of Full-width half maximum (FWHM) and phase contrast with various mixing temperature, mixing time and rotor speed

AFM result		Conditions										
		Temperature (°C)				Time (min.)				Rotor speed (rpm)		
		130	140	150	170	10	15	20	25	10	30	60
FWHM (degree)	EVA phase	1.8	2.0	2.2	2.4	1.6	2.0	2.1	2.2	1.2	2.0	2.1
	NR phase	4.7	2.8	2.1	1.7	3.3	2.8	2.2	1.6	3.6	2.8	2.1
Phase contrast (Degree)		17.4	17.2	17.2	17.1	23.5	17.2	17.1	17.1	23.4	17.2	19.1

สรุปผล

การเบลนด์ยางธรรมชาติรีไซเคิลกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตทหรืออีวีเอร่วมกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ที่อุณหภูมิการผสมเป็น 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 รอบต่อนาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดโดยให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด มีค่าการกระจายตัวของทั้งเฟสยางและเฟสอีวีเอที่สูง หมายถึงมีการกระจายตัวระหว่างเฟสดี เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้เป็นไม้ระแนงเทียมสำหรับ ปูพื้น โรงเรือนเลี้ยงแพะหรือคอกปศุสัตว์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุสำหรับพื้นที่ในการทดลอง ทุนการวิจัยประเภท สิ่งประดิษฐ์ ปีงบประมาณ 2560 คณะวิทยาศาสตร์และทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Asaletha, R., Kumaran, M.G. and Thomas, S. 1999. Thermoplastic elastomers from blends of polystyrene and natural rubber: morphology and mechanical properties. **European Polymer Journal** 35 (2): 253-271.
- Nair, M. N. R. and Nair, M. R. G. 2006. Compatibility studies and characterization of a PVC/NR blend system using NR/PU block copolymer. **Polymer Bulletin** 56 (6): 619-631.
- Thitithammawong, A., Nakason, C., Sahakaro, K. And Noordermeer, J. W. M. 2007. NR/PP thermoplastic vulcanizates: Selection of optimal peroxide type and concentration in relation to mixing conditions. **Applied Polymer Science** 106 (4): 2204-2209.
- Karnkornsrapanee, E., Nakason, C., Kummerlöwe, C. and Vennemann, N. 2012. Development and preparation of high-performance thermoplastic vulcanizates based on blends of natural rubber and thermoplastic polyurethanes. **Applied Polymer Science** 128 (4): 2358-2367.
- วิสุทธิ แก้วสกุล และ เอกวิญ ภาณุกรณ์สุรปราณี. 2015. รายงานโครงการพื้นฐานงานวิจัย เรื่อง พอลิเมอร์ เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอผสมสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพของ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์.
- Monshi, A., Foroughi M. R. and Foroughi M. R. 2012. Modified scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD. **World Journal of Nano Science and Engineering** 2: 154-160.
- Liu, H., Fu, S., Zhu, J. Y., Li, H. And Zhan, H. 2009. Visualization of enzymatic hydrolysis of cellulose using AFM phase imaging. **Enzyme and Microbial Technology** 45: 274-281.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC). 2540. พลาสติกที่สลายตัวได้โดยธรรมชาติ. ม.ป.ท.

ภาคผนวก ข.

อนุสิทธิบัตร

ระแนงเทียมจากการเบลนด้อย่างธรรมชาติรีเคลม
เลขที่คำขอ 1903001121 ยื่นคำขอเมื่อ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2562
รับคำขอเมื่อ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

[illegible]

[illegible]

ภาคผนวก ค.

การเปรียบเทียบสมบัติและการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบระแนงเทียม

ค.1 การเปรียบเทียบสมบัติและราคาของวัสดุต่าง ๆ สามารถทำได้โดยเทียบจากขนาดที่เท่ากันของวัสดุ คือ 1 m^2 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ ค.1 โดยราคาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA และ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr คำนวณมาจากส่วนของราคาค้นทุนสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนด์

ในการเปรียบเทียบสมบัติและราคาของวัสดุต่าง ๆ สามารถทำได้โดยเทียบจากขนาดที่เท่ากันของวัสดุ คือ 1 m^2 ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ ค.1 โดยราคาของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA และ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr คำนวณมาจากส่วนของราคาค้นทุนสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในพอลิเมอร์เบลนด์

ตารางที่ ค.1 เปรียบเทียบสมบัติและราคาของระแนงเทียมที่เตรียมได้กับระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์และไม้จริงในปริมาณที่เท่ากัน คือ 1 m^2

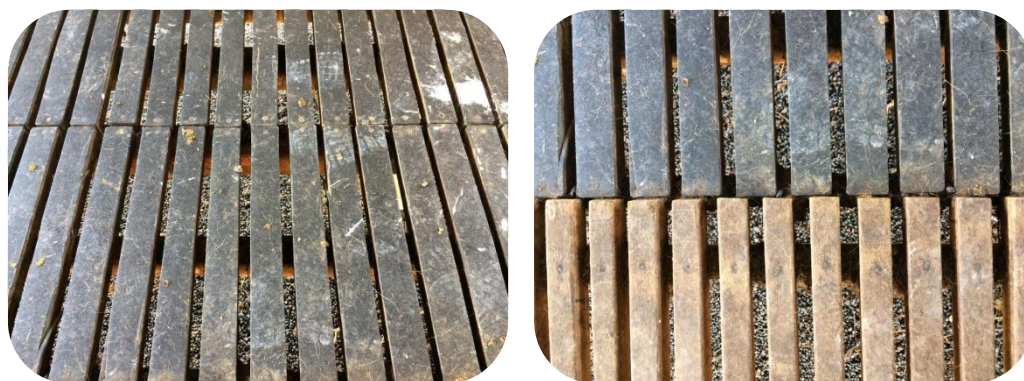
วัสดุ	NR/EVA	RR/EVA +Ph-EVA 3 phr	ระแนงเทียม	ไม้จริง
ยี่ห้อ	-	-	Thaisun	-
ราคา (บาท)	120	103	150	101
การยืดเกาะของจุลชีพ	สูง	ต่ำ	สูง	สูง
ความต้านทานต่อน้ำและความชื้น	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความต้านทานต่อการสึกหรอ	สูง	ต่ำ	-	-
การดูดซับแรง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
การทำความสะอาดในการใช้งาน	ง่าย	ง่าย	ง่าย	ยาก
อายุการใช้งาน	นาน	นาน	นาน	สั้น

จากตารางที่ ค.1 จะเห็นว่าการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ใช้ยางธรรมชาติรีไซเคิลลดต้นทุนพอลิเมอร์เบลนด์ของ NR/EVA มีความประสบความสำเร็จ โดยสามารถลดต้นทุนได้กว่า 14 เปอร์เซ็นต์ จากพอลิเมอร์เบลนด์ในสูตรเดิม รวมทั้งสามารถต้นทุนได้ต่ำกว่าระแนงเทียมที่มีในเชิงพาณิชย์และใกล้เคียงราคาของไม้จริง และเมื่อพิจารณาในแง่สมบัติต่าง ๆ ของ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr พบว่า มีสมบัติการยืดเกาะของจุลชีพหรือแบคทีเรียต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ซึ่งจะส่งผลต่อการลดการเกิดโรคในแพะได้ และยังมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการดูดซับแรง ซึ่งเป็นสมบัติที่โดดเด่นของยางธรรมชาติในด้านความยืดหยุ่นและการดูดซับแรงและพลังงานที่ดี สามารถช่วยในเรื่องของการลดการบาดเจ็บของแพะได้ ทำให้ได้แพะที่มีสุขภาพดี ซึ่งส่งผลต่อราคาขายที่ดี นอกจากนี้ พอลิเมอร์เบลนด์ของ RR/EVA+Ph-EVA 3 phr ยังช่วยยืดอายุการใช้งานให้แก่วัสดุบุพื้นคอกแพะหรือคอกปศุสัตว์จากการมีความทนทานต่อน้ำและความชื้นและยังมีการทำความสะอาด

สะอาดที่ง่าย ซึ่งทำให้เกษตรกรประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกและลดจำนวนครั้งในการติดตั้งพันธุ์พืชใหม่ ทำให้ประหยัดต้นทุนในส่วนนี้ได้

ค.2 ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบระแนงเทียม

ทำการขึ้นรูประแนงเทียมโดยวิธีการการอัดด้วยความร้อนด้วยเครื่องอัดเป็น เวลาประมาณ 15 นาที ซึ่งเป็นเวลาการที่ได้จากการทดสอบการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่อง MDR ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมที่ทำให้ยางเกิดการไหลได้เต็มเข้าพิมพ์ก่อนเกิดการวัลคาไนซ์โดยพบว่า พอลิเมอร์ เบลนดระหว่าง RR/EVA โดยใช้สภาวะในที่อุณหภูมิการผสมเป็น 140 °C เป็นเวลา 15 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 30 rpm มีค่าความสมบัติเชิงและสมบัติเชิงความร้อนที่ดีที่สุด จึงนำมาเป็นสูตรที่ใช้ในการขึ้นรูปเป็นระแนงเทียมในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งระแนงเทียมที่นำไปติดตั้งเป็นพื้นคอกแพะที่โรงเรียนจริง ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาสัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดเล็ก หมู่ที่ 5 ต.คลองหอยโข่ง อ.คลองหอยโข่ง จ.สงขลา กลุ่มงานศูนย์วิจัย คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ ค.1 และ ค.2 ตามลำดับ



รูปที่ ค.1 ต้นแบบระแนงเทียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ NR/EVA

ที่นำไปติดตั้งเป็นพื้นคอกแพะที่โรงเรียนจริง

จากรูปที่ ค.2 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าวัสดุระแนงเทียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA จะมีความสึกหรอบริเวณของขอบวัสดุที่น้อยมากเมื่อเทียบกับวัสดุไม้จริงหลังการใช้งานที่เวลาผ่านไปประมาณ 2 ปี โดยจะเห็นร่องรอยการสึกหรอบริเวณของไม้จริง เนื่องจากความทนทานต่อของเหลวและปัสสาวะแพะที่ต่ำกว่าเนื่องจากความเป็นขี้ของไม้จริง ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA สามารถปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุนของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้จริง

ภาคผนวก ง.

ผลการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอ (NR/EVA) ที่เตรียมขึ้นใหม่ โดยใช้สูตรที่เหมาะสมกับค่าที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้า [37] และการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติรีเคลมกับอีวีเอ (RR/EVA)

ง.1 ผลการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติผสมกับอีวีเอ (NR/EVA)

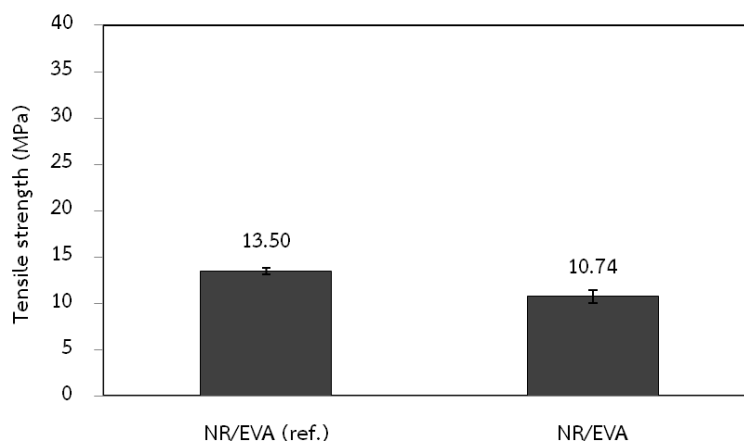
การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA เพื่อใช้เป็นตัวมาตรฐานในการเปรียบเทียบ โดยใช้สูตรที่เหมาะสมจากงานวิจัยก่อนหน้า [37] ดังแสดงในตารางที่ ค.1 ขั้นตอนการผสมใช้วิธีการผสมแบบหลอม (Melt mixing) ด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับการผสมที่ 90 °C และความเร็วรอบในการบดผสมเท่ากับ 30 rpm โดยในช่วงแรกนั้นทำการผสมยางธรรมชาติ 2-3 นาที ก่อนเติมอีวีเอและยางธรรมชาติ ทำการบดต่อเนื่องอีก 5 นาที จึงทำการเติมครึ่งหนึ่งของปริมาณทั้งหมดของ ซิลิกา เขม่าดำ สารคู่ควบไซเลน น้ำมันช่วยในการแปรรูปและแว็กซ์ ทำการบดต่อเนื่องอีก 5 นาที ก่อนเติมครั้งที่เหลือของสารดังกล่าว รวมถึงฟีนอลิกเรซิน บดต่อเนื่องอีก 5 นาที ก่อนทำการเติมซิงค์ออกไซด์ กรด สเตียริก ทีเอ็มคิว หกพีพีดี บดต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำยางออกจากเครื่องผสมเพื่อทำการผสมสารวัลคาไนซ์กับยางมาสเตอร์แบชที่ได้ โดยใช้เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นนำพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้ไปขึ้นรูปเข้าแบ้าพิมพ์ด้วยความร้อน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและความแข็ง เพื่อทบทวนและยืนยันสูตรที่ใช้จากงานวิจัยก่อนหน้า

ตารางที่ ง.1 สูตรสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA [37]

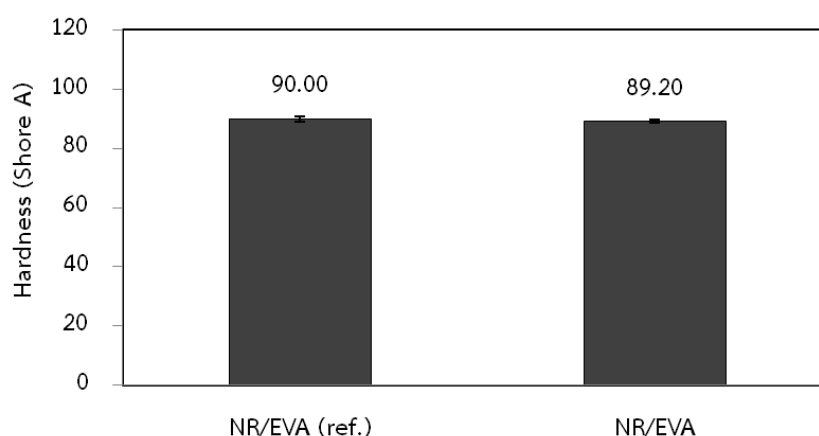
Ingredients	phr*
STR 5L	100
EVA-28	20
ZnO	5
Stearic acid	1
Silica Ultrasil VN3	60
TESPT	5.4
Carbon black N-330	60
Aromatic oil	17.2
Paraffin wax	5
Phenolic resin	10
TMQ	1
6PPD	1
DPG	1
CBS	1.5
Sulfur	2

*phr คือ Parts per hundred of rubber เป็นการใช้สารเคมีเทียบกับปริมาณยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก)

จากผลการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA พบว่า สามารถเตรียมการผสมโดยใช้สภาวะจากการศึกษาก่อนหน้าได้ และจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็ง (Shore A) กับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA จากการศึกษาท่อนำหน้า (NR/EVA (ref.)) ดังแสดงในรูปที่ ง.1 และ ง.2 ตามลำดับ



รูปที่ ง.1 เปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงของ NR/EVA ที่เตรียมได้กับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA จากการศึกษาท่อน้ำ



รูปที่ ง.2 เปรียบเทียบความแข็งของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ที่เตรียมได้กับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA จากการศึกษาท่อน้ำ

จากรูปที่ ง.1 พบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ที่เตรียมในได้นั้นมีค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ที่ได้จากการศึกษาท่อน้ำเล็กน้อย โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงประมาณ 10.74 MPa ในขณะที่พอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ที่เตรียมได้มีค่าประมาณ 13.50 MPa และเมื่อพิจารณาค่าความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ ง.2 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA ทั้งสองให้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 90 Shore A ทั้งนี้ การทดสอบดังกล่าวอาจมีผลมาจากการผู้ทำการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ที่ต่างกัน จึงส่งผลให้ค่าสมบัติที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น สามารถยืนยันการใช้งานของสูตรและสภาวะการผสมระแนงเทียมจากงานวิจัยท่อน้ำในการทำการศึกษาด้อยอดในเรื่องของการปรับปรุง

สมบัติและการลดต้นทุนได้ รวมทั้งสามารถนำสูตรพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง NR/EVA มาใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง RR/EVA ในลำดับต่อไปได้

ง.2 ผลการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติรีเคลมผสมกับอีวีเอ (RR/EVA)

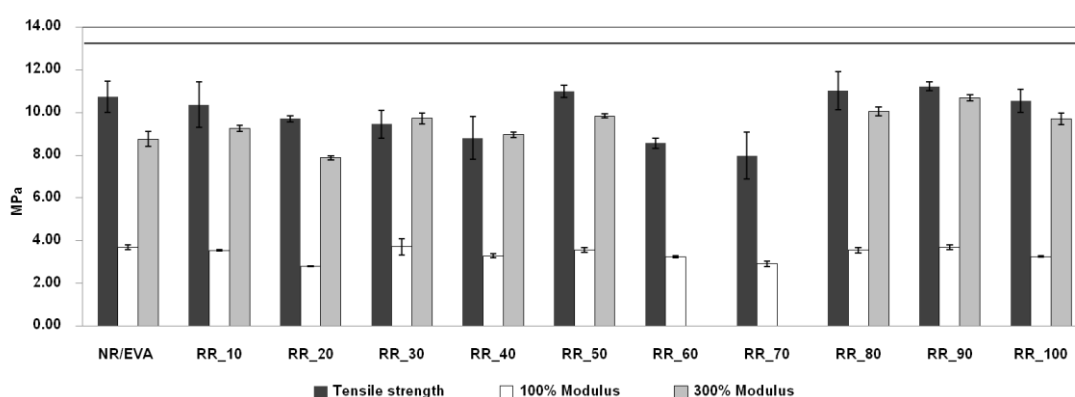
ง.2.1 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีเคลมเบลนด์กับอีวีเอ

ทำการผสมยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีเคลมเป็น 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 ที่กำหนดสัดส่วนการเบลนด์ระหว่างยางกับอีวีเอเท่ากับ 80/20 ซึ่งสูตรยางและสารเคมีที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.2 สูตรยางและสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีเคลมเบลนด์กับอีวีเอ

Ingredients	phr*
STR 5L/ RR	100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90, 0/100
EVA-28	20
ZnO	5
Stearic acid	1
Silica Ultrasil VN3	60
TESPT	5.4
Carbon black N-330	60
Aromatic oil	17.2
Paraffin wax	5
Phenolic resin	10
TMQ	1
6-PPD	1
DPG	1
CBS	1.5
Sulfur	2

จากผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีไซเคิลผสมกับอีวีเอ ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติรีไซเคิลตั้งแต่ 0-100 (RR_0-RR_100) โดยมีอัตราส่วนระหว่างยางกับอีวีเอ เท่ากับ 80/20 phr จากการศึกษาสมบัติเชิงกล ที่มีการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.2 โดยทำการศึกษาสมบัติที่สำคัญคือความต้านทานต่อแรง โมดูลัส และความแข็ง ได้ผลการทดลอง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนยางธรรมชาติรีไซเคิลที่ผสมกับค่าความแข็งแรงเชิงกล ดังรูป ที่ ง.3



รูปที่ ง.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนยางธรรมชาติรีไซเคิลที่ผสมกับค่าความแข็งแรงเชิงกล

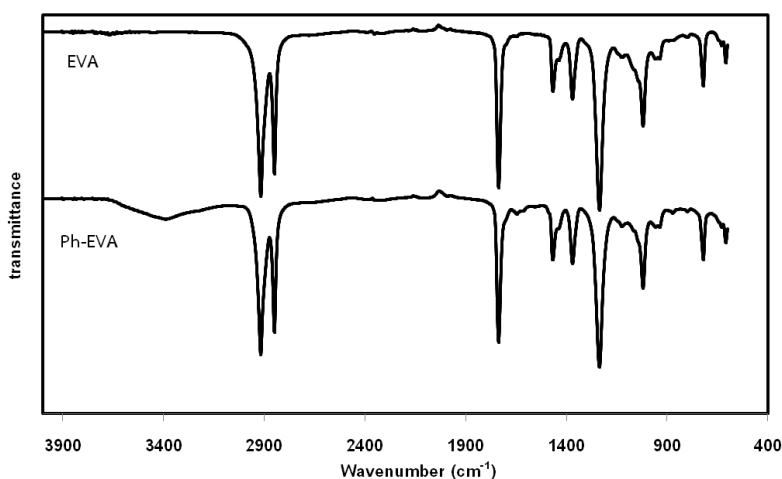
จากผลการทดสอบเชิงกลในรูปที่ ง.3 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญในทุก ๆ การแปรอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติรีไซเคิล ดังนั้นจึง พิจารณาให้การใช้อัตราส่วนของยางธรรมชาติรีไซเคิลที่มากที่สุด คือสูตร RR_100 เพื่อเป็นการลด ต้นทุนของพอลิเมอร์เบลนด์ได้มากที่สุดและเลือกสูตรดังกล่าวในการทำการศึกษารายต่อไป

ภาคผนวก จ.

ผลยืนยันการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน
(EVA modified with phenolic resin, Ph-EVA)

จ.1 การเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดอีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Phenolic compound modified EVA, Ph-EVA)

ขั้นตอนการเตรียมอีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน ใช้วิธีการบดผสมแบบหลอมในเครื่องบดผสมแบบปิด โดยในขั้นตอนแรกทำการผสมอีวีเอกับฟีนอลิกเรซินตามเทคนิคการเตรียมจากงานวิจัยก่อนหน้า [36] โดยใช้อุณหภูมิในการผสมเป็น $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 3 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงเติมสแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride, SnCl_2) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ประมาณ 0.8 phr และบดต่อเนื่องเป็นเวลา 4 นาที จากนั้นนำไปทำให้บริสุทธิ์โดยการสกัดด้วยอะซิโตนในกระบวนการสกัดแบบซ็อกซ์เลต (Soxhlet extraction) บันทึกค่าน้ำหนักก่อนและหลังการสกัด รวมถึงนำไปยืนยันโครงสร้างหลังการดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR ดังแสดงในรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 FT-IR spectrum ของสารเพิ่มความเข้าได้ ชนิดอีวีเอดัดแปรด้วยฟีนอลิกเรซิน (Ph-EVA)

โดยสามารถยืนยันการดัดแปลงโมเลกุลของอีวีเอด้วยฟีนอลิกเรซินด้วยเทคนิค FT-IR ดังแสดงในรูปที่ จ.1 โดยปรากฏพีคที่เพิ่มขึ้นของอีวีเอที่ในช่วง $3,578\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ฟีนอลหรือวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลของฟีนอลิกเรซิน และจากการคำนวณน้ำหนักที่ได้ก่อนและหลังการสกัด ได้ค่าปริมาณการดัดแปรโมเลกุลของอีวีเอด้วยฟีนอลิกเรซิน เท่ากับ 89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเตรียมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด Ph-EVA เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ในขั้นตอนการศึกษาชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ในลำดับถัดไป

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวอัจฉราวดี ชูเกต

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5910220084

1. วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2557

2. ทวนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทวนการวิจัยประเภทสิ่งประดิษฐ์ ปีงบประมาณ 2560 คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทวนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

3. ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

4. การตีพิมพ์และการเผยแพร่ผลงาน

- อัจฉราวดี ชูเกต วิสุทธิ แก้วสกุล และเอกวิญ กาลกรณ์สุรปราณี การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6 ภายใต้หัวข้อ “นวัตกรรมและเทคโนโลยีเพื่อคุณภาพชีวิตและสังคมที่ยั่งยืน” เมื่อวันที่ 24 พ.ย. 2561 ณ ห้องประชุมระพี สารีก อาคารเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร (Oral presentation) โดยได้รับรางวัลในการนำเสนอผลงานยอดเยี่ยมประเภทบรรยาย

- อนุสิทธิบัตร เลขที่คำขอ 1903001121