



การพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนโดยใช้เทคนิคการเบลนด์
Development of Natural Rubber and Thermoplastic Polyurethane Properties by
Blending Techniques

อัครพงษ์ ตุลย์จิตราภรณ์
Akarapong Tuljittaporn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
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

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(ดร.กานดา แซ่ลอยเลื่อน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายอัครพงษ์ ตุ้ยจิตราภรณ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอัครพงษ์ ตุลย์จิตราภรณ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนโดยใช้เทคนิคการเบลนด์
ผู้เขียน	นายอัครพงษ์ ตุ้ยจิตราภรณ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนายางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนโดยการเบลนด์ระหว่างวัสดุทั้ง 2 ชนิดเพื่อปรับปรุงสมรรถนะ ในกรณีการปรับปรุงสมรรถนะของยางธรรมชาติใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติส่งผลให้วัสดุที่พัฒนาขึ้นยังคงแปรรูปโดยใช้กระบวนการแปรรูปอย่างทั่วไปโดยมีสมบัติเด่นด้านทนทานต่อการสึกหรอ ในส่วนเทอร์โมพอลิยูรีเทนใช้ยางธรรมชาติปรับปรุงสมบัติส่งผลให้วัสดุที่พัฒนาขึ้นยังคงแปรรูปได้แบบเทอร์โมพลาสติกโดยมีสมบัติเด่นด้านแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นและการผิดรูปถาวรลดลง จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผสมที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ได้แก่การใช้อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที ความเร็วโรเตอร์ 90 รอบต่อนาที ซึ่งเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอให้แก่ยางธรรมชาติได้ และยางธรรมชาติสามารถเพิ่มสมบัติด้านแรงเสียดทานและลดการผิดรูปถาวรของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน 90:10 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ส่งผลให้วัสดุที่เตรียมได้มีสมบัติที่ดีขึ้นโดยสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เป็นวัสดุปรับปรุงการเข้ากันได้ จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุที่มีสมรรถนะโดดเด่นกว่าวัสดุที่ไม่ผ่านการปรับปรุง

คำสำคัญ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ วัสดุหมุนเวียน

Thesis Title	Development of Natural Rubber and Thermoplastic Polyurethane Properties by Blending Techniques
Author	Mr.Akarapong Tuljitrarn
Major Program	Polymer Science and technology
Academic Year	2021

ABSTRACT

The aim of this research is for developing natural rubber and thermoplastic polyurethane by blending technique of the materials to improve performance. In the case of improving the performance of natural rubber, thermoplastic polyurethane was used as the material to enhance the properties. From the result, the developed materials are still processed by conventional rubber methods, with outstanding properties of abrasion resistance. On the other hand, when the thermoplastic polyurethane was improved, natural rubber was used to improve the properties. The result is that the developed materials are still hold the thermoplastics properties which has outstanding properties of increased friction and reduced tension set. The Study have shown that optimal conditions for mixing natural rubber and thermoplastic polyurethane were temperature at 150 °C 15 minutes and speed rotor at 90 rpm. So, thermoplastic polyurethane can increase the abrasion resistance properties of natural rubber. While natural rubber can increase the friction and reduced tension set of thermoplastic polyurethane, at the ratio between natural rubber and thermoplastic polyurethane 90:10 and 10:90 %wt. It was also found that the used of compatibilizer provide better properties of prepared materials. According to the result, the optimal amount of compatibilizer was 5 per one hundred of rubber composition and used epoxidized natural rubber for compatibilizer. In conclusion, it can be concluded that the developed material has an outstanding performance over the unimproved material.

Key words: Thermoplastic elastomer, Thermoplastic natural rubber, Compatibilizer, Circular materials

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนและความกรุณาจากหลากหลายภาคส่วนไม่ว่าจะเป็นคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์และวิทยาลัยนานาชาติบางพาราไทย-จีน บริษัทนอร์เทอส์ริบบเบอร์ จำกัด(มหาชน) ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณในความกรุณาและให้ความช่วยเหลือจาก ร.ศ.ดร.เอกวิญ กาลกรณ์ สุรปราณี อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.กานดา แซ่ลยเลื่อน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ นอกจากนี้ยังส่งเสริมประสบการณ์และความรู้รอบด้านที่ผู้จัดทำไม่อาจหาได้จากที่อื่น ขอขอบคุณในการดูแลเอาใจใส่และให้คำปรึกษาแก่ผู้จัดทำเสมอมา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง ดร.ณัฐพันธ์ อุทัยพันธุ์ และดร.เยี่ยมพล นัครามนตรี ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ความกรุณาชี้แนะข้อบกพร่องและข้อผิดพลาดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงความกรุณาให้คำปรึกษาทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากบริษัทนอร์เทอส์ริบบเบอร์ จำกัด(มหาชน) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากร ในหลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาและความรู้ รวมถึงอำนวยความสะดวกทั้งเรื่องเอกสารสำคัญ อุปกรณ์และเครื่องมือ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว ญาติมิตร ครูอาจารย์ เพื่อน และผู้มีพระคุณทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาและกำลังใจเสมอมา รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษา หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ

อัครพงษ์ ตุ้ยจิตราภรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	4
2.1.1 โครงสร้างและลักษณะทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	5
2.1.2 ประเภทของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	6
2.2 พอลิเมอร์เบลนด์	9
2.2.1 ประเภทความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์	9
2.2.2 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	10
2.3 การพัฒนาโดยใช้เทคนิคเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	13
2.4 การใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	15
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	19
3.1 สารเคมี	19
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ	22
3.3 วิธีการทดลอง	31
3.3.1 การศึกษาสภาวะการผสมที่เหมาะสมกับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	31
3.3.2 การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป	32
3.3.2.1 ยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ	32
3.3.2.2 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	33
3.3.3 การศึกษาชนิดและปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	33
3.3.4.1 การทดสอบเวลาครีปของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ	33
3.3.4.2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์	34
3.3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลและกายภาพ	34
3.3.4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา	37
3.3.5 การศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ	37
3.3.6 การเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลทดลอง	38
4.1 ผลของการศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	38
4.2 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป	42
4.2.1 ผลของการแปรสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการวัลคาไนซ์	42
4.2.2 ผลของการแปรสัดส่วนของยางธรรมชาติที่ส่งผลต่อดัชนีการหลอมไหล	43
4.3 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	45
4.3.1 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ	45
4.3.2 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	51
4.4 ผลของการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	58
4.4.1 ผลของการศึกษาปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	58
4.4.2 ผลของการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	63
4.5 ผลของการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ	73
4.5.1 ผลของการศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.2 ผลของการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์	75
4.6 ผลของการเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โม พลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ	78
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	81
5.1 การศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	81
5.2 การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป	81
5.3 การศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์	81
5.4 การศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	81
5.5 การศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ	82
5.6 การเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ	82
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	
- ภาคผนวก ก	85
ประวัติผู้เขียน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	สภาวะการผสมที่มีการแปร อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์	31
3.2	สูตรการเตรียมยางคอมพาวด์ในยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ	32
4.1	สภาวะการผสมที่มีการแปรอุณหภูมิ	38
4.2	สภาวะการผสมที่มีการแปรเวลา	38
4.3	สภาวะการผสมที่มีการแปรความเร็วโรเตอร์	39
4.4	ลักษณะทางการภาพของวัสดุผสมที่มีการแปรสภาวะการผสม	39
4.5	ระยะเวลาในการคงรูปร่าง (t_{c90}) ของยางธรรมชาติที่สัดส่วนการผสมเทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทนต่างกัน	43
4.6	ดัชนีการหลอมไหลของยางธรรมชาติ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางแต่ละชนิด	44
4.7	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรแปร ปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	45
4.8	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากการผสมยางธรรมชาติ กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและมีการแปรปริมาณของยางธรรมชาติ	51
4.9	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรสัดส่วนวัสดุ ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	59
4.10	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่แปรสัดส่วนวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	61
4.11	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรชนิดของวัสดุ ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	64
4.12	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่แปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความ เข้ากันได้	68
4.13	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่าน การแปรรูปซ้ำต่างกัน	73
4.14	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ	75
4.15	สมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนใน การปรับปรุงสมบัติ	78

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
2.1	เปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบยางกับแบบเทอร์โมพลาสติก	4
2.2	ลักษณะการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยางด้วยปฏิกิริยาวัลคาไนซ์	5
2.3	แบบจำลองลักษณะพื้นฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แบบเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) และเฟสร่วมกัน (Co-continuous phase) ในการผสมพอลิเมอร์	7
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของยางเทอร์โมพลาสติกแบบบล็อกโคพอลิเมอร์	9
2.5	แบบจำลองการใช้บล็อกหรือกราฟโคพอลิเมอร์ในการเพิ่มความเข้ากันได้	11
2.6	แบบจำลองการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีความเป็นขั้วในระบบการผสม	12
2.7	แบบจำลองการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่หมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา	12
2.8	ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาของ PhHRJ-PE กับ ยางธรรมชาติ	16
2.9	ปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันระหว่างยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลกับ PBAT	18
3.1	โครงสร้างของยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR)	19
3.2	โครงสร้างของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxide natural rubber; ENR)	20
3.3	โครงสร้างของยางไนไตรล์ (Nitrile or Acrylonitrile-butadiene rubber; NBR)	20
3.4	โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethanes; TPU)	21
3.5	เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)	22
3.6	เครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer)	23
3.7	เครื่องรีโอมิเตอร์แบบเคลื่อนที่ (Moving die rheometer; MDR)	24
3.8	เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow tester)	25
3.9	เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression machine)	26
3.10	แม่พิมพ์ (Mold)	26
3.11	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal testing machine)	27
3.12	เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester)	28
3.13	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber	29
3.14	เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid resistance tester)	29
3.15	เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific tester)	30
3.16	เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM)	31
3.17	ตัวอย่างทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	34

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ค่าทอร์กระหว่างการผสมในเครื่องบดผสมแบบปิด โดยใช้สภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วโรเตอร์ 90 rpm และเวลาในการผสม 15 นาที	40
4.2 ระยะเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่สกัดส่วนการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน ต่างกัน	42
4.3 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	46
4.4 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	46
4.5 แบบจำลองลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในยางธรรมชาติที่สกัดส่วนต่างกัน	47
4.6 ลักษณะสัญญาณวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สกัดส่วน (a) 95:05, (b) 90:10 และ (c) 80:20	48
4.7 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	49
4.8 ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	49
4.9 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	52
4.10 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	52
4.11 แบบจำลองลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคยางธรรมชาติในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สกัดส่วนต่างกัน	53
4.12 ลักษณะสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สกัดส่วน (a) 05:95, (b) 10:90 และ (c) 20:80	54
4.13 สมบัติการผิดรูปถาวรและค่าความต้านทานต่อการลื่นไถลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	55

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ความถ่วงจำเพาะของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แปรปริมาณของ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	55
4.15 ขั้นตอนการแยกเมล็ดข้าวออกจากเปลือกโดยใช้ยางกะเทาะเปลือกข้าว	56
4.16 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็น วัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	59
4.17 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	60
4.18 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มี การแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	61
4.19 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	62
4.20 แบบจำลองลักษณะการทำหน้าที่ของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	63
4.21 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุ ปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	65
4.22 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	65
4.23 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ ที่แปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	66
4.24 ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการ แปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	66
4.25 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มี การแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	69
4.26 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	69
4.27 ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยาง ไนไตรล์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน	70
4.28 สมบัติการผิวดูรูปถาวรและความต้านทานต่อการสั่นไถลของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	71

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ความถ่วงจำเพาะของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้	71
4.30 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำต่างกัน	74
4.31 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำต่างกัน	74
4.32 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ	76
4.33 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ	76
4.34 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ	79
4.35 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ	79
4.36 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

เศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy) เป็นโมเดลเศรษฐกิจใหม่ในการขับเคลื่อนการเติบโตของเศรษฐกิจและการพัฒนาสังคมของประเทศที่นำหลักการและลำดับความสำคัญจากยุทธศาสตร์ชาติและวิสัยทัศน์ “Thailand 4.0” เป็นตัวตั้งผสมผสานกับ “หลักคิดของเศรษฐกิจพอเพียง” (Sufficiency Economy Philosophy; SEP) และ “เป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน” (Sustainable Development Goals; SDGs) ในการพัฒนา 3 เศรษฐกิจ คือ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) ไปพร้อมกัน เพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างเป็นรูปธรรม โดยการผนึกพลัง ภาครัฐ เอกชน ชุมชน สังคม มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัย และเครือข่ายต่างประเทศ ด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม (Science, Technology & Innovation; STI) เศรษฐกิจหมุนเวียนจะเน้นส่งเสริมระบบเศรษฐกิจที่มีการวางแผนให้ทรัพยากรในระบบการผลิตทั้งหมดสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อรับมือกับปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรในอนาคต จากมีความต้องการใช้ทรัพยากรเพื่อการผลิตเพิ่มมากขึ้นจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและความต้องการสินค้าและบริการของผู้บริโภค ดังนั้น เศรษฐกิจหมุนเวียน จึงมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรใหม่ (Virgin material) ให้น้อยที่สุด การคงคุณค่าผลิตภัณฑ์ให้นานที่สุด การเปลี่ยนรูปแบบ การใช้งานผ่านโมเดลธุรกิจใหม่ การสร้างของเสียในปริมาณที่ต่ำที่สุดและให้ความสำคัญกับการจัดการของเสียจากการผลิตและบริโภค ด้วยการนำวัตถุดิบที่ผ่านการผลิตและบริโภคแล้วเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ (Secondary raw material) เช่น การเปลี่ยนของเหลือทิ้งให้เป็นสารที่มีมูลค่าเพิ่มขึ้น การใช้นวัตกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกำจัดขยะต้นทาง กลางทางและปลายทาง การส่งเสริมอุตสาหกรรมรีไซเคิลวัสดุที่สำคัญ การส่งเสริมการออกแบบผลิตภัณฑ์และรูปแบบธุรกิจที่เอื้อต่อระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน เป็นต้น [1] โดยปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีการนำเอาเทอร์โมพลาสติกเหลือทิ้งมารีไซเคิลใหม่ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ฯลฯ เพื่อเป็นการหมุนเวียนและสร้างมูลค่าเพิ่มจากขยะพลาสติกและอีกหนึ่งวิธีที่นำเอาของเหลือทิ้งมาสร้างมูลค่าเพิ่ม คือ การนำเอาวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มาผสมกับยาง กลายเป็นวัสดุผสมเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมปัจจุบัน

ยางเทอร์โมพลาสติก หรือ TPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถขึ้นรูปได้เหมือนพลาสติก แต่มีสมบัติที่ยืดหยุ่นคล้ายยาง โดยยางเทอร์โมพลาสติกจะมีสมบัติคล้ายยางที่อุณหภูมิใช้งานแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวและไหลได้เหมือนพลาสติก จึงสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด (Injection molding machine) เครื่องเป่า (Blow molding machine) เครื่องอัดรีด (Extruder) หลังการขึ้นรูปเมื่อเย็นตัวลง ยางเทอร์โมพลาสติกก็จะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวที่ไหลได้ไปเป็นของแข็งที่มีสมบัติคล้ายยางและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [2]

งานวิจัยนี้จึงสนใจปรับปรุงสมรรถนะของยางธรรมชาติโดยเลือกใช้เทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (Thermoplastic polyurethane; TPU) เป็นองค์ประกอบหลักในการเบลนด์ โดยทำการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน โดยเป้าหมายหลักคือการพัฒนายางธรรมชาติให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น ได้แก่ ในยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ มุ่งเน้นเรื่องความต้านทานต่อการขูดถูและในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มุ่งเน้นเรื่องการปรับปรุงการผิดรูปถาวร ความต้านทานต่อการลื่นไถลและยังมีจุดเด่นในการแปรรูปที่สามารถนำเศษที่เหลือมาขึ้นรูปซ้ำได้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนยางกะเทาะเปลือกข้าวและยางขัดข้าว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูปของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เหมาะสม

1.2.2 เพื่อศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

1.2.3 เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ และยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

1.2.4 เพื่อประยุกต์วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

1.2.5 เพื่อเพิ่มมูลค่าและขยายขอบเขตการใช้งานยางธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาสภาวะการผสมที่เหมาะสมกับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดยการใช้เทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) ด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกับการผสม ได้แก่ อุณหภูมิในการผสม ความเร็วรอบโรเตอร์ เวลาที่ใช้ในการผสม

1.3.2 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป โดยแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ 1) ยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติมีการแปรสัดส่วนระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกที่

95:05 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนัก และ 2) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีการแปรสัดส่วนระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกที่ 05:95 10:90 และ 20:80 ส่วนโดยน้ำหนัก

1.3.3 ศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดย 1) ยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ เพื่อให้เกิดคุณสมบัติเด่นด้านทนทานต่อการสึกหรอ และ 2) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เพื่อให้เกิดคุณสมบัติเด่นด้านความต้านทานต่อการลื่นไถลที่ดี และไม่เกิดการผิรุปลถาร

1.3.4 ศึกษาชนิดและสัดส่วนของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้แก่ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีอีพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล และยางไนไตรล์ ที่ปริมาณ 0, 3, 5 และ 7 ส่วนในร้อยละเมื่อเทียบกับยาง

1.3.5 ทดสอบคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ได้แก่ สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ (Compatibilization) สมบัติต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid resistance) โดยเปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ กับผลิตภัณฑ์จำพวกยางขัดข้าว และยางกะเทาะเปลือกข้าว เพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนทำให้เกิดวัสดุที่สามารถใช้หมุนเวียนได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสูตรและกระบวนการที่เหมาะสมในการเตรียมยางเทอร์โมพลาสติกระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

1.4.2 ทราบสัดส่วนที่สามารถปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ ทั้งในรูปแบบยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มุ่งเน้นการเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อการขัดถูที่ดีขึ้น และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มุ่งเน้นปรับปรุงการผิรุปลถาร และความต้านทานต่อการลื่นไถล

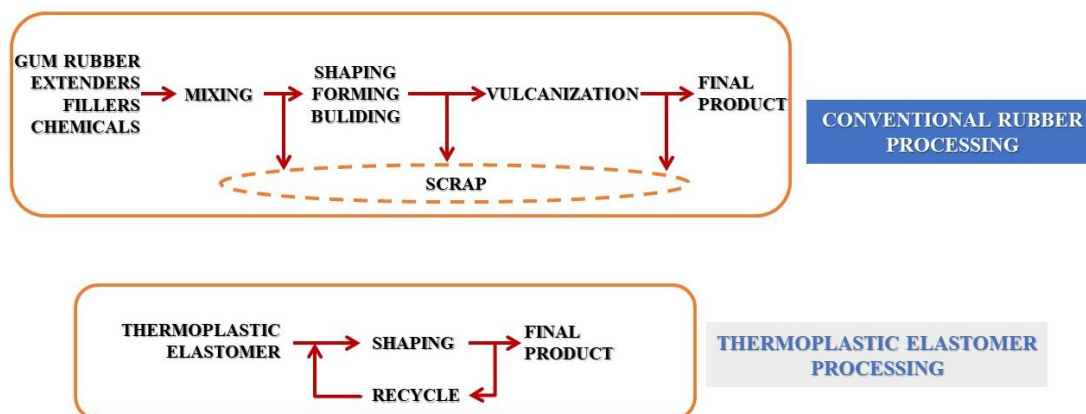
1.4.3 ส่งเสริมให้เกิดแนวทางการใช้วัสดุที่สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อสอดคล้องกับนโยบาย เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

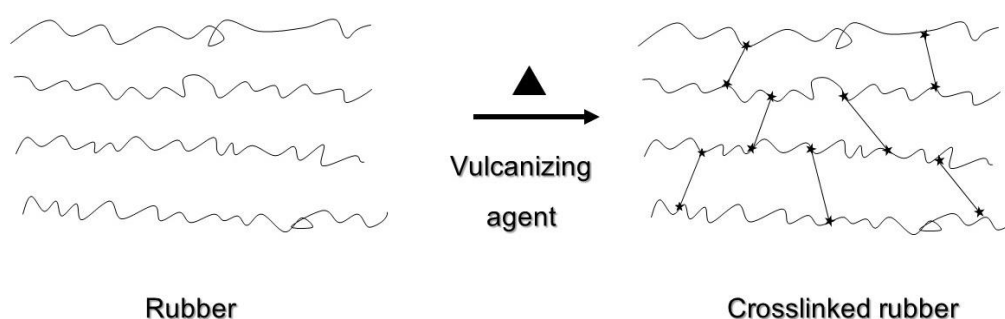
เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์หรือยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomer; TPE) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกและอีลาสโตเมอร์รวมไว้ด้วยกัน โดยโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะประกอบด้วยโคพอลิเมอร์หรือส่วนประกอบทางฟิสิกส์ของพอลิเมอร์ (โดยปกติคือพลาสติกและยาง) โดยเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะมีคุณสมบัติอีลาสโตเมอร์คล้ายกับยางเทอร์โมเซต (Thermoset rubber) ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น รับแรงกระแทกได้ดี แต่ในขณะที่เดียวกันเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ยังมีคุณสมบัติคล้ายกับเทอร์โมพลาสติก คือสามารถหลอมได้เมื่อโดนความร้อน และเมื่อเย็นตัวลงจะกลับมาแข็งตัวได้ ซึ่งทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถแปรรูปได้ด้วยการใช้ความร้อนเหมือนเทอร์โมพลาสติก เช่น กระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) กระบวนการอัดรีด (Extrusion) เป็นต้น [3] คุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ทำให้วัสดุนี้มีจุดเด่นที่สามารถแก้ไขข้อด้อยของวัสดุพอลิเมอร์อื่นได้ เช่น จากเดิมวัสดุยางเทอร์โมเซตต้องใช้เวลาในการแปรรูปแต่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถแปรรูปได้ง่ายและสะดวกเหมือนเทอร์โมพลาสติกดังรูปที่ 2.1 และข้อเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่นเหมือนยางสามารถแก้ไขข้อด้อยของวัสดุเทอร์โมพลาสติกส่วนใหญ่ที่มีความเปราะแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก ทำให้วัสดุสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้นและมีศักยภาพในการผลิตที่ดีกว่าการขึ้นรูปยางทั่วไป



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบยางกับแบบเทอร์โมพลาสติก

2.1.1 โครงสร้างและลักษณะทางเคมีของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ยางจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ที่มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่น (Elastic properties) ทำให้ยางถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายในชีวิตประจำวัน เช่น พื้นรองเท้า ยางล้อรถ ลูกบอล ยางรัดของ เป็นต้น ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีขั้นตอนการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งานของยาง เช่น สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent) สารตัวเร่ง (Accelerator) สารกระตุ้น (Activator) สารตัวเติม (Filler) สารป้องกันการเสื่อม (Protective agent) เป็นต้น โดยทั่วไปในกระบวนการขึ้นรูปยางจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างยางกับสารทำให้ยางคงรูป เรียกว่า ปฏิกิริยาควคาไนซ์ (Vulcanization) หรือปฏิกิริยาคงรูปที่ทำให้ยางเกิดพันธะเชื่อมขวางกันระหว่างโมเลกุลของยาง (Crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของยางด้วยปฏิกิริยาควคาไนซ์

ซึ่งเมื่อยางเกิดการเชื่อมโยงขึ้นในโครงสร้างแล้วจะทำให้ยางกลายเป็นเทอร์โมเซต ยางวัลคาไนซ์จึงไม่สามารถหลอมหรือไหลได้อีกเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงเฉือน ส่งผลให้ไม่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก

โดยทั่วไปโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่อ่อน (Soft segment) และส่วนที่แข็ง (Hard segment) อยู่ในโครงสร้าง โดยที่

- ส่วนประกอบที่อ่อน (Soft segment) จะมียืดหยุ่นได้ มีความยืดหยุ่นได้ และมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ต่ำ
- ส่วนประกอบที่แข็ง (Hard segment) จะมีความแข็งไม่ยืดหยุ่นเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรง สามารถเกิดผลึกได้

โดยในการใช้งานส่วนที่เป็น Hard segment จะทำหน้าที่คล้ายกับ Crosslink ยึดเหนี่ยวส่วนที่เป็น Soft segment ไว้ด้วยกัน ทำให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงคุณสมบัติความเป็นอิลาสติก และส่วนประกอบทั้ง 2 ส่วนนี้อาจเกิดขึ้นในโมเลกุลเดียวกันหรือแยกเป็นโมเลกุลเดี่ยวก็ได้ จึงอาจ

นิยามได้ว่าสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะขึ้นกับพฤติกรรมด้านสัณฐานวิทยา (Morphology) มากกว่าองค์ประกอบทางเคมี [4] และในทางเดียวกับความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง 2 ส่วนด้วย ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมขวางทางกายภาพ หรือการเชื่อมขวางทางเคมีขึ้นอยู่กับลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุที่นำมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

พันธะและแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง 2 ส่วนของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ สามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายรูปแบบ โดยรูปแบบที่สำคัญได้แก่ [5]

1. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ (Ionic)
2. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force)
3. เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ที่มีความไม่เสถียรเมื่ออุณหภูมิสูง และมีความสามารถเกิดพันธะขึ้นใหม่ได้เมื่ออุณหภูมิต่ำ
4. แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นผลึก

2.1.2 ประเภทของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

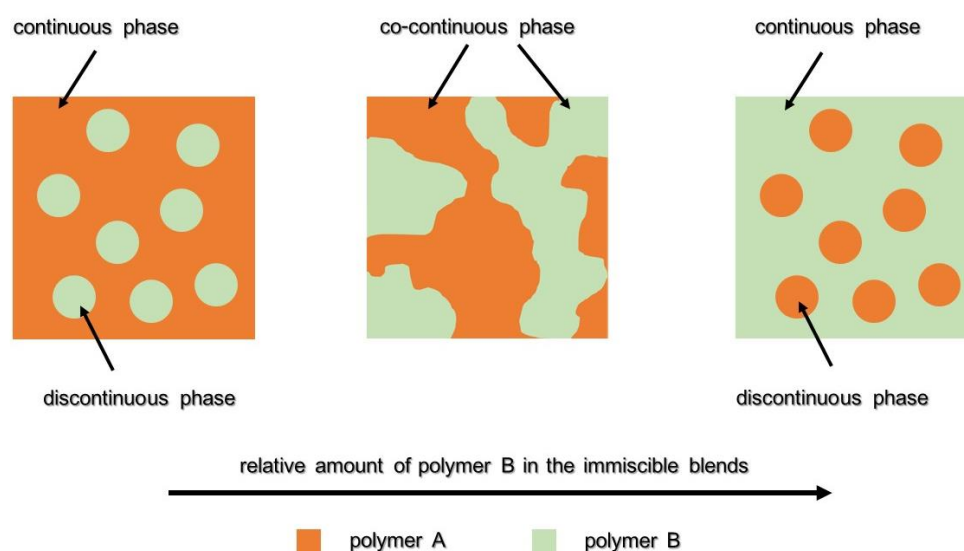
การแบ่งประเภทของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งได้หลากหลายรูปแบบ เช่น แบ่งตามลักษณะโครงสร้างของเฟส เทคนิคในการสังเคราะห์ และสัณฐานวิทยา เป็นต้น [6] แต่การแบ่งประเภทที่มีความเข้าใจง่ายสามารถแบ่งได้ตามลักษณะและส่วนประกอบของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่มคือ [4]

1. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic-elastomer blends)
2. บล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่อ่อนและแข็งในโครงสร้าง (Block or segmented copolymer)
3. อีลาสโตเมอร์ที่มีความสามารถเกิด Crosslink ที่ไม่เสถียรต่ออุณหภูมิสูง (Elastomers with thermally reversible labile crosslink)

ซึ่ง 3 กลุ่มที่กล่าวมาข้างต้นนี้เทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากการผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic-elastomer blends) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากสามารถเตรียมได้ง่าย และมีราคาต้นทุนในการผลิตที่ถูกลงอีกด้วย

2.1.2.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic-elastomer blends)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้เตรียมได้จากการนำเอาพอลิเมอร์ 2 ชนิดมาทำการผสมกัน โดยที่พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก และอีกชนิดหนึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ แต่เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้ส่วนใหญ่เกิดความไม่เข้ากันระดับโมเลกุล (Immiscible) และเกิดการแยกเฟสกันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด และเนื่องจากการแยกเฟสกันส่งผลให้วัสดุที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีนัก เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง 2 โมเลกุลไม่แข็งแรง ในการเลือกวัสดุที่จะนำมาผสมนั้นควรมีความเป็นไปได้ตามหลักของการเบลนด์พอลิเมอร์ (Polymer blends) เช่น โครงสร้างทางเคมี (Chemical structure) สภาพขั้วของโมเลกุล (Polarity of molecules) เป็นต้น นอกจากนี้ลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ก็เป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้มีสมบัติที่ดีขึ้น โดยที่ส่วนที่อ่อน (เฟสอีลาสโตเมอร์) ควรกระจายตัวและมีขนาดเล็กในส่วนที่แข็ง (เฟสพลาสติก) ซึ่งอาจจะเกิดเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือเฟสร่วมกัน (Co-continuous phase) ได้ [7] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แบบเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) และเฟสร่วมกัน (Co-continuous phase) ในการผสมพอลิเมอร์

นอกจากนี้ในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดที่ไม่เข้ากันระดับโมเลกุล (Immiscible) ยังมีแนวทางในการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นที่สามารถทำได้ คือ

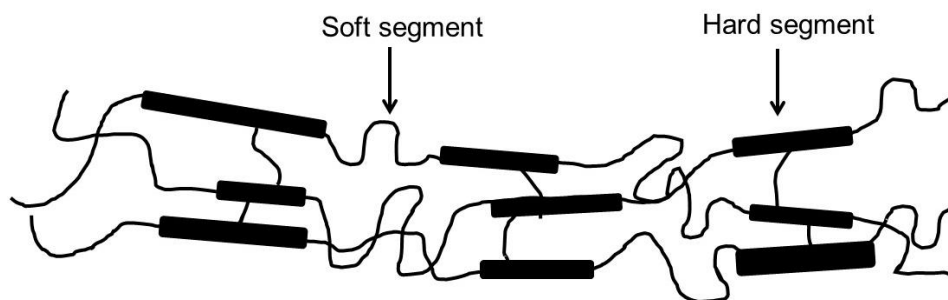
1. การเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ลงไปในระบบผสมในปริมาณเล็กน้อย สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่ช่วยลดแรงตึงผิว (Interfacial tension) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ส่งผลให้เฟสกระจาย (Dispersed phase) มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงและกระจายตัวได้ดีขึ้น และ

ช่วยลดการรวมตัวกันของเฟสกระจายอีกด้วย ทำให้วัสดุผสมมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสกระจายและเฟสต่อเนื่องมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

2. การใช้เทคนิคการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน จากเดิมในการผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์จะใช้เทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (Melt blending) โดยไม่มีการเติมสารคงรูปลงไปในเฟสของอีลาสโตเมอร์ เรียกกระบวนการผสมนี้ว่า การผสมแบบปกติ (Simple blends) ต่างจากเทคนิคการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน จะมีการเติมสารคงรูปลงไปในเฟสของอีลาสโตเมอร์ และใช้ความร้อนร่วมกับแรงเฉือนในกระบวนการผสมทำให้เฟสของอีลาสโตเมอร์เกิดการเชื่อมโยง และตัดย่อยเฟสยาวให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงเกิดเป็นเฟสกระจายในเฟสต่อเนื่องของเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีผลทำให้มีความยืดหยุ่นและรับแรงกระแทกได้ดีมากยิ่งขึ้น วัสดุที่ใช้เทคนิคการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน จะจัดอยู่ในประเภท Thermoplastic vulcanizate (TPV) หรือ Elastomeric alloy (EA) [4,5]

2.1.2.2 บล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนอ่อนและแข็งในโครงสร้าง (Block or segmented copolymers)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบของส่วนแข็ง และส่วนนิ่มอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลเดียวกันซึ่งมีลักษณะเป็นโคพอลิเมอร์แบบแบ่งส่วน ดังรูปที่ 2.4 โดยทั้งสองส่วนประกอบนี้ทำหน้าที่ต่างกันออกไป ส่วนที่เป็นส่วนแข็งจะมีหน้าที่เป็นเมทริกหลักซึ่งมักจะเกิดการรวมกลุ่มกันและเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงในช่วงอุณหภูมิต่ำ เช่น การจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกหรือการเกิดพันธะโคเวเลนต์ เมื่อได้รับความร้อนหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดการขยับของสายโซ่โมเลกุลส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวลดต่ำลง ส่วนที่เป็นส่วนแข็งนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ (เกิดการไหล) และกระบวนการนี้จะเกิดการแปรผันกลับ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง และส่วนที่เป็นส่วนนิ่มนั้นทำหน้าที่ทำให้โคพอลิเมอร์มีความเป็นอีลาสติก ซึ่งนอกจากโครงสร้างแบบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่เป็น 2 ส่วนแล้ว ยังมีพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสามบล็อกหรือมากกว่านั้นในหนึ่งโมเลกุล (Triblock or Multiblock copolymer) ที่มีความสามารถเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ โดยมีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะ Hard-Soft-Hard อีกด้วย ยกตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกันนี้ คือ Styrene-Butadiene-Styrene triblock copolymer (SBS), Thermoplastic polyurethane (TPU) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของยางเทอร์โมพลาสติกแบบบล็อกโคพอลิเมอร์

2.1.2.3 อีลาสโตเมอร์ที่มีความสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงที่ไม่เสถียรต่ออุณหภูมิสูง

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้จะเกิดการเชื่อมโยงของพันธะทางเคมีที่ไม่เสถียรต่ออุณหภูมิที่สูง ซึ่งเมื่อความร้อนสูงขึ้นพันธะเชื่อมโยงจะสลายออก และสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ประเภทนี้พบได้ไม่มากนัก โดยมีการศึกษาลักษณะการเกิดพันธะชนิดนี้เริ่มแรกจากยางพอลิยูรีเทน [4]

2.2 พอลิเมอร์เบลนด์

พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) คือ การนำเอาพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่ามาทำการผสมกันทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ผสมซึ่งอาจจะเกิดเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible) หรือเนื้อผสม (Immiscible) ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ โดยเป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถนำเอาคุณสมบัติเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาใช้งานได้กว้างยิ่งขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ใหม่ซึ่งจะมีความซับซ้อนและมีต้นทุนที่สูงกว่า พอลิเมอร์เบลนด์ยังมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พอลิเมอร์อัลลอยด์ (Polymer alloys) ซึ่งในปัจจุบันพอลิเมอร์ที่จัดจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ประมาณ 40% ของปริมาณทั้งหมด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการเบลนด์นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก [8,9]

2.2.1 ประเภทความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์จะสังเกตได้จากลักษณะทางสัญญาณวิทยา โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

2.2.1.1 การเบลนด์ที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์

พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้นมีความเข้ากันในระดับโมเลกุลและเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นซึ่งจะได้คุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมทั้งหมด แต่คุณสมบัติเด่นขึ้นอยู่กับสัดส่วนในการเบลนด์ ความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์นี้จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่สูง โดยอาจจะเกิดเป็น พันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรือการเกิดเป็นผลึก เป็นต้น และความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์นี้ยังส่งผลทำให้มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) เพียงค่าเดียว ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีความเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลท (PBAT) เป็นต้น

2.2.1.2 การเบลนด์ที่เข้ากันได้บางส่วน

เกิดจากการเลือกคู่พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันมีความแตกต่างกันทางโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพแต่ยังมีบางส่วนที่สามารถเข้ากันได้ เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจน หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-Dipole interaction) เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเกิดการแยกเฟสกัน โดยที่พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากกว่าจะเป็นเฟสต่อเนื่องหรือเฟสหลัก (Continuous matrix phase) และพอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยกว่าจะเป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) โดยคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวและขนาดอนุภาค ถ้าเกิดการกระจายตัวที่ดีและมีขนาดอนุภาคที่เล็กจะส่งผลทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ดีทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ดีตามไปด้วย

2.2.1.3 การเบลนด์เข้ากันไม่ได้

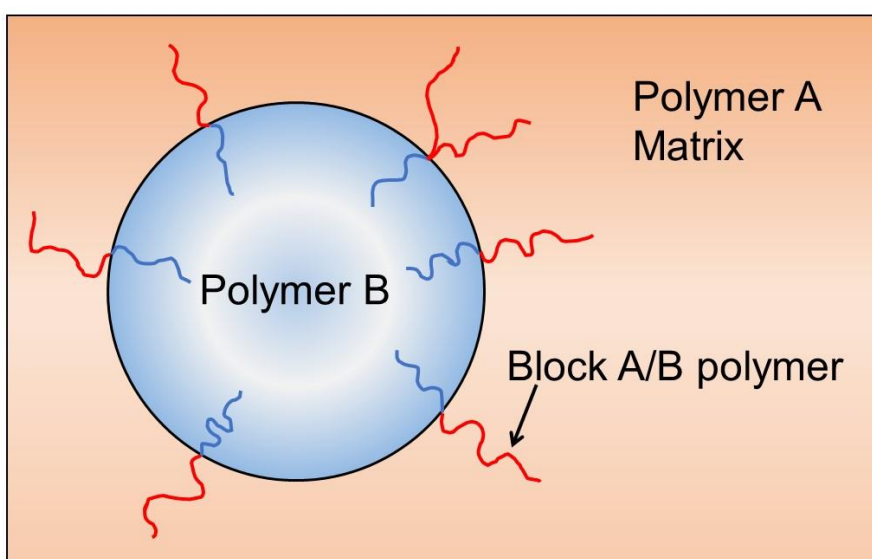
เกิดจากการเลือกคู่พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันมีความแตกต่างกันทางโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพมากเกินไป ทำให้เกิดการแยกเฟสและรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้พอลิเมอร์เบลนด์กลุ่มนี้มีสมบัติที่ไม่ดี เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ต่ำ

2.2.2 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

ในกรณีของพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเข้ากันได้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นได้โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในระบบการผสม โดยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่เข้ากัน ส่วนใหญ่แล้วสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะเป็นพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ [10]

2.2.2.1 บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์

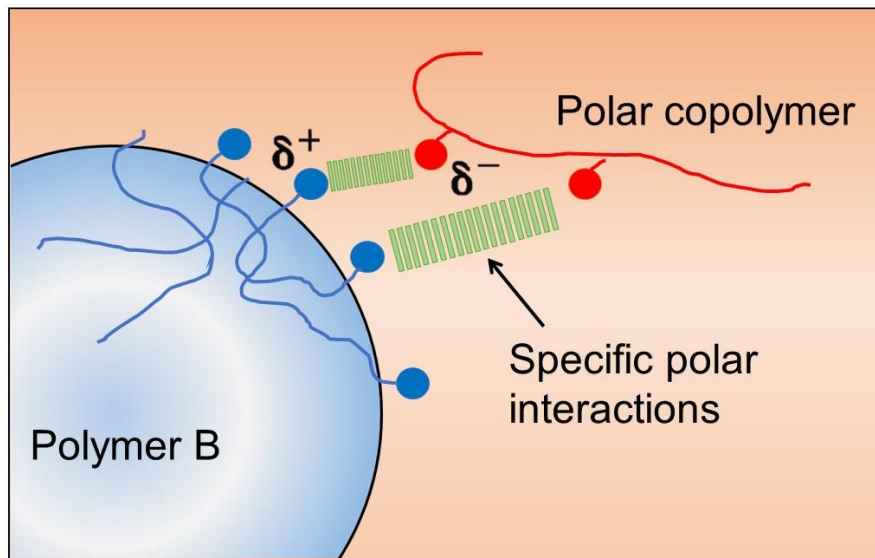
บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์จะมีหน้าที่ช่วยลดแรงตึงผิวของระบบการผสม โดยโครงสร้างของบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์จะมีส่วนประกอบที่มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ดังรูปที่ 2.5 ที่แสดงให้เห็นว่าบล็อกโคพอลิเมอร์ที่เป็นเส้น สีแดงจะเป็นส่วนที่สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ A ที่เป็นเฟสหลัก และสีน้ำเงินจะเป็นส่วนที่สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ B ที่เป็นเฟสกระจายได้ ทำให้สามารถลดแรงตึงผิวระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดได้ และส่งผลให้พอลิเมอร์ B มีการกระจายตัวและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการใช้บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ในการเพิ่มความเข้ากันได้

2.2.2.2 พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วแต่ไม่ไวต่อเกิดการเกิดปฏิกิริยา

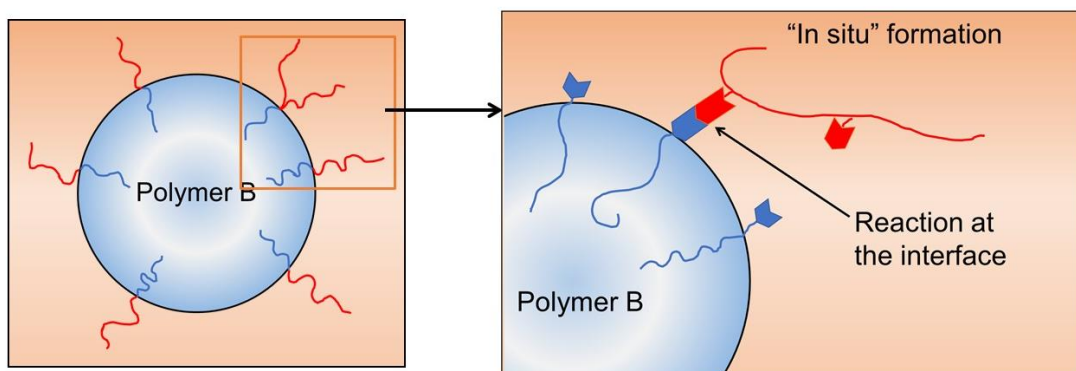
เป็นการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ส่วนใหญ่มักถูกใช้ในการผสมระหว่างพอลิเมอร์ที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ซึ่งเมื่อเติมเข้าไปในระบบการผสมแล้วจะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ เช่น การเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-Dipole interaction) อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ดียิ่งขึ้น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีความเป็นขั้วในระบบการผสม

2.2.2.3 พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดนี้จะเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยจะอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เป็นเฟสหลักหรือเฟสต่อเนื่อง และจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของเฟสกระจายได้ เป็นดังรูปที่ 2.7 โดยหมู่ว่องไวที่นิยมใช้ ได้แก่ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) และไกลซิديل เมทาคริเลต (glycidyl methacrylate) เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

2.3 การพัฒนาโดยใช้เทคนิคเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแล้วว่าวิธีที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ คือการผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic-elastomer blends) ทำให้ในปัจจุบันมีการวิจัยมากมายที่ใช้เทคนิคนี้ ยางธรรมชาติเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่มีความเป็นไปได้สูงที่จะนำมาใช้เป็นส่วนนิ่ม (Soft segment) ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความยืดหยุ่นสูง สามารถรับแรงกระแทกได้ดี งานวิจัยจำนวนมาก รายงานตรงกันว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้ยางธรรมชาติเป็นเฟสนิ่ม ตัวอย่างเช่น PP/NR/LLDPE [11], NR/PLA [12] และ NR/PVDF [13] มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และจากงานวิจัยของ S.Pichaiyut และคณะ(2012)[14] ได้ศึกษายางเทอร์โมพลาสติก จากการนำเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (TPU) มาผสมกับยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิคการผสมแบบปกติและทำการศึกษาอิทธิพลของยางสองชนิดคือ ยางธรรมชาติ (NR) กับ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) ซึ่งจุดมุ่งหมายหลักของการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติ ความต้านทานต่อความร้อน การรับแรงและการกระจายแรงกระทำจากภายนอกโดยการทดลองมีการใช้สัดส่วนระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทนอยู่ที่ 30/70 และ 40/60 โดยน้ำหนัก ผลจากการศึกษาพบว่า ยางเทอร์โมพลาสติกจากการผสม ENR/TPU มีแรงบิดในการผสม โมดูลัสของยัง ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการสลายตัวด้วยความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางเทอร์โมพลาสติกจาก NR/TPU แต่ในทางกลับกันยางเทอร์โมพลาสติก NR/TPU มีสมบัติสมบัติการดูดซับแรงและกระจายแรง ความสามารถในการยืดขาดและสมบัติความต้านทานต่อการผิรุปรูปร่าง ดีกว่ายางเทอร์โมพลาสติก ENR/TPU

E.Kalkornsurapranee และคณะ(2012)[15] ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic natural rubber, TPNR) จากเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน โดยได้ศึกษาอิทธิพลของยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลต่อสมบัติของ TPNR ที่เตรียมได้ โดยทำการศึกษาในยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุล 3 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติมาเลอิก (Malleated natural rubber, MNR) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) และยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (NR-*g*-PMMA) โดยใช้เทคนิคการผสมในสภาวะหลอม (Melt blending) ในเครื่องผสมแบบปิด ที่สัดส่วนระหว่างยางกับ TPU เท่ากับ 40/60 จากนั้นทำการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางแต่ละประเภทที่เตรียมได้ พบว่า ยางธรรมชาติดัดแปรโครงสร้างชนิด ENR, MNR และ NR-*g*-PMMA สามารถเตรียมได้สำเร็จจากการศึกษาหามุมฟังก์ชันทางเคมีของยางด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี ชนิดโปรตอน (^1H Nuclear magnetic resonance spectroscopy, ^1H NMR) TPNR ที่เตรียมจากยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

มีสมบัติการดูดซับและกระจายแรงดีกว่า TPNR ที่เตรียมจากยางธรรมชาติไม่ดัดแปรโมเลกุล ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างของยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุล ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลในยาง ENR หมู่มาลิเอตในยาง MNR และหมู่เมทาคริเลตในยาง NR-g-PMMA กับหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วในโครงสร้างของ TPU ทำให้เกิดอัตรากิริยาระหว่างสองเฟสดีขึ้น โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคของยางกับ TPU ได้รับการตรวจสอบด้วยเทคนิค Attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) และเทคนิค Temperature scanning stress relaxation (TSSR) นอกจากนี้ยังพบว่า MNR/TPU มีสมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นสูงสุด อนุภาคยางมีขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีกว่า TPNR ที่เตรียมจาก ENR/TPU, NR-g-PMMA/TPU และ NR/TPU และยังพบว่า การรวมตัวของยาง ทำให้ช่วยลดความแข็งและปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นของ TPNR ที่เตรียมได้เมื่อเทียบกับสมบัติของเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทนบริสุทธิ์

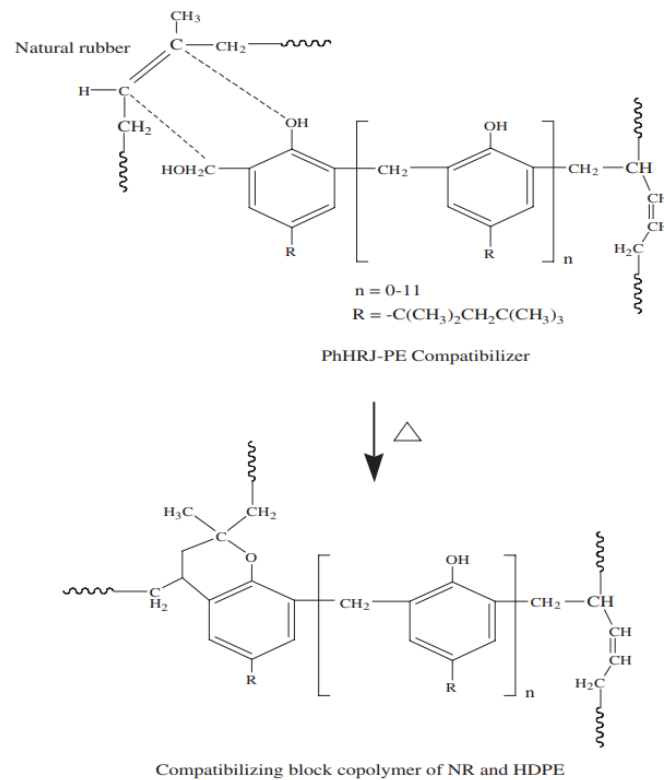
S.Pichaiyut และคณะ(2011)[16] ได้ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเตรียมยางเทอร์โมพลาสติกที่แตกต่างกันระหว่างการผสมแบบปกติ กับการผสมแบบไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน (Dynamic vulcanization) ENR กับ TPU ที่สัดส่วนเท่ากับ 40/60 และ 50/50 เพื่อลดความแข็งของ TPU ปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกและสมบัติเชิงกลของยางเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่า เมื่อผสมยางธรรมชาติไฮดรอกซิลกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน ด้วยเทคนิคการผสมแบบปกติและการผสมแบบไดนามิกส์วัลคาไนเซชันทำให้ความแข็งของ TPU มีค่าลดลง ในขณะที่สมบัติการรับแรงกระแทกและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันค่า มีค่ามอดูลัสของยัง $\tan \delta$ และการผิดรูปถาวร ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทนบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี (เช่นแรงดึง ความแข็งแรงและการยืดตัวเมื่อขาด) เกิดจากการผสมที่ทำให้ส่วนที่นิ่มของ TPU เกิดขึ้นมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุที่ได้จากการเตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบง่ายมีคุณสมบัติทางกล stress relaxation สมบัติการดูดซับและกระจายพลังงาน คุณสมบัติการไหลและความยืดหยุ่น ที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับวัสดุที่ได้จากการเตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน (Dynamic vulcanization) และสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของยางที่เตรียมด้วยการผสมแบบไดนามิกส์วัลคาไนเซชันดีกว่า

E.Kalkornsurapranee และคณะ(2012)[17] ได้เตรียมยางเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizates, TPVs) ประสิทธิภาพสูงจากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน โดยใช้เทคนิคการผสมแบบไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน และได้ศึกษาอิทธิพลของการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันระบบต่างๆ ได้แก่ ระบบกำมะถันปกติ (Conventional sulfur vulcanization system; CV) ระบบกำมะถันกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient sulfur

vulcanization system; Semi-EV) และระบบกำมะถันประสิทธิภาพ (Efficient sulfur vulcanization system, EV) พบว่า การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันแบบ EV ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีกว่า ระบบ Semi-EV และ CV ตามลำดับ และ TPV ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV จะมีความเสถียรทางความร้อนสูงสุด ทำให้มีเหมาะสมในการเตรียม TPV นอกจากนี้จากการศึกษาสมบัติของ TPNR ที่เตรียมจากยาง NR และยาง ENR พบว่า ยาง ENR มีประสิทธิภาพในการผสมกับ TPU ได้ดีกว่ายาง NR เนื่องจากหมู่ไอพอกไซดีนในโครงสร้างของยาง ENR ทำให้เกิดอันตรกิริยาและปฏิกิริยากับ TPU บริเวณผิวประจัญได้ดีกว่ายาง NR จากสภาพขั้วที่ใกล้เคียงกัน

2.4 การใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการพัฒนาเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้คือความเข้ากันระหว่างเฟสยางและเทอร์โมพลาสติกโดยการไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันในระดับอนุภาค (Immiscible blend) ของ TPE ทำให้สมบัติด้อยลงจึงมีงานวิจัยที่มีการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อช่วยปรับปรุงการผสมและสมบัติของ TPE ให้ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น W.Pechurai และคณะ(2008)[18] ได้เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) และศึกษาอิทธิพลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากการดัดแปรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนด้วยฟีนอลิกเรซิน (Modified phenolic resins; PhHRJ-PE) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างวัฏภาคของยาง NR และ HDPE ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.8

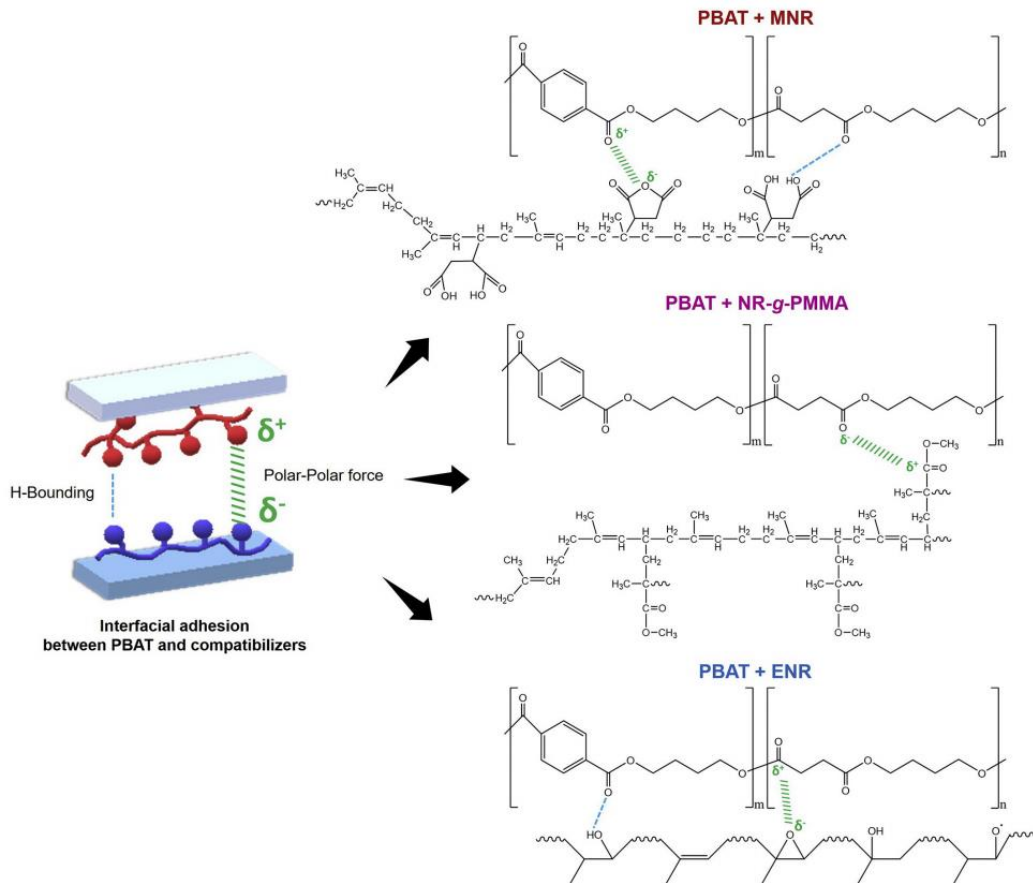


รูปที่ 2.8 ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาของ PhHRJ-PE กับ ยางธรรมชาติ [18]

จากการศึกษาพบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความเค้นเฉือน (Shear stress) และความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ของ TPNR ที่เตรียมจากการเบลนด์ยาง NR และ HDPE ที่อัตราส่วน 60/40 ที่มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากการตัดแปรรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนด้วยฟีนอลิกเรซินมีสมบัติที่ดีกว่าการไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ นอกจากนี้การใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากการตัดแปรรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนด้วยฟีนอลิกเรซิน ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้วยความแข็งแรงเหนียว (Toughness) และความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาดของ TPNR ได้

S.Salaeh และคณะ(2018)[19] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของการเตรียม TPNR จากพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride; PVDF) กับยางธรรมชาติ โดยเตรียมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลด้วยการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Natural rubber grafted Polymethylmethacrylate; NR-g-PMMA) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คือ 3.5, 12 และ 23 ร้อยละ โดยโมล การเตรียม TPNR จะทำการผสมยาง NR กับ PVDF ที่อัตราส่วนคงที่ร้อยละ 50/50 โดยน้ำหนัก พบว่า การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต (NR-g-PMMA) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PVDF และ NR ทำให้คุณสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล และสัญญาณวิทยาของ TPNR ที่เตรียมได้ดีขึ้นตามปริมาณของ PMMA ใน NR-g-PMMA ที่เพิ่มขึ้น

E.Kalkornsurapranee และคณะ(2020)[20] ได้ศึกษาอิทธิพลของยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลที่ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการเตรียม TPNR จากยางธรรมชาติและพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นของวัสดุผสมระหว่าง NR/PBAT ที่สัดส่วนร้อยละ 40/60 โดยน้ำหนัก และใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์จากการศึกษาพบว่า การใช้ MNR, NR-g-PMMA และ ENR-50 เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะช่วยให้สมบัติของ NR/PBAT ดีขึ้นเนื่องจากการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติจะทำให้ยางมีสมบัติความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาหรือปฏิกิริยาที่หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติดัดแปรโมเลกุลกับ PBAT แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาของหมู่ฟังก์ชันระหว่างยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุลกับ PBAT [20]

จากศึกษาพบว่า การใช้ยางธรรมชาติดัดแปลงโมเลกุล ได้แก่ MNR, NR-g-PMMA และ ENR-50 สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการเตรียม TPNR จาก NR/PBAT ได้ โดยจะส่งผลให้สมบัติทางความร้อนและลักษณะสัญญาณวิทยาที่ดีกว่าที่ TPNR ที่ไม่มีการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และพบว่า การใช้ ENR-50 เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

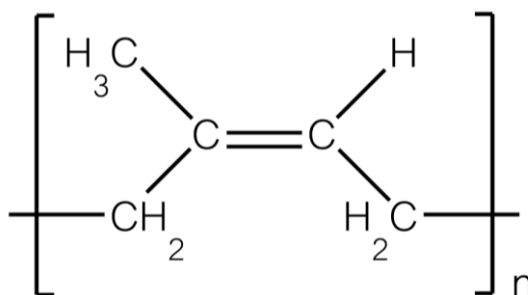
บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ

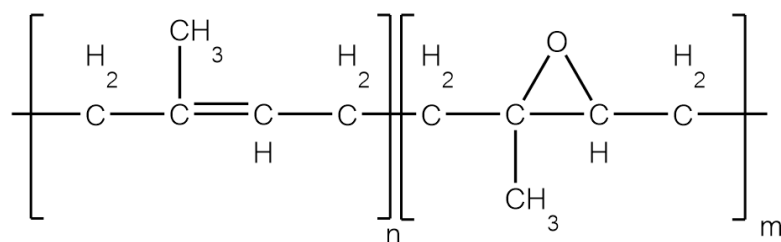
ยางธรรมชาติชนิดแท่งเกรด STR 5L (Standard thai rubber 5L) ใช้สำหรับเป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ผลิตโดยบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น จำกัด จังหวัดสงขลา ประเทศไทย มีชื่อทางเคมีคือ *cis*-1,4-polyisoprene ในโมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีน (C_5H_8) ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวและเป็นเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 3.1 มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.92



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

3.1.2 ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์

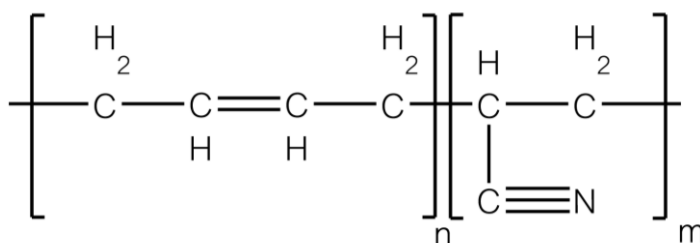
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ใช้สำหรับเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และใช้เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด (มหาชน) ประเทศไทย มีสูตรทางโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{10}H_{16}O$ แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นยางธรรมชาติที่ได้รับการดัดแปรโมเลกุลโดยการเติมออกซิเจนเข้าไปในพันธะคู่ทำให้เกิดเป็นวงแหวนอีพอกไซด์ในโมเลกุล โดยงานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์

3.1.3 ยางไนไตรล์

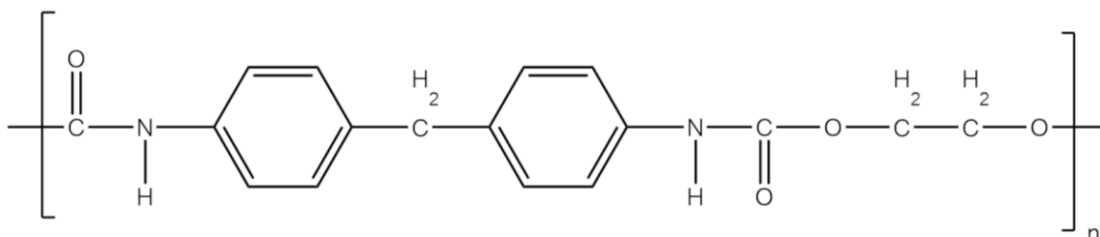
ยางไนไตรล์ใช้สำหรับเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และใช้เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท นอร์สอีส์ริบเบอร์ จำกัด ประเทศไทย มีโครงสร้างทางเคมีเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบเป็นบิวตะไดอีน (Butadiene) และอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยงานวิจัยนี้ใช้ยางไนไตรล์เกรด N3380 GRN มีสัดส่วน Acrylonitrile: Butadiene เท่ากับ 33:67 % โมล



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของยางไนไตรล์

3.1.4 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนใช้สำหรับเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท นอร์สอีส์ริบเบอร์ จำกัด ประเทศไทย จัดอยู่ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีโครงสร้างมาเคมีดังรูปที่ 3.4 โดยงานวิจัยนี้ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเกรด Elastollan® S 95 A ผลิตโดยบริษัทบีเอเอสเอฟ จำกัด ประเทศเยอรมนี มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

3.1.5 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นผงสีขาวอนุภาคเล็ก มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 81.38 กรัมต่อโมล และมีความหนาแน่นเท่ากับ 5.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอุณหภูมิหลอมเท่ากับ 1,975 องศาเซลเซียส มีหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาการคงรูปของยางด้วยระบบกำมะถันทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท ไทย-ไลซาท จำกัด ประเทศไทย

3.1.6 กรดสเตียริก

กรดสเตียริกเป็นกรดไขมันที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว มันวาว ไม่ละลายน้ำ มีกลิ่นหืนไขมัน มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{18}H_{36}O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 284.48 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และจุดหลอมเหลวเท่ากับ 361 องศาเซลเซียส มีหน้าที่เป็นสารกระตุ้นทำงานร่วมกับ ZnO ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปยางเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท บางกอกเคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.1.7 บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์

บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_{11}H_{14}N_2S_2$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 238.37 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.17 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 105 องศาเซลเซียส มีหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์หรือการคงรูปยาง ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท สยามเคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.1.8 ไตเมทิลบิวทิลฟีนิลลีนไดเอมีน

ไตเมทิลบิวทิลฟีนิลลีนไดเอมีนมีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลเข้มและเป็นสารเคมีในกลุ่มอนุพันธ์ของเอมีนส่งผลให้เกิดการตกสีในยาง มีหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากออกซิเดชัน (Antioxidant)

3.1.9 กำมะถัน

กำมะถันมีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีเหลืองเป็นธาตุโลหะที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32.065 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวเท่ากับ 115.21 องศาเซลเซียส มีหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์หรือสารเชื่อมขวางสายโซ่โมเลกุลของยาง ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท สยามเคมีคอล จำกัด ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ

3.2.1 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง รุ่น YFM 160B เป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับผสมยางและสารเคมีต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งนี้เป็นเครื่องบดผสมแบบเปิด ลูกกลิ้งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูก โดยลูกกลิ้งหน้าและลูกกลิ้งหลังมีการหมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วที่ไม่เท่ากันเพื่อให้เกิดแรงเฉือน อัตราเร็วอยู่ที่ 1:1.2 ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท Yong Fong Machinery Co., Ltd ประเทศจีน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

3.2.2 เครื่องบดผสมแบบปิด

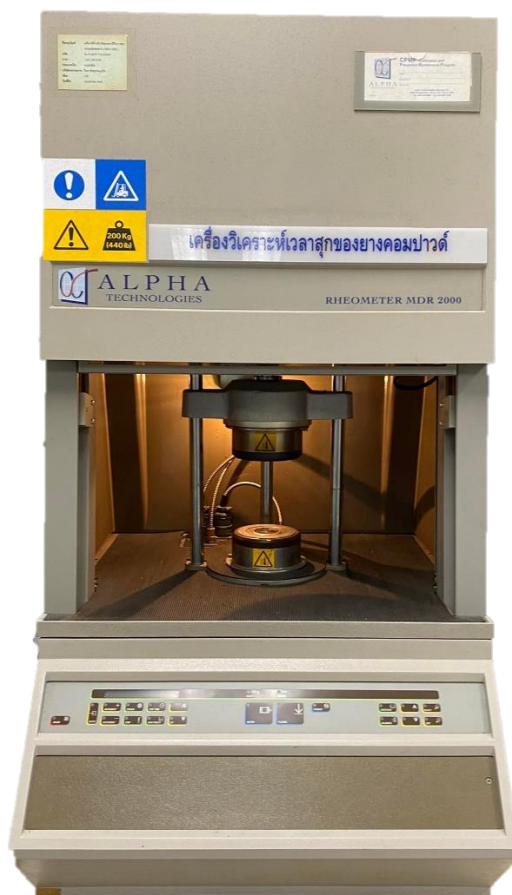
เครื่องบดผสมแบบปิดเป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับผสมยางและสารเคมีต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยอาศัยแรงเฉือนระหว่างโรเตอร์ และผนังห้องผสม มีปริมาตรห้องผสมเท่ากับ 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร รุ่น PolyLab OS RheoDrive 7 ยี่ห้อ Haake สามารถปรับความเร็วโรเตอร์ได้ตั้งแต่ 0.5-250 รอบต่อนาที ทำอุณหภูมิได้ 40- 400 °C ผลิตโดย Thermo Scientific Co., Ltd แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องบดผสมแบบปิด

3.2.3 เครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยาง

เครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยางเป็นเครื่องมือที่ใช้หาเวลาคงรูปของยาง (Cure time; t_{c90}) ซึ่งค่าการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้กำหนดเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปยาง เพื่อให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายน์เคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายนัมเคลื่อนที่

3.2.4 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์

เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหลของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก ซึ่งค่าการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้กำหนด แรงดัน อุณหภูมิ และ กระบวนการแปรรูปที่เหมาะสม โดยทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ISO 1133 น้ำหนักกด 5 กิโลกรัม หน่วยที่วัดได้คือ กรัมต่อ 10 นาที เครื่องที่ใช้ทดสอบ Mflow extrusion plastometer แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบดัดขึ้นรูปการหลอมไหลของพอลิเมอร์

3.2.5 ตู้อบอากาศร้อน

ตู้อบอากาศร้อนใช้สำหรับให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ภายในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ ก่อนทำการแปรรูป รุ่น Oven ULE 600 Memmert

3.2.6 เครื่องอัดขึ้นรูป

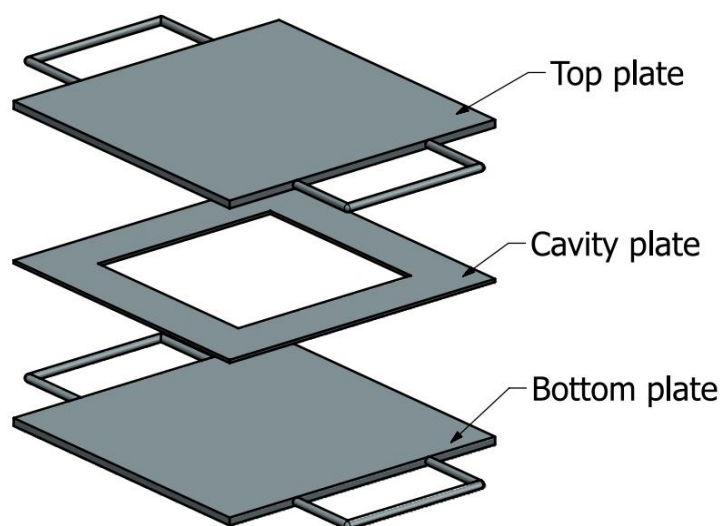
เครื่องอัดขึ้นรูปเป็นเครื่องจักรที่ส่งกำลังด้วยระบบไฮดรอลิก ใช้สำหรับอัดยางเพื่อขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ มีกำลังอัดเท่ากับ 30 ตัน รุ่น LCC 140 ผลิตโดยบริษัท TANG-MASTER Co., Ltd ประเทศไต้หวัน แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องอัดขึ้นรูป

3.2.7 แม่พิมพ์

แม่พิมพ์มีขนาดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 13x13x0.2 เซนติเมตร แม่พิมพ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวน 3 แผ่น แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แม่พิมพ์

3.2.8 เครื่องตัดชิ้นทดสอบ

เครื่องตัดชิ้นทดสอบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบให้ได้ตามมาตรฐาน โดยการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile properties) ใช้มาตรฐาน ASTM D412 ใช้รูปแบบ die type C

3.2.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงเป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อทดสอบ มอดูลัสที่ระยะยืด ร้อยละ 100 (100% Modulus) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และการผิดรูปถาวร (Tension set) โดยใช้ Load cell 1000 นิวตัน ความเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องทดสอบ Universal testing machine รุ่น instron 3365 ผลิตโดยบริษัท Instron Co., Ltd แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

3.2.10 เครื่องทดสอบความแข็ง

เครื่องทดสอบความแข็งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งของวัสดุแบบ shore durometer โดยมีหน่วยความแข็งเป็น Shore A ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ใช้เครื่องทดสอบรุ่น INSTRUMENTS MODEL 408 Type A ผลิตโดยประเทศเยอรมัน แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็ง

3.1.11 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber

เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4060-10 ทำการทดสอบด้วยน้ำหนักกด 1000 กรัม ความเร็ว 60 รอบต่อนาที จำนวน 1000 รอบ และทำการเปรียบเทียบน้ำหนักที่สูญเสียไป เครื่องทดสอบรุ่น GT-7012-T ผลิตโดยบริษัท Gotech testing machines inc. ประเทศไต้หวัน แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber

3.2.12 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการลื่นไถล

เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการลื่นไถลเป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการลื่นไถลของวัสดุ โดยทำการวัดพลังงานที่สูญเสียไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของวัสดุ สามารถทำการทดสอบได้ทั้งสภาวะพื้นผิวที่แห้ง และเปียกน้ำ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เครื่องที่ใช้ในการทดสอบคือ British Pendulum Skid Tester (BPST) รุ่น S885 บริษัท Wessex ประเทศสหราชอาณาจักร แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการลื่นไถล

3.2.13 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ

เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของวัสดุ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 2781: 2008 (Method A) โดยการใช้เทคนิคเปรียบเทียบน้ำหนักของชิ้นทดสอบในอากาศ และน้ำ เครื่องทดสอบรุ่น ML204 ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศนิวซีแลนด์ แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ

3.2.14 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการดูลักษณะทางกายภาพของวัสดุระดับนาโน เพื่อดูการกระจายตัว (Phase distribution) และขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ โดยใช้เครื่องทดสอบ ACL-A Type ร่วมกับโปรแกรม Nanosurf Easyscan 2 เครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาสภาวะการผสมที่เหมาะสมกับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

ทำการทดลองเตรียมยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเท่ากับ 80:20 และ 20:80 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยควบคุมสภาวะการผสมหลักที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลาในการผสม 10 นาที และความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที และทำการแปรปัจจัยที่มีผลกับการผสมทั้ง 3 ปัจจัย ดังตารางที่ 3.1 เพื่อให้ได้สภาวะการผสมที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

ตารางที่ 3.1 สภาวะการผสมที่มีการแปร อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์

Conditions	Temperature (°C)	Time (min)	Rotor speed (rpm)
Vary temperature	140, 150, 160, 180,200	10	60
Vary time	150	10, 15, 30	60
Vary rotor speed	150	10	60, 90, 120

3.3.2 การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป

การศึกษาสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูปโดยจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบได้แก่ 1. ยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติจะทำการศึกษาระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ และ 2. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะทำการศึกษาดัชนีการลอมไหล

3.3.2.1 ยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ

ขั้นตอนที่ 1 เตรียมยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) โดยทำการเติมสารเคมีและวัตถุดิบตามสัดส่วน ดังตารางที่ 3.2 ยกเว้นสารตัวเร่ง และกำมะถัน โดยความคุมเวลาในการผสมประมาณ 8 นาที

ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ

Ingredients	phr
NR	100
ZnO	5
Stearic acid	1
6PPD	1
TBBS	1
Sulfur	2.5

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมผสมยางคอมพาวด์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนด้วยเครื่องบดผสมแบบปิดที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเท่ากับ 95:05 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนัก และใช้สภาวะการผสมที่ได้จากหัวข้อที่ 3.3.1

ขั้นตอนที่ 3 นำยางที่ผสมเสร็จแล้ว เติมสารตัวเร่ง และกำมะถัน ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง

ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบเวลาสุกของยางด้วยเครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยางและทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ชิ้นงานนำไปทดสอบ

3.3.2.2 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดขยาดด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 5 นาที เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุล และพักยางไว้ 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 เตรียมผสมยางกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนด้วยเครื่องบดผสมแบบปิดที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเท่ากับ 05:95 10:90 และ 20:80 ส่วนโดยน้ำหนัก และใช้สภาวะการผสมที่ได้จากหัวข้อที่ 3.3.1

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดสอบดัชนีการหลอมไหลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่เตรียมได้

ขั้นตอนที่ 4 ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปโดยใช้การอบให้ความร้อนก่อน (Preheat) 4 นาที ทำการอัดขึ้นรูป 1 นาที และทำการลดอุณหภูมิ 5 นาที เพื่อให้ได้ชิ้นงานนำไปทดสอบ

3.3.3 การศึกษาชนิดและปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

ในการศึกษาชนิดและปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะทำการศึกษาวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ 2 ชนิด คือ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีอีพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล และยางไนไตรล์ ที่และที่ปริมาณปริมาณ 0, 3, 5 และ 7 ส่วนเทียบกับยางร้อยละส่วนโดยขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติจะมีขั้นตอนตามหัวข้อที่ 3.3.2.1 และการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจะมีขั้นตอนตามหัวข้อที่ 3.3.2.2

3.3.4 การทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

3.3.4.1 การทดสอบเวลาคงรูปของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer 200 โดยทำการเตรียมยางคอมพาวด์ 4-4.5 กรัม และทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 6205-01 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที โดยค่าที่ได้จากการทดสอบ ค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) ค่าทอร์คสูงสุด (M_H) และ T_{C90} ถือเป็นเวลาในการคงรูปยางของยางในเครื่องอัดขึ้นรูป

3.3.4.2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์

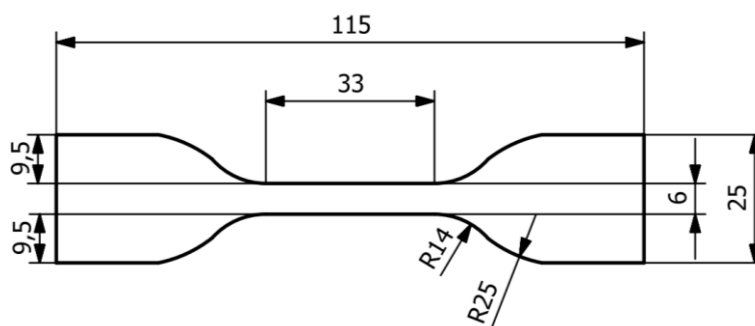
ทำการทดสอบด้วยเครื่อง M-flow extrusion plastometer โดยทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ 4.5-5 กรัม ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1133 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่ใช้ในการกด 5 กิโลกรัม และทำการจับเวลา 60 วินาทีเมื่อตัวอย่างไหลออกจากหัวตาย ทำการตัดและเก็บตัวอย่างไปทำการชั่งน้ำหนักทั้งหมด 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำน้ำหนักที่ได้คำนวณหาค่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ โดยคำนวณค่า MFR ดังสมการที่ (3.1)

$$\text{MFR} = 10W / T \quad (3.1)$$

โดยที่ MFR = ค่าดัชนีการหลอมไหล
 W = ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของพลาสติกหลอมไหล
 T = ช่วงเวลาที่ตัดของพลาสติกหลอมไหล

3.3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลและกายภาพ

- การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % และระยะยืดจนขาด (Elongation at break) ทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D 412 โดยการเตรียมตัวอย่างดัมเบลแบบ die C ดังรูปที่ 3.18 ทำการทดสอบ 5 ซ้ำ และความหนาของชิ้นงานได้จากค่าเฉลี่ยความหนา 3 จุดที่ตำแหน่ง Gauge range



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น instron 3365 load cell 1000 นิวตัน ดึงด้วยอัตราเร็ว 500 mm/min ที่อุณหภูมิ 27 °C

การคำนวณ

$$\text{Modulus at 100\% elongation (MPa)} = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

โดย

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืดออก 100% (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

$$\text{Elongation at break (\%)} = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

โดย

L = ระยะยืดที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด

L₀ = ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

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

โดย

F = แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

มีหน่วยเป็นนิวตัน/ตารางมิลลิเมตร (N/mm³) หรือกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (kg/cm²) ในหน่วย SI มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa) 1 MPa = 10.197 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

- การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทำการทดสอบความแข็งภายใต้มาตรฐาน ASTM D 2240 โดยทดสอบด้วยเครื่อง Shore durometer ชนิด Shore A โดยทดสอบ 5 ตำแหน่งและคำนวณหาค่าเฉลี่ย

- การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ทำการทดสอบความถ่วงจำเพาะด้วยวิธีไฮโดรสแตติก (Hydrostatic method) ด้วยเครื่องรุ่น ML204 โดยการหาขนาดหรือปริมาตรของวัตถุโดยการแทนที่น้ำ และชั่งน้ำหนักน้ำที่ถูกแทนที่ ซึ่งเป็นการชั่งวัตถุจำนวนหนึ่งภายใต้สภาวะอากาศ และนำวัสดุนั้นมาทำการชั่งน้ำหนักในน้ำที่เป็นตัวกลาง น้ำหนักที่หายไปจากผลต่างที่ชั่งในอากาศ และในน้ำจะมีค่าเท่ากับน้ำที่ถูกแทนที่ โดยสามารถอ่านค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุได้จากเครื่องทดสอบ

- การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber

ทำการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D4060 โดยทดสอบด้วยเครื่องรุ่น GT-7012-T เตรียมชิ้นทดสอบเป็นรูปวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 cm ซึ่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ จากนั้นทำการทดสอบด้วยน้ำหนักกด 1000 กรัม ที่ความเร็วรอบ 60 rpm ซึ่งน้ำหนักหลังการทดสอบ และคำนวณค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ ดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

สมการคำนวณค่าความต้านทานต่อการสึกหรอ

$$\text{Wear index} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อน} - \text{น้ำหนักหลัง}) \times 1000}{1000} \quad (3.2)$$

$$\text{Weight loss} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อน} - \text{น้ำหนักหลัง})}{\text{น้ำหนักก่อน}} \times 100 \quad (3.3)$$

- การทดสอบการผิดรูปถาวรโดยการดึง (Tension set)

ทำการทดสอบชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ด้วยเครื่อง Universal testing machine รุ่น instron 3365 load cell 1000 นิวตัน ดึงด้วยอัตราเร็ว 500 mm/min โดยทำการดึงยืดค้างไว้ 10 นาทีที่ระยะ 100 % modulus และทำการปล่อยกลับคืนสภาวะปกติ 30 นาที จากนั้นทำการวัดระยะยืดของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป และคำนวณค่าการผิดรูปถาวรดังสมการที่ (3.4)

$$\text{Tension set} = \frac{\text{Change length} - \text{original length}}{\text{original length}} \times 100 \quad (3.4)$$

- การทดสอบความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid resistance tester)

ทำการทดสอบชิ้นงานในมิติการแปรรูปแบบเทอร์โมพลาสติกด้วยเครื่อง British Pendulum Skid Tester (BPST) รุ่น S885 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

3.3.4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope; AFM) เพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของเฟสกระจาย (Dispersed phase) ในยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ โดยการวัดขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างส่วนปลายเข็มทดสอบกับพื้นผิวของตัวอย่าง ในขณะที่สแกนบนพื้นผิวขึ้นทดสอบ และถูกนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Nanosurf Easyscan 2 ในคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นแผนภาพสามมิติในกำลังขยายสูง

3.3.5 การศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ

ในการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ 1. ทำการศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำมาแล้วจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบมาทำการผสมกับยางธรรมชาติเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนไป โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังหัวข้อที่ 3.3.2.2 และ 2. ทำการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยใช้สัดส่วนที่ดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.3.3-3.3.4 และทำการทดลองแปรรูปซ้ำจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบ และศึกษาสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไป

3.3.6 การเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ

เมื่อได้สูตรที่ดีที่สุดจากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.3.3-3.3.4 นำสูตรที่ได้ทำการผสมยางตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.3.2.1 โดยเปลี่ยนเป็นการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับคอมพาวด์ยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้า และทำการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุที่เตรียมได้

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลของการศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

ในการเตรียมยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสมระหว่างยางและเทอร์โมพลาสติกด้วยเครื่องบดผสมแบบปิดจำเป็นต้องหาสภาวะการผสมที่เหมาะสมเนื่องจากอาจส่งผลต่อสมบัติของวัสดุที่เตรียมได้ ในการทดลองนี้จึงศึกษาสภาวะการผสมที่เหมาะสมกับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 20:80 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักโดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผสม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเร็วโรเตอร์ โดยมีการแปรสภาวะการผสมที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.1 ผลเป็นดังตารางที่ 4.1-4.4

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางการภาพของสภาวะการผสมที่มีการแปรอุณหภูมิ

Temperature (°C)	physical appearance
140	มีลักษณะการเข้ากันไม่ดี ^a
150	วัสดุผสมเข้ากันดีเป็นเนื้อเดียว ^d
160	ยางเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสม ^b
180	ยางเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสม ^c
200	ยางเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสม ^c





ตารางที่ 4.2 สภาวะการผสมที่มีการแปรเวลา

Time (min)	physical appearance
10	มีลักษณะการเข้ากันไม่ดี ^a
15	วัสดุผสมเข้ากันดีเป็นเนื้อเดียว ^d
30	ยางเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสม ^b

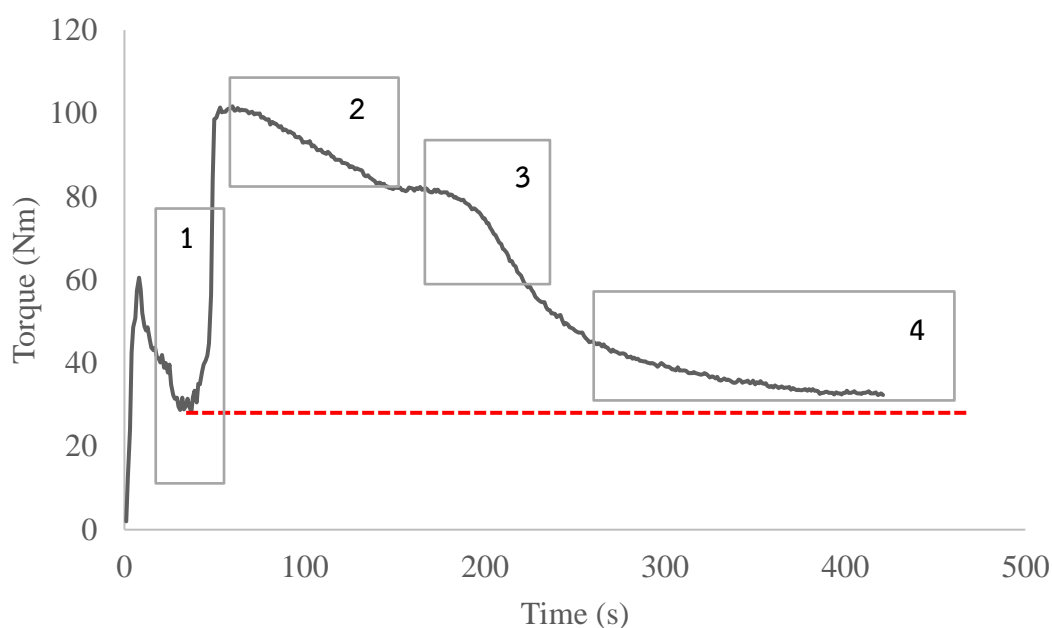
ตารางที่ 4.3 สภาวะการผสมที่มีการแปรความเร็วโรเตอร์

Rotor speed (rpm)	physical appearance
60	มีลักษณะการเข้ากันไม่ดี ^a
90	วัสดุผสมเข้ากันดีเป็นเนื้อเดียว ^d
120	ยังเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสม ^b

ตารางที่ 4.4 ลักษณะทางการภาพของวัสดุผสมที่มีการแปรสภาวะการผสม

Types	Physical appearance	Notation
a		วัสดุผสมมีลักษณะการเข้ากันไม่ดีเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นเม็ดขนาดใหญ่
b		ยังเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสมเนื่องจากอุณหภูมิสูง
c		ยังเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างผสม เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนไม่หลอม
d		วัสดุทั้ง 2 ชนิดผสมเข้ากันดีเป็นเนื้อเดียว

จากตารางที่ 4.1-4.4 ที่แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของการศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนพบว่าลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ผสมได้มีลักษณะแตกต่างกันโดยรูปในตารางที่ 4.4(a) มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ดี การผสมของวัสดุทั้ง 2 ไม่มีความเข้ากันเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนยังเป็นเม็ดเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมไม่ถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ประมาณ 167 องศาเซลเซียส ส่งผลเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนยังคงเป็นเม็ดขนาดใหญ่ และในทางกลับกันเมื่อใช้สภาวะการผสมที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 180 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพ และมีความหนืดไม่เหมาะสมส่งผลเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนไม่เกิดการกระจายตัว และเช่นเดียวกันเมื่อใช้เวลาในการผสมนานเกินไปจะส่งผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการตัดเฉือนเป็น เวลา และการใช้สภาวะการผสมที่ความเร็วโรเตอร์สูง 120 rpm ส่งผลให้ในห้องผสมมีการตัดเฉือนอย่างรุนแรงทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพก่อนเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจะเกิดการหลอม ทำให้สภาวะการผสมที่ความเร็วโรเตอร์สูงไม่เหมาะสมดังรูปในตารางที่ 4.4(b) , (c) และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากสภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ที่ 90 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการผสม 15 นาทีซึ่งเป็นสภาวะการผสมที่ดีที่สุด ดังรูปในตารางที่ 4.4(d)นอกจากการดูลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผสมได้ยังสามารถสังเกตพฤติกรรมระหว่างผสมได้จากค่าทอร์กที่เกิดขึ้นในห้องผสมดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าทอร์กระหว่างการผสมในเครื่องบดผสมแบบปิด โดยใช้สภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วโรเตอร์ 90 rpm และเวลาในการผสม 15 นาที

จากรูปที่ 4.1 จะสามารถแบ่งช่วงการผสมได้เป็น 4 ช่วงตามพฤติกรรมในการผสมที่เปลี่ยนไปโดยช่วงที่ 1 จะเป็นการเริ่มใส่ยางลงไปในห้องผสม จะเห็นได้ว่าค่าทอร์กลดลงตามระยะเวลาในการผสมโดยทำการบดยางเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นช่วงที่ 2 เติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนลงไปในห้องผสมจะเห็นได้ว่าค่าทอร์กมีการเปลี่ยนแปลงไปสูงขึ้นเนื่องจากปริมาตรในห้องผสมมากขึ้น และช่วงที่ 3 จะสังเกตได้ว่าความชันของกราฟค่าทอร์กมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากเป็นช่วงที่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเกิดการขยายตัวและกำลังจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของหนืดคล้ายยาง และในช่วงที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าทอร์กที่เกิดขึ้นเริ่มมีความคงที่บ่งบอกได้ถึงการผลิตเข้ากันได้ของทั้ง 2 วัสดุเนื่องจากความหนืดที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการปรับความหนืดของยางให้ใกล้เคียงกับความหนืดของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในช่วงค่าทอร์กประมาณ 30 Nm ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมสั้นลงและวัสดุทั้ง 2 ชนิดเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

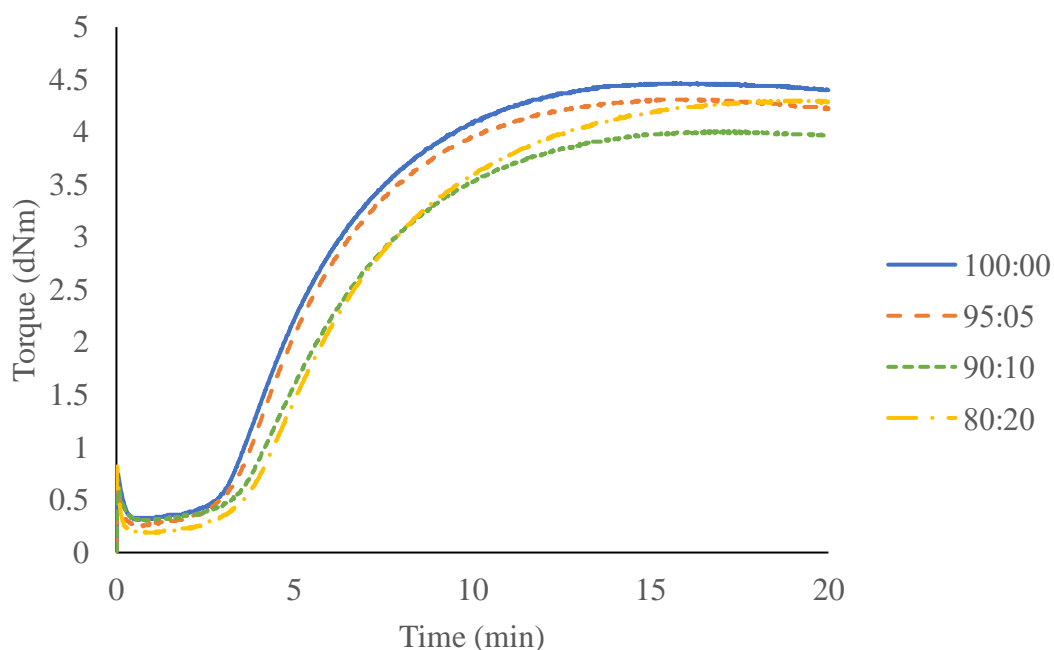
หัวข้อการศึกษาที่ 4.1 ที่ศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสรุปได้ว่าสภาวะที่สามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนให้มีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมคือการใช้สภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วโรเตอร์ 90 rpm และเวลาในการผสม 15 นาที

4.2 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป

ศึกษาสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูปโดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1. ในยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติจะทำการศึกษาระยะเวลาในการวัลคาไนซ์โดยมีวิธีการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.2.1 และ 2. ในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จะทำการศึกษาด้านการหลอมไหลโดยมีวิธีการทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.2.2 โดยการใช้วัสดุที่เตรียมได้จากสภาวะการผสมจากหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังผลการทดลองที่ 4.2.1-4.2.2

4.2.1 ผลของการแปรสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการวัลคาไนซ์

ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ หรือระยะเวลาในการคงรูปยาง (Cure time; T_{c90}) คือ ระยะเวลาที่สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้กำมะถัน เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสายโซ่โมเลกุลของยางเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยในการทดลองจะทำการศึกษาระยะเวลาในการคงรูปยางด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (MDR) ที่ความร้อน 150 °C ผลการทดลองอิทธิพลของสัดส่วนที่ 100:00 95:05 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการคงรูปยางแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ระยะเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่สัดส่วนการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ระยะเวลาในการคงรูปยาง (t_{c90}) ของยางธรรมชาติที่สัดส่วนการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนต่างกัน

TPU contents (%wt)	Cure time; T_{c90} (min)
0	9.45
5	9.53
10	10.41
20	11.71

จากตารางที่ 4.5 แสดงระยะเวลาในการคงรูปยาง (t_{c90}) ของยางธรรมชาติ ที่สัดส่วนการผสมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน 100:0 95:05 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักพบว่ายางธรรมชาติใช้เวลาในการวัลคาไนซ์มากขึ้นตามปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาวัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของโครงสร้าง ซึ่งยางธรรมชาติมีโครงสร้างทางเคมีคือ *cis*-1,4-polyisoprene การเพิ่มเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน จะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติมีระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางที่ตำแหน่งพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเชื่อมขวางในระบบมีประสิทธิภาพลดลงส่งผลความเร็วในการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางจึงเกิดได้ช้าลง

4.2.2 ผลของการแปรสัดส่วนของยางธรรมชาติที่ส่งผลต่อดัชนีการลอมไหล

ดัชนีการลอมไหลของพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกมีส่วนสำคัญในการเลือกเทคนิคในการแปรรูปที่เหมาะสม ในการศึกษาเปรียบเทียบดัชนีการลอมไหลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จึงเป็นตัวชี้วัดว่าจะสามารถแปรรูปโดยการใช้เทคนิคแบบเทอร์โมพลาสติกได้หรือไม่โดยทำการทดสอบตามหัวข้อที่ 3.3.4.2 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบเป็นดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ดัชนีการหลอมไหลของยางธรรมชาติ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางแต่ละชนิด

NR : TPU (%wt)	MFR (g / 10 min.)
00:100	1.252
05:95	0.014
10:90	0.017
20:80	0.084
100:00	N/A

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าดัชนีการหลอมไหลของยางธรรมชาติ เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ พบว่ายางธรรมชาติไม่สามารถทดสอบค่าดัชนีการหลอมไหลได้เนื่องจากมีความหนืดที่สูง และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าดัชนีการหลอมไหลน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ไม่มีการเติมยาง แสดงให้เห็นถึงความหนืดที่มากขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาวทำให้น้ำหนักโมเลกุลที่สูง แต่ในทางกลับกันเมื่อปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติค่าดัชนีการหลอมไหลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้กลับเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่สูงทำให้ยางธรรมชาติบางส่วนเกิดการเสื่อมสภาพสายโซ่ที่ยาวของยางธรรมชาติเริ่มขาดออกจากกัน

หัวข้อการศึกษาที่ 4.2 ที่ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูปสรุปได้ว่า ในยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติสามารถวัลคาไนซ์ได้เหมือนยางทั่วไปแต่การเพิ่มขึ้นของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนส่งผลทำให้ต้องใช้เวลาในการแปรรูปที่เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย และในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์สามารถไหลได้เหมือนเทอร์โมพลาสติกแต่การเพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติส่งผลให้ความหนืดของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เพิ่มมากขึ้นจึงมีข้อจำกัดในการเลือกใช้เทคนิคการแปรรูปให้เหมาะสมกับวัสดุที่เตรียมได้

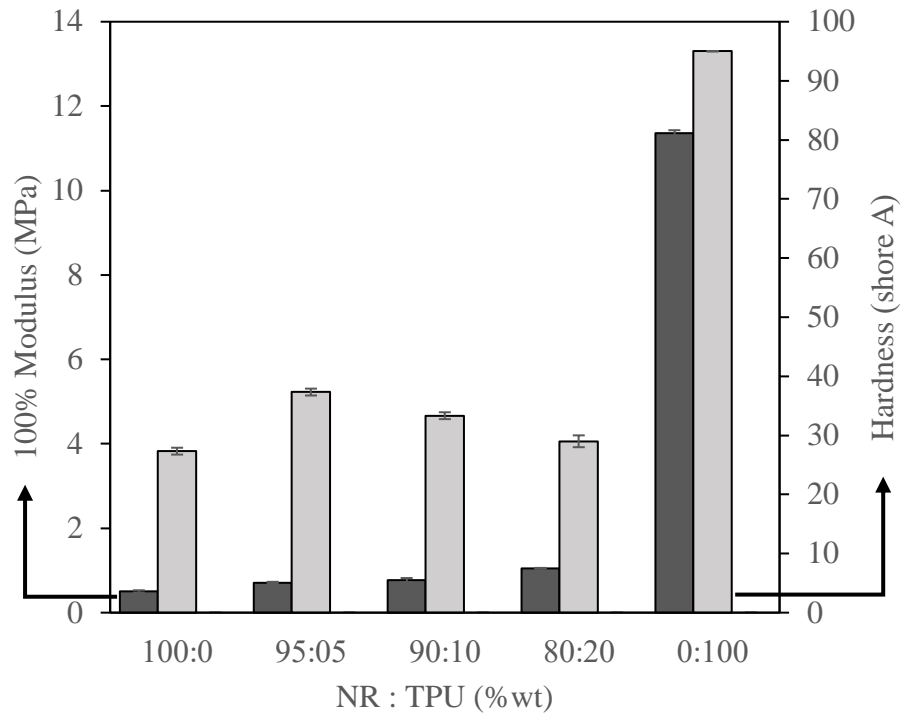
4.3 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

4.3.1 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติ

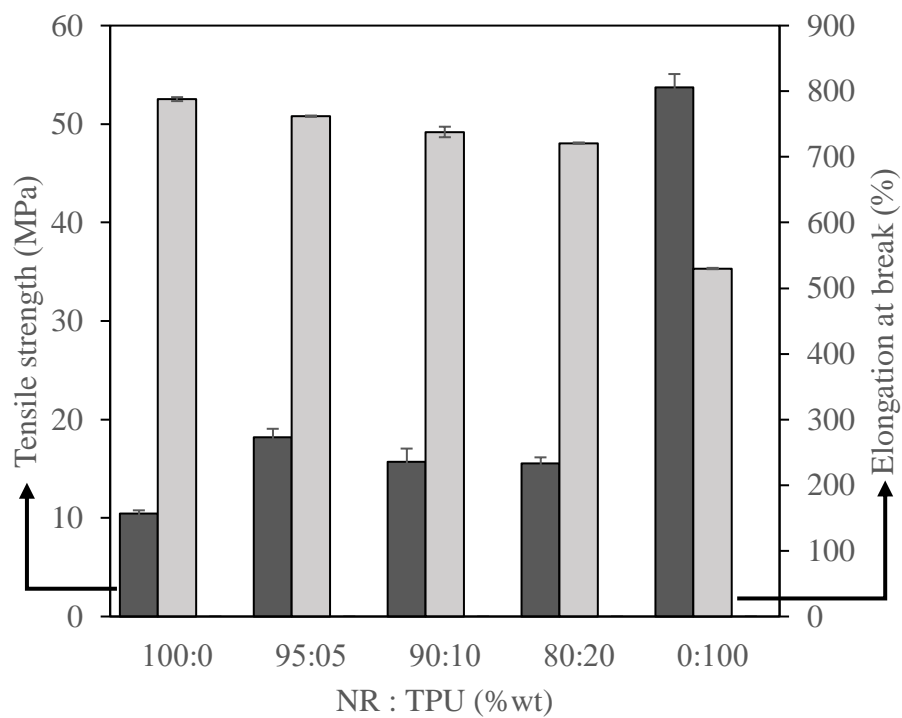
ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติโดยการแปรสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 100:0 95:05 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักโดยทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง 100% มอดูลัส ระยะยืดจนขาด ความแข็ง ความถ่วงจำเพาะ และมุงเน้นสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอโดยทำการทดสอบแบบ Taber ดังหัวข้อที่ 3.3.4.3 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

Properties	NR : TPU (%wt)				
	100:0	95:05	90:10	80:20	0:100
Hardness (shore A)	27.33±0.58	37.33±0.58	33.33±0.58	29.00±1.00	95.00±0.00
100% Modulus (MPa)	0.50±0.03	0.71±0.02	0.77±0.05	1.05±0.01	11.36±0.07
Tensile strength (MPa)	10.46±0.32	18.20±0.86	15.70±1.35	15.56±0.60	53.70±1.38
Elongation at break (%)	788±3	762±1	738±8	721±1	530±1
Wear index	0.1800	0.1100	0.1200	1.0000	0.0008
Weight loss (%)	1.320	0.820	0.850	7.190	0.004
Specific gravity	0.972	0.975	0.995	1.005	1.231

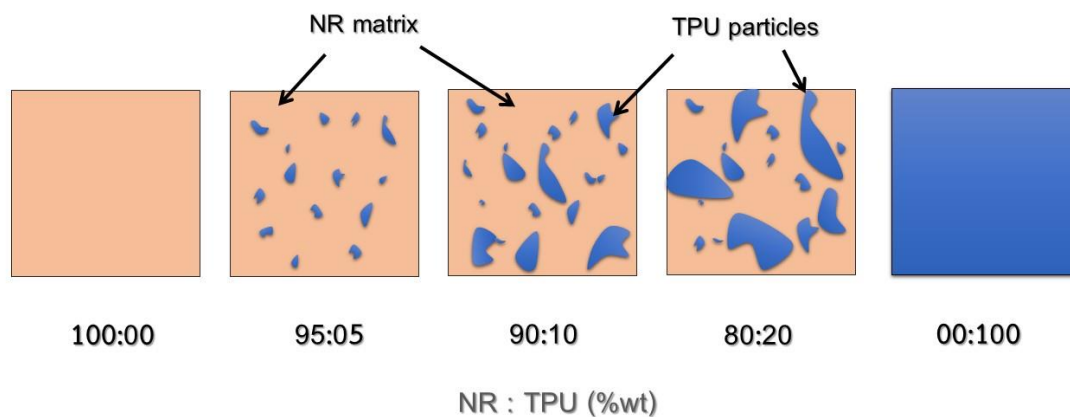


รูปที่ 4.3 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



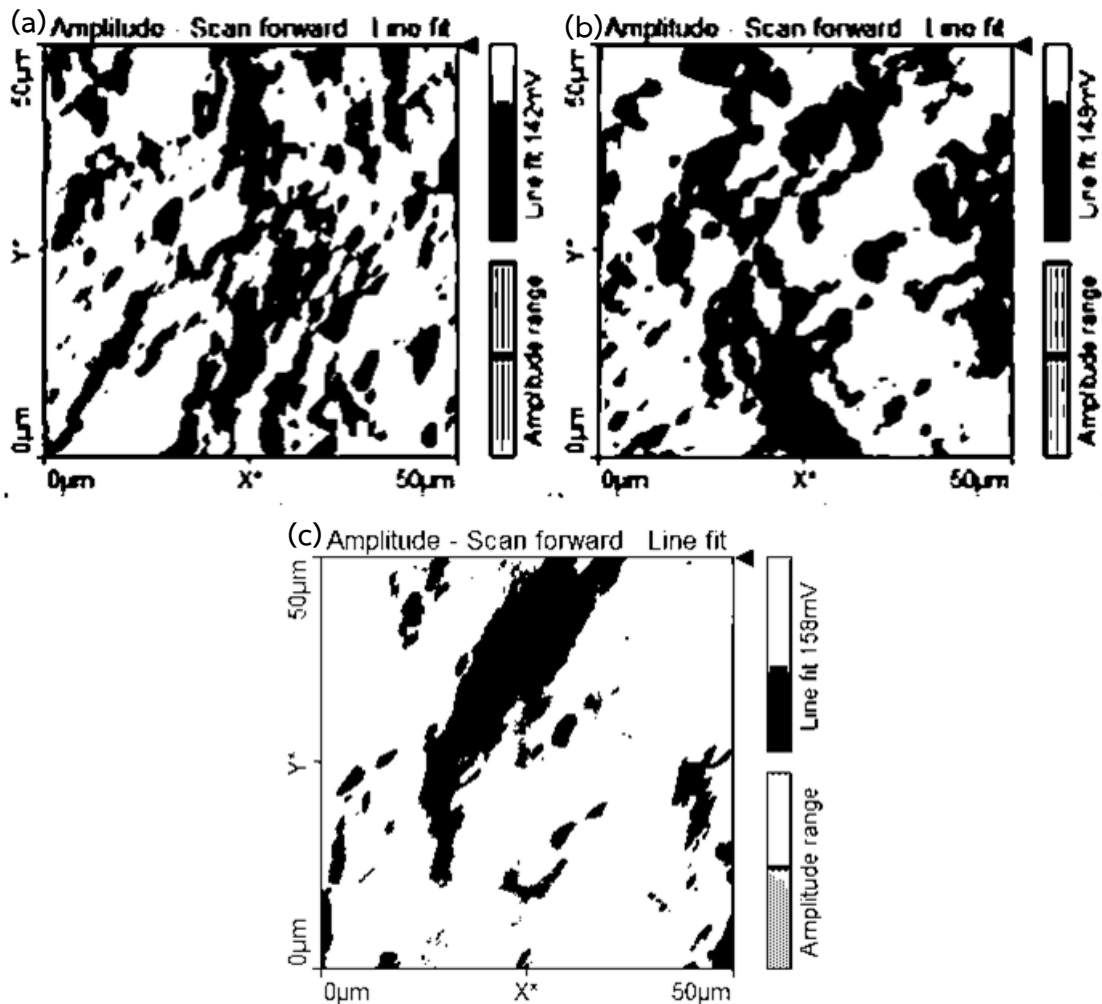
รูปที่ 4.4 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

จากรูปที่ 4.3-4.4 แสดงค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 100:0, 95:05, 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักพบว่ายางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้มีค่าความแข็งสูงสุดที่ 95:05 ส่วนโดยน้ำหนักและเมื่อปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนส่งผลให้ยางธรรมชาติ มีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ และค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความแข็งสูงจากโครงสร้างโมเลกุลที่มีส่วนที่จัดเรียงกันเป็นผลึกและองค์ประกอบของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นห่วงแหวนเบนซีน แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นสูงสุดที่สัดส่วน 95:05 ส่วนโดยน้ำหนักและมีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณ TPU เพิ่มขึ้นเนื่องจากความไม่เข้ากันในเรื่องของความเป็นขั้วทำให้อนุภาคของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกระจายตัวได้ไม่ดีและมีขนาดใหญ่ดังแบบจำลองรูปที่ 4.5 และนอกจากนี้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นยังส่งผลทำให้ ระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติมีค่าต่ำลงเนื่องจากการกระจายแรงดึงแย่ง



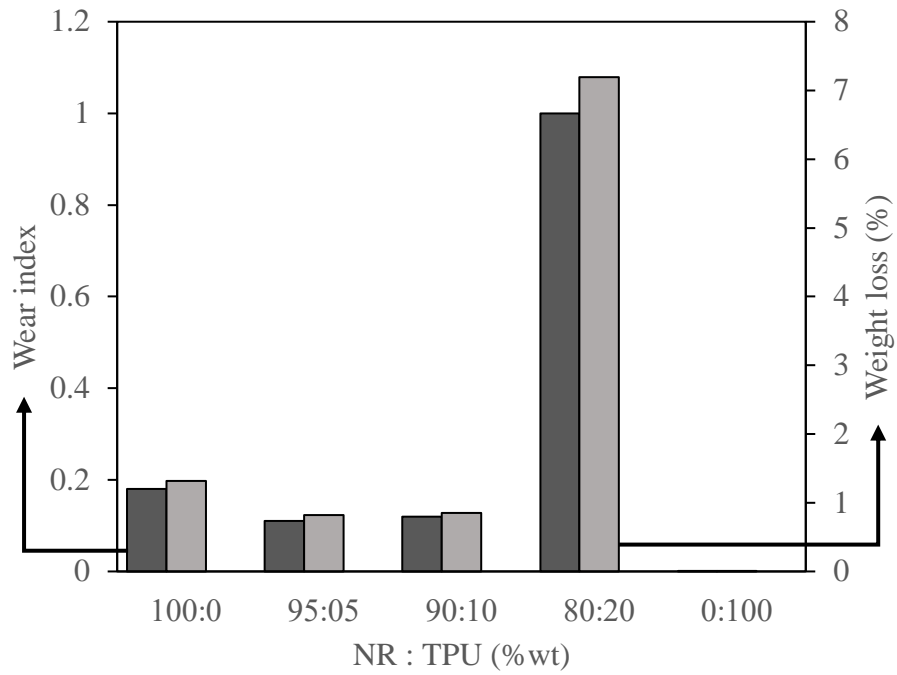
รูปที่ 4.5 แบบจำลองลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในยางธรรมชาติที่สัดส่วนต่างกัน

จากการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคในเฟสกระจายที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้ดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.3.1 การทดสอบทางสัณฐานวิทยาจะสามารถเป็นส่วนช่วยยืนยันเหตุผลทางวิทยาศาสตร์ที่กล่าวมาข้างต้นได้ โดยในการทดสอบทางสัณฐานวิทยาจะใช้เทคนิค AFM ในการทดสอบเพื่อดูขนาดของอนุภาคในเฟสกระจายผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 4.6

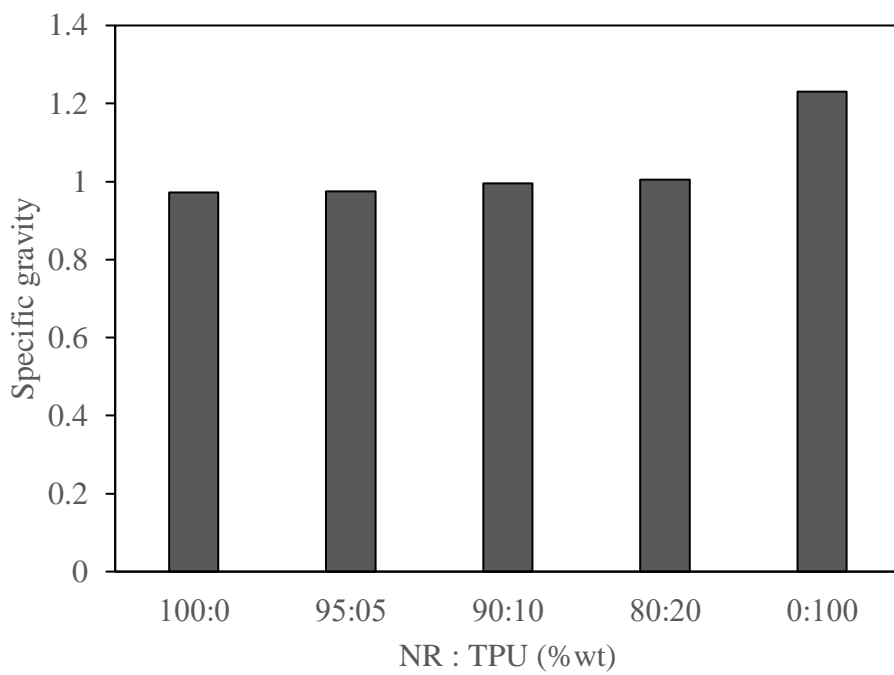


รูปที่ 4.6 ลักษณะสัญญาณวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน (a) 95:05, (b) 90:10 และ (c) 80:20 ส่วนโดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.6 (a) - (c) แสดงลักษณะสัญญาณวิทยาของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 95:05, 90:10 และ 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักที่มีเฟสกระจายคือเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (สีดำ) พบว่าอนุภาคของเฟสกระจายมีการกระจายตัวที่แย่งและมีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เนื่องมาจากแรงดึงผิวระหว่างเฟสที่เพิ่มมากขึ้นเพราะความไม่เข้ากันในเรื่องความเป็นขั้วของวัสดุทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่เป็นเฟสกระจายเกิดการเกาะกลุ่มกันเมื่อปริมาณมากขึ้น ทำให้อนุภาคเกิดขนาดใหญ่ขึ้นและกระจายตัวไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุที่เตรียมได้ลดลงแสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.7 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



รูปที่ 4.8 ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 100:0, 95:05, 90:10, 80:20 และ 0:100 ส่วนโดยน้ำหนักพบว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผสมลงไปใยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติได้โดยพบว่าดีที่สุดในสัดส่วน 95:05 และ 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักจะทำให้การปรับปรุงความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีที่สุดเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีส่วนที่จัดเรียงกันเป็นผลึกและองค์ประกอบของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นห่วงแหวนเบนซีนทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อมีแรงกระทำเป็นไปได้อย่างยากลำบากจึงมีความแข็งแรงเกิดการขัดสีได้น้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ TPU มากกว่านั้นความแข็งแรงจะลดลง เนื่องจากความไม่เข้ากันในเรื่องของความเป็นขั้วระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดต่ำลงดังผลการทดสอบที่สัดส่วน 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักและจากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่เตรียมได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เนื่องจากสัดส่วนของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้เพิ่มขึ้น

หัวข้อการศึกษาที่ 4.3.1 ที่ศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติสรุปได้ว่า การเติม TPU ในยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติได้ในระดับหนึ่งที่สัดส่วน 95:05 และ 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักแต่เนื่องจากความไม่เข้ากันในเรื่องความเป็นขั้วของวัสดุทำให้เมื่อปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ TPU ที่สัดส่วน 80:20 ส่วนโดยน้ำหนักส่งผลให้ TPU มีอนุภาคขนาดใหญ่และกระจายตัวไม่ดีดังผลการทดสอบทางกายภาพ AFM ส่งผลให้สมบัติแย่งลง

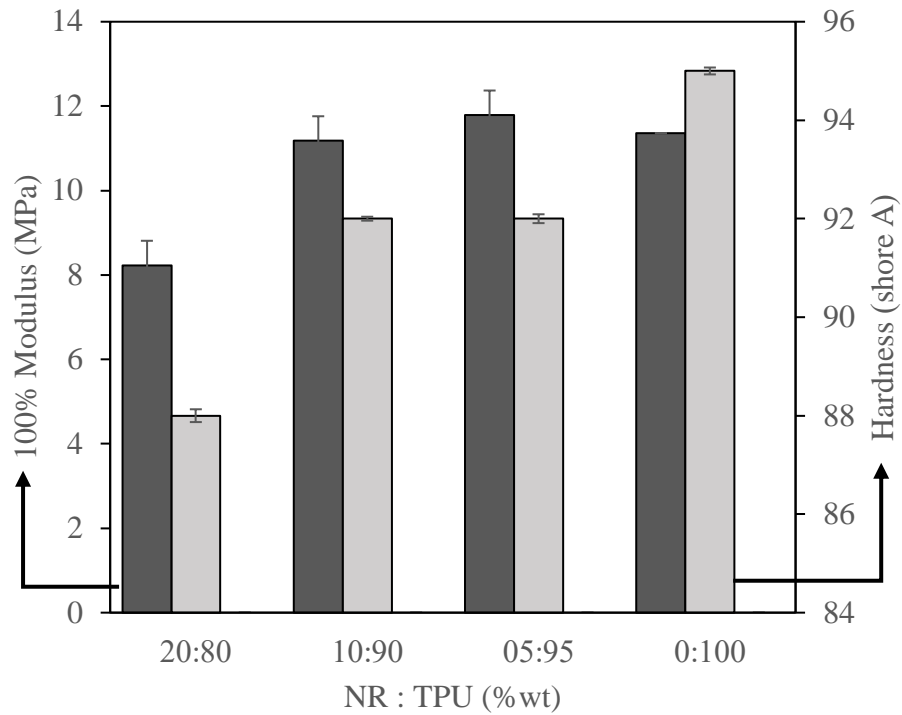
4.3.2 ผลของการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์โดยการแปรสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 20:80 10:90 05:95 และ 0:100 ส่วนโดยน้ำหนักโดยทำการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง 100% มอดูลัส ระยะเวลายืดจนขาด ความแข็ง ความถ่วงจำเพาะ และมุงเน้นสมบัติการยืดรูปถาวร และความต้านทานต่อการลื่นไถล ดังหัวข้อที่ 3.3.4.3 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8

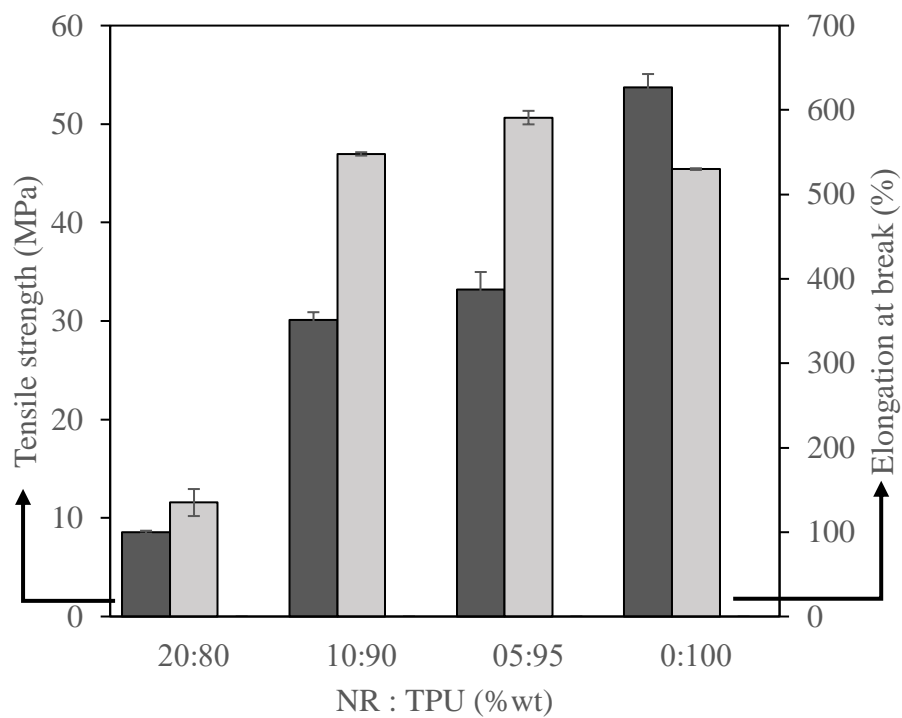
ตารางที่ 4.8 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากการผสมยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและมีการแปรปริมาณของยางธรรมชาติ

Properties	NR : TPU (%wt)			
	20:80	10:90	05:95	0:100
Hardness (shore A)	88.00±0.58	92.00±0.58	92.00±0.58	95.00±0.00
100% Modulus (MPa)	8.23±0.13	11.18±0.04	11.79±0.09	11.36±0.07
Tensile strength (MPa)	8.56±0.15	30.10±0.80	33.20±1.78	53.70±1.38
Elongation at break (%)	135±16	548±2	591±8	530±1
Tension set (%)	*	11.0±1.41	3.5±0.71	27.3±3.21
Skid resistance (PTV)	65	60	51	51
Specific gravity	1.135	1.178	1.191	1.231

* ตัวอย่างขาดก่อนกำหนด

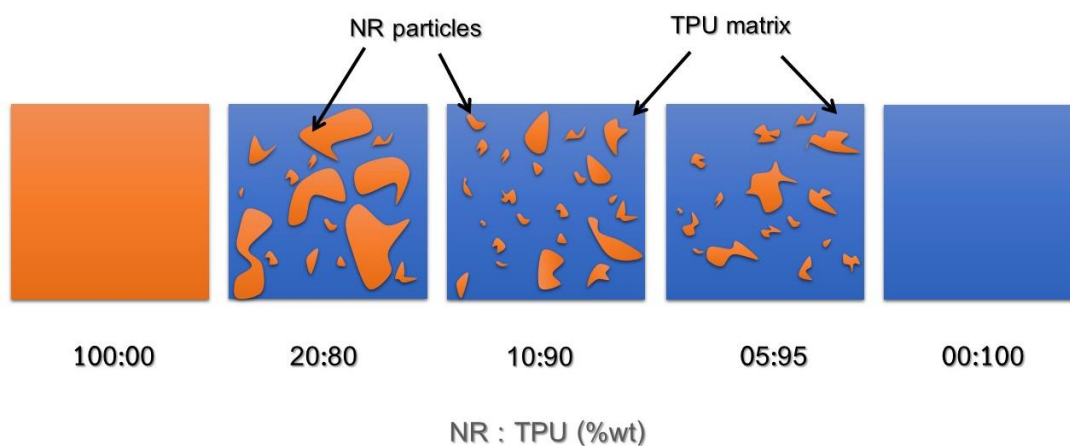


รูปที่ 4.9 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



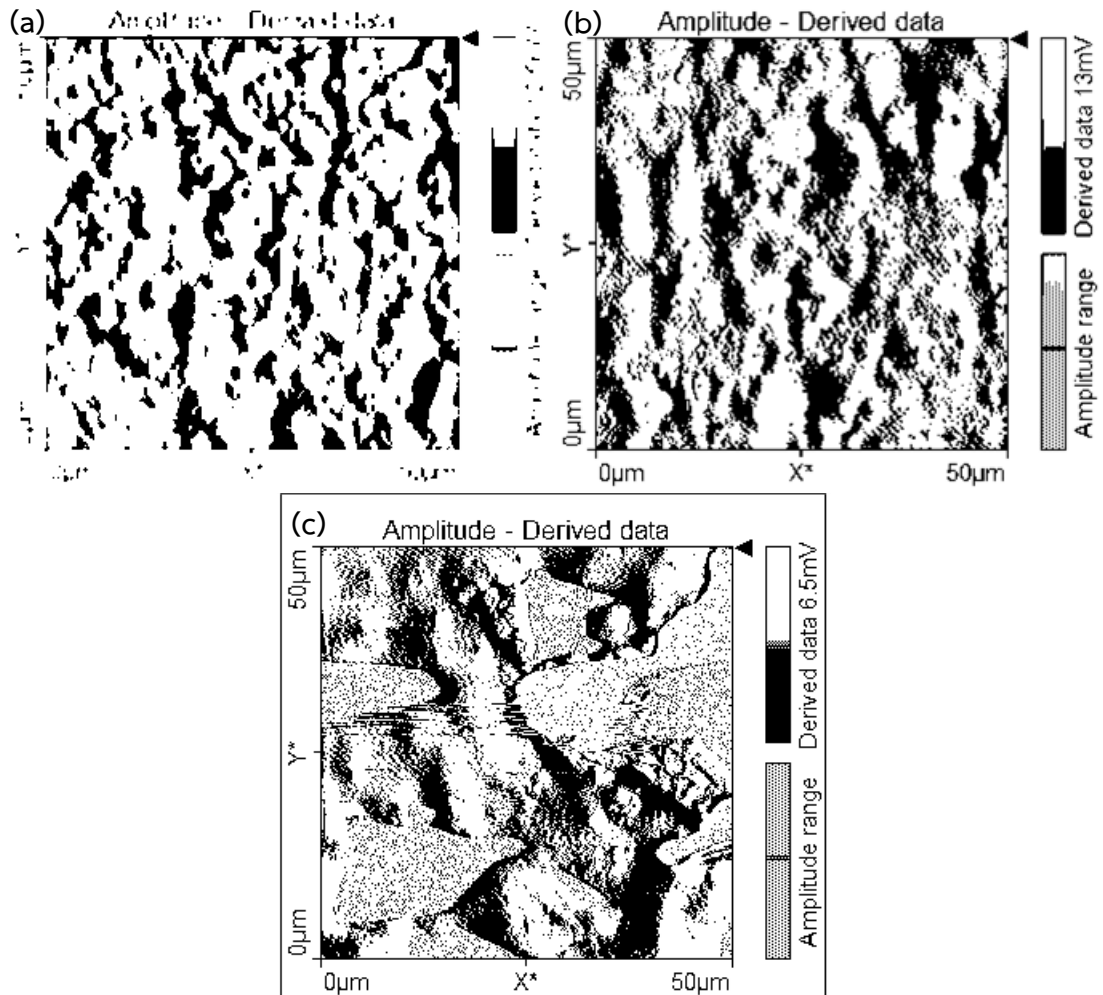
รูปที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

จากรูปที่ 4.9-4.10 แสดงค่าความแข็งและ 100% มอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 0:100, 05:95, 10:90 และ 20:80 ส่วนโดยน้ำหนักพบว่า เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จะมีค่าความแข็งและค่า 100% มอดูลัสมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน คือมีค่าลดลงตามสัดส่วนที่ของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติที่มีลักษณะสายโซ่ยาวและเป็นเส้นตรงทำให้มีคุณสมบัติยืดหยุ่นและเกิดการขยับได้ง่ายเมื่อมีแรงกระทำ ซึ่งส่งผลต่อระยะยืด ณ จุดขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อ TPU เป็น 05:95 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักอันเนื่องมาจากสมบัติความเป็นอิลาสติกที่มากขึ้นแต่จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนยางธรรมชาติเป็น 20:80 ส่วนโดยน้ำหนักในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดต่ำลงตามปริมาณของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของวัสดุผสมจะขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีความต่างกันในเรื่องของความเป็นขี้ของโครงสร้างทางเคมีทำให้เข้ากันได้ไม่ดีและเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคยางธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ในสัดส่วน 20:80 ส่วนโดยน้ำหนักดังแบบจำลองในรูปที่ 4.11 แต่ในสัดส่วนที่ 5:95 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักยังมีความแข็งแรงที่สูงสามารถนำไปใช้งานได้



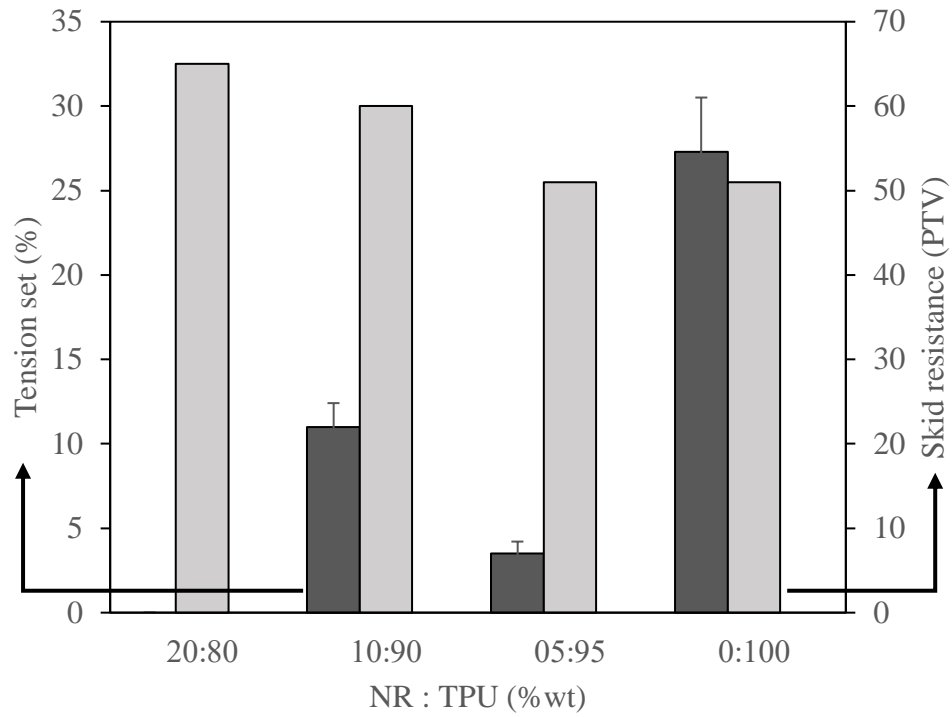
รูปที่ 4.11 แบบจำลองลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคยางธรรมชาติในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วนต่างกัน

จากการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคในเฟสกระจายที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้ดังที่แสดงในหัวข้อที่ 4.3.2 การทดสอบทางสัญญาณวิทยาจะสามารถช่วยยืนยันเหตุผลทางวิทยาศาสตร์ที่กล่าวมาข้างต้นได้ โดยในการทดสอบทางสัญญาณวิทยาด้วยเทคนิค AFM ในการทดสอบเพื่อดูขนาดของอนุภาคในเฟสกระจาย ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.12

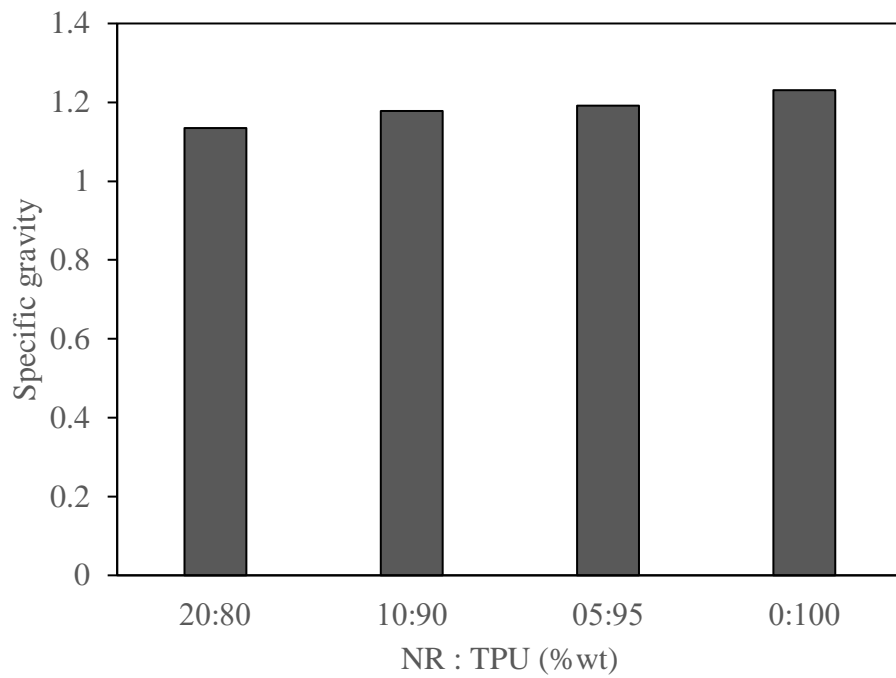


รูปที่ 4.12 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน (a) 05:95, (b) 10:90 และ (c) 20:80 ส่วนโดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.12 (a) – (c) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 05:95, 10:90 และ 20:80 ส่วนโดยน้ำหนักที่มีเฟสกระจายคือยางธรรมชาติ (สีดำ) พบว่า อนุภาคของเฟสกระจายมีการกระจายตัวแย่งและมีอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติเนื่องมาจากแรงตึงผิวระหว่างเฟสที่เพิ่มมากขึ้นเพราะความไม่เข้ากันในเรื่องความเป็นขั้วของวัสดุส่งผลให้ยางธรรมชาติที่เป็นเฟสกระจายเกิดการเกาะกลุ่มกันเมื่อปริมาณมากขึ้น ทำให้อนุภาคเกิดขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุที่กระจายตัวไม่ดีและอนุภาคมีขนาดใหญ่ไม่ตีตามไปด้วยดังตารางที่ 4.6

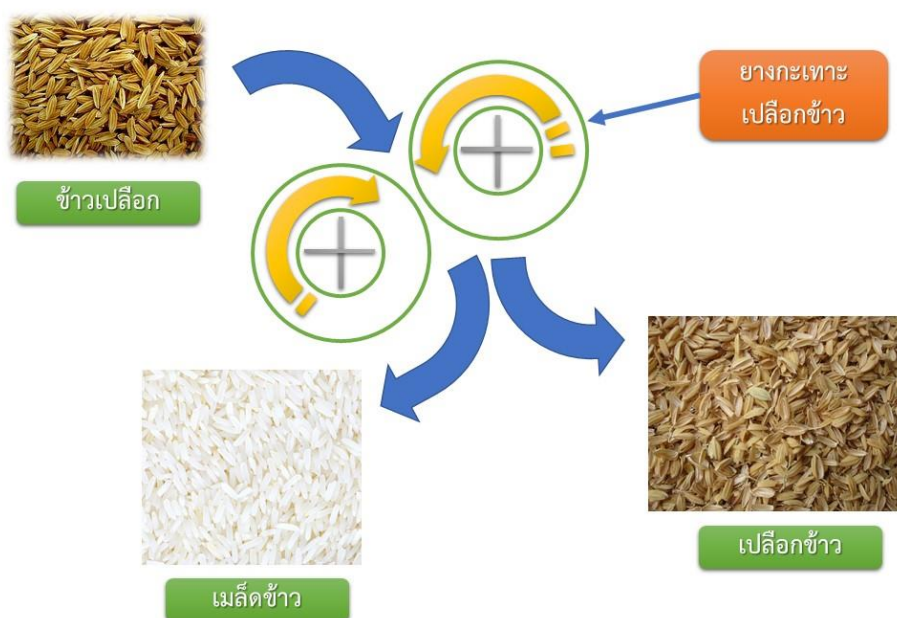


รูปที่ 4.13 สมบัติการผิดรูปถาวรและค่าความต้านทานต่อการลื่นไถลของเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



รูปที่ 4.14 ความถ่วงจำเพาะของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์แปรปริมาณของเทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทน

จากรูปที่ 4.13-4.14 แสดงสมบัติการผิตรูปถาวรโดยการดึง ความต้านทานต่อการลื่นไถล และความถ่วงจำเพาะของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ พบว่าสมบัติการผิตรูปถาวรของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีการผิตรูปน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 05:95 ส่วนโดยน้ำหนักและแย่งเมื่อสัดส่วนของยางเพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวกันเป็นสายโซ่ตรงและยาวขดอยู่เป็นอนุสรณเหมือนสปริงเมื่อถูกดึงยืดและปล่อยออกทำให้มีการเคลื่อนที่คืนสภาพเดิมได้ดี แต่แรงยืดเหนี่ยวระหว่างเฟสของยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากความไม่เข้ากันในเรื่องของความเป็นขั้ว ทำให้สมบัติแย่งเมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติที่สัดส่วน 10:90 และ 20:80 ส่วนโดยน้ำหนัก นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติยังส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการลื่นไถลมีค่าสูงขึ้น ซึ่งบ่งบอกได้ว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้มีแรงเสียดทาน (Friction) มากขึ้นด้วย เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นสายโซ่ยาวเมื่อมีแรงกระทำจะมีความยืดหยุ่นและมีการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ง่าย สมบัติความต้านทานต่อการลื่นไถลที่เพิ่มขึ้นทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นยางกะเทาะเปลือกข้าวดังรูปที่ 4.15 ทำให้สามารถแยกเมล็ดข้าวออกได้เปลือกข้าวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติความลื่นไถลต่ำ



รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการแยกเมล็ดข้าวออกจากเปลือกโดยการใช้ยางกะเทาะเปลือกข้าว

หัวข้อการศึกษาที่ 4.3.2 ที่ศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สรุปได้ว่า การเติมยางธรรมชาติในเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้โดยสัดส่วน 10:90 และ 05:95 ส่วนโดยน้ำหนักมีระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มมากขึ้น และสมบัติการผิดรูปถาวร และค่าความต้านทานต่อการลื่นไถลที่มุ่งเน้นที่จะพัฒนาเพิ่มขึ้นโดยสัดส่วนที่เหมาะสมคือ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นยางกะเทาะเปลือกข้าวต้องการสมบัติเด่นเรื่องความต้านทานต่อการลื่นไถลเพื่อให้เกิดแรงเสียดทานในการแยกเมล็ดข้าวออกจากเปลือกข้าว และที่สัดส่วน 20:80 ส่วนโดยน้ำหนักมีสมบัติแย่งลงเนื่องจากอนุภาคของยางธรรมชาติเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และกระจายตัวไม่ตั้งการทดสอบทางสัณฐานวิทยา

4.4 ผลของการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

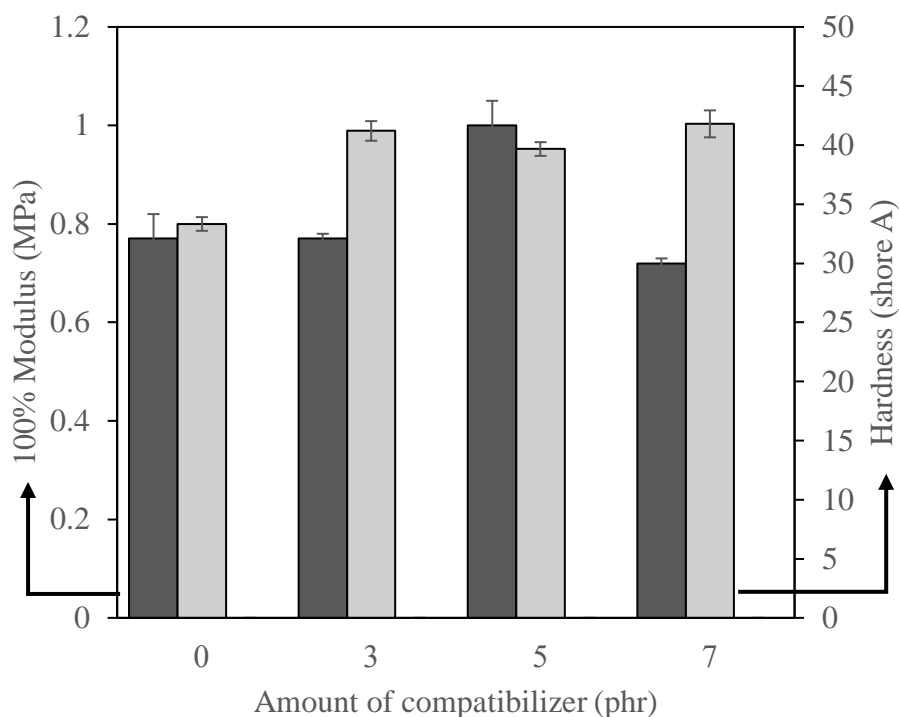
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของยางให้ดีขึ้นที่สัดส่วน 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักและยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติการผิวรูปถาวรและสมบัติความต้านทานต่อการลื่นไถลของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนได้ที่สัดส่วน 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักแต่ความไม่เข้ากันในเรื่องของความเป็นขั้วระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนทำให้มีสมบัติด้อยลงเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้น การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่อาจเป็นอีกทางเลือกที่ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. ศึกษาปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เทียบสัดส่วนที่ 0, 3, 5 และ 7 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ 2. ศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้โดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางไนไตรล์โดยเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่สัดส่วน 90:10 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักผลเป็นดังหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2

4.4.1 ผลของการศึกษาปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

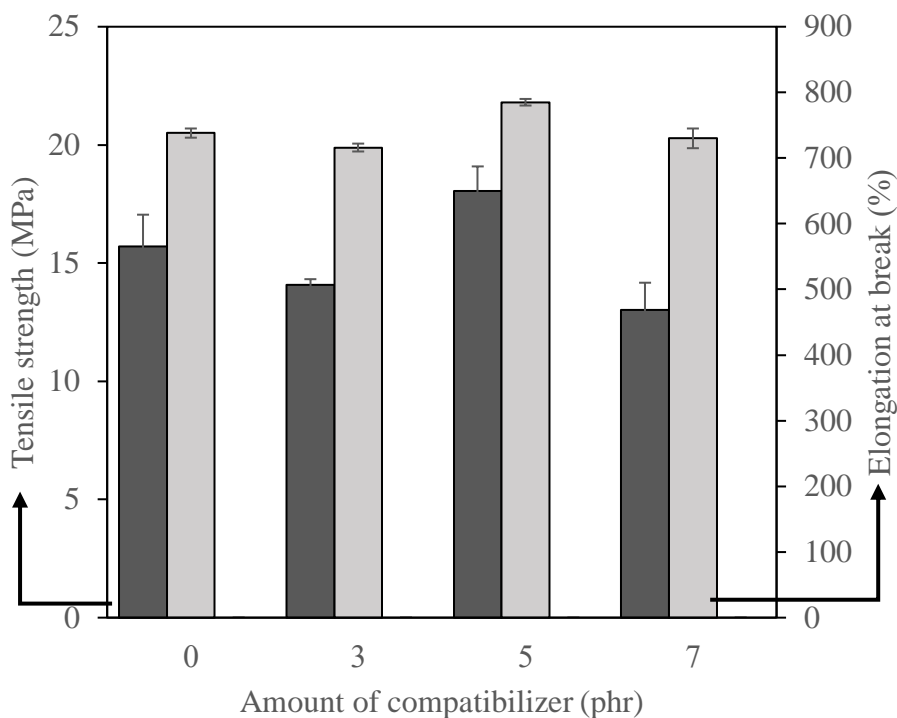
ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเท่ากับ 90:10 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ โดยแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ 0 3 5 และ 7 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ ผลเป็นดังตารางที่ 4.9-4.10

ตารางที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรสัดส่วนวัสดุ ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Properties	Amount of compatibilizer (phr)			
	0	3	5	7
Hardness (shore A)	33.33±0.58	41.20±0.83	41.80±0.83	41.60±1.14
100% Modulus (MPa)	0.77±0.05	0.77±0.01	1.00±0.05	0.72±0.01
Tensile strength (Mpa)	15.70±1.35	14.07±0.25	18.06±1.03	13.03±1.14
Elongation at break (%)	738±7	716±6	785±5	730±15



รูปที่ 4.16 มอดูลสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุง สมบัติที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

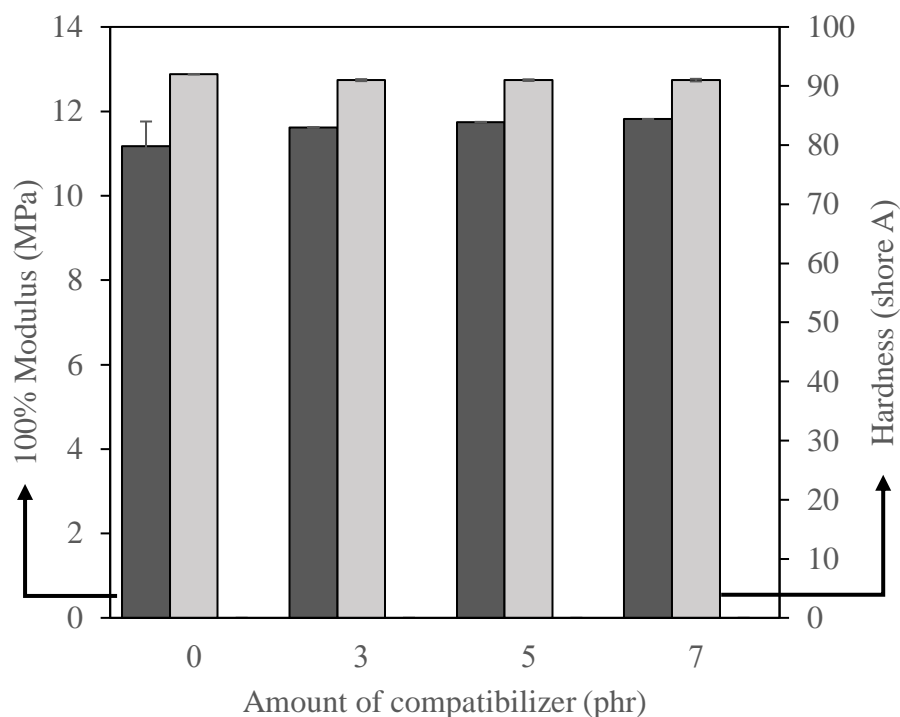


รูปที่ 4.17 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

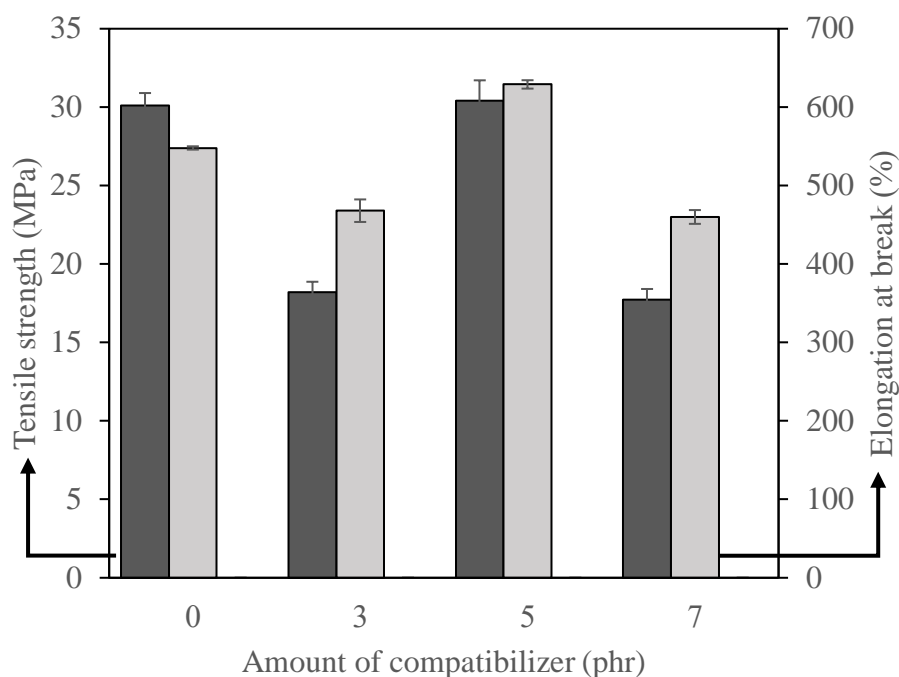
จากรูปที่ 4.16-4.17 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักและมีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ดีที่สุดส่วน 0 3 5 และ 7 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ พบว่า มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติมีสมบัติที่ดีที่สุดเมื่อเติมวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกไซด์ที่มีความเป็นขั้วและมีส่วนประกอบของโครงสร้างเหมือนกับยางธรรมชาติ ส่งผลให้การผสมระหว่างเฟสของยางธรรมชาติกับเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนดีขึ้น

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่แปรสัดส่วนวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Properties	Amount of compatibilizer (phr)			
	0	3	5	7
Hardness (shore A)	92.00±0.58	91.00±0.00	91.00±0.00	91.00±0.00
100% Modulus (MPa)	11.18±0.04	11.62±0.17	11.75±0.14	11.82±0.22
Tensile strength (MPa)	30.10±0.80	18.20±0.67	30.40±1.31	17.74±0.67
Elongation at break (%)	548±2	468±14	629±5	460±8



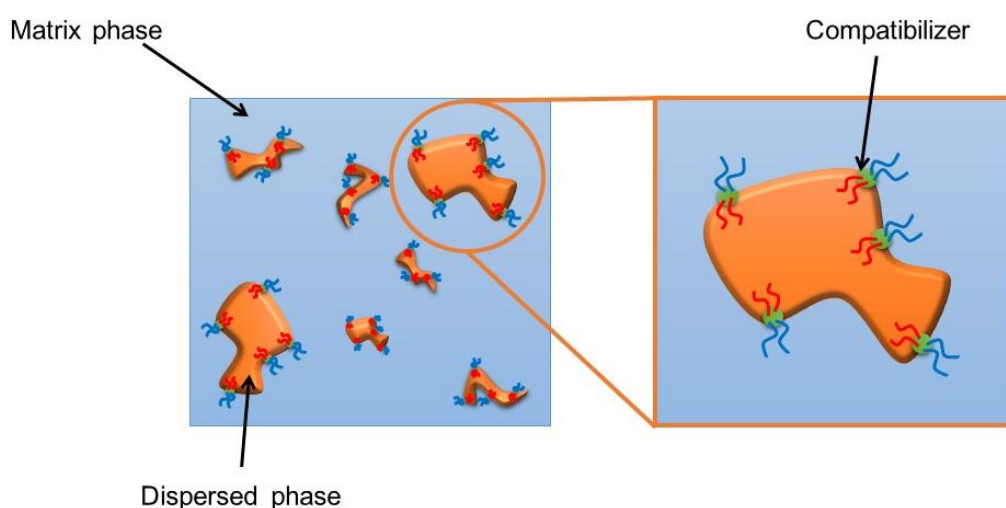
รูปที่ 4.18 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 4.19 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.18-4.19 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและมีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สัดส่วน 0 3 5 และ 7 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ พบว่าค่าความแข็งและมอดูลัสที่ระยะยืด 100 % ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการแปรสัดส่วนของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเมื่อเทียบสัดส่วนระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนยังคงมีค่าเท่าเดิมที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและพบว่าการเติมวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยางส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกไซด์ที่มีความเป็นขั้วและมีส่วนประกอบของโครงสร้างเหมือนกับยางธรรมชาติ ส่งผลให้การผสมระหว่างเฟสของยางธรรมชาติกับเฟสของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนดีขึ้น แต่เมื่อเติมวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มากขึ้นที่ 7 ส่วนเมื่อเทียบกับยางร้อยละกับมีคุณสมบัติที่แย่งอันเนื่องมาจากการแยกเฟสของยางธรรมชาติอีพอกไซด์เกิดเป็นเฟสที่สามขึ้นในเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ส่งผลให้แรงยืดเหนียวระหว่างโมเลกุลในยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกลดลง

หัวข้อการศึกษาที่ 4.4.1 ที่ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเท่ากับ 10:90 และ 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ โดยแปรปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ 0 3 5 และ 7 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ สรุปลงได้ว่าปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ โดยลักษณะการทำงานของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) มีลักษณะดังแบบจำลองในรูปที่ 4.20



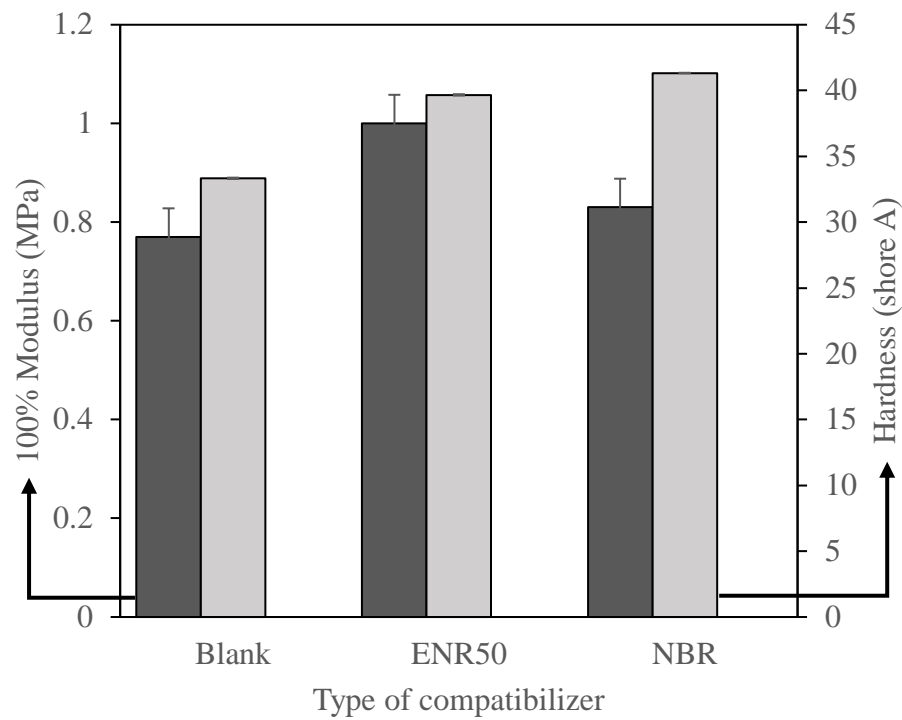
รูปที่ 4.20 แบบจำลองลักษณะการทำงานที่ของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

4.4.2 ผลของการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

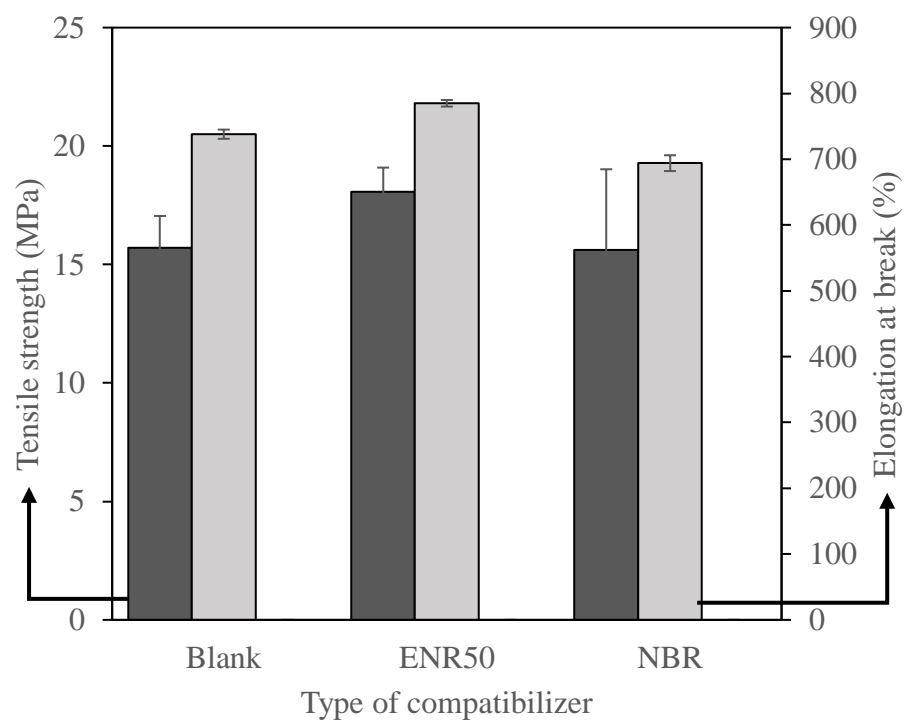
ศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเท่ากับ 90:10 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักโดยการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางไนไตรล์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สัดส่วนที่ดีที่สุดจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.1 คือ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ ผลเป็นดังตารางที่ 4.11-4.12

ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรชนิดของวัสดุ ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

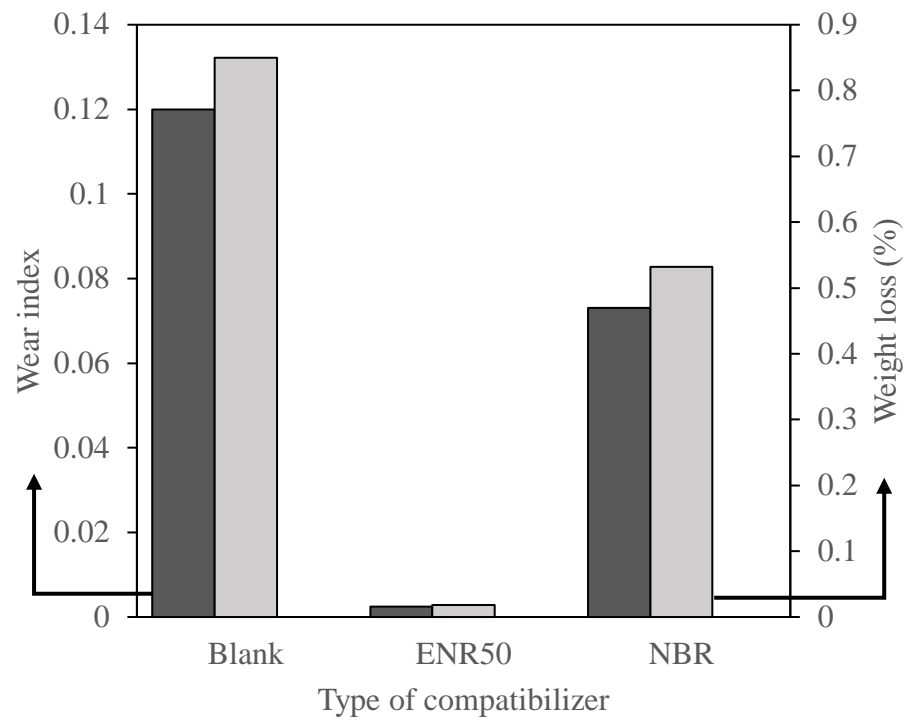
Properties	Type of compatibilizer		
	Blank	ENR50	NBR
Hardness (shore A)	33.33±0.58	41.80±0.83	41.33±0.58
100% Modulus (MPa)	0.77±0.05	1.00±0.05	0.83±0.02
Tensile strength (MPa)	15.70±1.35	18.06±1.03	15.62±3.40
Elongation at break (%)	738±7	785±5	694±12
Wear index	0.1200	0.0025	0.0730
Weight loss (%)	0.850	0.018	0.532
Specific gravity	0.995	0.982	0.984



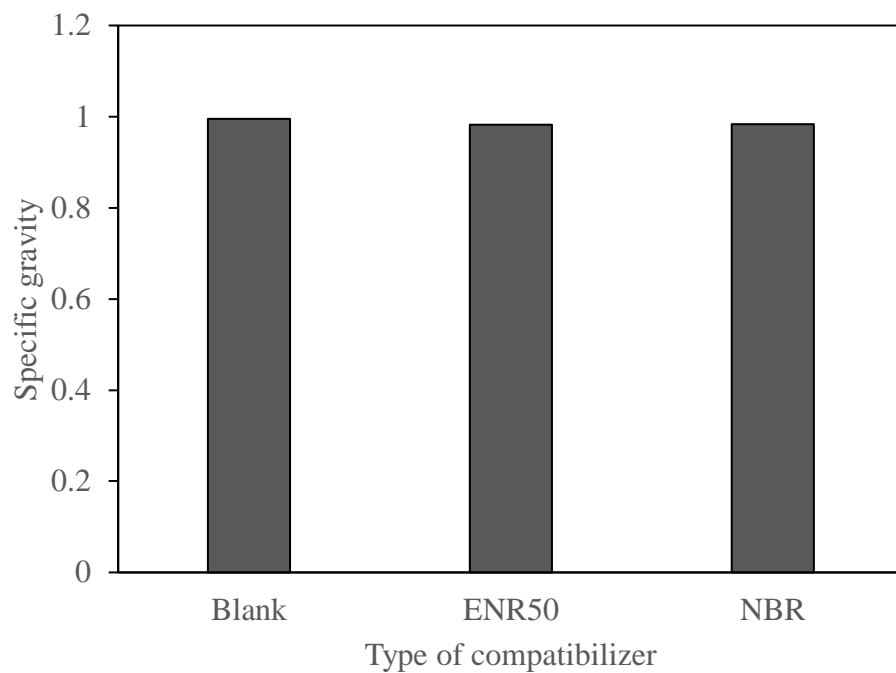
รูปที่ 4.21 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 4.23 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่แปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

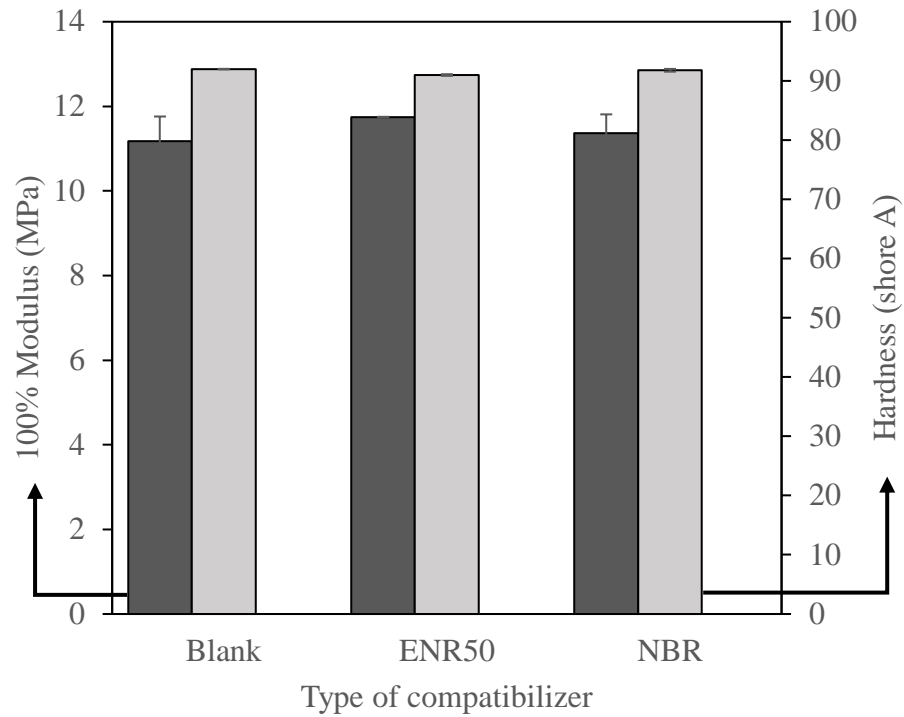


รูปที่ 4.24 ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติที่เติม TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

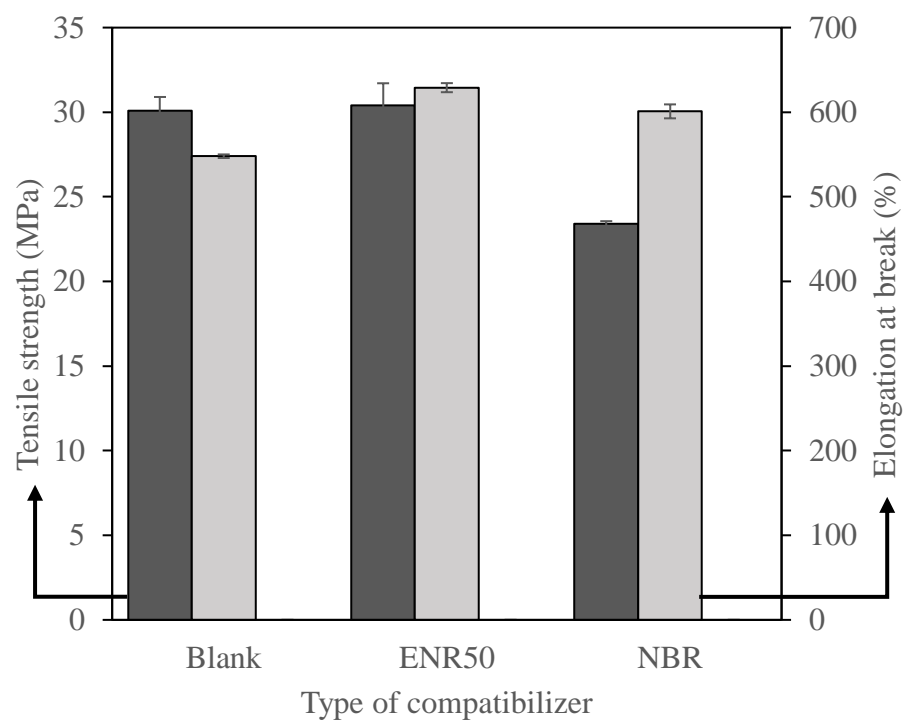
จากรูปที่ 4.21-4.22 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักและมีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางไนไตรล์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้พบว่า ชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มีผลต่อสมบัติเชิงกลซึ่งการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ให้สมบัติมอดูลัสที่ระยะยืด 100% ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ที่ดีกว่ายางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีการเติมวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยอีพอกไซด์ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น ทำให้ในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole interactions) ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เตรียมได้ในทางกลับกันการใช้ยางไนไตรล์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ได้ส่งผลให้สมบัติด้านนี้ดีขึ้น แต่สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอให้ดีขึ้นได้ดังรูปที่ 4.23 เนื่องจากยางไนไตรล์มีโครงสร้างของหมู่เอคริโลไนไตรล์ที่เป็นหมู่ที่มีขนาดใหญ่ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อมีแรงมากระทำเป็นไปได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ยังให้สมบัติที่ดีกว่าเนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่มีความคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติแล้วอันตรกิริยาเชิงขั้วที่เกิดขึ้นทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่แข็งแรงทำให้มีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี นอกจากนี้รูปที่ 4.24 การใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ไม่ได้ส่งผลต่อความถ่วงจำเพาะของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีสัดส่วนการใช้ที่น้อยมาก

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่แปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Properties	Type of compatibilizer		
	Blank	ENR50	NBR
Hardness (shore A)	92.00±0.58	91.00±0.00	91.80±0.44
100% Modulus (MPa)	11.18±0.04	11.75±0.14	11.37±0.23
Tensile strength (MPa)	30.1±0.80	30.4±1.31	23.4±0.16
Elongation at break (%)	548±2	629±5	601±8
Tension set (%)	11.0±1.41	10±1.41	12.5±2.12
Skid resistance (PTV)	60	60	61
Specific gravity	1.178	1.181	1.179

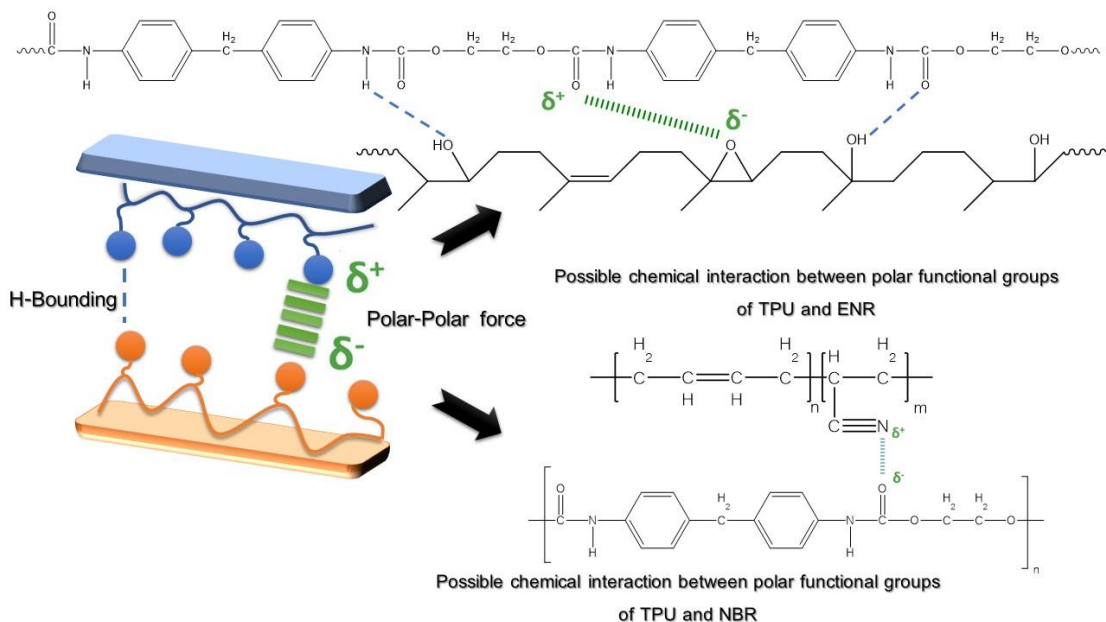


รูปที่ 4.25 โมดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

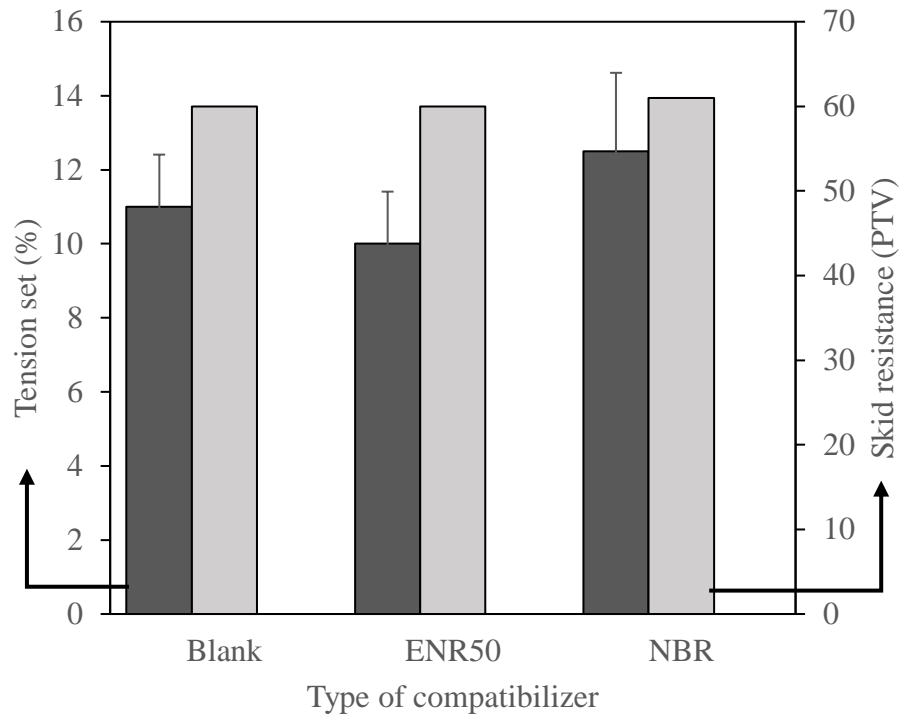


รูปที่ 4.26 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

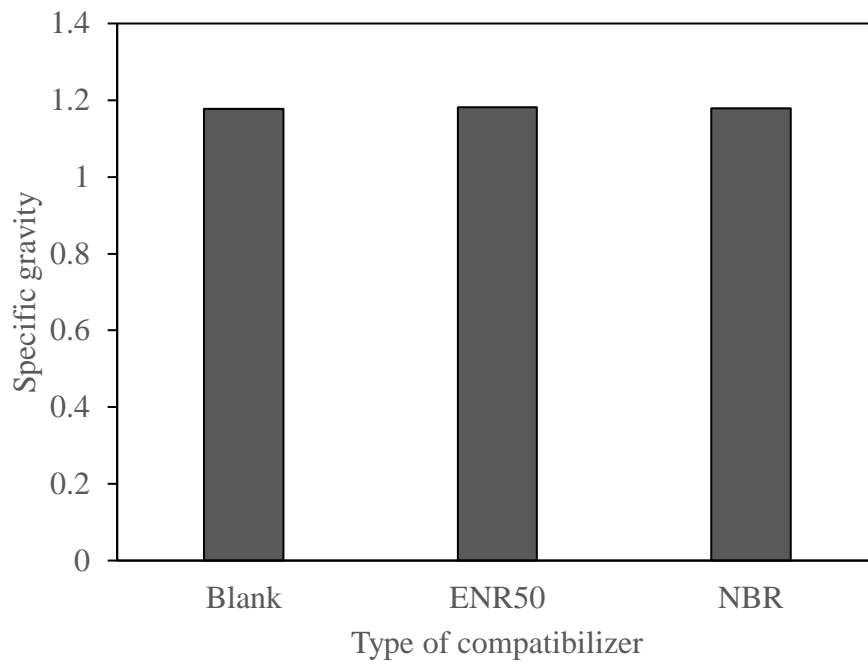
จากรูปที่ 4.24-4.26 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและมีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางไนไตรล์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้พบว่า การเติมวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกให้ดีขึ้นได้เมื่อเทียบกับการไม่เติมเนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยอีพอกไซด์และยางไนไตรล์มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์เป็นองค์ประกอบทำให้วัสดุมีความเป็นขั้วสูงเมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ส่งผลให้ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น ในการผสมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนจึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole interactions) ดังรูปที่ 4.27 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ใช้เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ให้สมบัติที่ดีกว่ายางไนไตรล์เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกไซด์มีลักษณะโครงสร้างหลักที่เหมือนกับยางธรรมชาติมากกว่ายางไนไตรล์



รูปที่ 4.27 ความเป็นไปได้ในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางไนไตรล์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน



รูปที่ 4.28 สมบัติการผิดรูปถาวรและความต้านทานต่อการลื่นไถลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้



รูปที่ 4.29 ความถ่วงจำเพาะของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มีการแปรชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

จากรูปที่ 4.28-4.29 แสดงสมบัติการผิวดรูปถาวร ความต้านทานต่อการลื่นไถล และ ความถ่วงจำเพาะของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและมีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์และยางไนไตรล์เป็น วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้พบว่า การใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เป็นยางไนไตรล์ส่งผลให้สมบัติ การผิวดรูปถาวรมีการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของยางไนไตรล์มีรูปแบบเป็น กิ่งส่งผลให้การคืนตัวของวัสดุมีความสามารถลดลง นอกจากนี้ชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติความต้านทานการลื่นไถลหรือความถ่วงจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญ

หัวข้อการศึกษาที่ 4.4.2 ที่ศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ส่งผลต่อ สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติและเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ มีการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน เท่ากับ 90:10 และ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยศึกษาการใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับยางไนไตรล์ เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ สรุปได้ว่าการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้สามารถช่วยปรับปรุง สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกได้โดยที่ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความ เข้ากันได้ที่ดีกว่ายางไนไตรล์

4.5 ผลของการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ

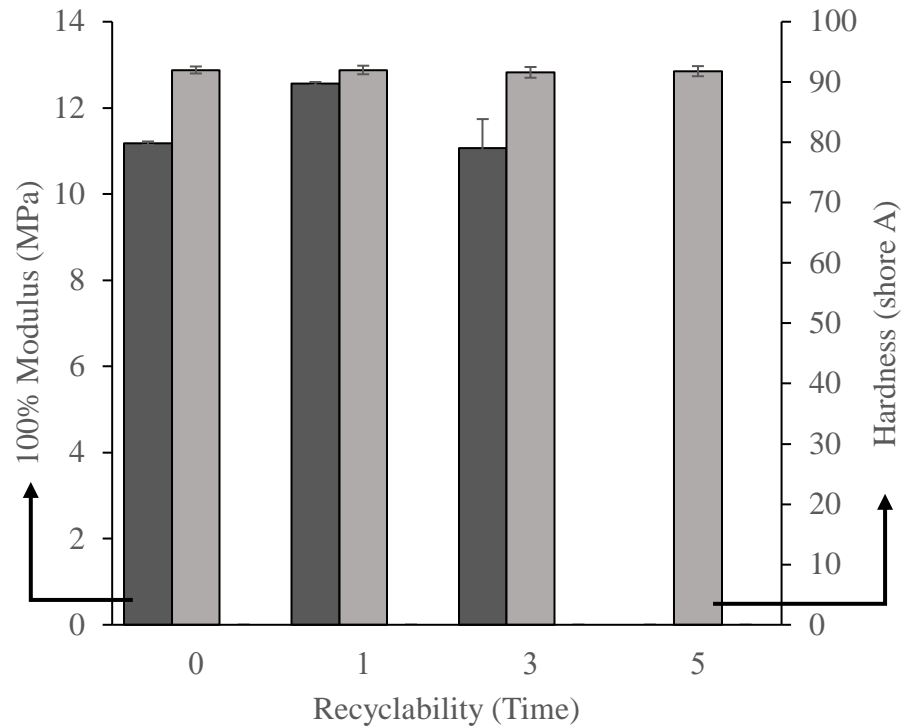
การทดลองความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการรีไซเคิล โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. ศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำมาผสมกับยางธรรมชาติ 2. ศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ในการทดลองใช้สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ ซึ่งป็นสูตรที่ดีที่สุดจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4

4.5.1 ผลของการศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ

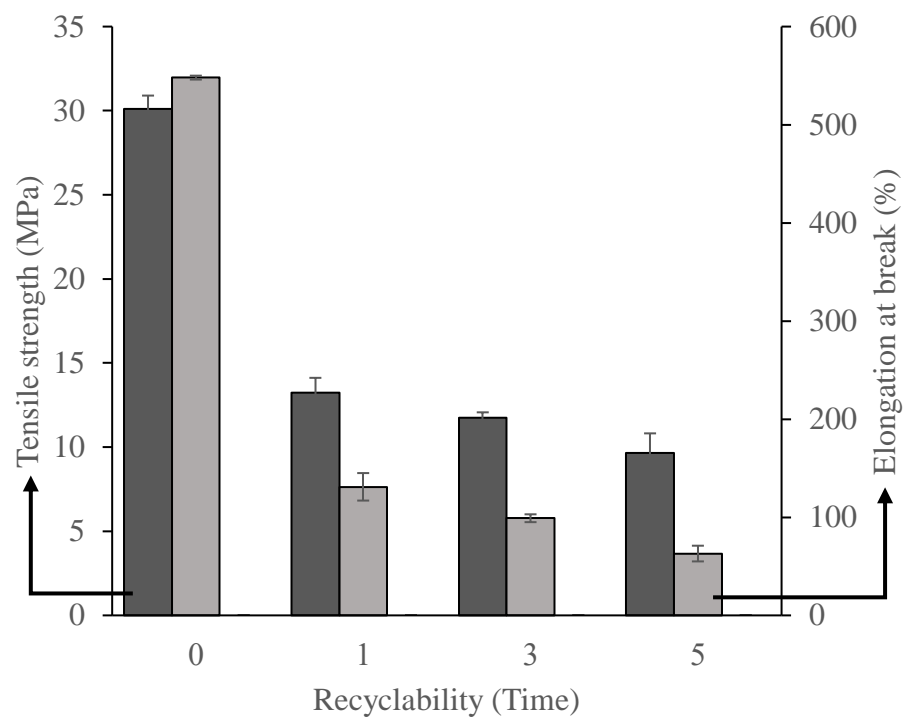
ศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ โดยนำเอาเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบ มาผสมกับยางธรรมชาติที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ และทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปผลเป็นดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำต่างกัน

Properties	Recyclability (Time)			
	0	1	3	5
Hardness (shore A)	92.00±0.58	92±0.71	91.6±0.89	91.8±0.84
100% Modulus (MPa)	11.18±0.04	12.56±0.04	11.06±0.68	-
Tensile strength (MPa)	30.10±0.80	13.23±0.89	11.76±0.31	9.66±1.16
Elongation at break (%)	548±2	131±14	99±4	63±8



รูปที่ 4.30 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำต่างกัน



รูปที่ 4.31 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำต่างกัน

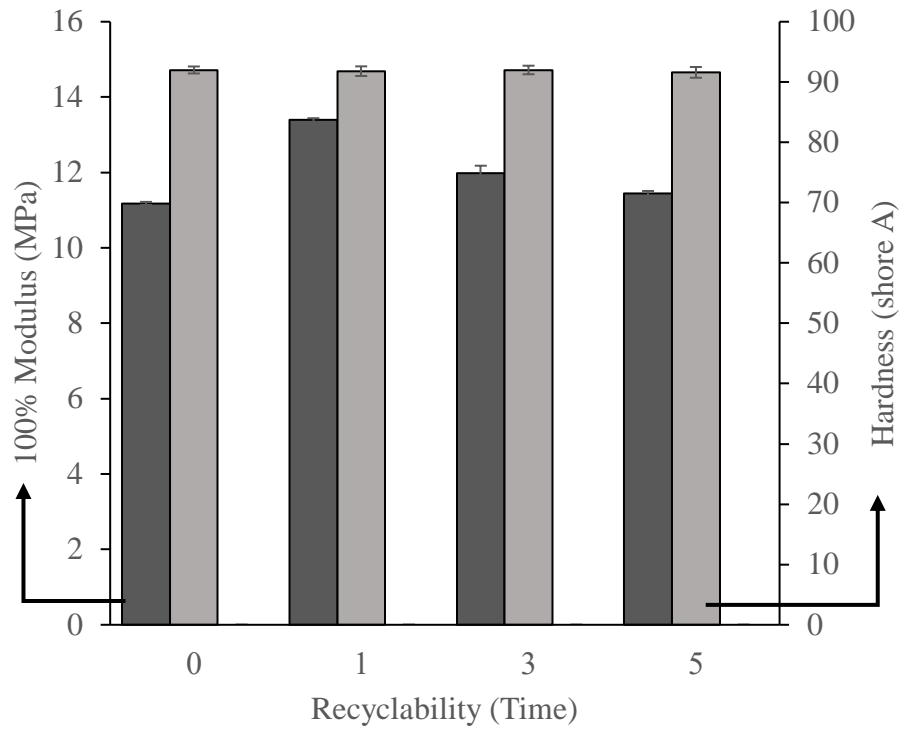
จากรูปที่ 4.30–4.31 แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบและนำมาผสมกับยางธรรมชาติที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละพบพบว่า สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลงเนื่องมาจากการแปรรูปซ้ำได้ผ่านกระบวนการบดย่อยและกระบวนการทางความร้อน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของวัสดุที่เตรียมได้ถูกตัดขาดและเสื่อมสภาพลงทำให้สมบัติเชิงกลแย่งลงไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้ก็สามารถยืนยันได้ว่าการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำสามารถนำมาผสมกับยางธรรมชาติให้เกิดเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้

4.5.2 ผลของการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

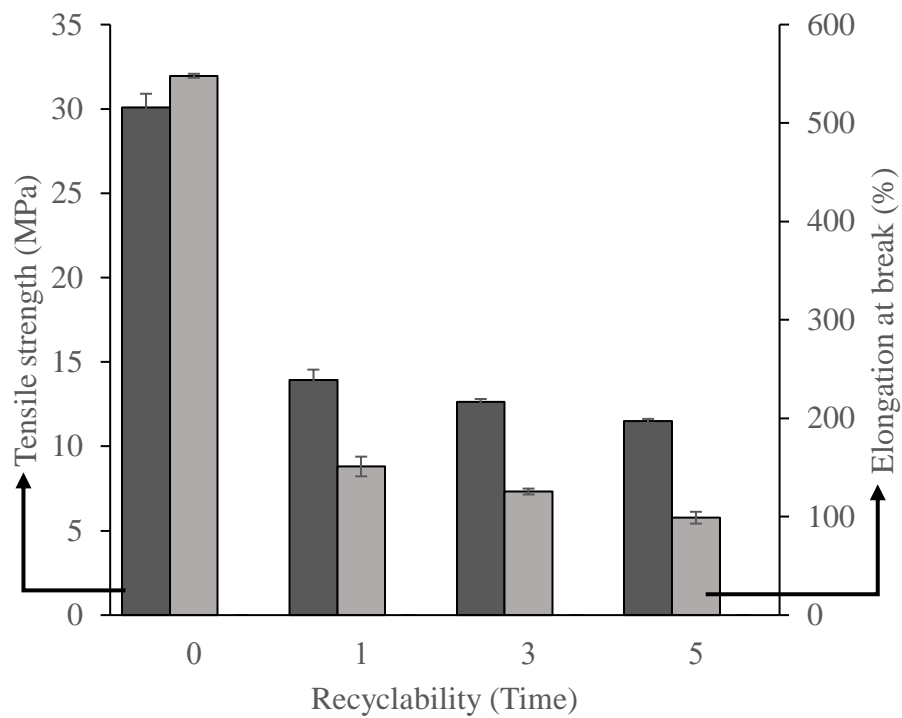
ศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ โดยทำการทดลองแปรรูปซ้ำจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบ และทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปผลเป็นดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ

Properties	Recyclability (Time)			
	0	1	3	5
Hardness (shore A)	92.00±0.58	91.8±0.8	92±0.71	91.6±0.89
100% Modulus (MPa)	11.18±0.04	13.39±0.05	11.98±0.20	11.44±0.07
Tensile strength (MPa)	30.10±0.80	13.92±0.63	12.63±0.18	11.51±0.12
Elongation at break (%)	548±2	151±10	125.55±3	99±6



รูปที่ 4.32 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ



รูปที่ 4.33 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านการแปรรูปซ้ำ

จากรูปที่ 4.32-4.33 แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ โดยผ่านการแปรรูปซ้ำจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบ พบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติด้อยลงหลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปซ้ำเนื่องมาจากในการแปรรูปซ้ำได้ผ่านกระบวนการบดย่อยและกระบวนการทางความร้อน ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของวัสดุที่เตรียมได้ถูกตัดขาดและเสื่อมสภาพลงทำให้สมบัติเชิงกลแย่ง อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้ก็สามารถยืนยันได้ว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีความสามารถในการแปรรูปซ้ำได้

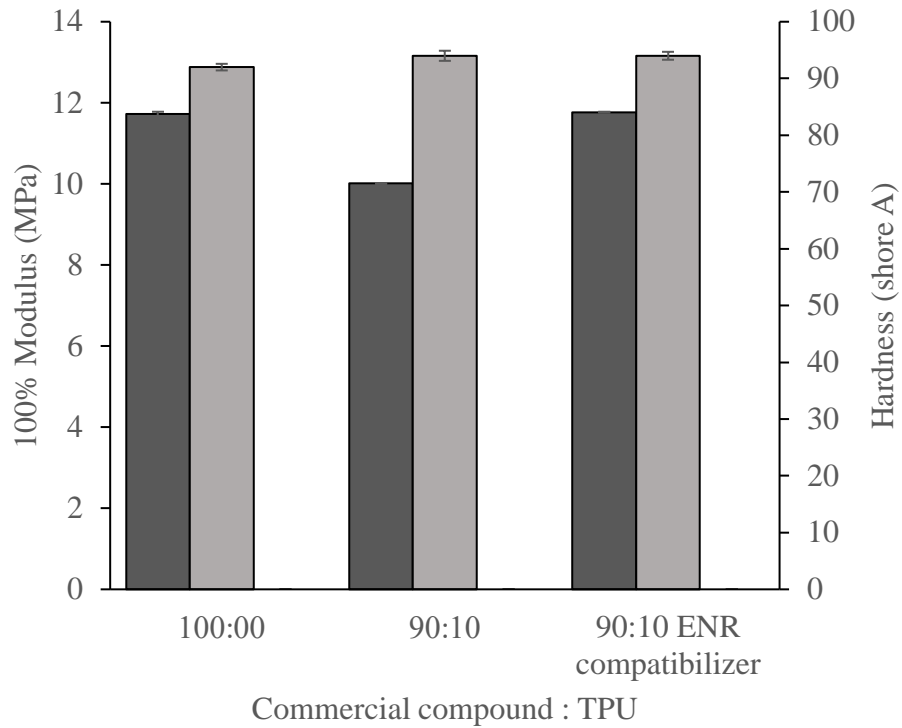
หัวข้อที่ 4.5 ที่ทำการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ โดยทำการศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำจำนวน 0 1 3 และ 5 รอบก่อนนำมาทำการผสมกับยางธรรมชาติ และทำการศึกษาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ที่สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ สรุปได้ว่า 1. การนำเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำมาผสมกับยางธรรมชาติยังคงสามารถทำให้เกิดเป็นวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้แต่สมบัติที่ได้จะด้อยลงตามจำนวนครั้งที่ผ่านการแปรรูปซ้ำมา และ 2. เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้มีความสามารถในการแปรรูปซ้ำเหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป แต่สมบัติที่ได้จะด้อยลงตามจำนวนครั้งที่ผ่านการแปรรูปซ้ำเช่นเดียวกัน

4.6 ผลของการเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติก พอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ

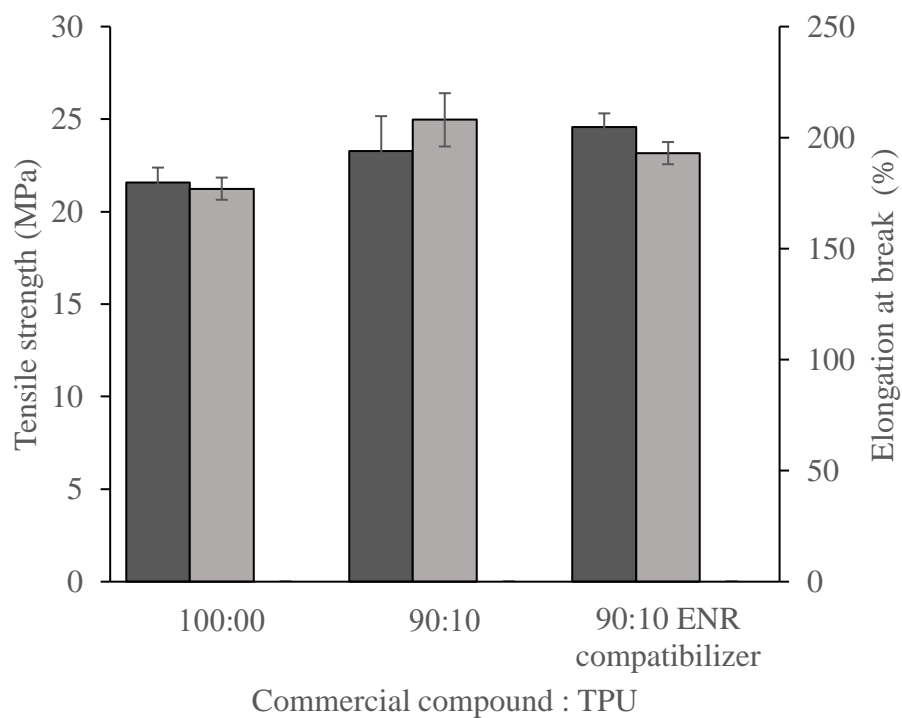
จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3-4.4 แล้วพบว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีความสามารถในการช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติได้และมีสมบัติเด่นในเรื่องความต้านทานต่อการขีดถูที่เพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้า โดยการผสมคอมพาวด์ยางกะเทาะเปลือกข้าวกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 90:10 ส่วนโดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้า ยางกะเทาะเปลือกข้าวที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติที่สัดส่วน 90:10 และยางกะเทาะเปลือกข้าวที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติที่สัดส่วน 90:10 ที่ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ปริมาณ 5 ส่วนเทียบกับยางร้อยละ ส่วน ผลเป็นดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ

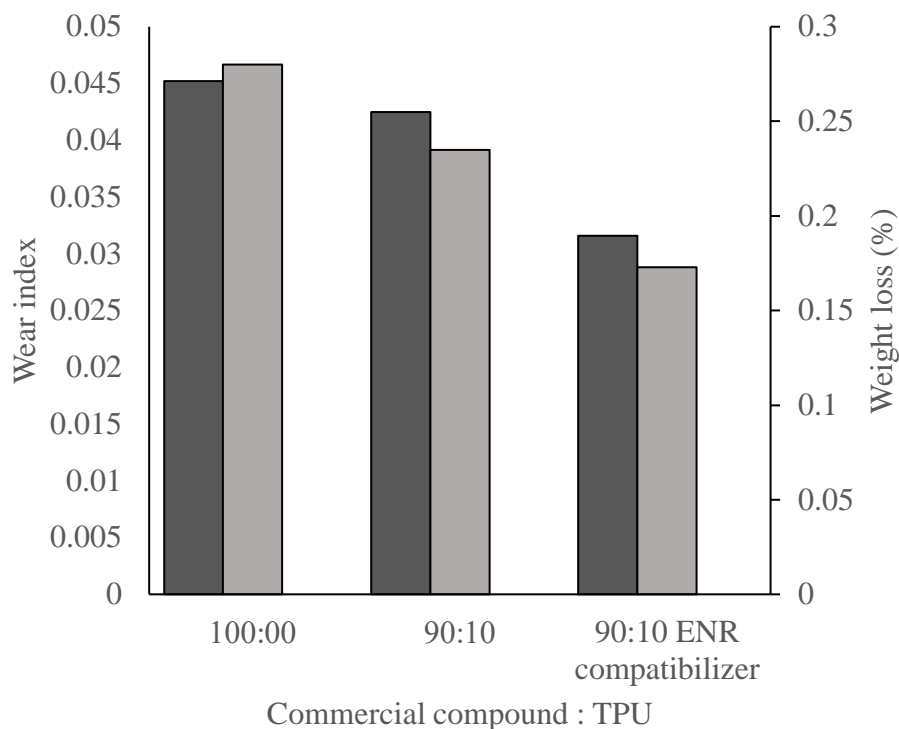
Properties	Commercial compound : TPU		
	100:00	90:10	90:10 ENR compatibilizer
Hardness (shore A)	92.00±0.58	94.00±0.89	94.00±0.70
100% Modulus (MPa)	11.72±0.06	10.01±0.01	11.77±0.01
Tensile strength (MPa)	21.58±0.80	23.28±1.88	24.56±0.75
Elongation at break (%)	177±5	208±12	193±5
Wear index	0.0452	0.0425	0.0316
Weight loss (%)	0.280	0.235	0.173



รูปที่ 4.34 มอดูลัสที่ระยะยัด 100% และความแข็งของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ



รูปที่ 4.35 ความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยัด ณ จุดขาด ของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ



รูปที่ 4.36 ความต้านทานต่อการสึกหรอของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ

จากรูปที่ 4.34-4.36 แสดงสมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติพบว่า การเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางได้ โดยที่มีค่าความแข็ง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีส่วนที่จัดเรียงกันเป็นผลึกและองค์ประกอบของสายโซ่โมเลกุลที่เป็นห่วงวนเบนซินส่งผลให้มีความแข็งแรง และยังส่งผลให้มีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีขึ้น นอกจากนี้การเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์เป็นวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกข้าวดียิ่งขึ้น

หัวข้อที่ 4.6 ที่เปรียบเทียบสมบัติของยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ สรุปได้ว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางได้ นอกจากนี้การใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ยังช่วยให้สมบัติของยางกะเทาะเปลือกข้าวที่เติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนดีขึ้นอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ผลการศึกษาสภาวะการผสมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนด้วยเครื่องบดผสมแบบปิดคือการใช้สภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วโรเตอร์ 90 rpm และเวลาในการผสม 15 นาที

5.2 การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูป

ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรรูปพบว่ายางธรรมชาติที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนเป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติต้องใช้ระยะเวลาในการคงรูปยางขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีดัชนีการหลอมไหลน้อยลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางธรรมชาติ

5.3 การศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ผลการศึกษาสัดส่วนที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์พบว่ายางธรรมชาติที่ใช้ TPU เป็นวัสดุปรับปรุงสมบัติมีสมบัติที่เหมาะสมที่สุดที่สัดส่วน 90:10 ส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนโดยเลือกจากสมบัติเด่นด้านความต้านทานต่อการสึกหรอ และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีสมบัติที่เหมาะสมที่สุดที่สัดส่วน 10:90 ส่วนโดยน้ำหนักโดยเลือกจากสมบัติเด่นด้านการยืดรูปถาวร (Tension set) และความต้านทานต่อการลื่นไถล

5.4 การศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

ผลการศึกษาชนิดของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้พบว่าปริมาณของวัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 ส่วนโดยร้อยละเมื่อเทียบกับยาง และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ร้อยละ 50 โดยโมล เป็นวัสดุที่ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ได้ดีกว่ายางไนไตรล์

5.5 การศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุ

ผลการศึกษาความสามารถในการแปรรูปซ้ำของวัสดุพบว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่ผ่านการแปรรูปซ้ำมาแล้วสามารถนำมาผสมกับยางธรรมชาติเพื่อให้เกิดเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ได้ และเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่เตรียมได้สามารถแปรรูปซ้ำได้ แต่สมบัติต่าง ๆ ของวัสดุจะด้อยลงตามจำนวนครั้งในการแปรรูปซ้ำ

5.6 การเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติ

ผลการเปรียบเทียบสมบัติยางกะเทาะเปลือกข้าวทางการค้าที่ใช้เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนในการปรับปรุงสมบัติพบว่าเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกข้าวได้ และการใช้วัสดุช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ช่วยให้สมบัติของวัสดุผสมดีขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] ข้อเสนอ BCG in Action: The New Sustainable Growth Engine โมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/bcg-in-action-new-sustainable/ (สืบค้นเมื่อ 23 เมษายน 2564)
- [2] สถาบันพลาสติก. 2558. ยางเทอร์โมพลาสติก. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. <http://rubber.oie.go.th/Elibrary.aspx?cid=72> (สืบค้นเมื่อ 23 เมษายน 2564)
- [3] นายนเรนทร์ อาศัยพานิชย์. 2550. การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [4] Hofmann, W. 1989. Rubber technology handbook. Munich: Hanser Publishers.
- [5] Brydson, J.A. 2016. Rubbery materials and their compounds. Norfolk: Elsevier Science Publishers.
- [6] Drobny, J.G. 2014. Handbook of thermoplastic elastomers. San Diego: Elsevier Inc.
- [7] Harper, C.A. 1992. Handbook of plastics, elastomers, and composites. New York: McGraw-Hill, Inc.
- [8] Harper, C.A. 2006. Handbook of plastics technologies. The McGraw-Hill Companies. United states of America: McGraw-Hill.
- [9] Paul, D.R. 1978. Polymer blends. Texas: Academic Press Inc.
- [10] จารีนุช โรจน์เสถียร. 2554. ศึกษาการผสมระหว่างสไตรีน อะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ออปเกรดและยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [11] Hassan, A., Wahit, M. and Chee, C. 2003. Mechanical and morphological properties of PP/NR/LLDPE ternary blend—effect of HVA-2. Polym. Test. 281–290.
- [12] Fekete, I., Ronkay, F. and Lendvai, L. 2021. Highly toughened blends of poly(lactic acid) (PLA) and natural rubber (NR) for FDM-based 3D printing applications: The effect of composition and infill pattern. Polym. Test. 107205.
- [13] Salaeh, S., Bandaa, T., Pongdonga, P., Wießner, S., Das, A. and Thitithammawonga, A. 2018. Compatibilization of poly(vinylidene fluoride)/natural rubber blend by poly(methyl methacrylate) modified natural rubber. Eur. Polym. J. 107:132–142.

- [14] Pichaiyut, S., Nakason, C. and Vennemann, N. 2012. Thermoplastic elastomers-based natural rubber and thermoplastic polyurethane blends. *Iran. Polym. J.* 21:65–79.
- [15] Kalkornsurapranee, E., Vennemann, N., Kummerlöwe, C. and Nakason, C. 2012. Novel thermoplastic natural rubber based on thermoplastic polyurethane blends: influence of modified natural rubbers on properties of the blends. *Iran. Polym. J.* 21:689–700.
- [16] Pichaiyut, S., Nakason, C., Kummerlöwe, C. and Vennemann, N. 2011. Thermoplastic elastomer based on epoxidized natural rubber/thermoplastic polyurethane blends: influence of blending technique. *Polym. Adv. Technol.* 23:1011–1019.
- [17] Kalkornsurapranee, 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. *J. Appl. Polym. Sci.* 128(4): 2358-2367.
- [18] Pechurai, W., Nakason, C. and Sahakaro, K. 2008. Thermoplastic natural rubber based on oil extended NR and HDPE blends: Blend compatibilizer, phase inversion composition and mechanical properties. *Polym. Test.* 27:621-631.
- [19] Salaeh, S., Bandaa, T., Pongdonga, P., Wießner, S., Das, A. and Thitithammawonga, A. 2018. Compatibilization of poly(vinylidene fluoride)/natural rubber blend by poly (methyl methacrylate) modified natural rubber. *Eur. Polym. J.* 107:132–142.
- [20] Kalkornsurapranee, E., Koedthip, D., Songtipya, P., Prodpran, T., Johns, J., Nakaramontri, Y. and Songtipya, L. 2020. Influence of modified natural rubbers as compatibilizers on the properties of flexible food contact materials based on NR/PBAT blends. *Mater. Des.* 196:109134. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109134>.

ภาคผนวก ก.

ต้นฉบับบทความวิจัย

อิทธิพลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของยางเทอร์โมพลาสติกจากการ

เบลนด์ยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

อัครพงษ์ ตุลย์จิตราภรณ์, ณัฐวดี ศรีสองคอน, เอกวิญ กาลกรณ์สุรปราณี

และกานดา แข่งลอยเลื่อน

อิทธิพลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของยางเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์
ยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

Influence of compatibilizers on the properties of thermoplastic elastomer
based on natural rubber and thermoplastic polyurethane blends

อัครพงษ์ ตัญยจิตรารามณ์^{1*} ณัฐวดี ศรีสองคอน¹ เอกวิภู กาลกรณ์สุปราณี¹ และ กานดา แซ่ลยเลื่อน²

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยียาง (หลักสูตรนานาชาติ) วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

*Email: akarapong04@gmail.com

บทคัดย่อ

ศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic natural rubber, TPNR) ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) ที่สัดส่วนการผสม 100:0, 95:5, 90:10, 80:20 และ 0:100 โดยน้ำหนัก และศึกษาชนิดของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ในการเตรียม TPNR 2 ชนิด ได้แก่ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีโมลเปอร์เซ็นต์อีพอกไซด์เท่ากับ 50 (Epoxidized natural rubber-50, ENR50) และยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) ที่ปริมาณ 5 phr TPNR ที่เตรียมได้นำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเบ้าเพื่อเตรียมตัวอย่างในการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติเชิงกล และความต้านทานต่อการสึกหรอ พบว่า การเตรียม TPNR ระหว่าง NR กับ TPU ที่สัดส่วน 95:5 ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการสึกหรอของ TPNR ให้ดีขึ้น และจากการศึกษาชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่า การใช้ยาง ENR50 สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง NR กับ TPU โดยจะเห็นได้จากค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับสูตรยางที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ และมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า TPNR ที่ใช้ยาง NBR เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

คำสำคัญ: เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Abstract

Study of thermoplastic natural rubber (TPNR) based on natural rubber (NR) and thermoplastic polyurethane (TPU) blends with the blending ratios of NR compound and TPU at 100:0, 95:5, 90:10, 80:20 and 0:100 by weight. The effect of compatibilizer types on the properties of TPNR were studied by using epoxidized natural rubber with 50 mole% of epoxide (ENR50) and nitrile rubber (NBR) for 5 phr. TPNR were shaped by using a compress molding to obtain test specimens for testing some mechanical properties and abrasion resistance. TPNR with the blend ratio of NR and TPU at 95:5 showed a better improvement of mechanical properties and abrasion resistance property compared to other blend ratios. The use of ENR50 as a compatibilizer for NR/TPU blends gave a better compatibility of between NR and TPU as an improvement of tensile strength compared to TPNR without any compatibilizer and a higher mechanical properties compared to TPNR with NBR as a compatibilizer.

Keywords: Thermoplastic elastomer, Thermoplastic natural rubber, Compatibilizer

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีอิทธิพลในชีวิตประจำวันมากในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องแต่งกาย บรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์ หรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น โดยพลาสติกสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และเทอร์โมเซตติง (thermosetting) ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทก็จะมีจุดเด่นและข้อดีแตกต่างกันออกไป แต่ข้อเสียหลัก ๆ ของพลาสติกส่วนใหญ่คือ มีความเปราะ แตกหักง่ายเมื่อโดนแรงกระแทก จึงมีนักวิจัยพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมาเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer; TPEs) หรือยางเทอร์โมพลาสติก วัสดุชนิดนี้มีความสามารถในการขึ้นรูปเหมือนพลาสติก และมีสมบัติยืดหยุ่นอ่อนนุ่มคล้ายยาง ซึ่งการเตรียมยางเทอร์โมพลาสติกที่เป็นที่นิยมคือการผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกกับอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic-elastomer blends) เช่น งานวิจัยของ Pichaiyut และคณะ (2012) ได้ศึกษายางเทอร์โมพลาสติก โดยการนำเอาเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (thermoplastic polyurethane; TPU) มาผสมกับยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิคการผสมแบบปกติและทำการศึกษาอิทธิพลของยางสองชนิดที่แตกต่างกันระหว่าง ยางธรรมชาติ (NR) กับ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) ผลจากการศึกษาพบว่า ส่วนผสมของ ENR / TPU มีแรงบิดในการผสม โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ความต้านทานแรงดึงและการย่อยสลายทางความร้อน สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการผสม NR / TPU แต่ในทางกลับกันสมบัติการดูดซับและกระจายพลังงาน ความต้านทานต่อแรงดึงระยะยืด ณ จุดขาดและสมบัติความยืดหยุ่นของการฝังรูอยู่ที่ตัวของโพลีเมอร์ มีความต้อกว่าการผสม NR/TPU

ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาปรับปรุงสมรรถนะของยางธรรมชาติโดยเลือกใช้เทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทนมาประกอบเป็นหลักในการเบลนด์ โดยทำการศึกษาค่าเตรียมวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน โดยเป้าหมายหลักคือการพัฒนาที่ยางธรรมชาติให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น ได้แก่ มุ่งเน้นเรื่องสมบัติเชิงกล และความต้านทานต่อการขีดถู

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสัดส่วนเบลนด์ที่เหมาะสมในการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ต่อสมบัติยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) หรือยางเทอร์โมพลาสติกเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมของยางและพลาสติกเข้าด้วยกัน TPE จะมีคุณสมบัติคล้ายยางเทอร์โมเซต (thermoset rubber) คือมีสมบัติความยืดหยุ่นคล้าย โดย TPE จะสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกและสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงกระทำนั้นหมดไป ในขณะที่เดียวกัน TPE ก็มีสมบัติของเทอร์โมพลาสติกด้วย โดยจะหลอมเมื่อได้รับความร้อนและจะกลับมาแข็งตัวได้เมื่อเย็นตัวลง จึงสามารถขึ้นรูป TPE ด้วยกระบวนการทางความร้อนทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกได้ เช่น กระบวนการอัดรีด (extrusion) กระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (injection molding) เป็นต้น [1] การเตรียมยางเทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไปสามารถเตรียมได้ 2 รูปแบบ คือ การเตรียมแบบปกติ (simple blends) คือการผสมยางกับเทอร์โมพลาสติกโดยตรง อาจจะมีการใส่สารเติมแต่งเพิ่มปรับปรุงความเข้ากันได้หรือช่วยในการกระบวนการผลิต และการเตรียมแบบไดนามิก (dynamic vulcanization) ซึ่งจะมีการใส่สารวัลคาไนซ์เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงในยาง ทำให้เกิดบดเนียนอย่างมีอนุภาคเล็กเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของยางในเทอร์โมพลาสติกที่ยิ่งขึ้น โดยกระบวนการวัลคาไนซ์ของยางจะเกิดขึ้นในระหว่างทำการผสมกับเทอร์โมพลาสติกที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของยางเทอร์โมพลาสติก เช่น สมบัติการคืนตัว สมบัติเชิงกล การใช้งานที่อุณหภูมิสูงและความแข็ง [2]

3.2 การพัฒนาโดยใช้เทคนิคเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์

จากงานวิจัยของ Pichaiyut และคณะ (2012) [3] ได้ศึกษายางเทอร์โมพลาสติก โดยการนำเอาเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน (TPU) มาผสมกับยางธรรมชาติ ด้วยเทคนิคการผสมแบบปกติและทำการศึกษาอิทธิพลของยางสองชนิดคือ ยางธรรมชาติ (NR) กับ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (ENR) ซึ่งจุดมุ่งหมายหลักของการศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติ ความต้านทานต่อความร้อน การรับแรงและการกระจายแรงกระทำจากภายนอกโดยการทดลองมีการใช้สัดส่วนระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทนอยู่ที่ 30/70 และ 40/60 โดยน้ำหนัก ผลจากการศึกษาพบว่า ยางเทอร์โมพลาสติกจากการผสม

ENR/TPU มีแรงบิดในการผสม โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการสลายตัวด้วยความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางเทอร์โมพลาสติกจาก NR/TPU แต่ในทางกลับกันยางเทอร์โมพลาสติก NR/TPU มีสมบัติสมบัติการดูดซับแรงและกระจายแรง ความสามารถในการยืดขาดและสมบัติความต้านทานต่อการผิรูปลาวรร ดีกว่ายางเทอร์โมพลาสติก ENR/TPU

Pichaiyut และคณะ (2011) [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเตรียมยางเทอร์โมพลาสติกที่แตกต่างกันระหว่างการผสมแบบปกติ กับการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) ENR กับ TPU ที่สัดส่วนเท่ากับ 40/60 และ 50/50 เพื่อลดความแข็งของ TPU ปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกและสมบัติเชิงกลของยางเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมได้ จากการศึกษาพบว่า เมื่อผสมยางธรรมชาติพอกโซดกับเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน ด้วยเทคนิคการผสมแบบปกติ และการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) ทำให้ความแข็งของ TPU มีค่าลดลง ในขณะที่สมบัติการรับแรงกระแทกและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันค่า โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) $\tan \delta$ และการผิรูปลาวรร ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ TPU บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี (เช่นแรงดึง ความแข็งแรงและการยืดตัวเมื่อขาด) เกิดจากการผสมที่ทำให้ส่วนของ TPU เกิดขึ้นมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุที่ได้จากการเตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบง่ายมีคุณสมบัติทางกล stress relaxation สมบัติการดูดซับและกระจายพลังงาน คุณสมบัติการไหลและความยืดหยุ่น ที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับวัสดุที่ได้จากการเตรียมด้วยเทคนิคการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน (dynamic vulcanization) และสันฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของยางที่เตรียมด้วยการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน ดีกว่า

Kalkornsurapane และคณะ (2012) [5] ได้เตรียมยางเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (thermoplastic vulcanizates, TPVs) ประสิทธิภาพสูงจากยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) และเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน โดยใช้เทคนิคการผสมแบบไดนามิกวัลคาไนเซชัน และได้ศึกษาอิทธิพลของการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันตรังสีแบบต่างๆ ได้แก่ ระบบกัมมันตรังสีแบบปกติ (conventional sulfur vulcanization system, CV) ระบบกัมมันตรังสีประสิทธิภาพ (semi-efficient sulfur vulcanization system, Semi-EV) และระบบกัมมันตรังสีประสิทธิภาพ (efficient sulfur vulcanization system, EV) พบว่าการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมันตรังสีแบบ EV ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีกว่า ระบบ SEV และ CV ตามลำดับ และ TPV ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ EV จะมีความเสถียรทางความร้อนสูงสุด ทำให้มีเหมาะสมในการเตรียม TPV นอกจากนี้จากการศึกษาสมบัติของ TPNR ที่เตรียมจากยาง NR และยาง ENR พบว่า ยาง ENR มีประสิทธิภาพในการผสมกับ TPU ได้ดีกว่ายาง NR เนื่องจากหมู่พอกโซดในโครงสร้างของยาง ENR ทำให้เกิดอันตรกิริยาและปฏิกิริยากับ TPU บริเวณผิวประจัญได้ดีกว่ายาง NR จากสภาพชั้นที่ใกล้เคียงกัน

3.3 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer)

สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) คือ โพลีเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ ที่นิยมใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์ผสม หรือใช้เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติม (fillers) ในการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยทั่วไปสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ [6]

1. บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (block or graft Copolymer)
2. โพลีเมอร์ที่มีความเป็นขั้วแต่ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา (nonreactive polymers containing polar groups)
3. โพลีเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (functional/reactive polymers)
4. การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์โรเซชันในระหว่างการผสม (*In-situ* Grafting Polymerization)

สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการช่วยปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมให้ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น Salaeh และคณะ (2018) [7] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของการเตรียม TPNR จากพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) กับยางธรรมชาติ โดยเตรียมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากยางธรรมชาติติดแปรโมเลกุลด้วยการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาครีเลต (polymethylmethacrylate, PMMA) ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน คือร้อยละ 3.5, 12 และ 23 โดยโมล การเตรียม TPNR จะทำการผสมยาง NR กับ PVDF ที่อัตราส่วนคงที่ 50/50 ร้อยละโดยน้ำหนัก พบว่า การใช้ยางธรรมชาติกราฟต์พอลิเมทิลเมทาครีเลต (NR-g-PMMA) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่ช่วย

เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PVDF และ NR ทำให้คุณสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของ TPNR ที่เตรียมได้ดีขึ้นตามปริมาณของ PMMA ใน NR-g-PMMA ที่เพิ่มขึ้น

Pechurai และคณะ (2008) [7] ได้เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาติกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) และศึกษาอิทธิพลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จากการตัดแปรรูปโครงสร้างของพอลิเอทิลีนด้วยฟีนิกเรซิน (ใส่ชื่อภาษาอังกฤษ, PhHRJ-PE) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างภูมิภาคของยาง NR และ HDPE จากการศึกษพบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความเค้นเฉือน (shear stress) และความหนืดเฉือน (shear viscosity) ของ TPNR ที่เตรียมจากการเบลนดียง NR และ HDPE ที่อัตราส่วน 60/40 ที่มีสารเติม PhHRJ-PE เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มีสมบัติที่ดีกว่าการไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ นอกจากนี้การใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PhHRJ-PE ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้วยความแข็งแรง (toughness) และความต้านทานต่อแรงดึง ณ จุดขาดของ TPNR ได้

Kalkomsurapraanee และคณะ (2020) [8] ได้ศึกษาอิทธิพลของยางธรรมชาติตัดแปรรูปโมเลกุลที่ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการเตรียม TPNR จากยางธรรมชาติและพอลิบิวทิลีนอะดิเพเทรพทาเลท (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นของวัสดุผสมระหว่าง NR/PBAT ที่สัดส่วน 40/60 ร้อยละโดยน้ำหนัก และใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณ 1 ร้อยละโดยพลาสติก (php) จากการศึกษาพบว่า การใช้ MNR, NR-g-PMMA และ ENR-50 เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะช่วยให้สมบัติของ NR/PBAT ดีขึ้น เนื่องจากการตัดแปรรูปโครงสร้างของยางธรรมชาติจะทำให้ยางมีสมบัติความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาหรือปฏิกิริยาที่หมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติตัดแปรรูปโมเลกุลกับ PBAT

4. วิธีการวิจัย

4.1 ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนเบลนด์

4.1.1 เตรียมยางคอมพาวด์

เตรียมยางคอมพาวด์บนเครื่องผสมสองลูกกลิ้งโดยใช้สูตรยางคอมพาวด์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยในขั้นตอนนี้จะผสมเฉพาะยางธรรมชาติ สารกระตุ้น และสารป้องกันการเสื่อมเท่านั้น โดยใช้เวลาในการบดยางและผสมสารเคมีดังกล่าวเป็นเวลา 8 นาที

ตารางที่ 1 สูตรที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวด์

สารเคมี	น้ำหนัก (phr)
NR	100
ZnO	5
Stearic acid	1
6PPD	1
TBBS	1
Sulfur	2.5

4.1.2 เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีสัดส่วนระหว่างยางคอมพาวด์กับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 95:5, 90:10 และ 80:20 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 150 °C โดยมีขั้นตอนการผสมดังแสดงในตารางที่ 2

4.1.3 ใส่สารวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง

หลังจากพักยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกให้เย็น จากนั้นนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 4.1.2 มาผสมสารตัวเร่งและกำมะถันอีกครั้งบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้งตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เวลาในการผสม 2 นาที

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

ขั้นตอน	เวลา (นาที)
1. ใส่ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ และทำการบดเพื่อ ปรับความหนืด	3
2. ใส่ TPU ลงในท้องผสม	11
รวม	14

4.1.4 ทดสอบสมบัติยางคอมพาวด์

ยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่มีการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสัดส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติการวัดคาโมดด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C

4.1.5 ชั้นรูปยางคอมพาวด์

ชั้นรูปยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่มีการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสัดส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องอัดใบ้ เพื่อเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆ

4.2 ศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้
4.2.1 เตรียมยางคอมพาวด์

เตรียมยางคอมพาวด์ที่มีการใช้ยาง ENR50 หรือยาง NBR เป็นสารเพิ่มความเข้าได้ที่ปริมาณ 5 phr ดังสูตรยางคอมพาวด์ที่แสดงในตารางที่ 3 โดยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยในขั้นตอนนี้จะผสมเฉพาะยางธรรมชาติ ยาง ENR50 หรือยาง NBR สารกระตุ้น และสารป้องกันการเสื่อมเท่านั้น โดยใช้เวลาในการบดยางและผสมสารเคมีดังกล่าวเป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 3 สูตรยางที่ใช้ชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างกัน ได้แก่ ENR50, NBR ที่ 5 phr

สารเคมี	น้ำหนัก (phr)
NR	100
ENR 50 or NBR	5
ZnO	5
Stearic acid	1
6PPD	1
TBBS	1
Sulfur	2.5

4.2.2 เตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก

นำยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสัดส่วน 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 150 °C โดยมีขั้นตอนการผสมดังแสดงในตารางที่ 2

4.2.3 ใส่สารวัดคาโมดด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง

หลังจากพักยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกให้เย็น จากนั้นนำยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 4.1.2 มาผสมสารตัวเร่งและกัมมะถันอีกครั้งบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้งตามสัดส่วนที่แสดงในตารางที่ 3 โดยใช้เวลาในการผสม 2 นาที

4.2.4 ทดสอบสมบัติยางคอมพาวด์

นำยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่มีการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสัดส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติการวัดคาโมดด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C

4.2.5 ขึ้นรูปยางคอมพาวด์

ขึ้นรูปยางธรรมชาติคอมพาวด์ที่ไม่มีการเติมเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนและยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนสัดส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องอัดเบ้า เพื่อเตรียมขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล

4.3.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

เตรียมขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1415-06 แล้วนำไปวัดความแข็งด้วยเครื่อง Shore durometer ชนิด Shore A

4.3.2 การทดสอบการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

เตรียมขึ้นทดสอบรูปวงกลมแบบ C ตามมาตรฐาน ASTM D 412 นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ด้วยอัตราความเร็วในการดึงที่ 500 mm/min ที่อุณหภูมิ 27 °C

4.3.3 ทดสอบการสึกหรอแบบ Taber (Taber abrasion)

เตรียมขึ้นทดสอบรูปวงกลม ตามมาตรฐาน ASTM D4060 โดยใช้หัวทดสอบ load 1000 g ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที จำนวน 1000 รอบ แล้วชั่งน้ำหนักก่อนและหลังทดสอบ และคำนวณหาค่าความต้านทานการสึกหรอ ดังสมการที่ 1 และ 2

สมการคำนวณหาค่าความต้านทานการสึกหรอ

$$\text{ดัชนีการสึกหรอ (Wear index)} = ((\text{น้ำหนักก่อน} - \text{น้ำหนักหลัง}) \times 1000) / 1000 \quad (1)$$

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสีย (Weight loss)} = (\text{น้ำหนักก่อน} - \text{น้ำหนักหลัง} / \text{น้ำหนักก่อน}) \times 100 \quad (2)$$

5. ผลการวิจัย

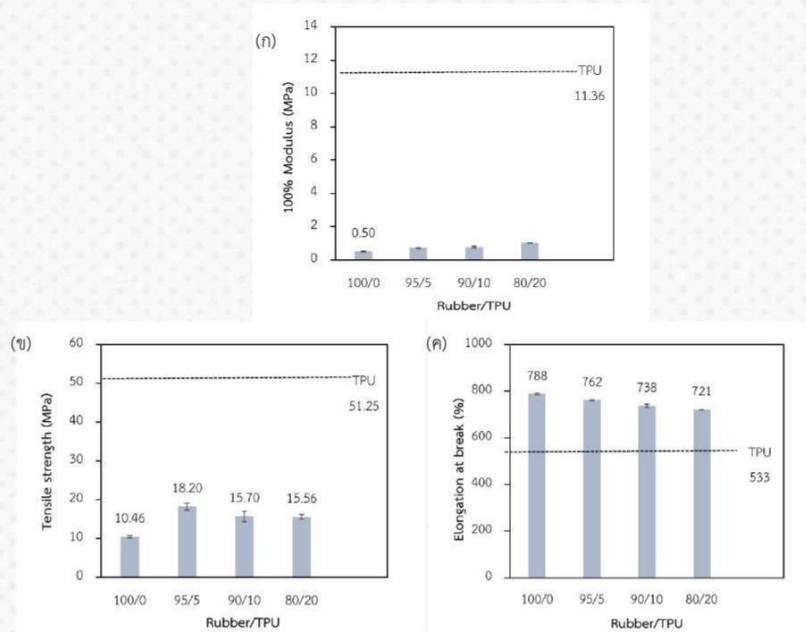
5.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนเบลนด์

ผลการทดสอบสมบัติความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมโดยใช้สัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับพอลิยูรีเทนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ยางธรรมชาติและเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนที่สัดส่วนต่างๆ

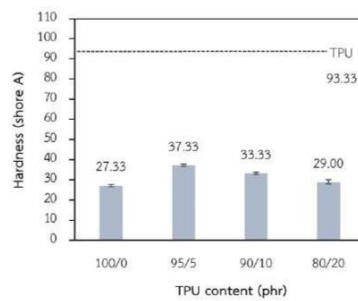
	NR:TPU (%wt)	Hardness (shore A)	100% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Wear index	Weight loss (%)
NR	100/0	27.33±0.58	0.5±0.03	10.46±0.32	788±3	0.18	1.32
	95/5	37.33±0.58	0.71±0.02	18.20±0.86	762±1	0.11	0.82
	90/10	33.33±0.58	0.77±0.05	15.70±1.35	738±8	0.12	0.85
	80/20	29.00±1.00	1.05±0.01	15.56±0.60	721±1	1.00	7.19
TPU	0/100	93.33±0.58	11.36±0.07	51.25±0.73	533±1	0.0008	0.004

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4 จะเห็นว่าสัดส่วนที่ส่วน 95:5 ให้ผลที่ดีที่สุดแสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติกับ TPU สามารถเข้ากันได้ในระดับนี้ แต่เนื่องจากสภาพผิวของยางธรรมชาติกับ TPU ที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติเชิงกลของ TPNR ลดลง และส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอลดลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปได้ว่า การเพิ่มปริมาณของ TPU ทำให้เกิดการแยกเฟสของ TPU ทำให้ TPNR มีสมบัติที่ลดลง



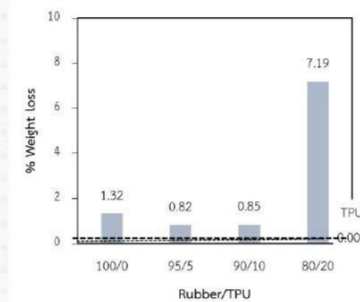
ภาพที่ 1 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรสัดส่วนยางกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (ก) มอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์, (ข) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (ค) ระยะยืด ณ จุดขาด

จากภาพที่ 1 ผลการทดสอบพบว่า สูตรยางธรรมชาติที่ไม่มีการผสม TPU มีความต้านทานต่อแรงดึง น้อยกว่า สูตรยางธรรมชาติที่มีการผสม TPU เนื่องจากโครงสร้างของ TPU จะประกอบด้วยโมเลกุลของห่วงวนเบนซินทำให้มีความแข็งแรงที่สูงขึ้น สอดคล้องกับ ระยะยืด ณ จุดขาดที่สูตรยางธรรมชาติที่ไม่มีการผสม TPU มีค่าที่สูงกว่าเนื่องจากโครงสร้างของยางธรรมชาติจะประกอบด้วยโมเลกุลของไอโซพรีน (Isoprene Unit) ต่อกันเป็นเส้นตรงทำให้สามารถแสดงสมบัติความยืดหยุ่นได้ดีกว่า



ภาพที่ 2 ความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรสัดส่วนยางกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

จากภาพที่ 2 แสดงผลการทดสอบความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก ผลการทดสอบพบว่า หลังจากที่ได้เติม TPU ลงไปยางธรรมชาติ ส่งผลให้ค่าความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าความแข็งสูงที่สุดที่สัดส่วน 95:5



ภาพที่ 3 ปริมาตรของตัวอย่างที่สูญเสียไปของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่แปรสัดส่วนยางกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน

จากภาพที่ 3 แสดงผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้ยางธรรมชาติ (NR) ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) จากการทดสอบพบว่า เมื่อเติม TPU ที่สัดส่วน 95:5 มีปริมาณการสึกหรอลดลง เนื่องจาก TPU มีคุณสมบัติด้านการสึกหรอที่ดี จึงไปทำให้ยาง NR มีคุณสมบัติต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณของ TPU ที่สัดส่วน 80:20 ทำให้คุณสมบัติแย่งลง เนื่องจากความไม่เข้ากันของยางธรรมชาติและ TPU ในเรื่องของความเป็นขี้

5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้

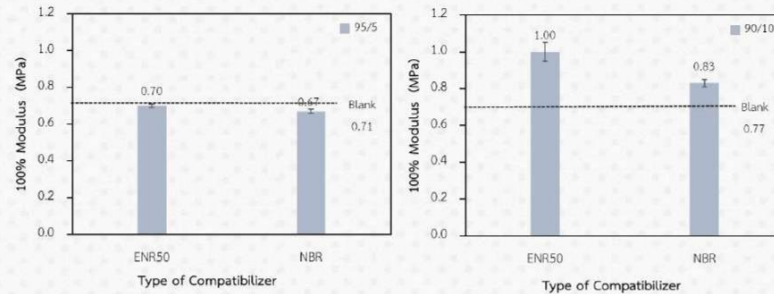
ผลการทดสอบสมบัติความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Taber ที่ใช้ชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างกัน ได้แก่ ENR50, NBR ที่ 5 phr ที่สัดส่วนระหว่างยางกับ TPU เท่ากับ 95:5 และ 90:10 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ต่างชนิดกัน

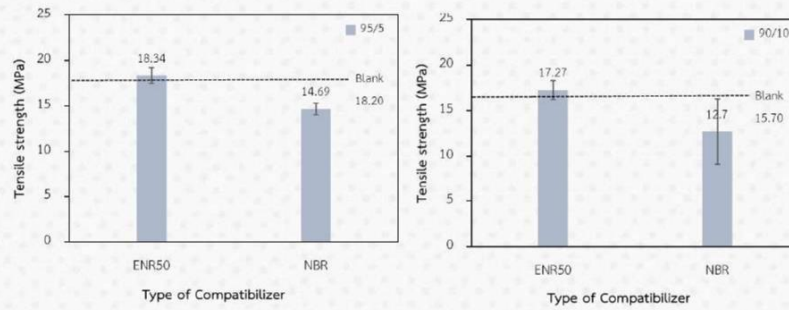
NR/TPU (%wt)	Compatibilizer	Hardness (shore A)	100% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Wear index	Weight loss (%)
95/5	Blank	37.33±0.58	0.71±0.017	18.20±0.861	762±0.92	0.11	0.82
	ENR50	38.33±0.58	0.7±0.01	18.34±0.89	807±33.91	0.0316	0.227
	NBR	36.67±0.00	0.67±0.01	14.69±0.64	725±1.29	0.0015	0.011
90/10	Blank	33.33±0.58	0.77±0.052	15.70±1.348	738±7.68	0.12	0.85
	ENR50	39.67±0.58	1.0±0.05	17.27±1.03	694±5.39	0.0025	0.018
	NBR	41.33±0.58	0.83±0.02	12.7±3.40	567±12.3	0.0730	0.532

จากผลการทดลองในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ของ TPNR ดียิ่งขึ้นเนื่องจากความเป็นขี้ที่เพิ่มมากขึ้นของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายาง ENR50 จะ

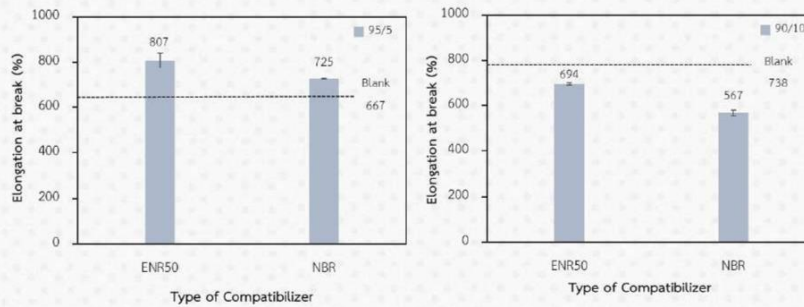
สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติของความต้านทานต่อการสึกของ TPNR ได้ดีกว่าใช้ยาง NBR เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลระหว่างยางธรรมชาติ กับ ENR50 มีความคล้ายกันมากกว่า NBR



ภาพที่ 4 มอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้



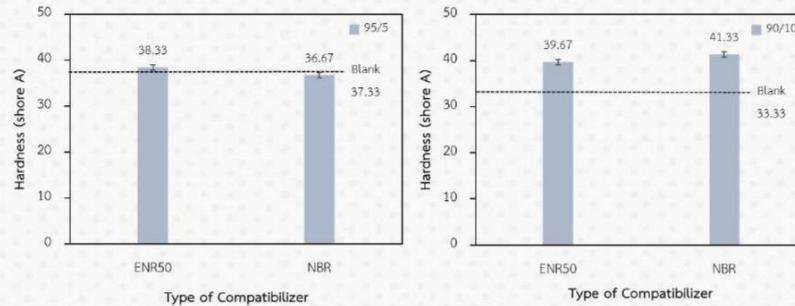
ภาพที่ 5 การต้านทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้



ภาพที่ 6 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

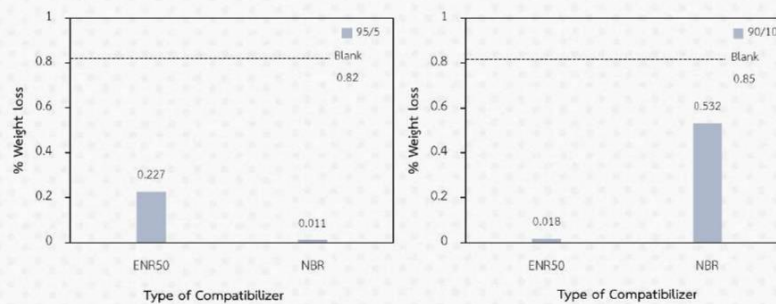
จากภาพที่ 4-6 แสดงผลอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้าได้ที่ปริมาณ 5 phr พบว่า ที่สัดส่วน 95/5 สารเพิ่มความเข้ากันได้ ชนิดยาง ENR50 ช่วยในการเชื่อมระหว่างเฟสของยาง NR กับ TPU ให้เข้ากันได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดมีแนวโน้มสูงกว่าการเติมสารเพิ่มความเข้าได้ชนิดยาง NBR เนื่องจากความเข้ากันของยาง

ENR50 กับ ยาง NR ที่สามารถเข้าได้ดีกว่ายาง NBR ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างโมเลกุลของยาง ENR50 มีความคล้ายคลึงกับยาง NR และ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยาง ENR50 ที่มีความเป็นขี้ว อาจส่งผลทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขี้ว กับหมู่ฟังก์ชันของโครงสร้าง TPU ที่มีขี้วเช่นเดียวกัน ทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า



ภาพที่ 7 ความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากภาพที่ 7 แสดงผลการทดสอบความแข็งของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มี ENR50 และ NBR ปริมาณ 5 phr เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่า ที่สัดส่วน 95/5 มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติม แต่ที่สัดส่วนการผสม 90/10 มีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนของ TPU ที่เพิ่มขึ้น และการเติมสารเพิ่มความเข้าได้ชนิดยาง NBR มีค่าความแข็งสูงกว่า ENR50 เนื่องจาก TPU มีค่าความแข็งสูง เมื่อผสมกับ NBR ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่ได้มีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 8 ปริมาณของตัวอย่างที่สูญเสียไปของยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกที่มีชนิดสารเพิ่มความเข้ากันได้

จากภาพที่ 8 แสดงผลของความต้านทานต่อการสึกหรอของยางในกรณีที่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่า มีปริมาณของตัวอย่างที่สูญเสียไปน้อยกว่า ซึ่งแสดงว่ามีค่าความต้านทานการสึกหรอดีกว่ากรณีที่ไม่ได้เติม นอกจากนี้พบว่าที่สัดส่วน 90/10 การเติมยาง NBR มีปริมาณที่สูญเสียไปสูง เนื่องจากมีความเข้าได้ต่ำกว่าที่มีการเติม ENR50

6. บทสรุป

การจากเตรียมยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกกระหว่างยางธรรมชาติคอมพาวด์กับพอลิยูรีเทนที่สัดส่วน 95:5 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการสึกหรอของธรรมชาติให้ดีขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณของพอลิยูรีเทนมีแนวโน้มทำให้สมบัติเชิงกล และสมบัติของความต้านทานต่อการสึกหรอ TPNR ลดลง และการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ของ TPNR ตียิ่งขึ้นเนื่องจากความเป็นขั้วที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายาง ENR50 ปริมาณ 5 phr จะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติของความต้านทานต่อการสึกหรอของ TPNR ได้ดีกว่าใช้ยาง NBR ที่สัดส่วน 90/10 เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลระหว่าง NR กับ ENR50 มีความคล้ายกันมากกว่า

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] นายณเรณทร์ อาศัยพานิชย์. การพัฒนาเทอร์โมพลาสติกโกลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2550.
- [2] นายชาริฟ บารู. การศึกษาของออร์แกนอิลด์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล พฤติกรรมการเกิดผลึก และสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซท ที่เตรียมจากไดนามิกวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติกับพอลิพรอพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2553.
- [3] S. Pichaiyut, C. Nakason, N. Vennemann, Thermoplastic elastomers-based natural rubber and thermoplastic polyurethane blends. *Iran. Polym. J.* 21(2012):65–79.
- [4] S. Pichaiyut, C. Nakason, C. Kummerlöwe, N. Vennemann, Thermoplastic elastomer based on epoxidized natural rubber/thermoplastic polyurethane blends: influence of blending technique. *Polym. Adv. Technol.* 23(2011):1011–1019.
- [5] E. Kalkonsurapranee, C. Nakason, C. Kummerlöwe, N. Vennemann, Development and preparation of high-performance thermoplastic vulcanizates based on blends of natural rubber and thermoplastic polyurethanes. *J. Appl. Polym. Sci.* 128(4) (2012): 2358-2367.
- [6] นางสาวจารีนุช โรจน์เสถียร. ศึกษาการผสมระหว่างสไตรีน อะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ออฟเกรดและยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2554.
- [7] S. Salaeh, T. Badaa, P. Pongdonga, S. Wießner, A. Das, A. Thitithammawonga, Compatibilization of poly(vinylidene fluoride)/natural rubber blend by poly (methyl methacrylate) modified natural rubber. *Eur. Polym. J.* 107(2018):132–142.
- [8] W. Pechurai, C. Nakason, K. Sahakaro, Thermoplastic natural rubber based on oil extended NR and HDPE blends: Blend compatibilizer, phase inversion composition and mechanical properties. *Polym. Test.* 27(2008):621-631.
- [9] E. Kalkonsurapranee, D. Koedthip, P. Songtipya, T. Prodpran, J. Johns, Y. Nakaramontri, L. Songtipya, Influence of modified natural rubbers as compatibilizers on the properties of flexible food contact materials based on NR/PBAT blends. *Mater. Des.* 196(2020):109134.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอัครพงษ์ ตุลย์จิตราภรณ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6210220094	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเครื่องมือ และแม่พิมพ์)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลสุวรรณภูมิ	2562

ทุนการศึกษา

- ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อัครพงษ์ ตุลย์จิตราภรณ์ ณิชวุฒิ ศรีสองคอน เอกวิภู กาลภรณ์สุรปราณี และ กานดา แซ่ลอยเลื่อน งานประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 4 “วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมสร้างสรรค์ เพื่อก้าวผ่านสถานการณ์ COVID-19” เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2564 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

รางวัล

รางวัลชมเชย การประกวดผลิตภัณฑ์ยางพาราและไม้ยางพารา Lower Southern Rubber Innovation Award (LS-RIA 2020) ในหัวข้อ “แผ่นดักฝุ่นจากยางพาราผสมกากชา” เมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2563 ณ การยางแห่งประเทศไทยเขตภาคใต้ตอนล่าง จังหวัดสงขลา

รางวัลผลงานวิจัยดีเด่น ภาคบรรยาย จากการประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 4 “วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมสร้างสรรค์ เพื่อก้าวผ่าน สถานการณ์ COVID-19” เมื่อวันที่ 30 สิงหาคม 2564 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร