JOHN F. KENNEDY LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
PATTANI THAILAND

การปรับปรุงความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

Improvement of Compatibilization of Thermoplastic Vulcanizates based on Natural Rubber/Reclaimed Rubber/Propylene Ethylene Copolymer Blends

Prince of Songkla University
Pattani Campus

วิชชุดา นาคะสรรค์
Witchuda Nakasan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Polymer Technology
Prince of Songkla University
2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

ผู้เขียน นางสาววิชชุดา นาคะสรรค์

สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโนมา ธิติธรรมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(อาจารย์ ดร.ซีตีไซยีดะห์ สายวารี)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัติ แซ่ตั้ง)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโนมา ธิติธรรมวงศ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ซีตีไซยีดะห์ สายวารี)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.นาบิล หะยีมะแซ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ประชิด สระโมพี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

Prince of Songkla University Pattani Campus

ขอรับรองว่าผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโนมา ธิติธรรมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาววิชชุดา นาคะสรรค์)

นักศึกษา

Prince of Songkla University Pattani Campus

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....วิชชุดา นาคะสรรค์.....

(นางสาววิชชุดา นาคะสรรค์)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ชื่อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

ผู้เขียน นางสาววิชชุดา นาคะสรรค์

สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

การศึกษาอิทธิพลของสารดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ ฟินอลิกเรซิน, มาลิอิกแอนไฮไดรด์ และ ไกลซิดิลเมทาคริเลต ต่อสมบัติของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลม พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรมีระยะเวลาการสกอร์ช และเวลาในการวัลคาไนซ์นานกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร และสูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซินให้สมบัติของยางเบลนด์โดยรวมดีที่สุด จึงเลือกใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินสำหรับการศึกษาผลของการปรับปรุงความเข้ากันได้ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปร พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้วิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะให้สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลพลวัตโดยรวมดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้วิธีการผสมแบบ Reactive blending รวมถึงให้ลักษณะสัณฐานวิทยาที่เรียบสม่ำเสมอมากกว่า และปริมาณสารดัดแปรฟินอลิกเรซินที่เหมาะสม คือ 10 phr นอกจากนี้การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ที่อัตราส่วน NR/RR/PEC เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลโดยรวมด้อยลง เป็นผลมาจากยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เกิดการวัลคาไนซ์ใหม่ในโมเลกุลได้น้อย และมีสารตัวเติมเขม่าดำเหลืออยู่ การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับสารดัดแปรฟินอลิกเรซิน พบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ช่วยเสริมให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด มอดุลัสสะสม และความหนืดเชิงซ้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าสูตรที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันชนิด PEC-g-Ph จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งสูงที่สุด และจากการศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติ พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติให้สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสัณฐานวิทยาดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ที่ซึ่งเมื่อใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์สมบัติโดยรวมลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

Thesis Title	Improvement of Compatibilization of Thermoplastic Vulcanizates based on Natural Rubber/Reclaimed Rubber/Propylene Ethylene Copolymer Blends
Author	Miss Witchuda Nakasan
Major Program	Polymer Technology
Academic Year	2016

ABSTRACT

Effect of modifying agents i.e. phenolic resin, maleic anhydride and glycidyl methacrylate on properties of natural rubber/reclaimed rubber (NR/RR) blend was studied. Results show that longer scorch time and cure time of the blend with modifying agent were achieved compared to those of the blend without modifying agent. The blend with phenolic resin gave the best overall properties. Therefore, it was then further used for promoting the phase compatibility in thermoplastic vulcanizates (TPVs) based on blending of NR/RR/ propylene ethylene copolymer (PEC). Different mixing methods, melt mixing and reactive blending, were designed to prepare TPVs with phenolic resin. It was found that the TPVs prepared via melt mixing method provided superior mechanical, rheological and dynamic mechanical properties as well as better phase morphology than the TPVs prepared via reactive blending. Furthermore, suitable quantity of phenolic resin was at 10 phr. Influence of blend proportion of NR/RR/PEC TPVs, 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 and 0/60/40 parts by weight, was also investigated. Increasing of RR in the rubber component of TPVs clearly impacted on deterioration of mechanical property. This was due to the RR had low molecular weight, remained carbon black and could not be much re-vulcanized during blending. In addition, effect of PEC-g-Ph compatibilizer in combination with phenolic resin as modifying agent on properties of NR/RR/PEC TPVs was studied. The use of compatibilizer could promote a slight increasing of tensile strength, elongation at break, storage modulus and complex viscosity of the TPVs. Furthermore, synergistic effect of PEC-g-Ph compatibilizer and phenolic resin could be found from the highest tensile strength

Prince of Songkla University Pattani Campus

and hardness of the TPVs. Epoxidized natural rubber (ENR) was also applied to the TPVs in replacement of NR. It was found that the TPVs with NR still showed better mechanical, rheological and morphological properties than the TPVs with ENR. Overall properties of the TPVs were decreased with increasing epoxy contents in the ENR.

Prince of Songkla University
Pattani Campus

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จาก ผศ.ดร. อโนมา ธิติธรรมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในการศึกษาค้นคว้าทำงานวิจัย ให้ความรู้ ให้โอกาส คอยอบรบสั่งสอน อีกทั้งยังช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆของวิทยานิพนธ์ ให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ซีตีไซยีดะห์ สายวารี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุวัติ แซ่ตั้ง อาจารย์ ดร.นาบิล หะยีมะแซ และอาจารย์ ดร.ประชิด สระโมพี ที่ให้คำปรึกษา ตรวจทาน และแก้ไขการเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอาจารย์ เจ้าหน้าที่และนักวิทยาศาสตร์ทุกท่านในภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ คอยให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกทำให้การทำวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณพี่บอลที่คอยให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือตลอดเวลา และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ทั้งปริญญาเอก โท และ ตรี ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ พ่อและแม่ พี่ๆ และน้องๆ ที่ให้ความรัก ให้กำลังใจ เป็นแรงใจ และคอยดูแลเอาใจใส่ผู้วิจัยเสมอมา

Prince of Songkla University Pattani Campus

วิชชุดา นาคะสรรค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ..... (5)

Abstract..... (6)

กิตติกรรมประกาศ..... (8)

สารบัญ..... (9)

รายการตาราง..... (16)

รายการรูป..... (18)

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ขอบเขตการศึกษา..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5

2.1 ยางธรรมชาติ..... 5

2.2 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์..... 6

2.2.1 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์..... 7

2.2.2 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอิพอกไซด์..... 7

2.3 ยางรีเคลม..... 8

2.3.1 ตัวอย่างกระบวนการเตรียมยางรีเคลม..... 10

2.3.1.1 กระบวนการรีเคลมโดยอาศัยความร้อน..... 10

2.3.2.2 กระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล (Thermo-mechanical process)..... 10

2.3.3.3 กระบวนการรีเคลมโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับวิธีทางเคมี (Mechano-chemical methods)..... 10

2.3.4.4 กระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี (Chemical reclaiming processes)..... 11

2.3.2 สมบัติของยางรีเคลม..... 12

2.3.3 การใช้งานยางรีเคลม..... 12

2.4 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers, TPEs)..... 13

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ยางและพลาสติก..... 15
2.4.2 การแปรรูปและการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์..... 19
2.5 การเข้ากันได้ของการเบลนด์ (Blend compatibilization)..... 20
2.5.1 การใช้โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้..... 20
2.5.2 การใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังชันก์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้..... 20
2.5.3 รีเอกทีฟเบลนด์ (Reactive blending)..... 21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 21
2.6.1 กระบวนการรีเคลม..... 21
2.6.2 การใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบเบลนด์..... 22
2.6.3 ระบบวัลคาไนซ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ..... 24
2.6.4 การใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบการเบลนด์ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์..... 26
2.6.5 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ..... 27
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง..... 29
3.1 สารเคมี..... 29
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 35
3.3 วิธีการทดลอง..... 38
3.3.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของยางรีเคลม..... 38
3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติและยางรีเคลม..... 40
3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์..... 42
3.3.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 46
3.3.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 46

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.6 การศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน(Propylene-ethylene copolymer grafted phenolic resin, PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 47
3.3.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 51
3.4 วิธีการทดสอบสมบัติ 52
3.4.1 การทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ 52
3.4.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึง และความสามารถในการยืดจนขาด 52
3.4.3 การทดสอบการผิดรูปถาวรแบบดึง (Tension set) 53
3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง 53
3.4.5 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Durometer 54
3.4.6 การทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer 54
3.4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง Moving die rheometer 55
3.4.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) 55
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง 56
4.1 การศึกษาสมบัติของยางรีเคลม 56
4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของยางรีเคลมด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) 56
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโทรสโกปี (FTIR) 59
4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณส่วนที่ละลายและไม่ละลาย (Sol-gel fraction) ในยางรีเคลม 60
4.1.4 การหาความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมด้วยวิธีการบวมพอง (Swelling) 60

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางรีเคลม..... 61
4.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม (NR/RR blend)..... 61
4.2.1 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 61
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR..... 68
4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR..... 69
4.2.4 สมบัติการไหลของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 72
4.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)..... 75
4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC..... 75
4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 76
4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 84
4.3.4 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 87
4.3.5 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 90
4.3.6 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 93

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)..... 94
4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC..... 94
4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 95
4.4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 98
4.4.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 102
4.4.5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 104
4.4.6 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 108
4.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์..... 110
4.5.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์NR/RR/PEC..... 110
4.5.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 111
4.5.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 115
4.5.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 120
4.5.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 121

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.6 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 126
4.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซิน (Propylene-ethylene copolymer grafted phenolic resin, PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ 128
4.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) 128
4.6.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC 130
4.6.3 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 131
4.6.4 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 137
4.6.5 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 141
4.6.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 143
4.6.7 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC 146

Prince of Songkla University Pattani Campus

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์..... 147
4.7.1 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์..... 147
4.7.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC..... 151
4.7.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 152
4.7.4 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 156
4.7.5 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 160
4.7.6 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 163
4.7.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC..... 166
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 168
บรรณานุกรม..... 175
ภาคผนวก..... 182
ประวัติผู้เขียน..... 190

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับวิธีทางเคมี..... 11
2.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี..... 12
3.1 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 41
3.2 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์..... 44
3.3 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ 47
3.4 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สำหรับศึกษาการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้..... 49
3.5 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์..... 51
4.1 องค์ประกอบของยางรีเคลมแบบแผ่นที่ทดสอบด้วยเทคนิค TGA ที่อุณหภูมิห้อง ถึง 750°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน..... 57
4.2 ปริมาณส่วนที่ละลายได้ ปริมาณส่วนที่ไม่ละลาย และความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง.... 60
4.3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 63
4.4 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 69
4.5 สมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 71
4.6 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 78
4.7 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 85
4.8 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 85
4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณสารดัดแปร..... 96
4.10 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณสารดัดแปร..... 100
4.11 ความสามารถในการยืดจนขาดหลังภายบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณสารดัดแปร..... 100

ลิขสิทธิ์ของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ 113
4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ 117
4.14 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ 117
4.15 สมบัติเชิงกลของของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน 132
4.16 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน 138
4.17 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน 139
4.18 ปริมาณหมู่อิพอกไซด์เมื่อใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50°C 148
4.19 ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์ 150
4.20 ค่าทอร์กสูงสุดและระยะเวลาการเกิดการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกซ์ 152
4.21 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ 154
4.22 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ 158
4.23 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ 158

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 การจัดการของเสียจากยางล้อในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2554 1
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ 5
2.2 ปฏิกิริยาริพอกซิเดชันแบบ *In-situ* 7
2.3 กราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR 8
2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการรีไซเคิลยางด้วยการรีเคลมและการดีวัลคาไนซ์ 9
2.5 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมด้วย (a) วิธีเบลนด์แบบปกติ (b) ไดนามิกส์วัลคาไนซ์ และ (c) การเตรียมโคพอลิเมอร์ 14
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดที่ใช้ในการเบลนด์กับสัดส่วนในการผสมของพอลิเมอร์ 2 องค์ประกอบ 16
2.7 อิทธิพลของค่าความสามารถในการละลายต่อขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ 17
2.8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ 18
2.9 แผนภาพแสดงการประสานของโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อคในการเพิ่มความเข้ากันได้ 21
3.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ 29
3.2 สูตรโครงสร้างของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ 30
3.3 โครงสร้างโมเลกุลของวิงสเตย์ แอล 32
3.4 โครงสร้างโมเลกุลของเอ็น เทอเทียรี บิวทิล-2-เบนโซไทอาซิล ซัลฟีนาไมด์ 32
3.5 โครงสร้างโมเลกุลของกำมะถัน 32
3.6 โครงสร้างโมเลกุลของไฮดรอกซีเมทิลอลฟีนอลิกเรซิน 33
3.7 โครงสร้างโมเลกุลมาลิอิกแอนไฮไดรด์ 33
3.8 โครงสร้างโมเลกุลไกลซิดิลเมทาคริเลต 34
3.9 โครงสร้างโมเลกุลเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 34
3.10 ลำดับขั้นตอนการเตรียมคอมพาวนด์โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด 42
3.11 ลำดับขั้นตอนการผสมวิธี Reactive blending method และ Melt mixing method 45

ลิขสิทธิ์ของ Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.12 ลำดับขั้นตอนการผสมวิธี Melt mixing method เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph..... 50
4.1 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป และอัตราการหายไปของน้ำหนัก กับอุณหภูมิของยางรีเคลม เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้องถึง 750°C ภายใต้สภาวะ (A) บรรยากาศไนโตรเจน (B) บรรยากาศออกซิเจน..... 58
4.2 สเปคตรัม FTIR ของยางรีเคลมชนิดแผ่น..... 59
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมแบบก้อนที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า.. 61
4.4 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปรที่อุณหภูมิ 150°C..... 62
4.5 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปรชนิดไกลซิดิลเมทาคริเลต ที่อุณหภูมิ 150°C..... 62
4.6 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟินอลิกเรซินเรซินกับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิ่มตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b)..... 65
4.7 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างมาลิอิกแอนไฮไดรด์กับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิ่มตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b)..... 66
4.8 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างไกลซิดิลเมทาคริเลตกับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิ่มตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b)..... 67
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร..... 68
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์ภายหลังบ่มเร่งจากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร..... 70
4.11 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร..... 72
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร..... 73
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร..... 74

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.14 tan δ ที่ความถี่ 10 Hz ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร..... 74
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 75
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 77
4.17 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 78
4.18 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 79
4.19 โอกาสเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางรีเคลม ยางธรรมชาติ และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซินเมื่อใช้วิธีการผสมแบบ Melt mixing method..... 80
4.20 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางรีเคลม และยางธรรมชาติ กับฟินอลิกเรซิน..... 81
4.21 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างเฟสยาง กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เมื่อใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 82
4.22 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 83
4.23 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 83
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 84
4.25 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 86
4.26 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 86
4.27 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 87

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 88
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 88
4.30 ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 89
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 90
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 91
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 92
4.34 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร..... 94
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 94
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 96
4.37 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 97
4.38 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 97
4.39 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 98
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณสารดัดแปร..... 99
4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 101

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.42 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 101
4.43 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 102
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 103
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 103
4.46 ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 104
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 105
4.48 มอดุลัสสะสมที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 105
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 106
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 106
4.51 tan δ และ ค่าความหนืดเชิงซ้อน ที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 107
4.52 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน..... 109
4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนระหว่าง NR/RR/PEC..... 110
4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 112

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.55 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 113
4.56 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 114
4.57 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 115
4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 116
4.59 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 118
4.60 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 118
4.61 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 119
4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 120
4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 121
4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 122
4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 123
4.66 ความเค้นเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์.... 124
4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสียกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 124

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.68 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 125
4.69 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์..... 127
4.70 สเปคตรัม FTIR ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซินเปรียบเทียบกับสเปคตรัมของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์..... 128
4.71 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟินอลิกเรซินกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์..... 129
4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 130
4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 132
4.74 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 133
4.75 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 133
4.76 การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินร่วมสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph..... 135
4.77 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 136
4.78 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 136
4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 137

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.80 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 139
4.81 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 140
4.82 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 141
4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 142
4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 142
4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 144
4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 144
4.87 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 145
4.88 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน..... 146
4.89 สเปคตรัม FTIR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับสเปคตรัมของยางธรรมชาติ..... 147

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.90 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อิพอกไซด์กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา..... 149
4.91 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่ระดับต่างๆ..... 150
4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 151
4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 153
4.94 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 154
4.95 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 155
4.96 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 156
4.97 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 157
4.98 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PECเมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 159
4.99 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 159
4.100 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 160
4.101 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 161
4.102 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 162
4.103 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 163

Prince of Songkla University Pattani Campus

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.104 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 163
4.105 ความเค้นเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 165
4.106 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 165
4.107 tan δ ที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 166
4.108 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ..... 167

Prince of Songkla University Pattani Campus

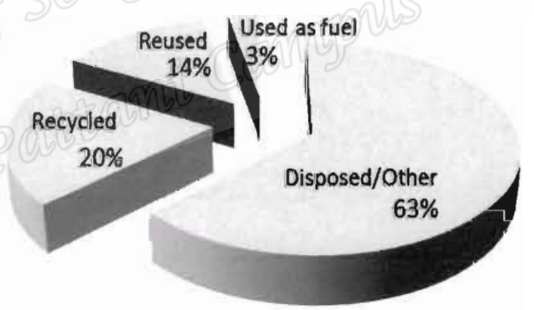
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมทำให้ในปัจจุบันมีความพยายามนำของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยทั่วโลกมีของเสียจำพวกยางวัลคาไนซ์จากอุตสาหกรรมยางล้อเป็นปริมาณมากถึง 20 ล้านตัน/ปี ในขณะที่ในประเทศไทยมีของเสียจากยางล้อประมาณ 400,000 - 600,000 ตัน (Duangburong *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตามในประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์จากของเสียดังกล่าว โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) การรีไซเคิล (Recycle) หรือการใช้เป็นเชื้อเพลิง (Used as fuel) เพียงประมาณไม่เกินครึ่งหนึ่งของปริมาณของเสียทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบและอื่นๆ ดังข้อมูลสรุปการจัดการของเสียจากยางล้อในประเทศไทย (Duangburong *et al.*, 2015) ดังแสดงในรูปที่ 1.1

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 1.1 การจัดการของเสียจากยางล้อในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2554 (Duangburong *et al.*, 2015)

กระบวนการรีเคลม (Reclaimation) เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อนำยางวัลคาไนซ์ที่มีการเชื่อมขวางระหว่างโซ่โมเลกุลกลับมาแปรรูปใหม่หรือรีไซเคิล โดยผ่านวิธีการต่างๆ ได้แก่ วิธีการย่อยทางกลร่วมกับความร้อน (Thermomechanical pulping process) วิธีการย่อยทางกลร่วมกับปฏิกิริยาเคมี (Chemomechanical pulping process) หรือวิธีการย่อยทางกลร่วมกับความร้อนและปฏิกิริยาเคมี (Thermo-chemomechanical pulping process) โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำให้พันธะเชื่อมขวางตัดขาดออกบางส่วน ได้เป็นยางรีเคลม (Reclaimed rubber) ที่มีลักษณะแบบ

กึ่งของแข็งและของเหลว (Paste-like) (คลังศัพท์ไทย, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ) ที่มีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลคงเหลืออยู่บางส่วน และอาจจะมีส่วนของสารตัวเติมและสารวัลคาไนซ์อยู่ภายในร่วมด้วย ในการใช้งานยางรีเคลมโดยทั่วไปจะเป็นการนำยางรีเคลมมาเบลนด์ร่วมกับยางหรือเทอร์โมพลาสติกเพื่อลดต้นทุนการผลิต สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น องค์ประกอบของยางรีเคลม ความเข้ากันได้ของยางรีเคลมกับวัสดุใหม่ ปริมาณของยางรีเคลม และระบบวัลคาไนซ์ เป็นต้น โดยในปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นความเข้ากันได้ของยางรีเคลมกับวัสดุใหม่เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากหากพอลิเมอร์เบลนด์มีความไม่เข้ากันจะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวประจัญ (Interfacial adhesion) ต่ำ การกระจายตัวของยางรีเคลมในเมทริกซ์ของวัสดุใหม่มีลักษณะแบบไม่สม่ำเสมอและมีโอกาสที่จะเกิดการรวมกันอยู่บางบริเวณ กอปรกับยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความกระเด้งตัว เป็นต้น ค่อนข้างต่ำ (พรพรรณ, 2528) จากการที่โซ่โมเลกุลบางส่วนขาดออกในระหว่างกระบวนการรีเคลม จึงส่งผลกระทบให้สัดส่วนการใช้ยางรีเคลมเพื่อแทนที่ยางใหม่ทำได้น้อย และพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยลง การปรับปรุงความเข้ากันได้ของยางรีเคลมกับยางหรือเทอร์โมพลาสติกสามารถทำได้โดยการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลม (Shanmugharaj *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009a; Zhang *et al.*, 2009b) และการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizers) (Zhang *et al.*, 2009b)

เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ (Thermoplastic vulcanizates, TPVs) เป็นวัสดุที่มีสมบัติการใช้งานแบบยางแต่สามารถแปรรูปได้ด้วยเครื่องแปรรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป รวมถึงสามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ง่ายเมื่อเทียบกับยางวัลคาไนซ์ โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมขึ้นจากการเบลนด์ระหว่างยางกับเทอร์โมพลาสติกในสภาวะไดนามิกส์วัลคาไนเซชัน (Dynamic vulcanization) ซึ่งเฟสของยางจะเกิดการเชื่อมขวางขึ้นในระหว่างการผสมและเกิดการกระจายตัวในเมทริกซ์ต่อเนื่องของเทอร์โมพลาสติก เฟสของยางวัลคาไนซ์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติแบบยาง ส่วนเฟสเทอร์โมพลาสติกทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง และช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สามารถแปรรูปได้อย่างวัสดุเทอร์โมพลาสติก ดังจะเห็นได้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะช่วยลดปริมาณของเสียจากยางวัลคาไนซ์ลงได้จากความสามารถในการนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ อีกทั้งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการแปรรูปยางแบบทั่วไป

งานวิจัยนี้มีแนวคิดจากความต้องการในการเพิ่มปริมาณการใช้งานยางรีเคลมและวัสดุเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ จึงทำการศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs) โดยมุ่งเน้นการศึกษาการปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวประจัญของยางรีเคลมกับองค์ประกอบการเบลนด์ โดยใช้การ

ดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลม และการทำรีแอคทีฟเบลนด์ นอกจากนี้จะศึกษาการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ และชนิดยางธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ชนิดและปริมาณของสารดัดแปรต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เปรียบเทียบกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์และชนิดของยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของยางรีเคลม ได้แก่ โครงสร้างทางเคมี องค์ประกอบของยางรีเคลม ปริมาณส่วนที่ละลายได้และส่วนที่ไม่ละลาย (Sol-gel fraction) ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลม และสัณฐานวิทยา

1.3.2 การศึกษาเปรียบเทียบผลของชนิดของสารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลม โดยแปรชนิดของสารดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) ไกลซิดิลเมทาคริเลท (Glycidyl methacrylate) และ ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

1.3.3 การศึกษาเปรียบเทียบผลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs) โดยศึกษาผลของวิธีการผสมสารดัดแปร 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1. วิธีการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมในสภาวะหลอม (Melt mixing method) และวิธีที่ 2. วิธีการเบลนด์แบบรีแอคทีฟ (Reactive blending method)

1.3.4 การศึกษาปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรปริมาณสารดัดแปรที่ 0, 3, 5, 7 และ 10 phr โดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาที่ปริมาณคงที่ที่ 1 phr

1.3.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/RR/PEC TPV ที่อัตราส่วน 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยเลือกใช้ชนิดสารดัดแปร วิธีการผสมสารดัดแปร และปริมาณของสารดัดแปรที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Prince of Songkla University Pattani Campus

1.3.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน (Propylene ethylene copolymer grafted phenolic resin, PEC-g-Ph) ที่ปริมาณ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

1.3.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ยางแผ่นรมควัน (NR) และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 10 (ENR-10), 20 (ENR-20), 30 (ENR-30), 40 (ENR-40) และ 50 (ENR-50) เปอร์เซ็นต์โดยโมล

1.3.8 การทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้แก่ สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง สมบัติการไหล สมบัติเชิงกลพลวัต และสัณฐานวิทยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้

1.4.2 ทราบถึงผลของชนิดสารดัดแปร วิธีการผสมสารดัดแปร ปริมาณสารดัดแปร อัตราส่วนการเบลนด์ และชนิดยางธรรมชาติ ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

1.4.3 เพิ่มปริมาณของการใช้งานยางรีเคลมในการเตรียมวัสดุเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

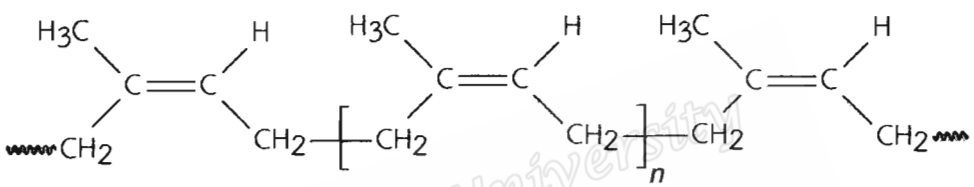
Prince of Songkla University Pattani Campus

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่ 20°C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.5215 ถึง 1.5238 ที่ 20°C โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

ยางธรรมชาติมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) กล่าวคือมีหน่วยย่อยไอโซพรีน (Isoprene unit, C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง 50,000 มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000 ถึง 3,000,000 g/mol และประมาณร้อยละ 60 ของโมเลกุลเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 (ชัยวัฒน์, 2527) ส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้นยางธรรมชาติจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อแรงฉีกขาด (Tear strength) และความทนต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว

สมบัติของยางธรรมชาติอันเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมี

1. ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ไม่มีหมู่หรืออะตอมที่มีสภาพขั้วในโครงสร้าง ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียม

2. มีพันธะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้วัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจน และโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง

3. การมีพันธะคู่และพันธะเดี่ยวในโมเลกุล ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติมีสภาพยืดหยุ่น และมีความกระเด้งตัวสูง

4. ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงสามารถตกผลึกได้เมื่อยืด โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเสริมแรงส่งผลให้ยางธรรมชาติ มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก

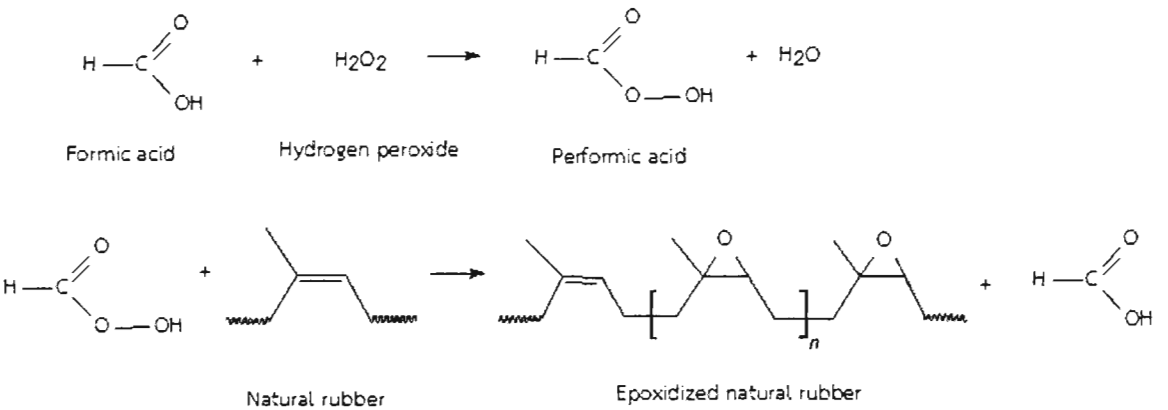
5. ยางธรรมชาติมีความกระเด้งตัวสูง มีความร้อนสะสม (Heat build up) ต่ำ ทำให้ยางธรรมชาตินิยมใช้ในการทำยางรถบรรทุก ซึ่งต้องรับน้ำหนักมาก

6. มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางมีความหนืดสูง และแปรรูปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการบดเพื่อตัดสายโซ่โมเลกุล ให้ยางธรรมชาติมีความหนืด และน้ำหนักโมเลกุลลดลงก่อนทำการบดผสมสารเคมีและแปรรูป

2.2 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ยางธรรมชาติอิพอกไซด์สามารถเตรียมได้จากการดัดแปรโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน (Epoxidation) ทำให้เกิดวงแหวนอิพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) ตรงตำแหน่งพันธะคู่ของโมเลกุลยางธรรมชาติบางตำแหน่งกระจายอยู่ในสายโซ่โมเลกุลยางธรรมชาติ ซึ่งสามารถปรับปรุงหรือเพิ่มสมบัติความทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วมากขึ้น มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) เพิ่มขึ้น ทนทานต่อการเสื่อมสลายจากความร้อนมากขึ้น และความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศเพิ่มขึ้นทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมต่างๆได้กว้างขึ้น (Baker and Gelling, 1987) พบว่ายางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีหมู่ปริมาณอิพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-50) สามารถทนทานต่อน้ำมันและต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศได้เทียบเท่ายางสังเคราะห์บางชนิด เช่น ยางไนไตรล์ ยางบิวไทล์ และยางคลอโรพรีน นอกจากนี้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ยังสามารถเกิดการจัดเรียงตัวขณะดึงยืดได้เป็นผลให้เกิดผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติที่ไม่ดัดแปรโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีความต้านทานต่อแรงดึง และทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีด้วย

การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์จากปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันโดยการทำให้เกิดเปอร์เอซิดในขณะทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน *(In-situ* peracid*)* ดังปฏิกิริยาแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลของกรดฟอร์มิกกับไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้อยู่ในช่วง 0.2 - 0.5 (Baker and Gelling, 1987) ปฏิกิริยาเริ่มจากกรดฟอร์มิกจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิดกรดเปอร์ฟอร์มิก จากนั้นกรดเปอร์ฟอร์มิกจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันแบบ *In-situ* (ดัดแปลงจาก Baker and Gelling, 1987)

2.2.1 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์

สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกไซด์โดยรวมจะขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ โดยเมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องมาจากปริมาณหมู่อิพอกไซด์สูงขึ้นจะทำให้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีโอกาสเกิดผลึกได้น้อยลง ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณหมู่อิพอกไซด์เป็นการเพิ่มสภาพขั้วในโมเลกุลของยางส่งผลให้ความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความสามารถในการละลายของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ขึ้นอยู่กับระดับของการเกิดอิพอกซิเดชัน และชนิดของตัวทำละลาย โดยยางธรรมชาติอิพอกไซด์สามารถละลายได้ง่ายขึ้นหากมีการบดยางก่อน ตัวทำละลายที่เหมาะสมได้แก่ โทลูอีน คลอโรฟอร์ม และเตตระไฮโดรฟิวแรน เป็นต้น สำหรับค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ พบว่าการเกิดหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมลในโมเลกุลยางธรรมชาติทำให้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น 1°C ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -47°C และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -22°C (Baker and Gelling, 1987) นอกจากนี้ Chuayjuljit *et al.*, (2006) ได้พบว่า ยาง ENR-20 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -38.2°C ยาง ENR-45 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -27.8°C และยาง ENR-65 มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -19.7°C

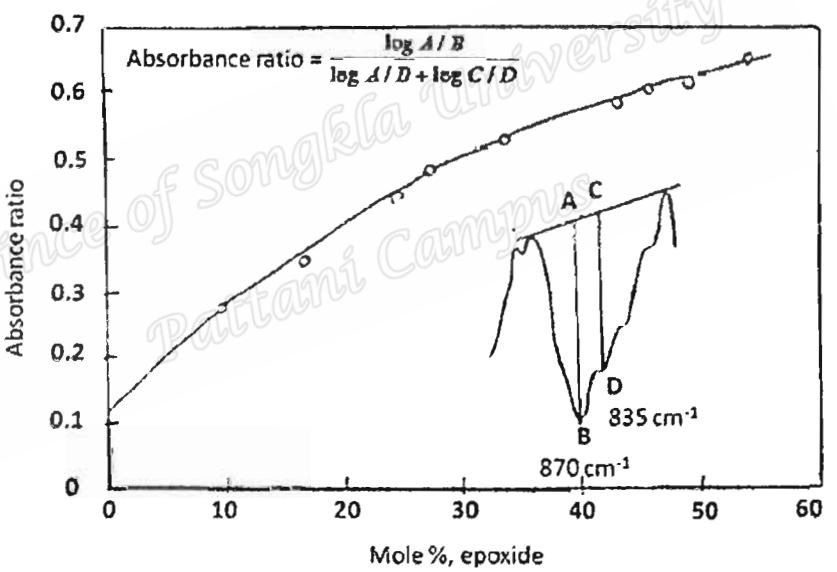
2.2.2 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอิพอกไซด์

การวิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR จะได้สเปคตรัมของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่แตกต่างจากสเปคตรัมของยางธรรมชาติ สามารถคำนวณหา (Absorbance ratio, Ar) ของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสง

อินฟราเรดของหมู่อิพอกไซด์หรือวงแหวนออกซิเรน เปรียบเทียบกับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 835 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบงอนอกระนาบของพันธะ C-H ที่ต่อกับ C=C ของพอลิไอโซพรีน ดังสมการที่ 2.1 แล้วเปรียบเทียบค่ากับกราฟมาตรฐาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3

$$\text{Absorbance ratio, Ar} = \frac{\log A/B}{\log A/B + \log C/D} \qquad (2.1)$$

โดยที่ A/B และ C/D เป็นความสูงของพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} และ 835 cm^{-1} ตามลำดับ



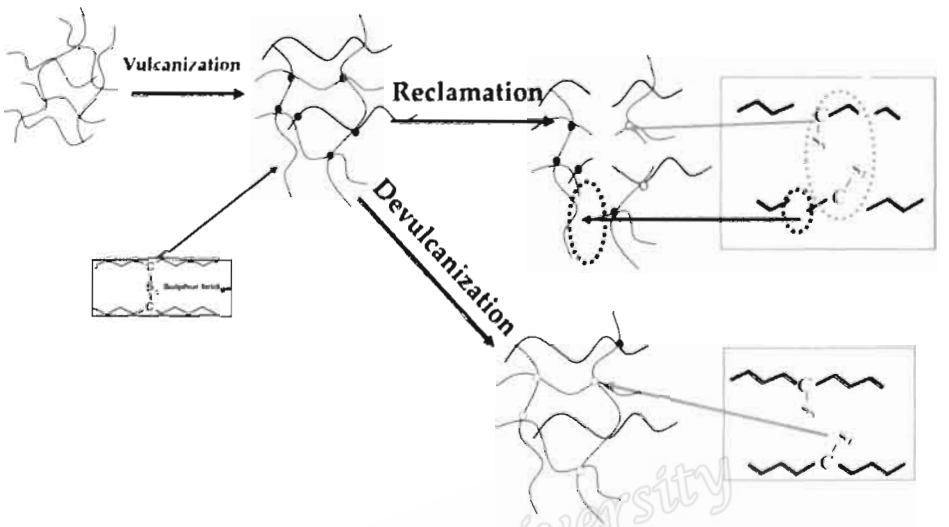
รูปที่ 2.3 กราฟมาตรฐานเปอร์เซ็นต์โมลอิพอกไซด์ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR (Davey and Loadman, 1984)

2.3 ยางรีเคลม (Reclaimed Rubber)

ยางรีเคลม คือ ยางที่ได้จากการนำยางวัลคาไนซ์มาผ่านกระบวนการรีเคลม (Reclaimation) เพื่อให้สามารถนำยางวัลคาไนซ์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการตัดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางโดยอาศัยวิธีทางความร้อน ทางเคมี และทางกล เพื่อให้สามารถกลับเข้าสู่กระบวนการผสม และวัลคาไนซ์ได้อีกครั้ง อย่างไรก็ตามในกระบวนการทำยางรีเคลมไม่สามารถควบคุมตำแหน่งในการตัดพันธะได้ฉะนั้นการตัดพันธะด้วยกระบวนการรีเคลม จะเกิดการตัดพันธะที่ตำแหน่งพันธะ

Prince of Songkla University Pattani Campus

เชื่อมขวางและตำแหน่งสายโซ่ยางเอง (ชีตีไชยีดะห์ และคณะ, 2551) ลักษณะการตัดโครงสร้างตาข่ายของโมเลกุลยางด้วยวิธีทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการรีไซเคิลยางด้วยการรีเคลมและการดีวัลคาไนซ์ (Saiwari, 2013)

Prince of Songkla University Pattani Campus

กระบวนการรีเคลมเป็นกระบวนการทำให้ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกโดยใช้เทคนิคการให้ความร้อน วิธีทางเคมี หรือวิธีทางกล โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการรีเคลม คือโครงสร้างตาข่ายของโมเลกุลยางถูกตัดแบบสุ่ม อาจเกิดการตัดหรือทำลายพันธะเคมีทั้งบริเวณพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากสารวัลคาไนซ์ (C-S, S-S) หรือบริเวณสายโซ่หลักของโมเลกุลยาง ยางรีเคลมที่ได้จึงมีสมบัติทางกลต่ำ

กระบวนการรีเคลมทำได้หลายวิธี สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ (Myhre *et al.*, 2012) คือ วิธีทางกายภาพ (Physical process) และวิธีทางเคมี (Chemical process) การรีเคลมโดยการใช้วิธีทางกายภาพ (Adhikari *et al.*, 2000) เช่น วิธีทางกล (Mechanical reclaiming process) การใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล (Thermo-mechanical reclaiming process) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic method) และคลื่นไมโครเวฟ (Microwave method) เป็นต้น การรีเคลมโดยการใช้วิธีทางเคมี คือการใช้สารเคมีเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพการรีเคลมสูงขึ้นเรียกสารเคมีดังกล่าวว่า สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ (Reclaiming agents) เช่นไดแอลิลไดซัลไฟด์ (Diallydisulfide), 2,3-ไดเมทิล-2-บิวทีน (2,3-Dimethyl-2-butene), ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Diphenyldisulfide, DPDS), เฮกซะเดกซิลามีน (Hexadecylaminine), เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) และ ไดเบนซามิโดไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Dibenzamido diphenyldisulfide) เป็นต้น

2.3.1 ตัวอย่างกระบวนการเตรียมยางรีเคลม

2.3.1.1 กระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อน (พรพรรณ, 2540)

- Heater หรือ pan process กระบวนการนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม โดยยางที่ถูกบดเป็นอนุภาคเล็กๆ และกำจัดเส้นใยออกไปแล้วจะถูกนำไปผสมเข้ากับน้ำมันและสารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ แล้วจึงเทลงบนถาด ซึ่งถาดที่ใช้ได้ถูกออกแบบให้สามารถแผ่กระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึง โดยการฝังขดลวดความร้อนตลอดแนว การให้ความร้อนด้วยไอน้ำภายในถาดที่อุณหภูมิประมาณ 180°C เป็นเวลา 5 ถึง 10 ชั่วโมง สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ที่ใช้คืออะโรมาติกไทออล ไดซัลไฟด์ และน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโดยยังคงให้สมบัติเชิงกลที่เหนือกว่า

- Digester process วิธีนี้ยางที่ผ่านการบดถูกผสมเข้ากับสารเคมี ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกใส่เข้าไปในตู้อบความดันที่ประกอบด้วย ชุดกวน และให้ความร้อนที่ 180 ถึง 210°C ที่ 5 ถึง 24 ชั่วโมง โดยการใช้ไอน้ำ หลังจากนั้นวัสดุที่ได้จะถูกล้างทำความสะอาด อบแห้งและบดให้ละเอียด จากนั้นจึงกรองเป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.3.2.2 กระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล (Thermo-mechanical process) (Adhikari *et al*., 2000; Myhre *et al*., 2012)

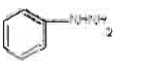
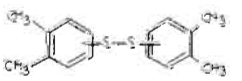
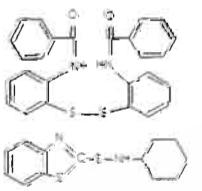
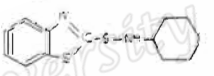
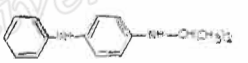
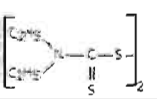
ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้ความร้อนร่วมกับวิธีทางกล โดยอาศัยแรงเฉือนทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยเมื่อวัสดุได้รับแรงเฉือนจะส่งผลให้มีอุณหภูมิ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของพันธะเชื่อมขวางในยาง และเนื่องจากกระบวนการนี้ไม่มีการใช้สารเคมีแต่อาศัยความร้อนที่เกิดจากกระบวนการทางกลทำให้วิธีนี้มีข้อเสียคือจะเกิดการตัดสายโซ่ที่ตำแหน่งของสายโซ่หลัก

2.3.3.3 กระบวนการรีเคลมโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับวิธีทางเคมี (Mechano-chemical methods) (Rajan *et al*., 2006)

การทำให้ยางนิ่ม สามารถปรับปรุงโดยใช้ Reclaiming accelerator ในขณะที่ให้แรงทางกลแก่ยาง ในสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปแล้วการทำยางรีเคลมที่อุณหภูมิต่ำจะมีการใช้สาร Reclaiming catalyst, Reclaiming oil และ Process oil ร่วมกับการใช้สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ (Reclaiming agent) ตัวอย่างการใช้สารเคมีแสดงดังตารางที่ 2.1

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 2.1 สารรีเคลมมิ่งเอเจนต์ที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้วิธีทางกลร่วมกับวิธีทางเคมี (Rajan *et al.*, 2006)

No	Chemical name/abbreviation	Reclaiming accelerator	eclaiming catalys
1	Peroxide-methyl halides	ROOR	Me_nX_m
2	Phenyl hydrazine-ferrous chloride (PH-$FeCl_2$)		$FeCl_24H_2O$
3	Tributlamine-cuprous chloride (TBA-CuCl)	$(nC_4H_8)_3N$)	Cu_2Cl_2
4	Dixylyldisulfide		
5	2,2'-Dibenzamidodipheyl disulfide		
6	*N*-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide (CBS)		
7	*N* -isopropyl-*N'* -phenyl-p-phenylenediamine (IPPD)		
8	Thiophenol-n-butylamine (TP-BA)		n-BuN_{H2}
9	Toluene sulfonic acid-1,8-diazabicyclo 5,4Ojundee-7-ene (TS-DBU)		
10	Tetraethylthiuramdisulfide-triphenyl phosphine (TETD-TPP)		

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.3.4.4 กระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี (Chemical reclaiming processes)

(Adhikari *et al.*, 2006)

กระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี จะใช้สารเคมีช่วยในการสลายพันธะซัลเฟอร์ สารเคมีที่นิยมใช้คือ ไดซัลไฟด์ (Disulfides) หรือ เมอร์แคปแทน (Mercaptans) หรือสารเคมีอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งมีหน้าที่ในการทำลายพันธะซัลเฟอร์ที่เกิดจากกระบวนการคงรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งกระบวนการนี้สามารถเตรียมโดยการนำยางที่ใช้แล้วมาแช่ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอีน เบนซีน หรือไซโคลเฮกเซน เพื่อให้โมเลกุลของยางเกิดการบวมตัว และง่ายต่อการซึมผ่านของสารเคมีที่ช่วยในการสลายพันธะซัลเฟอร์ในโครงร่างสามมิติ แม้ว่าการใช้สารเคมีในการเตรียมยางรีเคลมจะมีความจำเพาะเจาะจงในการทำลายพันธะโควาเลนต์ระหว่างพันธะคาร์บอน-ซัลเฟอร์ และซัลเฟอร์-ซัลเฟอร์ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีข้อเสียคือความยากในการพาตัวทำลายออกจากเนื้อยาง และความเสี่ยงที่เกิดจากสารเคมีที่ใช้

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการรีเคลมโดยใช้สารเคมี (Adhikari *et al.*, 2006)

Name of the chemical probes	Attacking position of the crosslink bonds
Triphenylphosphine	Polysulfide links into monosulfide and to a lesser extent disulfide links
Sodium di-n-butyl phosphite	Di and polysulfide crosslinks
Propane-thiol/piperidine	Polysulfide linkages
Hexane-1-thiol	Both polysulfide and disulfide linkages
Dithiothreitol	Disulfide bonds into two thiol groups
Lithium aluminium hydride	Disulfide and polysulfide bonds
Phenyl lithium in benzene	Polysulfide and disulfide bonds
Methyl iodide	Monosulfide linkages

2.3.2 สมบัติของยางรีเคลม (พรพรรณ, 2540)

ยางรีเคลมที่นำมาวัลคาไนซ์โดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความกระเด้งตัว และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางใหม่ที่ไม่ผ่านกระบวนการรีเคลม นอกจากนี้ยางรีเคลมจะวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่ายางปกติ และมีความทนทานต่อการออกซิไดซ์ที่ดี อาจเป็นเพราะในกระบวนการทำยางรีเคลมต้องผ่านกระบวนการออกซิเดชัน การให้ความร้อน และการล้าง เป็นต้น

2.3.3 การใช้งานยางรีเคลม (วราภรณ์, 2552)

การใช้งานยางรีเคลมโดยส่วนใหญ่จะใช้เพื่อลดต้นทุน แต่นอกจากลดต้นทุนแล้วยางรีเคลมยังมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้ยางใหม่ในด้านกระบวนการผลิต กล่าวคือในกระบวนการเตรียมยางรีเคลมจะมีขั้นตอนการบดย่อยพันธะเชื่อมโมเลกุลยาง แต่ก็ยังคงมีพันธะเชื่อมขวางของ Sulfur crosslink ที่มีส่วนทำให้คอมพาวนด์ดิบมีความหยุ่นน้อย (Reduce nerve) ดังนั้นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการอัดผ่านดาย (Extrude) หรือการฉีดจะมีผิวที่เรียบ ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดแน่นอนทำให้ช่วยเพิ่มอัตราการผสมได้ นอกจากนี้การใช้ยางรีเคลมเพื่อเตรียมคอมพาวนด์จะใช้เวลาบดผสมและพลังงานน้อยกว่ากรณีการใช้ยางใหม่ เพราะยางรีเคลมได้ผ่านการบดมาแล้วในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม อย่างไรก็ตามสมบัติความแข็งแรงของยางรีเคลมจะไม่ทัดเทียมยางใหม่ ดังนั้นการใช้ยางรีเคลมจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ถ้าต้องการลดต้นทุนและใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงมาก ก็สามารถใช้ยางรีเคลมล้วนๆได้โดยไม่ต้องผสมกับยางใหม่

เช่น พื้นรองเท้า ยางปูพื้น เป็นต้น แต่ถ้าต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงระดับหนึ่งก็อาจจะผสมยางรีเคลมกับยางใหม่ เพื่อให้ส่วนของยางใหม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงขณะที่ยางรีเคลมจะช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิต

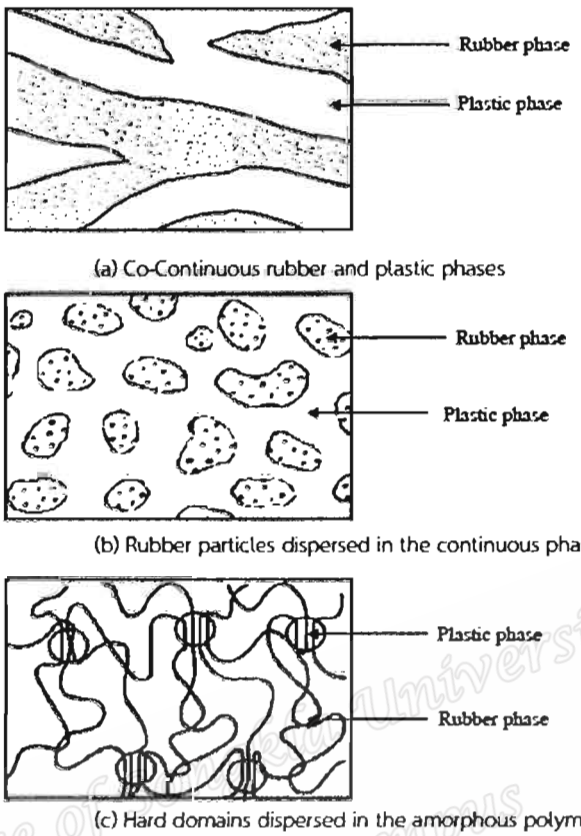
2.4 เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomers, TPEs)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ หมายถึง วัสดุอิลาสโตเมอร์ที่มีพฤติกรรมการแปรรูปของเทอร์โมพลาสติก โดยจะแสดงสมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) หรือการมีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิการใช้งาน และมีพฤติกรรมการไหลแบบพลาสติกที่อุณหภูมิการแปรรูป การเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาวะหลอมกับของแข็งที่ยืดหยุ่นแบบยางเมื่อให้อุณหภูมิหลอมหรือทำให้เย็นตัวเป็นแบบผันกลับได้ (Reversible process) ทำให้สามารถแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ซ้ำได้เช่นเดียวกับการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์และการเตรียมโคพอลิเมอร์มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบบเฟสคู่ (Two-Phase morphology) ประกอบด้วยเฟสแข็ง (Hard phase) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเทอร์โมพลาสติก และเฟสนิ่ม (Soft phase) หรือเฟสของยางมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาระหว่างเฟสที่สามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ สัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วม (Co-continuous phase morphology) คือเกิดการกระจายซึ่งกันและกันของทั้ง 2 เฟส และสัณฐานวิทยาแบบเฟสกระจาย (Dispersed phase morphology) กล่าวคือเกิดการกระจายตัวของเฟสหนึ่ง ในเมทริกซ์ต่อเนื่องของอีกเฟสหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 2.5

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมจากการเบลนด์ยางกับเทอร์โมพลาสติกทั้งการ เบลนด์แบบปกติ (Simple blend) และการเบลนด์แบบไดนามิกส์วัลคาไนซ์ (Dynamic vulcanization) ส่วนของเฟสแข็งทั้งที่เป็นเฟสร่วมและเฟสต่อเนื่อง ให้คุณสมบัติด้านความแข็งแรง และควบคุมไม่ให้เฟสนิ่มเกิดการไหลเมื่อได้รับแรงหรือความร้อน แต่เมื่อได้รับแรงหรือความร้อนที่เหมาะสมเฟสแข็งก็จะเกิดการหลอมไหล (ขึ้นรูปได้) เมื่อเย็นตัวก็จะกลับสู่สภาวะที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นอีกครั้ง

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ได้จากการเตรียมโคพอลิเมอร์นั้นส่วนของเฟสแข็งที่เกิดการรวมกลุ่มกันของผลึกเป็นโดเมนของแข็ง (Hard domain) จะกระจายตัวต่อเนื่องอยู่ในเฟสยาง และทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslink) ควบคุมไม่ให้เฟสนิ่มเกิดการไหล และเนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลเป็นการเชื่อมขวางทางกายภาพ หรือการมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลไม่ได้เกิดการเชื่อมขวางทางเคมี ดังนั้นเมื่อได้รับพลังงานที่เหมาะสมก็จะสูญเสียการเชื่อมขวางโซ่โมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนไหวหรือลื่นไถลผ่านกันได้ (ขึ้นรูปได้) แต่เมื่อกลับสู่สภาวะที่มีพลังงานต่ำอีกครั้งการเชื่อมขวางทางกายภาพก็จะเกิดขึ้นใหม่ เรียกการเชื่อมขวางที่มีลักษณะดังกล่าวว่า การเชื่อมขวางแบบผันกลับได้ (Physical reversible crosslink)



Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 2.5 สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมด้วย (a) วิธีเบลนด์แบบปกติ (b) ไดนามิกส์วัลคาไนซ์ และ (c) การเตรียมโคพอลิเมอร์ (Holden, 2000)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่สำคัญ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมผลึก โดยที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิการใช้งาน คือ ระหว่างช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมผลึก วัสดุจะมีสมบัติเป็นยาง คือ มีความสามารถในการคืนกลับรูปเดิมหลังจากสิ้นสุดแรงกระทำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากลักษณะของเฟสแข็งควบคุมไม่ให้เฟสของยางเกิดการไหลเสมือนการมีพันธะเชื่อมขวางในยางวัลคาไนซ์ ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมผลึก เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะอยู่ในสภาวะหลอม (Molten state) และมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic behavior) คือ ความหนืดของวัสดุจะขึ้นกับอัตราเฉือน (Shear rate) ทำให้เหมาะแก่การขึ้นรูปแบบฉีด หรือการเอกทรูดช์ที่มีอัตราการเฉือนสูง เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จะไหลได้ดีเพราะมีความหนืดต่ำ และเมื่อเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์กลับสู่สภาวะที่มีพลังงานต่ำก็จะมีความสามารถในการคงรูปใหม่ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเหนือยางวัลคาไนซ์ที่เกิดการคงรูปถาวรด้วยพันธะทางเคมี ทำให้มีความนิยมในการผลิต

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้น ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น ชิ้นส่วนยางประกอบเครื่องจักร ท่อ ปะเก็น อุปกรณ์อุดรอยรั่ว สายไฟ และฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น

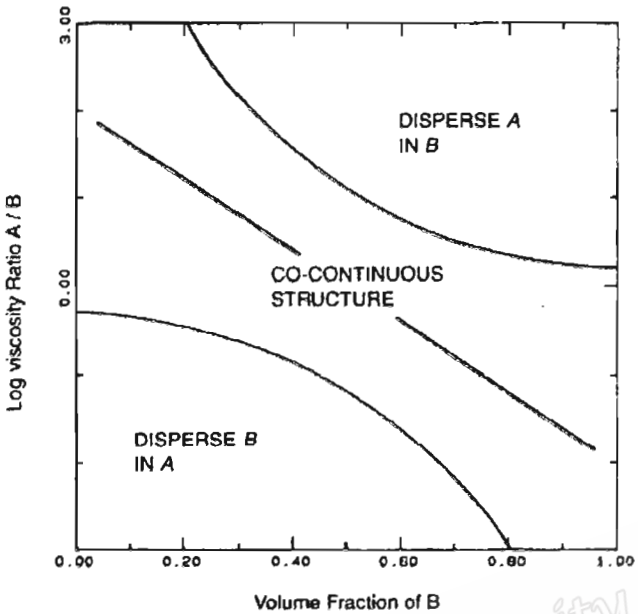
2.4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากการเบลนด์ยางและพลาสติก

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์พลาสติกกับยางจัดเป็นกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีความนิยมทางการค้า เนื่องด้วยมีสมบัติเป็นที่ยอมรับและมีความสะดวกในการเตรียม โดยสามารถแบ่งลักษณะการเบลนด์เป็น 2 ประเภท คือ

ก. เทคนิคการเบลนด์แบบปกติ (Simple blend)

การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์แบบปกติทำได้โดยการเบลนด์เทอร์โมพลาสติกกับยางโดยไม่เติมสารวัลคาไนซ์ ซึ่งการเบลนด์จะทำในสภาวะที่มีแรงเฉือนสูง และให้ความร้อนเพียงเพื่อเกิดการหลอมในพลาสติกโดยไม่ทำให้เฟสของยางเสื่อมสภาพ ซึ่งการเบลนด์แบบปกติมีโอกาสการเกิดลักษณะทางสัณฐานวิทยาได้ 2 ลักษณะ คือ พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายตัวในเฟสต่อเนื่อง (หรือเมทริกซ์) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้จะแสดงสมบัติเด่นของพอลิเมอร์ชนิดที่เป็นเมทริกซ์ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาอีกลักษณะ คือ เกิดจากการกระจายตัวซึ่งกันและกันเป็นแบบเฟสร่วม ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (a) ซึ่งในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยวิธีเบลนด์แบบปกติต้องควบคุมลักษณะทางสัณฐานวิทยาให้เป็นแบบเฟสร่วม เนื่องจากต้องการสมบัติที่ผสานกันระหว่าง 2 เฟส โดยปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยวิธีการเบลนด์แบบปกติ คือ อิทธิพลของความหนืด อัตราส่วนการเบลนด์ และความเข้ากันของพอลิเมอร์เบลนด์

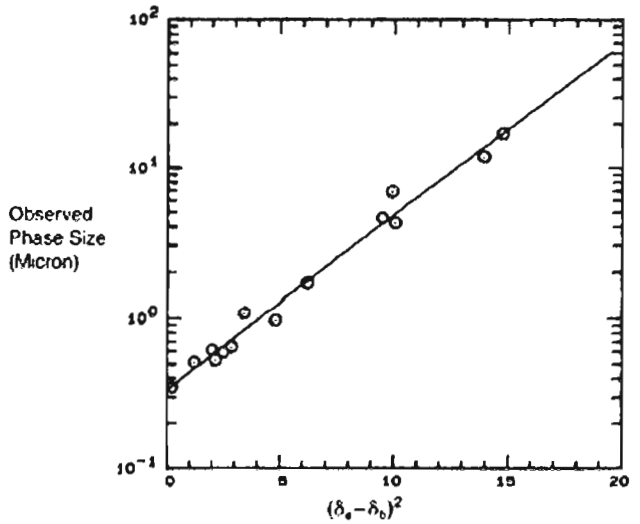
พอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์กันต้องมีค่าความหนืดใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ และอัตราเฉือนที่ทำการเบลนด์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของอัตราส่วนความหนืดระหว่างเฟสทั้ง 2 (A และ B) กับสัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส B (อาจจะเป็นเฟสอิลาสโตเมอร์หรือพลาสติก) แสดงดังรูปที่ 2.6 พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดใกล้เคียงกัน (ค่า log ของอัตราส่วนความหนืดระหว่างพอลิเมอร์ A กับ พอลิเมอร์ B มีค่าใกล้ 0) จะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วมที่ทุกสัดส่วนการเบลนด์ และที่อัตราส่วนความหนืดค่าอื่นๆ การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ให้ได้สัณฐานวิทยาแบบเฟสร่วมจะต้องคำนึงถึงสัดส่วนการเบลนด์ซึ่งจะมีสัดส่วนช่วงหนึ่งๆ เท่านั้นที่จะให้สัณฐานวิทยาแบบดังกล่าว



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดที่ใช้ในการเบลนด์กับสัดส่วนในการผสมของพอลิเมอร์ 2 องค์ประกอบ (Holden, 2000)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ความเข้ากันได้ของการเบลนด์ซึ่งพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ซึ่งค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด เกี่ยวข้องกับแรงตึงผิวประจัญ (Interfacial tension) กล่าวคือ ถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าแรงตึงผิวสูงจะทำให้เกิดเป็นระบบสองเฟส (Two phase system) ที่มีเฟสขนาดใหญ่ (Coarse dispersion) โดยการเกิดเฟสขนาดใหญ่จะไปลดพื้นผิวประจัญ (Interfacial area) และพลังงานผิวประจัญ (Interfacial energy) ในทางกลับกันถ้าคู่พอลิเมอร์มีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกันทำให้เกิดการกระจายตัวของเฟสที่มีขนาดเล็กมากกว่า (Finer dispersion) ทำให้พื้นที่ผิวประจัญและพลังงานผิวประจัญมีค่าสูง พอลิเมอร์เบลนด์จึงมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์กับค่าความแตกต่างของความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาเบลนด์กัน พบว่าขนาดอนุภาคของ พอลิเมอร์เบลนด์มีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความแตกต่างระหว่างค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์ที่ใช้ ซึ่งถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันมาก เช่น พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีขั้วในขณะที่พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งไม่มีขั้วก็จะเกิดเฟสขนาดใหญ่



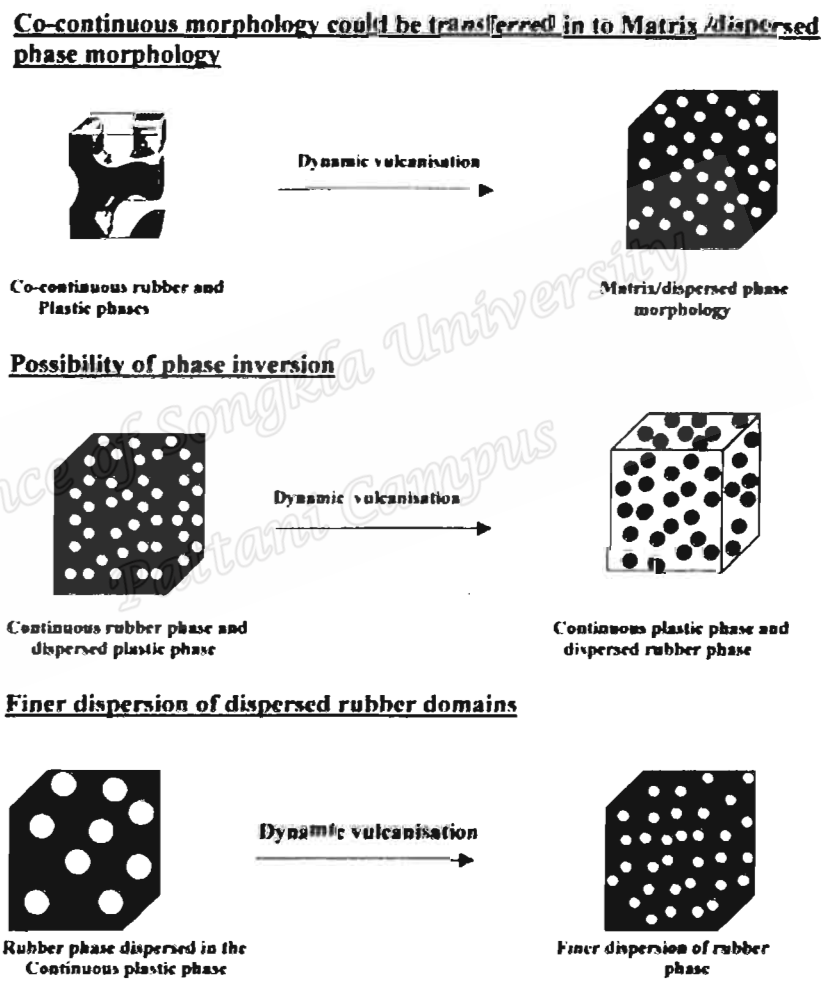
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของค่าความสามารถในการละลายต่อขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์เบลนด์ (Holden, 2000)

ข. เทคนิคการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่เตรียมโดยกระบวนการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกส์ หรือที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ หรือไดนามิกส์วัลคาไนซ์ มีหลักการในการเตรียม คือ การปรับปรุงสัณฐานวิทยาของอนุภาคยางที่กระจายตัวในเฟสต่อเนื่องของพลาสติกให้มีความเสถียรโดยการผสมสารวัลคาไนซ์ในขณะเบลนด์หรือการนำยางมาผ่านกระบวนการผสมสารเคมีแล้วนำมาทำการเบลนด์ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งแบบแบช (Batch process) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Co-Rotating twin screw extruder) เป็นต้น การวัลคาไนซ์จะเกิดขึ้นในระหว่างการบดผสมภายใต้อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์ในเฟสยาง ความหนืดของเฟสยางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่ความหนืดระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกต่างกันมาก (Viscosity mismatch) เมื่อทำการผสมต่อเนื่องไปเฟสของยางที่หนืดได้รับแรงเฉือนจากกลไกของเครื่องมือกลก็จะเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กระดับไมครอนกระจายตัวในเมทริกซ์ของพลาสติก โดยต้องให้แรงเฉือน และอุณหภูมิจนกระทั่งเกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคยางกลับมารวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ซึ่งอนุภาคยางขนาดเล็กที่เกิดขึ้นระหว่างทำการผสมทำให้เกิดการปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการคืนตัว ความทนทานต่อความล้า และความทนทานต่อน้ำมัน เป็นต้น

สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการเบลนด์แบบปกติจะถูกควบคุมโดยอิทธิพลของความหนืดและสัดส่วนการเบลนด์ แต่ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วย

กระบวนการเบลนด์แบบไดนามิกส์วัลคาไนซ์ พอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์กันจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนืด และเทอร์โมไดนามิกส์ที่อุณหภูมิและอัตราเฉือนที่ทำการเบลนด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.8 กล่าวคือ มีการเปลี่ยนจากเฟสร่วมกลายเป็นเฟสกระจาย การเปลี่ยนในลักษณะของการกลับเฟส (เปลี่ยนจากเฟสพลาสติกที่กระจายตัวในเฟสยางกลายเป็นเฟสยางกระจายตัวในเฟสพลาสติก) และการลดลงของขนาดอนุภาคยางที่กระจายตัวในเทอร์โมพลาสติก



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์ (John *et al.*, 2003)

2.4.2 การแปรรูปและการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

ด้วยสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีพฤติกรรมเหมือนเทอร์โมพลาสติกในสภาวะหลอม (Molten state) มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก จึงสามารถแปรรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ด้วยเครื่องแปรรูปพลาสติกทั่วไปและสามารถนากลับมาใช้ใหม่ได้

2.4.2.1 การขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดเข้าเบ้า (Injection Molding)

การขึ้นรูปโดยการฉีดเข้าเบ้าเป็นเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่สำคัญที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาต่อรอบการผลิต (Cycle time) สั้นและสามารถนำเศษวัสดุ (Scrap) จากการขึ้นรูปมาใช้ได้อีก เครื่องฉีดเข้าเบ้าทั่วไปที่ใช้ในการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสามารถนำมาใช้กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ได้ โดยแรงดันประกบแม่พิมพ์ (Clamping pressure) ควรจะอยู่ในช่วง 40-70 MPa หัวฉีด (Nozzle) กรวยนำฉีด (Sprue cone) และประตู (gates) ควรใช้ขนาดกลาง อุณหภูมิที่ใช้ควรมากกว่าอุณหภูมิหลอมของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ เนื่องจากระบบท่อวิ่งที่ร้อน (Hot runner system) จะลดการเสียหายของวัสดุทำให้ประหยัดวัสดุและระยะเวลาต่อรอบการผลิต ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่และขนาดเล็ก โดยจะต้องใช้ช่องว่างของเบ้า (Cavities) มากกว่า 1 หรือ 2 ช่องสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.4.2.2 การขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion Molding)

เทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยการอัดรีดร้อนให้มีรูปทรงต่างๆกัน เช่น เป็นท่อ แผ่นพลาสติก หรือโพรไฟล์พลาสติกได้โดยใช้เครื่องอัดรีดร้อนสกรูเดี่ยวหรือสกรูคู่ที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติกทั่วๆไป การควบคุมขนาดของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดร้อนนั้นทำได้โดยการควบคุมการบวมพองที่หัวดาย (Die swell) ซึ่งสำหรับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์โดยทั่วไปแล้วจะเกิดการบวมพองน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกชนิดแข็งหรือยางวัลคาไนซ์ที่ผสมเขม่าดำ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบวมพอง คือ อัตราเฉือน กล่าวคือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการอัดรีดร้อนเพิ่มขึ้น ตัวเครื่องจะมีค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) ของสกรู (Screw) อย่างน้อย 20/1 (โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้อยู่ในช่วง 24/1 ถึง 30/1) สกรูที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบเดียวกันกับที่ใช้สำหรับพอลิโอลิฟินด์และอาจใช้สกรูที่ออกแบบพิเศษเพื่อช่วยในการผสมได้เช่นกัน

2.4.2.3 การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

เนื่องจากมีการใช้งานวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาวัสดุดังกล่าวให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น สมบัติด้านความต้านทานต่อน้ำมันร้อน สมบัติ

ความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง เป็นต้น โดยในปัจจุบันนิยมนำวัสดุเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น

(1) การนำไปใช้เป็นสินค้าที่ใช้ในเครื่องจักรที่เป็นยาง เช่น ลูกกลิ้งที่ติดไว้ที่ขาโต๊ะไดอะเฟรมที่ยืดหยุ่นได้ ปะเก็น ท่อ เครื่องกันชน อุปกรณ์อุดรูรั่ว วาล์ว และปลั๊ก เป็นต้น

(2) การนำไปใช้ภายใต้ฝากระโปรงรถ เช่น เป็นที่ครอบท่อเครื่องปรับอากาศ ครอบท่อน้ำมัน ท่อดูดสุญญากาศ ตัวต่อเครื่องดูดสุญญากาศ ตัวปลั๊ก อุปกรณ์อุดรูรั่ว วงแหวน ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

(3) การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมท่อผ้าใบ เช่น สเปรย์ในงานเกษตรกรรม สเปรย์ในงานสีอุตสาหกรรมท่อ เป็นต้น

(4) การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ปลั๊ก สายไฟ และสายเคเบิล เป็นต้น

2.5 การเข้ากันได้ของการเบลนด์ (Blend compatibilization) (เจริญ, 2546)

การเข้ากันได้ (Compatibilization) ของการเบลนด์เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาพอลิเมอร์เบลนด์ การเข้ากันได้หมายถึง การผสมเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่นำมาผสมไม่มีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่ต่างกัน และสามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานรูปแบบต่างๆ

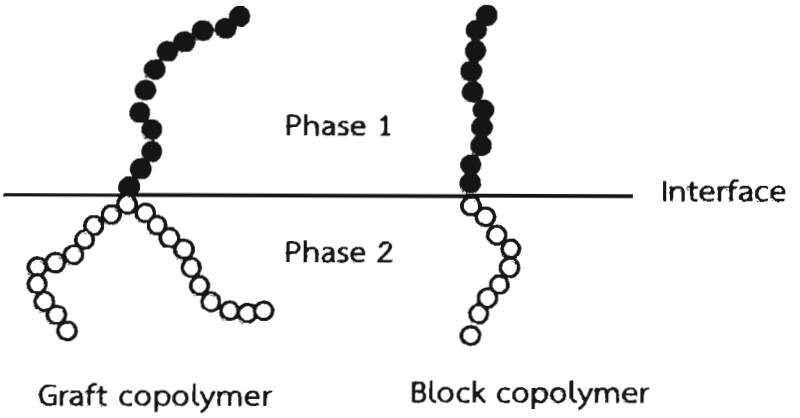
2.5.1 การใช้โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

การเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยใช้โคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อกเป็นตัวประสาน เป็นวิธีการที่มีการศึกษาวิจัยและมีการผลิตพอลิเมอร์เบลนด์กันมากที่สุด โดยทั่วไปจะนิยมใช้โคพอลิเมอร์แบบบล็อกมากกว่า โดยเฉพาะโคพอลิเมอร์แบบบล็อกที่มีส่วนของโมเลกุลที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ที่ต้องการผสม โคพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานจะมีตำแหน่งอยู่ที่ผิวประจัญ (Interface) ของพอลิเมอร์ที่ผสม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 โคพอลิเมอร์จะผสมส่วนที่มีธรรมชาติทางเคมีเหมือนกันกับพอลิเมอร์

2.5.2 การใช้พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังชันก์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ที่มีลักษณะทางเคมีเหมือนกับพอลิเมอร์ที่จะทำการเบลนด์ มาทำการดัดแปรโมเลกุลโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีลงบนโมเลกุล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มเข้าไปจะสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองที่นำมาทำการเบลนด์ได้ การดัดแปรโมเลกุลทำได้โดยการทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์เคมี (Reactor) ซึ่งมักจะทำในสภาวะที่เป็นสารละลาย หรือทำโดยการใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูดดัดแปรโมเลกุลในสภาวะหลอม

JOHN P. KENNEDY LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
PATTANI THAILAND



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการประสานของโคพอลิเมอร์แบบกราฟต์และบล็อคในการเพิ่มความเข้ากันได้ (Bonner and Hope, 1993 อ้างถึงโดย เจริญ, 2546)

2.5.3 รีเอกทีฟเบลนด์ (Reactive blending)

เทคนิครีเอกทีฟเบลนด์ จะเตรียมโดยการปรับสภาวะให้พอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลต่างชนิดในสภาวะหลอม (Melt blending) เทคนิคนี้ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์หลายชนิด เช่น การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากพอลิเอไมด์กับยางเอทิลีนโพรพิลีน ที่มีการดัดแปรโมเลกุลด้วยมาลิอิกแอนไฮไดรด์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์กับหมู่คาร์บอนิลอิสระบนโมเลกุลของยางเอทิลีนโพรพิลีน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางรีเคลมเป็นวัตถุดิบยางในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทหนึ่ง มีลักษณะแบบกึ่งของแข็งและของเหลว มีส่วนของสารตัวเติม น้ำมัน และสารวัลคาไนซ์อยู่ภายใน รวมถึงมีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลคงเหลืออยู่บางส่วน ในการใช้งานโดยทั่วไปมักนำยางรีเคลมมาเบลนด์ร่วมกับยางหรือเทอร์โมพลาสติก สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น องค์ประกอบของยางรีเคลม ความเข้ากันได้ของยางรีเคลมกับวัสดุใหม่ ปริมาณของยางรีเคลม และระบบวัลคาไนซ์ เป็นต้น

2.6.1 กระบวนการรีเคลม

กระบวนการรีเคลม เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสภาพยางวัลคาไนซ์หรือยางเทอร์โมเซตให้มีความสามารถในการแปรรูปและสามารถวัลคาไนซ์ได้อีกครั้ง โดยการทำให้พันธะเชื่อมขวางระหว่างโซ่โมเลกุลยางวัลคาไนซ์นั้นขาดออกด้วยการใช้แรงเชิงกลร่วมกับความร้อน และ/หรือปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น (พรพรรณ, 2528) อย่างไรก็ตามในกระบวนการรีเคลมนอกจากพันธะเชื่อมขวางแล้ว ยังมีโซ่โมเลกุลยางบางส่วนที่สามารถขาดออกได้ด้วย เป็นผลให้ยางรีเคลมที่นำมาวัลคาไนซ์ใหม่มีค่าความ

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความกระเด้งตัว และความต้านทานการสึกหรอต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ทั่วไป (พรพรรณ, 2528) ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษากระบวนรีเคลม เช่น De *et al.* (2005) ได้ศึกษาการเตรียมยางรีเคลมจากยางครัมป์ (Crumb rubber) ที่ได้จากล้อรถยนต์เก่า โดยเตรียมยางรีเคลมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง แปรเวลาการบดผสม 20-40 นาที และแปรปริมาณสารช่วยรีเคลม (Reclaiming agent) ชนิด Tetrametyl thiuram disulfide (TMTD) ปริมาณ 1.5-3.25 phr โดยใช้น้ำมันสปินเดิลคงที่ที่ 10 มิลลิลิตร ต่อยาง 100 กรัม นำยางรีเคลมที่ได้มาวัลคาไนซ์ใหม่ที่อุณหภูมิ 160°C จากการศึกษาพบว่าการใช้สารช่วยรีเคลมที่ปริมาณ 2.75 phr ร่วมกับการบดผสม 40 นาที เป็นสภาวะการเตรียมยางรีเคลมที่ทำให้ยางรีเคลมวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลโดยรวม ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด มอดุลัส และความแข็งที่ดีที่สุด ต่อมา อัญชลี (2551) ได้ศึกษาการเตรียมยางรีเคลมจากยางครัมป์ที่ได้จากผิวหน้ายางล้อรถบรรทุกในกระบวนการหล่อดอกด้วยกระบวนการทางกลร่วมกับการใช้สารช่วยรีเคลมบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิบดผสมเริ่มต้น 40°C ทำการแปรชนิดสารช่วยรีเคลม 4 ชนิด ได้แก่ Tetramethyl thiuram monosulfide (TMTM), TMTD, Dipentamethylene thiuramtetrasulfide (DPTS) และ Mercaptobenzothiazole disulfide (MBTS) แปรปริมาณสารช่วยรีเคลมในช่วง 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางครัมป์ แปรระยะเวลาการบดผสมที่ 40 และ 120 นาที และนำยางรีเคลมที่ได้กลับมาวัลคาไนซ์ใหม่ที่อุณหภูมิ 142°C ผลการศึกษาพบว่าการใช้ MBTS ที่ปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของยางครัมป์ ที่ระยะเวลาการบดผสม 40 นาที จะให้ยางรีเคลมวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด 100% มอดุลัส และความแข็ง ที่ดีที่สุด การเพิ่มเวลาในการบดผสมเป็น 120 นาที จะทำให้สมบัติเชิงกลดังกล่าวของยางรีเคลมวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ในการศึกษาของ ปฏิญญา (2556) ได้ศึกษาการเตรียมยางรีเคลมจากยางครัมป์ที่ได้จากผิวหน้ายางล้อรถบรรทุกในกระบวนการหล่อดอกด้วยกระบวนการทางกลร่วมกับการใช้สารช่วยรีเคลมที่อุณหภูมิ 60°C และทำการแปรปริมาณน้ำมันสปินเดิล (Spindle oil) ที่ 0-30 phr พบว่ายางรีเคลมวัลคาไนซ์ ที่ใช้อุณหภูมิวัลคาไนซ์ 160°C จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณน้ำมันจนถึงที่ 5 phr การใช้ปริมาณน้ำมันมากกว่านี้จะมีผลให้สมบัติดังกล่าวลดลงตามปริมาณน้ำมันที่มากขึ้น

2.6.2 การใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบเบลนด์

การใช้งานยางรีเคลมในปัจจุบันค่อนข้างมีข้อจำกัดเนื่องจากยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปจะนิยมใช้ยางรีเคลมเติมลงในยางคอมพาวนด์เพื่อลดต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งนี้เนื่องจากยางรีเคลมมีราคาถูกเมื่อเทียบกับวัตถุดิบยางอื่นๆ ประกอบกับการใช้งานยาง

รีเคลมยังมีข้อได้เปรียบบางประการเช่น ช่วยให้เพิ่มอัตราการผลิต ลดการบวมพอง (Die swell) ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) เนื่องจากยางรีเคลมมีพันธะเชื่อมขวางคงเหลืออยู่บางส่วน เป็นผลให้ยางคอมพาวนด์มีความยืดหยุ่นน้อยลง จึงสามารถได้ชิ้นงานที่มีขนาดแน่นอน (วราภรณ์, 2552) เป็นต้น งานวิจัยที่ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลม เช่น Sombatsompop and Kumnuantip (2003) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางรีเคลมในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม จากการทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์ พบว่าค่าพลาสติซิตี้ และค่าความหนืดเฉือน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของเขม่าดำที่เป็นองค์ประกอบของยางรีเคลม และในการศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์พบว่ามอดุลัส ความแข็ง และปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางเบลนด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม เนื่องจากในยางรีเคลมมีเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมแรง และการมีพันธะเชื่อมขวางที่คงอยู่ในยางรีเคลมซึ่งไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลยาง ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของยางเบลนด์จากยางธรรมชาติและยางรีเคลมลดลงเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในองค์ประกอบเบลนด์เพิ่มมากขึ้น รวมถึงการเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาของ Kumnuantip and Sombatsompop (2003) แสดงให้เห็นอีกว่าการเพิ่มสัดส่วนยางรีเคลมในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมมีผลทำให้แนวโน้มพีคของค่าแทนเจนต์สูญเสียเลื่อนไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าแทนเจนต์สูญเสียสูงสุดลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำที่อยู่ในยางรีเคลม โดยเขม่าดำเป็นสารที่มี loss angle ต่ำมาก การผสมยางรีเคลมลงในยางเบลนด์จะทำให้ยางเบลนด์มีค่าแทนเจนท์สูญเสียลดลงได้ ต่อมา Tantayanon and Juikham (2004) ศึกษาการแปรอัตราส่วนระหว่างยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีนที่อัตราส่วนเท่ากับ 20/80, 25/75, 30/70, 35/65 และ 40/60 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยางรีเคลม เนื่องจากยางรีเคลมช่วยในการดูดซับแรงได้มากขึ้น ร่วมกับการเกิดพันธะเชื่อมขวางในเฟสยางทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้ความสามารถในการรับแรงดีขึ้น ที่ระดับสัดส่วนของยางรีเคลมมากกว่า 30 ส่วนโดยน้ำหนักในองค์ประกอบเบลนด์ ความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณเขม่าดำจากยางรีเคลมเพิ่มมากขึ้น ทำให้เขม่าดำเกิดการแยกชั้นออกมา (Layer like structure) ส่งผลให้ความต่อเนื่องของเฟสลดลงทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีความต้านทานต่อการกระแทกลดลงต่อมา Farahani *et al.* (2006) ศึกษาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ระหว่างธรรมชาติกับยางรีเคลม โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ส่วนโดยน้ำหนัก พบว่าความหนืดมูนนี่ของยางเบลนด์มีค่าต่ำกว่าความหนืดมูนนี่ของยาง

Prince of Songkla University Pattani Campus

ธรรมชาติเนื่องจากยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจากผลของการตัดขาดสายโซ่ในระหว่างกระบวนการรีเคลม และความหนืดมูนนี่ของยางเบลนด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมที่อยู่ในยางเบลนด์ จากผลของสารตัวเติมในยางรีเคลมและความไม่เข้ากันระหว่างเฟสในยางเบลนด์ ขณะที่สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการล้า และความกระเด้งตัว มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ามอดุลัส ความแข็ง และการผิดรูปเนื่องจากการกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่มากขึ้น ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับผลของน้ำหนักโมเลกุลยางรีเคลมที่ต่ำ การมีสารตัวเติมและการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลของยางรีเคลมบางส่วน จึงทำให้ยางเบลนด์เกิดการแยกเฟสจากผลของความไม่เข้ากันขององค์ประกอบ นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Mandal *et al*. (2014) ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงกลพลวัตของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมที่ 100/0, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ส่วนโดยน้ำหนัก ในการศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมจะมีส่วนพันธะเชื่อมขวางเป็นองค์ประกอบ ทำให้เมื่อนำยางรีเคลมมาเบลนด์ร่วมกับยางธรรมชาติ ส่วนของพันธะเชื่อมขวางที่อยู่ในยางรีเคลมจะทำให้ยางรีเคลมไม่สามารถกระจายตัวอย่างต่อเนื่องในยางธรรมชาติได้ และส่วนของพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมเป็นจุดอ่อนแอในการส่งผ่านแรงไปยังเฟสยางธรรมชาติทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าด้อยลง ขณะที่ความแข็ง และมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมที่เพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการมีปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางเบลนด์วัลคาไนซ์เพิ่มมากขึ้นนอกเหนือจากพันธะเชื่อมขวางเดิมที่อยู่ในยางรีเคลม และการที่มีเขม่าดำทำให้ยางเบลนด์วัลคาไนซ์มีความแข็งในโมเลกุลเพิ่มขึ้น ในการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตพบว่าที่อัตราส่วนการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเท่ากับ 80/20 ให้ค่ามอดุลัสสะสม มอดุลัสสูญเสีย และค่าแทนเจนต์สูญเสียที่สูงที่สุด

2.6.3 ระบบวัลคาไนซ์ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ

การวัลคาไนซ์ยางเบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมจะแตกต่างไปจากกรณีการใช้ยางใหม่ที่ไม่ผสมยางรีเคลม มีความจำเป็นต้องพิจารณาการใช้สารในระบบวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม (วราภรณ์, 2552) งานวิจัยที่ศึกษาผลของการวัลคาไนเซชันต่อสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ เช่น Sombatsompop and Kumnuantip (2003) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณยางรีเคลมในยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม ในการทดสอบพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์พบว่าอัตราการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมมีสารวัลคาไนซ์และสารตัวเร่งหลงเหลืออยู่ ในขณะที่เวลาสกอชมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีเคลม

ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ายางรีเคลมยังมีส่วนที่ว่องไวในการเกิดพันธะเชื่อมขวางเหลืออยู่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mandal *et al.* (2014) ซึ่งศึกษาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ และปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม ที่อัตราส่วนการเบลนด์แตกต่างกัน พบว่าค่าทอร์กสูงสุด ดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ และความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางเบลนด์ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางรีเคลมที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่เวลาการวัลคาไนซ์ลดลง เป็นผลมาจากปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่คงอยู่ในยางรีเคลมซึ่งเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลม ต่อมา Tantayanon and Juikham (2004) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ยางรีเคลมและยางครัมป์เบลนด์ร่วมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อปรับปรุงความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิโพรพิลีน ร่วมกับการศึกษาการใช้สารวัลคาไนซ์ในพอลิเมอร์เบลนด์ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ยางรีเคลมจะช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกของพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่ายางครัมป์ และพบว่าการใช้สารวัลคาไนซ์ทำให้พอลิเมอร์เบลนด์มีค่าความต้านทานต่อการกระแทกสูงกว่ากรณีที่ไม่ใช้สารวัลคาไนซ์ โดยการใช้สารวัลคาไนซ์ผสมระหว่างมาลิอิกแอนไฮไดรด์ร่วมกับเปอร์ออกไซด์จะให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการกราฟต์ของมาลิอิกแอนไฮไดรด์บนโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน และยาง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น โดยสารวัลคาไนซ์ที่ให้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกสูงรองลงมา คือ เปอร์ออกไซด์ กำมะถัน และมาลิอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ ส่วนในงานวิจัยของ Rattanasom *et al.* (2005) ศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์กำมะถันแบบปกติ และแบบประสิทธิภาพ ต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการบ่มเร่งของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม ผลการศึกษาพบว่ายางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติมีความแข็ง มอดุลัส และความต้านทานต่อการสึกหรอ สูงกว่ากรณียางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ ยกเว้นความสามารถในการยืดจนขาดที่มีค่าด้อยกว่า เนื่องจากการใช้ระบบกำมะถันแบบปกติจะให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางเบลนด์มากกว่าการใช้ระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ เพราะระบบกำมะถันแบบปกติจะมีปริมาณกำมะถันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้มากกว่า ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงจะไม่ขึ้นกับระบบวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ในการศึกษาความต้านทานต่อการบ่มเร่งของยางเบลนด์ พบว่ายางเบลนด์ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติจะมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่ด้อยกว่าการใช้ระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพ เนื่องจากพันธะเชื่อมขวางในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบประสิทธิภาพจะเป็นแบบ โมโนซัลฟิดิก และไดซัลฟิดิก ซึ่งจะมีความเสถียรมากกว่าพันธะเชื่อมขวางแบบโพลิซัลฟิดิกในการใช้ระบบกำมะถันแบบปกติ

Payap University Research Center

2.6.4 การใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบเบลนด์ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

นอกจากใช้งานยางรีเคลมในการเบลนด์ร่วมกับยางหรือเทอร์โมพลาสติกดังที่กล่าวผ่านมานี้ ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบเบลนด์ในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เช่น ในการศึกษาของ Magioli *et al.* (2010) ได้ศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) ยางรีเคลม และพอลิโพรพิลีน โดยใช้ระบบวัลคาไนซ์เปอร์ออกไซด์ ทำการแปรอัตราส่วนระหว่างไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) และสารโคเอเจนท์ *N,N*-m-phenylene-bis-maleimide (BMI) และศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีและไม่มียางสไตรีนบิวทาไดอีนเป็นองค์ประกอบเบลนด์ จากผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณสารโคเอเจนท์ในระบบเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความแข็งที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก BMI สามารถช่วยในการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพันธะคู่ของ BMI กับอนุมูลอิสระในยางรีเคลมและพอลิโพรพิลีน และพบว่าสูตรที่มีองค์ประกอบของยางสไตรีนบิวทาไดอีนทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสมบัติเด่นด้านความสามารถในการยืดจนขาด นุรอัสวารี (2557) พบว่าการใช้ยางรีเคลมเป็นองค์ประกอบในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และพอลิโพรพิลีน มีผลทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการใช้สารวัลคาไนซ์ในปริมาณคงที่แทนที่จะไปวัลคาไนซ์โมเลกุลยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว สารวัลคาไนซ์บางส่วนสามารถเข้าไปวัลคาไนซ์ยางรีเคลมได้ด้วยทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ในยางธรรมชาติลดลง เป็นผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสมบัติการไหลลดลง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างเฟสและความเข้ากันได้ขององค์ประกอบ รวมถึงการที่ยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเนื่องจากโมเลกุลถูกตัดในกระบวนการเตรียมยางรีเคลม ในขณะที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางรีเคลมที่มากขึ้น และในการศึกษาอิทธิพลของระดับของหมู่อิพอกไซด์ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ยางรีเคลม และพอลิโพรพิลีน โดยแปรระดับของหมู่อิพอกไซด์ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์เท่ากับ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์โมล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสมบัติการไหลมีค่าลดลง ตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และพอลิโพรพิลีนที่ลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีสภาพขั้วที่แตกต่างจากเฟสยางรีเคลมและพอลิโพรพิลีน

2.6.5 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบ

ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มียางรีเคลมเป็นองค์ประกอบโดยทั่วไปนิยมทำโดยการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมและการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อให้มีหมู่ฟังชันก์ที่เข้ากันได้กับคู่เบลนด์ได้มากขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาในหัวข้อนี้ เช่น Shanmugharaj *et al.* (2007) ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีนโดยใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ คือ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted maleic anhydride, PP-g-MA) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้ยางรีเคลมที่ไม่ดัดแปรพื้นผิว และยางรีเคลมที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยอัลลิลเอมีน (Allylamine) พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมดัดแปรพื้นผิวจะมีความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่ากรณีของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ใช้ยางรีเคลมที่ไม่ดัดแปรพื้นผิว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเข้ากันได้ระหว่างยางรีเคลมดัดแปรพื้นผิวกับพอลิโพรพิลีน เนื่องจากยางรีเคลมที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยอัลลิลเอมีนทำให้มีหมู่เอมีนอยู่ที่ผิว ซึ่งหมู่เอมีนสามารถเกิดอันตรกริยากับมาลิกอิกแอนไฮไดรด์จากสารเพิ่มความเข้ากันได้ PP-g-MA ทำให้ยางรีเคลมที่ดัดแปรผิวด้วยอัลลิลเอมีนถูกเคลือบด้วย PP-g-MA ซึ่งช่วยในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ และปรับปรุงการกระจายตัวของยางรีเคลมในเฟสพอลิโพรไพรลีน ต่อมา Zhang *et al.* (2009b) ศึกษาการดัดแปรพื้นผิวยางรีเคลมด้วยน้ำมันดิน (Bitumen) ร่วมกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ 3 ชนิดคือ styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS), Maleic anhydride grafted styrene-ethylene/butylene-styrene (SEBS-g-MA) และ Maleic anhydride grafted Ethylene propylene diene (EPDM-g-MA) ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางรีเคลมกับพอลิโพรพิลีน พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยน้ำมันดินจะมีค่าความสามารถในการยืดจนขาดและความเสถียรต่อความร้อนที่สูงกว่ากรณีการใช้ยางรีเคลมที่ไม่ได้ดัดแปรพื้นผิว เนื่องจากน้ำมันดินสามารถเกิดปฏิกิริยากับกำมะถันในยางรีเคลม ทำให้ลดโอกาสที่พันธะเชื่อมขวางที่ถูกตัดขาดสามารถกลับมารวมตัวกันใหม่ จึงทำให้ยางรีเคลมมีพันธะเชื่อมขวางน้อยลง และมีโอกาสที่สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น (เกิดการเกี่ยวพันของโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น) และในการศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ร่วมกับยางรีเคลมที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยน้ำมันดินพบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการยืดจนขาด และความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ได้ โดยสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวจากมากไปน้อย ดังนี้ SEBS>SEBS-g-MA>EPDM-g-MA เนื่องจากจะมีส่วนของเอทิลีนบิวทาไดอีนที่สามารถเข้ากับพอลิโพรพิลีนได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีองค์ประกอบของยางรีเคลมโดยการใช้รังสี เช่น การศึกษาของ Zhang *et al.* (2009a) ได้ศึกษาการใช้พลาสมาในการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้

ระหว่างยางรีเคลมกับยางไนไตรล์ พบว่ายางรีเคลมมีหมู่ไฮดรอกซิล (–OH groups) ปรากฏอยู่บนพื้นผิวภายหลังจากทำทรีทเมนต์ด้วยพลาสมา (Plasma treatment) และในการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์พบว่าการใช้ยางรีเคลมที่ดัดแปรพื้นผิว ค่ามอดุลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด สูงกว่ากรณียางเบลนด์ที่ผสมยางรีเคลมที่ไม่ดัดแปรพื้นผิว เนื่องจากยางรีเคลมที่ดัดแปรพื้นผิวจะมีออกซิเจนที่ผิวของยางรีเคลมซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างผิวของยางรีเคลมดัดแปรพื้นผิวและยางไนไตรล์

Prince of Songkla University
Pattani Campus

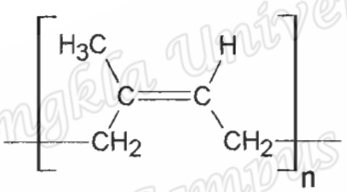
บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoke sheet, RSS#3)

ใช้สำหรับเบลนด์ร่วมกับยางรีเคลมและโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้จากการนำน้ำยางสดมาจับตัวเป็นก้อนแล้วนำไปรีดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม จากนั้นนำไปรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 45-46°C มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมสีน้ำตาลเข้ม ความหนาแน่น 0.92 g/cm^3 ผลิตโดยชมรมสหกรณ์สวนยาง อำเภอโคกโพธิ์-แม่ลาน จังหวัดปัตตานี มีสูตรโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.1.2 ยางรีเคลมชนิดแผ่น (Reclaimed rubber, RR)

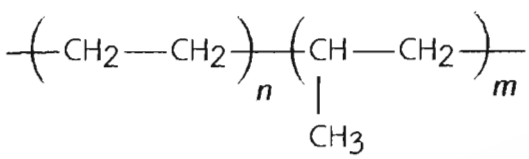
ใช้สำหรับเบลนด์ร่วมกับยางธรรมชาติและโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยยางรีเคลมที่เลือกใช้เป็นยางรีเคลมชนิดแผ่น มีลักษณะเป็นแผ่นยางบางๆ ซ้อนกันหลายๆชั้นจนมีลักษณะเป็นก้อนสีดำ มีความหนาแน่น 1.10 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย

3.1.3 น้ำยางธรรมชาติข้นชนิดแอมโมเนียมสูง (High ammonia concentrated natural rubber latex, HA)

ใช้สำหรับเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) โดยประมาณ 60% มีปริมาณของแข็งทั้งหมดในยาง (Total solid content, TSC) 61.65% ผลิตโดยบริษัท ยะลาลาเท็กซ์ จำกัด จังหวัดยะลา ประเทศไทย

3.1.4 โพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (Propylene-ethylene copolymer, PEC)

ใช้สำหรับเบลนด์ร่วมกับยางธรรมชาติและยางรีเคลม เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้โพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เกรด Versify®3300 มีลักษณะเป็นเม็ดใส ไม่มีสี มีค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index, MFI) เท่ากับ 8 g/10min (230°C, 2.16 kg) ความหนาแน่นเท่ากับ 0.869 g/cm^3 มีปริมาณเอทิลีน (Ethylene content) 12% และมีปริมาณผลึก 11% ผลิตโดยบริษัท Dow Chemical Company ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสูตรโครงสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สูตรโครงสร้างของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

3.1.5 กรดฟอร์มิก (Formic acid)

ใช้ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกในปฏิกิริยาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีสถานะเป็นของเหลว สูตรโมเลกุลคือ HCOOH มีความเข้มข้น 94 %w/w น้ำหนักโมเลกุล 46.03 g/mol ความหนาแน่น 1.22 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Riedel De Haen ประเทศเยอรมัน

3.1.6 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ใช้ร่วมกับกรดฟอร์มิกสำหรับการเตรียมกรดเปอร์ฟอร์มิกในปฏิกิริยาการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์ มีสถานะเป็นของเหลว สูตรโมเลกุลคือ H_2O_2 มีความเข้มข้น 50 %w/w น้ำหนักโมเลกุล 34.0 g/mol ความหนาแน่น 1.44 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Riedel De Haen ประเทศเยอรมัน

3.1.7 เทอร์ริก เอ็น 30 (Terric N30)

เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทนอนไอออนิก (Non-ionic surfactant) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มอัลคิลฟีนอลเอทอกซิเลท (Alkylphenol ethoxylate) มีลักษณะเป็นไขสีขาวขุ่น pH ประมาณ 6-8 ผลิตโดยบริษัท Huntsman ประเทศออสเตรเลีย

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.1.8 เมทานอล (Methanol)

ใช้จับตัวน้ำยางหลังจากปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน มีสถานะเป็นของเหลว สูตรโมเลกุลคือ CH_3OH น้ำหนักโมเลกุล 32.05 g/mol ความหนาแน่น 0.79 g/cm^3 จุดเดือด 64.7°C ผลิตโดยบริษัท J.T Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.9 กรดสเตียริก (Stearic acid)

ใช้เป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน มีสูตรโมเลกุลคือ $CH_3(CH_2)_{16}.COOH$ น้ำหนักโมเลกุล 284.47 g/mol ลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.85 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 69-70°C ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical จำกัด ประเทศไทย

3.1.10 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ใช้เป็นสารกระตุ้นในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน เกรดที่ใช้คือ White seal มีน้ำหนักโมเลกุล 81.41 g/mol ลักษณะเป็นผงสีขาว ความหนาแน่น 5.57 g/cm^3 อุณหภูมิสลายตัวที่ 1975°C ผลิตโดยบริษัท Global Chemical จำกัด ประเทศไทย

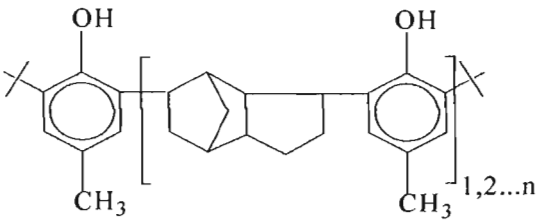
3.1.11 น้ำมันขาว (White oil)

เป็นน้ำมันสำหรับช่วยแปรรูป (Processing aid) โดยเป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่องค์ประกอบส่วนใหญ่คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดพาราฟินิก และแนฟทานิก เกรดที่ใช้ในงานวิจัยคือ GRADE A มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C เท่ากับ 18.86 mm^2/s ความหนาแน่นเท่ากับ 0.87 g/cm^3 ผลิตโดย บริษัท Maoming Fulida Chemical จำกัด ประเทศจีน

3.1.12 วิงสเตย์ แอล (Wingstay L®)

ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมเนื่องจากการออกซิเดชัน (Antioxidant) จัดอยู่ในกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol derivatives) ชื่อทางเคมีคือ Polymeric sterically hindered phenol มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 650 g/mol มีความหนาแน่น 1.08 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 115°C ผลิตโดยบริษัท Eliokem. Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.3

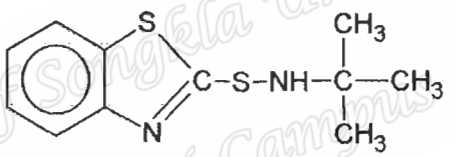
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 3.3 โครงสร้างโมเลกุลของวิงสเตย์ แอล

3.1.13 เอ็น เทอเทียรี บิวทิล-2-เบนโซไทอาซิล ซัลฟีนาไมด์ (*N*-tert-butyl-2-benzothiazyl sulphenamide, TBBS)

ใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน จัดอยู่ในกลุ่มของซัลฟีนาไมด์ มีสูตรโมเลกุล $C_{11}H_{14}N_2S_2$ น้ำหนักโมเลกุล 238.37 g/mol มีจุดหลอมเหลว 105°C ผลิตโดยบริษัท Flexsys Amerrica L.P. ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.4

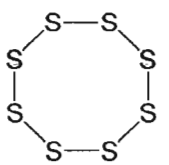


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 3.4 โครงสร้างโมเลกุลของเอ็น เทอเทียรี บิวทิล-2-เบนโซไทอาซิล ซัลฟีนาไมด์

3.1.14 กำมะถัน (Sulphur)

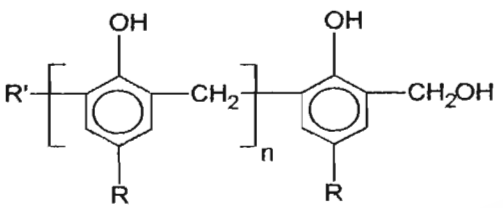
ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ มีสูตรโมเลกุลคือ S_8 ลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีจุดหลอมเหลว 115.21°C ผลิตโดยบริษัท Siam Chemical จำกัด ประเทศไทย มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างโมเลกุลของกำมะถัน

3.1.15 ไฮดรอกซีเมทิลลอลฟินอลิกเรซิน (Hydroxymethylol phenolic resin, HRJ-10518)

ใช้เป็นสารดัดแปรสำหรับยางรีเคลมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟส เป็นสารเคมีในกลุ่มฟินอลิกเรซินที่มีหมู่เมทิลลอล(CH_2OH) อยู่ในช่วง 6-9% ลักษณะเป็นของแข็งสีเหลืองอำพัน ช่วงจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 60-70°C มีความถ่วงจำเพาะ 1.05 ผลิตโดยบริษัท Schenectady International Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.6



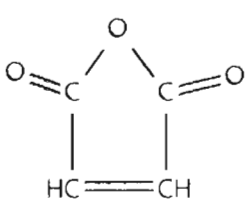
รูปที่ 3.6 โครงสร้างโมเลกุลของไฮดรอกซีเมทิลลอลฟินอลิกเรซิน

3.1.16 สแตนนัสคลอไรด์ไดไฮเดรท (Stannous chloride dihydrate)

ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับฟินอลิกเรซินเพื่อดัดแปรยางรีเคลมสำหรับเพิ่มความเข้ากันได้ มีสูตรโมเลกุลคือ $SnCl_2.2H_2O$ มีน้ำหนักโมเลกุล 226.63 g/mol ความหนาแน่น 2.71 g/cm^3 และมีจุดหลอมเหลว 37-38°C ผลิตโดยบริษัท Carlo Erba Reagent ประเทศฝรั่งเศส

3.1.17 มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, $C_4H_2O_3$)

ใช้เป็นสารดัดแปรสำหรับยางรีเคลมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟส เกรดที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกรดวิเคราะห์ (AR-grade) มีความบริสุทธิ์ 99.0% มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวขุ่น น้ำหนักโมเลกุล 98.06 g/mol ความหนาแน่น 1.48 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Fluka chemical ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.7

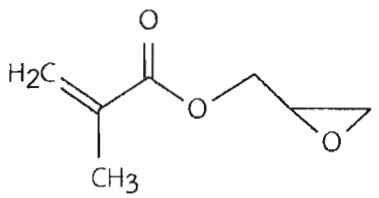


รูปที่ 3.7 โครงสร้างโมเลกุลมาลิอิกแอนไฮไดรด์

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.1.18 ไกลซิดิลเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate, $C_7H_{10}O_3$)

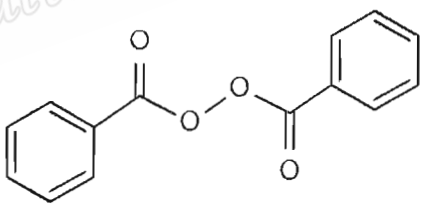
ใช้เป็นสารดัดแปรสำหรับยางรีเคลมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟส เกรดที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกรดวิเคราะห์ (AR-grade) มีความบริสุทธิ์ 97.0% มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี น้ำหนักโมเลกุล 142.15 g/mol และมีความหนาแน่น 1.07 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich chemistry ประเทศญี่ปุ่น มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างโมเลกุลไกลซิดิลเมทาคริเลต

3.1.19 เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide, $C_{14}H_{10}O_4$)

ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาสำหรับมาลิอิกแอนไฮไดรด์และไกลซิดิลเมทาคริเลตเพื่อดัดแปรยางรีเคลมสำหรับเพิ่มความเข้ากันได้ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ใช้ในการทดลองมีความบริสุทธิ์ 98.0% ความหนาแน่น1.33 g/cm^3 ผลิตโดย Fluka chemical Co., Ltd มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โครงสร้างโมเลกุลเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

3.1.20 อะซิโตน (Acetone)

ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดยางรีเคลมเพื่อหาปริมาณส่วนที่สามารถละลายได้มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีสูตรโมเลกุล คือ C_3H_6O มีจุดเดือดที่ 56.53°C ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia จำกัด ประเทศไทย

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.1.21 เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran; THF)

ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดยางรีเคลมเพื่อหาปริมาณส่วนที่สามารถละลายได้ มีสูตรโมเลกุลคือ C_4H_8O มีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี มีจุดเดือดเท่ากับ 66°C ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia จำกัด ประเทศไทย

3.1.22 โทลูอีน (Toluene)

ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับทดสอบปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลม มีสูตรโมเลกุลคือ $C_6H_5(CH_3)$ ลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี น้ำหนักโมเลกุล 92.14 g/mol ความหนาแน่นเท่ากับ 0.87 g/cm^3 มีค่าพารามิเตอร์การละลายเท่ากับ 8.9 $cal^{-1/2}.cm^{-3/2}$ มีความบริสุทธิ์ 99.5% มีจุดเดือดเท่ากับ 110.6°C ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia จำกัด ประเทศไทย

3.1.23 ไซลีน (Xylene)

ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดเฟสของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เพื่อเตรียมตัวอย่างในการทดสอบสัณฐานวิทยา มีสูตรโมเลกุล C_8H_{10} จุดเดือด 138.5°C ความหนาแน่น 0.864 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Fisher Scientific, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ชุดสกัดด้วยตัวทำละลายโดยวิธี Soxhlet extraction

ชุดสกัดประกอบด้วยเครื่องมือสกัดแบบซ็อกเล็ต (Soxhlet extractor) ขวดก้นกลม (Round bottle flask) คอนเดนเซอร์แบบไส้กระเปาะ (Condenser allihn) และตัวให้ความร้อน (Heating mantle) โดยใช้ในการสกัดยางรีเคลมเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณส่วนที่สามารถละลายได้

3.2.2 เครื่องทดสอบการสลายตัวด้วยความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA)

ใช้ในการวิเคราะห์ความเสถียรต่อความร้อน โดยศึกษาหาอุณหภูมิในการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นตัวอย่าง สามารถทดสอบได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 750°C ภายใต้สภาวะก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน โดยสภาวะบรรยากาศออกซิเจน เป็นการสลายตัวจากปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้ความร้อน (Thermo-oxidative degradation) ส่วนสภาวะบรรยากาศไนโตรเจน เป็นการสลายตัวที่มีผลมาจากความร้อน (Thermal degradation) โดยใช้เครื่องรุ่น STA 6000 ผลิตโดย บริษัท Perkin Elmer Co., Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR)

ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของยางรีเคลม ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และสารเพิ่มความเข้ากันได้ มีช่วงรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.8-200 ไมโครเมตร ซึ่งมีช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 4000-400 cm^{-1} สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีโดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance Spectroscopy (ATR) และเทคนิค Infrared spectroscopy (IR) เป็นเครื่องรุ่น Tensor27/Hyperion ผลิตโดยบริษัท Bruker ประเทศเยอรมัน

3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

ใช้ในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา โครงสร้างระดับจุลภาค โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300,000 เท่า ส่วนประกอบของเครื่องประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ระบบเลนส์ (Electromagnetic lens) หัวดักจับสัญญาณ (Signal detector) และส่วนแสดงภาพจอคอมพิวเตอร์ เป็นเครื่องยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 ผลิตโดยบริษัท Philips Co., Ltd ประเทศเนเธอร์แลนด์

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2.5 เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)

ใช้ในการทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่หมุนในยาง สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ วัดแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนของแผ่นโลหะในยางด้วยความเร็วคงที่ 2 รอบต่อนาที เป็นเครื่องรุ่น VISCAL ผลิตโดย Tech Pro Co., Ltd ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.6 เครื่องผสมแบบปิดชนิดบราเบนเดอร์ พลาสติคอร์เดอร์ (Brabender plasticorder)

เป็นเครื่องผสมแบบปิดขนาดเล็ก รุ่น mixer 50EHT 3Z ประกอบด้วยโรเตอร์ 2 ตัวมีปริมาตรความจุของห้องผสม 50 cm^3 สามารถควบคุมความเร็วโรเตอร์ และอุณหภูมิขณะผสมได้ อุปกรณ์หลักประกอบด้วย ห้องผสม และชุดให้ความร้อนแบบใช้ไฟฟ้าเพื่อควบคุมอุณหภูมิผสมด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ (Themostat) โดยตัวเครื่องจะเชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณข้อมูล (Data acquisition system) เพื่อวัดค่าทอร์กและอุณหภูมิของการผสม ซึ่งเครื่องบราเบนเดอร์จัดเป็นอุปกรณ์ประเภท Torque Rheometer โดยเครื่องจะบันทึกกราฟที่แสดงลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงขณะการผสมที่สำคัญ คือกราฟระหว่างค่าทอร์กกับเวลาและกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ผลิตโดยบริษัท Brabender® GmbH & Co. KG ประเทศเยอรมัน

3.2.7 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการบดผสมยางกับสารเคมี ในงานวิจัยใช้เพื่อรีดยางคอมพาวนด์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ให้เป็นแผ่นหลังจากผสมจากเครื่องผสมแบบปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 14 นิ้ว ความเร็วผิวลูกกลิ้งหน้า 21.4 รอบต่อนาที ความเร็วผิวลูกกลิ้งหลัง 25.7 รอบต่อนาที อัตราความเร็วของลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1/1.21 สามารถปรับอุณหภูมิสูงสุดที่ 399°C ผลิตโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด ชัยเจริญการช่าง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

3.2.8 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer, Mini-MDR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์รุ่น Mini-MDR โดยค่าที่ทดสอบได้คือ เวลาในการไหลของยาง (Scorch time) เวลาในการวัลคาไนซ์ (Cure time) ค่าแรงบิดสูงสุด ค่าแรงบิดต่ำสุด และผลต่างของค่าแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด ผลิตโดยบริษัท Prescott Instruments Ltd ประเทศอังกฤษ

3.2.9 เครื่องอัดเบ้า (Compression moulding machine)

เครื่องอัดเบ้าแบบมีระบบหล่อเย็นรุ่น PR2D-W300L350-PM-WCL-HMI เป็นเครื่องอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ โดยการกดอัดเบ้าด้วยระบบไฮดรอลิก ตัวเครื่องประกอบด้วยแผ่นให้ความร้อนที่มีขนาดเท่ากับ 300 x 350 mm จำนวน 2 แผ่น ซึ่งแต่ละแผ่นตั้งอุณหภูมิได้ถึง 300°C สำหรับแผ่นอัดล่างสามารถลดอุณหภูมิด้วยระบบน้ำหล่อเย็น ผลิตโดยบริษัท เจริญทัศน์ จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ประเทศไทย

3.2.10 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile testing machine)

เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ยี่ห้อ Hounsfield รุ่น H 10KS สามารถรับแรงได้สูงสุด 10 kN มี load cell ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากค่าแรงที่วัดได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นค่าแรงดึงหรือแรงกดในหน่วยนิวตัน สามารถตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.01 ถึง 1,000 mm/min ผลิตโดยบริษัท Hounsfield Test Equipment ประเทศอังกฤษ

3.2.11 เครื่องทดสอบความแข็ง (Digital Hardness Tester)

เป็นเครื่องวัดความแข็งดิจิตอล แบบชอร์ดูโรมิเตอร์ (Shore durometer) ใช้วัดความแข็งชิ้นทดสอบ โดยใช้แรงกดจากสปริง ผลิตโดยบริษัท Toyosetki Co., Ltd ประเทศญี่ปุ่น

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.2.12 เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer)

ใช้ในการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ประกอบด้วยบาร์เรล 2 ตัว มีความยาวตลอดแนวของกระบอก ส่วนปลายกระบอกจะมีร่องเกลียวที่สามารถติดตั้งหัวดายได้ ความเร็วในการอัดกระบอกสูบอยู่ในช่วง 0.0001 – 40 mm/s สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 400°C สามารถปรับความดันได้ตั้งแต่ 20 ถึง 2,000 bar เครื่องที่ใช้คือ Goëttfert รุ่น RG 20 ผลิตโดยบริษัท Goëttfert Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.13 เครื่องทดสอบความสามารถในการแปรรูป (Moving die processability, MDpt)

เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัติ สามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 50-220°C แปรความถี่ได้ตั้งแต่ 0.02-30 Hz สามารถทดสอบหาค่ามอดุลัสสะสม (G') มอดุลัสสูญเสีย (G'') แทนเจนท์สูญเสีย (Tan δ) และค่าความหนืดเชิงซ้อน (η^*) ได้ เป็นเครื่องรุ่น Rheo Tech MDpt ผลิตโดยบริษัท Tech Pro Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของยางรีเคลม

▶ การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโทรสโกปี โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrophotometer, FT-IR) โดยนำยางรีเคลมแผ่นบางๆ ไปอบที่อุณหภูมิ 40°C 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance Spectroscopy (ATR) ในช่วงความยาวคลื่น 4000-400 cm^{-1}

▶ การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางรีเคลมด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 750°C ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่ากับ 10°C/min ใช้ตัวอย่างหนักประมาณ 8-12 mg ทดสอบในบรรยากาศไนโตรเจนและออกซิเจนโดยใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนและออกซิเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที

▶ การวิเคราะห์ปริมาณโซลเจล (Sol-gel fraction) ของยางรีเคลมด้วยวิธีสกัดด้วยซอกห์เลต (Soxhlet extraction) ทำการทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบยางรีเคลมมาชั่งน้ำหนักละเอียด 0.0001 g ใส่ในตะแกรงที่พับเป็นกล่อง นำไปสกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน (Acetone) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นจึงเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF) และทำการสกัดต่อเนื่องอีก 72 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40°C แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลัง

Prince of Songkla University Pattani Campus

สกัด คำนวณหาปริมาณโซลเจลโดยใช้น้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการสกัด ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

$$\text{Sol fraction} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (3.1)$$

$$\text{Gel fraction} = 1 - \text{Sol faction} \quad (3.2)$$

โดยที่ W_1 คือ น้ำหนักของยางรีเคลมเริ่มต้น และ W_2 คือ น้ำหนักของยางรีเคลมหลังการสกัด

▶ การหาความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมด้วยวิธีการบวมพอง (Swelling) โดยใช้สมการ Flory–Rehner equation ในการหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลม นำชิ้นทดสอบที่สกัดส่วนที่สามารถละลายได้เหลือเฉพาะส่วนที่ไม่ละลาย (Gel fraction) จากการทดลองในหัวข้อการวิเคราะห์ปริมาณโซลเจล มาแช่ในโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ โดยใช้กระดาษทิชชูมาซับก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก คำนวณปริมาณพันธะเชื่อมขวางโดยใช้สมการของ Flory-Rehner ดังสมการ 3.3 และ 3.4 ดังนี้

Prince of Songkla University Pattani Campus

$$v_e = \frac{V_r + xV_r^2 + \ln(1-V_r)}{V_s(0.5V_r - V_r^{1/3})} \quad (3.3)$$

$$V_r = \frac{m_r}{m_r + m_s\,(p_r/p_s)} \quad (3.4)$$

โดยที่ v_e = crosslink density per unit volume

V_r = polymer volume fraction of the swollen sample

V_s = sovent molar volume

m_r = mass of the rubber network

m_s = weight of solvent in the sample at equilibrium swelling

p_r = density of the rubber

p_s = density of sovent

x = Flory-Huggins polymer-sovent interaction parameter

ปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่คำนวณโดยใช้สมการของ Flory-Rehner จากสมการ 3.3 และ 3.4 นิยมใช้ในการคำนวณปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางที่ไม่ใช้สารตัวเติมเท่านั้น ดังนั้นสำหรับยางที่ใช้สารตัวเติมจึงจำเป็นต้องคำนวณเพิ่มเติมโดยใช้การคำนวนแก้ไขของ Kraus (Kraus correction) โดยการคำนวณจะเพิ่มค่าคงที่ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่มีอยู่ในยางนั้น ดังสมการ 3.5 และ 3.6

$$V_{actual} = \frac{V_{apparent}}{1 + K + \phi} \quad (3.5)$$

$$\phi = \frac{\text{Weight fraction of filler x Density of compound x } W_b}{\text{Density of filler x } W_a} \quad (3.6)$$

โดยที่ V_{actual} = the actual chemical crosslink density

$V_{apparent}$ = the measured chemical crosslink density

K = a constant for a given filler

ϕ = the volume fraction of filler in the specimen which is calculate

W_b = the weight of the specimen before extraction

W_a = the weight of the specimen after extraction

Prince of Songkla University Pattani Campus

▶ การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของยางรีเคลม โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) นำยางรีเคลมมาเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนการทดสอบและใช้โหมด *SEI (Secondary* electron image) ในการบันทึกภาพ โดยทดสอบที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า

3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติและยางรีเคลม

เตรียมคอมพาวนด์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติและยางรีเคลม โดยแปรชนิดของสารดัดแปร 3 ชนิดคือ ฟินอลิกเรซิน (Phenolic resin, Ph) มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) และ ไกลซิดิลเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate, GM) โดยใช้สารเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1

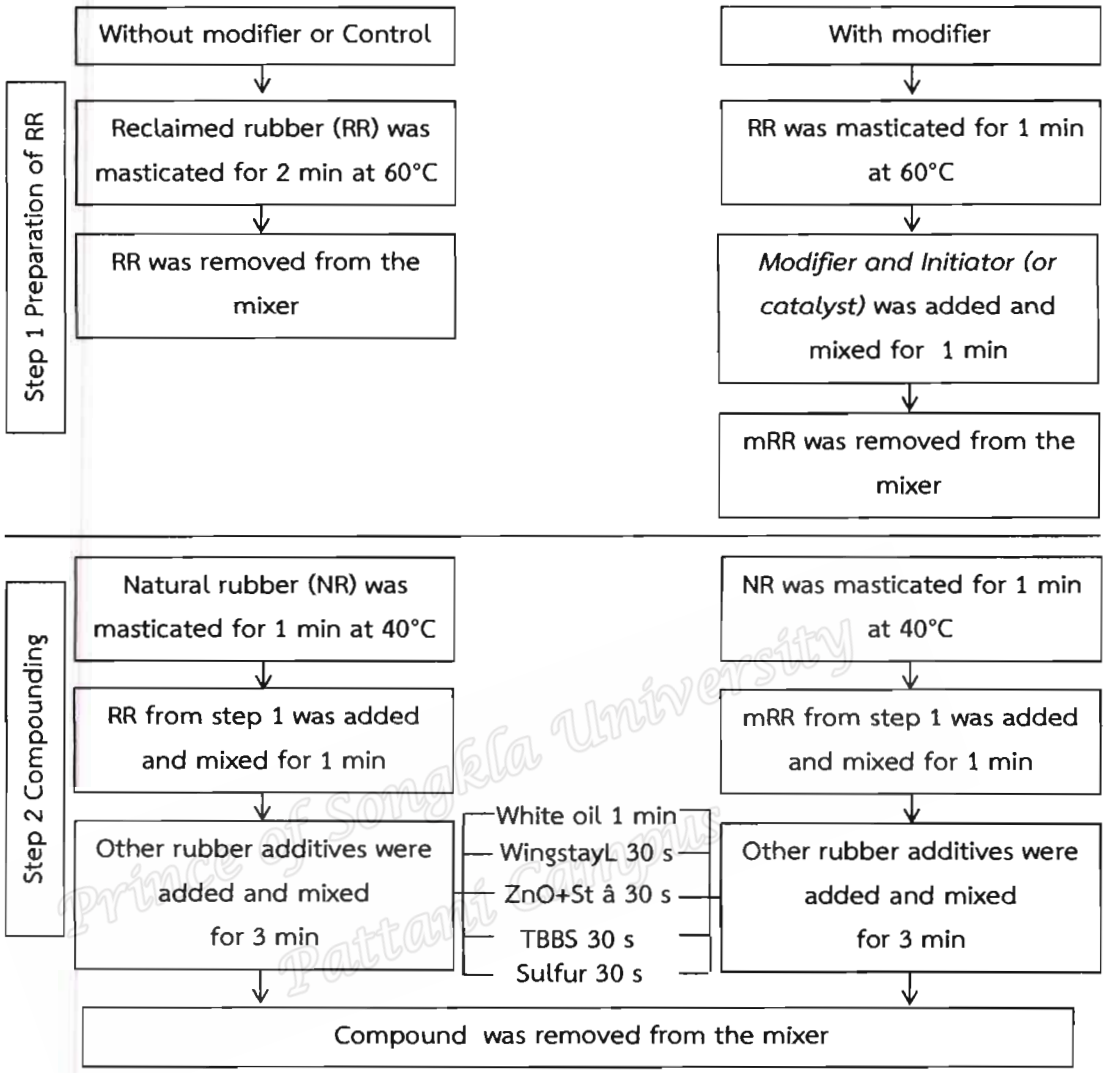
ทำการผสมยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติและยางรีเคลมที่อัตราส่วนการเบลนด์ 50/50 ส่วนโดยน้ำหนักของเนื้อยาง โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด อุณหภูมิการผสมเริ่มต้น 40°C ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที fill factor เท่ากับ 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม โดยขั้นตอนการเตรียมคอมพาวนด์แสดงดังรูปที่ 3.10 จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ออกมาบดต่อด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของสารเคมี โดยนำยางมาผ่านลูกกลิ้ง 10 ครั้ง จากนั้นปรับความหนาและรีดยางเป็นแผ่นยางให้เหมาะสม พักยางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปทดสอบหาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่อง Mini-MDR ที่อุณหภูมิ 150°C จากนั้นนำไปเตรียมชิ้นทดสอบด้วยวิธีการอัดเบ้า และนำยางวัลคาไนซ์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความแข็ง การผิดรูปถาวรแบบดึง และความต้านทานต่อการบ่มเร่ง

ตารางที่ 3.1 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Ingredients	Quantity (phr)			
	Control	Ph	MA	GM
Natural rubber, NR	50	50	50	50
Reclaimed rubber, RR*	90	90	90	90
Phenolic resin	-	**5**	-	-
Maleic anhydride	-	-	**5**	-
Glycidyl methacrylate	-	-	-	**5**
Stannous chloride	-	1	-	-
Benzoyl peroxide	-	-	1	1
White oil	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1
ZnO	5	5	5	5
Wingstay L	1	1	1	1
TBBS	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	4	4	4	4

หมายเหตุ: *ยางรีเคลมมีปริมาณเนื้อยาง 55%

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 3.10 ลำดับขั้นตอนการเตรียมคอมพาวนด์โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด

3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรในหัวข้อที่ 3.3.1 เลือกใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน เพื่อนำมาศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปร 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1. วิธีการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมในสภาวะหลอม (Melt mixing method) และ วิธีที่ 2. วิธีการเบลนด์แบบรีแอคทีฟ (Reactive blending method) วิธีการทดลองแสดงในหัวข้อที่ 3.3.3.1 และ 3.3.3.2 ตามลำดับ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปร (Without modifier)

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.3.1 วิธีการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมในสภาวะหลอม (Melt mixing method)

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2 และมีขั้นตอนการผสมแสดงดังรูปที่ 3.11 โดยขั้นตอนที่ 1 นำยางรีเคลมไปบดผสมกับสารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซินด้วยเครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วรอบโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที fill factor 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม เป็นเวลารวม 2 นาที ขั้นตอนที่ 2 นำยางรีเคลมจากขั้นตอนที่ 1 มาเบลนด์กับยางธรรมชาติและสารเคมียางเพื่อเตรียมยางคอมพาวนด์ โดยบดผสมที่อุณหภูมิ 40°C ใช้สภาวะการผสมอื่นๆเช่นเดียวกับข้างต้น จากนั้นนำยางคอมพาวนด์มาบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และพักยางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำยางคอมพาวนด์ที่ได้มาเบลนด์กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เพื่อเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยใช้อัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/RR/PEC เท่ากับ 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก การผสมใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ที่อุณหภูมิ 155°C ขณะที่สภาวะการผสมยังคงเดิม จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง นำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 165°C แล้วทำการหล่อเย็นภายใต้ความดันเพื่อให้เกิดการคงรูป ก่อนนำไปเตรียมเป็นชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่ง สมบัติการไหล สมบัติเชิงกลพลวัต และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.3.3.2 วิธีการเบลนด์แบบรีแอคทีฟ (Reactive blending method)

การเตรียมแบบรีแอคทีฟ จะใช้สารเคมีและขั้นตอนการเตรียมเหมือนกับหัวข้อที่ 3.3.3.1 แต่จะเปลี่ยนลำดับขั้นตอนในการใส่ฟินอลิกเรซิน โดยวิธีเบลนด์แบบรีแอคทีฟจะใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมเทอร์พลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 3.11

Prince of Songkla University Pattani Campus

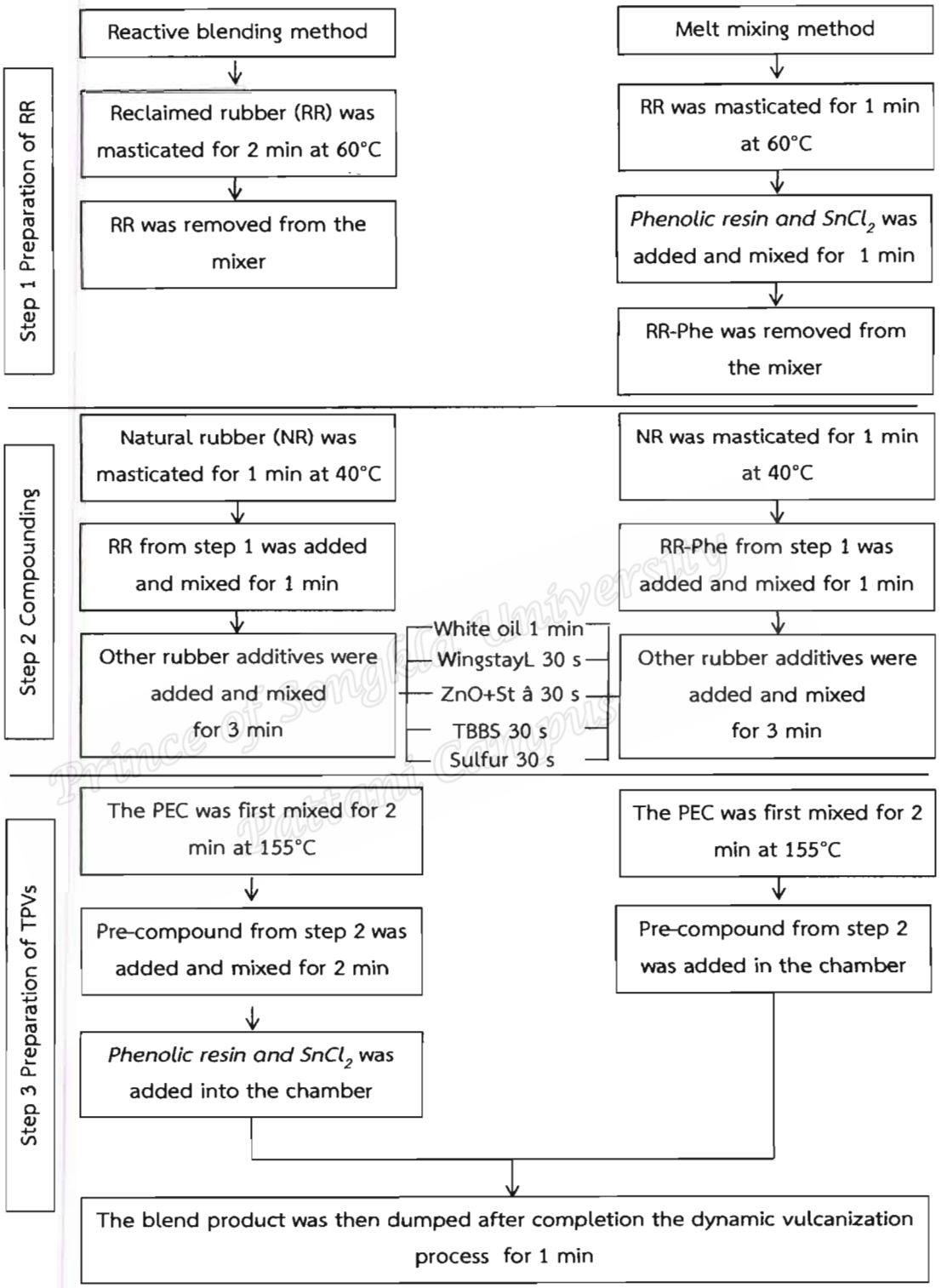
ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

Ingredients	Quantity (phr)
Natural rubber, NR	50
Reclaimed rubber, RR*	90
Phenolic resin	5
Stannous chloride	1
Propylene-ethylene copolymer, PEC**	67
White oil	5
Stearic acid	1
ZnO	5
Wingstay L	1
TBBS	0.8
Sulfur	4

หมายเหตุ: *ยางรีเคลมมีปริมาณเนื้อยาง 55%

**สัดส่วน NR/RR/PEC คิดเป็น 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 3.11 ลำดับขั้นตอนการผสมวิธี Reactive blending method และ Melt mixing method

3.3.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยใช้อัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/RR/PEC เท่ากับ 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้วิธีการผสมแบบ Melt mixing method ตามหัวข้อที่ 3.3.3.1 โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ขนาดห้องผสม 55 cm^3 ที่อุณหภูมิ 60, 40 และ155°C เพื่อเตรียมยางรีเคลมผสมกับสารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน ยางคอมพาวนด์ และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตามลำดับ ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ใช้ Fill factor 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม โดยแปรปริมาณฟินอลิกเรซินที่ 0, 3, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเนื้อยางทั้งหมด กำหนดปริมาณของสแตนนัสคลอไรด์คงที่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเนื้อยางทั้งหมด สารเคมีที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.2 และขั้นตอนการผสมแสดงในรูปที่ 3.11 จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่ง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติการไหล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.3.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ของ NR/RR/PEC เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้วิธีการผสมแบบ Melt mixing method ตามหัวข้อที่ 3.3.3.1 โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ขนาดห้องผสม 55 cm^3 ที่อุณหภูมิ 60, 40 และ155°C เพื่อเตรียมยางรีเคลมผสมกับสารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน ยางคอมพาวนด์ และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตามลำดับ ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ใช้ Fill factor 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม สารเคมีที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.3 และขั้นตอนการผสมแสดงในรูปที่ 3.11 จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่ง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติการไหล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 3.3 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์

Ingredients	Quantity (phr)				
	60/0/40	45/15/40	30/30/40	15/45/40	0/60/40
NR	100	75	50	25	-
RR*	-	45	90	135	180
PEC	67	67	67	67	67
Phenolic resin	10	10	10	10	10
Stannous chloride	1	1	1	1	1
White oil	5	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1	1
ZnO	5	5	5	5	5
Wingstay L	1	1	1	1	1
TBBS	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	4	4	4	4	4

หมายเหตุ: *ยางรีเคลมมีปริมาณเนื้อยาง 55%

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.6 การศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน (Propylene-ethylene copolymer grafted phenolic resin, PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

3.3.6.1 การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟีนอลิกเรซิน (PEC-g-Ph)

เตรียม PEC-g-Ph โดยนำโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ไปอบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น ชั่งโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ที่อบแล้วปริมาณ 100 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยใช้ฟีนอลิกเรซิน (HRJ-10518) ปริมาณ 4 ส่วนโดยน้ำหนักโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ และสแตนนัสคลอไรด์ปริมาณ 0.8 ส่วนโดยน้ำหนักโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ที่อุณหภูมิ 180°C ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที และ Fill factor 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม โดยบดโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมฟีนอลิกเรซิน (HRJ-10518) ลงในห้องผสมแล้วบดต่อเป็นเวลา 1 นาที และเติมสแตนนัสคลอไรด์ บดผสมต่ออีก 1 นาที นำพอลิเมอร์ออกทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปสกัดเอาสารเคมีที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาออกโดยแช่ในสารละลายผสม

ของน้ำและอะซีโตน (95/5 vol/vol) พร้อมทั้งกวน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปกรองและนำมาสกัดซ้ำอีก 2 ครั้ง (สกุลรัตน์, 2551) จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1 คืน หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคอิฟราเรดสเปคโตรสโคปี (FTIR)

3.3.6.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด (PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

ในศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน ซึ่งจะเปรียบเทียบผลของการใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน ผลของการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph และผลของการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph โดยสารเคมีที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.4 สำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน เตรียมด้วยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing method ตามวิธีการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.11 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพื่อศึกษาผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph จะเตรียมด้วยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing method เช่นเดียวกัน แต่จะมีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เตรียมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ขนาดห้องผสม 55 cm^3 ที่อุณหภูมิ 60, 40 และ155°C เพื่อเตรียมยางรีเคลมผสมกับสารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน ยางคอมพาวนด์ และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตามลำดับ ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ใช้ Fill factor 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม โดยจะเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์หลังบดผสมยางคอมพาวนด์เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่ง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติการไหล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

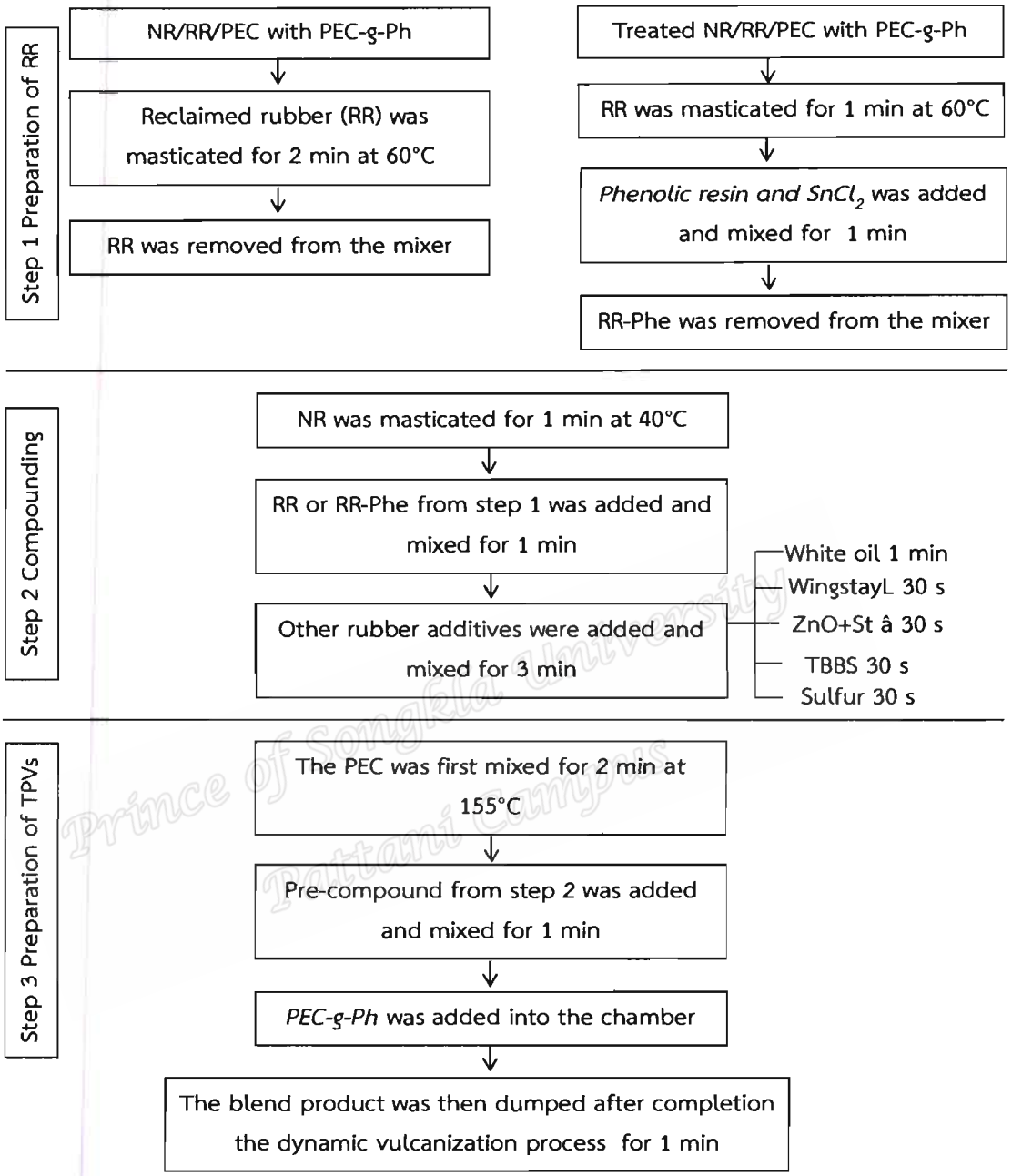
ตารางที่ 3.4 สูตรการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สำหรับศึกษาการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้

Ingredients	Quantity (phr)			
	NR/RR/PEC*	NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	Treated NR/RR/PEC**	Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph
NR	50	50	50	50
RR	90	90	90	90
PEC	67	67	67	67
PEC-g-Ph (7 wt% of PEC)	-	**4.7**	-	**4.7**
Phenolic resin	-	-	10	10
Stannous chloride	-	-	1	1
White oil	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1
ZnO	5	5	5	5
Wingstay L	1	1	1	1
TBBS	0.8	0.8	0.8	0.8
Sulfur	4	4	4	4

หมายเหตุ: **NR/RR/PEC คือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่ฟีนอลิกเรซิน (Without modifier)

**Treated NR/RR/PEC คือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นสารดัดแปร

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 3.12 ลำดับขั้นตอนการผสมวิธี Melt mixing method เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph

3.3.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

3.3.7.1 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

นำน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงมาเจือจางด้วยน้ำให้มีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางเท่ากับ 20% จากนั้นเติมสบู่ Teric N30 เพื่อให้อนุภาคยางเสถียร จากนั้นกวนเป็นเวลา 25 นาทีที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นหยดกรดฟอร์มิกพร้อมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างช้าๆ เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 1.30, 2.30, 3.30, 4.30 และ 6.30 ชั่วโมง ต่อมาจึงนำมาจับตัวด้วยเมทานอล นำไปรีดแผ่นด้วยเครื่องรีดแผ่นยาง แล้วจึงนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสารเคมีหลงเหลือออกไป นำแผ่นยางที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 40°C จนแห้ง และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี รายละเอียดสารเคมีที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกไซด์

Chemicals	Quantity (g)
60% HA latex	192.67
10% Teric N30	44.04
94% Formic acid	176.80
50% Hydrogen peroxide	13.00
H_2O	385.00

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.3.7.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC เพื่อศึกษาชนิดยางธรรมชาติ

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ใช้อัตราส่วนการเบลนด์ของ (E)NR/RR/PP เท่ากับ 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้วิธีการผสมแบบ Melt mixing method ตามหัวข้อที่ 3.3.3.1 โดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์พลาสติคอเดอร์ขนาดห้องผสม 55 cm^3 ที่อุณหภูมิ 60, 40 และ155°C เพื่อเตรียมยางรีเคลมผสมกับสารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน ยางคอมพาวนด์ และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ตามลำดับ ความเร็วโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที ใช้ Fill factor 0.8 ของปริมาตรความจุห้องผสม สารเคมีที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.2 และขั้นตอนการผสมแสดงในรูปที่ 3.11 จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้ไปเตรียมเป็นชิ้นทดสอบเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่ง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติการไหล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

3.4 วิธีการทดสอบสมบัติ

3.4.1 การทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

ทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์แตกต่างกัน โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ทำการทดสอบโดยใช้โรเตอร์เล็ก เนื่องจากยางมีความหนืดสูง ใช้เวลาในการอุ่นยาง 1 นาที เดินเครื่อง 4 นาที ที่อุณหภูมิ 100°C อ่านค่าได้เป็น MS(1+4), 100°C

3.4.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงและความสามารถในการยืดจนขาด

ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยการเตรียมชิ้นทดสอบจะต้องมีความหนาระหว่าง 1.5-3.0 mm นำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมบ์เบล (Dumbbell) Die C ซึ่งจะมีขนาดความยาว 115 mm กว้าง 6.0$\pm$0.4 mm ชิ้นทดสอบทุกชิ้นจะต้องวัดความหนาที่บริเวณกึ่งกลาง 3 จุดแล้วหาค่ากลาง พร้อมทั้งกำหนดระยะเริ่มต้นของการทดสอบ เพื่อติดตามระยะการยืดของชิ้นทดสอบ

นำไปทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติเทนไซล์ (Tensile testing machine) โดยชิ้นทดสอบจะถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบ และถูกดึงด้วยความเร็ว 500±5 mm/min ค่าที่ตรวจวัดคือ ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) สามารถคำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

การคำนวณ

$$\text{ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)} = \frac{F}{A} \qquad (3.7)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ดึงยางจนขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะไม่ได้ยืด (mm^2)

$$\text{ความสามารถในการยืดจนขาด (\%)} = \left(\frac{L_1 - L_0}{L_0}\right) \times 100 \qquad (3.8)$$

Prince of Songkla University Pattani Campus

โดยที่ L_1 คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (cm)

L_0 คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเดิม (cm)

3.4.3 การทดสอบการผิดรูปถาวรแบบดึง (Tension set)

นำชิ้นทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบสมบัติการดึงในหัวข้อ 3.8.2 นำชิ้นทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติการดึง โดยนำชิ้นตัวอย่างมาจับด้วยตัวยึดจับ (Grip) โดยวางตัวอย่างให้ได้แนวกลางของที่จับ จากนั้นยืดชิ้นทดสอบให้มีระยะยืด 100% ปล่อยให้ยางยืดในระยะนี้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ แล้ววางตัวอย่างทิ้งไว้ 10 นาที ที่อุณหภูมิห้องจึงวัดระยะห่างระหว่างรอยขีดที่ขีดไว้ คำนวณหา Tension set (%) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{การผิดรูปถาวรแบบดึง (\%)} = \left(\frac{L_1 - L_0}{L_0} \right) \times 100 \qquad (3.9)$$

โดยที่ L_1 คือ ระยะห่างระหว่างขีดสัญลักษณ์หลังทดสอบ (cm)

L_0 คือ ระยะห่างระหว่างขีดสัญลักษณ์ก่อนทดสอบ (cm)

3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่ง

ทดสอบการบ่มเร่งโดยนำชิ้นทดสอบที่เตรียมตามมาตรฐาน ASTM D412 สำหรับใช้ทดสอบสมบัติการดึงตามหัวข้อที่ 3.8.2 นำไปบ่มเร่งโดยใช้ตู้อบอากาศร้อนที่มีการไหลของอากาศบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกจากตู้บ่มเร่ง และวางตัวอย่างทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดสอบสมบัติการดึงตามวิธีในหัวข้อที่ 3.8.1 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติ (%Change in property) ได้จากสมการที่ (3.10)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติ} = \left(\frac{B - A}{A} \right) \times 100 \qquad (3.10)$$

โดยที่ A คือ สมบัติก่อนบ่มเร่ง

B คือ สมบัติหลังบ่มเร่ง

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.4.5 การทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Durometer

ทดสอบสมบัติด้านความแข็งโดยใช้ Durometer แบบ Shore A โดยใช้ชิ้นทดสอบสมบัติการดึงนำมาซ้อนทับกันให้แนบสนิทไม่มีอากาศให้มีความหนา 10 มิลลิเมตร ความกว้างและความยาวไม่น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร การทดสอบจะใช้เครื่องมือวัดความแข็งโดยการกดลงให้แป้นสัมผัสกับผิวหน้าของชิ้นตัวอย่าง โดยทำการวัดที่จุดต่างๆบริเวณผิวหน้าของชิ้นทดสอบ 5 จุด หลังจากนั้นอ่านค่าความแข็งของชิ้นทดสอบจากหน้าปัดของเครื่องมือ ใช้ค่ากลางของข้อมูลเป็นความแข็งของตัวอย่างที่ทดสอบ

3.4.6 การทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer

ทดสอบหาความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 1400 bar ใช้อัตราการเฉือนตั้งแต่ 1 ถึง 1,000 s^{-1} ใช้บาร์เรลเดี่ยว ใช้หัว die ที่มี L/D ratio 32/2 โดยเครื่องจะอัดพอลิเมอร์ผ่าน die ที่อัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราเฉือนที่เปลี่ยนไปนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการอัดยางผ่าน die ใช้เวลาทดสอบ 10 นาที ซึ่งจะเป็นการอุ่น 5 นาทีและทดสอบ 5 นาที โดยในระหว่างการทดสอบความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นที่ดายจะถูกบันทึก คำนวณหาค่าปรากฏของความเค้นและความหนืดตามกฎของ the Poiseuille law สำหรับการ ไหลในคาร์ปิลลารีตามสมการที่ 3.11-3.13

Prince of Songkla University Pattani Campus

- ความเค้นเฉือนปรากฏ (Pa)

$$\tau = \frac{R\Delta P}{2L} \tag{3.11}$$

- อัตราเฉือนปรากฏ (s^{-1})

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4Q}{\pi R^3} \tag{3.12}$$

- ความหนืดเฉือนปรากฏ (Pa.s)

$$\eta_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_{app}} \tag{3.13}$$

โดยที่ ΔP คือ ความดันตกคร่อมในดาย

Q คือ อัตราการไหล (m^3/s)

R คือ รัศมีของดายคาปิลลารี (m)

L คือ ความยาวของดายคาปิลลารี (m)

จากสมการที่ (3.11)-(3.13) เป็นค่าที่เป็นสมบัติปรากฏ (Apparent values) แทนที่จะเป็นค่าจริงของการไหลของพอลิเมอร์หลอม ทั้งนี้เนื่องจากการคำนวณได้ใช้ของไหลนิวโตเนียนเป็นตัวเปรียบเทียบการทดสอบจะเปรียบเทียบสมบัติการไหลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนปรากฏกับความเค้นเฉือนปรากฏ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนปรากฏกับความหนืดเฉือนปรากฏ

3.4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง Moving die rheometer

ทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัติ โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6601 โดยใช้เครื่อง rheoTECH MDpt โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 165°C ค่าความเครียด (Strain) 3% แปรค่าความถี่ในการทดสอบ (Frequency sweep) ซึ่งจะรายงานค่าออกมาเป็น ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') แทนเจนท์สูญเสีย (Tan δ) และ ค่าความหนืดเชิงซ้อน (Complex viscosity, η^*)

Prince of Songkla University Pattani Campus

3.4.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning eletron microscope (SEM)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เตรียมตัวอย่างด้วยการทำให้ชิ้นตัวอย่างแตกหักด้วยไนโตรเจนเหลวเพื่อให้ได้ผิวหน้าใหม่สำหรับทดสอบ หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปสกัดเฟสพลาสติกออกด้วยไซลีนที่อุณหภูมิเดือด เป็นเวลา 15-25 นาที นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C จากนั้นนำไปเคลือบผิวหน้าชิ้นตัวอย่างด้วยทองคำโดยนำตัวอย่างวางในเครื่องสำหรับเคลือบทองคำภายใต้สุญญากาศเป็นเวลา 2 นาที ก่อนนำไปทดสอบในโหมด *SEI (Secondary* electron image) ในการบันทึกภาพ โดยทดสอบที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสมบัติของยางรีเคลม

ยางรีเคลม คือ ยางที่ได้จากการนำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์มาผ่านกระบวนการรีเคลม (Reclaimation) เพื่อให้สามารถนำยางวัลคาไนซ์ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ กล่าวคือการทำให้โมเลกุลยางสามารถวัลคาไนซ์ได้อีกครั้ง โดยยางรีเคลมที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นแผ่นสีดำไม่ทราบสมบัติ ฉะนั้นจึงต้องทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของยางรีเคลม ได้แก่ สมบัติเชิงความร้อน การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี การวิเคราะห์ปริมาณส่วนที่ละลายและไม่ละลาย การหาปริมาณพันธะเชื่อมขวาง และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา

4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของยางรีเคลมด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA ตามวิธีในหัวข้อ 3.3.1.2 เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณองค์ประกอบในยางรีเคลม ได้ผลเทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป (Weight loss (%)) และอัตราการหายไปของน้ำหนัก (Derivative weight (%/min)) กับอุณหภูมิ (Temperature (°C)) ดังรูปที่ 4.1(A) และ (B) และ ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของยางรีเคลมจากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA

จากรูปที่ 4.1(A) เป็นการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จะพบการสลายตัวของยางรีเคลม 4 ช่วง แบ่งเป็นช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 49-300°C มีปริมาณการสลายตัว 9.5% ซึ่งเป็นการสลายตัวของ น้ำมัน พลาสติไซเซอร์ และสารเคมีบางชนิดในยางรีเคลมที่สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ (Chen and Qian, 2003) จากนั้นการสลายตัวในช่วงที่ 2 และ ช่วงที่ 3 จะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 300-490°C และ 490-585°C ตามลำดับ ในช่วงนี้จะเป็นการสลายตัวขององค์ประกอบหลักของสายโซ่โมเลกุลยางซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะเห็นว่ายางเกิดการสลายตัวเป็น 2 ช่วง แสดงให้เห็นว่ายางรีเคลมมียางเป็นองค์ประกอบเท่ากับหรือมากกว่า 2 ชนิด ซึ่งมีปริมาณการสลายตัวรวมกันเท่ากับ 55% โดยจากการสลายตัวทั้งสองช่วงนั้นคาดว่า ในช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 355°C เป็นการสลายตัวของยางธรรมชาติ (Gisbert *et al.*, 2007) และช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิประมาณ 422°C เป็นการสลายตัวของยางสังเคราะห์คือ ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber) และยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-Butadiene rubber) (Chen and Qian, 2003; Berrueco *et al.*, 2004; Gisbert *et al.*, 2007) รวมถึงอาจจะเป็นการสลายตัวของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน

Prince of Songkla University Pattani Campus

(Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) เนื่องจากสามารถสลายตัวได้ในช่วงอุณหภูมิ 410 - 440°C (Gamlin *et al.*, 2003) และในการสลายตัวของยางรีเคลมในช่วงที่ 4 ซึ่งเกิดในช่วงอุณหภูมิ 615-750°C พบการสลายตัวขององค์ประกอบในยางรีเคลมประมาณ 2% ซึ่งคาดว่าจะเป็นการสลายตัวของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Huang and Wang, 2009) ดังสมการที่ 4.1 และมีขี้เถ้าหลงเหลืออยู่ 33.5%

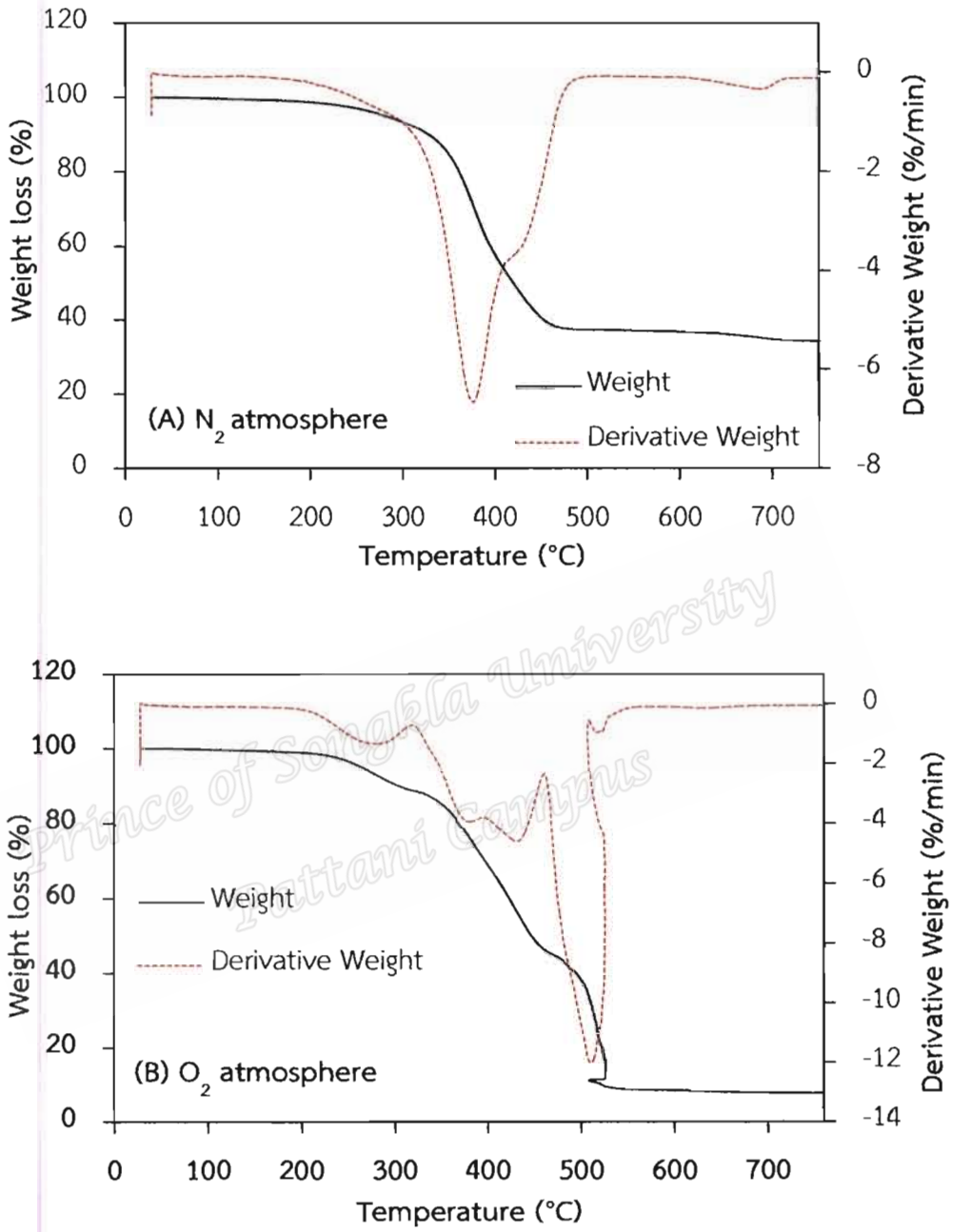
$$CaCO_3\ (100\%) \longrightarrow CaO(s) + CO_2(g) \qquad (4.1)$$

จากนั้นเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของสารตัวเติมเขม่าดำในยางรีเคลมเพิ่มเติม จึงได้นำยางรีเคลมไปวิเคราะห์การสลายตัวภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ดังรูปที่ 4.1(B) พบว่าเขม่าดำมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 460-510°C และมีปริมาณ 33% ขณะที่มีเถ้าเหลืออยู่ 8.0% ซึ่งเป็นสารที่ไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 620°C เช่น สารอนินทรีย์ ซิงค์ออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์จากแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของยางรีเคลมแบบแผ่นที่ทดสอบด้วยเทคนิค TGA ที่อุณหภูมิห้อง ถึง 750°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และออกซิเจน

Number	Atmosphere	T_d onset (°C)	T_d (°C)	Component (%)	Type of component
1	N_2	59	49-300	9.5	Water, Oil
2	N_2	349	300-490	36.5	Rubber
3	N_2	410	490-585	18.5	Rubber
4	N_2	623	685-750	2.0	CO_2 in $CaCO_3$
5	N_2	-	>750	33.5	Ash
6	O_2	485	460 – 510	33.0	Carbon black
7	O_2	618	510 – 620	4.0	CO_2 in $CaCO_3$
8	O_2	-	>620	8.0	Ash

Prince of Songkla University Pattani Campus

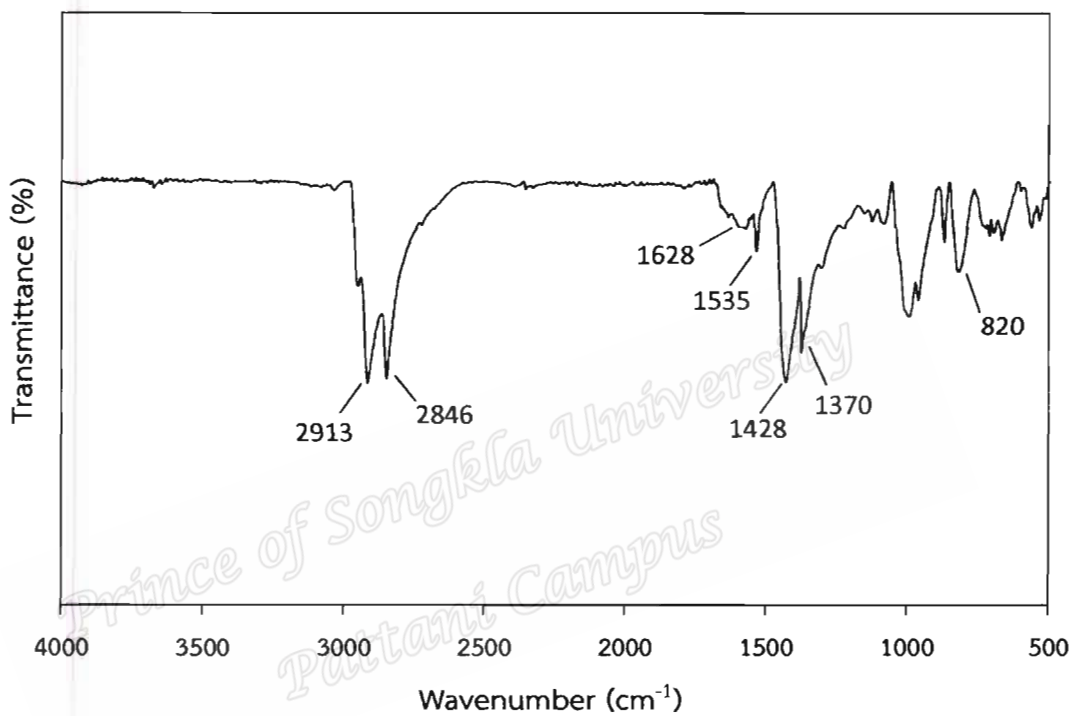


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.1 เทอร์โมแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไป และอัตราการหายไปของน้ำหนักกับอุณหภูมิของยางรีเคลม เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิห้องถึง 750°C ภายใต้สภาวะ (A) บรรยากาศไนโตรเจน (B) บรรยากาศออกซิเจน

4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโทรสโกปี (FTIR)

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR) ได้สเปกตรัมของยางรีเคลม ดังรูปที่ 4.2



Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.2 สเปคตรัม FTIR ของยางรีเคลมชนิดแผ่น

รูปที่ 4.2 แสดงสเปคตรัม FTIR ของยางรีเคลม ซึ่งพบเห็นว่า FTIR ของยางรีเคลมปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 2913 และ 2846 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ C-H ใน $-CH_3$ และ $-CH_2$ ขณะที่ 1432 และ 1370 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ $-CH_2$ และ$-CH_3$ ในโครงสร้างของยาง (Zanchet *et al.*, 2012; Imyim *et al.*, 2016) และพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1628 cm^{-1} แสดงถึงส่วนที่ไม่อิ่มตัวในไอโซพรีนซึ่งแสดงถึงพันธะ C=C (Hassan *et al.*, 2013) สำหรับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1535 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ Zinc carboxylates (Zanchet *et al.*, 2012) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่ได้จากการสลายตัวภายใต้ความร้อนของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 820 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ในโมเลกุลยางธรรมชาติ และในวงเบนซีน

เป็นสารวัลคาไนซ์ และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 820 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ในโมเลกุลยางธรรมชาติ และในวงเบนซีน

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณส่วนที่ละลายและไม่ละลาย (Sol-gel fraction) ในยางรีเคลม

ทำการวิเคราะห์หาส่วนที่ละลายได้ในยางรีเคลมด้วยวิธี Soxhlet extraction ตามวิธีในหัวข้อ 3.3.1.3 โดยเป็นการทดสอบหาส่วนที่ละลายได้ (Sol fraction) ของยางด้วยตัวทำละลายอะซิโตน และเตตระไฮโดรฟูแรน เช่น น้ำมัน ยางที่ไม่วัลคาไนซ์ สารวัลคาไนซ์ เป็นต้น และส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ (Gel fraction) เช่น ยางส่วนที่วัลคาไนซ์ สารตัวเติม เป็นต้น ผลการวิเคราะห์หาปริมาณส่วนที่ละลายได้ในยางรีเคลมแสดงผลดังตารางที่ 4.2

ส่วนที่ละลายได้ของยางรีเคลม เป็นการทดสอบเพื่อทราบถึงประสิทธิภาพในการรีเคลม โดยปกติปริมาณส่วนที่ละลายได้ของยางวัลคาไนซ์โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 5-20% ขึ้นอยู่กับชนิดยาง ความยาวสายโซ่โมเลกุลยาง ระบบการวัลคาไนซ์ และความสมบูรณ์ในโครงสร้างแบบร่างแห่ของโมเลกุลยาง (Saiwari, 2013) ในขณะที่จากการทดลองยางรีเคลมชนิดแผ่น พบว่ามีส่วนที่สามารถละลายได้ประมาณ 24.64% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงกว่ายางวัลคาไนซ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำรีเคลม

ตารางที่ 4.2 ปริมาณส่วนที่ละลายได้ ปริมาณส่วนที่ไม่ละลาย และความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง

Number	Initial weight (g)	weight after test (g)	Weight loss (g)	Sol (%)	Gel (%)	Crosslink density ($x10^{-4}$ mol/cm^3)
1	0.1864	0.1408	0.0456	24.46	75.54	2.24
2	0.1857	0.1395	0.0462	24.88	75.12	2.28
3	0.2623	0.1975	0.0648	24.70	75.30	2.40
4	0.2700	0.2037	0.0663	24.56	75.44	2.30
5	0.1727	0.1302	0.0425	24.61	75.39	2.18
			เฉลี่ย	**24.64**	**75.36**	**2.28**

4.1.4 การหาความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมด้วยวิธีการบวมพอง (Swelling)

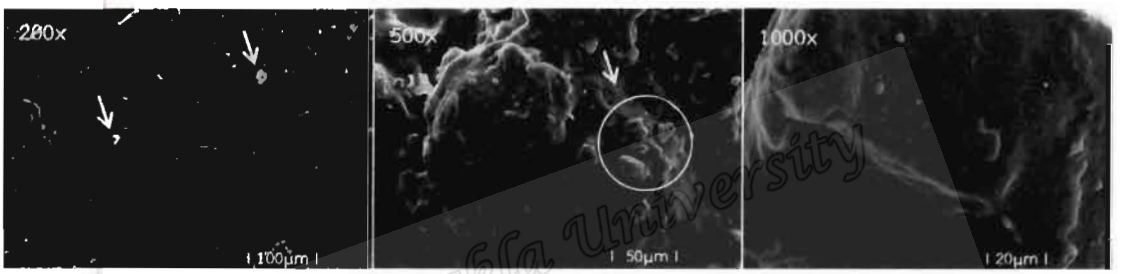
ทำการทดสอบหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมด้วยวิธีการตามหัวข้อที่ 3.3.1.4 โดยใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางโดยใช้สมการ Flory-Rehner ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

Property of Songkla University Pattani Campus

เติมเขม่าดำผสมอยู่ จึงจะหักลบปัจจัยของสารตัวเติมออกไป กล่าวคือความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลมเป็นพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากยางซึ่งมีปริมาณ 2.28 $x10^{-4}$ mol/cm^3

4.1.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางรีเคลม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของยางรีเคลมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1000 เท่า ดังรูปที่ 4.3 พบว่าสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมมีลักษณะเป็นผิวต่อเนื่องของยาง โดยที่ผิวหน้าของยางมีทั้งที่เป็นเรียบและขรุขระ และพบว่ามีกลุ่มของสารเคมีกระจายตัวอยู่



รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางรีเคลมแบบแผ่นที่กำลังขยาย 200, 500 และ 1,000 เท่า

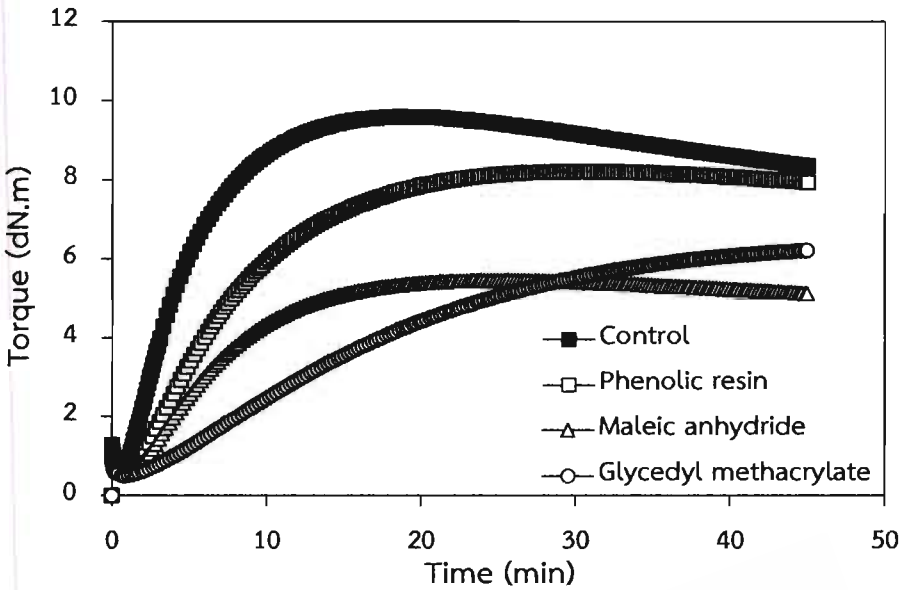
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม (NR/RR blend)

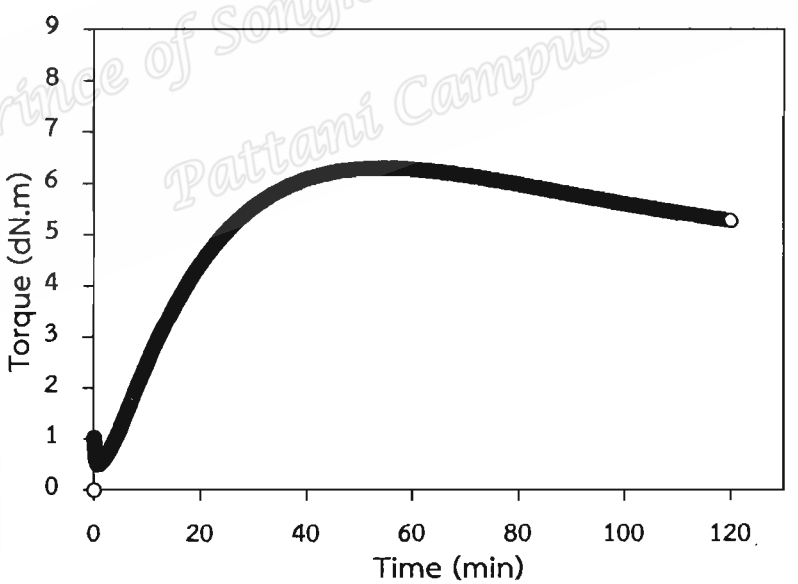
ทำการศึกษาผลของชนิดสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลม โดยแปรชนิดของสารดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ ฟินอลิกเรซิน (Phenolic resin, Ph) มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) และ ไกลซิดิลเมทาคริเลต (Glycidyl methacrylate, GM) เตรียมยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.2

4.2.1 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

นำยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR โดยแปรชนิดสารดัดแปรตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.2.1 มาทดสอบหาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง mini-MDR ที่อุณหภูมิ 150°C ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร ที่อุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่าง NR/RR เมื่อแปรชนิดสารดัดแปรชนิดไกลซิดิลเมทาคริเลต ที่อุณหภูมิ 150°C

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติเบลนด์ยางรีเคลม เมื่อมีการใช้สารดัดแปร 3 ชนิด ได้แก่ ฟินอลิกเรซิน มาลิอิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลต จะเห็นว่าการใช้สารดัดแปรแต่ละชนิดจะให้ลักษณะกราฟการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่มีอัตราเร็วและ

Prince of Songkla University Pattani Campus

ประสิทธิภาพการวัลคาไนซ์แตกต่างกัน ยกเว้นพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ในช่วงหลัง Optimum cure time (ระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่ทำให้ยางมีสมบัติดีที่สุด) ที่ปรากฏเหมือนกัน คือมีพฤติกรรมเป็นแบบ Reversion โดยยางจะเกิดการเสื่อมเมื่อวัลคาไนซ์มากเกินไป (Over cure) สังเกตได้จากยางจะมีความแข็งหรือมอดุลัสลดลง โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากการใช้ยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบในการเบลนด์ร่วมกับการใช้ระบบกำมะถันแบบปกติเป็นระบบวัลคาไนซ์ ซึ่งจะเกิด Reversion เนื่องจากโมเลกุลยางธรรมชาติถูกตัดขาดสายโซ่จากผลของความร้อน และพันธะเชื่อมขวางมีการเปลี่ยนรูปแบบจากพอลิซัลฟิดิกเป็นได-หรือโมโนซัลฟิดิกได้

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาในรูปที่ 4.4 สามารถหาค่าทอร์กต่ำสุด (Minimum torque, M_L) ค่าทอร์กสูงสุด (Maximum torque, M_H) ผลต่างของค่าทอร์ก (M_H-M_L) เวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ (Scorch time, t_{s1}) เวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time, t_{c90}) และดัชนีการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI) ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.3

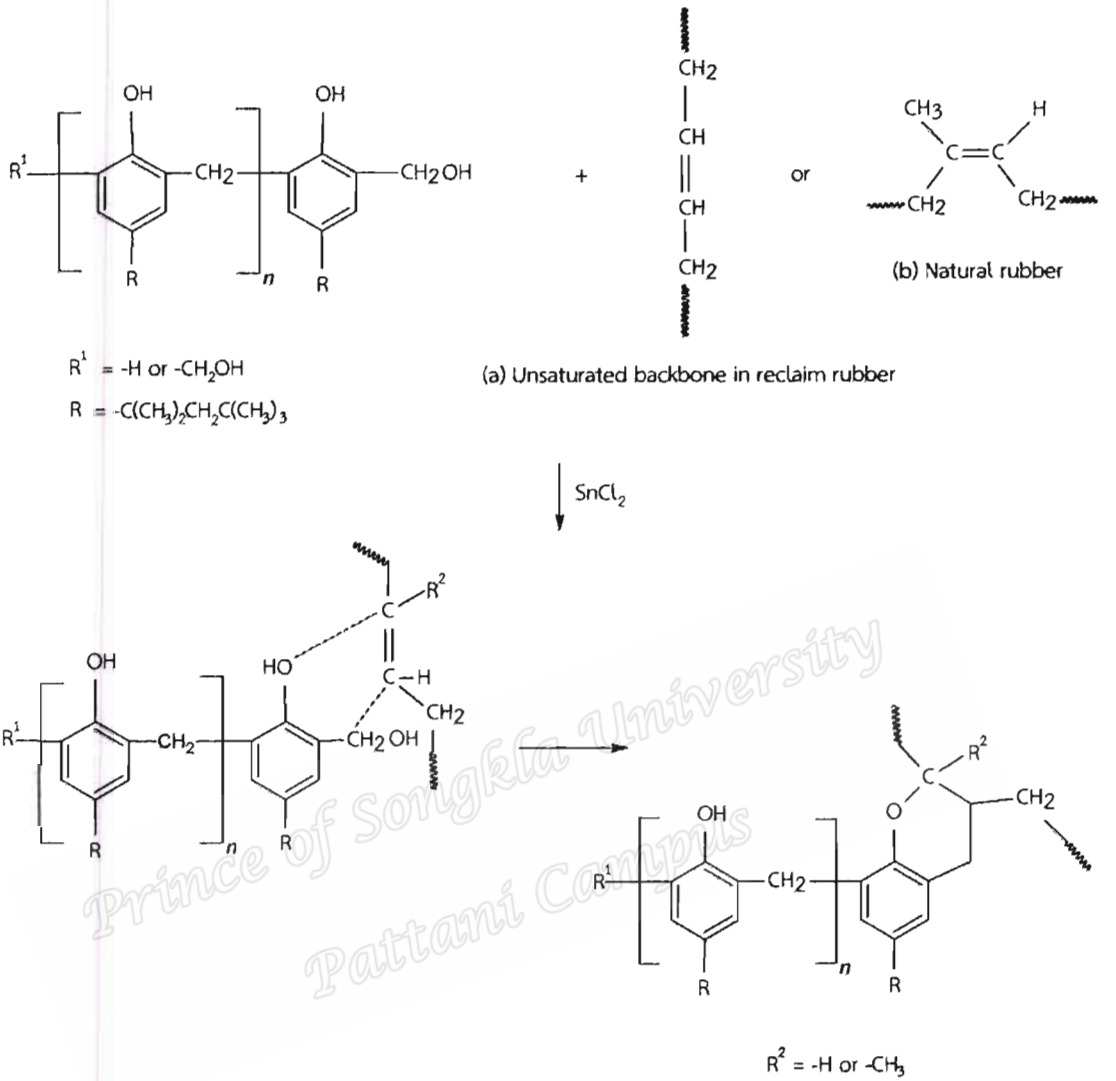
ตารางที่ 4.3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม เมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Types of modifier	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)	Scorch Time (min)	Cure Time (min)	CRI (min^{-1})
Control	0.61	9.59	8.98	1.57	10.10	11.72
Ph	0.64	8.22	7.58	2.81	16.43	7.34
MA	0.66	5.47	4.81	3.45	13.73	9.73
GM	0.49	6.31	5.82	6.11	32.61	3.77

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 จะพบว่าค่าทอร์กต่ำสุดของยางเบลนด์มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสูตรที่ไม่ใช้และสูตรที่ใช้สารดัดแปร ยกเว้นยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดไกลซิดิลเมทาคริเลต จะให้ค่าทอร์กต่ำสุดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากสารดัดแปรชนิดไกลซิดิลเมทาคริเลตมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงถึงโมเลกุลจะยิ่งเคลื่อนไหวได้ง่ายเมื่อเจอความร้อนขณะทดสอบส่งผลให้ยางมีความนิ่มลง ในขณะที่ค่าทอร์กสูงสุดของยางเบลนด์จะให้ค่าที่แตกต่างกัน คือ สูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรจะมีค่าทอร์กสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคือ ยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน ไกลซิดิลเมทาคริเลต และมาลิอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ โดยที่ค่าทอร์กสูงสุดจะขึ้นอยู่กับมอดุลัสของยางที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อโมเลกุลยางเกิดพันธะเชื่อมขวาง โดยระดับพันธะเชื่อมขวางหรือความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางสามารถพิจารณาได้จากผลต่างของค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุด (M_H-M_L) ข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรจะมีปริมาณพันธะ

Prince of Songkla University Pattani Campus

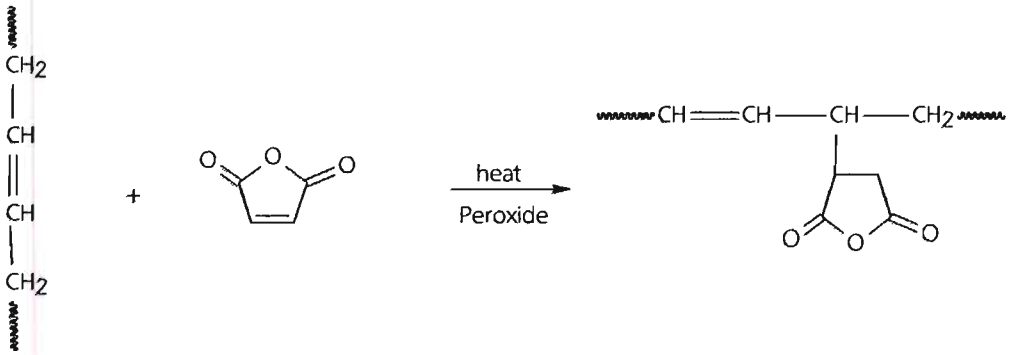
เชื่อมขวางมากที่สุด รองลงมาคือ ยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซินเรซิน ไกลซิดิลเมทาคริเลต และมาลิอิกแอนไฮไดรด์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าระยะเวลาการสกอร์ช ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ และดัชนีการวัลคาไนซ์ พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรจะทำให้ระยะเวลาการสกอร์ช และระยะเวลาการวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดัชนีการวัลคาไนซ์ และปริมาณพันธะเชื่อมขวางมีค่าลดลง ซึ่งลักษณะที่พบสามารถอธิบายได้จาก ความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาแข่งขันระหว่างสารวัลคาไนซ์และสารดัดแปร โดยปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางและสารดัดแปรชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.6 - 4.8 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจมีผลทำให้ปริมาณหมู่ว่องไวในยางธรรมชาติลดลง และเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์กับกำมะถันได้น้อยลง นอกจากนี้สภาพความเป็นกรด-ด่างของสารดัดแปรทั้ง 3 ชนิดที่มีค่าดังนี้ มาลิอิกแอนไฮไดรด์ ไกลซิดิลเมทาคริเลต และฟินอลิกเรซิน มีค่าความเป็นกรด (pH) เท่ากับ 0.5, 4.5, และ 5.5 ตามลำดับ โดยสภาพความเป็นกรดจะไปรบกวนระบบการทำงานของสารตัวเร่งในระบบการวัลคาไนซ์แบบกำมะถัน ให้มีประสิทธิภาพน้อยลง นอกจากนี้การที่ยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์มีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์แย่ที่สุดเป็นผลมาจากสารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์ จะแตกตัวได้ง่ายได้สารที่มีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้มาลิอิกแอนไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นเสมือนสารหน่วง (Cure retarders) ส่งผลให้ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้ช้าลง (Nelson and Kutty, 2004; Pasbakhsh *et al.*, 2009; วราภรณ์, 2552) ในขณะที่สารดัดแปรชนิดไกลซิดิลเมทาคริเลต ซึ่งมีหมู่อิพอกไซด์อยู่ในโครงสร้าง โดยที่หมู่อิพอกไซด์มีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับสารตัวเร่ง ทำให้สารตัวเร่งจำนวนหนึ่งไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้ (ภูริพงศ์, 2548) ทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น และเช่นเดียวกันในกรณีของการใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิที่ซึ่งในขั้นแรกของการเกิดปฏิกิริยาจะมีการกำจัดน้ำจาก o-methylol phenol ได้เป็น Methylene quinone ก่อนจะเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ในยางธรรมชาติ (Brydson, 1978) ส่งผลให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น



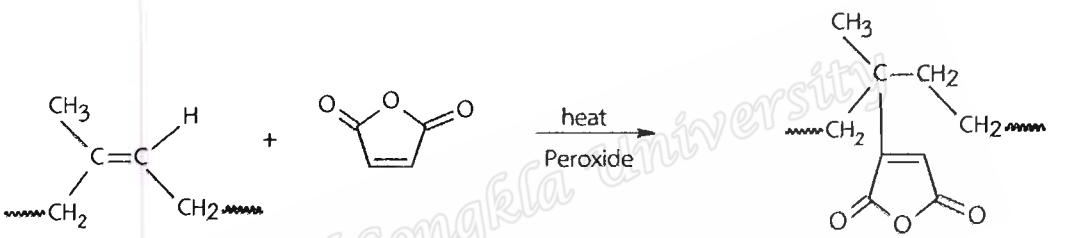
Chroman ring structure form reaction of phenolic resin with unsaturation sites in rubber

Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.6 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟินอลิกเรซินกับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิ่มตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b) (ดัดแปลงจาก Coran, 2005 และ Nakason *et al.*, 2006b)



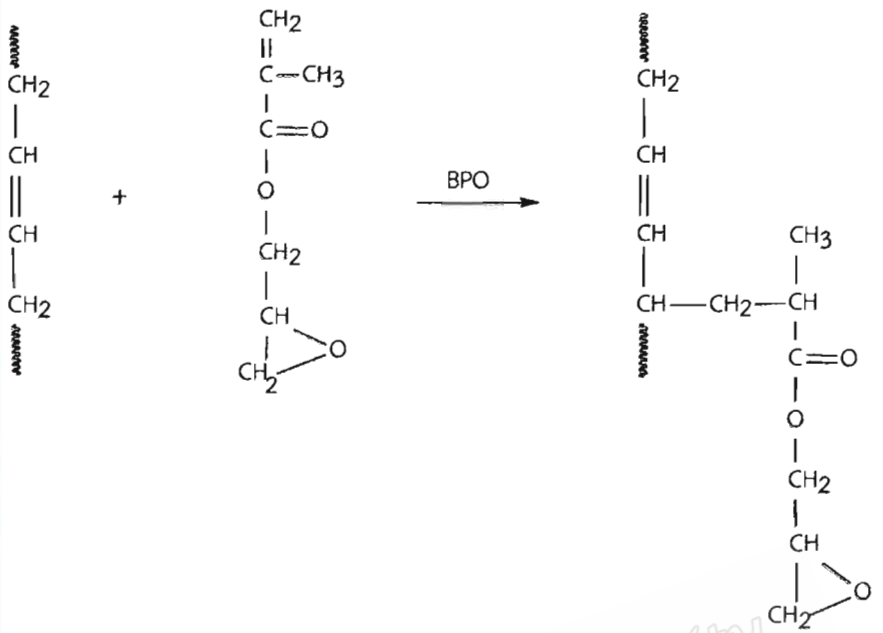
(a) Reaction of maleic anhydride with unsaturated backbone in reclaim rubber



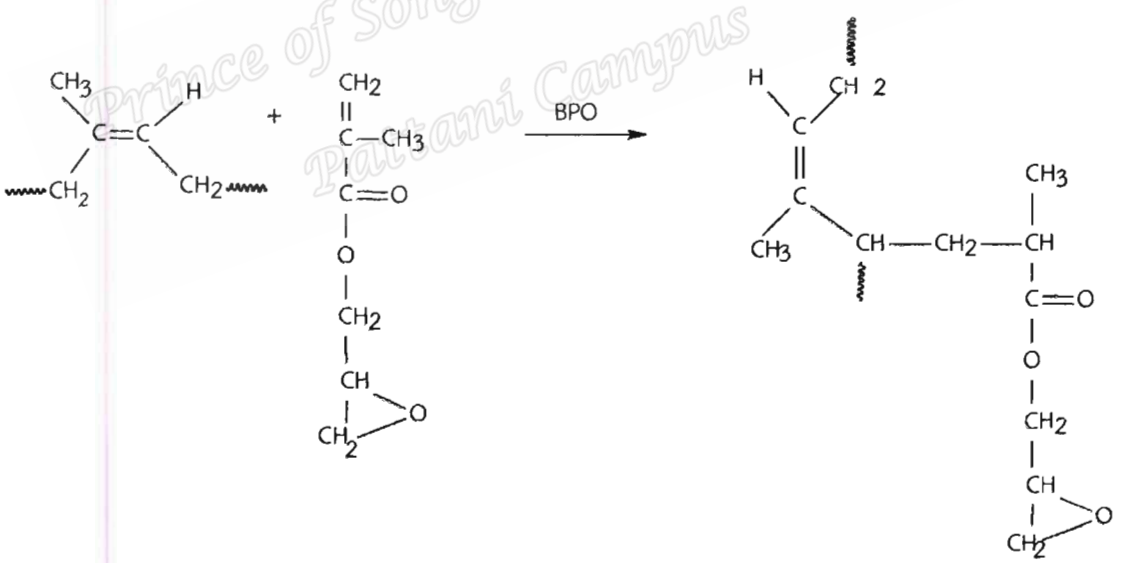
(b) Reaction of maleic anhydride with natural rubber

Prince of Songkla University
Pattani Campus

รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างมาลิอิกแอนไฮไดรด์กับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิ่มตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b) (Nelson, 2003 และ Nakason *et al.*, 2006a)



(a) Reaction of glycidyl methacrylate with unsaturated backbone in reclaim rubber



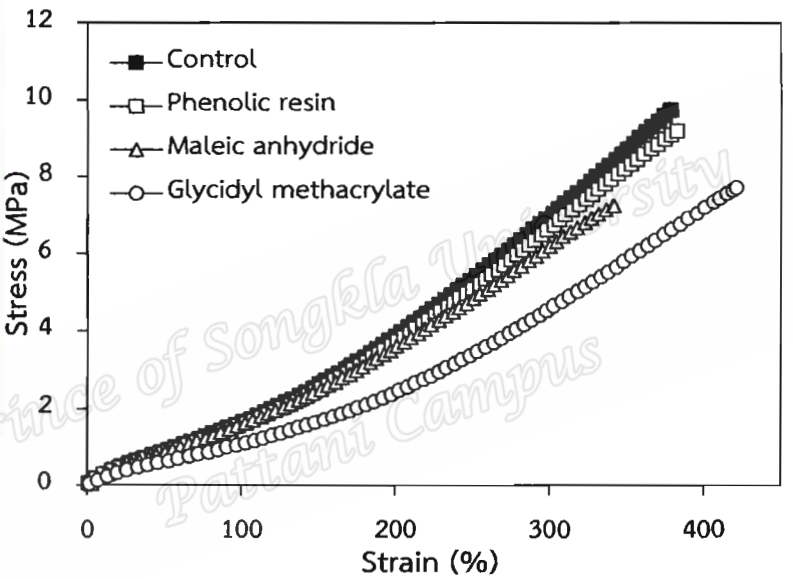
(b) Reaction of glycidyl methacrylate with natural rubber

รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างไกลซิดิลเมทาคริเลตกับสายโซ่โมเลกุลของยางไม่อิ่มตัวในยางรีเคลม (a) และยางธรรมชาติ (b) (ดัดแปลงจาก Nelson, 2003 และ Juntuek *et al.*, 2011)

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR

นำยางคอมพาวนด์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลมมาศึกษาสมบัติเชิงกล โดยการนำยางคอมพาวนด์ไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้า ที่อุณหภูมิ 150°C หลังจากนั้นนำยางที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็ง ตามวิธีการทดสอบในหัวข้อ 3.4.2, 3.4.3 และ 3.4.5 ตามลำดับ ผลทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเมื่อใช้สารดัดแปรชนิดต่างๆ พบว่ายางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมมีการผิดรูปแบบอิลาสติก และเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์การผิดรูปต่างๆ จะสังเกตได้ว่าความแข็งตึง (Stiffness) ของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรจะมีค่าน้อยกว่าสูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปรมากน้อยต่างกันตามชนิดสารดัดแปร

จากกราฟในรูปที่ 4.9 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ ยังแสดงผลการทดสอบสมบัติความสามารถในการคืนรูปและความแข็งด้วย

Prince of Songkla University Pattani Campus

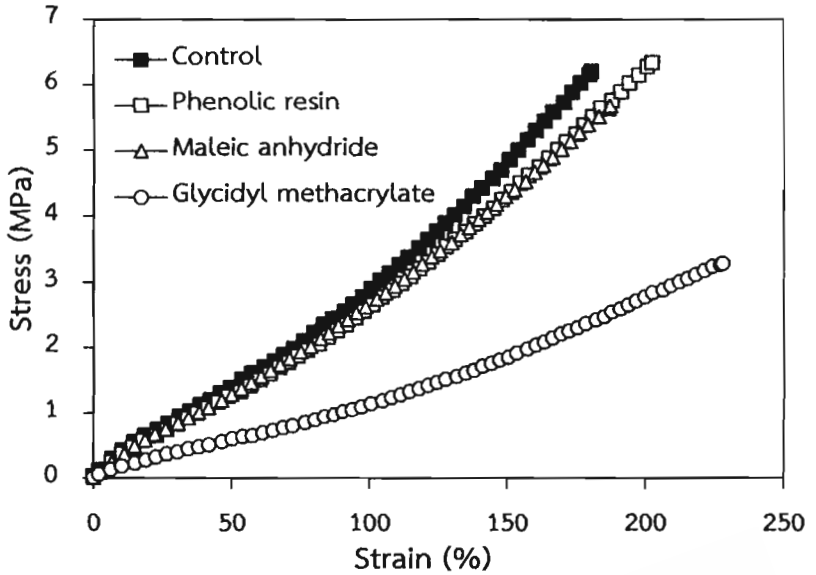
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Type of modifier	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Hardness (shore A)	Tension set (%)
Control	9.85±0.12	383±19.05	51	2.07±0.12
Ph	9.25±0.09	384±12.07	51	2.22±0.07
MA	7.75±0.12	328±15.42	49	2.20±0.35
GM	7.91±0.19	427±13.35	43	2.23±0.06

จากตารางที่ 4.4 พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปร และยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความแข็งใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลตจะมีค่าความต้านต่อแรงดึง และความแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางที่ได้จากผลต่างของค่าทอร์กสูงสุด และค่าทอร์กต่ำสุด (M_H-M_L) ในตารางที่ 4.3 กล่าวคือ สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลตจะไปรบกวนการทำงานของสารวัลคาไนซ์ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางน้อยลง ยางเบลนด์จึงแสดงสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ากรณียางเบลนด์ที่มีพันธะเชื่อมขวางสูง อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจว่ายางเบลนด์ทุกสูตรที่ใช้สารดัดแปรต่างชนิดกันมีความสามารถในการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR

ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่ง โดยนำยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR ไปบ่มเร่งด้วยการนำไปอบในตู้อบสำหรับบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์ภายหลังบ่มเร่งจากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดหลังการบ่มเร่งเมื่อใช้สารดัดแปรชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ากราฟมีลักษณะเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง กล่าวคือยางเบลนด์ยังคงแสดงลักษณะการผิดรูปแบบอิลาสติก แต่มีสมบัติเชิงกลด้อยลง จากกราฟในรูปที่ 4.10 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่ง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.5 นอกจากนี้ ยังแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังบ่มเร่ง (% Change in property) และสามารถนำเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังบ่มเร่ง มาเขียนกราฟแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

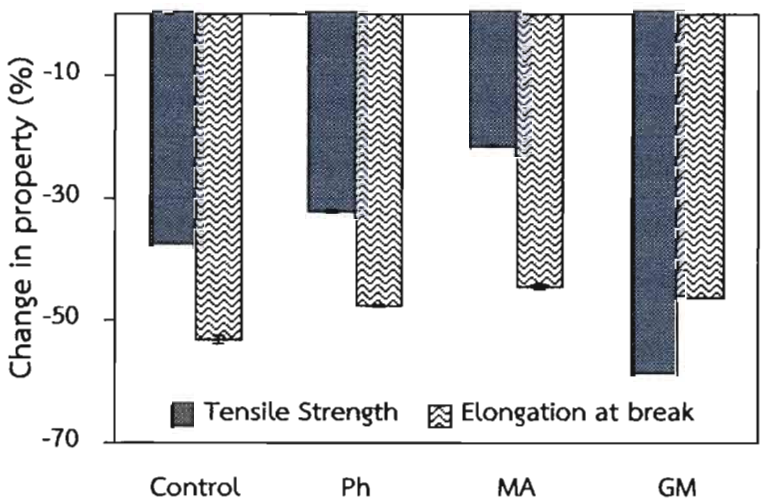
Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

Type of modifier	Tensile strength (MPa)		Change in property of T.S. (%)	Elongation at break (%)		Change in property of E.B. (%)
	Unaged	Aged		Unaged	Aged	
Control	9.85±0.12	6.19±0.14	-37.73	383±19.05	182±5.57	-53.21
Ph	9.25±0.09	6.27±0.07	-32.36	384±12.07	201±8.49	-47.66
MA	7.75±0.12	5.67±0.18	-21.79	328±15.42	182±11.74	-44.51
GM	7.91±0.19	3.25±0.07	-58.91	427±13.35	229±6.69	-46.37

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11 แสดงสมบัติเชิงกลและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางเบลนด์ NR/RR หลังบ่มเร่ง จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มเร่งมีค่าลดลงสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติที่มีค่าติดลบ ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปในแนวเดียวกันกับพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ที่เป็นแบบ Reversion กล่าวคือยางจะเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อระยะเวลาการวัลคาไนซ์มากเกินไป โดยจะทำให้มีความแข็งหรือมอดุลัสลดลง เนื่องจากผลของการตัดขาดสายโซ่ยางธรรมชาติและการเปลี่ยนรูปแบบพันธะเชื่อมขวางด้วยกำมะถันในโครงสร้างยาง ซึ่งในการทดลองใช้กำมะถัน 4 phr จะให้พันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยางแบบพอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมักจะเกิดการแตกออกของพันธะเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์เปลี่ยนแปลงไป

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

4.2.4 สมบัติการไหลของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดสารดัดแปร

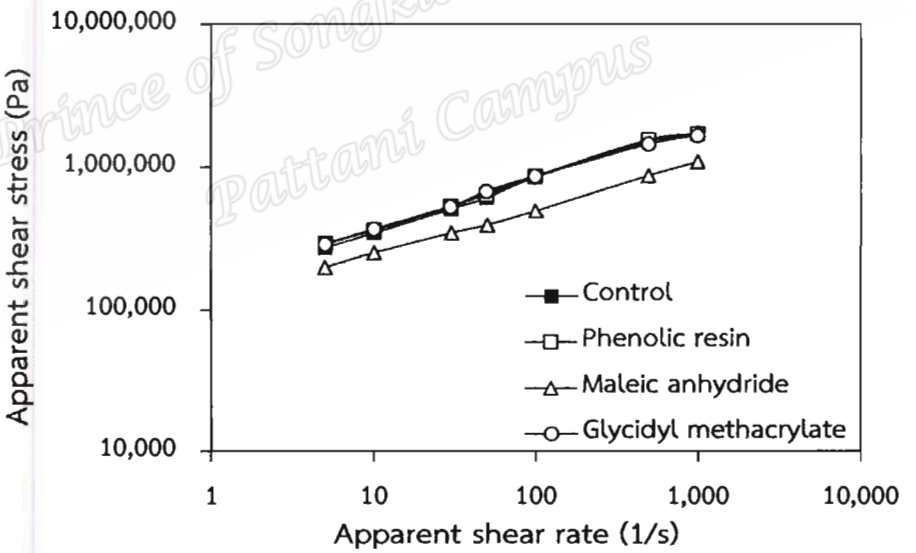
นำยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมที่แปรสารดัดแปรชนิดต่างๆ มาวิเคราะห์สมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าความเค้นเฉือนปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใต้ความร้อนพอลิเมอร์จัดเป็นวัสดุประเภท non-newtonian ชนิด shear thinning fluid ซึ่งวัสดุประเภทนี้มีความหนืดลดลงเมื่อได้รับแรงกระทำหรืออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกัน ยางเบลนด์แต่ละสูตรมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์ พบว่าให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏต่ำที่สุดอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจาก มาลิอิกแอนไฮไดรด์มีสภาพความเป็นกรดสูงที่สุด (pH 0.5) เมื่อเทียบกับสารดัดแปรชนิดอื่นๆ ประกอบกับมาลิอิกแอนไฮไดรด์สามารถเกิดการปลดปล่อยกรดได้เมื่อได้รับความร้อน (Nelson and Kutty,

Prince of Songkla University Pattani Campus

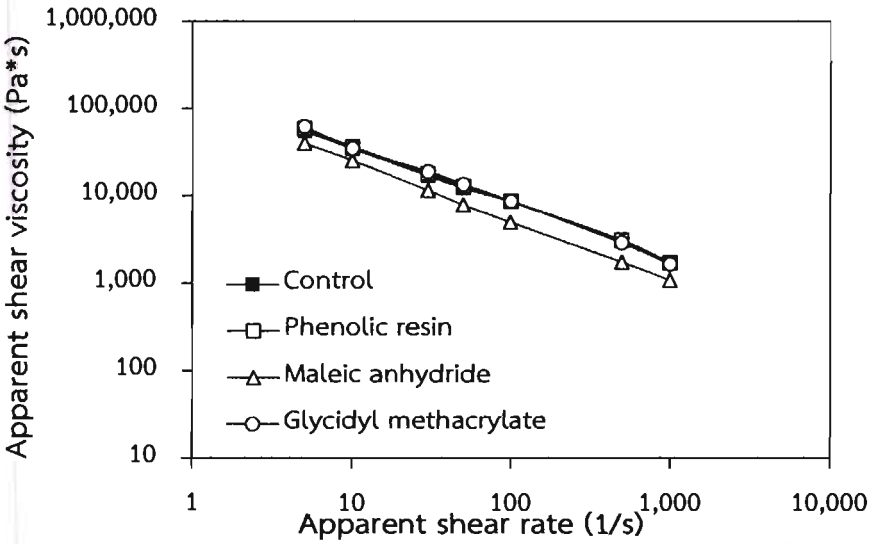
2004, Pasbakhsh *et al.*, 2009 และ วราภรณ์, 2552) จึงเป็นผลให้ยางมีระดับการวัลคาไนซ์ที่ต่ำ ยางเบลนด์ในสูตรนี้จึงมีความเค้นเฉือนและความหนืดเฉือนปรากฏต่ำที่สุด

อย่างไรก็ตามจากผลของการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี จะเห็นว่าไม่พบความแตกต่างของค่าสมบัติการไหล (ค่าความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏ) เมื่อใช้สารดัดแปรต่างชนิดกัน จึงทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อดูค่า tan δ ด้วยเทคนิค MDPT ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าการใช้สารดัดแปรต่างชนิดกัน จะไปรบกวนการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ และทำให้ค่า tan δ ของวัสดุเปลี่ยนไป โดยพบว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปรจะมีค่า tan δ ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นถึงระดับความเป็นอิลาสติกเมื่อยางได้รับการวัลคาไนซ์ปกติ ในขณะที่ยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรจะมีค่า tan δ เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากยางเบลนด์เกิดการวัลคาไนซ์ที่ไม่สมบูรณ์จากผลการรบกวนของสารดัดแปรที่มีสภาพเป็นกรด โดยที่มาลิอิกแอนไฮไดรด์จะมีสภาพเป็นกรดแก่ที่สุด (pH = 0.5) จึงมีค่า tan δ ของยางเบลนด์สูงที่สุด รองลงมาคือยางเบลนด์ที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน และไกลซิดิลเมทาคริเลต ตามลำดับ

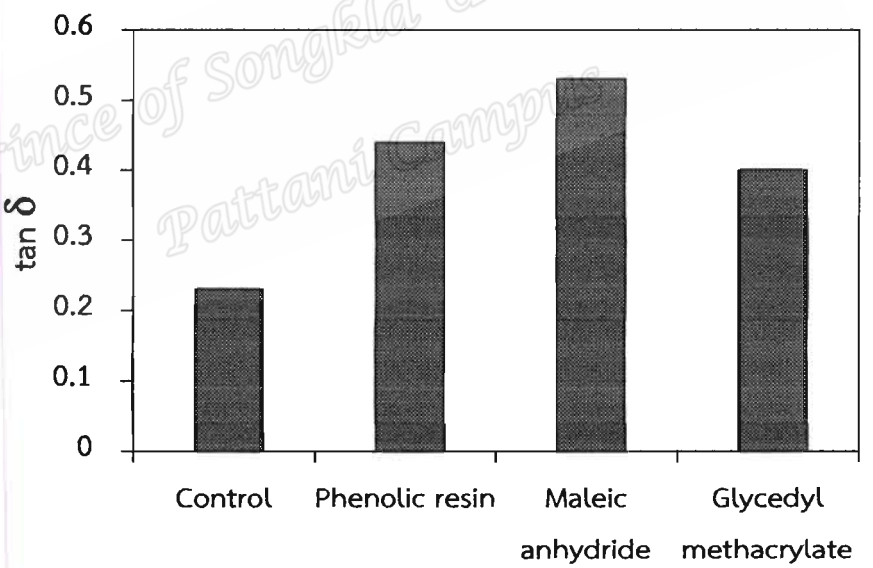
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร



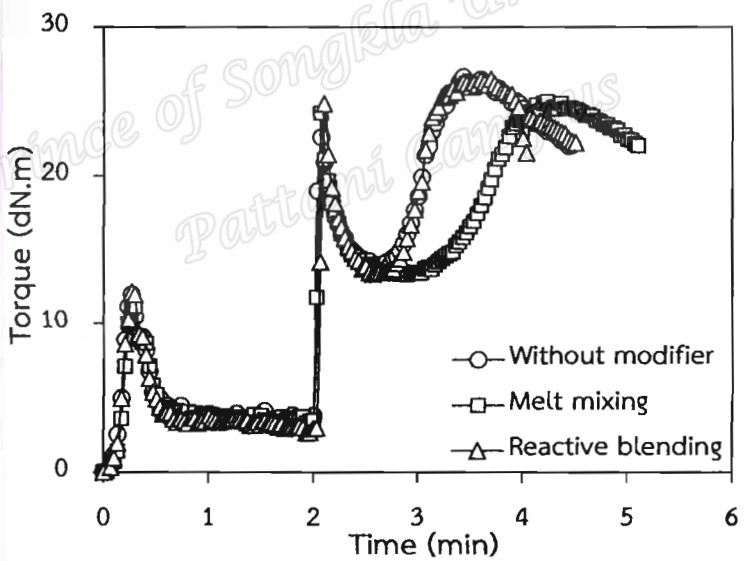
รูปที่ 4.14 tan δ ที่ความถี่ 10 Hz ของยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเมื่อแปรชนิดของสารดัดแปร

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก โดยศึกษาผลของวิธีการผสมสารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1. วิธีการดัดแปรพื้นผิวของยางรีเคลมในสภาวะหลอม (Melt mixing method) โดยนำยางรีเคลมมาผสมกับสารดัดแปรก่อนนำไปเตรียมคอมพาวนด์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ตามลำดับ และ วิธีที่ 2 วิธีการเบลนด์แบบรีแอคทีฟ (Reactive blending method) โดยผสมสารดัดแปรในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.3

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

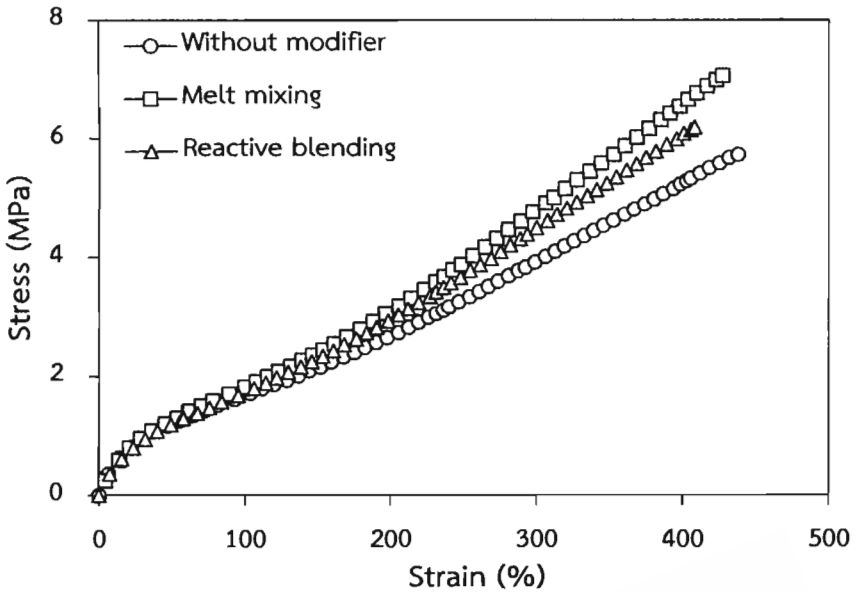
จากค่าทอร์กการผสมพบว่าในช่วงเริ่มต้นการผสมค่าทอร์กการผสมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการใส่เม็ดพลาสติก PEC ลงไปในห้องผสม ซึ่ง PEC ที่ยังไม่หลอมจะต้านการหมุนโรเตอร์สูง ทำให้ทอร์กมีค่าสูง และค่าทอร์กจะลดลงเมื่อ PEC เกิดการหลอมเนื่องจากความร้อนและแรงเฉือนที่ได้รับ จากนั้นทอร์กจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่นาทีที่ 2 เนื่องจากการใส่ยางคอมพาวนด์ซึ่งมี

Prince of Songkla University Pattani Campus

ความหนืดสูงลงไปในห้องผสม หลังจากนั้นเมื่อยางได้รับแรงเฉือนและความร้อนซึ่งจะส่งผลให้ยางนิ่มลงทำให้ค่าทอร์กจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งที่เวลาประมาณ 2.70 นาที สูตรที่ไม่ใส่สารดัดแปร (Without modifier) และวิธีดัดแปรผิวแบบ Reactive blending ค่าทอร์กจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่สูตรที่ใช้วิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะมีค่าทอร์กเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่เวลาประมาณ 3 นาที ซึ่งค่าทอร์กที่เพิ่มขึ้นในช่วงนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์ในโมเลกุลยาง ทำให้มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น หลังจากเฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์หรือเมื่อถึงจุดที่ทอร์กสูงที่สุด จะบดผสมต่อเนื่องไปอีก 1 นาที เพื่อให้เฟสยางที่เกิดการวัลคาไนซ์เกิดการแตกออกและกระจายตัวไปในเฟสพลาสติกภายใต้การผสมที่มีแรงเฉือนสูง โดยจะสังเกตได้จากค่าทอร์กการผสมที่มีแนวโน้มลดลง และจากค่าทอร์กการผสมพบว่าการใช้วิธีผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกันจะปรากฏลักษณะของทอร์กการผสมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมแบบไม่ใช้สารดัดแปร (Without modifier) และที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending จะมีลักษณะทอร์กการผสมเหมือนกัน ขณะที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะมีทอร์กการผสมที่ตำแหน่งการเกิดไดนามิกส์วัลคาไนเซชันช้ากว่า ทั้งนี้อาจเป็นผลจากวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ทำการผสมสารดัดแปรกับยางรีเคลมในขั้นตอนแรกของการเตรียมยางรีเคลม ก่อนนำมาเตรียมเป็นยางคอมพาวนด์ และเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เป็นขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งการมีฟินอลิกเรซินอยู่ในยางคอมพาวด์ ทำให้ฟินอลิกเรซินมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาดัดแปรผิวประจัญกับโมเลกุลยางรีเคลมและยางธรรมชาติได้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้จำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนเช่นกัน ทำให้รบกวนพลังงานความร้อนโดยรวมที่วัสดุได้รับในขณะผสม และพลังงานที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ส่งผลให้การเกิดไดนามิกส์วัลคาไนเซชันในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธี Melt mixing ช้าลงกว่าเดิม ซึ่งแตกต่างจากวิธีการเตรียมแบบ Reactive blending ที่ใส่สารดัดแปรฟินอลิกเรซินเข้าไปในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยปกติฟินอลิกเรซินจะเป็นสารวัลคาไนซ์ที่เกิดปฏิกิริยาได้ช้า จึงทำให้ ณ เวลาสิ้นสุดการผสมจึงยังไม่เห็นผลของการรบกวนการวัลคาไนซ์ในเฟสยางของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรวิธีการผสมสารดัดแปร 2 วิธีคือ Melt mixing method และ Reactive blending method มาเตรียมเป็นชิ้นทดสอบด้วยวิธีการอัดเบ้า จากนั้นจึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

ลิขสิทธิ์ของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ Prince of Songkla University Pattani Campus

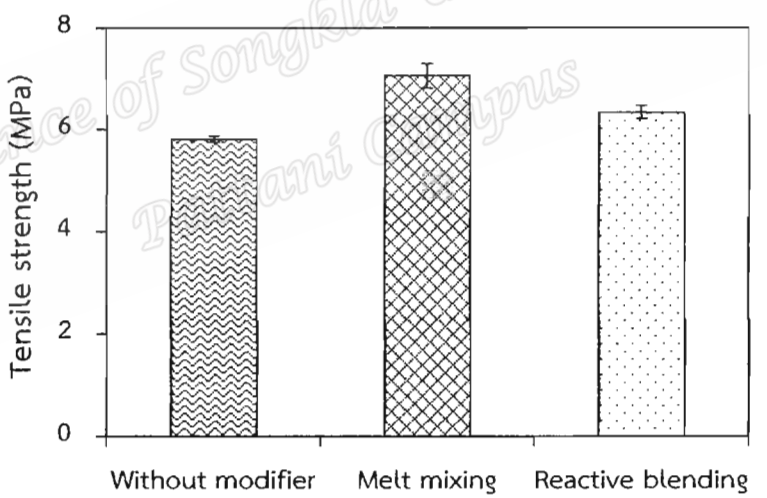
จากรูปที่ 4.16 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ แสดงลักษณะการผิดรูปแบบอิลาสติก โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่าช่วงเริ่มต้นจนถึงที่มอดุลัสที่ 100% มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้วิธีการผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกัน เนื่องจากในช่วงแรกของการยืดเฟสพลาสติกเป็นเฟสที่ทำหน้าที่รับแรงเค้น แต่เมื่อพิจารณามอดุลัสและระยะยืดช่วงสุดท้าย พบว่า NR/RR/PEC TPVs ที่ใส่สารดัดแปรคือ Melt mixing และ Reactive blending จะให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าไม่ใส่สารดัดแปร แสดงให้เห็นถึงผลของการใช้สารดัดแปรส่งผลต่อความแข็งตึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบผลของการใส่สารดัดแปรด้วยวิธีการผสมที่แตกต่างกันทั้ง 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending เล็กน้อย จากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 4.16 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6 รวมถึงยังแสดงผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็ง และการผิดรูปถาวรแบบดึงด้วย

ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

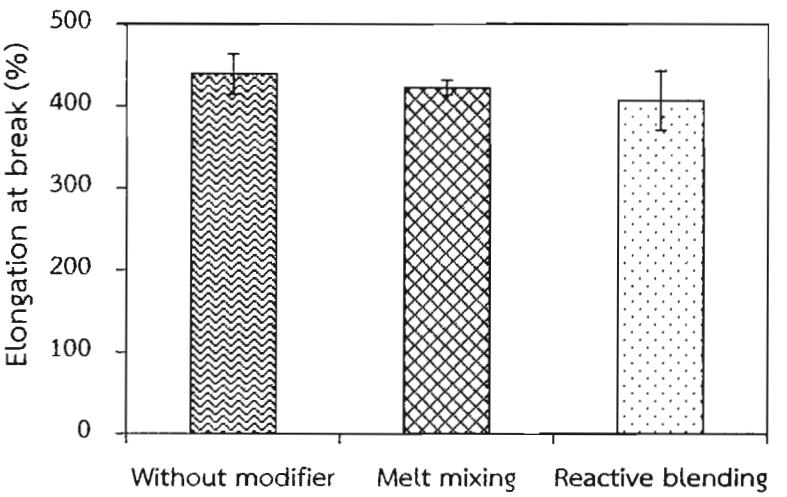
Blend methods	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (shore A)
Without modifier	5.81±0.06	439±24.64	6.28±0.58	52
Melt mixing	7.06±0.24	422±8.87	5.13±0.44	55
Reactive blending	6.34±0.14	406±35.96	5.17±0.86	55

จากตารางที่ 4.6 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความสามารถในการยืดจนขาด ค่าการผิดรูปถาวรแบบดึง และค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร ดังรูปที่ 4.17, 4.18, 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

Prince of Songkla University Pattani Campus



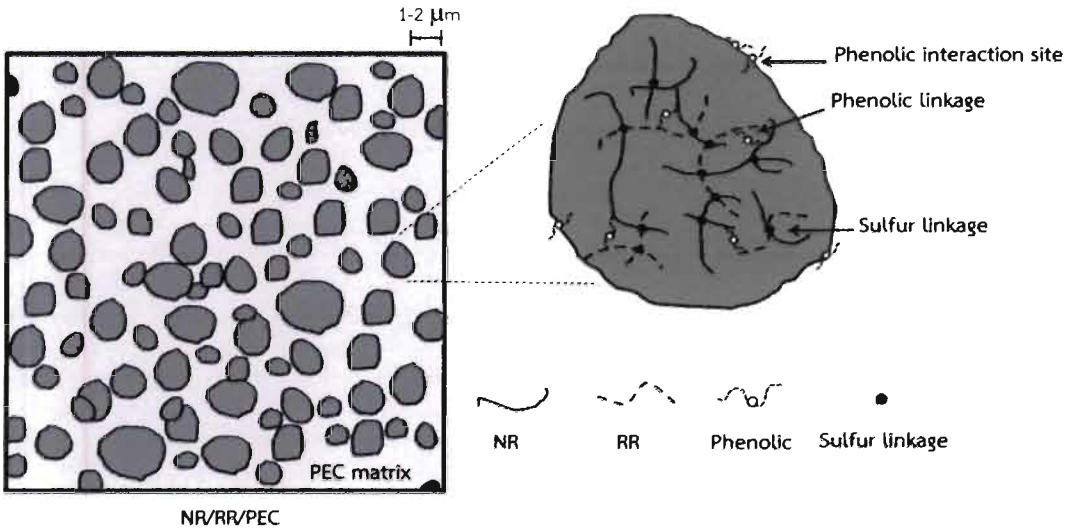
รูปที่ 4.17 ความต้านทานต่อแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร



รูปที่ 4.18 ความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากที่รูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อใช้สารดัดแปรเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าไม่ใส่สารดัดแปร เนื่องจากสารดัดแปรเข้าไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวประจัญสูงขึ้น ส่งผลให้การส่งผ่านแรงเค้นระหว่างรอยต่อของโมเลกุลยางดีขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น รวมถึงเมื่อมีฟินอลิกเรซินจะมีโอกาสเกิดพันธะเชื่อมขวางแบบ C-C และ C-O ซึ่งมีพลังงานพันธะ 346 kJ/mol และ 358 kJ/mol ตามลำดับ ทำให้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากเดิมที่มีการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวซึ่งจะให้พันธะเชื่อมขวางส่วนใหญ่แบบพอลิซัลฟิดิก (C-S_X-C) ซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำกว่า (270 kJ/mol) (Brydson, 1978) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างขั้นตอนการผสมที่แตกต่างระหว่างวิธีการผสมสารดัดแปรทั้ง 2 วิธี คือ Melt mixing และ Reactive blending พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการใช้วิธีผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่าวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending เนื่องจากการใช้วิธี Melt mixing จะเตรียมยางรีเคลมบดผสมกับฟินอลิกเรซินในขั้นตอนแรกก่อนที่จะนำยางรีเคลมผสมฟินอลิกเรซินที่ได้ไปเตรียมเป็นยางคอมพาวนด์ และนำไปเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในลำดับสุดท้าย (วิธีการเตรียมแบบ Melt mixing method แสดงในรูปที่ 3.2) ทำให้ฟินอลิกเรซินที่อยู่ในยางรีเคลมมีโอกาสเกิดอันตรกิริยาได้กับทั้งเฟสยางและเฟสพลาสติก ซึ่งความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสแสดงในรูปที่ 4.19

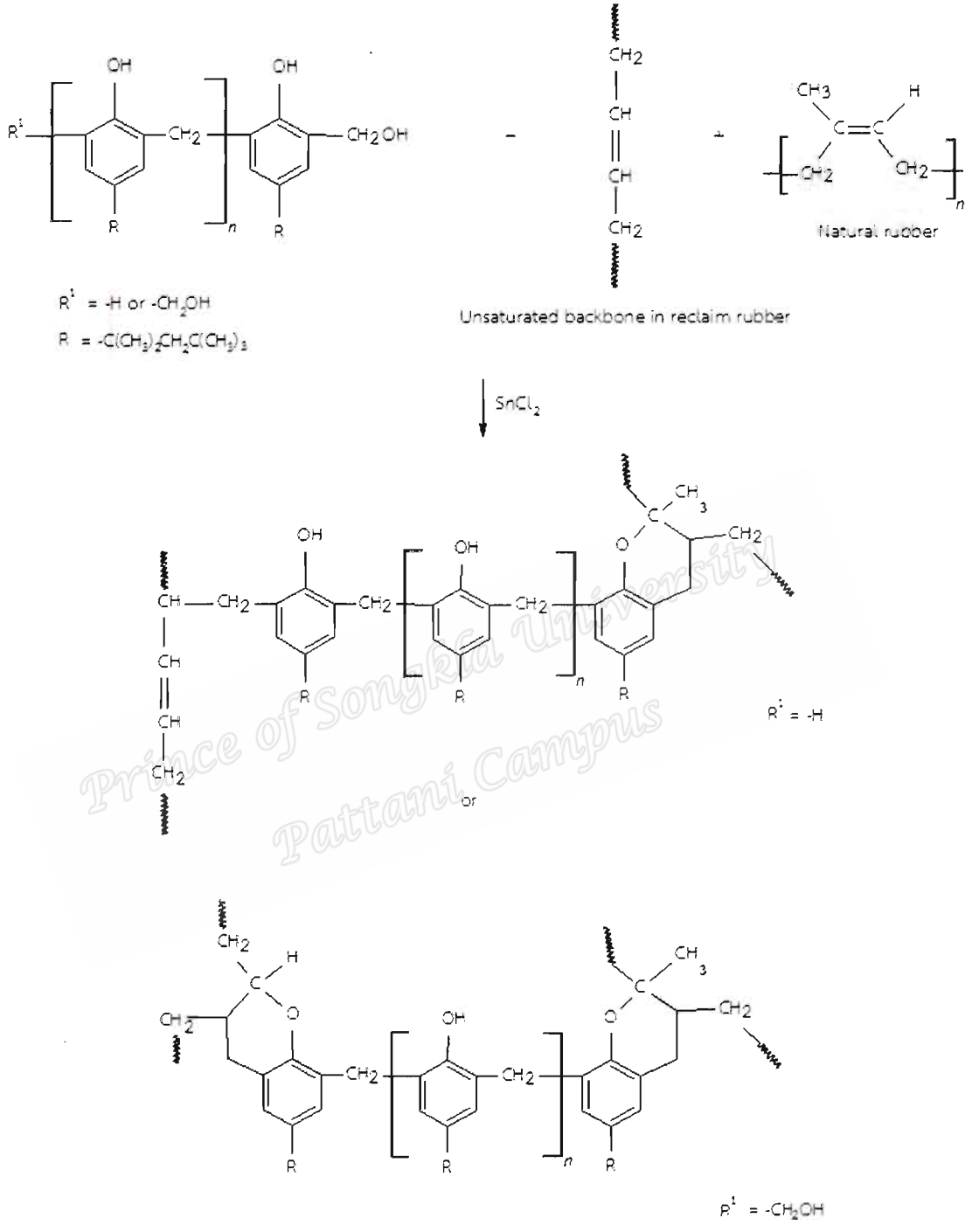
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.19 โอกาสเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางรีเคลม ยางธรรมชาติ และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซินเมื่อใช้วิธีการผสมแบบ Melt mixing method

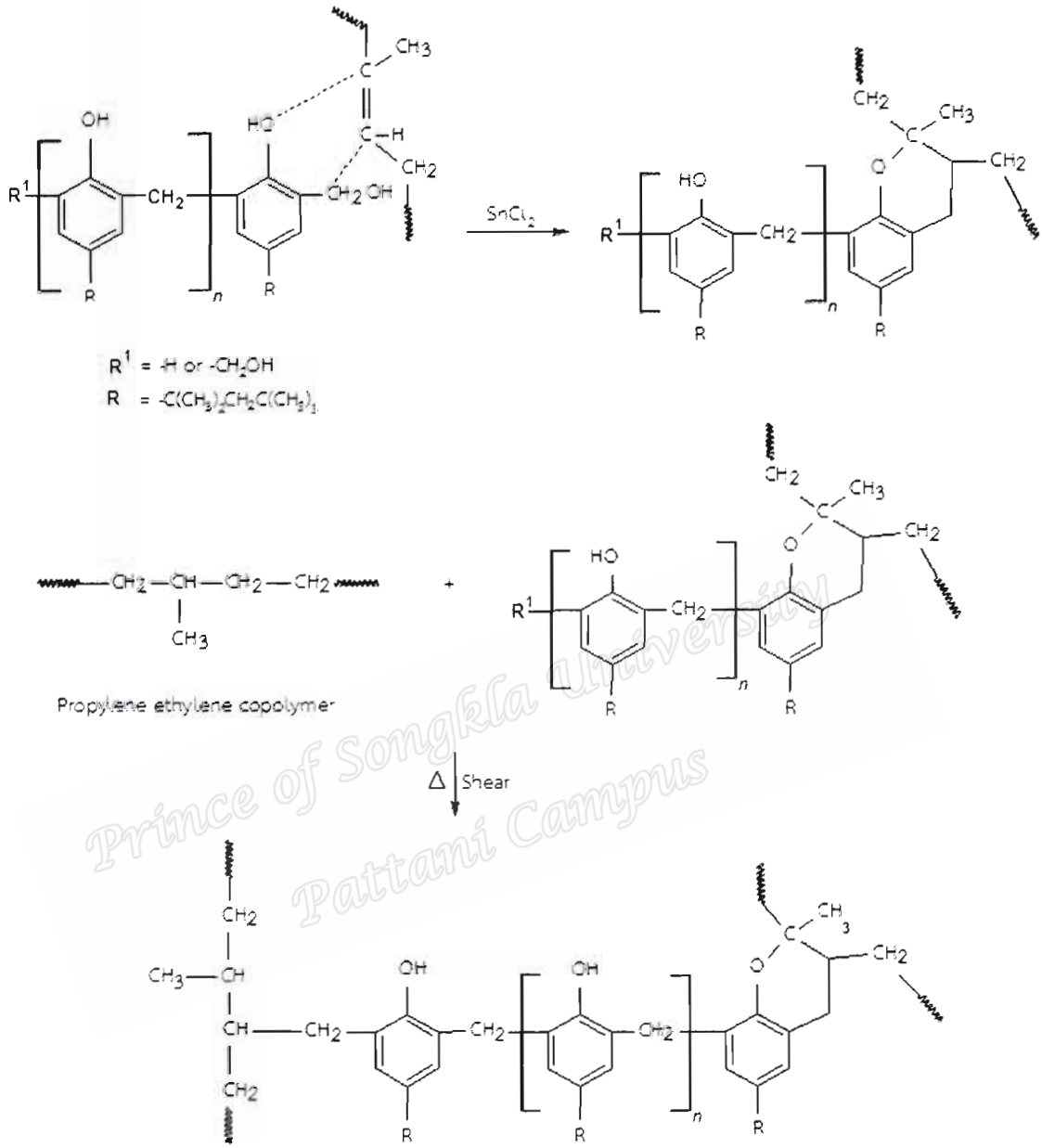
โดยที่หมู่เมทิลลอล (Methylol groups, -CH_2OH) ในโมเลกุลของฟินอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลของยางได้ (Nakason *et al.*, 2006b) ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 4.20 รวมถึงมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสยางและเฟสโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ ดังปฏิกิริยาที่แสดงดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ด้วยวิธีผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ซึ่งผสมสารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซินกับยางรีเคลมก่อนในขั้นตอนแรก ก่อนนำไปเบลนด์กับยางธรรมชาติเพื่อเตรียมคอมพาวนด์ ทำให้ช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเฟสยาง รวมถึงช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติก่อนที่จะนำไปเบลนด์กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เพื่อเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในขั้นตอนสุดท้าย นอกจากนี้การใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนแรกของการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะทำให้ฟินอลิกเรซินมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยากับเฟสต่างๆ เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้มากกว่าวิธีการเตรียมแบบ Reactive blending ซึ่งจะใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ซึ่งวิธีการนี้มีระยะเวลาในการกระจายตัวและเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบเบลนด์ (เกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟส) ที่สั้นกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมแบบ Melt mixing มากจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้วิธีการผสมแบบ Reactive blending มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าการใช้วิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing method

Prince of Songkla University Pattani Campus



Prince of Songkla University Pattani Campus

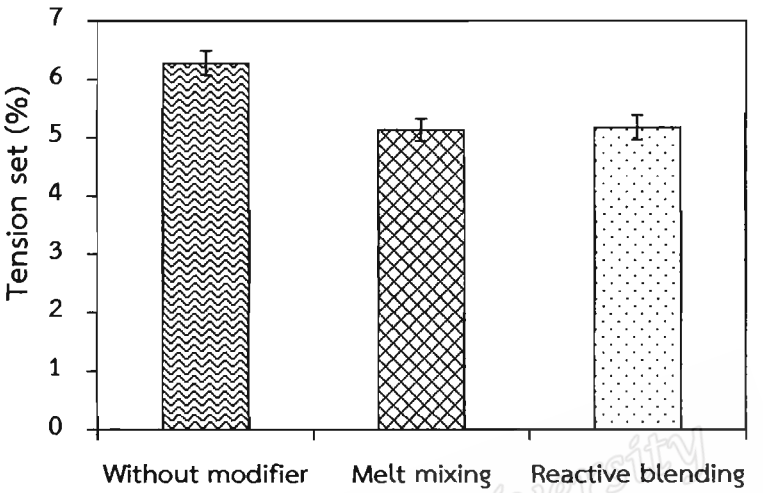
รูปที่ 4.20 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางรีเคลม และยางธรรมชาติ กับฟีนอลิกเรซิน (ดัดแปลงจาก Nakason *et al*., 2006b; Nelson, 2003; Brydson, 1978)



รูปที่ 4.21 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างเฟสยาง กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (ดัดแปลงจาก Nakason *et al.*, 2006b; George *et al.*, 1999; Brydson, 1978)

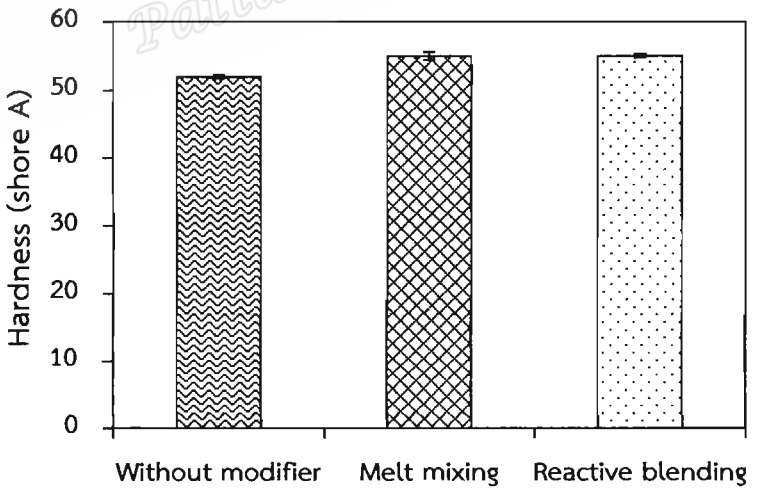
Prince of Songkla University Pattani Campus

การผิดรูปถาวรแบบดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แปรวิธีการผสมสารดัดแปร แสดงดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.22 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

Prince of Songkla University Pattani Campus



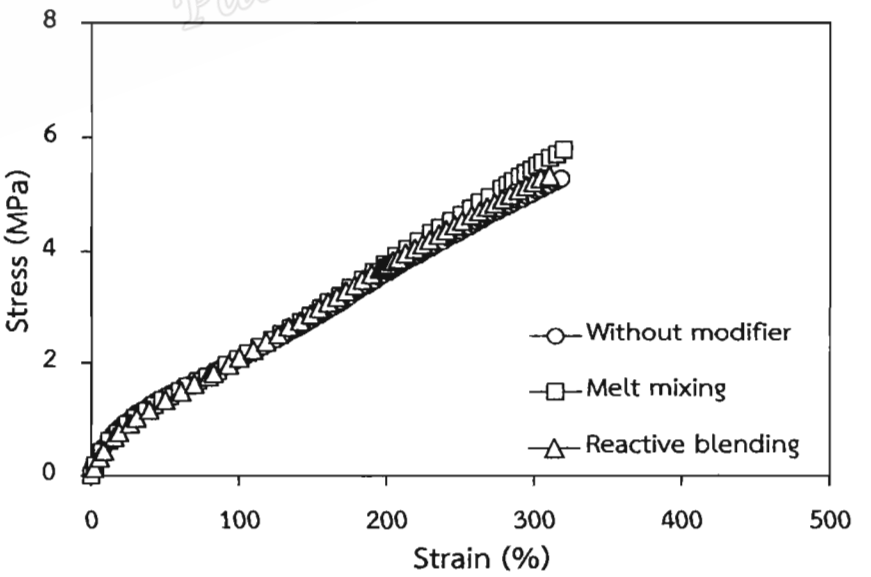
รูปที่ 4.23 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.22 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรมีความสามารถคืนรูปได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร ขณะที่เมื่อใช้วิธีการผสมที่แตกต่างกัน ความสามารถในการคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งซึ่งแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรให้ค่าความแข็งสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปรเล็กน้อย แต่ให้ค่าไม่แตกต่างกันเมื่อใช้วิธีการผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารดัดแปรที่เติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของเฟสยาง และเฟสพลาสติกในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีผลต่อการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวประจัญดังที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้

4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ ตามวิธีการในหัวข้อ 3.3.3 จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรวิธีการผสมที่ต่างกัน จากรูปพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีลักษณะการผิดรูปแบบอิลาสติกเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง แต่พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้วิธีการผสมที่ต่างกันภายหลังบ่มเร่งจะให้ค่ามอดุลัสใกล้เคียงกัน และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 4.24 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 รวมถึงแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้วย

ตารางที่ 4.7 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

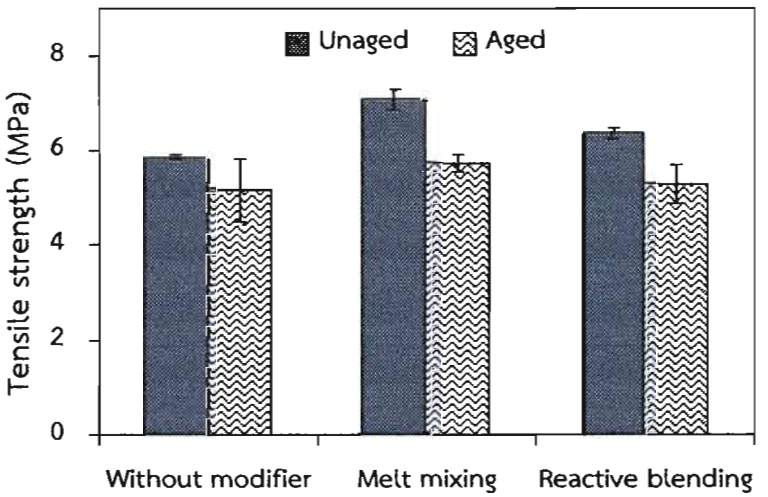
Blend method	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
Without modifier	5.81±0.06	5.16±0.67	-11.19
Melt mixing	7.06±0.24	5.72±0.19	-18.98
Reactive blending	6.34±0.14	5.28±0.41	-16.72

Prince of Songkla University Pattani Campus

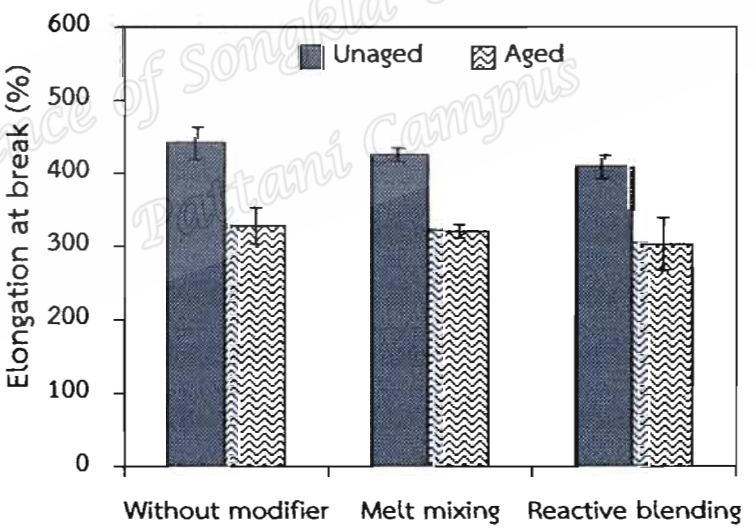
ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

Blend method	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
Without modifier	439±24.64	328±24.08	-25.28
Melt mixing	422±8.87	320±9.58	-24.17
Reactive blending	406±35.96	302±17.54	-25.62

จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 รวมถึงแสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นการเปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

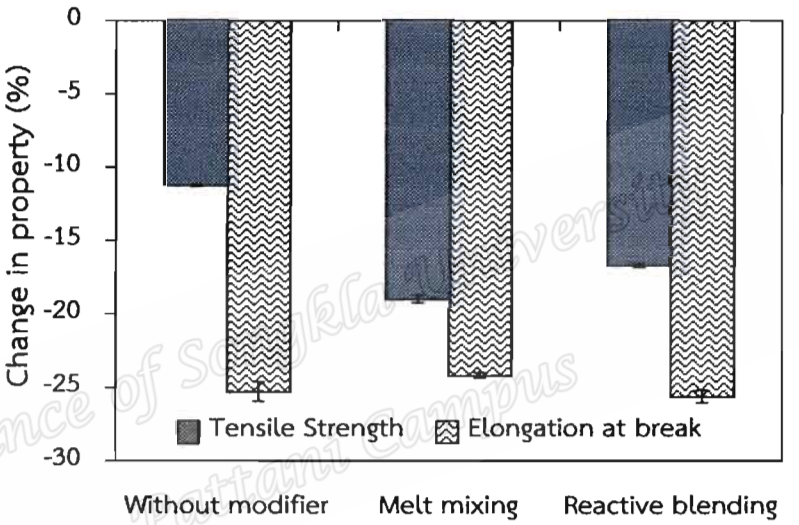


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.26 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร และที่ใส่สารดัดแปรด้วยวิธีการผสมทั้ง 2 วิธี ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มเร่งต่ำกว่าก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากยางสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้ ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ (Chain

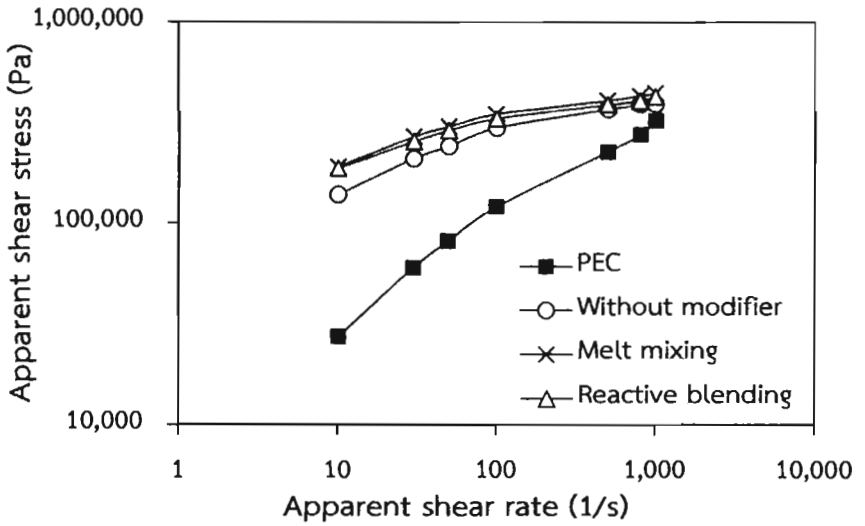
scission) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ลดลง กอปรกับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติซึ่งมีพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะแตกออกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดให้ค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมบัติที่ลดลงหลังการบ่มเร่ง และพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ทั้ง 3 สูตรทั้งที่ไม่ใช้สารดัดแปรและแปรวิธีการผสม 2 วิธี มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดไม่แตกต่างกัน



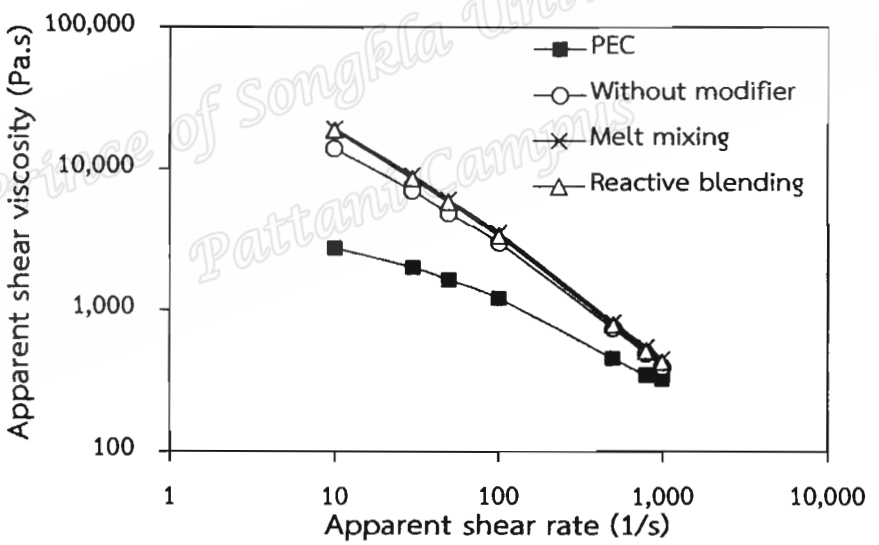
รูปที่ 4.27 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

4.3.4 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ มาวิเคราะห์สมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคาปิลลารี ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

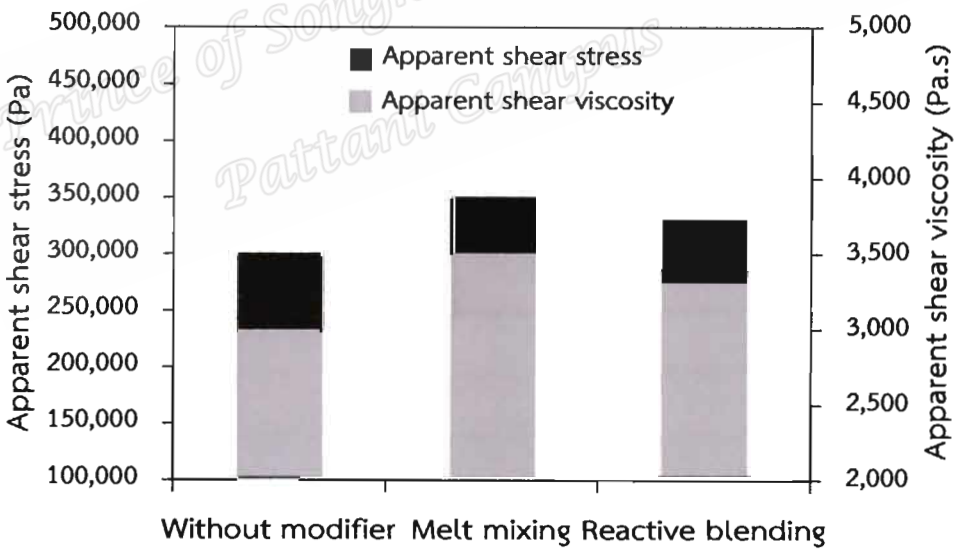


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.28 และ 4.29 พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือนปรากฏที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า NR/RR/PEC TPVs เป็นของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian fluid) มีพฤติกรรมการไหลแบบลดความหนืด (Shear thinning behavior) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) กล่าวคือขณะที่อัตราเฉือนเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์เกิดการหลอมและเกิดการ

จัดเรียงตัวใหม่ เพื่อให้โมเลกุลของยางผ่านง่ายขึ้น ทำให้ค่าความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลง โดยพบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏ และค่าความหนืดเฉือนปรากฏของเม็ดพลาสติก PEC และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ NR/RR/PEC TPVs เนื่องจาก PEC เป็นพลาสติกในกลุ่มพลาสโตเมอร์ คือ มีความเป็นพลาสติก และอิลาสติกในโมเลกุล มีความอ่อนตัว สามารถเกิดการหลอมและไหลได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน การนำยางมาใส่ในพลาสติกเพื่อเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เป็นการเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์ทำให้เกิดการหลอมและไหลได้ยากขึ้น ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง NR/RR/PEC TPVs ทั้ง 3 สูตร พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปร ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมสารดัดแปรทั้ง 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Melt mixing จะให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Reactive blending เล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

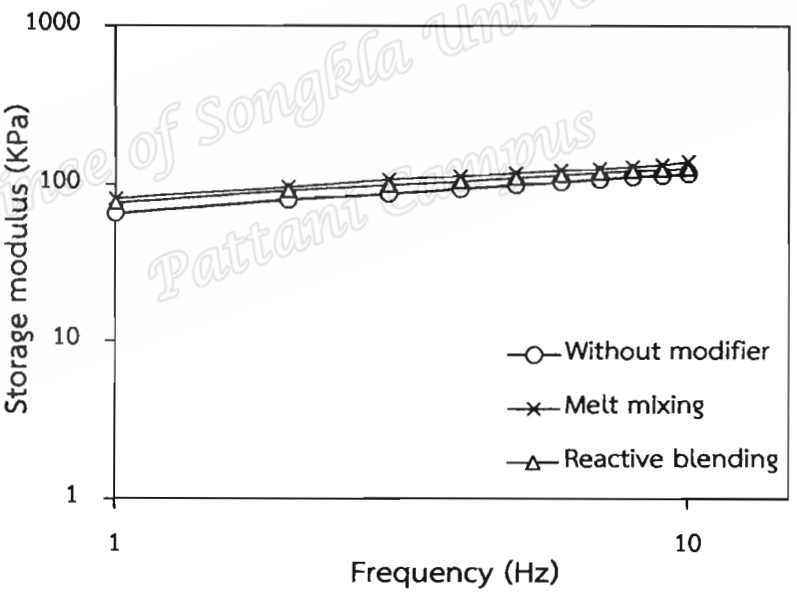
จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Melt mixing จะทำให้พอลิเมอร์มีความเค้นเฉือนสูงและไหลได้ยากที่สุด ซึ่งเป็นผลจากวิธีการผสมฟินอลิกเรซินด้วยวิธี Melt mixing ที่จะเตรียมยางรีเคลมผสมกับฟินอลิกเรซินก่อน ทำให้ฟินอลิกเรซินมีโอกาสเพิ่มความเข้ากัน

Prince of Songkla University Pattani Campus

ได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติ รวมถึงเฟสยางกับเฟสพลาสติก โดยแสดงปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างยางรีเคลม ยางธรรมชาติ และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ กับฟินอลิกเรซิน ในรูปที่ 4.19 ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) มากกว่าการใช้วิธี Reactive blending ซึ่งใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย

4.3.5 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ มาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ tan δ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.31–4.33

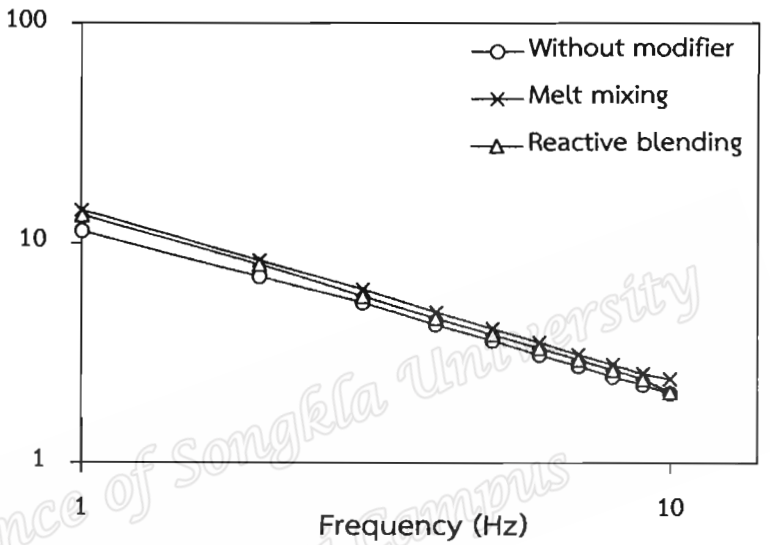


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.31 พบว่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในช่วงแรกที่ความถี่ต่ำพอลิเมอร์ยังมีเวลาในการพักความเค้น (Relaxation time) แต่เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเวลาในการพักความเค้นของโมเลกุลสั้นลง ทำให้โมเลกุลตอบสนองไม่ทันต่อความเค้นและความเครียดที่กระทำบนสายโซ่โมลุกุลพอลิเมอร์ค่ามอดุลัสจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่าค่ามอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตรที่ใส่สารดัดแปร จะมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติก

Prince of Songkla University Pattani Campus

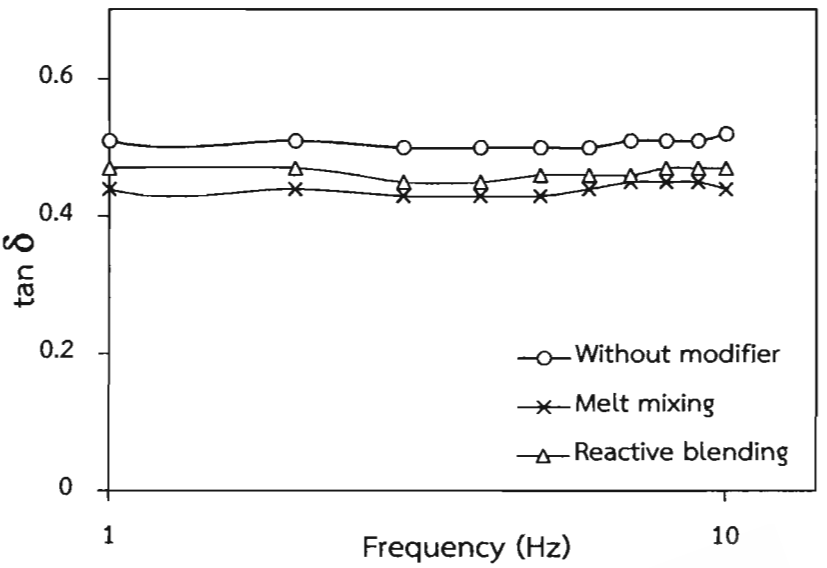
วัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปร (Without modifier) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผสมสารดัดแปรพบว่าการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์โดยใช้วิธี Melt mixing ให้ค่ามอดุลัสสะสมสูงกว่าวิธี Reactive blending เล็กน้อย แสดงให้เห็นการใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนแรกของการเตรียมจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสได้ดีกว่า ทำให้สามารถส่งผ่านแรงเค้นระหว่างเฟสได้ดี ทำให้เก็บสะสมพลังงานบนสายโซ่โมเลกุลได้มาก เป็นผลให้มีค่ามอดุลัสสะสมมากขึ้น



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.32 พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดปรากฏจากการทดสอบสมบัติการไหลในหัวข้อที่ 4.3.4 ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของการไหลแบบซูโดพลาสติก โดยที่เมื่อพอลิเมอร์เบลนด์เกิดการหลอมเนื่องจากความร้อนและความถี่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้การต่อต้านการไหล (ความหนืดเชิงซ้อน) ลดลงตามความถี่ และเมื่อพิจารณาค่าความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่เดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะให้ค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงที่สุด รองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending และ Without modifier ตามลำดับ เนื่องจากการใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมยางรีเคลมซึ่งเป็นขั้นตอนแรกทำให้ฟินอลิกเรซินมีเวลาและโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับเฟสต่างๆ มากกว่าวิธีการเตรียมแบบ Reactive blending ส่งผลให้ต้องใช้แรงเฉือนสูงขึ้นในการทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหว เป็นผลให้การใช้วิธีผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing มีค่าความหนืดเชิงซ้อนสูงที่สุด

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

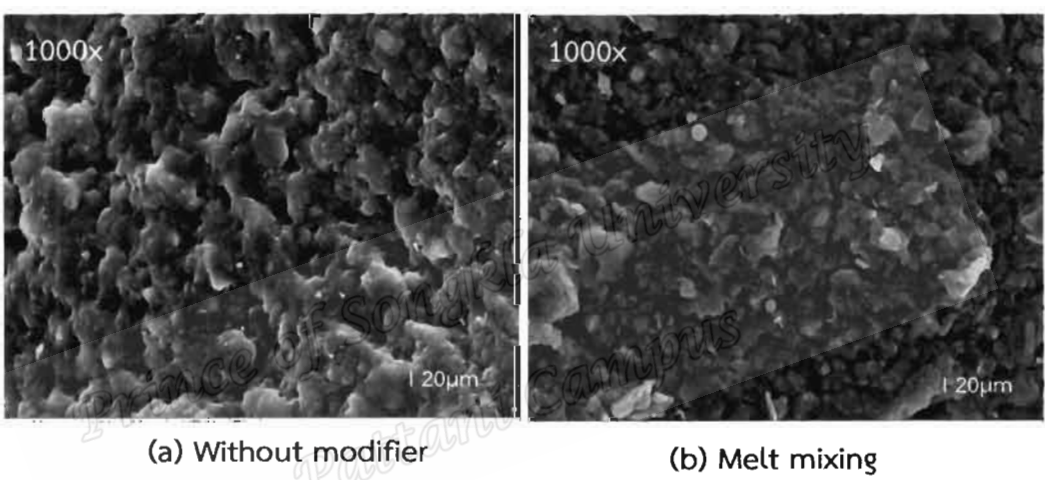
จากรูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า tan δ กับความถี่ ซึ่งค่า tan δ เป็นสัดส่วนระหว่างมอดุลัสสูญเสียต่อมอดุลัสสะสม โดยที่ค่า tan δ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นอิลาสติกของพอลิเมอร์ กล่าวคือถ้า tan δ มีค่าต่ำแสดงว่าวัสดุมีสมบัติอิลาสติกสูงสามารถผ่อนคลายความเค้นจากแรงกระทำได้ดี โดยจะพบว่าค่า tan δ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใส่สารดัดแปร กล่าวคือเมื่อใช้ฟินอลิกเรซินจะทำให้วัสดุสามารถตอบสนองกลับได้ดี มีสมบัติอิลาสติกปรับปรุงดีขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากฟินอลิกเรซินซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการผ่อนคลายความเครียดเนื่องจากการได้รับแรงกระทำในโมเลกุลได้ดี จึงทำให้มีค่า tan δ ต่ำ จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้วิธีการผสมสารดัดแปร 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing มีค่า tan δ ต่ำกว่าการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Reactive blending อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการใส่ฟินอลิกเรซินในขั้นตอนการเตรียมที่แตกต่างกันซึ่งได้อธิบายไปแล้วก่อนหน้านี้ในหัวข้อที่ 4.3.2 กล่าวคือการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing จะบดผสมฟินอลิกเรซินกับยางรีเคลมก่อน เพื่อให้ฟินอลิกเรซินอยู่ในเฟสของยางรีเคลมก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยากับยางธรรมชาติและโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ ต่อไปในขั้นตอนของการเตรียมคอมพาวนด์และการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ โดยจะเห็นว่าวิธีการเตรียมแบบ Melt mixing มีเวลาสำหรับให้ฟินอลิกเรซินเกิดการกระจายตัวและเกิดปฏิกิริยากับเฟสอื่นๆ มากกว่าการใช้การผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Reactive

Prince of Songkla University Pattani Campus

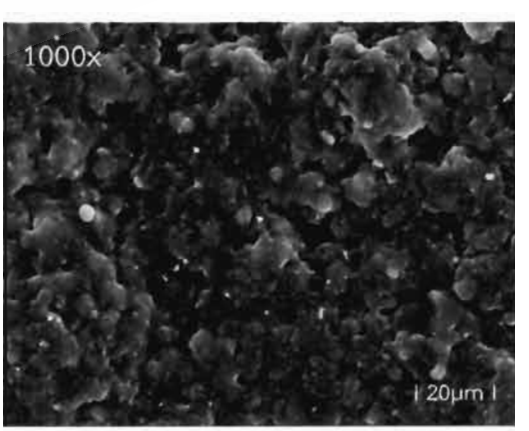
blending จึงส่งผลให้การผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสได้มากกว่าวิธี Reactive blending

4.3.6 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรวิธีการผสมสารดัดแปรวิธีต่างๆ มาศึกษาสัณฐานวิทยา ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.7 ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.34



(a) Without modifier (b) Melt mixing



(c) Reactive blending

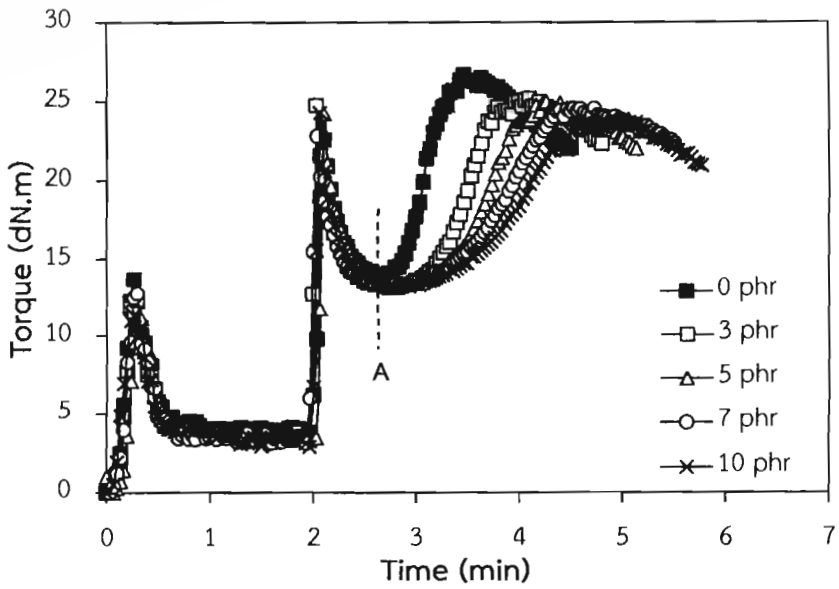
รูปที่ 4.34 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรวิธีการผสมสารดัดแปร

จากรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อใช้วิธีการผสมสารดัดแปรที่แตกต่างกันจะให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันด้วย โดยสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธี Reactive blending มีลักษณะของพื้นผิวที่หยาบและขรุขระ (Roughness) กว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing อย่างเห็นได้ชัด ความละเอียดของสัณฐานวิทยาที่ปรับปรุงดีขึ้นแสดงให้เห็นถึงผลของการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางทั้ง 2 ชนิด และระหว่างเฟสยางกับพลาสติกเกิดขึ้น (Lee *et al.*, 2007)

4.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)

เตรียมเทอร์พลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ที่อัตราส่วน 30/30/40 ส่วนโดยน้ำหนัก ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.4 ศึกษาผลของปริมาณสารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน ที่ปริมาณ 0, 3, 5, 7 และ 10 phr โดยใช้วิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing method

4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

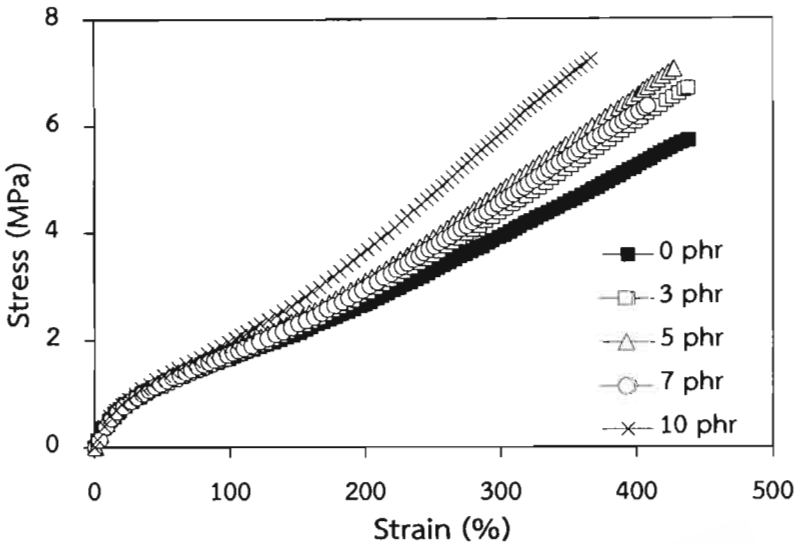
Prince of Songkla University Pattani Campus

จากรูปที่ 4.35 สามารถอธิบายลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์กได้เช่นเดียวกับรูปที่ 4.15 กล่าวคือ ค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่โพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ เนื่องจากโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เป็นของแข็งทำให้เกิดการต้านการหมุนของโรเตอร์สูง จากนั้นค่าทอร์กจะลดลงเนื่องจากโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เกิดการหลอม จากนั้นใส่ยางคอมพาวนด์ที่เวลา 2 นาที จะพบว่าค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูง และค่าทอร์กจะค่อยๆลดลงเมื่อยางได้รับความร้อนและแรงเฉือนจากการบดผสมจนยางนิ่มลง จากนั้นค่าทอร์กจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเกิดการเชื่อมขวางภายในเฟสยางหรือการเกิดการวัลคาไนซ์เชซันแบบไดนามิกซ์ จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์จากจุดที่ค่าทอร์กเริ่มเพิ่มขึ้น (จุด A ในรูปที่ 4.35) จนถึงจุดที่มีค่าทอร์กสูงสุดจะใช้ระยะเวลานานขึ้นตามปริมาณของฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่าค่าสูงสุดของทอร์กการผสมในช่วงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์จะมีความสูงลดลงตามปริมาณฟินอกลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น

4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

อิทธิพลของปริมาณฟินอลิกเรซินต่อพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC แสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่าค่าความแข็งตึง (Stiffness) หรือมอดุลัสซึ่งดูได้จากความชันของกราฟจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณฟินอลิกเรซินเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้ความแข็งตึงในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ทำให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่ใช้ กล่าวคือเมื่อปริมาณของพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นมอดุลัสของยางจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะยืดจนขาดของยางจะลดลง (บุญธรรม และคณะ, 2555) ประกอบกับฟินอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างเฟสของยางรีเคลมและเฟสของยางธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของยาง รวมถึงช่วยให้เกิดการกระจายตัวและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส (Interfacial adhesion) กับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ดี เนื่องจากฟินอลิกเรซินสามารถเกิดปฏิกิริยากับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ด้วย ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้แสดงดังรูปที่ 4.21 และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.9 รวมถึงยังแสดงผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็งและการผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ด้วย

Prince of Songkla University Pattani Campus



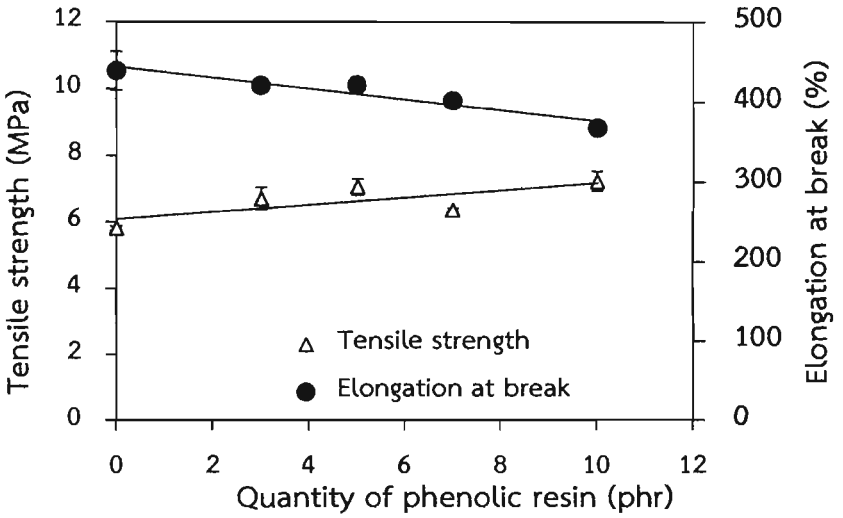
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

ตารางที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

Quantity of phenolic resin	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (shore A)
0 phr	5.81±0.06	439±24.64	6.28±0.21	52
3 phr	6.71±0.33	421±25.49	5.82±0.10	55
5 phr	7.06±0.24	422±8.87	5.13±0.19	55
7 phr	6.37±0.05	402±10.79	5.75±0.26	56
10 phr	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57

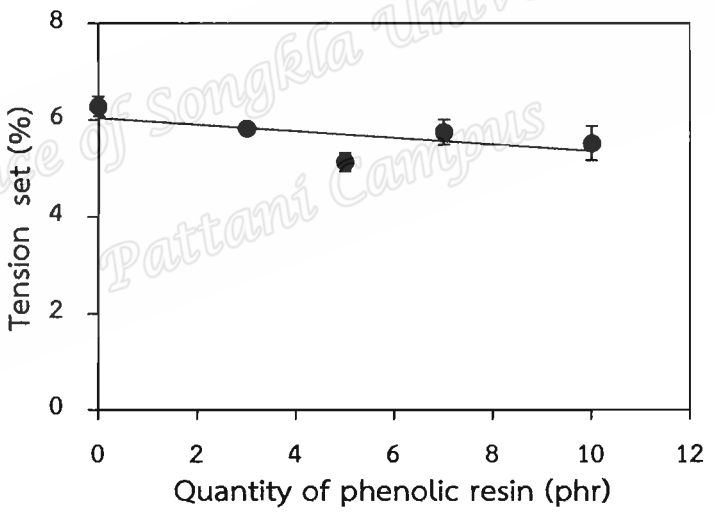
จากตารางที่ 4.9 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ค่าความสามารถในการคืนรูป และค่าความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน ดังรูปที่ 4.37, 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ

Prince of Songkla University Pattani Campus

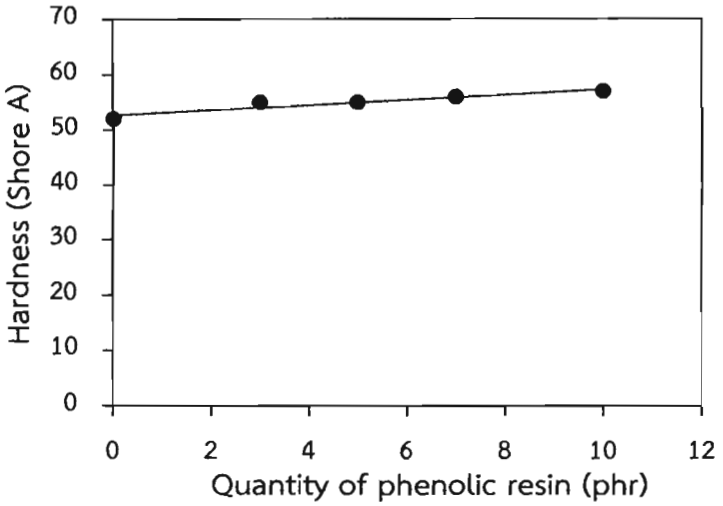


รูปที่ 4.37 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.38 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน



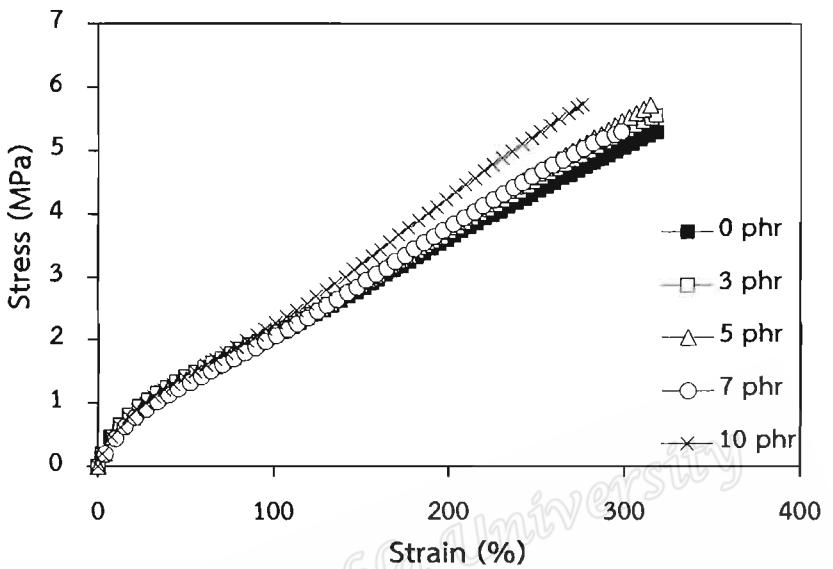
รูปที่ 4.39 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.37-4.39 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาด และค่าการผิดรูปถาวรแบบดึงมีแนวโน้มลดลง โดยที่ปริมาณฟินอลิกเรซิน 10 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งสูงที่สุด เนื่องจากการใช้ฟินอลิกเรซินจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่ผิวประจัญ ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณฟินอลิกเรซินที่มากบางส่วนยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยางให้มากขึ้น รวมถึงที่อุณหภูมิห้องฟินอลิกเรซินเป็นของแข็งเปราะ จึงช่วยเสริมความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ให้เพิ่มขึ้นด้วย และมีงานวิจัยของ Wu *et al.* (1997) และ Hirano *et al.* (2013) ที่ระบุว่าการใช้ฟินอลิกเรซินจะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของพอลิเมอร์เบลนด์ ดังนั้นสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงเพิ่มขึ้น เมื่อความแข็งแรงของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลง และจากรูปที่ 4.38 ที่พบว่าการผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของฟินอลิกเรซินที่ใช้ แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟินอลิกเรซินช่วยในการเกิดการเชื่อมประสานระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติ และเฟสยางกับเฟสพลาสติกได้ดี ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น

4.4.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรฟินอลิกเรซินที่ปริมาณต่างๆ จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา

22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากรูปที่ 4.40 แสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรฟินอลิกเรซินที่ปริมาณต่างๆ พบว่าพฤติกรรมการผิดรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนและหลังบ่มเร่งไม่แตกต่างกัน กล่าวคือความแข็งตึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น โดยจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 นอกจากค่าความความต้านทานต่อแรงดึง และค่าความสามารถในการยืดจนขาดที่คำนวณได้แล้ว สามารถนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้วย

ตารางที่ 4.10 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

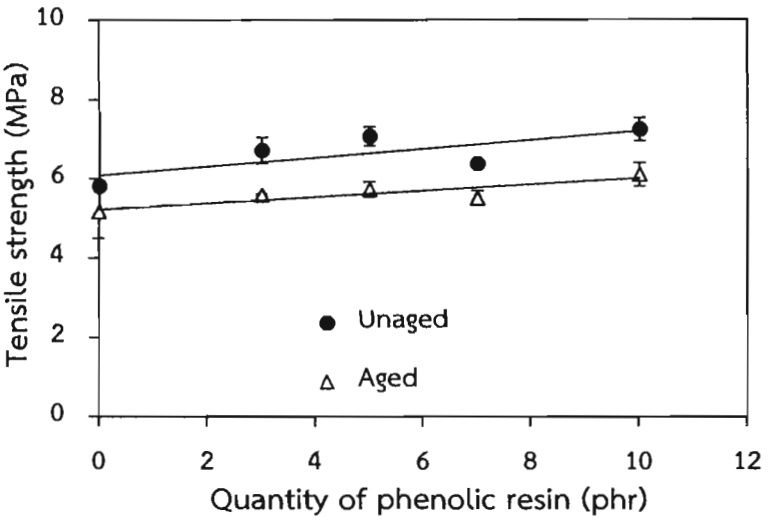
Quantity of phenolic resin	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
0 phr	5.81±0.06	5.16±0.67	-11.19
3 phr	6.71±0.33	5.58±0.03	-16.84
5 phr	7.06±0.24	5.72±0.19	-18.98
7 phr	6.37±0.05	5.50±0.18	-13.66
10 phr	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการยืดจนขาดหลังภายบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

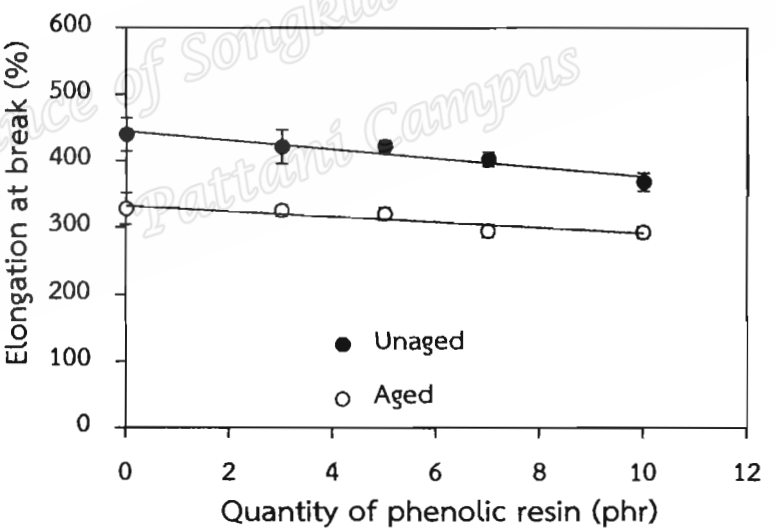
Quantity of phenolic resin	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
0 phr	439±24.64	328±24.08	-25.28
3 phr	421±25.49	325±8.10	-22.80
5 phr	422±8.87	320±9.50	-24.17
7 phr	402±10.79	294±9.42	-26.87
10 phr	368±13.74	292±8.59	-20.65

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 สามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน แสดงดังรูปที่ 4.41 และ 4.42 รวมถึงแสดงกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายหลังบ่มเร่งในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

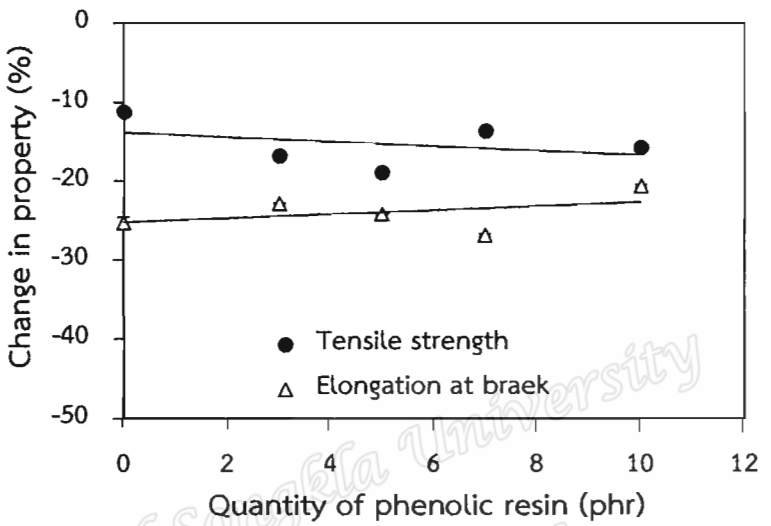


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.42 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.41 และ 4.42 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกปริมาณของฟินอลิกเรซินมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากเฟสยางวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันแบบปกติซึ่งมีพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ที่สามารถเกิดการแตกได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน และเฟสยางเกิดการเสื่อมจากการถูก

ออกซิไดซ์ (พรพรรณ, 2540) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณฟินอลิกเรซินเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง กล่าวคือ ความต้านต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลง

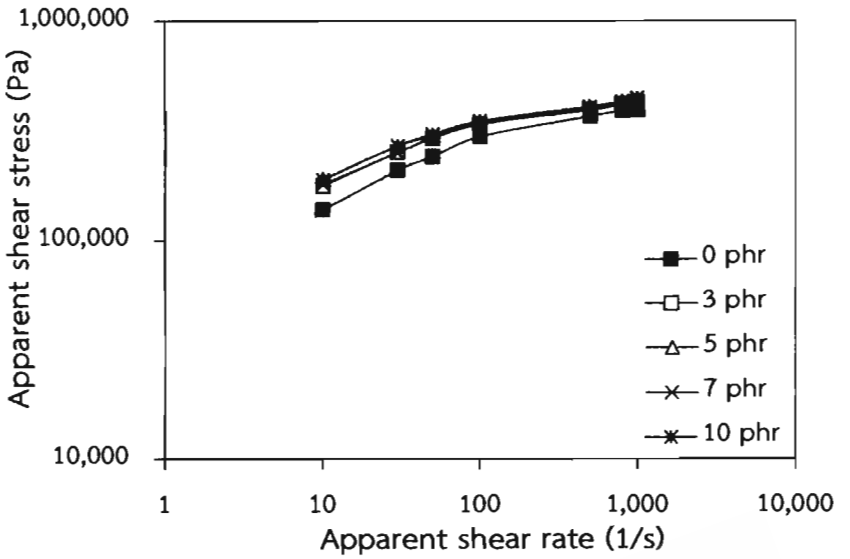


รูปที่ 4.43 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

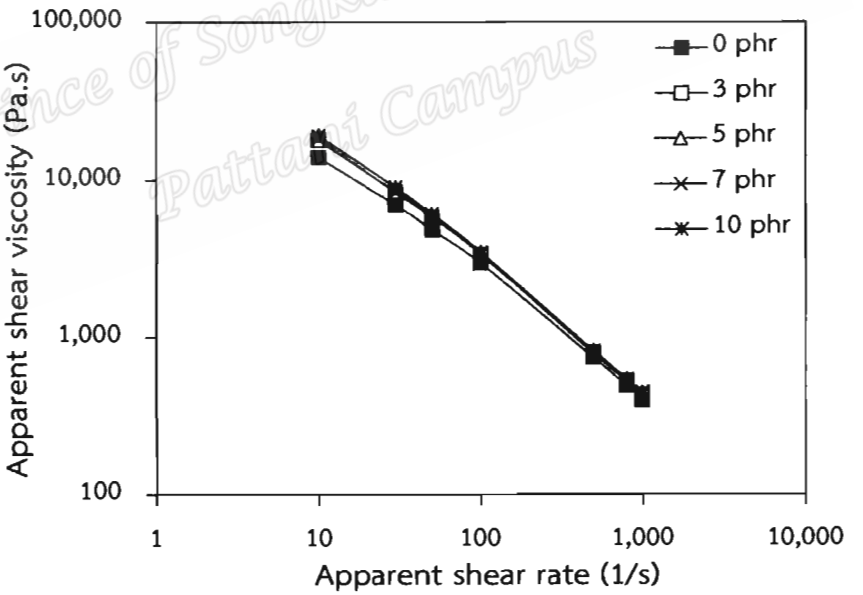
Prince of Songkla University Pattani Campus

4.4.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 เปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ เมื่อแปรฟินอลิกเรซินที่ปริมาณ 0, 3, 5, 7, 10 phr ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 และสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือนปรากฏ 100 1/s กับปริมาณฟินอลิกเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 4.46

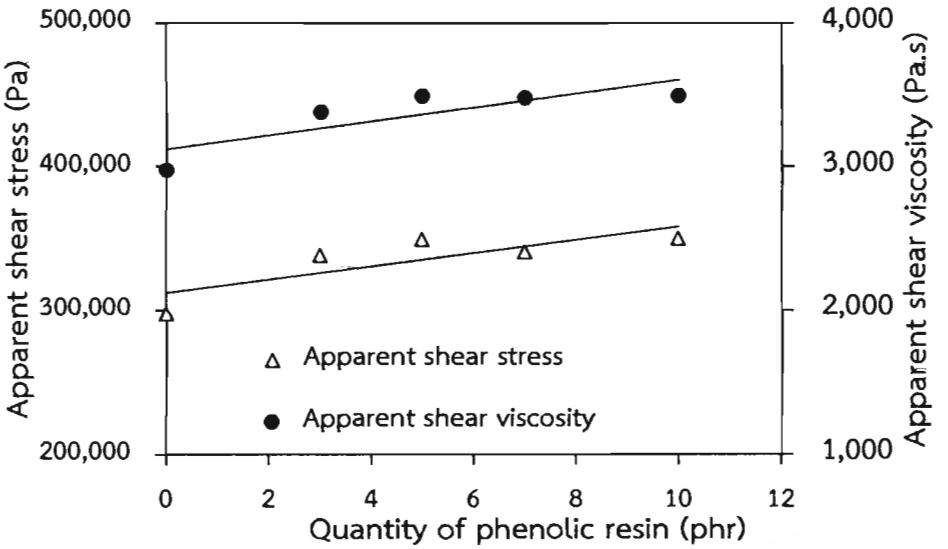


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus

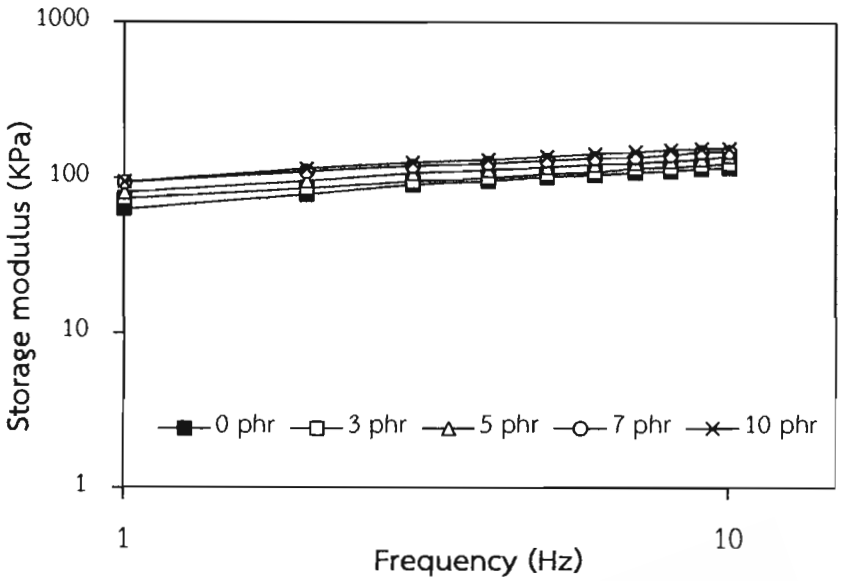


รูปที่ 4.46 ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.44 และ 4.45 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความเค้นเฉือนปรากฏเพิ่มขึ้นตามอัตราเฉือนปรากฏที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกันในรูปที่ 4.46 พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟินอลิกเรซินจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟส โดยสามารถเกิดการเชื่อมประสานภายในเฟสยาง และเฟสยางกับเฟสพลาสติกได้ ตลอดจนฟินอลิกบางส่วนยังไปทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวางในโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสต่างๆ เพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้แรงหรือความเค้นมากขึ้นที่อัตราเฉือนเท่าเดิม เพื่อให้วัสดุเกิดการไหล

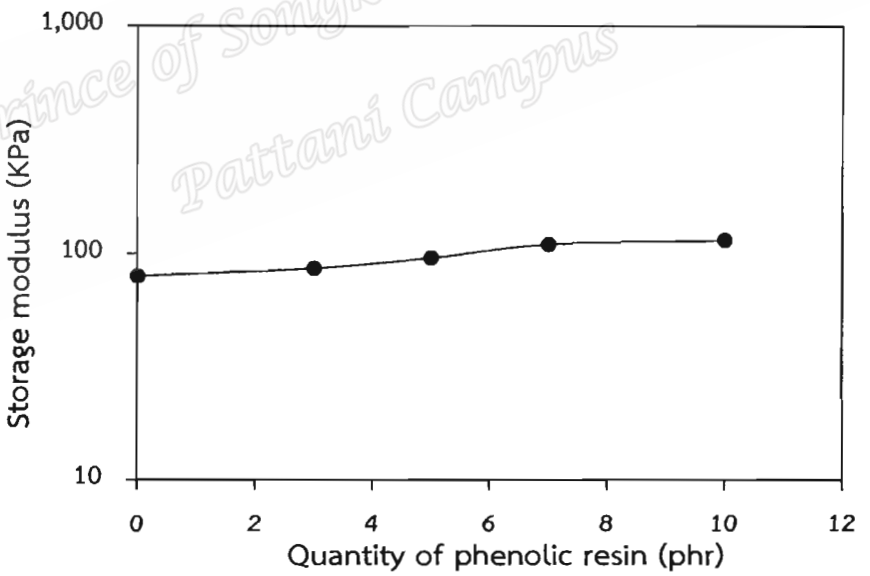
4.4.5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ฟินอลิกเรซินที่ปริมาณแตกต่างกัน ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ tan δ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.47, 4.49 และ 4.50 ตามลำดับ

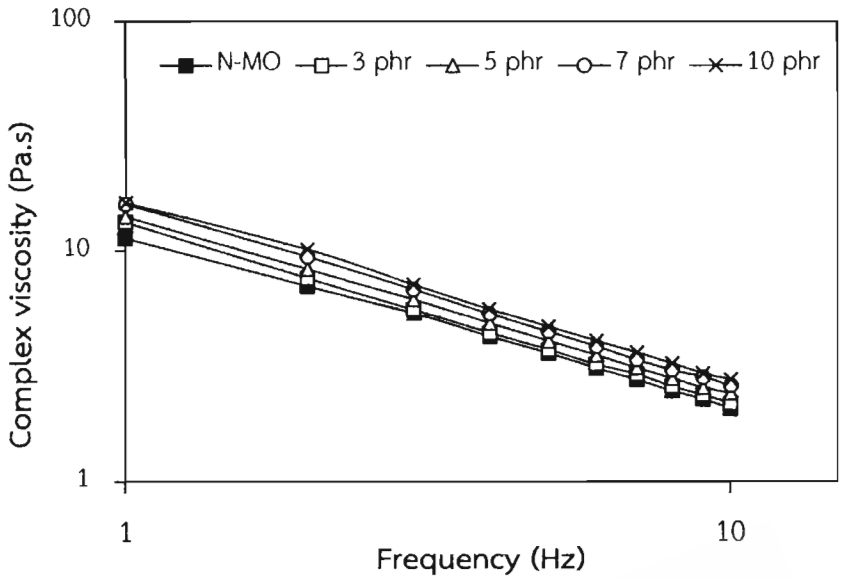


รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

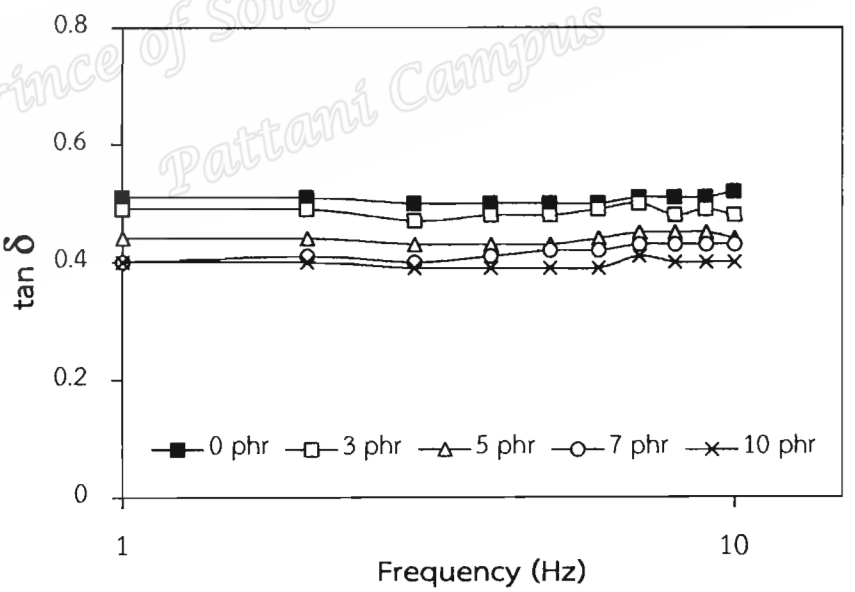
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.48 มอดุลัสสะสมที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

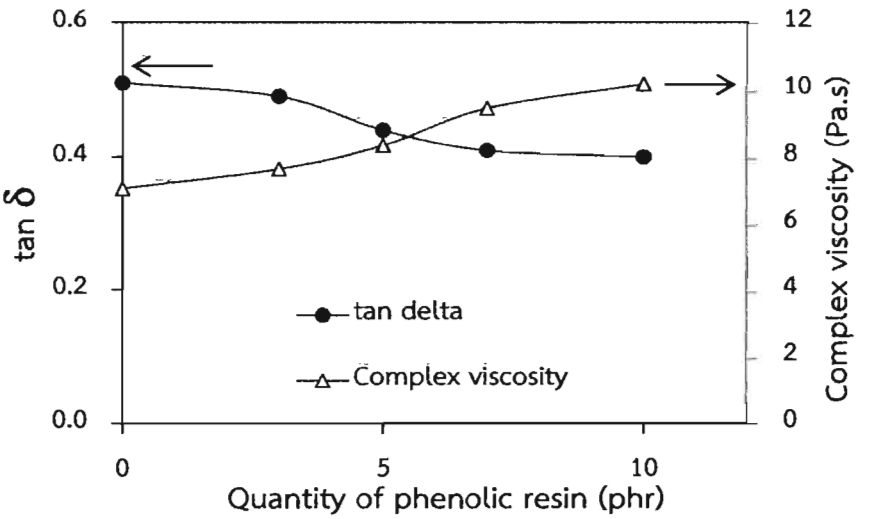


รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน



รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.51 tan δ และ ค่าความหนืดเชิงซ้อน ที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟีนอลิกเรซิน

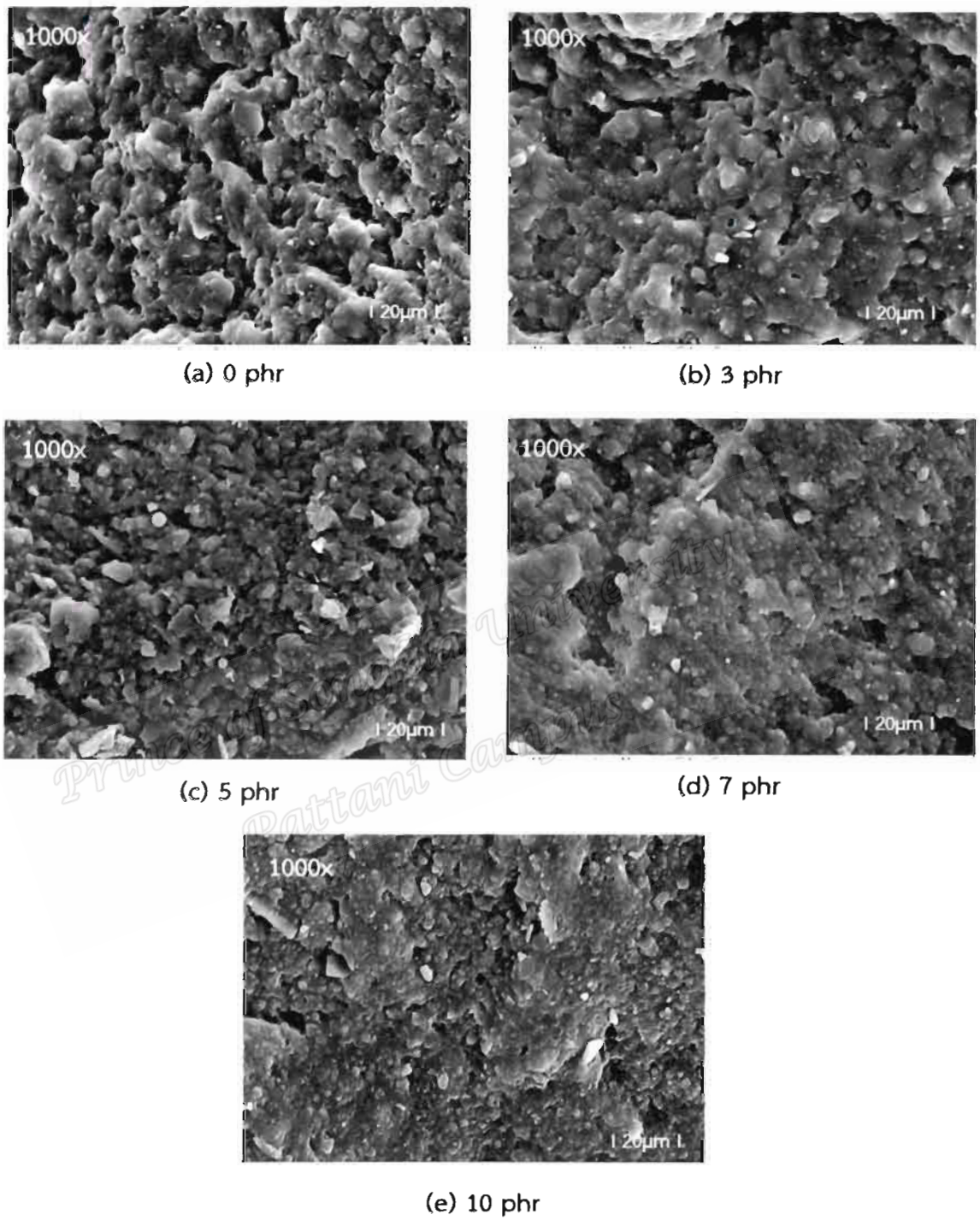
ผลการทดสอบสมบัติเชิงพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ได้ผลดังรูปที่ 4.47-4.51 ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณสารดัดแปรฟีนอลิกเรซินในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงสมบัติเชิงพลวัต โดยมีค่ามอดุลัสสะสม ค่าความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณฟีนอลิกเรซิน ขณะที่ค่า tan δ มีแนวโน้มลดลง ผลการทดลองสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่องคาร์ปิลลารี ในหัวข้อ 4.4.6 ซึ่งอธิบายได้ว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็งตึงในโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นจากผลของการเกิดพันธะเชื่อมขวางด้วยฟีนอลิกเพิ่มเติมมาจากเดิมที่มีเพียงพันธะเชื่อมขวางจากกำมะถัน และการที่ฟีนอลิกเรซินเข้าไปดัดแปรที่ผิวประจัญระหว่างเฟสยางรีเคลมกับยางธรรมชาติ และระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติก ส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวประจัญดีขึ้น ช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของเฟสในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ดังนั้นที่ความถี่ของการทดสอบให้เกิดการผิดรูปเท่ากัน เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ฟีนอลิกในสูตรจะต้านแรงบิดของโรเตอร์และไหลได้ยากขึ้น (Nakason *et al.*, 2006a และ Pichaiyut *et al.*, 2008) จึงปรากฏผลการทดสอบที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัสสะสม ค่าความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณฟีนอลิกเรซิน และเช่นเดียวกันผลของการปรับปรุงเฟสยางและเฟสพลาสติกช่วยให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงสมบัติแบบอิลาสติกดีขึ้น ค่า tan δ มีแนวโน้มลดลง

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.4.6 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรปริมาณสารดัดแปร มาศึกษาสัณฐานวิทยาตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.7 ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.52 ซึ่งจากรูปที่ 4.52 พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ปรากฏอนุภาคของยางวัลคาไนซ์กระจายตัวอยู่ในเฟสของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคยางวัลคาไนซ์พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ฟีนอลิกเรซินจะให้อนุภาคที่เล็กกว่าและมีความขรุขระของผิวหน้าน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้ฟีนอลิกเรซิน (ฟีนอลิกเรซิน 0 phr) โดยขนาดอนุภาคและความขรุขระจะลดน้อยลงตามปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงกลพลวัตก่อนหน้านี้ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณฟีนอลิกเรซินจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น และเฟสยางมีการวัลคาไนซ์สูงขึ้น จึงเกิดความต่างของความหนืดระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติกมากยิ่งขึ้น ทำให้สัณฐานวิทยาเกิดการเฉือนลดขนาดอนุภาคยางได้ดีและมีการกระจายได้ดีกว่าเดิม

Prince of Songkla University Pattani Campus

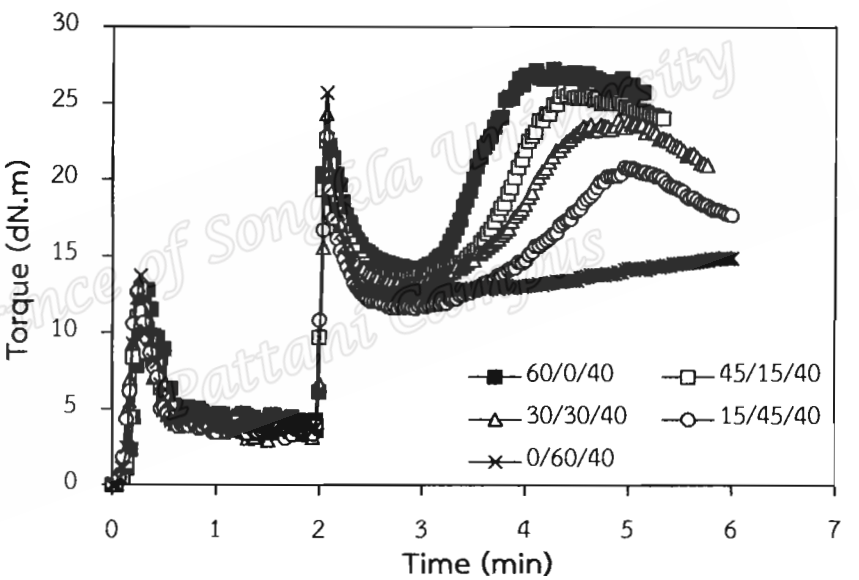


รูปที่ 4.52 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรปริมาณฟินอลิกเรซิน

4.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing method ตามหัวข้อที่ 3.3.3.1 และใช้ปริมาณสารดัดแปรฟีนอลิกเรซินที่ 10 phr โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนักตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.5

4.5.1 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC



รูปที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนระหว่าง NR/RR/PEC

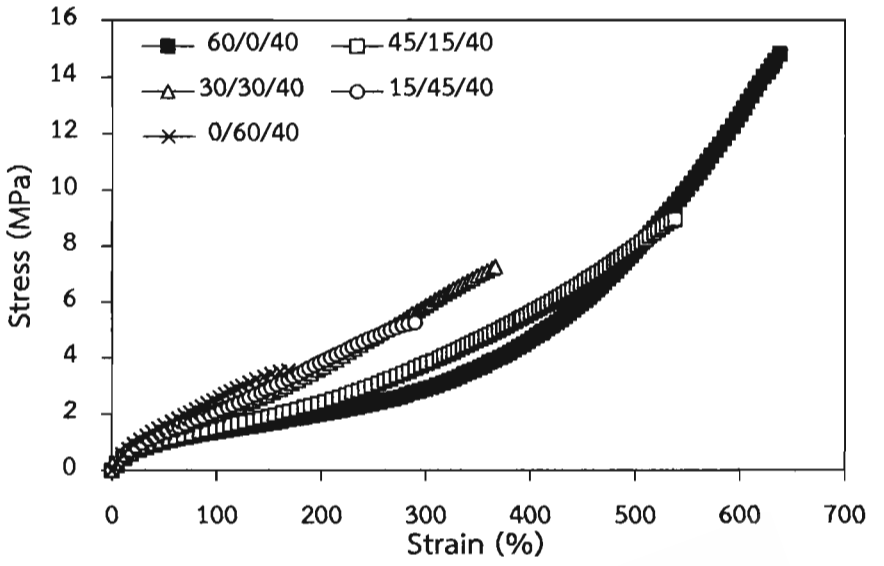
จากรูปที่ 4.53 พบว่าทอร์กการผสมจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในช่วงที่เฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์ที่เวลาประมาณนาทีที่ 3 โดยค่าทอร์กจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเฟสยางเกิดการวัลคาไนซ์จนถึงจุดสูงสุดจากนั้นค่าทอร์กจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเฟสยางวัลคาไนซ์สมบูรณ์ ซึ่งพบว่าเวลาที่เฟสยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์หรือช่วงที่ทอร์กการผสมเพิ่มขึ้นจะเกิดในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะเวลาของการเกิดการวัลคาไนซ์ของเฟสยางไม่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นส่งผลต่อระยะเวลาของการวัลคาไนซ์มากขึ้นด้วย นอกจากนี้ความแตกต่าง

ของทอร์กการผสมจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสูงสุดของการเกิดวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกซ์ลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนเฟสยางเพิ่มมากขึ้นทำให้มีสัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยางลดลง ส่งผลให้พันธะคู่ซึ่งอยู่ในทุกหน่วยซ้ำของไอโซพรีนลดลงตามสัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยาง โดยพันธะคู่ในยางธรรมชาตินั้นเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ดังนั้นการมีสัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยางลดลงทำให้การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ลดลงด้วย ประกอบกับยางรีเคลมเป็นยางที่ผ่านกระบวนการรีเคลมเพื่อให้สามารถนำกลับมาวัลคาไนซ์ใหม่ได้อีกครั้ง แต่จากการวิเคราะห์หาส่วนที่ละลายได้ในยางรีเคลมมีเพียง 24.64% ในขณะที่มีส่วนที่ไม่ละลายถึง 75.36% แสดงให้เห็นว่าในยางรีเคลมมีปริมาณพันธะเชื่อมขวางทางเคมีและพันธะเชื่อมขวางทางกายภาพจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (Bound rubber) เหลืออยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางรีเคลมมากจึงมีแนวโน้มเกิดการวัลคาไนซ์ได้น้อยกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติอยู่สูง

4.5.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์NR/RR/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์เท่ากับ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนักมาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.54

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

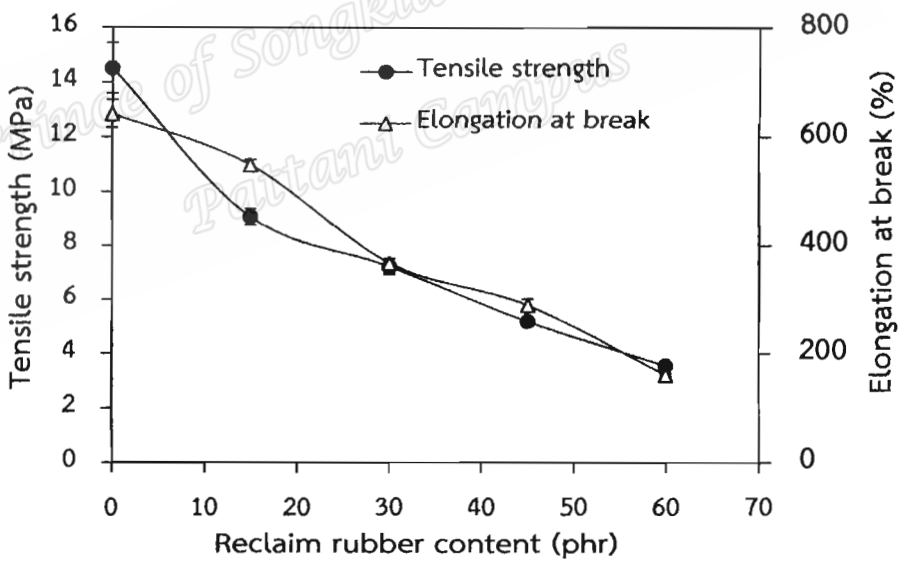
จากรูปที่ 4.54 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางรีเคลมและยางธรรมชาติแตกต่างกันความแข็งตึงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความเหนียวทนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางจากยางรีเคลมหรือส่วนที่ไม่ละลาย (Gel fraction) เพิ่มมากขึ้น สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น (De *et al.*, 2007 และ De *et al.*, 2013) ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีมอดุลัสเพิ่มสูงขึ้นและในขณะเดียวกันระยะยืดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนยางรีเคลมในเฟสยางมากขึ้นส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มสมบัติเชิงกลด้อยลงและจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ แสดงผลดังตารางที่ 4.12 นอกจากนี้ยังแสดงค่าความสามารถในการคืนรูป และความแข็งด้วย

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Blend ratio (NR/RR/PEC)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (Shore A)
60/0/40	14.52±0.92	643±10.91	4.78±0.89	51
45/15/40	9.07±0.31	549±37.63	5.65±0.18	54
30/30/40	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57
15/45/40	5.20±0.07	290±2.62	6.65±0.31	59
0/60/40	3.56±0.03	161±1.89	8.83±0.83	62

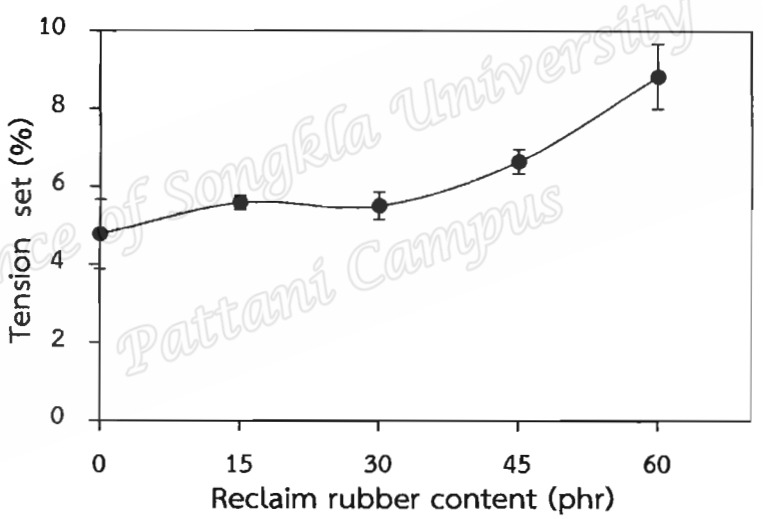
จากตารางที่ 4.12 สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังรูปที่ 4.55-4.57 ตามลำดับ



รูปที่ 4.55 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

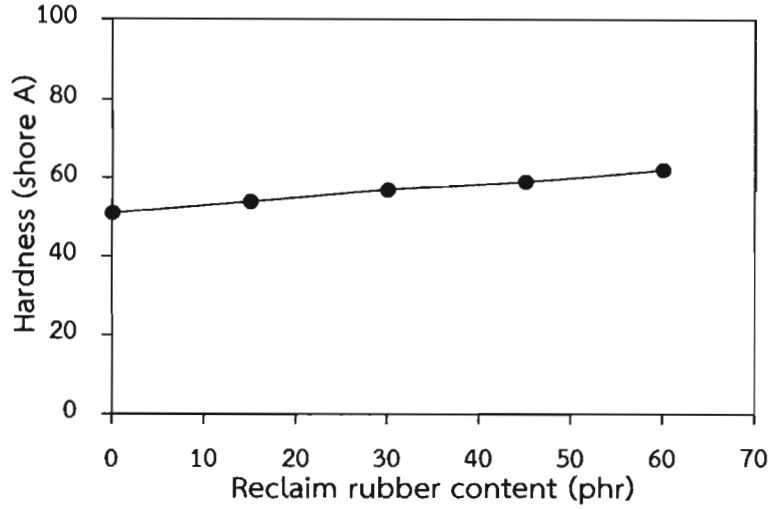
จากที่รูปที่ 4.55 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 60/0/40 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนที่ 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ตามลำดับ เนื่องจาก

เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณยางธรรมชาติในสัดส่วนของเฟสยางมากให้ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดที่ดี เพราะยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อยืด และมีความสามารถในการส่งผ่านแรงเค้นได้ดี ประกอบกับมีความต่อเนื่องของเฟสยางที่ดีในทางกลับกันยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจากผลของกระบวนการเตรียมยางรีเคลม ที่ใช้แรงเฉือนและความร้อนสูงเพื่อทำให้เกิดการแตกออกของพันธะการเชื่อมขวาง ส่งผลให้ยางรีเคลมมีสายโซ่โมเลกุลสั้น (Hassan *et al.*, 2010) นอกจากนี้การมีปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางมากขึ้นส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติลดน้อยลง ส่งผลให้เกิดจุดอ่อนแอขึ้นทำให้การส่งผ่านแรงเค้นเกิดได้ไม่ดี (De *et al.*, 2007 และ Sombatsompop and Kumnuantip, 2003) มีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง



Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.56 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

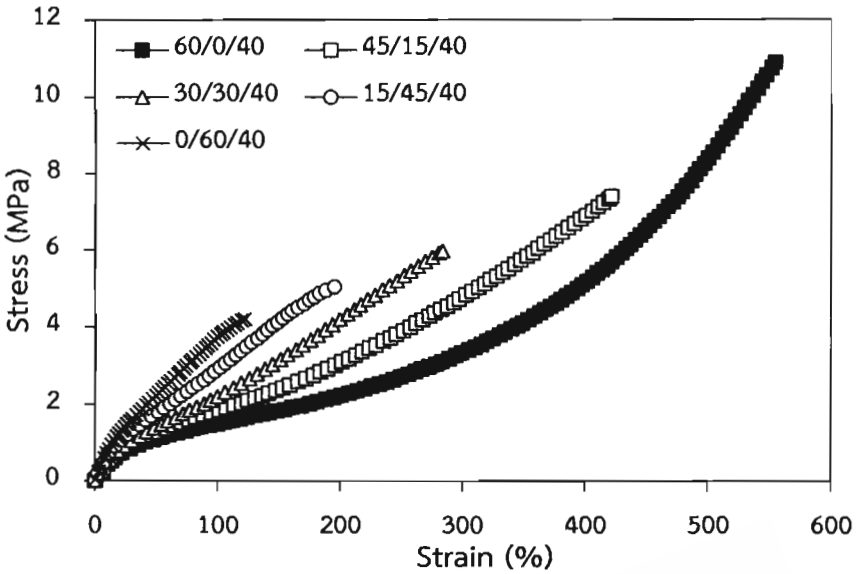


รูปที่ 4.57 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.56 และ 4.57 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการคืนรูปลดลง (Tension set เพิ่มขึ้น) และมีความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของยางธรรมชาติในเฟสยางลดลง ส่งผลให้การวัลคาไนซ์ของเฟสยางเกิดได้น้อยลง ทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางลดลงตามสัดส่วนของยางรีเคลมในเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการมีปริมาณปริมาณพันธะเชื่อมขวางน้อยจะทำให้ยางไหลได้ง่าย อีกทั้งยางรีเคลมมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีสารตัวเติม จึงส่งผลต่อการกลับคืนรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้น้อยลง ส่วนความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น

4.5.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ที่ 60/0/40, 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ส่วนโดยน้ำหนักมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.58 แสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นภายหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์พบว่าพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนและหลังบ่มเร่งไม่แตกต่างกัน กล่าวคือความแข็งตึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางรีเคลมในเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวทนมีค่าลดลงซึ่งเกิดจากการเพิ่มสัดส่วนของยางรีเคลมในองค์ประกอบเบลนด์เป็นการเพิ่มปริมาณส่วนที่ไม่ละลายเพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวไปข้างต้น และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงผลดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 รวมถึงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติแสดงในตารางนี้ด้วย

Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

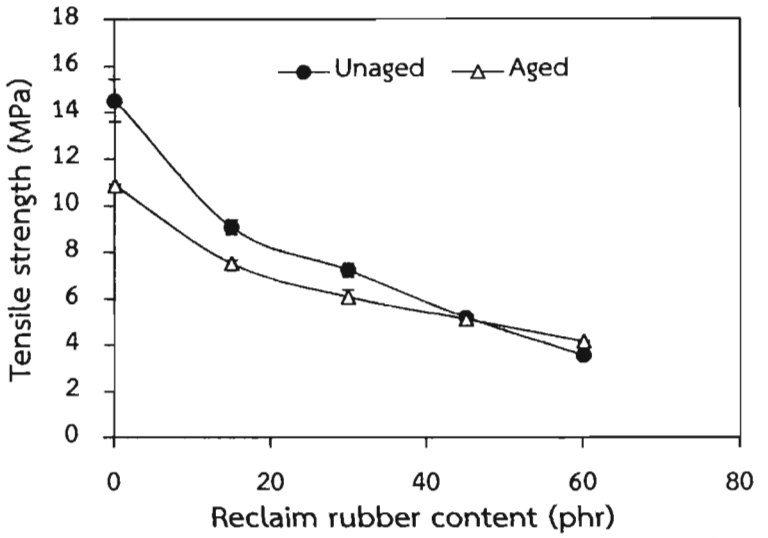
Blend ratio (NR/RR/PEC)	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
60/0/40	14.52±0.92	10.87±0.06	-23.13
45/15/40	9.07±0.31	7.52±0.14	-17.09
30/30/40	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77
15/45/40	5.20±0.07	5.12±0.06	-1.54
0/60/40	3.56±0.03	4.16±0.03	16.85

ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

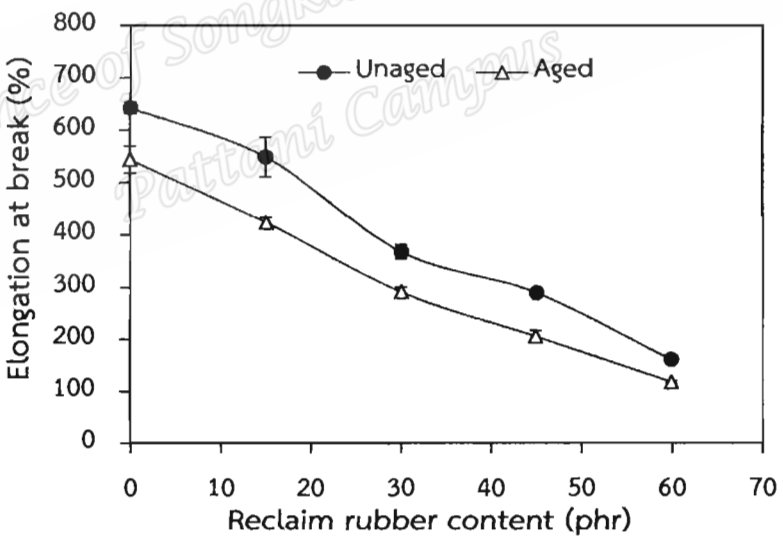
Blend ratio (NR/RR/PEC)	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
60/0/40	643±10.91	544±25.85	-15.66
45/15/40	549±37.63	424±9.61	-22.77
30/30/40	368±13.74	292±8.59	-20.65
15/45/40	290±2.62	206±11.47	-28.97
0/60/40	161±1.89	118±2.75	-26.71

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากตารางที่ 4.13 และ 4.14 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังแสดงในรูปที่ 4.59 และ 4.60 รวมถึงแสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายหลังบ่มเร่งในรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.59 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 4.60 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

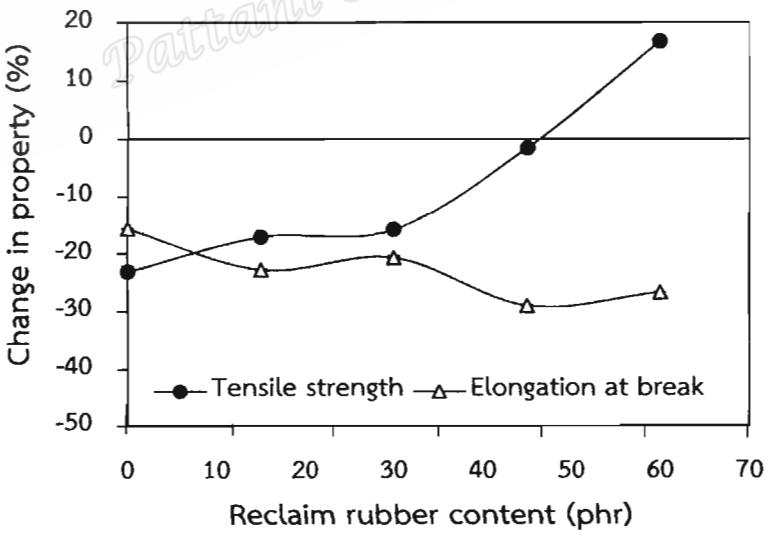
จากรูปที่ 4.59 และ 4.60 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังการบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ให้สมบัติต่ำกว่าก่อนบ่มเร่ง และสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับ

Prince of Songkla University Pattani Campus

พฤติกรรมก่อนการบ่มเร่ง ยกเว้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ 0/60/40 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากยางรีเคลมยังมีส่วนที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางได้อยู่ (Active crosslinking sites) เมื่อได้รับความร้อนจากการบ่มเร่งทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางได้บางส่วน (De *et al.*, 2007 และ Mandal *et al.*, 2014)

รูปที่ 4.61 แสดงข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง (การคงอยู่ของสมบัติภายหลังบ่มเร่งดีขึ้น) ตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น และลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติให้ค่าไปทางบวก ทั้งนี้เกิดจากยางรีเคลมมีความสามารถทนต่อการถูกออกซิไดซ์ได้ดีกว่ายางธรรมชาติ กล่าวคือในกระบวนการทำยางรีเคลมต้องผ่านกระบวนการที่มีความร้อนสูงจึงสามารถเกิดการออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการรีเคลมได้ตลอดเวลา ทำให้ยางรีเคลมเกิดการออกซิเดชันจนมากเกินพอ ส่งผลให้ยางรีเคลมมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่ดี กอปรกับเมื่อมีปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น พันธะคู่ที่ว่องไวทำให้ยางธรรมชาติทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนส่งผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมได้มาก (พรพรรณ, 2540) ขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความสามารถในการยืดจนขาดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทางลบเล็กน้อยเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางมากขึ้น

Prince of Songkla University Pattani Campus

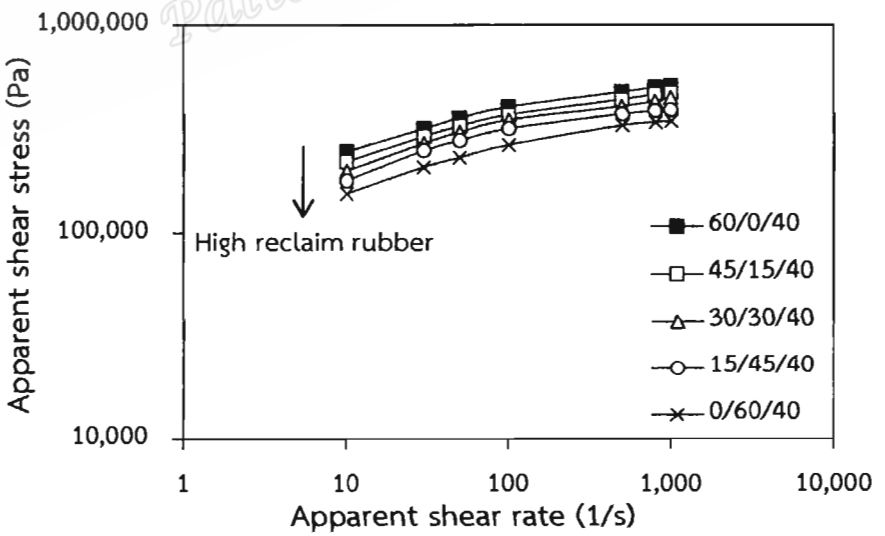


รูปที่ 4.61 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

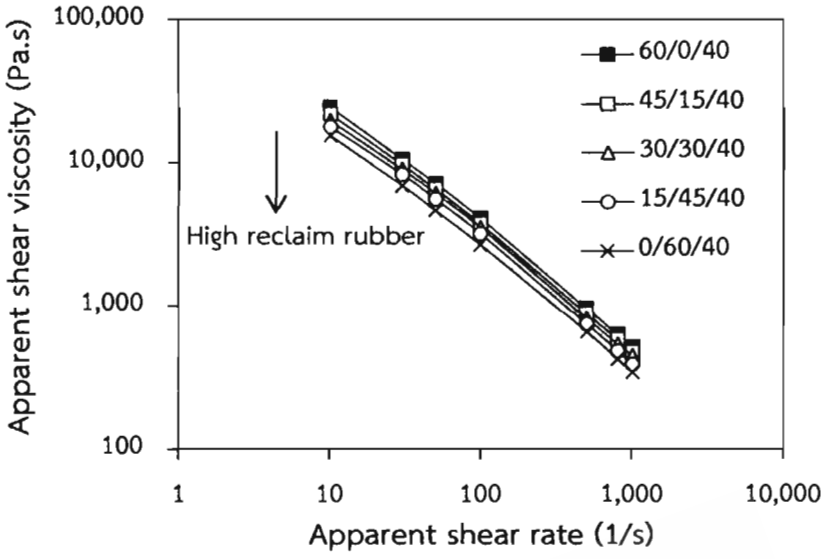
4.5.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 เปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ ได้ผลการทดลองค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏ และอัตราเฉือนปรากฏ รวมถึงความหนืดเฉือนปรากฏและอัตราเฉือนปรากฏดังในรูปที่ 4.62 และ 4.63 พบว่าที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกัน ความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือที่อัตราส่วน 60/0/40 ให้ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือ 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของยางรีเคลมทำให้สัดส่วนของยางธรรมชาติในองค์ประกอบเบลนด์ลดลง ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดการหลอมและไหลได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยางรีเคลมเป็นยางที่เคยผ่านการวัลคาไนซ์มาแล้วและนำมาตัดพันธะเชื่อมขวางแบบสุ่มจึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ในขณะที่ยางธรรมชาตินั้นมีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลมากกว่ายางรีเคลม รวมถึงการที่ยางธรรมชาติสามารถเกิดพันธะเชื่อมขวางได้มากกว่ายางรีเคลม จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติในองค์ประกอบเบลนด์มากต้องใช้แรงเฉือนสูงมากกว่า จึงจะเกิดการไหลได้ที่อัตราเฉือนเดียวกัน

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

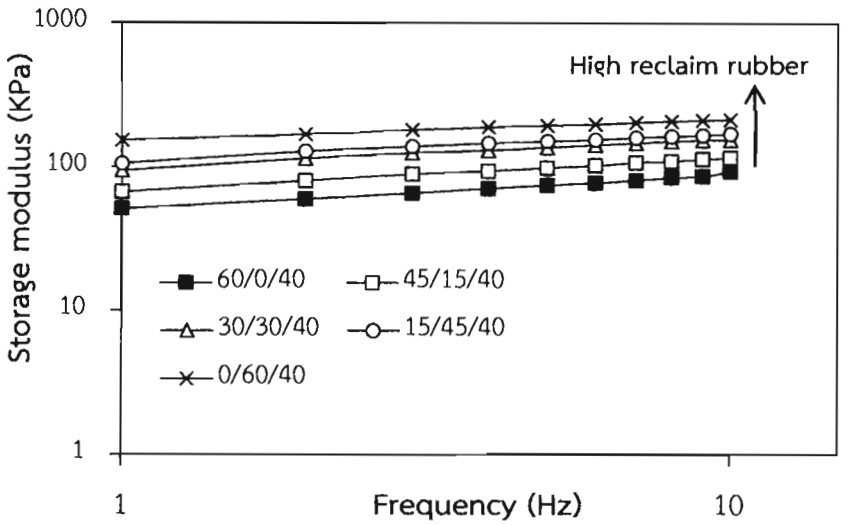


รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.5.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PECโดยแปรอัตราส่วนการเบลนด์ นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน มอดุลัสสูญเสีย และ tan δ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.64, 4.65, 4.67 และ 4.68 ตามลำดับ



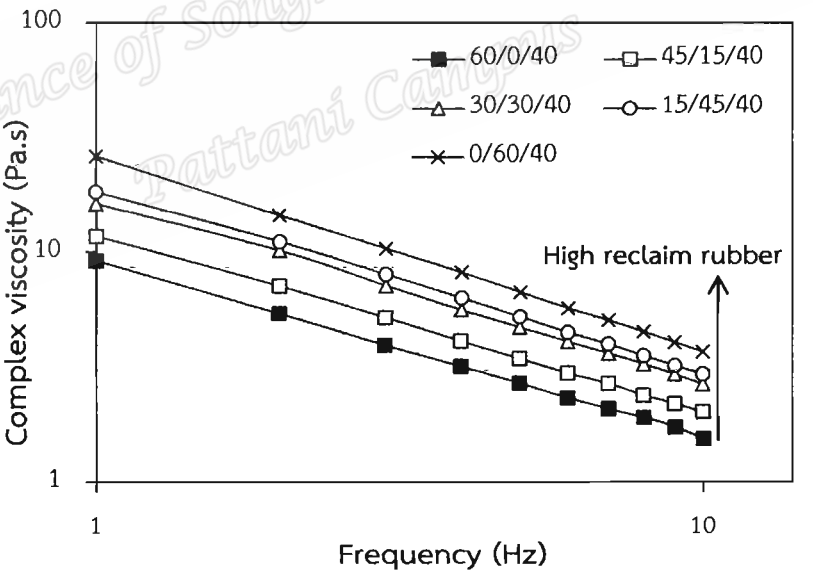
รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

จากรูปที่ 4.64 พบว่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสนใจว่าผลการทดลองนี้สวนทางกับการทดสอบสมบัติการไหลในรูปที่ 4.61 ที่พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏมีค่าลดลงเมื่อเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสัดส่วนของยางรีเคลมมากขึ้น ซึ่งการพบผลการทดลองที่แตกต่างกันนี้เกิดขึ้นในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีอัตราส่วนการเบลนด์แตกต่างกัน (หัวข้อวิจัยก่อนหน้านี้ กำหนดอัตราส่วนการเบลนด์คงที่) อาจเป็นผลมาจากรูปแบบการทดสอบของทั้ง 2 เทคนิคที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบด้วยเครื่องคาร์ปิลลารีรีโอมิเตอร์ทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการเลื่อนไถลระหว่างโมเลกุลสูง เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงแสดงสมบัติที่เป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลของแต่ละองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วนยางรีเคลมในองค์ประกอบที่เป็นยางมาก น้ำหนักโมเลกุลของยางรีเคลมต่ำทำให้การเลื่อนไถลของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ง่ายขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการใช้ยางรีเคลมเป็นสารช่วยในการปรับปรุงการแปรรูปของยาง (Shi *et al.*, 2014) จึงพบว่าความเค้นเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมที่มากขึ้นในสัดส่วนของเฟสยาง ในทางกลับกันการทดสอบด้วยเครื่อง MDPT ใช้อัตราเฉือนต่ำ (ความถี่ต่ำ ในการทดลองอยู่ระหว่าง 1-10 Hz) ซึ่งเป็นความถี่ที่วัสดุเกิดการผิดรูปน้อย การผิดรูปส่วนใหญ่ยังเป็นการผิดรูปแบบอิลาสติกจึงเป็นไปได้ว่าการตอบสนองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อได้รับความเค้น (แรงบิด) ยังไม่ปรากฏชัดเจนจากผลการเลื่อนไถลของโมเลกุล แต่เป็นผลมาจากการตอบสนองของสารตัวเติมที่มีอยู่ในยางรีเคลมแทน โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ยางรีเคลมในสัดส่วนการเบลนด์ขององค์ประกอบยางมาก จะมีสารตัวเติมเขม่าดำมากด้วย ที่การทดสอบแบบใช้การผิดรูปต่ำๆ สารตัวเติมเขม่าดำจะแสดงผลการ

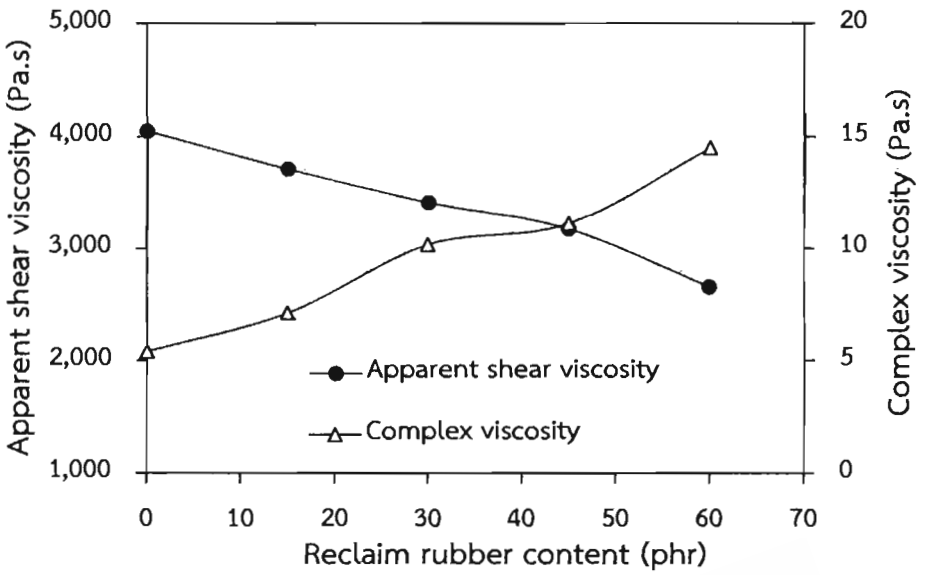
เสริมแรงต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแทน (Sombatsonpop and Kumnuantip, 2003) ส่งผลให้พบว่าค่ามอดุลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลม

จากรูปที่ 4.65 พบว่าความหนืดเชิงซ้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับความหนืดเฉือนปรากฏในการทดสอบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.63 เช่นเดียวกัน และเมื่อเขียนกราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือนปรากฏคงที่ค่าหนึ่ง และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่คงที่ค่าหนึ่ง เป็นฟังก์ชันกับอัตราส่วนการเบลนด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.66 พบว่าให้ผลการทดลองที่ตรงกันข้ามกันอย่างเห็นได้ชัด การลดลงของความหนืดเฉือนปรากฏเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนการเบลนด์เพิ่มมากขึ้น เกิดจากน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำของยางรีเคลม รวมถึงปริมาณพันธะเชื่อมขวางของเฟสยางมีน้อยดังที่กล่าวไปข้างต้น ในขณะที่ความหนืดเชิงซ้อนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมนั้นอาจจะแสดงผลของสารตัวเติมเขม่าดำซึ่งเป็นองค์ประกอบในยางรีเคลม โดยเมื่อมียางรีเคลมในปริมาณที่มากขึ้นทำให้มีปริมาณของเขม่าดำเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เขม่าดำไปขัดขวางการไหลของสายโซ่พอลิเมอร์ (Sombatsompop and Kumnuantip, 2003)

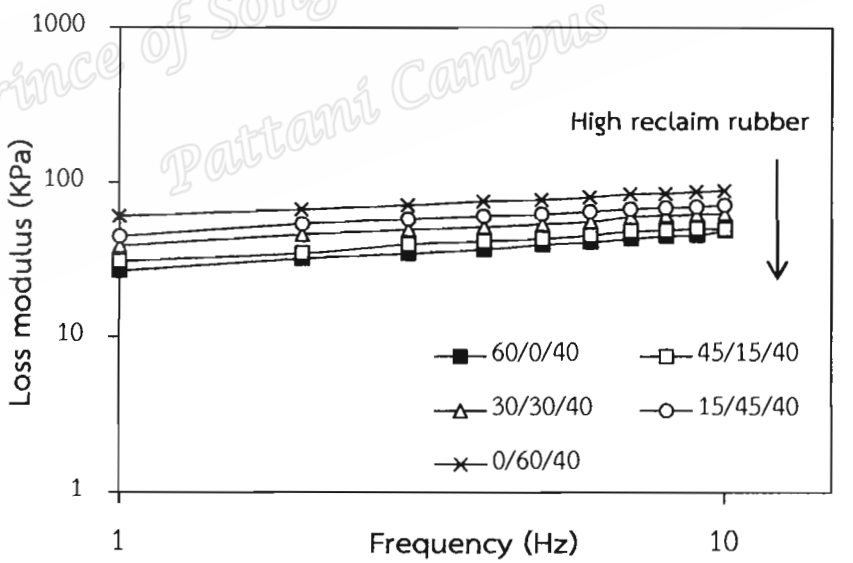
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

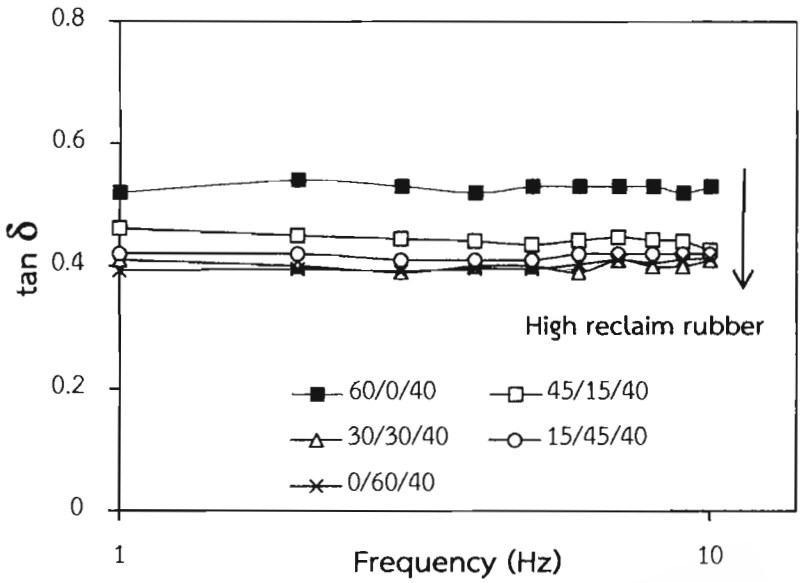


รูปที่ 4.66 ความเค้นเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์



รูปที่ 4.67 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสูญเสียกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.68 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

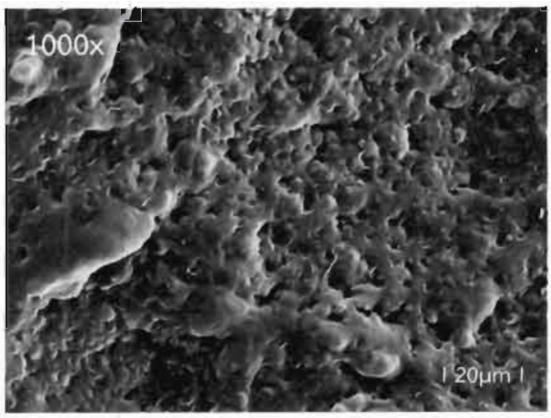
จากรูปที่ 4.67 พบว่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียกับความถี่ ซึ่งค่ามอดุลัสสูญเสียแสดงสมบัติการเป็นของไหลหนืด (Viscous liquid) คือเมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดการผิดรูปโดยไม่กลับคืนรูปเดิม เกิดการสูญเสียพลังงานไปอยู่ในรูปความร้อนสะสมของวัสดุสูง พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัสสูญเสียเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางรีเคลมมีสารตัวเติมเขม่าดำอยู่ ทำหน้าที่เสริมแรงในโมเลกุลยางส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการคืนรูปกลับได้น้อย แต่เมื่อพิจารณาค่าแทนเจนต์สูญเสีย (tan δ) แสดงในรูปที่ 4.68 จะเห็นว่าที่ความถี่เดียวกันค่า tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์กลับมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงวัสดุมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อความยืดหยุ่น (Elastic response) สูงกว่าการตอบสนองต่อการไหลหนืด (Viscous response) คือมีความหน่วง (Damping) ในพอลิเมอร์ต่ำ ซึ่งผลการทดลองนี้สวนทางกับค่ามอดุลัสสูญเสียที่เพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการถ่วงกันระหว่างการเสริมแรงของเขม่าดำกับน้ำหนักโมเลกุลของยางรีเคลม

Prince of Songkla University Pattani Campus

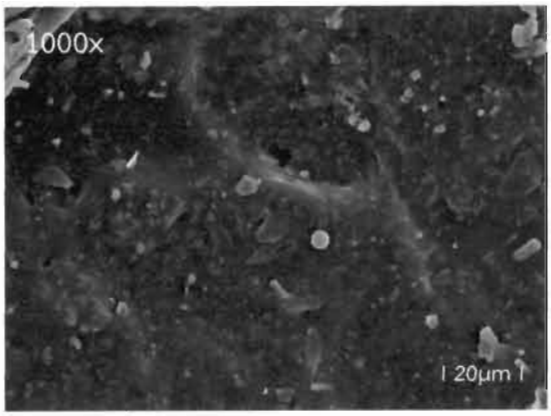
4.5.6 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่แปรอัตราส่วนการเบลนด์มาศึกษาสัณฐานวิทยา ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.69 พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนการเบลนด์ที่ต่างกันจะให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ที่อัตราส่วนเบลนด์ 60/0/40 ลักษณะสัณฐานวิทยามีความสม่ำเสมอมากที่สุดและเมื่อปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคยางมีขนาดเล็กลง แต่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) มากขึ้น ทำให้เกิดเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณยางรีเคลม ส่งผลให้เกิดความขรุขระและความไม่เข้ากันระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นจุดอ่อนแอระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้มีสมบัติเชิงกลด้อยลง

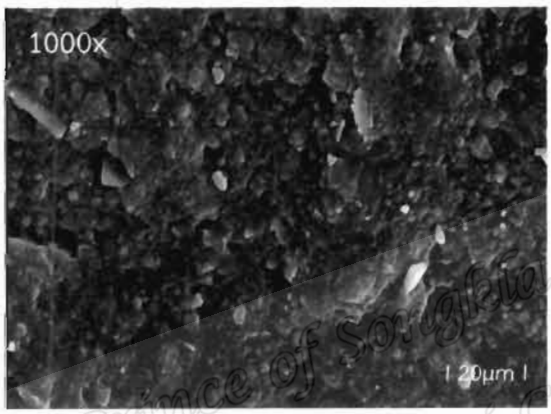
Prince of Songkla University
Pattani Campus



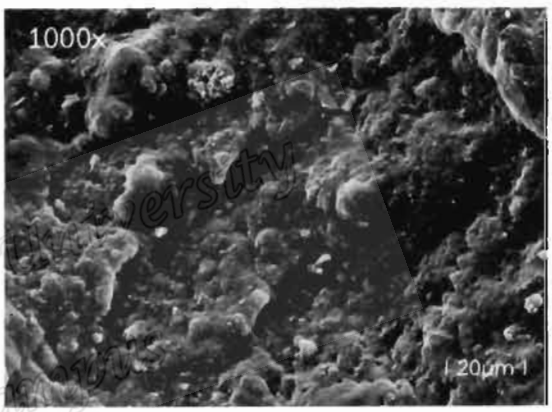
(a) 60/0/40



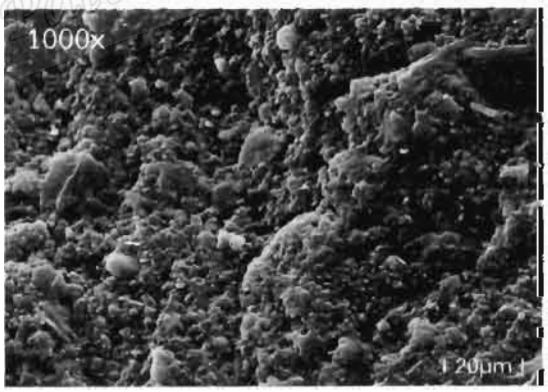
(b) 45/15/40



(c) 30/30/40



(d) 30/30/40



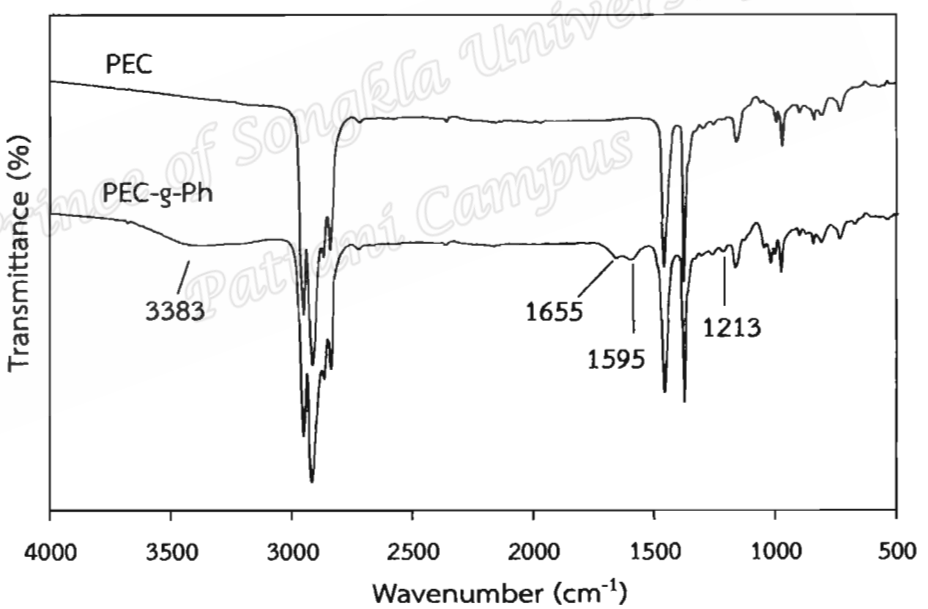
(e) 0/60/40

รูปที่ 4.69 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์

4.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซิน (Propylene-ethylene copolymer grafted phenolic resin, PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

4.6.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

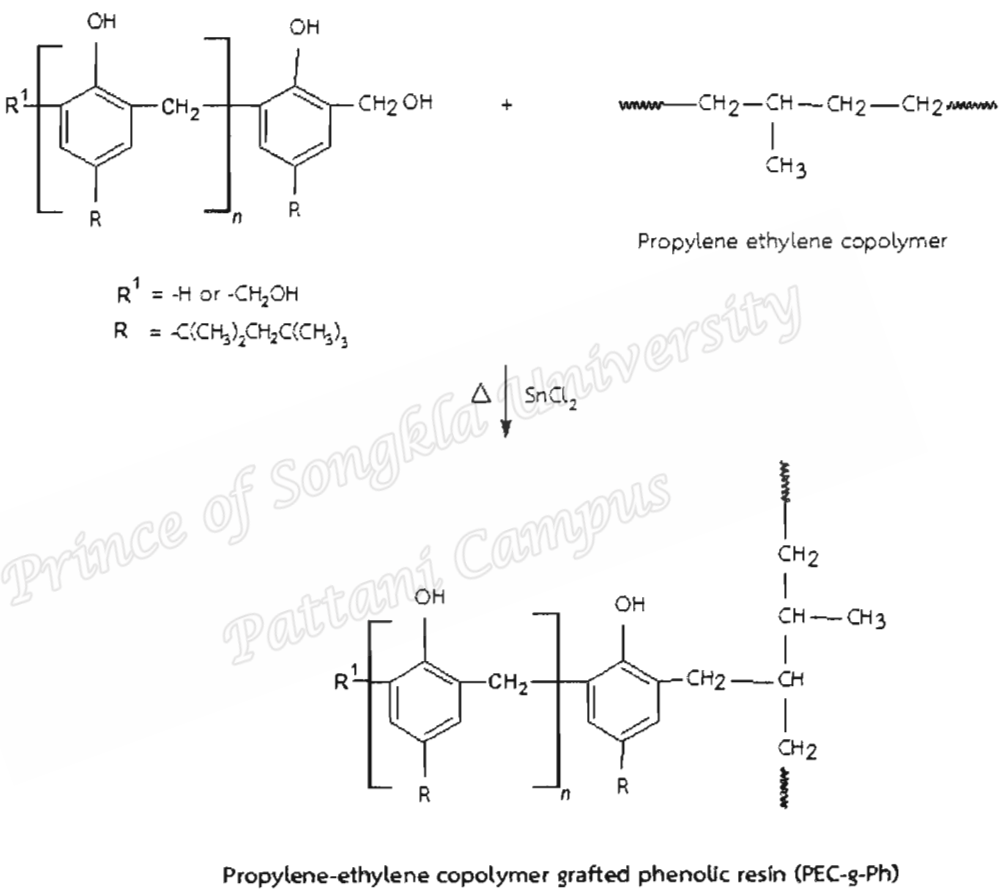
ดัดแปรโมเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยฟินอลิกเรซินชนิด HRJ-10518 ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.6 โดยทำปฏิกิริยาในสภาวะหลอม จากนั้นนำไปวิเคราะห์การเกาะติดของฟินอลิกเรซินบนโมเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง FTIR แสดงดังรูปที่ 4.70



รูปที่ 4.70 สเปคตรัม FTIR ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซินเปรียบเทียบกับสเปคตรัมของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

จากรูปที่ 4.70 แสดงสเปคตรัม FTIR ของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ กับฟินอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) เปรียบเทียบกับสเปคตรัมของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (PEC) จะเห็นว่าสเปคตรัมของสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3383 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืดของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ฟีนอล (Hydrogen bonding of phenol) และพบพีคที่ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1597 cm^{-1} และ 1656 cm^{-1}

แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ -C=C ในวงแหวนอโรมาติก (-C=C stretching of aromatic rings of phenol) รวมถึงจะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1213 cm^{-1} จากการสั่นแบบยืดของพันธะ –C-O (-C-O stretching of aromatic rings of phenol) (Nakason *et al.*, 2006b และ Wongthong *et al.*, 2015) โดยพีคที่ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆ ที่กล่าวมาแสดงถึงการมีฟินอลิกเรซินที่กราฟต์บนโลเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟินอลิกเรซินกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 4.71

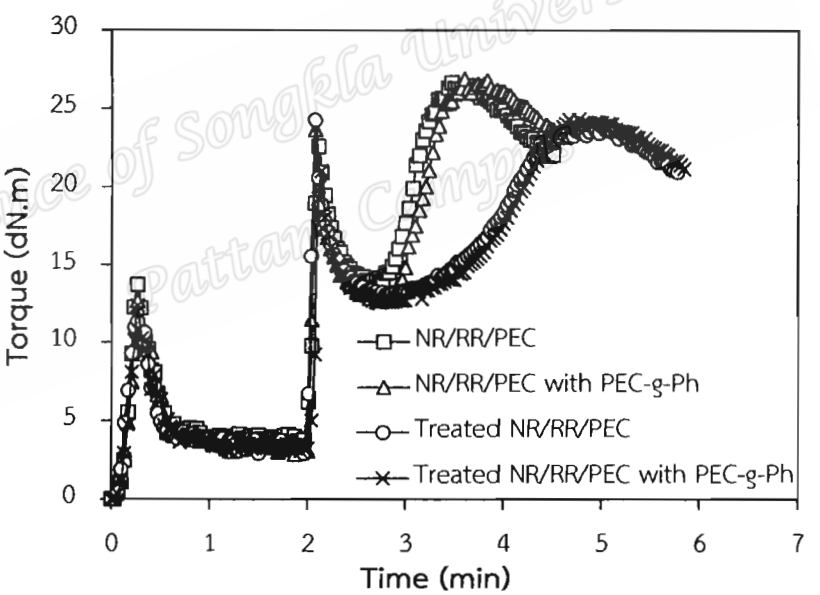


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.71 ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ระหว่างฟินอลิกเรซินกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (ดัดแปลงจาก Nakason *et al.*, 2006b)

4.6.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing method ทำการศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซิน (เติมโดยตรง) ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กการผสมกับเวลาการผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.72 โดยกำหนดให้ NR/RR/PEC แทนสูตรควบคุม (Control) ที่ไม่ใช้สารดัดแปรและสารเพิ่มความเข้ากันได้ Treated NR/RR/PEC แทนสูตรที่ใช้สารดัดแปร NR/RR/PEC with PEC-g-Ph แทนสูตรที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph แทนสูตรที่มีการใช้สารดัดแปรและการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ร่วมกัน



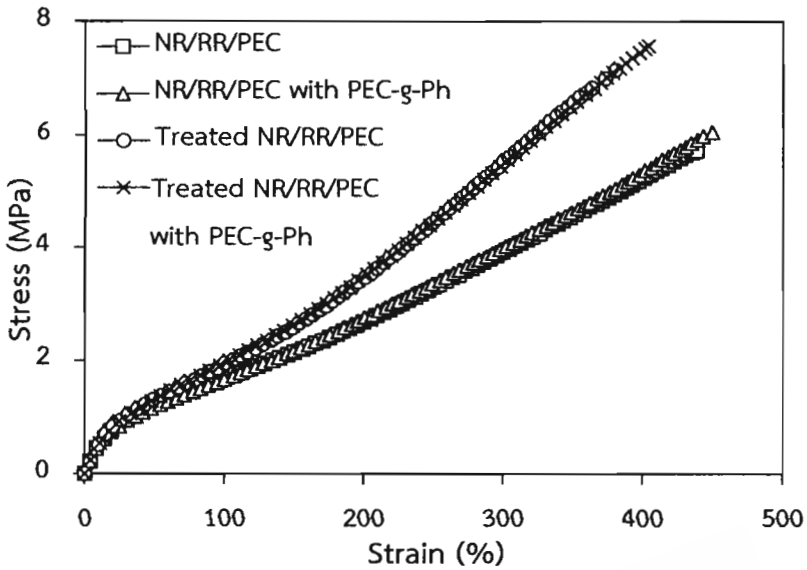
รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.72 พบว่าค่าทอร์กการผสมในสูตร NR/RR/PEC และ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ซึ่งไม่ใส่สารดัดแปรฟินอลิกเรซินให้ลักษณะทอร์กการผสมที่เหมือนกันในขณะที่ในสูตร Treated NR/RR/PEC และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้เป็นสารดัดแปรฟินอลิกเรซินจะให้ลักษณะของทอร์กการผสมเหมือนกัน โดยเมื่อเปรียบเทียบทอร์กการผสมในกรณี

ของการใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน (Untreated and treated) พบว่าทอร์กการผสมจะให้ลักษณะเช่นเดียวกับการศึกษาอิทธิพลวิธีการผสมสารดัดแปร และการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ กล่าวคือเมื่อใช้สารดัดแปรทำให้ทอร์กการผสมในช่วงของการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์มีระยะเวลาในการเกิดการวัลคาไนซ์ที่นานกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร เนื่องจากการใช้ฟินอลิกเรซินเป็นสารดัดแปรร่วมกับวิธีการเตรียมแบบ Melt mixing method จะผสมฟินอลิกเรซินกับยางรีเคลมในขั้นตอนแรกก่อนนำไปเตรียมเป็นยางพาวนด์และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ในลำดับสุดท้าย ทำให้ฟินอลิกเรซินผสมอยู่ในคอมพาวนด์ทำให้ระบบเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงซึ่งได้อธิบายไปแล้วในรูปที่ 4.15 ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของทอร์กการผสมเมื่อใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph กับพบว่ามีลักษณะของทอร์กการผสมที่ไม่แตกต่างกัน

4.6.3 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph มาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.73 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตรที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน (Treated NR/RR/PEC และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) มีความแข็งตึงสูงกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน (NR/RR/PEC และ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตรที่ใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเส้นกราฟให้ลักษณะที่ซ้อนทับกันไม่สามารถเห็นผลการทดลองที่ชัดเจน นอกจากนี้จุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์แสดงผลดังตารางที่ 4.15 รวมถึงแสดงค่าความสามารถในการคืนรูปและความแข็ง

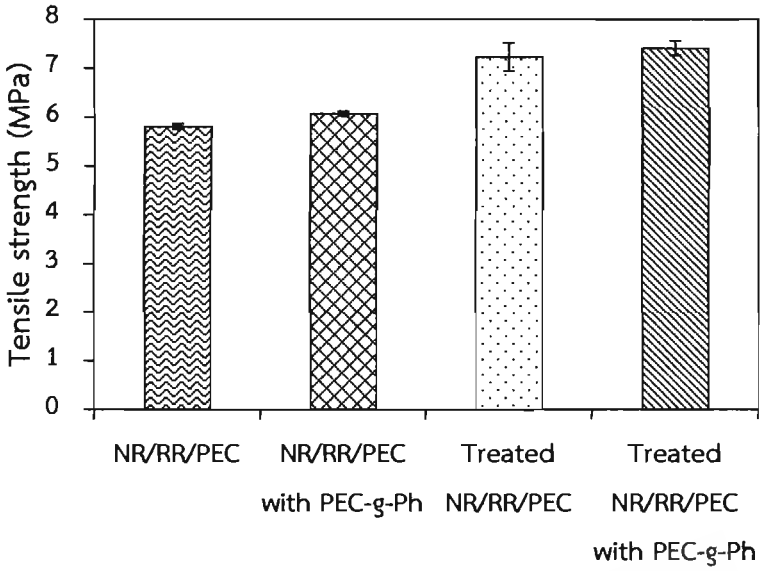


รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

ตารางที่ 4.15 สมบัติเชิงกลของของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

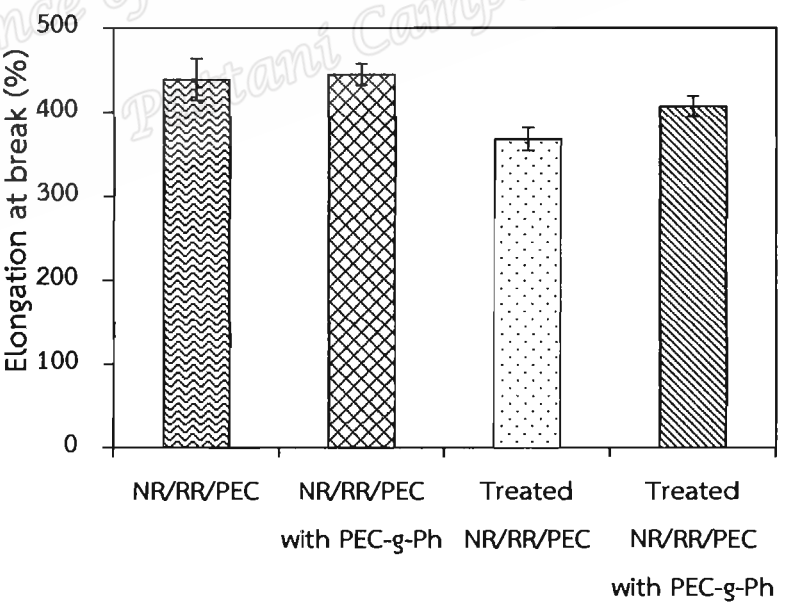
Blend	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (shore A)
NR/RR/PEC	5.81±0.06	439±24.64	6.28±0.21	52
NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	6.07±0.05	445±12.64	6.25±0.20	54
Treated NR/RR/PEC	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57
Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	7.41±0.15	407±12.36	5.55±0.05	58

จากตารางที่ 4.15 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็ง เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินดังรูปที่ 4.74, 4.75, 4.77 และ 4.78 ตามลำดับ



รูปที่ 4.74 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

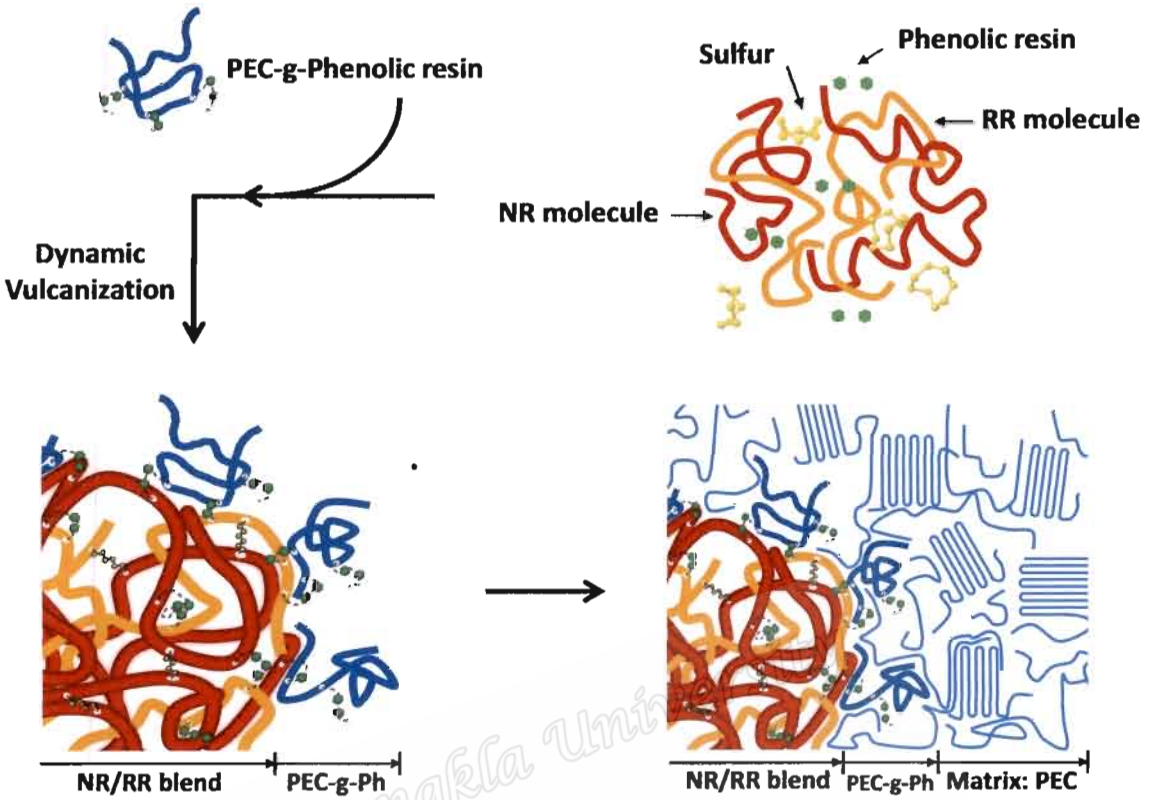
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.75 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

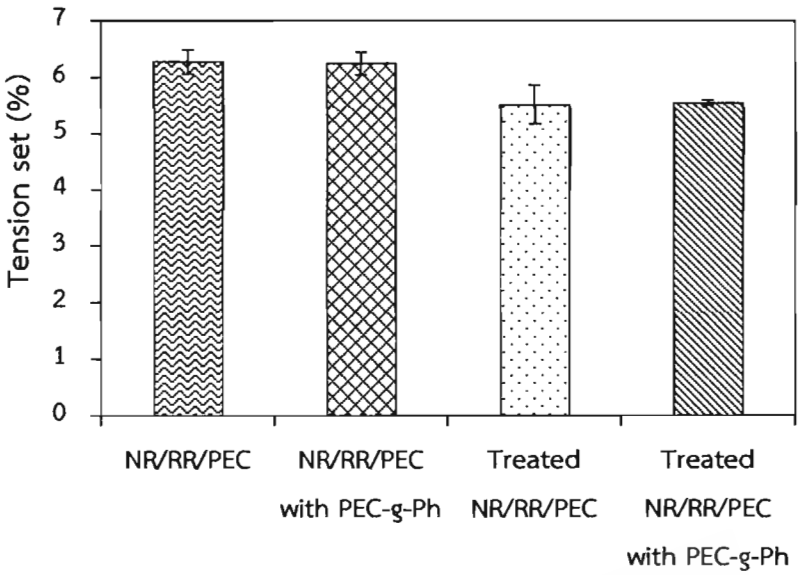
จากรูปที่ 4.74 และ 4.75 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารดัดแปร พบว่าการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดลดลง เนื่องจากการใช้ฟินอลิกเรซินเป็นสารดัดแปรจะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติได้ ซึ่งเกิดจากการที่หมู่เมทิลลอลในฟินอลิกเรซินเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Nakason *et al.*, 2006b) ทำให้ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PECwith PEC-g-Ph) ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุด เนื่องจากผลของการใช้ฟินอลิกเรซินเป็นสารดัดแปรมีความสามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางรีเคลมและยางธรรมชาติ และเมื่อใช้ร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางกับเฟสพลาสติก เนื่องจาก PEC-g-Ph เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีโครงสร้างส่วนหนึ่งเป็นโมเลกุลของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ทำให้สามารถเบลนด์เข้าโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ได้ดี แสดงลักษณะการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินร่วมสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph ดังรูปที่ 4.76 โดยที่สารเพิ่มความเข้ากันได้จะเข้าไปเป็นตัวประสานที่ผิวประจัญ (Interface) ของทั้งสองเฟสซึ่งส่งผลต่อการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางและเฟสพลาสติกทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ดี และมีโอกาสทำให้เฟสยางเกิดการกระจายอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

Prince of Songkla University Pattani Campus



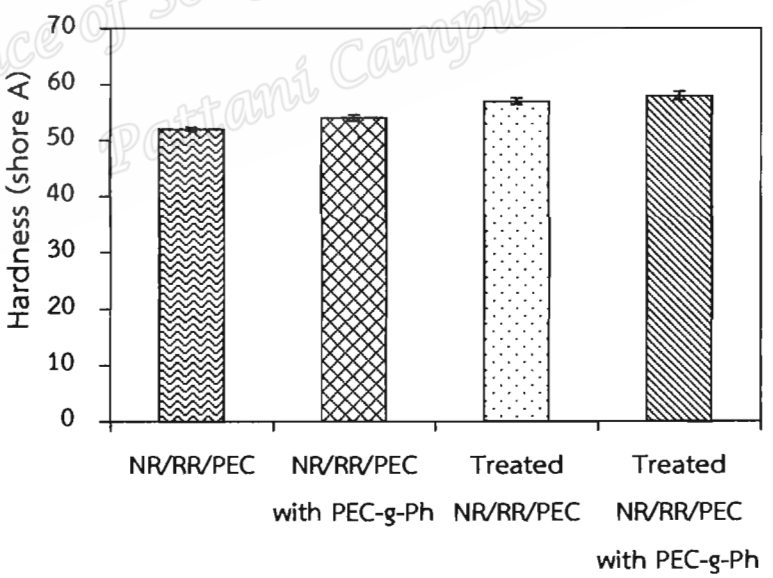
Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.76 การเกิดปฏิกิริยาที่เป็นไปได้เมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph



รูปที่ 4.77 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus

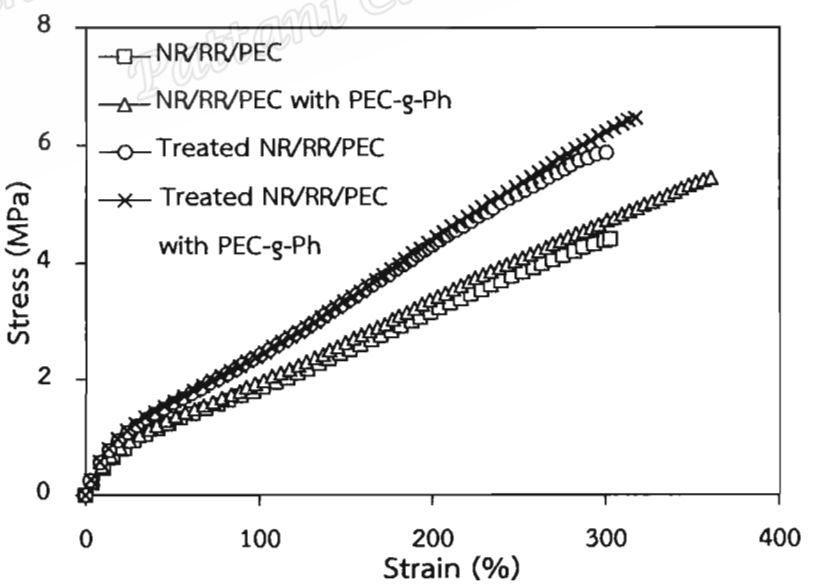


รูปที่ 4.78 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.77 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการคืนรูปเพิ่มขึ้น (Tension set ลดลง) เมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน ซึ่งเกิดจากการที่ฟีนอลิกเรซินเข้าไปช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางดังที่กล่าวไว้ข้างต้น และเมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเทอรโมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าความสามารถในคืนรูปไม่แตกต่างกัน ผลการวัดความแข็งแสดงในรูปที่ 4.78 พบว่าให้ผลเช่นเดียวกันกับค่าความสามารถในการคืนรูป กล่าวคือความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีความแข็งไม่แตกต่างกันเมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph

4.6.4 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph มาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.79



รูปที่ 4.79 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.79 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์หลังจากนำไปบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมงแสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นไม่ได้แตกต่างจากเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนบ่มเร่ง กล่าวคือเมื่อพิจารณามอดุลัสที่ระยะยืดเดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินจะให้มอดุลัสสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัสไม่แตกต่างกัน แต่พบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความสามารถในการยืดจนขาดและความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้เล็กน้อย และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ แสดงดังตารางที่ 4.16 และ 4.17 รวมถึงแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายหลังบ่มเร่งด้วย

ตารางที่ 4.16 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

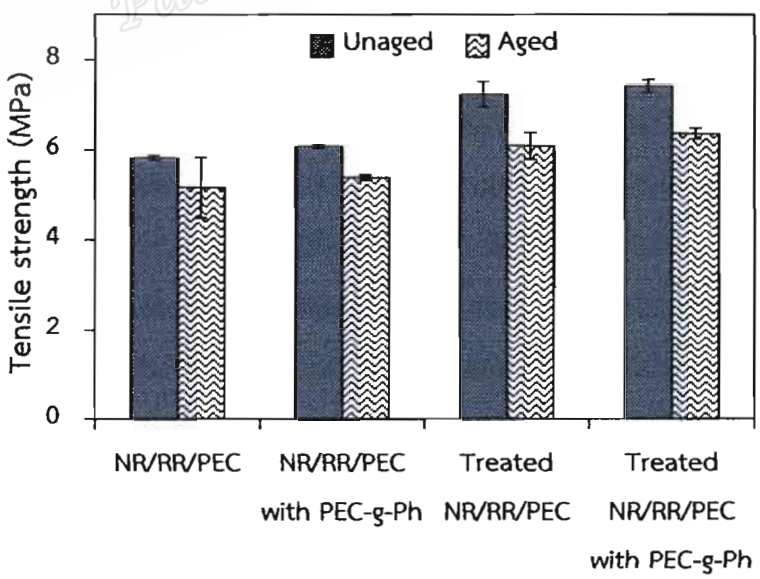
Blend	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
NR/RR/PEC	5.81±0.06	5.16±0.67	-11.19
NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	6.07±0.05	5.38±0.06	-11.37
Treated NR/RR/PEC	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77
Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	7.41±0.15	6.36±0.12	-14.17

Prince of Songkla University Pattani Campus

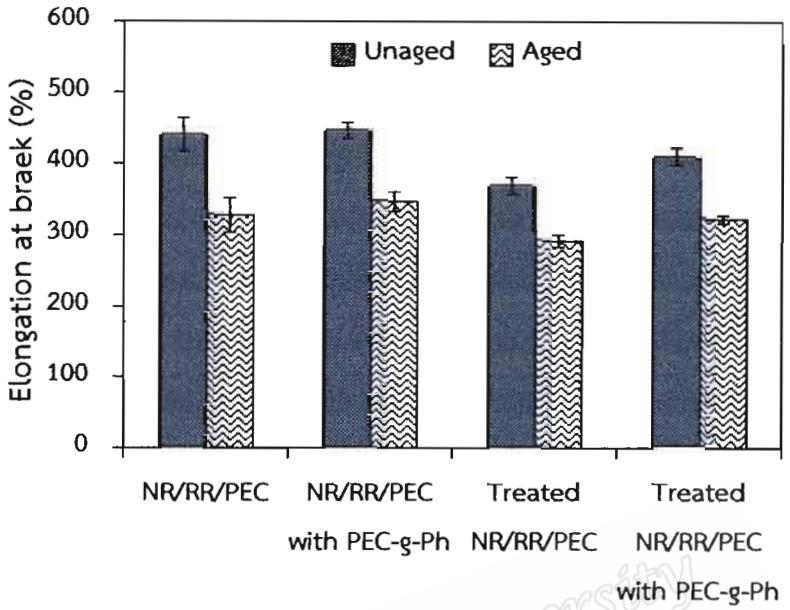
ตารางที่ 4.17 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

Blend	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
NR/RR/PEC	439±24.64	328±24.08	-25.28
NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	445±12.64	347±13.47	-22.02
Treated NR/RR/PEC	368±13.74	292±8.59	-20.65
Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph	407±12.36	322±5.71	-20.88

จากตารางที่ 4.16 และ 4.17 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ดังแสดงในรูปที่ 4.80 และ 4.81 รวมถึงแสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังบ่มเร่งในรูปที่ 4.82



รูปที่ 4.80 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน



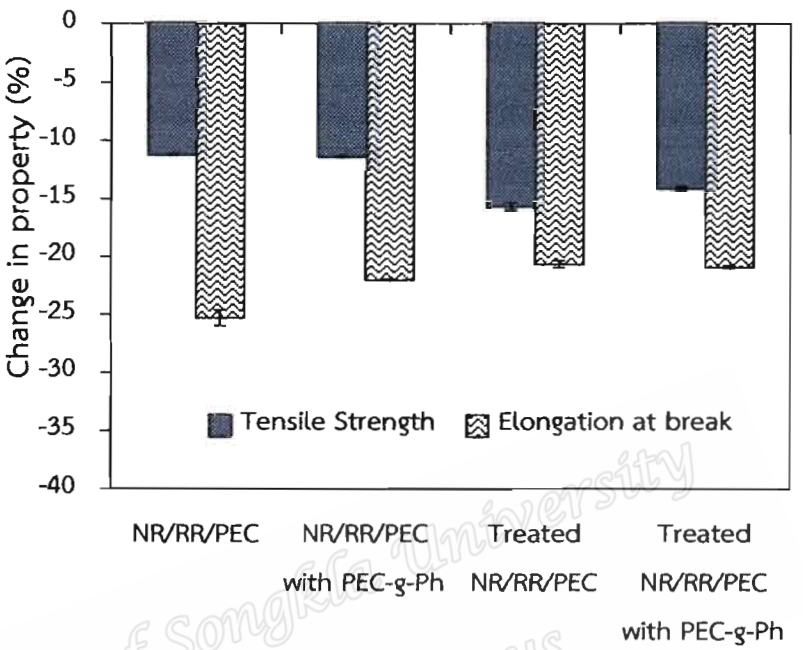
รูปที่ 4.81 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากรูปที่ 4.80 และ 4.81 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าน้อยกว่าก่อนบ่มเร่ง เนื่องจากผลของการเสื่อมสภาพในเฟสยางธรรมชาติภายหลังการบ่มเร่ง ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินจะให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกับผลสมบัติเชิงกลก่อนบ่มเร่ง กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินจะให้ค่าความต้านต่อแรงดึงสูงกว่า ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าด้อยกว่า เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร ส่วนการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ส่งผลให้ความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติซึ่งแสดงในรูปที่ 4.82 พบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าติดลบ และเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมากกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปรเล็กน้อย ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่า นอกจากนี้พบว่าเทอร์โม

พลาสติกที่ใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph จะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติไม่แตกต่างกัน

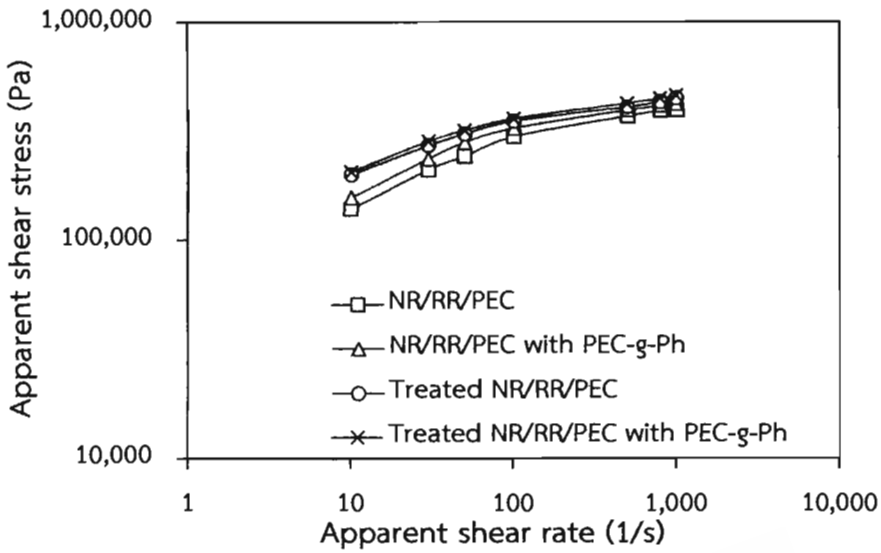


รูปที่ 4.82 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

4.6.5 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

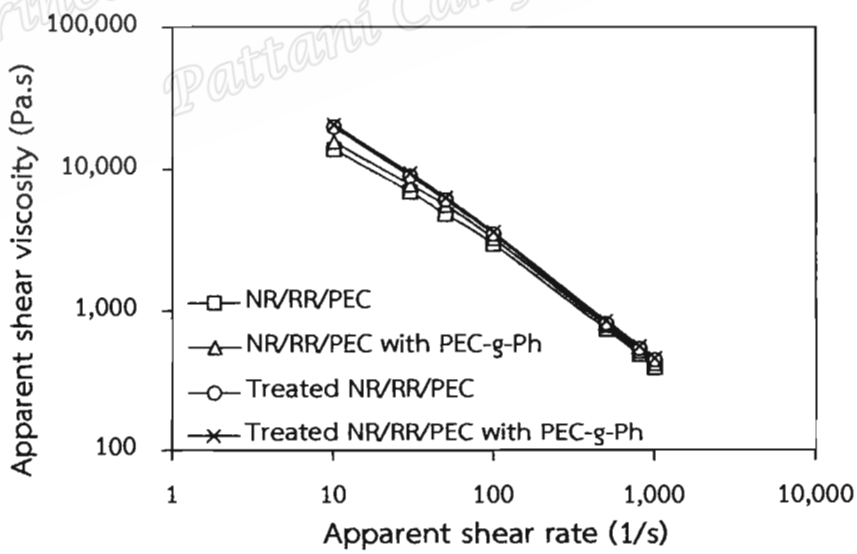
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการไหลตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.5 เปรียบเทียบสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4.83 และ 4.84

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.83 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus



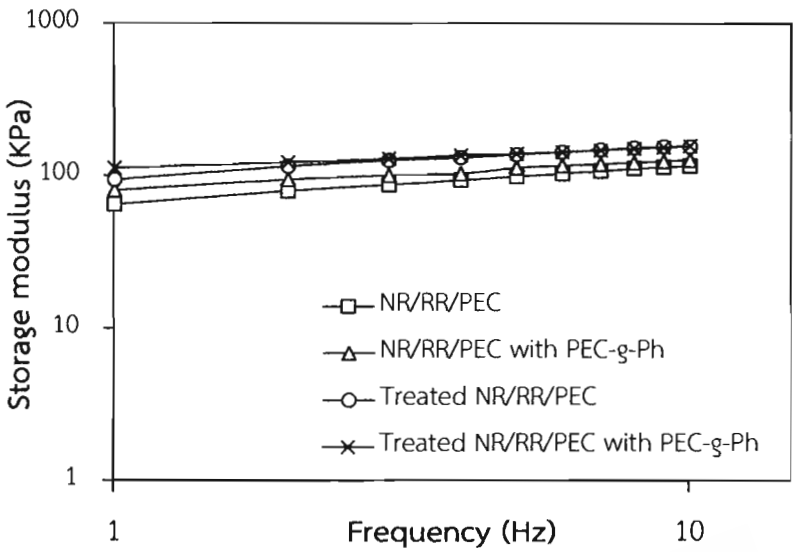
รูปที่ 4.84 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.83 และ 4.84 เมื่อพิจารณาที่อัตราเฉือนปรากฏเดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน ไม่ว่าจะมีหรือไม่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันชนิด PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph และ Treated NR/RR/PEC) ให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปรทั้ง 2 สูตร (NR/RR/PEC with PEC-g-Phและ NR/RR/PEC) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เกิดการหลอมและไหลได้ยากขึ้น เนื่องจากผลของการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับยางรีเคลมด้วยฟินอลิกเรซินที่ถูกผสมเข้ากับยางรีเคลมและยางธรรมชาติในขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์ นอกจากนี้การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นอาจส่งผลให้ช่วยลดแรงตึงผิวและทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสเพิ่มมากขึ้น ทำให้การส่งผ่านแรงเค้นระหว่างเฟสยางและเฟสพลาสติกมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงยังช่วยให้การลื่นไถลระหว่างผิวลดลง

4.6.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

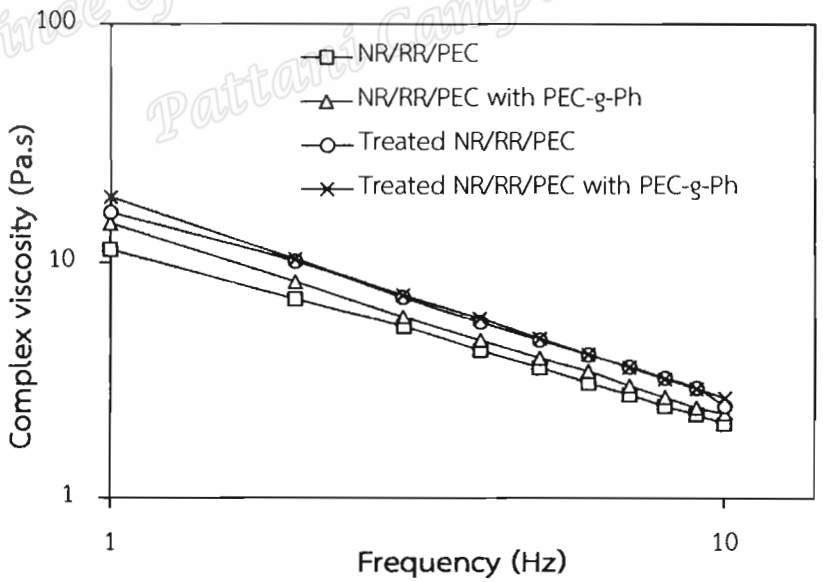
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.8.6 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสม ความหนืดเชิงซ้อน และ tan δ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.85-4.87 ตามลำดับ

Prince of Songkla University Pattani Campus



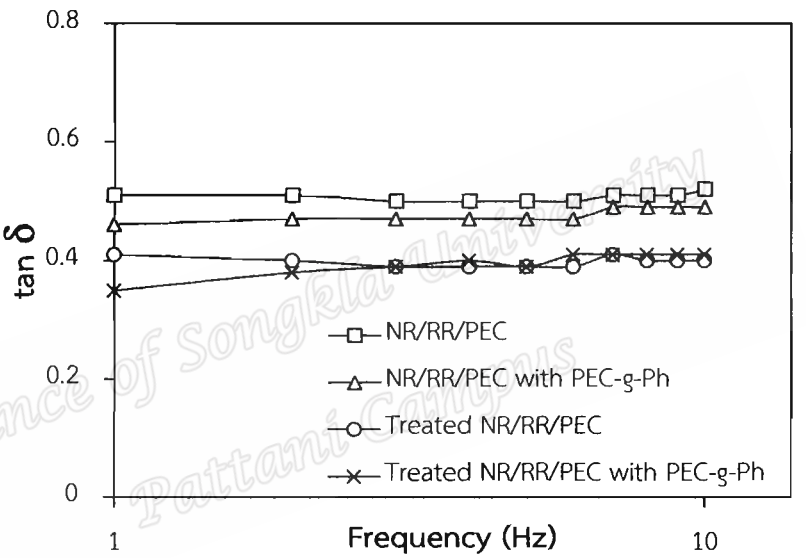
รูปที่ 4.85 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.86 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.85 และ 4.86 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินให้มอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่ากรณีไม่ใช้สารดัดแปรในการปรับปรุงความเข้ากันได้ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ให้มอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่า แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินร่วมกับการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ช่วยเสริมให้โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็งตึงมากขึ้นจึงต้านการบิดของโรเตอร์สูงและไหลได้ยาก



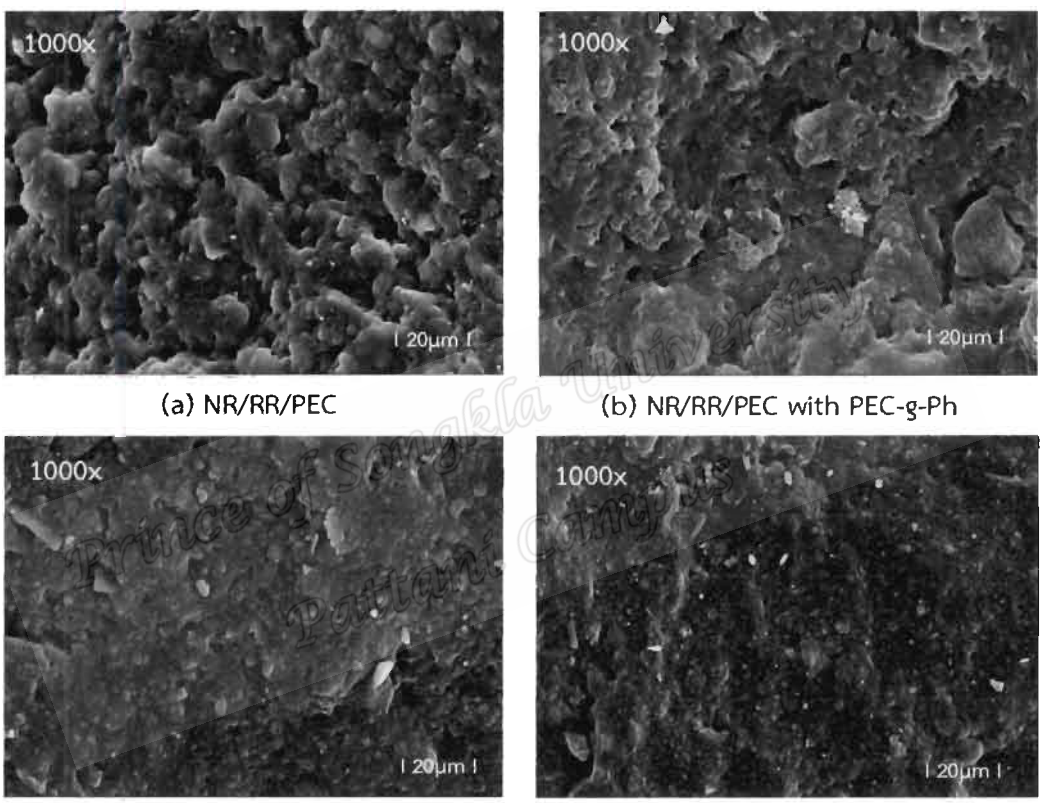
รูปที่ 4.87 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.87 เมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์สูตร NR/RR/PEC ให้ค่า tan δ สูงที่สุด รองลงมาคือ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ในขณะที่ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph และ Treated NR/RR/PEC มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินและการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ทำให้พื้นที่บริเวณผิวประจัญระหว่างเฟสทั้งสาม มีการยึดเหนี่ยวกันและเข้ากันได้มากขึ้นจึงสามารถส่งผ่านพลังงานบริเวณรอยต่อเฟสได้ดี ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่อยู่ในรูปของความร้อนน้อยที่สุดและมีการตอบสนองแบบอิลาสติกสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการคืนรูปซึ่งแสดงในรูปที่ 4.77

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.6.7 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.88



รูปที่ 4.88 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์NR/RR/PEC เมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน

จากรูปที่ 4.88 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (รูปที่ 4.88(C)และ 4.88(d)) จะมีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน (รูปที่4.88(a)และ 4.88(b)) และเมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph พบว่าเมื่อใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph(รูปที่4.88(b) และ 4.88(d))

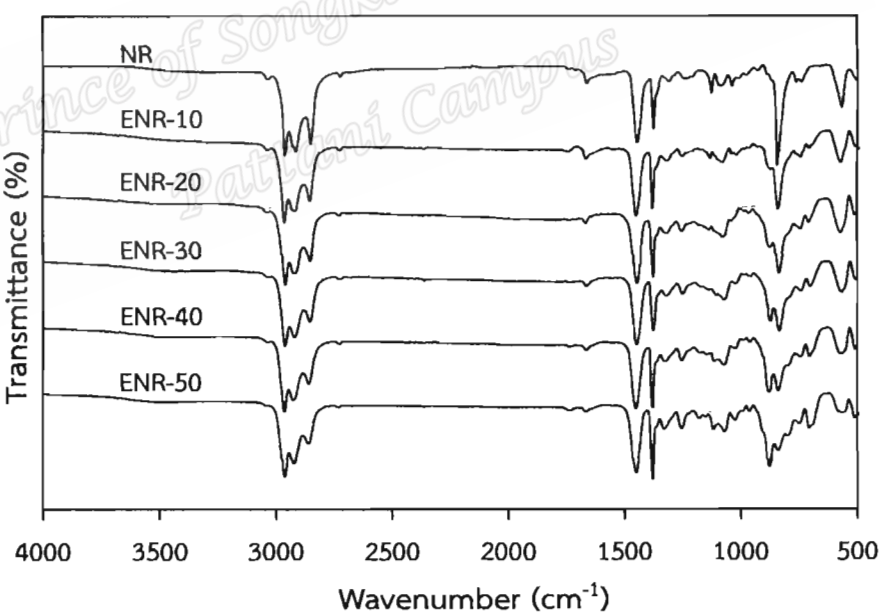
พบว่าเฟสยางในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับไม่ใช้ (รูปที่ 4.88(a) และ 4.88(c)) รวมถึงจะให้ลักษณะของพื้นผิวที่สม่ำเสมอมากกว่า ซึ่งลักษณะสัณฐานวิทยาที่ได้สอดคล้องกับสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลพลวัต โดยใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากัน PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด

4.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

4.7.1 ยางธรรมชาติอิพอกไซด์

4.7.1.1การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เตรียมขึ้นตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.7 ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปคโตรสโคปี ได้สเปคตรัมของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.89 สเปคตรัม FTIR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับสเปคตรัมของยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

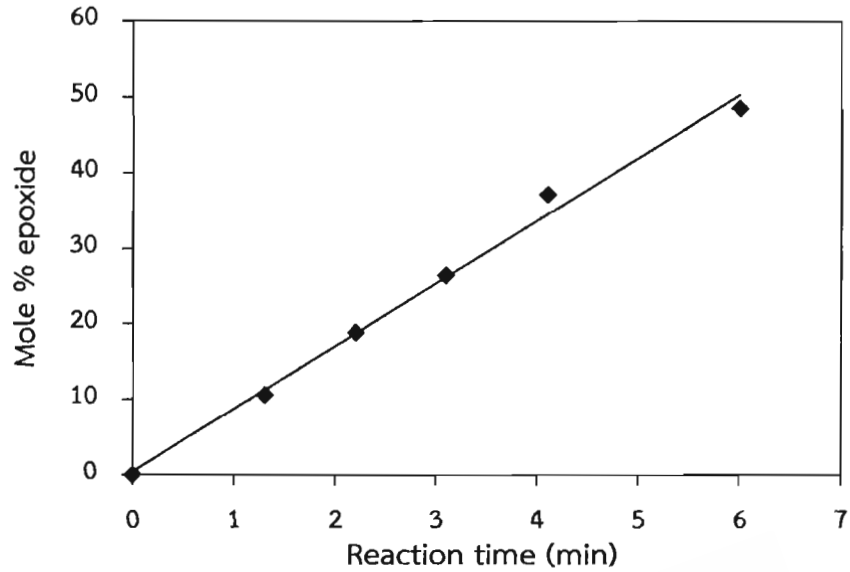
จากรูปที่ 4.89 แสดงสเปคตรัม FTIR ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ(NR) จะเห็นว่าสเปคตรัมของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1}และ 1240 cm^{-1} เพิ่มขึ้นมาซึ่งแสดงถึงการเกิดวงแหวนออกซิเรน (Oxirane ring) หรือหมู่อิพอกไซด์ที่เกาะติดบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ และพบว่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะคู่ (cis C=C) และ C-H out of plane bending ของพันธะ –C-H ที่ต่อกับ C=C ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของยางธรรมชาติ จะลดลงตามปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และจากสเปคตรัม FTIR สามารถนำไปคำนวณหาอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (Absorbance ratio, Ar) ของหมู่อิพอกไซด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1} เปรียบเทียบตำแหน่งเลขคลื่นที่ 835 cm^{-1} โดยใช้สมการที่ 2.1 จากนั้นนำอัตราส่วนการดูดกลืนแสงอิฟราเรดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ากราฟมาตรฐานของ Davey and Loadman (1984) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 ได้ผลดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ปริมาณหมู่อิพอกไซด์เมื่อใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 50°C

Reaction time (hr)	Epoxide content (mole%)
1.30	10.56
2.30	18.82
3.30	26.45
4.30	37.18
6.30	48.55

จากตารางที่ 4.18 สามารถนำเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อิพอกไซด์กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.90

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.90 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณหมู่อิพอกไซด์กับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

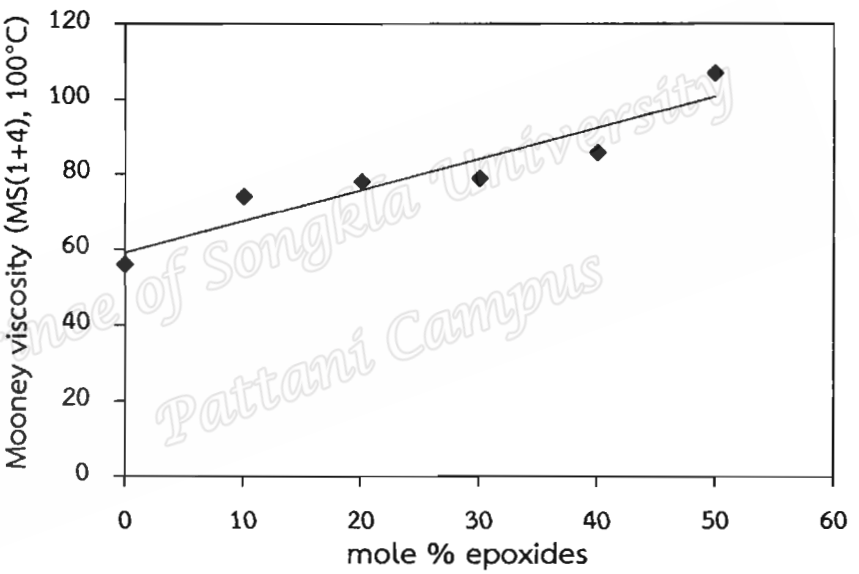
จากรูปที่ 4.90 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน จะทำให้เกิดปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในโมเลกุลของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากกรดเปอร์ฟอร์มิกจะทำปฏิกิริยากับโครงสร้างไม่อิ่มตัวของยางธรรมชาติ ได้โมเลกุลที่มีวงแหวนอิพอกไซด์บนโครงสร้างและกรดฟอร์มิกที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา และสามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้อีก ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะหมด ดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น

4.7.1.2 ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์

นำยางธรรมชาติและยางอิพอกไซด์ที่เตรียมได้ซึ่งมีปริมาณหมู่อิพอกไซด์แตกต่างกัน มาทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.4.1 ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.19 และสามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่กับปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.91

ตารางที่ 4.19 ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอิพอกไซด์

Types of rubber	Mooney viscosity (MS(1+4), 100°C)
NR	56
ENR-10	74
ENR-20	78
ENR-30	79
ENR-40	86
ENR-50	107



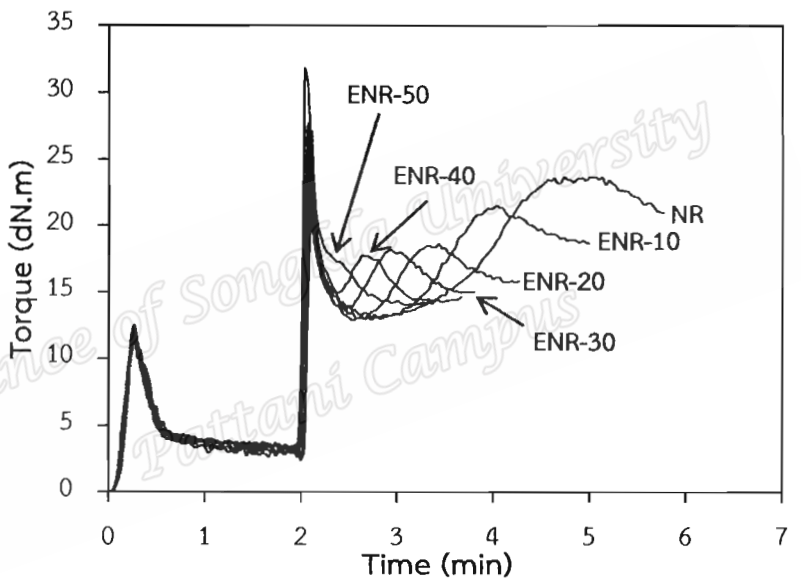
Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.91 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่ระดับต่างๆ

จากตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.91 พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และจะมีค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการดัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติด้วยปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันทำให้พันธะในโมเลกุลยางเปลี่ยนเป็นหมู่อิพอกไซด์ที่มีสภาพขั้ว ซึ่งการเพิ่มหมู่อิพอกไซด์เป็นการเพิ่มสภาพขั้วในโมเลกุลยาง ส่งผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงขึ้น (ภูริพงศ์, 2548) อีกทั้งหมู่อิพอกไซด์เป็นหมู่ขนาดใหญ่ที่สามารถขัดขวางความเป็นระเบียบของสายโซ่ยางธรรมชาติได้ ส่งผลให้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ไหลได้ยากขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

4.7.2 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการผสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC

เตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีการผสมแบบ Melt mixing method และใช้ปริมาณสารดัดแปรฟินอลิกเรซินปริมาณ 10 phr โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (NR) และยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์10 (ENR-10), 20 (ENR-20), 30 (ENR-30), 40 (ENR-40)และ 50 (ENR-50) เปอร์เซ็นต์โดยโมล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กการผสมกับเวลาการผสมดังแสดงในรูปที่ 4.92



รูปที่ 4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าทอร์กกับเวลาการผสมของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.91 พบว่าที่เวลาประมาณนาทีที่ 2 เป็นช่วงที่ใส่ยางคอมพาวนด์เข้าไปบดผสมกับโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ พบว่าเมื่อพิจารณาในช่วงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์จะมีระยะเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และค่าทอร์กสูงสุดที่การวัลคาไนซ์สมบูรณ์ลงลดตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ดังข้อมูลสรุปในตารางที่ 4.20 เนื่องจากการมีหมู่อิพอกไซด์บนสายโซ่โมเลกุลของยางเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของพันธะคู่ในโมเลกุลยางธรรมชาติลดลง (Poh *et al.*, 2000 และ Noriman *et al.*, 2010) ทำให้การเกิดพันธะเชื่อมขวางด้วยกำมะถันมีน้อยลง ส่งผลให้ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการที่ระยะเวลา

การวัลคาไนซ์ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ระยะเวลาสั้นลงตามปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มากขึ้น น่าจะมาจากผลของอันตรกิริยาหรือปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างฟินอลิกเรซินกับหมู่ oxirane ring ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์

ตารางที่ 4.20 ค่าทอร์กสูงสุดและระยะเวลาการเกิดการวัลคาไนเซชันแบบไดนามิกซ์

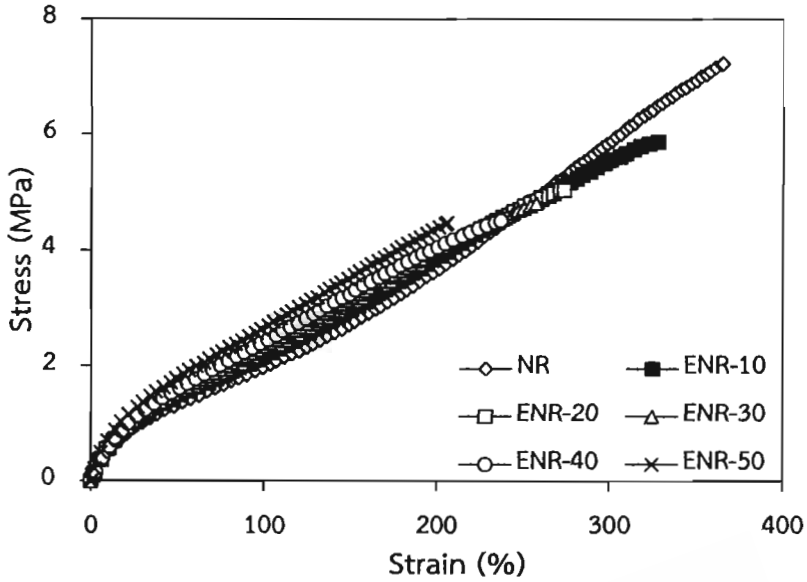
Type of rubber	Max torque (dN.m)	Time of vulcanization (min)
NR	23.67	1.4
ENR-10	21.49	1.48
ENR-20	18.58	0.86
ENR-30	18.14	0.26
ENR-40	17.72	0.14
ENR-50*	-	-

หมายเหตุ *ENR-50 ทอร์กจะมีค่าลดลงเรื่อยๆไม่ปรากฏพีคที่ชัดเจน

4.7.3 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาสมบัติเชิงกล ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.93

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.93 เมื่อพิจารณามอดุลัสที่ระยะยืด 100% พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีความแข็งตึงมากกว่ายางธรรมชาติ โดยความแข็งตึงในโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเหนียวทนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์กลับมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีความเป็นขั้วและมีความแข็งตึงของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นจากผลของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (Nakason *et al.*, 2005) ในขณะเดียวกันการมีปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มมากขึ้นจะเป็นการเพิ่มความเกะกะให้โมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ จึงทำให้มีความยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้ระยะยืดลดลงประกอบกับค่าทอร์กการผสมที่แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีระดับค่าทอร์กที่ตำแหน่งไดนามิกซ์วัลคาไนเซชันลดลง และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.21 รวมทั้งแสดงค่าความสามารถในการคืนรูป และความแข็งด้วย

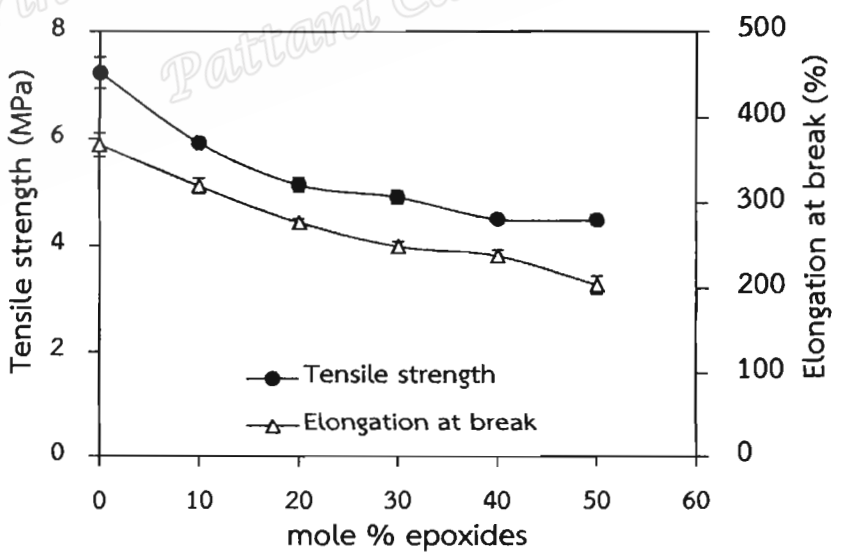
Prince of Songkla University Pattani Campus

ตารางที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Type of rubber	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tension set (%)	Hardness (Shore A)
NR	7.23±0.29	368±13.74	5.52±0.35	57
ENR-10	5.92±0.06	320±8.98	5.75±0.30	59
ENR-20	5.14±0.13	277±4.44	6.47±0.23	61
ENR-30	4.91±0.12	249±5.65	7.03±0.62	61
ENR-40	4.50±0.05	238±6.89	7.33±0.40	62
ENR-50	4.48±0.10	204±10.79	7.48±0.20	65

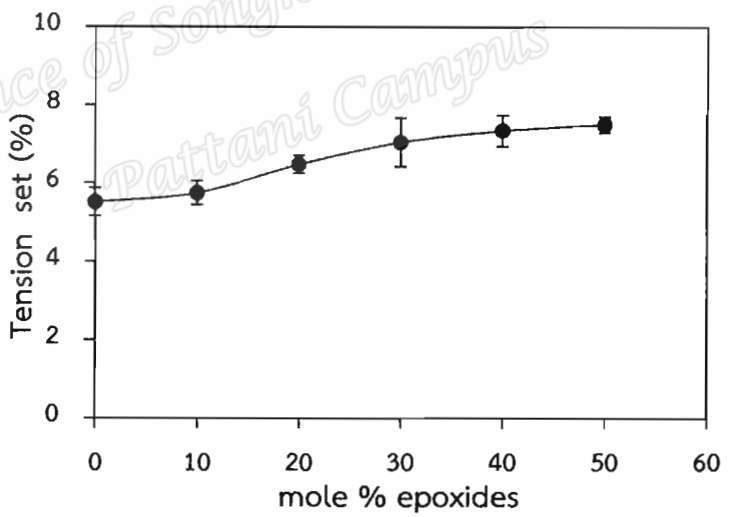
จากตารางที่ 4.21 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด ความสามารถในการคืนรูป และความแข็ง เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.94, 4.95 และ 4.96 ตามลำดับ

Prince of Songkla University Pattani Campus



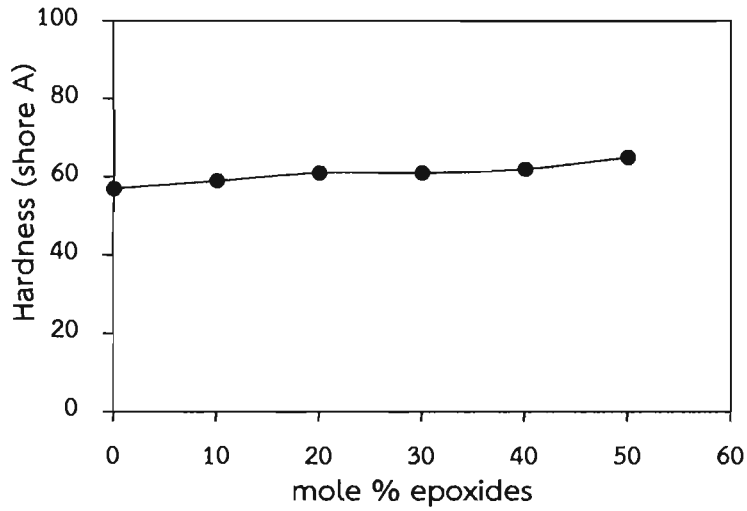
รูปที่ 4.94 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากที่รูปที่ 4.94 พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติจะมีค่ามากกว่าสมบัติดังกล่าวของยางธรรมชาติอิพอกไซด์อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีค่าลดลงตามปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในโมเลกุล เนื่องจากเมื่อมีปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มมากขึ้นทำให้มีปริมาณพันธะคู่บนสายโซ่โมเลกุลที่จะไปเกิดปฏิกิริยากับสารวัลคาไนซ์ได้น้อยลง ส่งผลให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางน้อยลดลงซึ่งสอดคล้องกับความสูงของทอร์กการผสมซึ่งแสดงในรูปที่ 4.90 ในขณะที่การลดลงของความสามารถในการยืดจนขาดนั้นเป็นผลมาจากปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเกะกะในโมเลกุลยางธรรมชาติอิพอกไซด์เพิ่มมากขึ้น รวมถึงทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์แข็งตึงขึ้น (Nakason *et al.*, 2005) ส่งผลให้ความยืนหยุ่นลดลง นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์เนื่องจากความแตกต่างของสภาพขั้วในแต่ละเฟสดังนั้นจึงให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ลดลง



รูปที่ 4.95 การผิดรูปถาวรแบบดึงของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

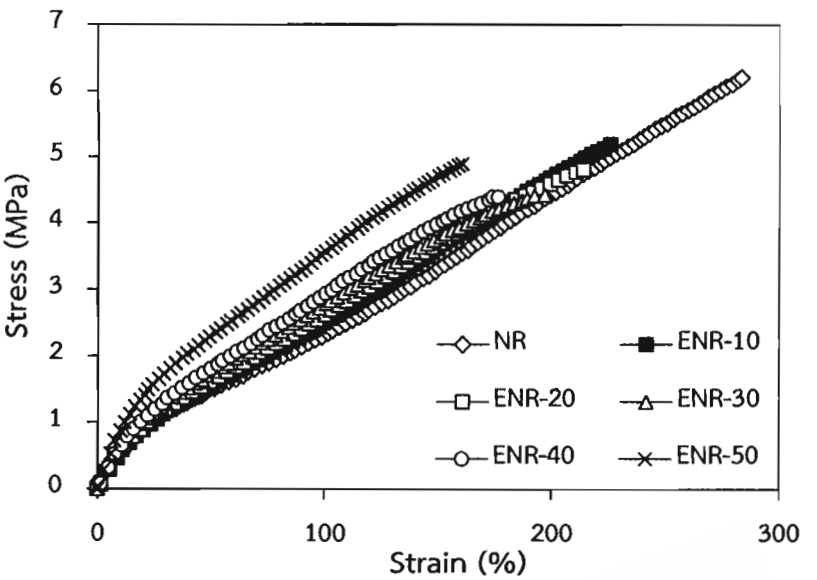


รูปที่ 4.96 ความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.95 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้ยางธรรมชาติมีความสามารถในการคืนรูปดีที่สุด ขณะที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีความสามารถในการคืนรูปลดลง (Tension set เพิ่มขึ้น) ตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ซึ่งเกิดจากหมู่อิพอกไซด์มีสภาพเป็นขั้วและมีขนาดใหญ่ทำให้สมบัติความเป็นอิลาสติกของวัสดุลดลง นอกจากนี้การที่มีหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มากขึ้นจึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความแข็ง (รูปที่ 4.96) เพิ่มขึ้น

4.7.4 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติมาทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 16 ชั่วโมงก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.97



รูปที่ 4.97 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

จากรูปที่ 4.97 แสดงพฤติกรรมการผิดรูปภายใต้แรงเค้นหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติพบว่าพฤติกรรมการผิดรูปของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ก่อนและหลังบ่มเร่งไม่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อพิจารณามอดุลัสที่ระยะยืด 100% พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีมอดุลัสสูงขึ้นตามสภาพขั้วในยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นขณะที่ให้ระยะยืดลดลงซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของหมู่อิพอกไซด์ซึ่งได้อธิบายไปแล้วข้างต้น และจากจุดขาดของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.22 และ 4.23 นอกจากนี้ยังแสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติด้วย

ตารางที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงดึงภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

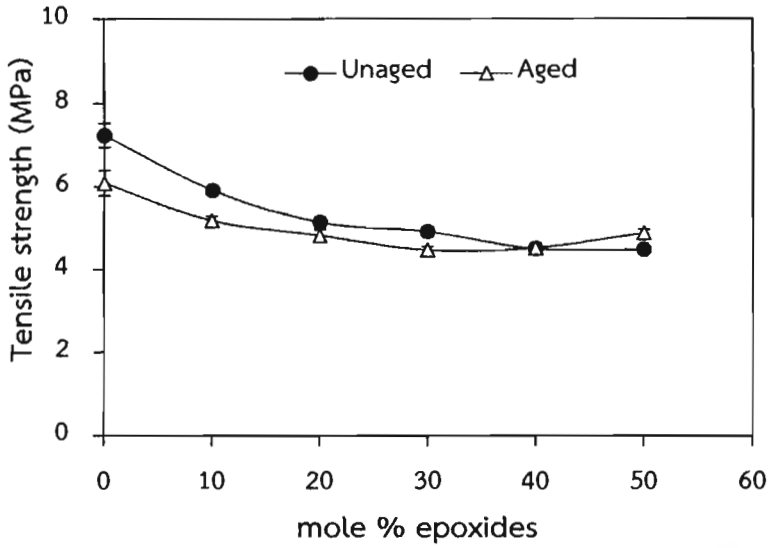
Type of rubber	Tensile strength (MPa)		Change in property of tensile strength (%)
	Unaged	Aged	
NR	7.23±0.29	6.09±0.30	-15.77
ENR-10	5.92±0.06	5.18±0.10	-12.50
ENR-20	5.14±0.13	4.82±0.13	-6.23
ENR-30	4.91±0.12	4.47±0.08	-8.96
ENR-40	4.50±0.05	4.52±0.12	0.44
ENR-50	4.48±0.10	4.88±0.08	8.93

ตารางที่ 4.23 ความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

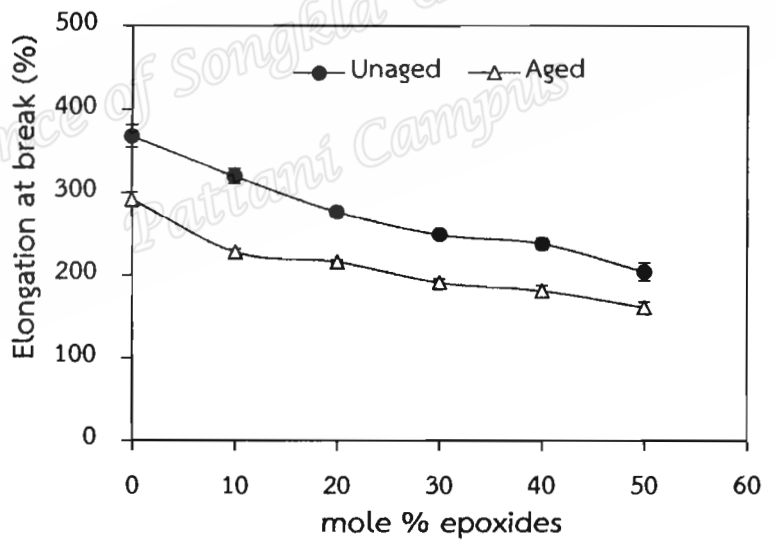
Type of rubber	Elongation at break (%)		Change in property of elongation at break (%)
	Unaged	Aged	
NR	368±13.74	292±8.59	-20.65
ENR-10	320±8.98	228±3.35	-28.75
ENR-20	277±4.44	216±2.31	-22.02
ENR-30	249±5.65	191±4.29	-23.29
ENR-40	238±6.89	181±6.60	-23.95
ENR-50	204±10.79	161±6.45	-21.08

จากตารางที่ 4.22 และ 4.23 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด ก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรอัตราส่วนการเบลนด์ดังแสดงในรูปที่ 4.98 และ 4.99 รวมถึงแสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติภายหลังบ่มเร่งในรูปที่ 4.100

Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.98 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

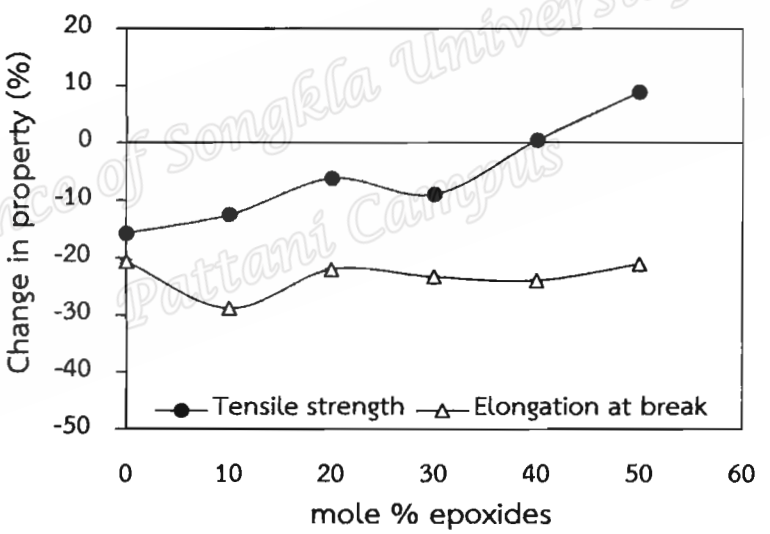


Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.99 ความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.98 และ 4.99 พบว่าค่าความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังการบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ภายหลังบ่มเร่งจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่

เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ยกเว้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ยาง ENR-50 จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากเฟสของยางธรรมชาติอิพอกไซด์เกิดการเปิดวงแหวนและเกิด Self crosslinking reaction ระหว่างโมเลกุล (เด่นศักดิ์, 2558) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดซึ่งแสดงในรูปที่ 4.100 พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ แสดงให้เห็นว่าการใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ในองค์ประกอบเบลนด์ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มต้านทานต่อการบ่มเร่งได้ดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันจะเป็นการไปลดปริมาณของส่วนที่ไม่อิ่มตัวในสายโซ่ยางธรรมชาติ (Gelling, 1991) กล่าวคือปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พันธะคู่ในหน่วยซ้ำของไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีปริมาณลดลงจึงมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งได้ดีขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



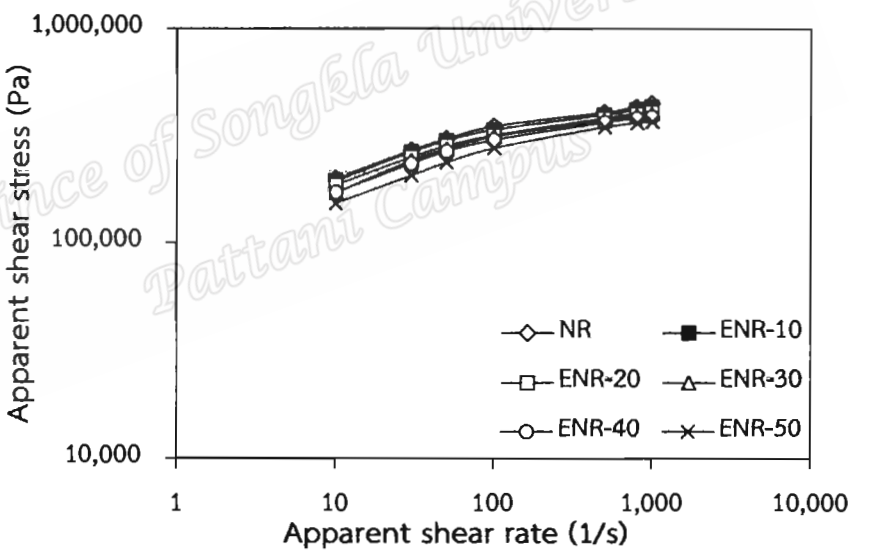
Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.100 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

4.7.5 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติการไหลของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

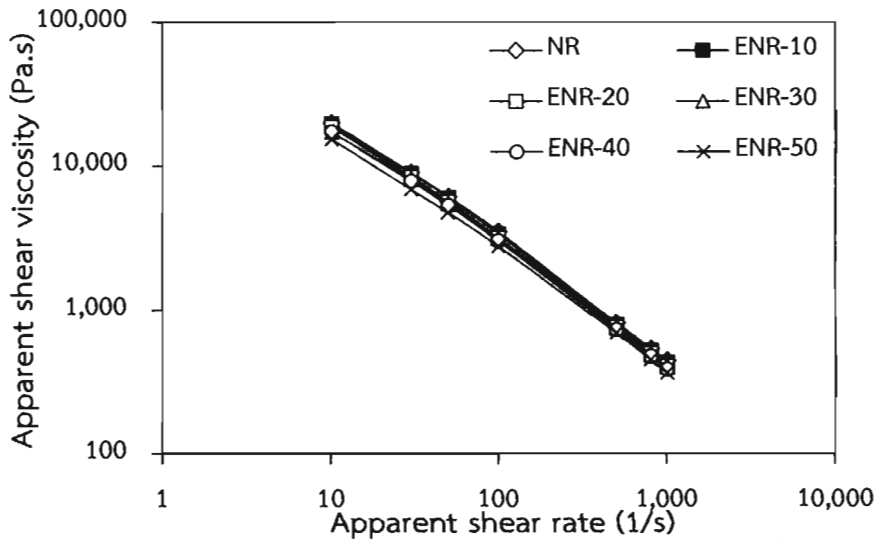
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากการเบลนด์ NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาสมบัติการไหลได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏ

และความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4.101 และ 4.102 พบว่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ยางธรรมชาติจะให้ค่าสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อเปลี่ยนมาใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์แทนที่ยางธรรมชาติในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ค่าดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการใช้ยางธรรมชาติจะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ได้ดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ กอรปกับการใช้ยางธรรมชาติจะทำให้มีปริมาณพันธะเชื่อมขวางในเฟสยางมากกว่าจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติมีความแข็งหรือมอดุลัสมากกว่าและจะไหลได้ยากกว่า นอกจากนี้อาจเป็นผลมากจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสต่างๆในเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์เนื่องจากความเป็นขั้วของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ จึงทำให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปที่ 4.101 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

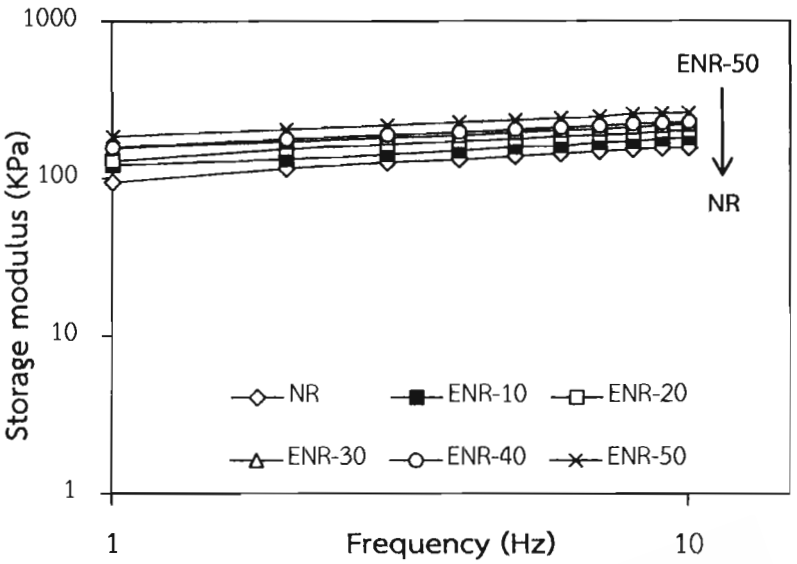


รูปที่ 4.102 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนปรากฏกับอัตราเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

4.7.6 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเชิงกลพลวัตของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

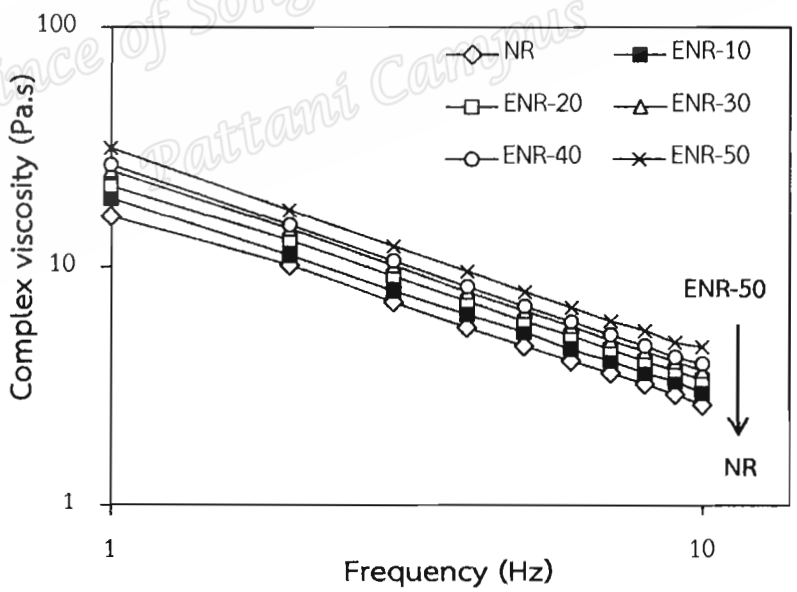
นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC โดยแปรชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่อง MDPT ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมความหนืดเชิงซ้อน และ tan δ กับความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.103, 4.104 และ 4.106

Prince of Songkla University Pattani Campus



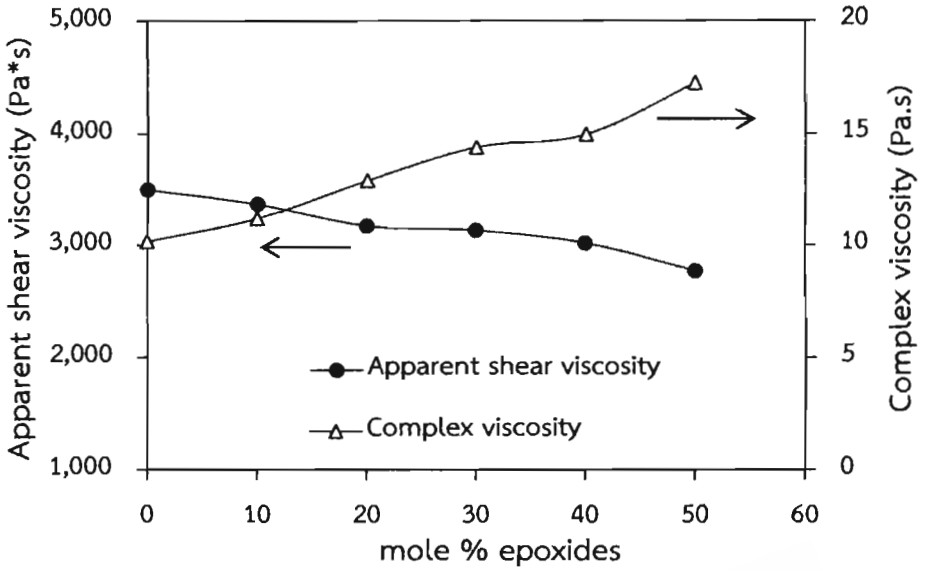
รูปที่ 4.103 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสสะสมกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus



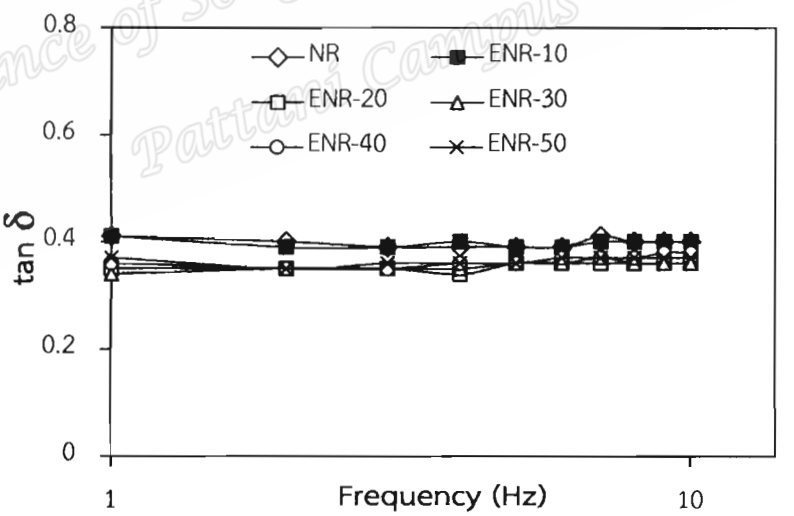
รูปที่ 4.104 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเชิงซ้อนกับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.103 และ 4.104 พบว่ามอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-50 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-40, ENR-30, ENR-20, ENR-10 และ NR ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สวนทางกับการทดสอบการไหลด้วยเครื่องคาร์ปิลลารี (หัวข้อ 4.7.5) ดังแสดงในรูปที่ 4.105 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากรูปแบบการทดสอบของทั้ง 2 เทคนิคที่แตกต่างกัน โดยการทดสอบด้วยเครื่องคาร์ปิลลารีรีโอมิเตอร์ทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการเลื่อนไถลระหว่างโมเลกุลสูง เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จึงแสดงสมบัติที่เป็นผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลหรือการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุล เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีระดับการอิพอกซิเดชันมาก น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีมากกว่ายางธรรมชาติทำให้การเลื่อนไถลของสายโซ่โมเลกุลเกิดได้ยากขึ้น ประกอบกับการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลสูงจากความเกะกะของหมู่อิพอกไซด์และการเกิด self crosslink จึงน่าที่จะให้สมบัติความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ แต่การทดลองกลับพบว่าค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงซึ่งเป็นผลมาจากระดับการวัลคาไนซ์ที่ต่ำและการไม่เข้ากันของเฟสยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับยางรีเคลมและเทอร์โมพลาสติก ในทางกลับกันการทดสอบด้วยเครื่อง MDPT ใช้อัตราเฉือนต่ำ (ความถี่ต่ำ ในการทดลองอยู่ระหว่าง 1-10 Hz) ซึ่งเป็นความถี่ที่วัสดุเกิดการผิดรูปน้อย การผิดรูปส่วนใหญ่ยังเป็นการผิดรูปแบบอิลาสติก จึงเป็นไปได้ว่าการการตอบสนองของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อได้รับความเค้น (แรงบิด) ยังไม่ปรากฏชัดเจนจากผลการเลื่อนไถลของโมเลกุล แต่เป็นผลมาจากการตอบสนองของสารตัวเติมที่มีอยู่ในยางรีเคลมและความแข็งของสายโซ่โมเลกุลแทน โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่มีระดับการอิพอกซิเดชันมาก ก็จะมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นที่การทดสอบแบบใช้การผิดรูปต่ำๆ จึงพบว่าค่ามอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่มากขึ้นในยางธรรมชาติอิพอกไซด์



รูปที่ 4.105 ความเค้นเฉือนปรากฏที่อัตราเฉือน 100 (1/s) และความหนืดเชิงซ้อนที่ความถี่ 2 Hz ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

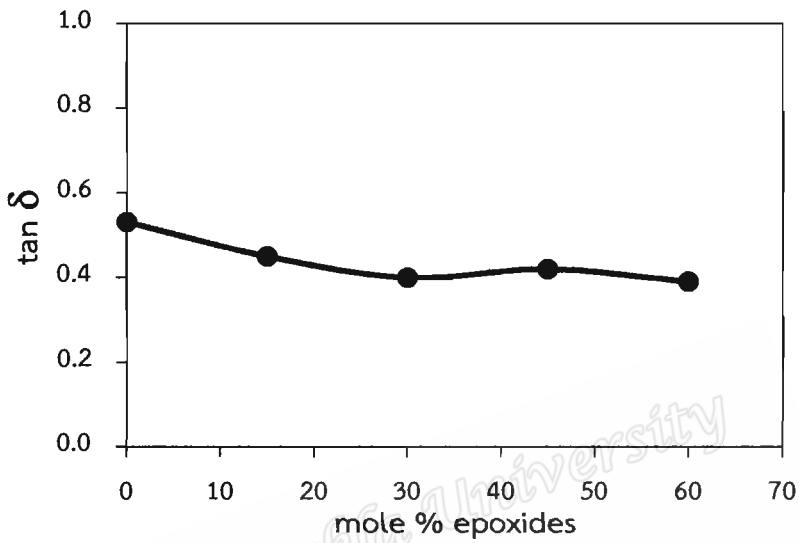
Prince of Songkla University Pattani Campus



รูปที่ 4.106 ความสัมพันธ์ระหว่าง tan δ กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 4.106 แสดงค่า tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติพบว่าเมื่อพิจารณาที่ความถี่เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.107 เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติจะให้ค่า tan δ สูงที่สุด รองลงมาคือยาง ENR-10, ENR-20, ENR-30, ENR-40 และ

ENR-50 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไม่สอดคล้องกับความสามารถในการคืนรูปซึ่งแสดงในรูปที่ 4.94 กล่าวคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีความสามารถในการคืนรูปลดลง (Tension set เพิ่มขึ้น) เมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซด์เพิ่มขึ้น

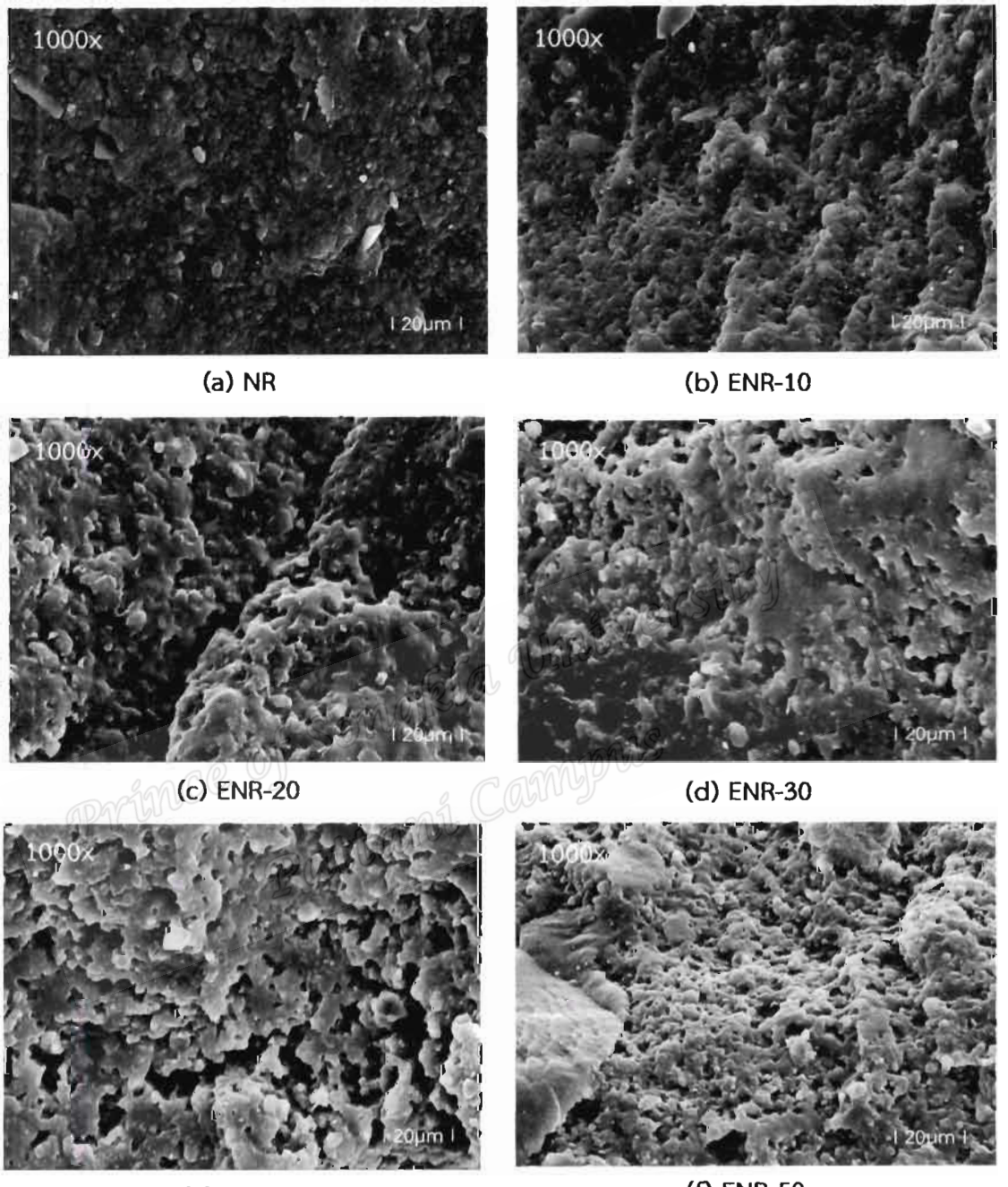


รูปที่ 4.107 ค่าtan δ ที่ความถี่ 2 Hz กับความถี่ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

Prince of Songkla University Pattani Campus

4.7.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC

นำเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่าง NR/RR/PEC ที่ศึกษาผลของชนิดยางธรรมชาติ มาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.108 พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติ (รูปที่4.108(a)) จะมีลักษณะของพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ (รูปที่ 4.108(b)-(f)) รวมถึงจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าด้วย และเมื่อเปรียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ พบว่าลักษณะพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีลักษณะที่หยาบและขรุขระเพิ่มมากขึ้น และเกิดการแยกเฟสมากขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในยางธรรมชาติอิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



(a) NR (b) ENR-10

(c) ENR-20 (d) ENR-30

(e) ENR-40 (f) ENR-50

รูปที่ 4.108 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ NR/RR/PEC เมื่อแปรชนิดยางธรรมชาติ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 การศึกษาสมบัติเบื้องต้นของยางรีเคลม

- การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของยางรีเคลมด้วยเทคนิค TGA พบว่ายางรีเคลมมีองค์ประกอบที่สามารถสลายตัวเนื่องจากความร้อนภายในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 750°C อยู่ทั้งหมด 4 องค์ประกอบคือ น้ำและน้ำมันมีปริมาณการสลายตัว 9.5% ยาง 55.0% เขม่าดำ 33.0% แคลเซียมคาร์บอเนต 4.00% และมีเถ้าเหลืออยู่ 8.0%

- การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางรีเคลมด้วยเทคนิค FTIR พบว่าสเปคตรัมของยางรีเคลมปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2913 และ 2846 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ C-H ใน $-CH_3$ และ $-CH_2$ ขณะที่ 1432 และ 1370 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงพันธะ $-CH_2$ และ$-CH_3$ ในโครงสร้างของยาง และพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1628 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C=C สำหรับตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1535 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ Zinc carboxylates และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 820 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบงอของพันธะ C-H ในโมเลกุลยางธรรมชาติและในวงเบนซีน

- การวิเคราะห์ปริมาณส่วนที่ละลายและไม่ละลายในยางรีเคลม พบว่ายางรีเคลมมีปริมาณส่วนที่ละลายได้ 24.64% และส่วนที่ไม่ละลาย 75.36%

- การวิเคราะห์ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางในยางรีเคลม พบว่ายางรีเคลมมีความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางที่เป็นพันธะเชื่อมขวางที่เกิดจากยางปริมาณ 2.28×10^{-4} mol/cm^3

- การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางรีเคลม พบว่ายางรีเคลมมีผิวหน้าของยางทั้งที่เรียบและขรุขระ และพบว่ามีกลุ่มของสารเคมีกระจายตัวอยู่

5.2 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารดัดแปรต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม (NR/RR blend)

- การศึกษาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร และยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรมีพฤติกรรมการวัลคาไนซ์หลัง Optimum cure time เป็นแบบ Reversion นอกจากนี้พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรจะให้ค่าทอร์กสูงสุด และผลต่างของค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุด ต่ำกว่ายางเบลนด์ที่สูตรไม่ใช้สารดัดแปร ในขณะที่มีระยะเวลาการวัลคาไนซ์มากกว่า

Prince of Songkla University Pattani Campus

- การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางเบลนด์ พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน และยางเบลนด์สูตรที่ไม่ใช่สารดัดแปรจะมีความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความแข็งใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลต จะมีค่าความต้านต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และความแข็งลดลง และพบว่าทั้ง 4 สูตรมีความสามารถในการคืนรูปไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้พบว่าสมบัติเชิงกลภายหลังบ่มเร่งของยางเบลนด์จะมีค่าลดลง

- การศึกษาสมบัติการไหลของยางเบลนด์ พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร และยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซิน และไกลซิดิลเมทาคริเลต จะมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์จะมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏต่ำที่สุด

- จากการศึกษาอิทธิของชนิดสารดัดแปร พบว่ายางเบลนด์สูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซินให้สมบัติใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร และมีสมบัติโดยรวมดีกว่าสูตรที่ใช้สารดัดแปรชนิดมาลิอิกแอนไฮไดรด์ และไกลซิดิลเมทาคริเลต ดังนั้นจึงเลือกใช้สารดัดแปรชนิดฟีนอลิกเรซินเพื่อนำไปศึกษาต่อในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์

5.3 การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)

- การศึกษาอิทธิพลของวิธีการผสมสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสม พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมแบบไม่ใช้สารดัดแปร (Without modifier) และที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending จะมีลักษณะทอร์กการผสมเหมือนกัน ขณะที่เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing method จะมีทอร์กการผสมที่ตำแหน่งการเกิดไดนามิกส์วัลคาไนเซชันช้ากว่า

- การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าไม่ใส่สารดัดแปร และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการผสมสารดัดแปรทั้ง 2 วิธี พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการใช้วิธีผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และสูงกว่าวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending ในขณะที่ให้ค่าการผิดรูปถาวรแบบดึง และความแข็งไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใช้สารดัดแปร และที่ใส่สารดัดแปรด้วยวิธีการผสมทั้ง 2 วิธี ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มเร่งต่ำกว่าก่อนบ่มเร่ง

Prince of Songkla University Pattani Campus

- การศึกษาสมบัติการไหล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรจะมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารดัดแปร ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบวิธีการผสมสารดัดแปรทั้ง 2 วิธี จะพบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Melt mixing จะให้ค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าการผสมสารดัดแปรโดยใช้วิธี Reactive blending เล็กน้อย

- การศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing จะให้ค่ามอดุลัสสะสม และความหนืดเชิงซ้อนสูงที่สุดรองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธีการผสมสารดัดแปรแบบ Reactive blending และ Without modifier ตามลำดับ ในขณะที่ค่า tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยการผสมสารดัดแปรด้วยวิธี Melt mixing จะมีค่าต่ำที่สุด

- การศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยวิธี Reactive blending มีลักษณะของพื้นผิวที่หยาบและขรุขระกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมด้วยวิธี Melt mixing

- จากการศึกษาอิทธิของวิธีการผสมสารดัดแปร พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมโดยใช้วิธีผสมสารดัดแปรแบบ Melt mixing ให้สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลพลวัตดีที่สุด

5.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (NR/RR/PEC TPVs)

- การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารดัดแปรต่อพฤติกรรมการผสม พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีระยะเวลาการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์นานขึ้นตามปริมาณของฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น และพบว่าค่าสูงสุดของทอร์กการผสมในช่วงการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกส์จะมีความสูงลดลงตามปริมาณฟินอกลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น

- การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดและค่าการผิดรูปถาวรแบบดึงมีแนวโน้มลดลง โดยที่ปริมาณฟินอลิกเรซิน 10 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งสูงที่สุด นอกจากนี้พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ทุกปริมาณของฟินอลิกเรซินมีค่าต่ำกว่าก่อนบ่มเร่ง

- การศึกษาสมบัติการไหล พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏและค่าความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น

- การศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัสสะสม ค่าความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า tan δ มีแนวโน้มลดลง

Prince of Songkla University Pattani Campus

- การศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าขนาดอนุภาคยางวัลคาไนซ์และความขรุขระของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะลดน้อยลงตามปริมาณฟินอลิกเรซินที่เพิ่มขึ้น

- จากการศึกษาอิทธิของปริมาณสารดัดแปร พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ฟินอลิกเรซินที่ปริมาณ 10 phr ให้สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลพลวัตโดยรวมดีที่สุด

5.5 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

- การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการเบลนด์ต่อพฤติกรรมการผสม พบว่าค่าทอร์กการผสม ณ เวลาที่เฟสยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์จะเกิดในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะเวลาของการเกิดการวัลคาไนซ์ของเฟสยางจะไม่เท่ากัน จะพบว่าเมื่อปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้น ระยะเวลาของการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นด้วย

- การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น โดยเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่อัตราส่วน 60/0/40 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนที่ 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการผิดรูปถาวรแบบดึง และความแข็งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังการบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ให้สมบัติต่ำกว่าก่อนบ่มเร่ง และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกันกับพฤติกรรมก่อนการบ่มเร่ง ยกเว้นที่อัตราส่วนการเบลนด์ 0/60/40 พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าก่อนบ่มเร่ง

- การศึกษาสมบัติการไหล พบว่าค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าลดลงตามปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือที่อัตราส่วน 60/0/40 ให้ความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือ 45/15/40, 30/30/40, 15/45/40 และ 0/60/40 ตามลำดับ

- การศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่ามอดุลัสสะสม มอดุลัสสูญเสีย และค่าความหนืดเชิงซ้อน เพิ่มขึ้นปริมาณยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า tan δ มีแนวโน้มลดลง

- การศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีความสม่ำเสมอของเฟสยางจะลดลงตามปริมาณของยางรีเคลมในสัดส่วนของเฟสยางเพิ่มขึ้น และทำให้มีความขรุขระของพื้นผิดเพิ่มมากขึ้น

5.6 การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

- การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์กับฟินอลิกเรซิน (PEC-g-Ph) พบว่าสเปคตรัมของสารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3383 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะไฮโดรเจนในหมู่ฟีนอล และพบพีคที่ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1597 cm^{-1} และ 1656 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ -C=C ในวงแหวนอโรมาติก รวมถึงจะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1213 cm^{-1} จากการสั่นแบบยืดของพันธะ –C-O

- การศึกษาอิทธิพลของการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ร่วมกับวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารดัดแปรชนิดฟินอลิกเรซินต่อพฤติกรรมการผสม พบว่าทอร์กการผสมในสูตร NR/RR/PEC และ NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ซึ่งไม่ใส่สารดัดแปรฟินอลิกเรซินให้ลักษณะทอร์กการผสมที่เหมือนกัน ในขณะที่ในสูตร Treated NR/RR/PEC และTreated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้เป็นสารดัดแปรฟินอลิกเรซินจะให้ลักษณะของทอร์กการผสมเหมือนกัน กล่าวคือเมื่อใช้สารดัดแปรทำให้ทอร์กการผสมในช่วงของการเกิดการวัลคาไนซ์แบบไดนามิกซ์มีระยะเวลาในการเกิดการวัลคาไนซ์ที่นานกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปร ขณะที่เมื่อใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าจะให้ลักษณะของทอร์กการผสมที่ไม่แตกต่างกัน

- การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน (Treated NR/RR/PEC และ NR/RR/PEC) สูตรที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซินให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการยืดจนขาดและการผิดรูปถาวรแบบดึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารเพิ่มความเขากันได้ชนิด PEC-g-Ph จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่มีค่าความสามารถในคืนรูป และความแข็งไม่แตกต่างกัน จากนั้นในการศึกษาสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่ง พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์มีค่าน้อยกว่าก่อนบ่มเร่ง

- การศึกษาสมบัติการไหล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน ทั้งสูตรที่มีและไม่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันชนิด PEC-g-Ph (Treated NR/RR/PEC และ Treated NR/RR/PEC with PEC-g-Ph) จะมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏใกล้เคียงกัน และจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟินอลิกเรซิน (NR/RR/PEC with PEC-g-Ph และ NR/RR/PEC)

- การศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินจะให้มอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่ากรณีไม่ใช้สารดัดแปรในการปรับปรุงความเข้ากันได้ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ให้มอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนสูงกว่า นอกจากนี้พบว่าค่า tan δ ของสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินจะมีค่าสูงกว่าสูตรที่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน ในขณะที่การใช้การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิด PEC-g-Ph ให้ค่า tan δ ไม่แตกต่างกัน

- การศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่มีการใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซินจะมีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าสูตรที่ไม่ใช้สารดัดแปรฟีนอลิกเรซิน และเมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph พบว่าการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ PEC-g-Ph จะทำให้เฟสยางเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่า และมีพื้นผิวที่สม่ำเสมอมากกว่า

5.7 การศึกษาอิทธิพลของชนิดยางธรรมชาติต่อสมบัติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติ ยางรีเคลม และโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์

- การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าสเปคตรัมของยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเลขคลื่น 870 cm^{-1}และ 1240 cm^{-1} แสดงถึงหมู่อิพอกไซด์ที่เกาะติดบนโมเลกุลของยางธรรมชาติ และพบว่าความเข้มของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 835 cm^{-1} จะลดลงตามปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

- การศึกษาความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์ พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติอิพอกไซด์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และจะมีค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

- การศึกษาอิทธิพลชนิดยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมการผสม พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์และค่าทอร์กสูงสุดที่การวัลคาไนซ์สมบูรณ์ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะลงลดตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

- การศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติจะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ ในขณะที่เมื่อเปรียบระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์พบว่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีค่าลดลงตามปริมาณของหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นในการศึกษาสมบัติเชิงกลภายหลังการบ่มเร่ง พบว่าความต้านต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดภายหลังการบ่มเร่งของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์จะมีค่าต่ำกว่ายางธรรมชาติเช่นเดียวกับก่อนบ่มเร่ง และพบว่าความต้านทานต่อ

แรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ภายหลังบ่มเร่งจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-50 จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

- การศึกษาสมบัติการไหล พบว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติจะมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยางธรรมชาติอิพอกไซด์ และเมื่อเปรียบระหว่างยางธรรมชาติอิพอกไซด์พบว่าความเค้นเฉือนปรากฏและความหนืดเฉือนปรากฏของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จะมีค่าลดลงตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น

- การศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่ามอดุลัสสะสมและความหนืดเชิงซ้อนของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-50 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่ใช้ยาง ENR-40, ENR-30, ENR-20, ENR-10 และ NR ตามลำดับ ในขณะที่ค่า tan δ ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์เมื่อใช้ชนิดยางธรรมชาติจะให้ค่า tan δ สูงที่สุด รองลงมาคือยาง ENR-10, ENR-20, ENR-30, ENR-40 และ ENR-50 ตามลำดับ

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บรรณานุกรม

เจริญ นาคะสรรค์. 2546. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. สำนักพิมพ์โฟร์เพซ, กรุงเทพมหานคร, หน้า 190-195.

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. 2527. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

ซีตีไซยีดะห์ สายวารี อีย์มาน เลาะยิ และเจริญ นาคะสรรค์. 2551. การศึกษาส่วนผสมระหว่างยางรีเคลมจากเศษถุงมือยางธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เด่นศักดิ์ แก้วกับเพชร. 2558. ยางธรรมชาติเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติอิพอกไซด์กับโคพอลิเอสเทอร์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นุรอัสวารี เจ๊ะโว๊ะ. 2557. อิทธิพลของยางรีเคลมที่เป็นองค์ประกอบในเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกับพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

บุญธรรม นิธิอุทัย ปรีชา ป้องภัย และตุลยพงศ์ ตุลยพิทักษ์. 2555. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง 2, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี.

ปฏิญญา อารีย์. 2556. การนำยางครัมป์กลับมาใช้ใหม่ด้วยเทคนิคการรีเคลมผิวอนุภาคร่วมกับการอัดที่อุณหภูมิสูง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. ยางเทคนิคการออกสูตร, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ภูริพงศ์ วรรณวิไล. 2548. การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์จากยางธรรมชาติอิพอกไซด์เบลนด์กับพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง:กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี, บริษัท ซีโน พับลิชชิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด, กรุงเทพมหานคร, หน้า 50-71.

Prince of Songkla University Pattani Campus

สกุลรัตน์ พิชัยยุทธ์. 2551. เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซีจากการเบลนด์ยางธรรมชาติมาลิเอตกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สวทช). คลังศัพย์ไทย สืบค้นจาก: http://www.thaiglossary.org/search/ยางรีเคลม [มกราคม 24, 2015]

อัญชลี โพธิญาณ. 2551. การเตรียมและสมบัติของยางรีเคลมจากเศษยางหล่อดอกของล้อรถบรรทุก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Adhikari, B., De, D. and Maiti, S. 2000. Reclamation and recycling of waste rubber. Progress in Polymer Science. 25, 909-948.

Baker, C.S.L. and Gelling, I.R. 1987. Epoxidation of natural rubber. In Development in Rubber Technoiogy, A. Whelan and K.S. Lee, editors. Elsevier Applied Science Publishers Ltd, London, England, pp. 87-117.

Berrueco, C., Esperanza, E., Mastral, F.J., Ceamanos, J. and García-Bacaicoa, P. 2005. Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 74, 245-253.

Brydson J.A. 1978. Rubber Chemistry. Applied Science Publishers Ltd, England, pp.255-257.

Chen, F. and Qian, J. 2003. Studies of the thermal degradation of waste rubber. Waste Management. 23, 463-467.

Chuayjuljit S., Soatthiyanon N. and Potiyaraj P. 2006. Polymer blends of epoxy resin and epoxidized natural rubber. Journal of Applied Polymer Science. 102, 452-459.

Coran, A.Y. 2005. Vulcanization. In The science and technology of rubber, J.E. Mark, B. Erman and M. Roland, editors. Elsevier Inc, United states of america, pp. 337-381.

Davey, J.E. and Loadman, M.J.R. 1984. A chemical demonstration of the randomness of epoxidation of natural rubber. British Polymer Journal. 16, 134-138.

Prince of Songkla University Pattani Campus

De, D., Das, A., De, D., Dey, B., Debnath, S.C. and Roy, B.C. 2005. Reclaiming of ground rubber tire (GTR) by a novel reclaiming agent. European Polymer Journal. 47, 1091-1100.

De, D., De, D. and Singharoy, G.M. 2007. Reclaiming of ground rubber tire by a novel reclaiming agent. I. Virgin natural rubber/reclaimed GRT vulcanizates. Polymer Engineering and Science. 47, 1091-1100.

De, D., Panda, P.K., Roy, M. and Bhunia, S. 2013. Reinforcing effect of reclaim rubber on natural rubber/polybutadiene rubber blends. Materials and Design. 46, 142-150.

Duangburong, J., Tantayanon, S. and Bhandhubanyong, P. 2015. A breakthrough challenge with tyre waste management: Thailand perspective. International Journal of Social Science and Humanity. 5, 768-772.

Farahani, T.D., Bakhshandeh, G.R. and Abtahi, M. 2006. Mechanical and viscoelastic properties of natural rubber/ reclaimed rubber blends. Polymer Bulletin. 19, 1241-1250.

Gamlin, C.D., Dutta, N.K. and Choudhury, N.R. 2003. Mechanism and kinetics of the isothermal thermodegradation of ethylene-propylene-diene (EPDM) elastomers. Polymer Degradation and Stability. 80, 525-531.

Gelling, I.R. 1991. Epoxidised natural rubber. Journal of Natural Products. 6, 184-205.

George, S., Ramamurthy, K., Anand, J.S., Groeninckx, G., Varughese, K.T. and Thomas, S. 1999. Rheological behaviour of thermoplastic elastomers from polypropylene/acrylonitrile–butadiene rubber blends: effect of blend ratio, reactive compatibilization and dynamic vulcanization. Polymer. 40, 4325-4344.

Gisbert, N.A., Amoros, C.J.E., Martínez, L.J. and Garcia, A.M. 2007. Study of thermal degradation kinetics of elastomeric powder (ground tire rubber). Polymer-Plastics Technology and Engineering. 47, 36-39.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Hassan, M.M., Badway, N.A., Gamal, A.M., Elnaggar, M.Y. and Hegazy, E.S.A. 2010. Studies on mechanical, thermal and morphological properties of irradiated recycled polyamide and waste rubber powder blends. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 268. 1427-1434.

Hassan, M.M., Badway, N.A., Elnaggar, M.Y. and Hegazy, E.S.A. 2013. Thermo-mechanical properties of devulcanized rubber/high crystalline polypropylene blends modified by ionizing radiation. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 19, 1241-1250.

Holden, G. 2000. Understanding Thermoplastic Elastomers. Hanser Publishers, Munich, Germany, pp. 9-63.

Huang, N. and Wang, J. 2009. A TGA-FTIR study on the effect of $CaCO_3$ on the thermal degradation of EBA copolymer. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 84, 124-130.

Hirano, K. and Asami, M. 2013. Phenolic resins—100 years of progress and their future. Reactive and Functional Polymers. 73, 256-269.

Imyim, A., Sirithaweesit, T. and Ruangpornvisuti, V. 2016. Arsenite and arsenate removal from wastewater using cationic polymer-modified waste tyre rubber. Journal of Environmental Management. 166, 574-578.

John, B., Varughese, K.T., Oommen, Z., Pötschke, P. and Thomas, S. 2003. Dynamic mechanical behavior of high-density polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer blends: The effects of the blend ratio, reactive compatibilization, and dynamic vulcanization. Journal of Applied Polymer Science, 87, 2083-2099.

Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., Chumsamrong, P. and Ruksakulpiwat, Y. 2011. Glycidyl methacrylate grafted natural rubber: synthesis, characterization, and mechanical property. Journal of Applied Polymer Science. 122, 3152-3159.

Kumnuantip, C. and Sombatsompop, N. 2003. Dynamic mechanical properties and swelling behaviour of NR/reclaimed rubber blends. Materials Letters. 57, 3167-3174.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Lee, S.H., Balasubramanian, M., Kim, J.K. 2007. Dynamic reaction inside co-rotating twin screw extruder. II. Waste ground rubber tire powder/polypropylene blends. Journal of Applied Polymer Science. 106, 3209-3219.

Magioli, M., Sirqueira, A. and Soares, B. 2010. The effect of dynamic vulcanization on the mechanical, dynamic mechanical and fatigue properties of TPV based on polypropylene and ground tire rubber. Polymer Testing. 29, 840-848.

Mandal, S.K., Alam, M.N., Roy, K. and Debnath, S.C. 2014. Reclaiming of ground rubber tire by safe multifunctional rubber additives: II virgin natural rubber/reclaimed ground rubber tire vulcanizates. Rubber Chemistry and Technology. 87, 152-167.

Myhre, M., Saiwari, S., Dierkes, W. and Noordermeer, J. 2012. Rubber recycling: chemistry, processing, and applications. Rubber chemistry and technology. 85, 408-449.

Nakason, C., Tobprakhon, A. and Kaesaman, A. 2005. Thermoplastic vulcanizates based on poly (methyl methacrylate)/epoxidized natural rubber blends: Mechanical, thermal, and morphological properties. Journal of Applied Polymer Science. 98, 1251-1261.

Nakason, C., Saiwari, S. and Kaesaman, A., 2006a. Rheological properties of maleated natural rubber/polypropylene blends with phenolic modified polypropylene and polypropylene-g-maleic anhydride compatibilizers. Polymer Testing. 25, 413-423.

Nakason, C., Nuansomsri, K., Kaesaman, A. and Kiatkamjornwong, S. 2006b. Dynamic vulcanization of natural rubber/high-density polyethylene blends: effect of compatibilization, blend ratio and curing system. Polymer Testing, 25, 782-796.

Nelson, P.A. 2003 Studies on the Utilisation of rubber Reclaim in Elastomers. Ph.D. Thesis, Cochin University of Science and Technology.

Nelson, P.A. and Kutty, S.K.N. 2004. Cure characteristics and mechanical properties of maleic anhydride grafted reclaimed rubber/styrene butadiene rubber blends. Polymer-Plastics Technology and Engineering. 43, 245-260.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Noriman, N.Z., Ismail, H. and Rashid, A.A. 2010. Characterization of styrene butadiene rubber/recycled acrylonitrile-butadiene rubber (SBR/NBRr) blends: the effects of epoxidized natural rubber (ENR-50) as a compatibilizer. Polymer Testing. 29, 200-208.

Pasbakhsh, P., Ismail, H., Fauzi, M.A. and Bakar, A.A. 2009. Influence of maleic anhydride grafted ethylene propylene diene monomer (MAH-g-EPDM) on the properties of EPDM nanocomposites reinforced by halloysite nanotubes. Polymer Testing. 28, 548-559.

Pichaiyut, S., Nakason, C., Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. 2008. Influences of blend compatibilizers on dynamic, mechanical, and morphological properties of dynamically cured maleated natural rubber and high-density polyethylene blends, Polymer Testing. 27, 566-580.

Poh, B.T., Ismail, H., Quah, E.H. and Chin, P.L. 2000. Cure and mechanical properties of filled SMR L/ENR 25 and SMR L/SBR blends. Journal of Applied Polymer Science. 81, 47-52.

Rattanasom, N., Poonsuk, A. and Makmoon, T. 2005. Effect of curing system on the mechanical properties and heat aging resistance of natural rubber/tire tread reclaimed rubber blends. Polymer Testing. 24, 728-732.

Rajan, V.V., Dierkes, W.K., Joseph, R. and Noordermeer, J.W.M. 2006. Science and technology of rubber reclamation with special attention to NR-based waste latex products. Progress in Polymer Science. 31, 811-834.

Saiwari, S. 2013. Post-Consumer Tires Black into New Tires, De-Vulcanization and Reutilization of Passenger Car. Ph.D. Thesis, University of Twente.

Shanmugharaj, A.M., Kim, J.K. and Ryu, S.H. 2007. Modification of rubber powder with peroxide and properties of polypropylene/rubber composites. Journal of Applied Polymer Science. 104, 2237-2243.

Shi, J., Zou, H., Ding, L., Li, X., Jiang, K., Chen, T., Zhang, X., Zhang, L. and Ren, D. 2014. Continuous production of liquid reclaimed rubber from ground tire rubber and its application as reactive polymeric plasticizer. Polymer Degradation and Stability, 99, 166-175.

Prince of Songkla University Pattani Campus

Sombatsompop, N. and Kumnuantip, C. 2003. Rheology, cure characteristics, physical and mechanical properties of tire tread reclaimed rubber/natural rubber compounds. Journal of Applied Polymer Science. 87, 1723-1731.

Tantayanon, S. and Juikham, S. 2004. Enhanced toughening of poly(propylene) with reclaimed-tire rubber. Journal of Applied Polymer Science. 91, 510–515.

Wongthong, P., Nakason, C., Pan, Q., Rempel, G.L. and Kiatkamjornwong, S. 2015. Influences of the phenolic curative content and blend proportions on the properties of dynamically vulcanized natural rubber/acrylonitrile–butadiene–styrene blends. Journal of Applied Polymer Science, 36, 42520.

Wu, H.D., Ma, C.C.M. and Lin, J.M., 1997. Processability and properties of phenoxy resin toughened phenolic resin composites. Journal of Applied Polymer Science. 63, 911-917.

Zanchet, A., Carli, L.N., Giovanela, M., Brandalise, R.N. and Crespo, J.S. 2012. Use of styrene butadiene rubber industrial waste devulcanized by microwave in rubber composites for automotive application. Materials and Design. 39, 437-443.

Zhang, X., Zhu, X., Liang, M. and Lu, C. 2009a. Improvement of the properties of ground tire rubber (GTR)-filled nitrile rubber vulcanizates through plasma surface modification of GTR powder. Journal of Applied Polymer Science. 114, 1118-1125.

Zhang, S.L., Zhen Xin, Z.X., Zhang, Z.X. and Kim, J.K. 2009b. Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder. Waste Management. 29, 1480-1485.

Prince of Songkla University Pattani Campus

ภาคผนวก

เอกสารตีพิมพ์ในการประชุม (proceeding) จากการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์ในงานประชุม

International Polymer Conference of Thailand (PCT-6)

ณ Pathumwan Princess Hotel กรุงเทพมหานคร

ระหว่างวันที่ 30 มิถุนายน – 1 กรกฎาคม 2559

Prince of Songkla University Pattani Campus

RUBCOM-O13

Improved Properties of Natural Rubber/Reclaimed Rubber/Propylene Ethylene CopolymerThermoplastic Vulcanizates as Affected by Modifying Methods

Witchuda Nakasan, Sitisaiyidah Saiwari and Anoma Thitithammawong*
Department of Rubber Technology and Polymer Science, Faculty of Science and Technology,
Prince of Songkla University, Pattani Campus, Pattani, 94001, Thailand
Phone +66 73 312213, *E-Mail: anoma.t@psu.ac.th

Abstract

Thermoplastic vulcanizates (TPVs) based on natural rubber, reclaimed rubber and propylene ethylene copolymer NR/RR/PEC blends at blend proportion of 30/30/40 wt% were prepared. The effect of modifying methods on mechanical, rheological and morphological properties of TPVs was studied. It was found that TPV with phenolic resin showed better tensile strength, elongation at break and tendency to recover from prolonged extension than the TPV without modifier. Moreover, rheological properties and phase morphology were also improved with the addition of phenolic. The melt blending method gave the TPV with better overall properties than those of the reactive blended TPV. Further increase phenolic content the better phase compatibility was achieved.

Keywords: Thermoplastic vulcanizates, Natural rubber, Reclaimed rubber, Modifying methods, Phenolic resin

1. Introduction

Increasing high consumption of rubber products leads to large amount of rubber wastes disposed to environment. More than million tons of rubber wastes, mainly used tires, are still be the environmental problems [1] as their molecules are crosslinked and they need very long time for completely natural degradation.

Reclamation is one technique using either thermal mechanical or chemicals to recycle the waste of crosslinked rubbers [2]. After reclamation, reclaimed rubber can be partially vulcanized again and it is partly used as raw rubber in new rubber product for cost reduction. However, reclaimed rubber in general has poor mechanical properties in comparison to virgin rubbers. Also, it has inferior physical and/or chemical compatibility with other rubbers or polymers leading to phase separation of developed rubber compound [3]. Therefore, phase compatibility is a significant issue for use of reclaimed rubber in order to achieve vulcanizates with acceptable properties [4]. Many research works have been done on study the way to improve compatibility between reclaimed rubber and other polymers. For example, surface modifications of RR have been done to improve the compatibility of RR with a polymer matrix [5-7]. Maleic anhydride (MA), bitumen, and allylamine were preferably applied as modifying agent to promote blend compatibility by increasing of phase adhesion [5-9]. Various irradiation techniques and plasma treatment were also used to activate reactive sites in the blends containing reclaimed rubber [10-11]. The reactive sites chemically reacted among phase and increased phase compatibility.

Propylene ethylene copolymer (PEC) offers an outstanding combination of clarity, heat-sealability, elasticity, softness, processability, and compatibility in blends in film, sheet, and molded products. It has been used as thermoplastic phase for production of TPVs with regard to good impact strength and processability [12-13].

In the present work, TPVs based on NR/RR/PEC blends were prepared at a blend ratio of NR/RR/PEC = 30/30/40 wt% by dynamic vulcanization. Effect of modifying methods and phenolic resin contents on the properties of the blends were investigated.

Prince of Songkla University Pattani Campus

2. Experimental

2.1 Materials

Ribbed smoke sheet no.3 typed natural rubber (NR) was produced by Local Farmer Cooperation, Pattani, Thailand. Reclaimed rubber (RR) was purchased from Union Commercial Development Co., Ltd. Samutprakan, Thailand. Propylene ethylene copolymer, versify®3300, (PEC) was supplied by Dow Chemical Company, USA. Hydroxymethylol phenolic resin (HRJ-10518) manufactured by Schenectady International Inc, USA was used as modifying agent. Stannous chloride dehydrate ($SnCl_2.2H_2O$) used as a catalyst for phenolic resin was manufactured by Carlo Erba Reagent (France). The compound ingredients were zinc oxide (Global Chemical, Thailand), stearic acid (Imperial Chemical, Thailand), white oil (Maoming Fulida Chemical, China), wingstay L (Eliokem, USA), *N*-tert-butyl-2-benzothiazyl sulfenamide or TBBS (Flexys, USA), and sulfur (Siam Chemical, Thailand). All ingredients were used as received.

2.2 Preparation of NR/RR/PEC blends

NR/RR/PEC blends were prepared at a fixed blend ratio of 30/30/40 wt% in an internal mixer using compound formulation as given in Table 1.

Table 1. Compound formulation of NR/RR/PEC TPVs.

Ingredients	Quantity (phr)
NR	100
RR	90
PEC	67
HRJ-10518	0, 3, 5, 7, 10
$SnCl_2.2H_2O$	1
Aromatic oil	10
Stearic acid	1
ZnO	5
Wingstay L	1
TBBS	0.8
Sulphur	4

* RR, containing 55.5% rubber content

** Blend ratio of NR/RR/PEC at 30/30/40 wt%

Mixing conditions were set at a fill factor of 0.80, mixing temperature of 155°C and at a rotor speed 60 rpm. In the present work, phenolic modifier was incorporated into the prepared blends in two different mixing methods. They were melt mixing and reactive blending as schematic diagram illustrated in Fig. 1. The blend without addition of modifier (called control) was also done for a comparison purpose. After completion of mixing, the mixture was removed from the chamber, immediately sheeted out on two roll mills and kept at room temperature for one day before further process. Test specimens were later prepared by compression molding at 165°C and preconditioned before test and characterization. In addition, the procedure which give the best properties of NR/RR/PEC TPV was later chosen and use in the part of study the effect of modifier content.

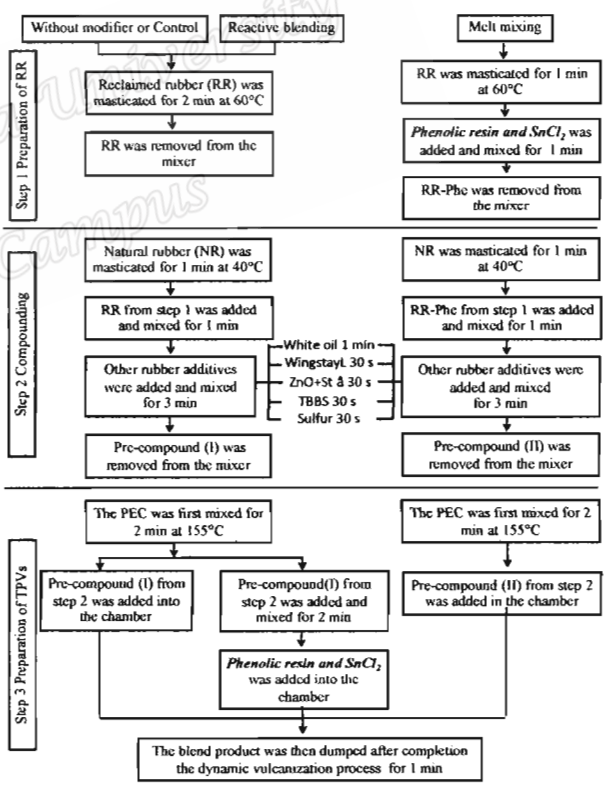


Fig. 1 Schematic diagram for mixing procedure for the preparation of NR/RR/PEC TPVs.

2.3 Testing procedures

2.3.1 Mechanical Properties

Tensile properties were measured on dumbbell shape

specimens using a Hounsfield Tensometer H 10 KS (the Hounsfield Test Equipment Co., Ltd, U.K.) in accordance with the procedure described in ASTM D412 at a constant cross-head speed of 500 mm/min. Tension set was tested at room temperature after stretching the samples for 10 min at 100% strain. Three specimens were tested for each sample and average value was reported.

2.3.2 Dynamic properties

Dynamic properties of the TPVs were established using a rotorless oscillating shear rheometer (RheoTech MDPT, Cuyahoya Falls, USA) at 165°C. The oscillation frequency was set in the range of 1–10 Hz at a constant strain of 3%. This was to ensure that the test was located in the linear viscoelastic region.

2.3.3 Morphological properties

Scanning electron microscope (model VP 1450, Leo, UK) was employed to examine morphology of extracted surface of NR/RR/PEC TPVs. The samples were cryogenically fractured in liquid nitrogen. The PEC phase was preferentially extracted by immersing the fractured surface into toluene for 30 minutes. The samples were dried in an oven at 40°C for 24 h to eliminate the solvent, and gold coated before characterization.

Prince of Songkla University Pattani Campus

3. Results and Discussion

3.1 Effect of modifying methods on properties of NR/RR/PEC TPVs

Fig. 2 shows stress-strain curves of the NR/RR/PEC TPVs. It is seen that all TPVs show similar values of the initial slope at the beginning of the curves. All stress-strain curves of the TPVs behaved the character of soft and tough elastic material. Slight increase of modulus and tensile stress can be seen in the TPVs with addition of modifier. The NR/RR/PEC TPV with melt mixing method show highest tensile strength with more or less the same value of elongation at break when compared with the reactive blended TPV and the TPV without modifier. Furthermore, improvement of phase compatibility in the presence of modifier can be clearly seen from decreased tension set of the TPVs with modifier as shown in Fig. 3. This can be explained by a function of phenolic resin. That is, during melt blending, graft copolymer of rubbers with phenolic resin occurred due to reactive methyol groups in the phenolic molecules can easily react with double bonds in the rubber chains [14] as reaction scheme shown in Schemes 1. This graft copolymer later reacted with rubber and PEC phases to form chemical reaction among phase [14]. Hence, increase of higher stress for tensile deformation and failure and also improvement of tension set are seen in Fig. 2 and 3.

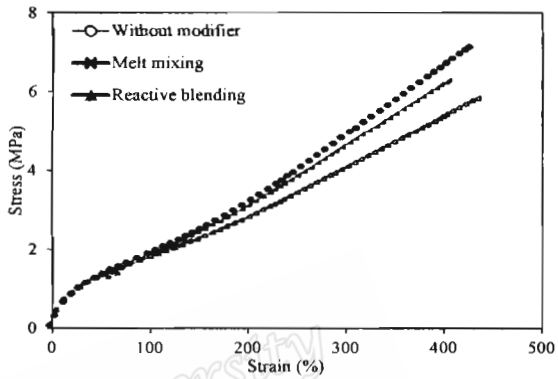


Fig. 2 Stress-strain curve of NR/RR/PEC TPVs prepared by different modifying methods.

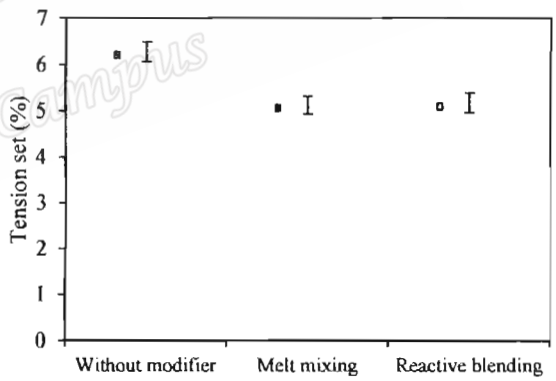
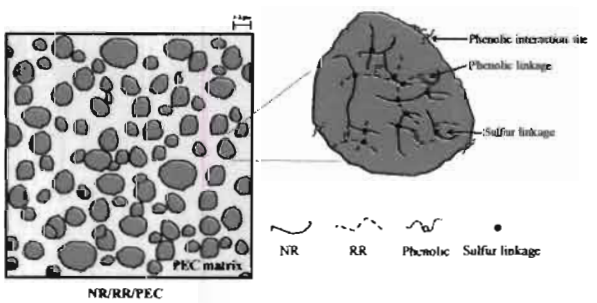


Fig. 3 Tension set of NR/RR/PEC TPVs prepared by different modifying methods.

In addition, comparing between two modifying methods used, the melt mixing NR/RR/PEC TPV which phenolic resin was located in the RR phase seemed to give better tensile strength and elongation at break than the reactive blending TPV. This is attributed to in the melt mixing process graft copolymer of RR with phenolic (RR-Phe) was firstly prepared. This graft copolymer can further compatible with the NR phase. Therefore, the interfacial adhesion of rubber component in the investigated blend system is promoted leading to more

compatible rubber phase prior to mix with the PEC [15-17]. Moreover, addition of phenolic resin at the beginning of mixing process, there was an enough mixing time for phenolic to possess chemical reaction when compared to the reactive blending method. In the reactive blending, phenolic resin was added in the step 3 with short time for dispersion and reaction in the blend component. Therefore, this might be a reason that the NR/RR/PP TPV with reactive blending had inferior mechanical properties in relative to those of the melt mixing TPV.



Scheme 1. Possible reaction between phenolic resin and natural rubber.

Dynamic mechanical properties of NR/RR/PEC TPVs with variation of modifying methods were also studied and results are shown in Fig. 4. Results show material characteristic of pseudoplastic or shear thinning behavior. In addition, storage modulus and complex shear viscosity (Fig. 4(a) and (b)) slightly increased with incorporation of phenolic resin. Also, tan δ clearly decreased to lower value (Fig. 4(c)).These observations are due to the phenolic modifier caused improvement of interfacial interaction among phases. The occurrence of chemical reaction by means of phenolic resin resulted in higher shear torque for molecular movement to desired strain [18]. As a consequence, storage modulus and complex shear viscosity of NR/RR/PEC TPVs with modifier were higher than those of the control TPV at a given tested frequency. In the case of tan δ, a drop of tan δ means material has good elastic response with low damping in its molecules. The chemical reaction promoted by phenolic resin helped polymer molecules of the modified NR/RR/PEC TPVs can better relax applied stress with low heat generated in molecules or loss modulus leading to low value of tan δ.

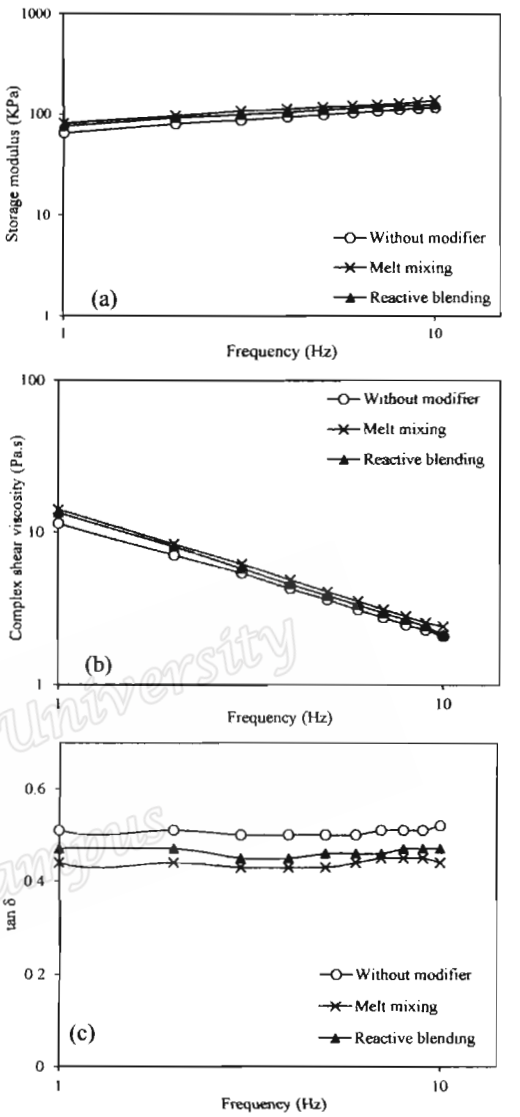


Fig. 4 Dynamic properties in a term of (a) storage modulus, (b) complex viscosity and (c) tan δ as function of frequency of NR/RR/PEC TPVs with various modifying methods.

Focusing on two different modifying methods, the TPVs prepared by melt mixing and reactive blending had identical test results of storage modulus and complex shear viscosity. However, the melt mixing technique gave the TPV with lowest tan δ. This is because of different incorporation step of phenolic resin as discussed earlier. The melt mixing method allowed the phenolic to firstly locate in the RR phase before further reacted with NR and

Prince of Songkla University Pattani Campus

PEC. In combination, this method provided enough time for phenolic to disperse and function. Therefore, the melt mixing showed stronger effect on phase compatibility of the TPVs.

Morphological study of the NR/RR/PEC TPVs was investigated using secondary electron SEM mode. Fig. 5 shows SEM micrographs of the toluene extracted surface of the NR/RR/PEC TPVs with various modifying methods. It is seen that the blends with different modifying method exhibited different surface morphologies. The surface morphology of the TPV without modifier (the control) and the TPV prepared by reactive blending method were more roughness than the surface morphology of the TPV prepared by melt mixing. The more roughness fracture surface means that the interfacial adhesion of the blend component is poor [9]. Incorporation of phenolic resin by means of melt mixing provides more smooth surface of the TPV than the others as an affected of chemical reaction caused by phenolic resin [19].

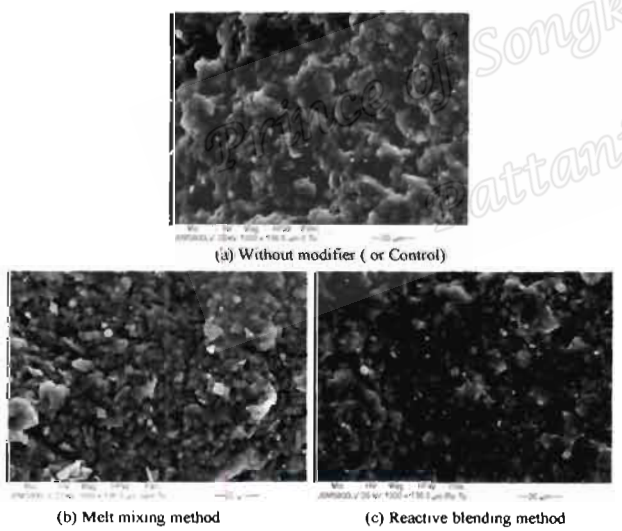


Fig. 5 SEM micrographs of NR/RR/PEC TPVs prepared by various modifying methods.

3.2 Effect of quantity of phenolic resin on properties of NR/RR/PEC TPVs prepared by melt mixing method

From previous study, the melt mixing process was chosen and used in the study of influence of quantity of phenolic resin. Figs. 6 and 7 show mechanical properties of the NR/RR/PEC TPVs. It is seen that tensile strength increased with increasing quantity of phenolic resin from 0 to 10 phr while as elongation at break and tension set slightly decreased. This was due to the raising of phenolic resin can perform more chemical interaction between RR and NR resulting to more compatible rubber phase which later dispersed in the PEC matrix with good interfacial adhesion. Additionally, small drop of tension set at 5 phr of phenolic resin might be attributed to an excess amount of phenolic resin caused phase separation and slightly hardened the TPV.

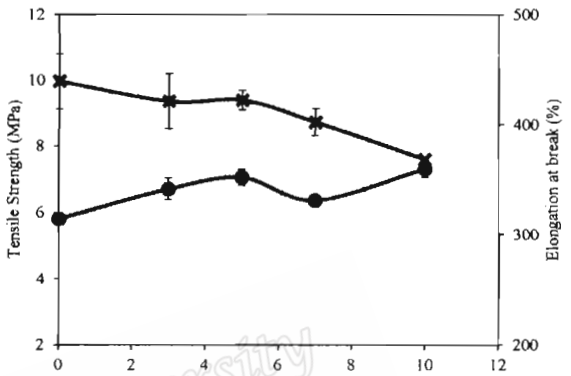


Fig. 6 Effect of phenolic resin content on the tensile strength and elongation at break of NR/RR/PEC TPVs.

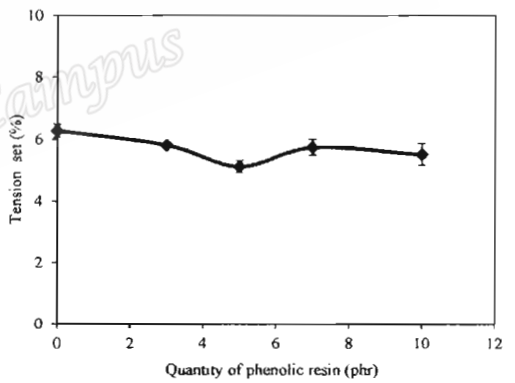


Fig. 7 Effect of phenolic resin content on tension set of NR/RR/PEC TPVs.

Fig.8 shows dynamic mechanical properties of the NR/RR/PEC TPVs with varying quantity of phenolic resin. Higher compatibility in the TPV can be seen from gradual increasing of storage modulus and complex shear viscosity together with decreasing of tan δ. At very high test temperature i.e. 165°C, the TPV almost melted as thermoplastic having vulcanized rubber particles as filler. The molten TPV was flowed in a direction of force (shear torque). Higher interfacial adhesion among phases yielded higher shear force for molten TPV to flow. Therefore,

Prince of Songkla University Pattani Campus

increasing of storage modulus and complex shear viscosity were observed with increasing the phenolic content. Furthermore, good phase compatibility caused better stress relaxation at the interface and hence lower damping in polymer molecules as clearly noticed from the lower tan δ.

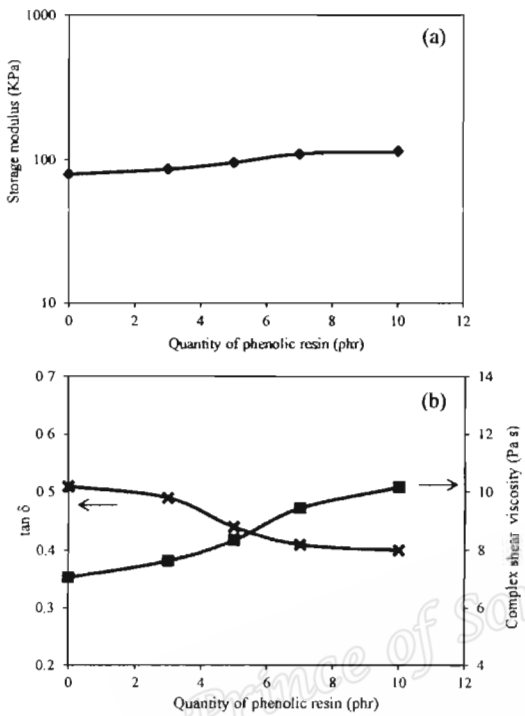


Fig. 8 (a) Storage modulus and (b) complex viscosity and tan δ at a frequency of 2 Hz of NR/RR/PEC TPVs with phenolic resin content.

Fig. 9 shows SEM micrographs of the NR/RR/PEC TPVs with varying phenolic content. Finer phase morphology of the fractured surface TPVS was obviously seen with increasing content of phenolic resin. This morphology is corresponding to the results of mechanical and dynamic properties of the NR/RR/PEC TPVs. Increasing of interfacial adhesion among phases as previously discussed yielded to an improvement of phase compatibility. Therefore, finer phase distribution or smooth fractured surface of the TPVs with increasing the phenolic content was found. This developed morphology impacted on improvement of mechanical, dynamic, and rheological properties of the TPVs in previously results.

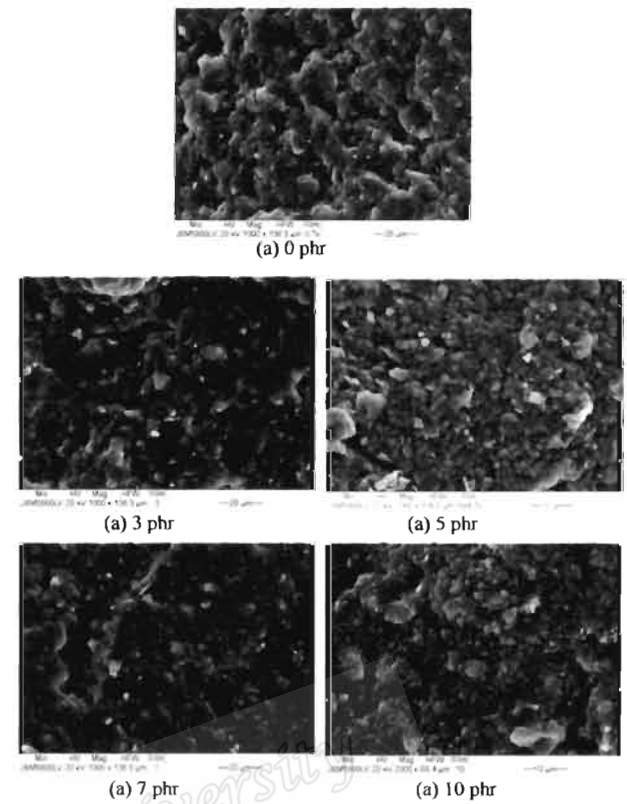


Fig. 9 SEM micrographs of NR/RR/PEC TPVs with phenolic content.

Prince of Songkla University Pattani Campus

4. Conclusion

The properties of NR/RR/PEC TPVs are affected by modifying method. The presence of phonolic modifier could promote improvement of mechanical, dynamic, and rheological properties of the modified NR/RR/PEC TPVs. The melt mixing method was the best method used for addition of phenolic resin due to this method provided enough time for chemical reaction of phenolic with other polymers phases and also it controlled the location of the phenolic in the RR phase. Quantity of phenolic content impacted on properties of the TPVs as well. It was seen that property improvement of TPVs can be clearly seen with increasing phenolic content in the blend system.

References

[1] Duangburong, J., Tantayanon, S., Bhandhubanyong, P. "A breakthrough challenge with tyre waste management: thailand perspective", *Int. J. Soc. Sci. Human.*, 5, 768-772 (2015).

[2] Isayev, A.I., "Recycling of rubbers", In: Erman, B., Mark, J.E., Roland, C.M. (eds) *The science and*

technology of rubber, United states of America: 697-764 (2013).

[3] Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C.T., Chuah, A.L., Rashmi, W. "Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future", *Prog. Mater. Sci.*, 72, 100-140 (2015).

[4] Fan, P., Lu, C. "A study on functionalization of waste tire rubber powder through ozonization", *J. Polym. Environ.*, 19, 943-949 (2011).

[5] Shanmugharaj, A.M., Kim, J.K., Ryu, S.H. "Modification of rubber powder with peroxide and properties of polypropylene/rubber composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, 104, 2237-2243 (2007):

[6] Naskar, A.K., De, S.K., Bhowmick, A.K. "Thermoplastic elastomeric composition based on maleic anhydride–grafted ground rubber tire", *J. Appl. Polym. Sci.*, 84, 370-378 (2002).

[7] Zhang, S.L., Xin, Z.X., Zhang, Z.X., Kim, J.K. "Characterization of the properties of thermoplastic elastomers containing waste rubber tire powder", *Waste. Manage.*, 29, 1480-1485 (2009).

[8] Lu, X., Wang, W., Yu, L. "Waste ground rubber tire powder/thermoplastic vulcanizate blends: Preparation, characterization, and compatibility", *J. Appl. Polym. Sci.*, 131, 39868 (2014).

[9] Lee, S.H., Balasubramanian, M., Kim, J.K. "Dynamic reaction inside co-rotating twin screw extruder. II. Waste ground rubber tire powder/polypropylene blends", *J. Appl. Polym. Sci.*, 106, 3209-3219 (2007).

[10] Hassan, M.M., Badway, N.A., Elnaggar, M.Y., Hegazy, E.S.A. "Thermo-mechanical properties of devulcanized rubber/high crystalline polypropylene blends modified by ionizing radiation", *J. Ind. Eng. Chem.*, 19, 1241-1250 (2013).

[11] Zhang, X., Zhu, X., Liang, M., Lu, C. "Improvement of the properties of ground tire rubber (GTR)-filled nitrile rubber vulcanizates through plasma surface modification of GTR powder", *J. Appl. Polym. Sci.*, 114, 1118-1125 (2009).

[12] Rajeshbabu, R., Gohs, U., Naskar, K., Thakur, V., Wagenknecht, U., Heinrich, G. "Preparation of polypropylene (PP)/ethylene octene copolymer (EOC) thermoplastic vulcanizates (TPVS) by high energy electron reactive processing", *Radiat. Phys. Chem.*, 80, 1398-1405 (2011).

[13] Da Silva, A.L.N., Rocha, M.C.G., Coutinho, F.M.B., Bretas, R., Scuracchio, C. "Rheological, mechanical, thermal, and morphological properties of polypropylene/ethylene-octene copolymer blends", *J. Appl. Polym. Sci.*, 75, 692-704 (2000).

[14] Nakason, C., Nuansomsri, K., Kaesaman, A. Kiatkamjornwong, S. "Dynamic vulcanization of natural rubber/high-density polyethylene blends: Effect of compatibilization, blend ratio and curing system", *Polym. Test.*, 25, 782-796 (2006).

[15] Jose, S., Thomas, S., Parameswaranpillai, J., Aprem, A.S. Kocsis, J. "Dynamic mechanical properties of immiscible polymer systems with and without compatibilizer", *Polym Test.*, 44, 168-176 (2015).

[16] Ohlsson, B., Hassander, H., Törnell, B. "Effect of the mixing procedure on the morphology and properties of compatibilized polypropylene/polyamide blends", *Polymer*, 39, 4715-4721 (1998).

[17] Thipmanee, R., Lukubira, S., Ogale, A.A., Sane, A. "Enhancing distributive mixing of immiscible polyethylene/thermoplastic starch blend through zeolite ZSM-5 compounding sequence". *Carbohyd. Polym.*, 136, 812-819 (2016).

[18] Nakason, C., Saiwari, S., Kaesaman, A. "Rheological properties of maleated natural rubber/polypropylene blends with phenolic modified polypropylene and polypropylene-g-maleic anhydride compatibilizers", *Polym .Test.*, 25, 413-423 (2016).

[19] Pichaiyut, S., Nakason, C., Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. "Influences of blend compatibilizers on dynamic, mechanical, and morphological properties of dynamically cured maleated natural rubber and high-density polyethylene blends", *Polym. Test., 27*, 566-580 (2008).

Prince of Songkla University Pattani Campus

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาววิชชุดา นาคะสรรค์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5720320103

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.เทคโนโลยียาง)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2557

ทุนการศึกษา

1. ทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2557 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ทุนกำหนดทิศทาง ประจำปีการศึกษา 2557 กองทุนวิจัยวิทยาเขตปัตตานี
3. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ผลงานที่ตีพิมพ์เผยแพร่

Nakasan, W., Saiwari, S. and Thitithammawong, A. 2016. Improved properties of natural rubber/reclaimed rubber/propylene ethylene copolymer thermoplastic vulcanizates as affected by modifying methods. International Polymer Conference of Thailand (PCT-6), Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, June 30-July 1, 2016, 234-240.

Prince of Songkla University Pattani Campus