

สมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนของยางผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์

**THE MECHANICAL PROPERTIES AND NYLON CORD
ADHESION OF NATURAL RUBBER / EPOXIDIZED NATURAL
RUBBER BLENDS**

นายกิติกร สโมสร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบในล่อนของยางผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์

นายกิติกร สโมสร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนของยางผสมระหว่าง
ยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์
The Mechanical Properties and Nylon Cord Adhesion of Natural
Rubber/Epoxidized Natural Rubber Blends

ชื่อ - นามสกุล นายกิติกร สโมสร
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันททิพ สกุลเหมฤทัย, Ph.D.
ปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีย์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(อาจารย์กัลทิมา เชาวัญชัยกุล, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(อาจารย์สุนนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันททิพ สกุลเหมฤทัย, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 27 เดือน กันยายน พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์
ชื่อ – นามสกุล	นายกิติกร สโมสร
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันททิพ สกุลเขมฤทัย, Ph.D.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารตัวเติมและเกรดของยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ที่อัตราส่วน 90:10

โดยในงานวิจัยจะใช้ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ 2 เกรดคือยาง ENR25 และ ENR50 โดยใช้สารตัวเติม 3 ชนิด คือซิลิกา เหม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตโดยทำการเติมที่ 10 phr สมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเหนียวนี้ พฤติกรรมการคงรูป สมบัติเชิงกล การยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนและสมบัติการเก็บกักอากาศ ผสมยางเข้ากับสารตัวเติมโดยใช้เครื่องผสมยางแบบนิกเคอร์และนำยางคอมพาวด์ที่ได้มาศึกษาความเหนียวนี้และพฤติกรรมการคงรูป นำยางคอมพาวด์ที่เตรียมไว้มาทำการวัลคาไนซ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 150 °C โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปจากนั้นนำยางวัลคาไนซ์ที่ได้ไปทำการศึกษาสมบัติเชิงกล, การยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนและการเก็บกักอากาศ

ผลการทดลองพบว่า การเติมซิลิกาทำให้ยางคอมพาวด์มีความเหนียวที่สุดและยังเพิ่มเวลาการเริ่มคงรูปและเวลาการคงรูปที่เหมาะสม การเติมเหม่าดำปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติและยางผสมได้สูงที่สุดตามด้วยซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ โดยในยางผสม NR/ENR50 จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางผสม NR/ENR25 และยางธรรมชาติสำหรับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ผลการทดสอบการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอนกับยางพบว่าซิลิกาให้ค่าการยึดเกาะที่ดีที่สุดและในยางผสม NR/ENR50 จะให้ค่าการยึดเกาะที่ดีกว่ายางผสม NR/ENR25 และยางธรรมชาติ ส่วนสุดท้ายคือผลการทดสอบสมบัติการเก็บกักอากาศพบว่าเหม่าดำให้สมบัติด้านการเก็บกักอากาศที่ดีสุดรองลงมาคือซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต โดยที่ในยางผสม NR/ENR50 จะให้สมบัติด้านการเก็บกักอากาศที่ดีกว่ายางผสม NR/ENR25 และยางธรรมชาติ

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ ยางผสม การยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอน

Thesis Title The Mechanical Properties and Nylon Cord Adhesion of Natural Rubber/Epoxidized Natural Rubber Blends

Name – Surname Mr. Kitikorn Samosorn

Program Materials Engineering

Thesis Advisor Assistant Professor Chuntip Sakulphaemaruehai, Ph.D.

Academic Year 2017

ABSTRACT

The objective of this research was to investigate the effects of fillers and epoxidized natural rubber grades on natural rubber (NR) and epoxidized natural rubber blend at the ratio of 90:10.

Two grades of epoxidized natural rubber, ENR25 and ENR50, were used, and 3 fillers, namely silica, carbon black and calcium carbonate, were added at the loading level of 10 phr. Mooney viscosity, cure characteristics, mechanical properties, nylon cord adhesion and gas barrier properties of the rubber blends were studied. The fillers were mixed with the rubber blends by the kneader mixer. After that, the Mooney viscosity and cure characteristics of the rubber compounds were determined. The rubber compounds were then vulcanized at 150°C by the compression molding machine. The mechanical properties, nylon cord adhesion and gas barrier properties of the vulcanized rubber were investigated.

Results showed that the rubber compounds filled with silica had the highest level of Mooney viscosity, and their scorch time and cure time were also increased. Carbon black could improve mechanical properties of natural rubber and rubber blends the most, followed by silica and calcium carbonate. NR/ENR50 blends had higher mechanical properties than NR/ENR25 blends and NR. Silica yielded the best nylon cord adhesion. NR/ENR50 blends had higher nylon cord adhesion than NR/ENR25 blends and NR. Finally, carbon black yielded greater gas barrier properties than silica and calcium carbonate. NR/ENR50 blends had better gas barrier properties than NR/ENR25 blends and NR.

Keywords: natural rubber, epoxidized natural rubber, rubber blends, nylon cord adhesion

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากหลายฝ่ายก่อนอื่นทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉันททิพ สุกุลเหมฤทัย เป็นอย่างสูงที่ช่วยให้คำแนะนำคำปรึกษาตลอดมาจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีช์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สุมนนมาลย์ เนียมกลาง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ดร.กัลทิมา เชาวัญชัยกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและบริษัทเอ็นดีรับเบอร์จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา-มารดาและครอบครัวผู้ที่คอยให้การสนับสนุนการศึกษา กำลังใจ กำลังทรัพย์ ตลอดจนผู้ที่ให้การสนับสนุนท่านอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวลง ณ ที่นี้ด้วย

กิติกร สโมสร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูปภาพ.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	15
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR).....	19
2.2 ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber : ENR).....	22
2.3 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agents).....	25
2.4 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators).....	26
2.5 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (Activators and Retarders).....	27
2.6 สารตัวเติม (Fillers).....	28
2.7 ยางล้อ.....	30
2.8 เครื่องผสมยาง.....	33
2.9 การขึ้นรูปและการคงรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์.....	35
2.10 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer : MDR).....	36
2.11 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (Universal testing machine).....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 การทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดยางกับเส้นไนล่อน (Adhesion of tire cords)	38
2.13 เครื่องทดสอบสมบัติการกักเก็บอากาศของยาง	39
2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM)	42
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	49
3.3 วิธีการทดลอง	50
3.4 สถานที่และเวลาทำการวิจัย	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	54
4.1 การศึกษาความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	54
4.2 การศึกษาพฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristic)	55
4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	58
4.4 ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนล่อนกับยาง (H-Adhesion Test)	63
4.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)	65
4.6 การศึกษาสมบัติด้านการกักอากาศ (Gas barrier properties).....	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก	82
ภาคผนวก ข	85
ภาคผนวก ค	102
ประวัติผู้เขียน.....	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	48
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	49
ตารางที่ 3.3 สูตรยาที่ใช้ทดลองในงานวิจัย	50



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ (Cis-1,4-polyisoprene)	19
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติฟ็อกไซค์	22
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิคล้ายแก้วที่ระดับหม้อพอกไซค์ต่างๆ.....	24
รูปที่ 2.4 ยางล้อชนิดต่างๆ Passenger car tyre (A), Truckbus tyre (B) and Mortorcycle tyre (C)	30
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของยางล้อ	30
รูปที่ 2.6 ผ้าใบไนลอน (Tyre cord fabric)	32
รูปที่ 2.7 โครงสร้าง Nylon 6.....	32
รูปที่ 2.8 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	33
รูปที่ 2.9 เครื่องแบบปิดชนิด Kneader.....	34
รูปที่ 2.10 เครื่อง Compression Moulding.....	35
รูปที่ 2.11 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer : MDR)	36
รูปที่ 2.12 เครื่อง Universal testing machine.....	37
รูปที่ 2.13 ชั้นทดสอบแบบ H-Test	38
รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบการกักเก็บอากาศ	39
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบการกักเก็บอากาศ (ต่อ)	40
รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM).....	42
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง	52
รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr	55
รูปที่ 4.2 ค่า t_{s2} ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr.....	57
รูปที่ 4.3 ค่า T_{c90} ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr.....	57
รูปที่ 4.4 ความแข็ง (Hardness : Shore A) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr	58

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength : MPa) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr.....	60
รูปที่ 4.6 โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (300% Modulus : MPa) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr.....	61
รูปที่ 4.7 ความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength : MPa) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr.....	62
รูปที่ 4.8 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break : %) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr	62
รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายคววมในล่อน 6 กีบยาง (H-Adhesion Test) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr.....	63
รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10	66
รูปที่ 4.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมซิลิกาที่ 10 phr.....	67
รูปที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมเขม่าดำที่ 10 phr.....	68
รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 phr	69
รูปที่ 4.14 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10	70
รูปที่ 4.15 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมซิลิกาที่ 10 phr	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมเขม่าดำที่ 10 phr	72
รูปที่ 4.17 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 phr	73
รูปที่ 4.18 ระยะเวลาการสูญเสียความดันเริ่มต้น (Initial pressure loss period) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr	74
รูปที่ 4.19 ความดันที่สูญเสียไปหลังจาก 360 ชั่วโมง (Pressure loss after 360 hr.) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr	74



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

NR	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)
ENR	ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (Epoxidized natural rubber)
ENR25	ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีจำนวน โมล 25% เกิดการอีพ็อกซิเดชัน
ENR50	ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ที่มีจำนวน โมล 50% เกิดการอีพ็อกซิเดชัน
SBR	ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-butadiene rubber)
BR	ยางบิวตาไดอีน (Butadiene Rubber)
IIR	ยางบิวไทล์ (Butyl Rubber)
EPDM	ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Dienerubber)
NBR	ยางไนไตรล์ (Nitrile butadiene rubber)
NBRr	ยางไนไตรล์รีไซเคิล (Nitrile butadiene rubber Recycle)
CR	ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber)
CIIR	ยางคลอโรบิวไทล์ (Chloro-Butyl Rubber)
Phr	หนึ่งส่วนต่ออย่าง 100 ส่วน (Parts per hundred of rubber)
ZnO	ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide)
CaCO ₃	แคลเซียมคาร์บอเนต Calcium Carbonate
SMR L	ยางธรรมชาติมาตรฐานมาเลเซียเกรด (Standard Malaysian Rubber เกรด L)
ESBS	Styrene-(Eoxidized butadiene)-Styrene Triblock Copolymer
MBT	2-mercaptobenzothiazole
MBTS	Dibenzothiazyl disulfide
CBS	N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide
TBBS	N-tert.butyl-2-benzothiazole sulfonamide
DCBS	N,N'-dicyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide
MBS	2-(4-morpholiniothio) benzothiazole
ZDMC	Zinc dimethyldithiocarbamate
ZDEC	Zinc diethyldithiocarbamate
ZBEC	Zinc dibenzylidithiocarbamate
TMTD	Tetramethylthiuram disulfide

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TMTM	Tetramethylthiuram monosulfide
TBzTD	Tetrabenzylthiuram disulfide
DPG	Diphenylguanidine
DOTG	Di-o-tolylguanidine
OTBG	O-tolylbiguanide
CTP	Cyclohexyl-N-thiophthalimide
DEG	Diethylene glyco
PEG	Polyethylene glycol
Si-69	Bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide
A-189	Mercaptopropyl-trimethoxysilane
Si-264	3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane
Semi-EV	Se-mi efficient vulcanization system
Nylon 6	ไนลอน (Poly (hexano-6-lactamO))
ML	ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
MH	ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque)
T _{S2}	คือระยะเวลาการสกอรัช (Scorch Time)
T _{C90}	ระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (optimum curing time)
Psi	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Pound-force per square inch)
BET	Brunauer-Emmett-Teller
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
AFM	Atomic Force Microscope
SEM	จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
TEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope)
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DMTA	Dynamic Mechanical Thermal Analysis
m ² /g	ตารางเมตรต่อกรัม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
g/cm^3	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
DRC	ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content)
T_g	อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature)
MPA	เมกะปาสคาล (Mega pascal)
ASTM	มาตรฐานการทดสอบของประเทศอเมริกา (American Society for Testing and Materials)
JIS	มาตรฐานการทดสอบของประเทศญี่ปุ่น (Japaness Industrial Standards)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์มีความสำคัญและมีมูลค่าเป็นอันดับต้นๆของประเทศไทย โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งมีแนวโน้มเติบโตตาม อุตสาหกรรมยานยนต์ ยกตัวอย่างคืออุตสาหกรรมยางล้อรถยนต์และรถจักรยานยนต์ ซึ่งมีการทำการ วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง หนึ่งในโครงสร้างหลักของการผลิตยางล้อคือผ้าใบ (Tire cord fabric) ซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับยางล้อโดยจะเป็นโครงสร้างชั้นในและทำหน้าที่รับ น้ำหนักของรถเปรียบเสมือนเหล็กเส้นใน โครงสร้างของคอนกรีต ซึ่งอุตสาหกรรมยางล้อมีการใช้ ผ้าใบชนิดไนลอน 6 (Nylon 6) ในการเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของยางล้อ โดยก่อนที่จะนำ ผ้าใบไปใช้ต้องทำการเคลือบยางลงไปบนผ้าใบก่อน ซึ่งยางที่ใช้ฉาบผ้าใบในที่นี้ต้องการสมบัติด้าน ความแข็งแรงและในด้านการยึดติดกับผ้าใบซึ่งในปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้ยางธรรมชาติ (Natural rubber) โดยใช้เขม่าดำและยางรีเคลม (Reclaim Rubber) เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ซึ่งการใช้ ยางธรรมชาติและยางรีเคลม (Reclaim Rubber) จะมีข้อด้อยในด้านความแข็งแรง การยึดติดกับเส้น ผ้าใบอีกทั้งการกักเก็บอากาศยังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งในงานวิจัยนี้เราจะทำการเลือกชนิดยางและชนิด ของสารตัวเติมที่เหมาะสมที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติข้างต้น

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาได้พบว่ามีมีการนำยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxydized Natural rubber : ENR) มาใช้งานกันอย่างมาก โดยยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์คือยางที่ตัด แปรงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยการเติมออกซิเจนลงไป ในโครงสร้างของยางธรรมชาติบริเวณ ตำแหน่งพันธะคู่ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปเช่นมีความเป็นขั้วสูงขึ้น มีความ ทนทานต่อน้ำมันเพิ่มขึ้นสามารถเข้ากับยางหรือพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูงได้ดีเนื่องจากยาง ธรรมชาติอีพอกซิไดซ์สามารถใช้เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) อีกทั้งยังมีสมบัติด้านการกัก เก็บอากาศที่ดีอีกด้วย

ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR) [1] แม้ว่าพืชที่ให้น้ำยางจะมีมากกว่า 200 ชนิดแต่มี เพียงต้นยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เพียงน้ำยางพาราเพียงชนิดเดียวที่สามารถนำมาแปรรูปเพื่อ ใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ได้อย่างมากมายโดยลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือมีความแข็งแรงของยาง

เนื้ออย่างล่วนๆสูงสามารถระบายความร้อนได้ดี เหนียวติดกันเองดีเยี่ยม ยางธรรมชาติจึงนิยมนำไปใช้ทำยางล้อชนิดต่างๆ ยางรองการสั่นสะเทือน เป็นต้น

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxidized Natural rubber : ENR) [2] ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์เป็นยางที่นำยางธรรมชาติมาปรับโครงสร้างโดยใช้สารเคมีจำพวกกรดเปอร์ออกไซด์ซึ่งยางจะมีสีน้ำตาลเข้มกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยน้ำยางโดยตรงและยางแห้งโดยมีการผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างของยางธรรมชาติให้ดียิ่งขึ้นเช่น ทำให้อย่างมีความเป็นขั้วมากขึ้น สามารถทนต่อน้ำมันที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้นอีกทั้งสามารถทนต่อโอโซนและการซึมผ่านของอากาศได้ดีเพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลงแต่ก็จะมีสมบัติบางอย่างที่ลดลงกว่ายางธรรมชาติ เช่นมีความยืดหยุ่นลดลงและหากนำไปวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันยางจะไม่ทนต่อความร้อน ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์มักใช้ในอุตสาหกรรมดังต่อไปนี้ เช่น กาว รองเท้า สี และยางรถยนต์

จากการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ ที่มีปริมาณหมู่อีพอกไซด์ 50 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-50) สามารถทนต่อน้ำมันและต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศได้เทียบเท่ากับสังเคราะห์เช่น ยางคลอโรพรีนและยางบิวไทล์นอกจากนี้ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ยังสามารถเกิดการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลในขณะที่ยืดเป็นผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติที่ไม่ดัดแปลง โมเลกุลทำให้อย่างธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมบัติของยางธรรมชาติในด้านสมบัติเชิงกล การยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอน (Nylon cord) และการเก็บลมให้ดีขึ้น โดยเราจะทำการศึกษาผลของเกรดของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์และชนิดของสารตัวเติมที่เติมลงไป ในยางธรรมชาติและทำการศึกษาสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นพร้อมกับการสรุปผลการทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเกรดของยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมในด้านพฤติกรรมการคงรูป สมบัติเชิงกล การยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนและการเก็บกักอากาศ

1.2.2 เพื่อศึกษาชนิดของสารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติของยางผสมในด้านพฤติกรรมการคงรูป สมบัติเชิงกล การยึดติดกับเส้นด้ายควบไนลอนและการเก็บกักอากาศ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมยาง NR โดยทำการเติมสารตัวเติมปริมาณ 10 phr และทำการแปรชนิดสารตัวเติมได้แก่ เขม่าดำเกรด N330, ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเครื่องผสมแบบปิดขนาดสามลิตร (Kneader 3 liters)

1.3.2 เตรียมยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR25 อัตราส่วน 90/10 โดยเครื่องผสมแบบปิดขนาดสามลิตร (Kneader 3 liters)

1.3.3 เตรียมยางผสม NR/ENR25 อัตราส่วน 90/10 โดยทำการเติมสารตัวเติมปริมาณ 10 phr และทำการศึกษาผลของสารตัวเติม 3 ชนิดได้แก่ เขม่าดำเกรด N330, ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเครื่องผสมแบบปิดขนาดสามลิตร (Kneader 3 liters)

1.3.4 เตรียมยางผสม NR/ENR50 อัตราส่วน 90/10 โดยทำการเติมสารตัวเติมปริมาณ 10 phr และทำการศึกษาผลของสารตัวเติม 3 ชนิดได้แก่ เขม่าดำเกรด N330, ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเครื่องผสมแบบปิดขนาดสามลิตร (Kneader 3 liters)

1.3.5 ทำการทดสอบความเหนียวของยางคอมปาวด์ด้วยมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) ตามมาตรฐาน ASTM D 1646 (Condition : ML1+4 @ 100 °C, frequency 2.0 cpm)

1.3.5 ทำการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดายนเคลื่อนที่ (MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D5289 (Condition : Angle 1.0 degree, frequency 100.0 cpm, 30 min at 150°C)

1.3.6 ทำการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression moulding) (Condition : ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลา t_{90} ที่ทดสอบได้จากเครื่อง MDR)

1.3.7 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (UTM) (ค่าความทนทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัส, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (Condition : Test speed 500 mm/min, Load cell 2 kN, ความหนาชิ้นงาน 2 mm, ความกว้าง 5 mm)

1.3.8 ทำการทดสอบการยึดติดกับไนลอนโดยการทดสอบแบบ H-TEST ADHESION ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D4776 (Condition : Test speed 125 mm/min, Load cell 2 kN, ความหนาชิ้นงาน 6.40 mm, ความกว้าง 25.40 mm)

1.3.9 ทำการทดสอบลักษณะสัญญาณวิทยุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.3.10 ทำการทดสอบการเก็บกักอากาศของชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยเครื่องที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นโดยบริษัทเอ็นดีรับเบอร์ จำกัด (มหาชน)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เกรดขางธรรมเนียมชาติอิพ็อกชิไคซ์ ที่เหมาะสมในการนำมาผสมในขางธรรมเนียมชาติเพื่อนำมาใช้ในการทำขางฉ่าไบในอุตสาหกรรมขางลื้อ

1.4.2 ได้ขงนิตสารตัวเติมที่ผสมเหมาะสมในการนำมาใช้เติมในขางผสมระหว่งขางธรรมเนียมและขางธรรมเนียมชาติอิพ็อกชิไคซ์เพื่อเพิ่มนำมาใช้ในการทำขางฉ่าไบขางลื้อ

1.4.3 ได้รับองค์ความรู้ใหม่ขางงานวิจัยนี้ขางด้านสมบัติการกักเก็บอากาศของขางสูตรฉ่าไบเพื่อนำไปต่อยอดในภาคอุตสาหกรรมในภายภาคหน้า



บทที่ 2

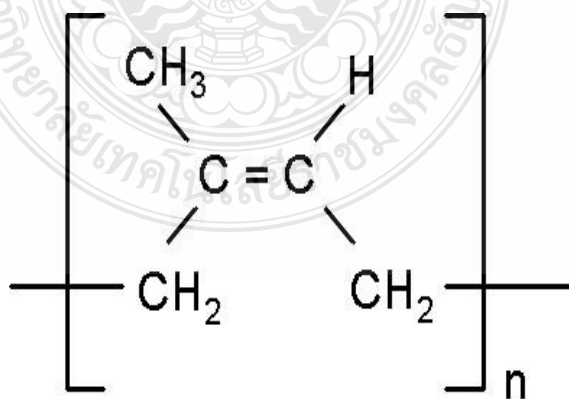
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR) [1, 3, 4, 5, 6]

ยางธรรมชาติหรือยางพาราเป็นยางที่ได้มาจากต้นยางพาราพันธุ์ *Hevea Braziliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มน้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ประมาณ 30 % (โดยน้ำหนัก) แฉวนลอยอยู่ในน้ำ โดยปริมาณของเนื้อยางแห้งขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์ยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล ยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ ยางแท่ง น้ำยาง เป็นต้นซึ่งสามารถแบ่งเป็รเกรดต่อไปได้อีกเช่น ยางแท่งจะแบ่งออกเป็นเกรด STR5L STR10 STR20 เป็นต้น

2.1.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ

Cis-1,4-Polyisoprene คือชื่อทางเคมีของยางธรรมชาติโดยกล่าวคือในโมเลกุลยางหนึ่งโมเลกุลประกอบไปด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรงโดยทั่วไปจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ที่ 200,000-400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้าง ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นอยู่ที่ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ $20 \text{ }^\circ\text{C}$ และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ $-72 \text{ }^\circ\text{C}$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ (Cis-1,4-polyisoprene) [1]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าหนึ่งหน่วยของไอโซพรีนจะมีพันธะคู่และมีหมู่แอลฟาเมทิลีน (α -Methylene) ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกัมมันต์อยู่ นอกจากนั้นพันธะคู่เหล่านี้ยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน ทำให้ยางเสื่อมสภาพหรืออาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างยางกับสารเคมีเหล่านี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อถึงแรงด้วยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

โดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติจะมีโครงสร้างโมเลกุลจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดมันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้นแต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิมในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion resistance) สูงอีกด้วย

ข้อดีของธรรมชาติที่สำคัญอีกข้อหนึ่งก็คือความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อมีแรงภายนอกที่มากระทำกับมันก็จะเกิดการเสียรูปแต่เมื่อปลดแรงออกหมดไป มันจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมที่ใกล้เคียงเดิม ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีเด่นอีกข้อคือการเหนียวติดกันเองที่ดีมาก (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องประกอบชิ้นส่วนหลายๆ ส่วนเข้าด้วยกันเช่น ยางล้อ เป็นต้น

ทั้งนี้ทั้งนั้นยางดิบยังมีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะอ่อนนุ่มและเหนียว แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำจะแข็งเปราะ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กัมมันต์ ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆเข้าไป หลังจากการบดผสมยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า " ยางสุกหรือยางคงรูป " (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

2.1.2 สมบัติของยางธรรมชาติ

2.1.2.1 สมบัติของยางดิบ

- ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติคนั้นคือยางสามารถแบนและไหลได้เมื่อได้รับแรงกดซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ซึ่งสมบัติของ

อีลาสติค ดังนั้นเมื่อยางมีสมบัติทั้งพลาสติกและอีลาสติค ทำให้ยางแบนหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงยางจะกลับคืนรูปใกล้เคียงเดิม

- ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่อยางอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำยางจะแข็งถ้ายางอยู่ในสถานะที่อุณหภูมิสูงจะนิ่ม

- ยางไม่ทนต่อตัวทำละลายหลายชนิดสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลาย

2.1.2.2 สมบัติของยางคงรูป

- มีความยืดหยุ่นสูง
- มีความทนต่อแรงดึงสูงมาก (Tensile strength) สามารถทนแรงดึงได้มากกว่า 20 MPa
- มีการยืดตัวก่อนขาดได้สูงมาก (Elongation) สามารถยืดได้ 500% – 1,000%
- มีความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear) และการสึกหรอ (abrasion) ได้ดี
- การคืนตัว (Compression set resistance) และการกระดอน (Resilience) ดี
- ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี
- มีแรงยึด หรือติดกันระหว่างยางกับเส้นใย และ โลหะ ได้ดี
- มีความทนทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Heat ageing) ไม่ค่อยยดี
- ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน และ โอโซน ไม่ดี
- ไม่ทนต่อตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอน และ น้ำมันปิโตรเลียม
- มีอุณหภูมิการใช้งาน อยู่ระหว่าง – 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส (°C)

2.1.3 การผสมยางธรรมชาติกับยางชนิดอื่น

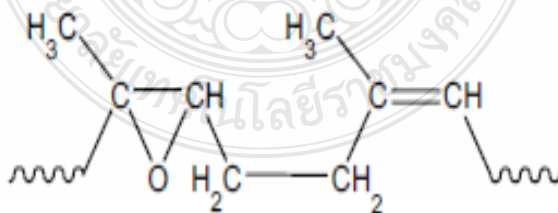
ยางธรรมชาติเป็นยางเป็นยางชนิดไม่มีขั้วเราจึงสามารถผสมเข้ากันได้กับยางพวกที่ไม่มีขั้วด้วยกันได้ง่าย เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene butadiene : SBR) ยางบิวทาไดอิน (Butadiene : BR) เป็นต้นแต่เราต้องคำนึงถึงปริมาณพันธะคู่ที่ใกล้เคียงกันด้วยเพราะยางบางตัวมีปริมาณพันธะคู่ที่อยู่ในโครงสร้างน้อยจึงอาจทำให้การสึกตัวไม่พร้อมกันและอาจเกิดปัญหาการแยกเฟสในระหว่างการคงรูปได้ ยกตัวอย่างยางที่ไม่มีขั้วแต่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างน้อยคือ ยางบิวไทล์ (Butyl : IIR) และยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอินมอนอเมอร์ (Ethylene Propylene diene monomer : EPDM) การเลือกระบบการคงรูปที่เหมาะสมและการเลือกยางเกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงอาจช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดจากการคงรูปได้ ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางมีขั้วอาจจะผสมกันได้ในบางกรณี แต่ก็ยังไม่ดีเท่าที่ควรยกตัวอย่างในยางไนไตรล์ (Acrylonitrile-Butadiene Rubber : NBR) ถ้าเลือกเกรดที่มีความเป็นขั้วต่ำๆ และเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากัน (Compatibilizer) ลงไปด้วย

การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์เป็นการรวมเอาข้อดีของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์เข้าไว้ด้วยกันกล่าวคือสมบัติที่ดีของยางธรรมชาติจะถูกส่งผ่านไปยังยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน สมบัติเชิงพลวัต รวมถึงการสะสมความร้อนต่ำระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกันสมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์ก็จะถูกถ่ายเทสู่ยางธรรมชาติ เช่นความต้านทานต่อการขูดถู (เมื่อผสมยาง BR) ความทนทานต่อน้ำมัน (เมื่อผสมยาง NBR) ความทนทานต่อความร้อนและการทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน (เมื่อผสมยาง EPDM)

ในกรณีนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางที่มีความเป็นแตกต่างกันมากๆ อาจจำเป็นต้องพิจารณาถึงความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่นำมาผสมกัน (โดยเฉพาะสารตัวเร่งปฏิกิริยา) เพราะสารตัวเติมหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความเป็นขั้วแตกต่างกันและสารเคมีเหล่านั้นก็มักจะชอบอยู่ในเฟสของยางที่มีความใกล้เคียงกับตัวมันเองเท่านั้น ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบเหล่านี้ในยางแต่ละเฟสอาจทำให้สมบัติของยางผสมที่ได้ต่ำกว่าที่ควร

2.2 ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (Epoxydized natural rubber, ENR) [2, 7, 8]

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์เป็นยางชนิดใหม่ที่ได้จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกุลของยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นวงแหวนอีพ็อกไซด์โดยผ่านปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชัน (Epoxydation) โดยระดับการเกิดอีพ็อกซิเดชันตั้งแต่ 10-50 % ยางที่ได้จึงมีความเป็นขั้วสูงกว่ายางธรรมชาติ อีกทั้งยังทนความร้อนและน้ำมันได้ดีขึ้น โดยที่ยางเกรดที่มีระดับของอีพ็อกซิเดชันสูงถึง 50 % จะมีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับยาง NBR ที่มีระดับอะโครโลไนไตรล์ ปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่ายาง ENR ที่เสริมแรงด้วยซิลิกาจะมีสมบัติคล้ายกับยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเขม่าอีกด้วย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ [1]

ยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์มีการผลิตในทางการค้า เช่น ENR25 หรือ ENR50 หมายถึงยางธรรมชาติที่มีจำนวน โมล 25% และ 50% ที่เกิดการอีพ็อกซิเดชัน โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์การอีพ็อกซิเดชันเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความเป็นขั้วของยาง ENR มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยจึงทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนไป เช่นมีความทนน้ำมันมากขึ้น สามารถเข้ากันได้กับยางหรือพอลิเมอร์ที่มีขั้วได้มากขึ้น เป็นต้น

2.2.1 การเตรียม

ยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์สามารถเตรียมได้จากที่น้ำยางสดโดยตรงและยางแห้ง

2.2.1.1 กรณีใช้น้ำยางสด

1) น้ำยางที่ใช้เพื่อปรับสภาพโครงสร้าง จะต้องทำให้อนุภาคยางมีความเสถียรก่อน เพื่อให้ไม่ให้น้ำยางเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน โดยการใส่สารปรับสภาพผิวอนุภาคยางเช่น สารเพิ่มความเสถียรชนิดที่ไม่มีประจุ (Non-ionic surfactant) ประเภทเอทิลีนออกไซด์ ซึ่งสารเคมีนี้จะสูญเสียสภาพความเสถียรที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 40-50 °C)

2) การเตรียมสารละลายกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ (Peroxyformic acid) เพื่อใช้ในการอีพ็อกไซค์ยางธรรมชาติ โดยการใส่กรดฟอร์มิกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากันเกิดกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์และน้ำ หากใช้กรดอ่อนเช่น กรดอะซิติก จะต้องเติมสารตัวเร่งที่เป็นกรดลงไปอีกได้แก่ กรดซัลฟูริกเป็นต้นกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการอีพ็อกซิเดชันอย่างรวดเร็วในโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว

3) เติมสารละลายกรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นลงไปในน้ำยางที่ปรับสภาพผิวอนุภาคเรียบร้อยแล้ว กรดฟอร์มิกเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาอีพ็อกซิเดชันกับยางธรรมชาติตรงตำแหน่งพันธะคู่ ที่อุณหภูมิ 60-70 °C เกิดเป็นยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ที่มีออกซิเจนอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติและได้กรดฟอร์มิกกลับคืนมา ยางธรรมชาติจะเกิดการอีพ็อกซิเดชันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเปอร์ออกไซด์

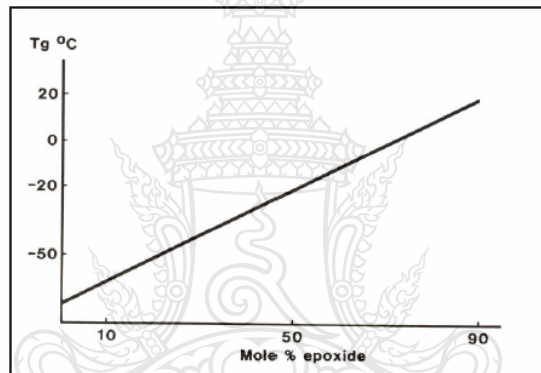
4) เมื่อได้น้ำยางอีพ็อกไซค์แล้วทำให้เป็นกลางด้วยด่างก่อนที่จะทำให้น้ำยางเกิดการจับตัวเป็นก้อนด้วยความร้อนจากนั้นล้างยางธรรมชาติอีพ็อกไซค์ด้วยน้ำและทำให้แห้งด้วยอากาศร้อน

2.2.1.2 กรณีใช้ยางแห้ง

ยางแห้งที่นำมาใช้ทำให้เกิดการอีพ็อกซิเดชันจำเป็นต้องทำให้เป็นสารละลายยางก่อนโดยการนำยางมาละลายในน้ำมันสน โทลูอิน หรือเบนซีน ต่อจากนั้นเติมสารอีพ็อกไซค์โมเลกุลของยางธรรมชาติเช่นเดียวกับน้ำยางต่อไป

2.2.2 สมบัติทั่วไป

การดัดแปลงโครงสร้างของยางธรรมชาติโดยการอีพ็อกซิเดชันส่งผลให้ค่าอุณหภูมิกลายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) เพิ่มขึ้นการเกิดหมู่อีพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทุก 1 เปอร์เซ็นต์โมลบนโมเลกุลยางธรรมชาติจะทำให้ค่าอุณหภูมิกลายแก้วเพิ่มขึ้น 0.93°C ซึ่งพบว่า ENR-25 มีค่าอุณหภูมิกลายแก้วประมาณ -47°C และ ENR-50 มีค่าอุณหภูมิกลายแก้วประมาณ -22°C ดังนั้นสามารถนำค่าอุณหภูมิกลายแก้วมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างโมเลกุลได้และนอกจากนั้นยังพบว่าในกรณีที่เกิดการเปิดวงแหวนอีพอกไซด์จะมีช่วงของการทรานซิชันที่กว้างการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิกลายแก้วจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางและการเพิ่มของค่าอุณหภูมิกลายแก้วจะส่งผลทำให้ค่า damping (lower resilience) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลายแก้วที่ระดับหมู่อีพอกไซด์ต่างๆ [7]

เมื่อศึกษาการใช้น้ำยางธรรมชาติอีพอกไซด์ไปใช้งานในส่วนของหน้ายาง (Tyre tread) พบว่ายาง ENR25 และ ENR50 สมบัติการยึดเกาะถนนบนพื้นเปียกที่ดี (Good wet grip characteristics) และจากการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติอีพอกไซด์สามารถเสริมแรงด้วยซิลิกาโดยไม่ต้องเติมสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agents) ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่ใช้สารตัวเติมซิลิกาหรือใช้ซิลิกาควบคู่กับเขม่าดำมีค่าต้านทานการหมุนที่ต่ำ (Rolling resistance) กว่ายางธรรมชาติและมีการยึดเกาะพื้นที่เปียกที่ดีกว่ายางธรรมชาติอีกด้วย

2.2.3 สมบัติที่สำคัญของยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์

2.2.3.1 ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์มีความขี้วสูงชันมากกว่ายางธรรมชาติจึงทำให้ยางสามารถทนน้ำมันได้เทียบเคียงยางไนไตรล์

2.2.3.2 มีความทนต่อโอโซนและการซึมผ่านของอากาศได้ดีใกล้เคียงกับยางบิวไทล์ เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยางธรรมชาติมีน้อยลงและมีกลุ่มของอีพอกไซด์เกิดขึ้นแทนที่พันธะคู่ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น

2.3.3.3 ผลลัพท์ที่ทำการคงรูปด้วยกำมะถัน จะทนความร้อนไม่ดี ยางจะมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลยางตรงตำแหน่งที่มีออกซิเจนมารวมตัวเป็นวงแหวนไม่แข็งแรงวงแหวนจะเปิดออกและการเชื่อมโยงแบบอีเทอร์พันธะ

2.2.4 การใช้งาน

2.2.4.1 ใช้ในอุตสาหกรรมรองเท้า

2.2.4.2 ใช้ในอุตสาหกรรมสี ช่วยเพิ่มการยึดติดที่ดี

2.2.4.3 ใช้ในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ทำให้ทนทานต่อการซึมของอากาศ

2.2.4.4 ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างยางและพลาสติก

2.3 สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agents) [9, 10]

สารวัลคาไนซ์คือสารที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน ยางที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติที่เสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักการวัลคาไนซ์ยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเพอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

2.3.1 กำมะถัน (Sulfur)

กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็วและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลักคือไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลเช่น ยางซิลิโคน หรือยาง EPM ได้

2.3.2 เพอร์ออกไซด์ (Peroxide)

แม้ว่าการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้กับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ประกอบกับเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วย

ความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ใน โมเลกุล หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ใน โมเลกุลต่ำเท่านั้น ยกเว้นกรณีที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีและ/หรือมีค่าการเสีรูปถาวรหลังกด (compression set) ต่ำเท่านั้น

2.3.3 สารเคมีอื่นๆ

นอกจากระบบหลัก 2 ระบบ ยังมีการใช้สารวัลคาไนซ์ชนิดอื่นๆมาใช้ในการคงรูปด้วยเช่นกัน แต่มีการใช้น้อยหรือใช้ในกรณีที่เป็น เช่น การใช้โลหะออกไซด์คงรูปของยางคลอโรพรีน หรือการใช้สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซม์นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง IIR เป็นต้น

2.4 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerators) [9, 10]

สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารเคมีที่เติมลงในยางเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาและลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ให้น้อยที่สุดและทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันโดยสามารถแบ่งกลุ่มได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

2.4.1 เมอร์แคปโต (Mercapto)

สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีเวลาสกอรัชที่สั้นกึ่งที่มีอัตราในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคปโตนี้ ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซโทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole; MBT) และไดเบนโซโทอะซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl disulfide; MBTS)

2.4.2 เบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (Benzothiazole sulfenamide)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีเวลาสกอรัชที่ยาว แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงดังนั้นยางที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูงมีความยืดหยุ่นดี ตัวอย่างที่สำคัญของคือ ไซโคลเฮกซิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; CBS) บิวทิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N-tert.butyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS) เป็นต้น

2.4.3 ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีเวลาสกอรัชที่สั้นและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการวัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากและสีของยางเปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถใช้ใน

การผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลายรวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในทางการแพทย์หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหารตัวอย่างของสารเคมีกลุ่มนี้ ได้แก่ ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc dimethyldithiocarbamate; ZDMC) และซิงก์ไดเบนซิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc dibenzylthiocarbamate; ZBEC) เป็นต้น

2.4.4 ไทยูเรม (Thiurams)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทยูเรมมีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะที่ให้ระยะเวลาสกอรัชที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตตัวอย่าง ได้แก่ เทตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide; TMTD) และเทตระเมทิลไทยูเรมโมนอสัลไฟด์ (Tetramethylthiuram monosulfide; TMTM) เป็นต้น

2.4.5 กัวนิดีน (Guanidines)

สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิแต่ละนาไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่นๆ ตัวอย่างที่สำคัญที่สุดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine; DPG) เป็นต้น

2.5 สารกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (Activators and Retarders) [9, 10]

2.5.1 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก โดยทั่วไป นิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

2.5.2 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders)

สารหน่วงปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อยืดระยะเวลาสกอรัช ทำให้ลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษาขางคอมพาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างที่สำคัญของสารหน่วงปฏิกิริยา ได้แก่

2.5.2.1 สารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น พะทาลิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) และกรดมาลิก (Maleic acid)

2.5.2.2 ไซโคลเฮกซิลไทโอพทาไลไมด์ (Cyclohexyl-N-thiophthalimide; CTP) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า PVI (Pre-vulcanization inhibitor) สารหน่วงชนิดนี้เป็นสารหน่วงที่เพิ่มระยะเวลาสกร๊ชของยางคอมพาวด์โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ซึ่งต่างจากสารหน่วงปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด

2.6 สารตัวเติม (Fillers) [9, 10]

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน ฯลฯ สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

- 1) สารตัวเติมเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ และซิลิกา
- 2) สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ได้แก่ ดินขาว ทดคัม แคลเซียมคาร์บอเนต ฯลฯ

2.6.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรมยาง โดยทั่วไปการเติมเขม่าดำลงไปในยาง มีจุดประสงค์หลักๆ ดังนี้

2.6.1.1 เพื่อเสริมแรงให้แก่ ยาง ทำให้ ผลัดกันซ์ ยางมี สมบัติ เชิงกลต่างๆ โดยเฉพาะความแข็งแรง โมดูลัสความทน ต่อ แรงดึงความทนต่อการนิกขาด รวมถึงความต้านทานต่อการขูดสูงชัน ด้วยเหตุนี้เขม่าดำจึงนำไปใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมการผลิตยางล้อเป็นเวลานานมาแล้ว

2.6.1.2 เพื่อป้องกันผลัดกันซ์ยางจากแสงแดด เพราะการเติมเขม่าดำลงไปเพียงเล็กน้อยจะช่วยป้องกันยางจากการเสื่อมสภาพ อันเนื่องมาจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ได้ แต่ก็มีข้อเสีย คือ จะทำให้ผลัดกันซ์ยางที่ได้มีสีดำหรือสีเทาเข้ม

2.6.1.3 เพื่อปรับสมบัติทางไฟฟ้าหรือทางความร้อนของยาง การเติมเขม่าดำลงไปจะทำให้ยางมีค่าการนำไฟฟ้าหรือการนำความร้อนสูงขึ้นขอบเขตของการปรับปรุงสมบัติ ดังกล่าวขึ้นอยู่กับทั้งชนิดและปริมาณของเขม่าดำ

2.6.1.4 เพื่อปรับปรุงการตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟ เพราะการเติมเขม่าดำลงไป ในยางที่มี ความเป็นขั้วจะทำให้ ยางสามารถตอบสนองต่อ คลื่นไมโครเวฟได้ดียิ่งขึ้น ยางจึงร้อน และเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็ว ส่งผลทำให้ผลัดกันซ์ยางสูงชันและต้นทุนต่ำลง

2.6.1.5 เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ทั้งนี้เพราะเขม่าดำมีราคาต่ำกว่ายาง ดังนั้นการเติมเขม่าดำลงไปจึงเป็นการเจือจางเนื้อยางทำให้ต้นทุนทางด้านวัสดุต่อหน่วยลดลง

2.6.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) หรือหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในปริมาณมาก ทำให้มีความเป็นขี้ผึ้ง ซิลิกาจึงแตกตัวและเข้ากับยางที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ยาก นอกจากนี้ หมู่ไฮดรอกซิลดังกล่าวยังสามารถดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าลงและมีระดับของการวัลคาไนซ์ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องแก้ปัญหาด้วยการเติมสารเคมีที่สามารถทาปฏิกิริยาได้ง่ายกับหมู่ไฮดรอกซิล เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไทรเอทานอลามีน (Triethanolamine) หรือเฮกซะเมทิลีนเททระมีน (Hexamethylene tetramine, HEXA) รวมถึงการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG หรือ DOTG ลงไปในสูตรเคมียางด้วย

นอกจากนั้น ยังต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบซิลเลน (Silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่ายขึ้น และยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลและพลวัตดีขึ้น

ตัวอย่างของสารคู่ควบซิลเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทรเอทอกซีซิลิลโพรพิลเททราซัลไฟด์ (Bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide; Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (Mercaptopropyl-trimethoxysilane; A-189) ไทโอไซยานโอโพรพิลไตรเอทอกซีซิลเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane; Si-264) เป็นต้น

2.6.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

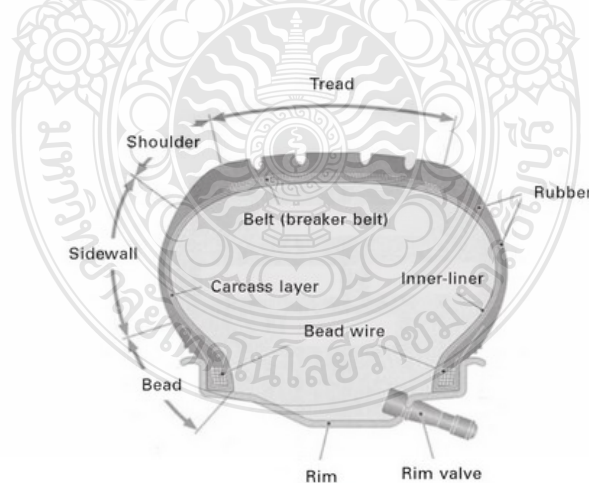
แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้งานในอุตสาหกรรมยางมีหลายเกรดและหลายขนาด ตั้งแต่ขนาดอนุภาคใหญ่ที่ไม่เสริมแรงจนถึงเกรดที่มีอนุภาคเล็กที่จัดเป็นสารตัวเติมเสริมแรง นอกจากขนาดอนุภาคแล้วแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิดยังแตกต่างกันที่สีอีกด้วย แคลเซียมคาร์บอเนตบางเกรดยังมีการเคลือบด้วยแคลเซียมสเตียเรตประมาณ 1-3% เพื่อช่วยให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเข้ากับยางได้ง่ายและทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปแคลเซียมคาร์บอเนตมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.5-2.65 g/cm³ และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ BET อยู่ในช่วง 10-30 m²/g การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้นปานกลาง ยางยังมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง แต่จะทำให้ความทนทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง และเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีฤทธิ์เป็นด่างจึงช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปเล็กน้อย

2.7 ยางล้อ [8, 11]



รูปที่ 2.4 ยางล้อชนิดต่างๆ Passenger car tyre (A), Truckbus tyre (B) and Mortorcycle tyre (C) [8]

อุตสาหกรรมยางล้อประกอบด้วยยางล้อหลายประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถจักรยานยนต์และรถจักรยาน ยางล้อรถใช้ในอุตสาหกรรม (รถยกของ) ยางล้อรถใช้ในการเกษตร (รถแทรกเตอร์) ยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตยางล้อแต่ละชนิดแตกต่างกันแต่โดยทั่วไปแล้วยางล้อจะมีโครงสร้าง 2 แบบ ได้แก่ โครงสร้างที่เป็นผ้าใบ (Bias tyre) และ โครงสร้างที่เป็นเรเดียล (Radial tyre) ส่วนประกอบต่างๆ ของยางล้อ มีดังนี้



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของยางล้อ [8]

-หน้ายาง (Tread) คือส่วนประกอบที่อยู่นอกสุดของยางเป็นส่วนเดียวที่สัมผัสผิวถนนทำหน้าที่ป้องกันของมีคมที่จะทำอันตรายต่อโครงยางที่หน้ายางจะประกอบไปด้วยดอกยางและร่องยางทำหน้าที่ในการยึดเกาะถนนดอกยางมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไปในการใช้จึงควรเลือกชนิดของดอกยางให้เหมาะสมกับการใช้งาน

-ไหล่ยาง (Shoulder) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อหน้ายางกับแก้มยางมีความหนาใกล้เคียงกับหน้ายางปกติไหล่ยางจะถูกออกแบบเป็นร่องให้เหมาะสมเพื่อช่วยระบายความร้อนภายในยางออกมาง่าย

- แก้มยาง (Side wall) เป็นส่วนด้านข้างสุดของยางที่ไม่ได้สัมผัสพื้นผิวถนนขณะที่รถวิ่งอยู่และเป็นส่วนที่ ยึดหยุ่นมากที่สุดของยางในขณะที่ใช้งานทำหน้าที่หุ้ม โครงยางเพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการใช้งานและ ป้องกันไม่ให้ความชื้นผ่านเข้าไปทำความเสียหายแก่โครงยาง

- ผ้าใบเสริมหน้ายางหรือเข็มขัดรัดหน้ายาง (Breaker or Belt) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างหน้ายางกับโครงยางใน กรณียางธรรมดา (Bias tyre) เราเรียกว่า “ผ้าใบเสริมหน้ายาง (Breaker)” ส่วนในกรณียางเรเดียล (Radial tyre) จะ เรียกว่า “เข็มขัดรัดหน้ายาง (belt)” ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับหน้ายางให้ยางสามารถรับแรงกระแทกได้ดี และป้องกันไม่ให้โครงยางชำรุดเสียหายจากสิ่งอันตรายต่างๆ จากพื้นถนน

- ขอบยาง (Bead) ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นลวดเหล็กกล้า (High carbon steel) ที่ช่วยยึดส่วนปลายทั้ง 2 ข้าง ของโครงยางเอาไว้เพื่อให้บริเวณขอบยางมีความแข็งแรงสามารถยึดแน่นสนิทกับกระทะล้อได้ดีเมื่อนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ เช่น ผ้าใบหุ้มขอบลวดและยางแข็งๆ ที่มีลักษณะคล้ายสามเหลี่ยมทำหน้าที่เชื่อมต่อ ต่อบริเวณส่วนที่แข็งคือบริเวณขอบยางกับส่วนที่อ่อนและยึดหยุ่นคือบริเวณแก้มยางและยังมีผ้าใบหุ้มขอบลวดที่อยู่ ด้านนอกสุดของขอบยางเพื่อป้องกันการเกิดอันตรายกับโครงยางจากการถอดประกอบเข้ากับกระทะล้อในแต่ละครั้งด้วย

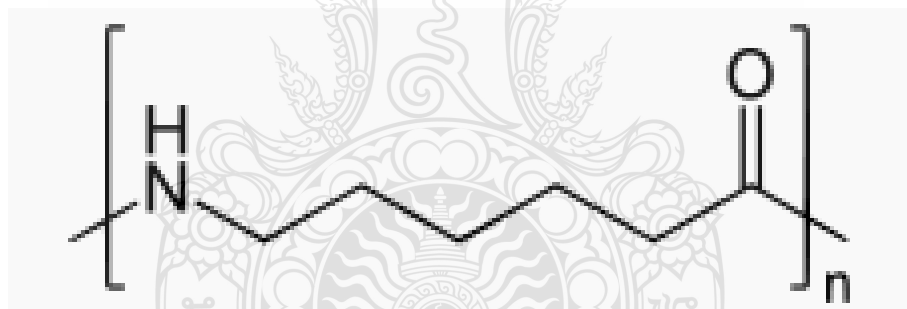
-โครงยาง (Carcass) เป็นส่วนประกอบหลักของยางทำขึ้นจากชั้นผ้าใบ (Textiles) ที่วางซ้อนกันหลายๆ ชั้น (Body ply) แล้วขึ้นรูปเป็นโครงยาง ทำหน้าที่คงรูปร่าง และรักษาความดันลมภายในยางเพื่อให้ยางสามารถรับน้ำหนัก บรรทุกได้ รวมถึงต้องทนทานต่อแรงกระแทกหรือสั่นสะเทือนจากถนนที่มีต่ออย่างดี

- ชั้นผ้าใบ ผ้าใบยางรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์เป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่ชุบเคลือบสารเคมีพร้อมจะทำปฏิกิริยาเคมีในการยึดเกาะกับยางและทำหน้าที่เป็น โครงสร้างผนังยางชั้นในที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางล้อ รับแรงสั่นสะเทือนจากถนนและช่วยเพิ่มความยึดหยุ่นและความนุ่มนวล

ในการขับเคลื่อนนอกจากจะนำมาเสริมความแข็งแรงให้ยางล้อแล้วยังถูกนำไปใช้ใน ท่อยางอุตสาหกรรม สายพานอุตสาหกรรมหรือแม้แต่ยางล้อเครื่องบิน



รูปที่ 2.6 ผ้าใบไนลอน (Tyre cord fabric) [12]



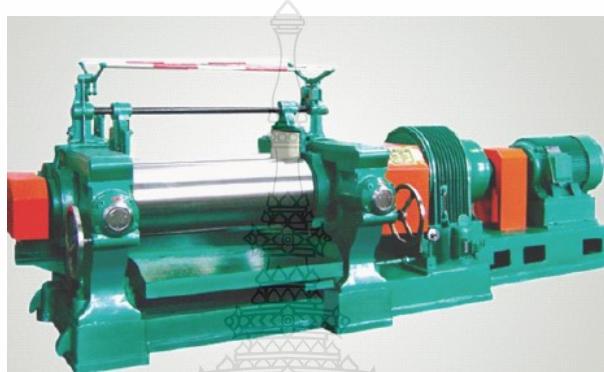
รูปที่ 2.7 โครงสร้าง Nylon 6 [13]

โดยส่วนใหญ่แล้วผ้าใบที่ทอเป็นผืนจะทำมาจาก ไนลอน 6 (Nylon 6 dipped tyre cord fabric) มีความแข็งแรงในการทนทานแรงดึงและความสามารถในการยืดตัวสูงด้วยความสามารถในการยืดตัวที่สูงนี้ทำให้ไนลอนมีสมบัติด้านการทนทานแรงกระแทกและแรงฉีกขาดที่ดี

2.8 เครื่องผสมยาง [14]

2.8.1 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll-mill)

การผสมยางมีจุดประสงค์สำคัญก็เพื่อให้องค์ประกอบต่างๆ โดยเฉพาะสารตัวเติมแตกตัวได้ดี (Dispersive mixing) และกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอทั้งเนื้อยาง (Distributive mixing) เครื่องที่นิยมใช้กันมากในอดีตคือเครื่องรีดแบบสองลูกกลิ้ง ซึ่งมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.8 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง [15]

เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้งเป็นเครื่องผสมระบบเปิด ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงตัวในแนวขนานกัน หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน โดยลูกกลิ้งด้านหน้าจะหมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่าลูกกลิ้งด้านหลังประมาณ 1.05 ถึง 1.2 เท่า ซึ่งอัตราส่วนนี้จะเรียกว่า “Friction ration” ซึ่งความเร็วที่ต่างกันนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ในการผสมยางกับสารเคมียางจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้ง ยางจะถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียาง โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติมสารเคมีลงไป ในยาง ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปยังช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งใช้ผสมยางในปริมาณไม่มากนัก เนื่องจากต้องใช้ความชำนาญและกำลังคนในการผสม

จุดเด่นหลักของเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งคือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างสองลูกกลิ้งมีค่าค่อนข้างสูงทำให้องค์ประกอบต่างๆผสมเข้ากันได้ดีและทำให้สารตัวเติมกระจายตัวดีและการระบายความร้อนมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียที่เราควรคำนึงคือ

- 1) ใช้ระยะเวลาในการผสมค่อนข้างนาน
- 2) ประสิทธิภาพของการบดผสมขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ปฏิบัติงาน

- 3) มีฝุ่นละอองและความสกปรกสูง
- 4) ควบคุมความสม่ำเสมอของแต่ละครั้งในการผสมยาก

2.8.2 เครื่องผสมแบบปิด

เครื่องผสมแบบปิดเป็นเครื่องผสมที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะการใช้งานและการควบคุมคุณภาพของยางแต่ละครั้งที่ผสมง่ายกว่าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เครื่องผสมแบบปิดประกอบด้วยห้องผสม แรม โรเตอร์ และระบบหล่อเย็นต่างๆ



รูปที่ 2.9 เครื่องแบบปิดชนิด Kneader [16]

สำหรับโรเตอร์ที่ใช้ในเครื่องผสมแบบปิดส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวเท่ากับ 1:1.4 และ 1:1.7 รูปร่างลักษณะของโรเตอร์ที่ใช้ก็มีมากมายหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับกรอกแบบของผู้ผลิต โดยทั่วไปแล้วโรเตอร์ทั้ง 2 ก้อนที่อยู่ในห้องผสมจะหมุนด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันทำให้เกิดการขัดสีที่สูง การผสมหรือแรงเสียดทานนอกจากจะเกิดระหว่างปีกของโรเตอร์ทั้งสองแล้วยังเกิดที่ระหว่างโรเตอร์กับผนังห้องผสมด้วยจึงทำให้การบดผสมมีประสิทธิภาพที่สูง

เครื่องนวดยางหรือนิคเคอร์เป็นเครื่องผสมระบบปิดชนิดอื่นๆ ที่มีการจำหน่ายในเชิงการค้าและมีการผลิตในประเทศแถบเอเชีย แม้ว่าเครื่องนวดยางจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนุรี แต่รูปแบบของโรเตอร์แตกต่างจากโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบปิดแบบนุรีมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนุรีมาก อย่างไรก็ตามเครื่องนวดยางมีราคาต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนุรีมาก จึงเป็นที่นิยมสำหรับผู้ประกอบการ

2.9 การขึ้นรูปและการคงรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์ [14]

2.9.1 การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง เป็นการขึ้นรูปยางไปพร้อมๆกับการคงรูปยาง (Vulcanization) โดยอาศัยความร้อนและแรงกดอัด การขึ้นรูปยางด้วยแม่พิมพ์เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็น โอริง ประเก็น ยางแท่นรองเครื่อง พื้นรองเท้า หรือแม่แต่ยางล้อ ก็ล้วนแต่ใช้วิธีขึ้นรูปโดยการใช้แม่พิมพ์ทั้งสิ้น การขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อนที่จะใส่ยางลงไปเพราะความร้อนจะทำให้ความหนืดของยางลดลงและทำให้ยางไหลเข้าแม่พิมพ์ได้ง่ายเมื่อยางไหลเข้าสู่แม่พิมพ์แล้วความร้อนจากแม่พิมพ์ก็จะทำให้ยางเกิดการคงรูป



รูปที่ 2.10 เครื่อง Compression Moulding [17]

2.9.2 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression Moulding) การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นวิธีที่ง่ายไม่ต้องลงทุนอะไรมาก โดยเครื่องจะประกอบไปด้วยแผ่นกดอัดจำนวน 2 แผ่น ซึ่งใช้ไฮดรอลิกเป็นแหล่งให้แรงกดอัด โดยที่ได้แผ่นกดอัดจะทำการฝังตัวให้ความร้อนแก่แผ่นกดอัดอยู่ ในการขึ้นรูปด้วยวิธีนี้จะต้องเตรียมยางที่จะนำมาขึ้นรูปให้มีขนาดใกล้เคียงกับตัวขึ้นงานและต้องเผื่อปริมาณยางเพื่อให้ยางสามารถไหลได้อย่างทั่วถึง ไม่เกิดความเสียหายจากยางไม่เต็มแม่พิมพ์

2.10 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบค้ายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer : MDR) [14]



รูปที่ 2.11 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบค้ายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer : MDR) [18]

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบลักษณะการคงรูปของยางอย่างต่อเนื่องจนได้เครื่องมือทดสอบชนิดที่ไม่มีโรเตอร์ที่เรียกว่า “Rotorless curemeter” ตัวอย่างที่สำคัญของเครื่องมือชนิดนี้คือ เครื่อง MDR ที่แสดงดังรูปที่ 2.11 หลักการทำงานของเครื่องคล้ายกับเครื่อง Oscilating disc rheometer:ODR ยกเว้นเครื่อง MDR ไม่มีโรเตอร์ โดยเมื่อเริ่มทำงานเครื่องจะให้ความร้อนแก่ค้าย (Die) เมื่อถึงระดับความร้อนที่ต้องการจะทำการใส่ยางไปในค้ายและทำการเริ่มต้นการทดสอบค้ายล่างจะแกว่งไป-มาด้วยมุมแคบๆ (ประมาณ 0.5° หรือ 1°) ด้วยความถี่ 1.67 Hz จากนั้นเครื่องจะทำการวัดค่าแรงบิดที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลา ผลการทดสอบจึงมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่อง ODR แต่ค่าระยะเวลาการสกอร์ชที่วัดได้จากเครื่อง MDR คือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตัน-เมตร โดยไม่ขึ้นอยู่กับมุมแกว่งของเครื่อง เมื่อทำการทดสอบเสร็จจะได้กราฟที่แสดงข้อมูลดังต่อไปนี้

ML คือค่าแรงบิดต่ำสุด

MH คือค่าแรงบิดสูงสุด

T_s คือระยะเวลาการสกอร์ช

T_{c90} คือระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสม

2.11 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (Universal testing machine) [14]

สมบัติแรงดึงที่นิยมใช้ควบคุมคุณภาพของยาง ได้แก่ ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength), การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) และมอดูลัส (Modulus) สมบัติแรงดึงของยางสามารถทดสอบได้โดยการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดด้วยอัตราเร็วการดึงคงที่ เครื่องที่ใช้ทดสอบเรียกว่า Universal testing machine ในระหว่างการดึงเครื่องจะบันทึกค่าแรงดึงที่เปลี่ยนไปตามระยะการยืดตัวแล้วนำไปคำนวณพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พร้อมทั้งคำนวณหาความต้านทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาดและค่ามอดูลัสที่ความเครียดต่างๆ

โดยทั่วไปแล้วชิ้นทดสอบที่จะนำมาทดสอบควรขึ้นรูปมาแล้วไม่น้อยกว่า 16 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นทดสอบนั้นได้รับการคงรูปอย่างสมบูรณ์แล้ว

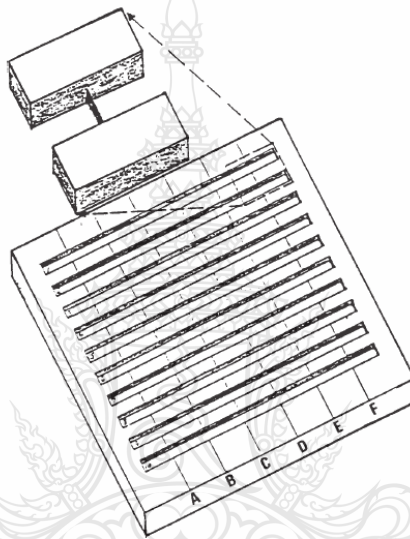


รูปที่ 2.12 เครื่อง Universal testing machine [19]

2.12 การทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดยางกับเส้นใยในล่อน (Adhesion of tire cords)

[20]

มีวิธีมากมายในการคิดค้นขึ้นเพื่อให้การประเมินค่าความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับยาง (Adhesion) แบ่งเป็นการทดสอบกับเส้นล่อน (Cord test) กับ การทดสอบแบบเป็นพื้นผ้า (Fabric test) สำหรับการทดสอบเส้นล่อนยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือการทดสอบแบบ Pull-out และการทดสอบแบบ Stripping



รูปที่ 2.13 ชิ้นทดสอบแบบ H-Test [20]

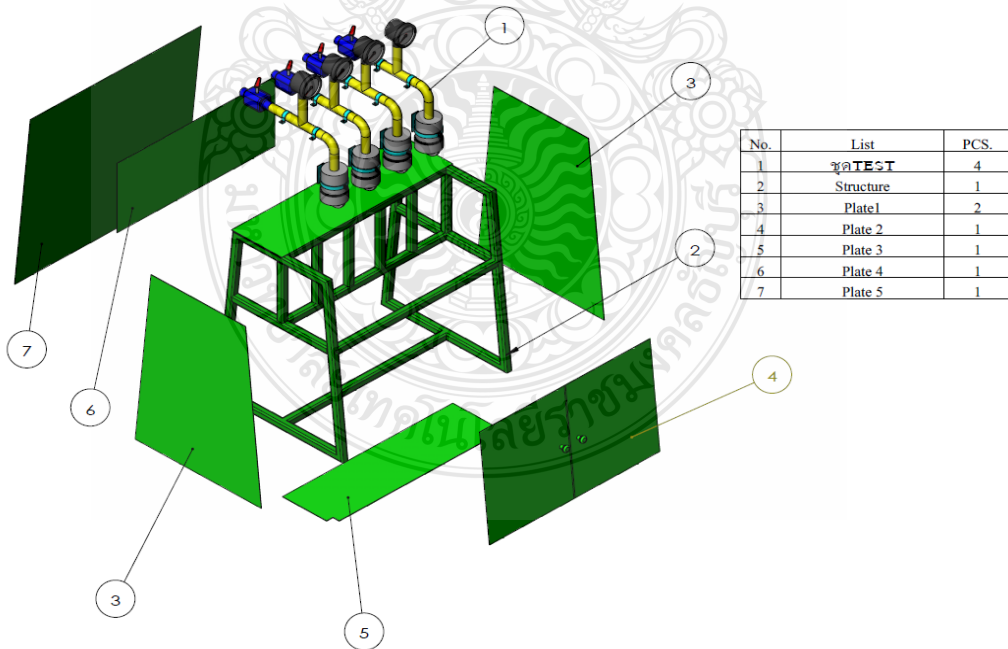
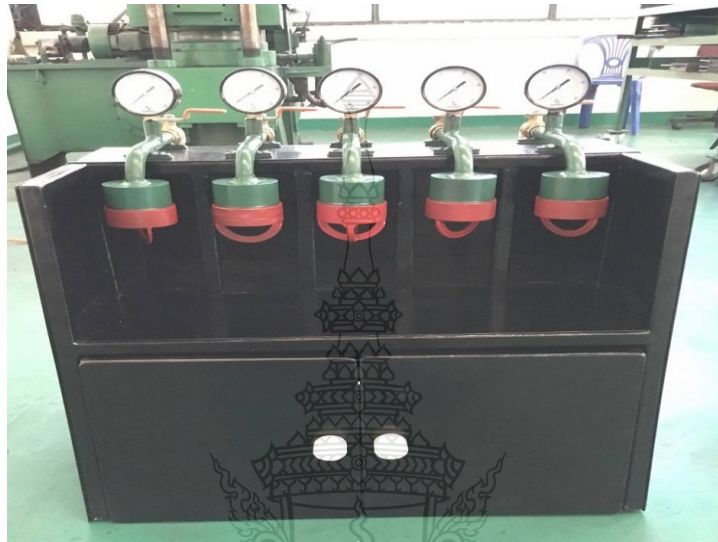
9.12.1 การทดสอบแบบ Pull out

หลักการพื้นฐานของการทดสอบชนิดนี้คือการฝังล่อน 1 ล่อนลงไปในยางแล้วทำการคงรูป (Vulcanization) เมื่อได้ชิ้นงานแล้วจากนั้นวัดแรงที่ต้องใช้ในการดึงล่อนออกจากยาง

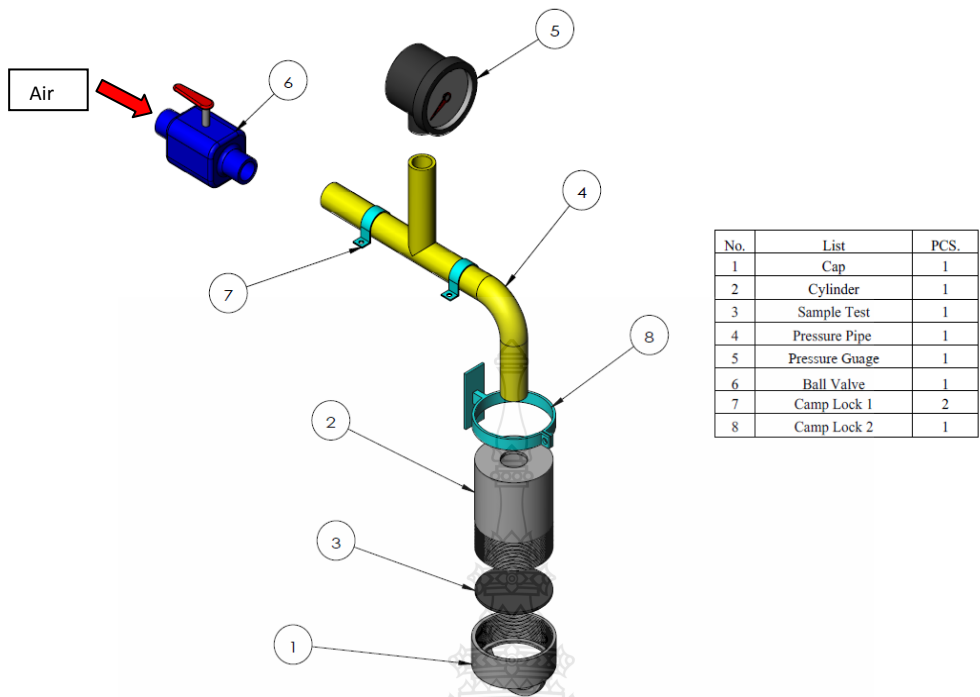
ในการทดสอบแบบ H-test adhesion ล่อนจะถูกยึดระหว่างก้อนยางทั้งสองก้อนตามมาตรฐานหลังจากนั้นทำการคงรูปยางแล้วปล่อยให้ยางเย็นลงหลังจากนั้นใช้เครื่อง Universal tensile testing machine ดึงล่อนให้หลุดจากยางและบันทึกแรงสูงสุดที่วัดได้ระหว่างการทดสอบ

2.13 เครื่องทดสอบสมบัติการกักเก็บอากาศของยาง

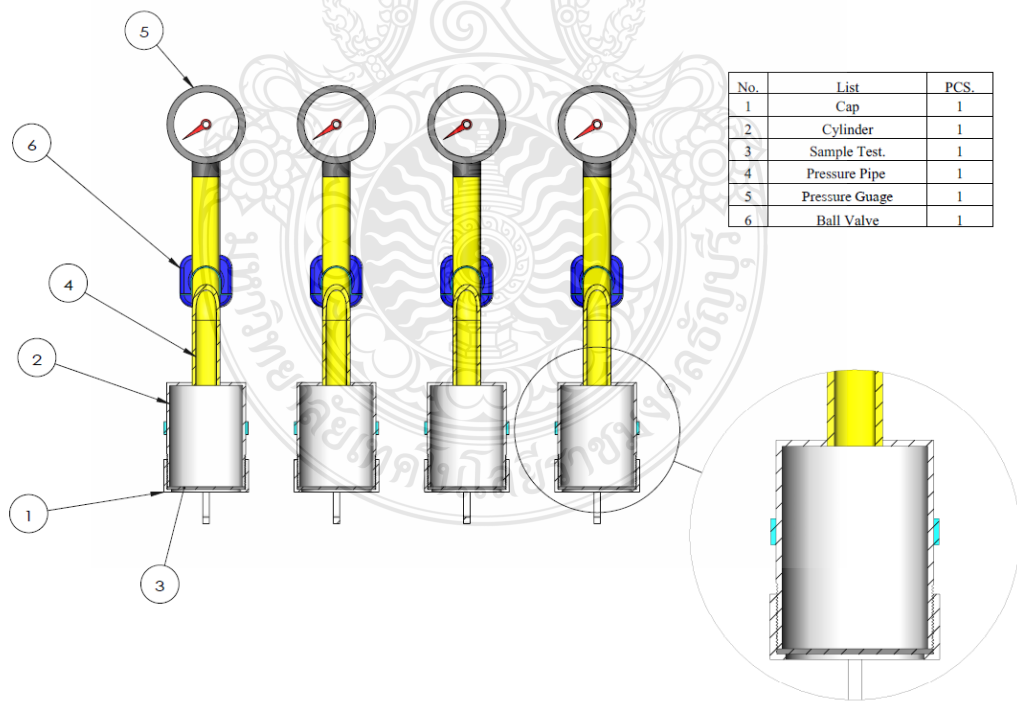
ในการทดสอบความสามารถในการกักเก็บอากาศของยางตัวอย่างนั้นจะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้นดังภาพที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบการกักเก็บอากาศ



No.	List	PCS.
1	Cap	1
2	Cylinder	1
3	Sample Test	1
4	Pressure Pipe	1
5	Pressure Gauge	1
6	Ball Valve	1
7	Camp Lock 1	2
8	Camp Lock 2	1



No.	List	PCS.
1	Cap	1
2	Cylinder	1
3	Sample Test.	1
4	Pressure Pipe	1
5	Pressure Gauge	1
6	Ball Valve	1

รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องทดสอบการกักเก็บอากาศ (ต่อ)

2.13.1 หลักการทำงานและวิธีการทดสอบของเครื่องทดสอบการกักเก็บอากาศ

2.13.1.1 เตรียมชิ้นงานให้พร้อมโดยการตัดชิ้นงานด้วย Die cut ให้ได้ตามขนาดที่กำหนดเพื่อให้สามารถใส่เข้าไปในเครื่องได้พอดี

2.13.1.2 ประกอบชิ้นงาน(3)โดยการใส่ชิ้นงานเข้าไปในฝาล่าง(1)แล้วขันเพื่อยึดติดกับตัวเครื่องให้แน่นเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศสามารถออกได้

2.13.1.3 ใช้ปั๊มลมเติมลมเข้าไปที่ปลายของวาล์ว ให้ได้ตามแรงดันตามที่กำหนด (กำหนด 33 psi) เติมทุกกระบอกให้เท่ากัน ซึ่งลมจะเข้าไปในเครื่องทดสอบโดย ผ่านไปทางท่อ (4) และจะมีตัว Pressure gauge (5) ไว้คอยตรวจวัดแรงดันที่มีอยู่ในกระบอก (2)ของเครื่อง

2.13.1.4 หลังจากนั้นเมื่ออัดลมเข้าไปตามแรงดันที่เราต้องการแล้วให้หมุนปิดวาล์ว (6) เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศที่อยู่ภายในกระบอกที่ควบคุมแรงดันไว้ไหลออกมา

2.13.1.5 ตัวอากาศที่อัดไว้จะทำหน้าที่ดันชิ้นงาน และด้วยแรงดันนี้เองก็จะทำให้อากาศบางส่วนค่อยๆหลุดออกมาจากชิ้นงานตัวอย่างอย่างช้าๆ

2.13.1.6 การตรวจวัดผลอัตราการรั่วซึมของอากาศ สามารถดูได้จากค่าแรงดันที่มีอยู่ภายในกระบอกที่ลดลง ซึ่งสามารถอ่านได้จาก Pressure gauge

2.13.1.7 แล้วให้ทำการบันทึกค่าแรงดันที่ลดลงจากการเติมครั้งแรก ทำการจดบันทึกค่าทุกวันจนได้ข้อสรุปของการเปลี่ยนแปลงที่สามารถเห็นได้ชัดเจน เท่านั้นก็จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการกักเก็บอากาศของชิ้นงานตัวอย่างแต่ละสูตรได้แล้ว

2.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) [21]

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้ลำอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว ปรากฏเป็นภาพ 2 มิติ ภาพเกิดขึ้นโดยอ้อมจากการรวบรวมสัญญาณที่เกิดภายหลังการกระทบของลำแสงอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดลำแสงอิเล็กตรอนหลังการกระทบของลำแสงอิเล็กตรอน ตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าฉาบผิวด้วยทองหรือคาร์บอน

หลักการทำงานของเครื่อง SEM ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตทัศน์ได้เลย



รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) [22]

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sabu Thomas และคณะ (1999) [23] ได้ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนของยาง NR, ENR และ NR/ENR จากการศึกษายพบความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g กับการซึมผ่านของอากาศพบว่าเมื่อค่า T_g ของยางสูงขึ้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนของ NR, ENR และ NR/ENR ลดลง และพบว่าเมื่อปริมาณการอ็อกซิเดชันของ ENR มากขึ้นจะทำให้การซึมผ่านอากาศของมันลดลงในทำนองเดียวกันในวัสดุผสมระหว่าง NR/ENR ปริมาณการซึมผ่านของอากาศจะลดลงเมื่อสัดส่วนปริมาณของ ENR เพิ่มขึ้น

Zhixin Jia และคณะ(2015) [24] ได้ศึกษาอันตรกิริยาตรงบริเวณพื้นผิวระหว่างยาง ENR กับซิลิกาในยางธรรมชาติผสมซิลิกา งานวิจัยนี้เป็นศึกษาการใช้ยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางพลวัต ในยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม โดยเตรียมคอมพาวด์ระหว่างยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์กับซิลิกา บนเครื่องบดผสมแบบเปิด จากการศึกษาพบว่าซิลิกามีการกระจายตัวและแตกตัวได้ดีในยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ ทำให้อันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของยางและซิลิกาดี สามารถอธิบายได้จากการเปิดวงแหวนของหมู่เอพอกไซด์ ของยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ ที่ทำปฏิกิริยากับ หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของ ซิลิกาเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ระหว่างผิวทั้งสองซึ่งปฏิกิริยาการเปิดวงของหมู่เอพอกไซด์ของยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์กับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกาจะเกิดขึ้นได้ดีในระหว่างกระบวนการบดผสมเนื่องมาจากแรงเชิงกลและอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกา โดยใช้ยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ เป็นตัวประสาน โดยทำการศึกษาปริมาณของยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ที่แตกต่างกันคือ 0 3 6 และ 9 phr จากผลการศึกษาวิเคราะห์และตรวจสอบ โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิก (DMA) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (tensile tester) พบว่าปริมาณยางธรรมชาติอ็อกซิไดซ์ที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้เป็นตัวประสานระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกา คือ 3 phr จะให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

Liqun Zhang และคณะ (2016) [25] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ENR เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยาง NR/NBR โดยทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง SEM, AFM, TEM, DSC, DMTA, และ tensile testing โดยจะให้ NR เป็นเฟสต่อเนื่องและ NBR ถูกทำเป็นเฟสกระจายโดยที่ขนาดของ NBR ที่กระจายอยู่ใน NR มีขนาดอยู่ที่ไมโครเมตร โดย ENR ที่เติมเข้าไปสามารถลดการร่วมตัวกันของอนุภาค NBR ที่เติมลงไปอีกทั้งยังช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง NR และ NBR อีกด้วย โดยอ้างอิงจากกฎ "like dissolves like" เมื่อเราเพิ่มความเข้มข้นของยางธรรมชาติโดยการเพิ่มยาง ENR เข้ามาทำให้พื้นที่ผิวระหว่างเฟส NR และ NBR เข้ากันได้ดีขึ้น ค่า

Wet grip และ rolling resistance ของวัสดุที่ใช้ทำหน้ายางถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น โดยผลบ่งชี้ว่า NR/NBR/ENR ternary composites แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานการฉีกขาดถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นจากผลจาก strain-induced crystallization ของยาง NR ซึ่งมีมันมีแนวโน้มที่จะเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำมาใช้ทำดอกยาง

J. Karger-Kocsis และคณะ (2004) [26] ได้ศึกษาผลของการใช้ยาง ENR เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในวัสดุผสมระหว่างยาง NR กับออร์แกโนเคลย์ โดยใช้ยาง NR เป็นเมทริกซ์และใช้ยาง ENR เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง NR กับออร์แกโนเคลย์ โดยใช้เครื่องผสมแบบปิดในการผสมและใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันแบบ Conventional โดยใช้ยาง ENR 2 เกรดในการทดลองได้แก่ ENR 25 และ ENR 50 โดยใช้ปริมาณ 5 และ 10 phr ส่วนออร์แกโนเคลย์ถูกกำหนดไว้ที่ 2 phr ผลการทดสอบพบว่า การกระจายตัวของออร์แกโนเคลย์ดีมากเมื่อใช้ยาง ENR 50 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าวัสดุผสมที่ใช้ยาง ENR 50 ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดดีที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่ใช้ยาง ENR 25 และยาง NR ที่ไม่เติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้

Hanafi Ismail และคณะ (2016) [27] ทำการศึกษาการใช้งานยาง ENR50 ผสมกับยาง NBR recycled (NBRr) ในปัจจุบันยังไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจากยังมีราคาแพง ENR50 มีสมบัติที่ดีในด้านการทนทานต่อน้ำมัน การซึมผ่านของอากาศต่ำ การปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะพื้นที่เปียกที่ดีและการต้านทานการหมุนต่ำแต่ยังมีการใช้งานอย่างจำกัดเนื่องจากยังมีราคาแพงในงานวิจัยนี้จึงมีการนำยาง NBR recycled (NBRr) ที่ผลิตมาจากถุงมือเพื่อทำการลดต้นทุนเนื่องจากยางที่ได้นี้มีสมบัติที่ดีในด้านการทนทานต่อการเจาะทะลุ การฉีกขาด และทนทานสารเคมีชนิดต่างๆ ได้ดี โดยการผสมใช้ Two-roll-mill และทำการศึกษาที่ 5 อัตราส่วน (95/5, 90/10, 85/15, 75/25 และ 65/35) ผลบ่งชี้ว่า ยาง ENR50 ผสมกับยาง NBR recycled (NBRr) สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัส และการยึดตัว ณ จุดขาด ให้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ NBR recycled (NBRr) และลักษณะทางสัณฐานวิทยาบ่งชี้ว่ายาง ENR50 ผสมกับยาง NBR recycled (NBRr) เข้ากันได้ดี

B.T. Poh และคณะ (2002) [28] ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมสารตัวเติมต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงและการฉีกขาดในยางผสมระหว่าง SMR L/ENR 25 และ SMR L/SBR โดยใช้การวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันระบบ Semi-EV (se-mi efficient vulcanization system) โดยใช้สารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ เขม่าดำเกรด N330, ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยทำการเติมที่ปริมาณ 0-40 phr ผลการศึกษาพบว่าเขม่าดำและซิลิกาที่ใส่ลงไปทำให้การยึดตัว ณ จุดขาด ลดลงแต่ค่าความทนทานต่อแรงดึง, มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์และค่าความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น มีการพบ

พฤติกรรมการรีเวอร์ชัน (Reverse behavior) ในยางผสมที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ผลข้างต้นมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟสของยางกับสารตัวเติมที่ดีของเขม่าดำและซิลิกาเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงอย่างแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับการกำหนดการเติมสารตัวเติมคงที่ SMR L/ENR 25 การยืดตัว ณ จุดขาด ลดลงแต่ค่าความทนทานต่อแรงดึง, โมดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ และค่าความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ SMR L/SBR สาเหตุเนื่องมาจาก ของยางธรรมชาติและยาง ENR สามารถเกิด Straininduced crystallization

Jin Kuk Kim และคณะ(2013) [29] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของน้ำมันและซิงค์ออกไซด์ ชนิดต่างๆที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการกักเก็บอากาศของยางผสมระหว่างยาง CIIR กับ ENR50 โดยใช้อัตราส่วนยางคือ 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและทำการผสมโดยใช้เครื่อง Two-roll-mill น้ำมัน 4 ชนิดและซิงค์ออกไซด์ 3 ชนิดถูกนำมาทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณคงที่ ผลการศึกษาพบว่า Recycled aromatic oil (RAE) และ Sheet zinc oxide ให้ผลการทดสอบโดยรวมทั้งการกักเก็บอากาศและสมบัติเชิงที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดสามารถยืนยันผลได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยา

Cuong Manh Vu และคณะ (2014) [30] ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/ENR/Nano-silica จากการศึกษาพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึง, โมดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเมื่อปริมาณของ ENR มากขึ้น และการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของยาง ENR เพิ่มขึ้น Scorch time, Cure time, Maximum torque และ Torque difference ลดลงเมื่อปริมาณ ENR มีปริมาณเพิ่มขึ้น การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่พื้นผิวที่ขาดหลังจากทดสอบความทนทานต่อแรงดึงพบว่า การเข้ากันจะเกิดได้ดีที่ปริมาณ ENR น้อยๆ ส่วน NR/ENR/Nano-silica Nanocomposites ทำการทดลองที่สัดส่วนปริมาณ NR/ENR 100/0 และ 80/20 โดยเสริมแรงด้วยนาโนซิลิกาปริมาณ 10 phr โดยทำการศึกษาผลกระทบของยาง ENR ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม ผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่ายาง ENR สามารถช่วยให้ นาโนซิลิกากระจายตัวได้ดีในเฟสของยางธรรมชาติและสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอีกด้วย

Hana Ismail และคณะ (2001) [31] ได้ศึกษาผลกระทบของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Styrene-(Eoxidized butadiene)-Styrene Triblock Copolymer (ESBS)) ที่มีต่อสมบัติการสึกตัว, สมบัติเชิงกลและความทนทานน้ำมันของยางผสมระหว่างยาง SBR/ENR โดยทำการศึกษาที่อัตราส่วนยาง SBR/ENR 75:25, 50:50, 25:75 และทำการเติม ESBS เปรียบเทียบกับไม่เติม ยาง ENR ที่ใช้เป็นเกรด ENR50 และทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ผลการทดลองบ่งชี้ว่าเมื่อปริมาณของยาง ENR เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกล (ความทนทานต่อแรงดึง, โมดูลัส และความทนทานต่อการฉีก

ขาด) และความทนทานต่อน้ำมันของยางผสมระหว่าง SBR/ENR มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่า T_{s_2} และ $T_{c_{90}}$ มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณยาง ENR เพิ่มขึ้น การเติม ESBS ทำให้สมบัติเชิงกลและความทนต่อน้ำมันของยางผสมระหว่าง SBR/ENR ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น

B.T. Poh และคณะ (2000) [32] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการคงรูปและความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมระหว่าง ENR25/SMR L และ ENR50/SMR L และทำการแปรปริมาณของยาง ENR ที่ปริมาณ 0-100% โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการคงรูปด้วยเครื่อง MDR และศึกษาความทนต่อการฉีกขาดด้วยเครื่อง Tensometer โดยผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของยาง ENR เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการคงรูปลดลงและทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดย ENR50 จะส่งผลกระทบต่อมากกว่า ENR25 การจากศึกษาความทนต่อการฉีกขาดพบว่าเมื่อปริมาณของ ENR เพิ่มขึ้นความทนต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ปริมาณการเติม ENR ที่ 50 % โดย ENR 25 และ ENR50 จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	สิ่งที่ทำการศึกษา
Sabu Thomas และคณะ (1999) [23]	ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนของยาง NR, ENR และ NR/ENR
B.T. Poh และคณะ (2000) [32]	ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการคงรูปและความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมระหว่าง ENR25/SMR L และ ENR50/SMR L
Hana Ismail และคณะ (2001) [31]	ได้ศึกษาผลกระทบของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Styrene-(Eoxidized butadiene) - Styrene Triblock Copolymer(ESBS)) ที่มีต่อสมบัติการสึกตัว, สมบัติเชิงกล และความทนทานน้ำมันของยางผสมระหว่างยาง SBR/ENR
B.T. Poh และคณะ (2002) [28]	ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมสารตัวเติมต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงและการฉีกขาดในยางผสมระหว่าง SMR L/ENR 25 และ SMR L/SBR
J. Karger-Kocsis และคณะ (2004) [26]	ได้ศึกษาผลของการใช้ยาง ENR เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในวัสดุผสมระหว่างยาง NR กับออร์แกนโอคลอยด์
Zhixin Jia และคณะ(2015) [24]	ศึกษาอันตรกิริยาตรงบริเวณพื้นผิวระหว่างยาง ENR กับซิลิกาในยางธรรมชาติผสมซิลิกา
Jin Kuk Kim และคณะ(2013) [29]	ได้ทำการศึกษาผลกระทบของน้ำมันและซิงค์ออกไซด์ชนิดต่างๆที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และการกักเก็บอากาศของยางผสมระหว่างยาง CIIR กับ ENR50
Cuong Manh Vu และคณะ (2014) [30]	ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง NR/ENR/Nano-silica
Liqun Zhang และคณะ (2016) [25]	ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง ENR เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยาง NR/NBR
Hanafi Ismail และคณะ (2016) [27]	ทำการศึกษาการใช้งานยาง ENR50 ผสมกับยาง NBR recycled (NBRr)

จากการงานวิจัยในหลายๆงานวิจัยในข้างต้น ได้มีการศึกษาสมบัติต่างๆของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ทำให้ทราบว่ายางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์สามารถใช้เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ระหว่างที่มีขั้วกับยางไม่มีขั้วและยางไม่มีขั้วกับสารตัวเติมที่มีขั้วเราจึงต้องการศึกษาผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆต่อสมบัติต่างๆ เช่น พฤติกรรมการคงรูปสมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบในล่อนกับยางผสมอีกด้วย



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อ	เกรด	ผู้ผลิต/ประเทศ
1. NATURAL RUBBER	STR20	SRI TRANG AGRO-INDUSTRY/ประเทศไทย
2. EPOXIDIZED NATURAL RUBBER	ENR50	MUANG MAI GUTHRIE/ประเทศไทย
3. EPOXIDIZED NATURAL RUBBER	ENR50	MUANG MAI GUTHRIE/ประเทศไทย
4. ZINC OXIDE	RED SEAL	CMC ADVANCE/ประเทศไทย
5. STEARIC ACID	PALMAC 1500 (BEADS)	PETCH THAI CHEMICAL/ประเทศไทย
6. N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS)	CBS-G	CHEM-LUBE INTERTRADE/ประเทศไทย
7. SULPHUR	SULPHUR POWDER	SIAM CHEMICALS/ประเทศไทย
8. CARBON BLACK	N330	THAI TOKAI CARBON/ประเทศไทย
9. SILICA	CN-180	BERKIN/ประเทศไทย
10. CALCIUM CARBONATE	HICOAT 810	SAND AND SOIL/ประเทศไทย
11. NYLON CORD	1260/D2-25	JUNMA TYRE CORD /ประเทศสาธารณรัฐ ประชาชนจีน

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อ	รุ่น	ผู้ผลิต/ประเทศ
1. เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Tow roll mill)	YFCR 8"	YONG FONG MACHINERY/ประเทศไทย
2. เครื่องผสมแบบปิด (Kneader mixer 3 liters)	YFYK 3L	YONG FONG MACHINERY/ประเทศไทย
3. เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)	MV3000A	GOTECH TESTING MACHINES/ประเทศไต้หวัน
4. เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer ; MDR)	M3000A	GOTECH TESTING MACHINES/ประเทศไต้หวัน
5. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal tensile testing machine ; UTM)	AI-700-S	GOTECH TESTING MACHINES/ประเทศไต้หวัน
6. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression moulding)	SYR-10	HONG YAO THAI/ประเทศไทย
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope ; SEM)	JSM 6340F	JEOL /ประเทศสหรัฐอเมริกา
8. เครื่องทดสอบการเก็บกักอากาศ	-	จัดสร้างขึ้นโดยบริษัทเอ็นดีรับเบอร์ จำกัด (มหาชน) / ประเทศไทย

3.3 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้กำหนดแผนการทดลอง ขอบเขตการศึกษา สำหรับการพัฒนาการปรับปรุงสมบัติด้านการยึดติดกับผ้าใบ การกักเก็บอากาศ และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติโดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดซ์ โดยขั้นตอนการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1.1 เตรียมยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สูตรยางที่ใช้ทดลองในงานวิจัย

Ingredient	NR	NR/ENR25	NR/ENR50	NR/Silica	NR/ENR25/Silica	NR/ENR50/Silica	NR/N330	NR/ENR25/N330	NR/ENR50/N330	NR/CaCO ₃	NR/ENR25/ CaCO ₃	NR/ENR50/ CaCO ₃
	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.	phr.
NR(STR20)	100	90	90	100	90	90	100	90	90	100	90	90
ENR25	-	10	-	-	10	-	-	10	-	-	10	-
ENR50	-	-	10	-	-	10	-	-	10	-	-	10
Silica	-	-	-	10	10	10	-	-	-	-	-	-
N330	-	-	-	-	-	-	10	10	10	-	-	-
CaCO₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	10
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
ZnO	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
CBS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

3.3.1.2 ทำการผสมยางเข้ากับสารเคมีที่เตรียมไว้โดยเครื่องผสมแบบปิด (Kneader) และทำการรีดแผ่นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

3.3.1.3 นำยางคอมพาวด์ที่ได้มาทดสอบความหนืดมูนนี้ด้วยมูนนี้วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 (Condition : ML1+4 @ 100 °C, frequency 2.0 cpm)

3.3.1.4 นำยางคอมพาวด์ที่ได้มาทดสอบพฤติกรรมการคงรูปด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเคลื่อนที่ (MDR) ตามมาตรฐาน ASTM D5289 (Condition : Angle 1.0 degree, frequency 100.0 cpm, 30 min at 150°C)

3.3.1.5 นำยางคอมพาวด์ที่ได้มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลโดยเครื่อง Compression moulding ที่อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลาที่ทดสอบได้จากเครื่อง MDR และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (Condition : Test speed 500 mm/min, Load cell 2 kN, ความหนาชิ้นงาน 2 mm, ความกว้าง 5 mm)

3.3.1.6 นำยางคอมพาวด์ที่ได้มาขึ้นรูปเพื่อทดสอบ Adhesion of tire cords ระหว่างยางกับเส้นไนลอน 6 และทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine ด้วยการทดสอบแบบ H- ADHESION TEST ตามมาตรฐาน ASTM D4776 (Condition : Test speed 125 mm/min, Load cell 2 kN, ความหนาชิ้นงาน 6.40 mm, ความกว้าง 25.40 mm)

3.3.1.7 นำชิ้นงานที่ได้หลังจากทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (UTM) ไปทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.1.8 เตรียมขึ้นรูปชิ้นงานและนำมาทดสอบการเก็บกักอากาศโดยเครื่องมือที่จัดสร้างโดยบริษัทเอ็นดีรับเบอร์ จำกัด(มหาชน) (Condition : Initial pressure 33 psi, ความหนาชิ้นงาน 2.0 mm, เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm)

- สูตรการคำนวณที่ใช้

$$\text{Pressure lost (\%)} = \frac{(P_i - P_t) \times 100}{P_i}$$

เมื่อกำหนดให้

P_i = ความดันเริ่มต้นที่อัดเข้าเครื่อง (Psi) (33 Psi)

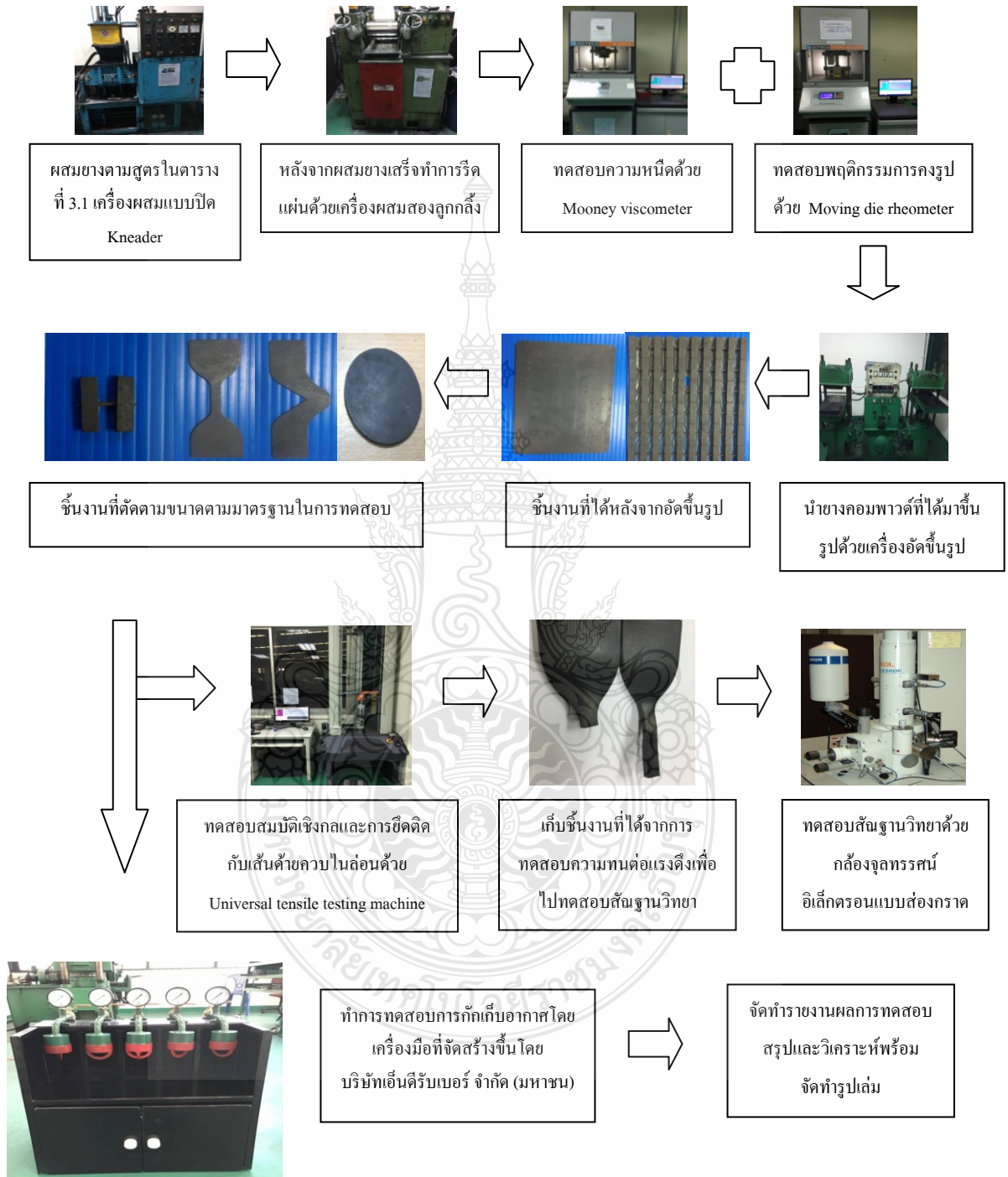
P_t = ความดันที่ตรวจวัดได้ทุก 12 ชั่วโมง (Psi)



ทดสอบการเก็บกักอากาศโดย
เครื่องมือที่จัดสร้างโดยบริษัทเอ็นดี
รับเบอร์ จำกัด (มหาชน)

3.3.1.8 ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเพื่อจัดทำเล่มรายงานวิจัย

ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.4 สถานที่และเวลาทำการวิจัย

1. ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

2. บริษัทเอ็นดีรับเบอร์ จำกัด (มหาชน)

ระยะเวลา 2 ปีการศึกษา



บทที่ 4

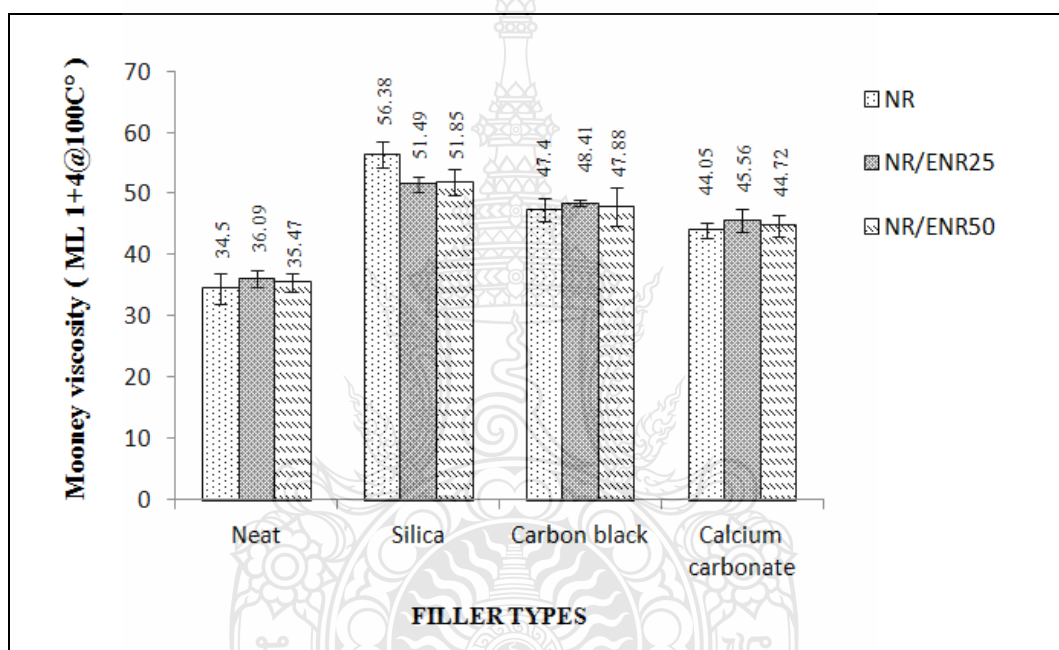
ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดของสารตัวเติมและชนิดของยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์โดยจะทำการศึกษาสมบัติการไหล (ความหนืดมูนนี่), พฤติกรรมการคงรูป, สมบัติเชิงกล, สมบัติการยึดติดกับเส้นด้ายควบในลอนและสมบัติการเก็บกักอากาศของยางผสม

4.1 ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

จากรูปที่ 4.1 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางธรรมชาติ (NR) และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ (NR/ENR) โดยใช้ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และใช้สารตัวเติม 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันคือซิลิกา, เขม่าดำเกรด N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 phr เท่ากัน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบความหนืดมูนนี่ระหว่างยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่ามีความหนืดมูนนี่ของยางทั้งสามชนิดก่อนใส่สารตัวเติมมีค่าต่างกันเล็กน้อยและเมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าซิลิกาจะให้ความหนืดมูนนี่ที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเขม่าดำ (Carbon black) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และยังพบว่าการเติมซิลิกาในยางธรรมชาติจะให้ความหนืดมูนนี่ที่สูงกว่าในยางผสมเนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วสูงเมื่อเติมลงไปยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้วจะทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ยาก [10] โดยเมื่อเติมซิลิกาลงไปในยาง ยางส่วนที่จับอยู่บนพื้นผิวของซิลิกาและยางส่วนที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซิลิกาจะถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของซิลิกาจึงทำให้ยางส่วนนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Immobilized rubber) ในขณะที่ยางส่วนที่เหลือซึ่งอยู่ด้านนอกจัดเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (Mobilized rubber) ซึ่งหากซิลิกาแตกตัวได้ไม่ดีจะทำให้ยางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้มีปริมาณมากส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดมูนนี่ที่สูงเนื่องจากยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีปริมาณน้อย แต่เมื่อเติมซิลิกาลงไปในยางผสมซึ่งซิลิกาสามารถกระจายตัวและแตกตัวได้ดีกว่าเนื่องจากยาง ENR ทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกา [33-34] ส่งผลให้ยางที่เคຍแทรกอยู่ในรูพรุนของซิลิกาถูกปลดปล่อยออกมาด้านนอกกลายเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระค่าความหนืดมูนนี่จึงลดลง [35] การเติมซิลิกาในยางผสม ENR25 และ ENR50 ให้ความหนืดมูนนี่ต่างกันเล็กน้อย

ในกรณีของเขม่าดำ (Carbon black) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ที่เติมในยางธรรมชาติและเติมในยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าความหนืดมูนนี่ไม่แตกต่างกันอาจจะเป็นเพราะสารตัวเติมทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นขั้วที่ต่ำจึงทำให้สามารถเข้ากับยางธรรมชาติซึ่งมีขั้วต่ำเหมือนกันได้คืออยู่แล้วความหนืดมูนนี่จึงไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญและเขม่าดำจะมีความหนืดมูนนี่ที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากเขม่าดำมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าจึงมีการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างยางกับสารตัวเติมได้มากกว่าจึงทำให้มีความหนืดมูนนี่ที่มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า



รูปที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

4.2 การศึกษาพฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristic)

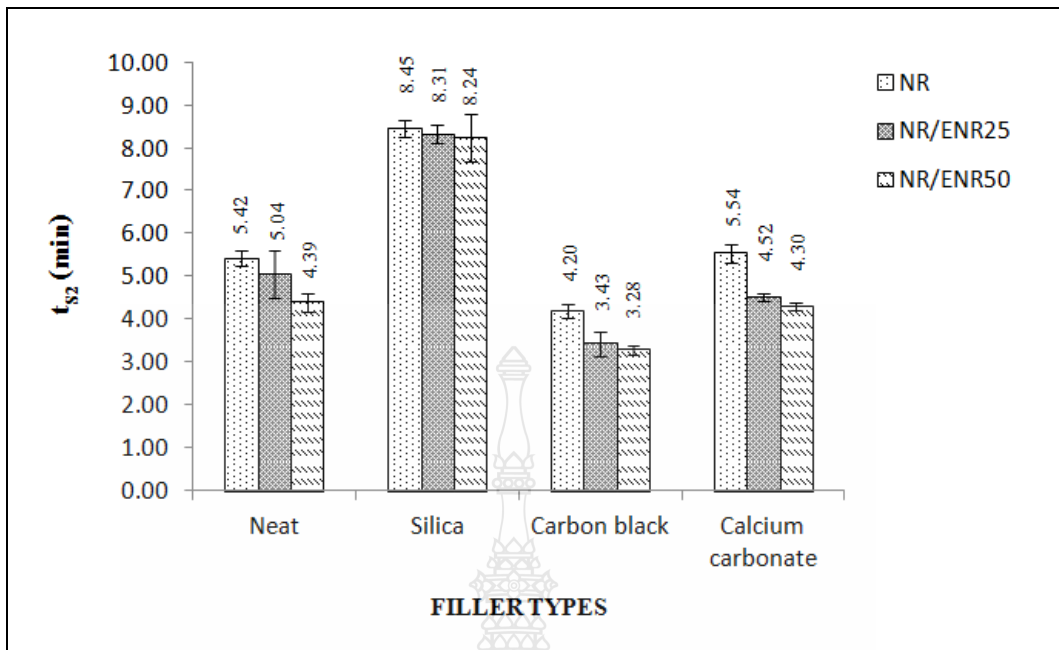
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 คือกราฟแสดงผลการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติฟ็อกซีไคซ์โดยใช้ยางธรรมชาติฟ็อกซีไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และใช้สารตัวเติม 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันคือซิลิกา, เขม่าดำเกรด N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 phr จากผลการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปพบว่าเมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าเวลาในการเริ่มคงรูป (t_{92})

และเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{c90}) ของยางผสมมีแนวโน้มจะสั้นกว่ายางธรรมชาติและในยางผสม NR/ENR50 มีแนวโน้มที่จะสั้นกว่า NR/ENR25 เนื่องจากหมู่เอพ็อกไซด์ (Epoxyde group) ที่อยู่ในยางธรรมชาติเอพ็อกไซด์จะไปกระตุ้นให้พันธะคู่ (Double bonds) ที่อยู่ติดกันมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization) มากขึ้นจึงส่งผลให้เวลาในการคงรูปมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมยาง ENR ลงไป [32,36,39] และเมื่อมีหมู่เอพ็อกไซด์มากขึ้นก็จะทำให้มีพันธะคู่ที่ว่องไวมากขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น

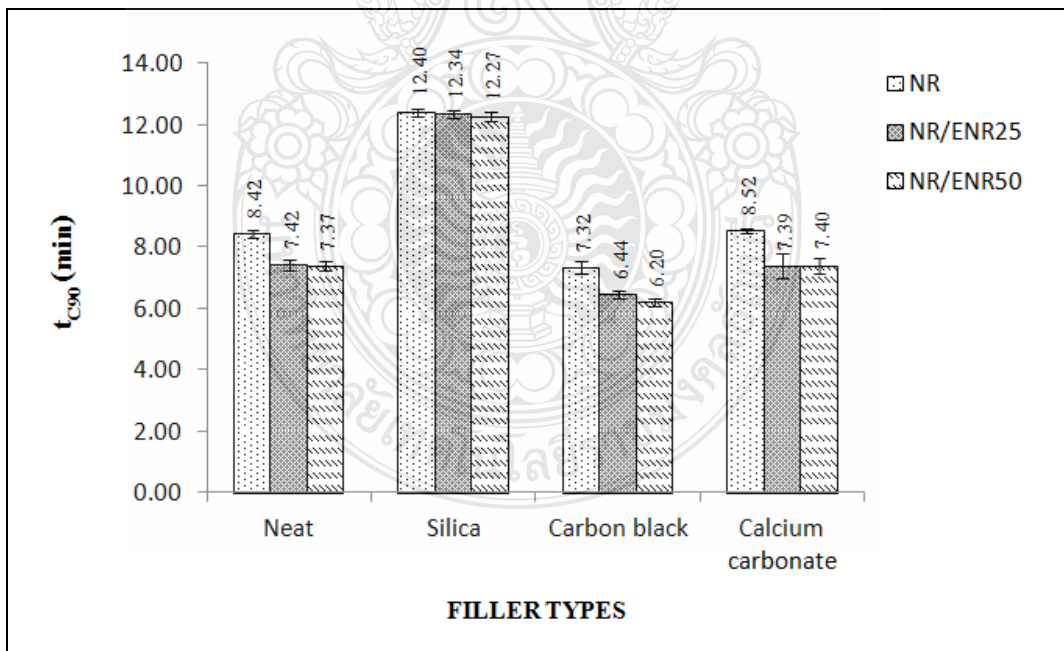
เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่าซิลิกาให้เวลาในการเริ่มคงรูปและเวลาในการคงรูปที่ยาวนานกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกาเต็มไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขั้วสูงอีกทั้งหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงคั้งนั้นจึงทำให้ดูดซับสารเคมีต่างๆ โดยเฉพาะกลุ่มสารตัวเร่งจึงทำให้เวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติและยางผสมที่เติมซิลิกามีแนวโน้มที่จะยาวนานกว่าสารตัวเติมตัวอื่น [32, 37-38] เมื่อเปรียบเทียบยางทั้ง 3 ชนิดที่เติมซิลิกาพบว่ายางผสมจะทำให้เวลาในการคงรูปสั้นกว่าในยางธรรมชาติและในยางผสม NR/ENR50 จะพบว่าเวลาในการคงรูปสั้นกว่า NR/ENR25 เนื่องจากเมื่อมีหมู่เอพ็อกไซด์มากขึ้นก็จะทำให้มีพันธะคู่ที่ว่องไวขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น

ในส่วนของเขม่าดำจะให้เวลาในการเริ่มคงรูป (t_{s2}) และเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{c90}) สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากเขม่าดำที่ใช้ในงานวิจัย (furnace black : N330) มีค่า pH ที่เป็นกลางค่อนข้างต่ำจึงส่งผลส่งเสริมทำให้ปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization) ของยางเกิดได้เร็วขึ้น [39] เมื่อเปรียบเทียบยางทั้ง 3 ชนิดที่เติมเขม่าดำพบว่ายางผสมจะทำให้เวลาในการคงรูปสั้นกว่าในยางธรรมชาติ และในยางผสม NR/ENR50 จะพบว่าเวลาในการคงรูปสั้นกว่า NR/ENR25 เช่นเดียวกันกับในกรณีของซิลิกา

ในส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้เวลาในการเริ่มคงรูป (t_{s2}) และเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{c90}) ใกล้เคียงกันกับยางธรรมชาติและยางผสมที่ไม่เติมสารตัวเติมแต่ยาวกว่าในกรณีของเขม่าดำสาเหตุอาจมาจากการที่แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงและเกิดอันตรกิริยากับยางได้น้อยจึงไม่ส่งผลให้พฤติกรรมคงรูปของยางเปลี่ยนแปลงไปมากนัก เมื่อเปรียบเทียบยางทั้ง 3 ชนิดพบว่ายางผสมจะทำให้เวลาในการคงรูปสั้นกว่าในยางธรรมชาติและในยางผสม NR/ENR50 จะพบว่าเวลาในการคงรูปสั้นกว่า NR/ENR25 เช่นเดียวกันกับในกรณีของเขม่าดำและซิลิกา



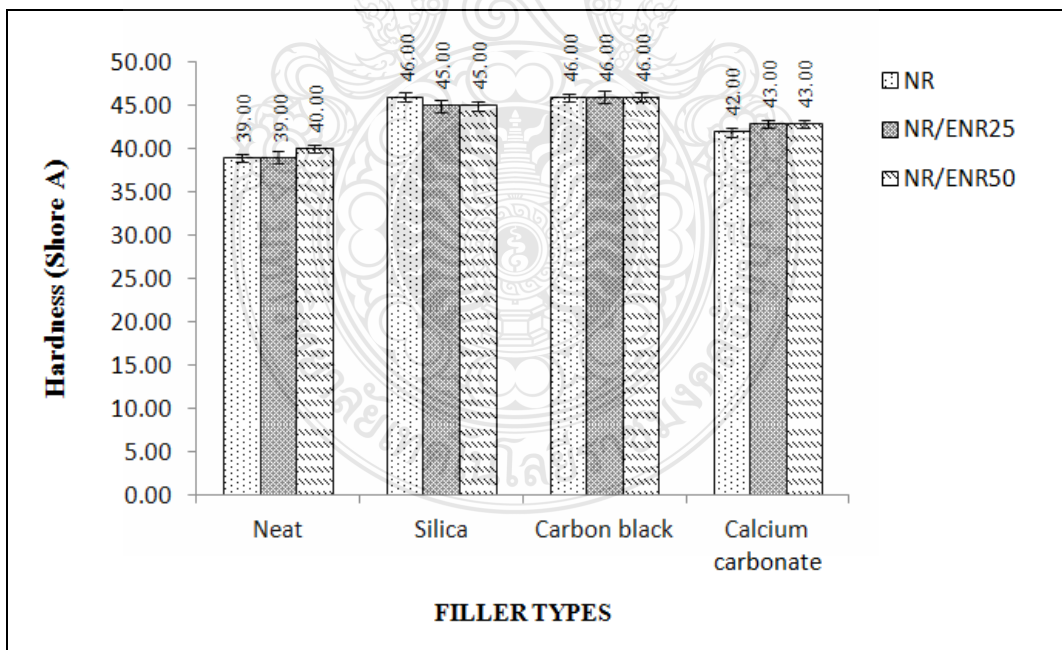
รูปที่ 4.2 ค่า t_{s2} ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr



รูปที่ 4.3 ค่า t_{c90} ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

จากรูปที่ 4.4 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความแข็ง (Shore A) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติฟ็อกซีไดซ์โดยใช้ยางธรรมชาติฟ็อกซีไดซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และใช้สารตัวเติม 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันคือซิลิกา, เขม่าดำเกรด N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 phr พบว่าความแข็งของยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่ไม่เติมสารตัวเติมมีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่าการเติมซิลิกาและเขม่าดำจะให้ค่าความแข็งที่มากกว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากทั้ง ซิลิกาและเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงซึ่งจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กและสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างยางกับสารตัวเติมได้มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต [10] โดยทั่วไปเขม่าดำเกรด N330 กับซิลิกาเกรดทางการค้าทั่วไปเมื่อเติมลงไปนยาง 2 phr จะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น 1 Shore A ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตจะต้องเติมถึง 8 phr จึงจะทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น 1 Shore A จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้การเติมเขม่าดำและซิลิกาจึงให้ค่าความแข็งที่มากกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติม และยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยเมื่อเปรียบเทียบยางแต่ละชนิดที่เติมสารตัวเติมชนิดเดียวกัน พบว่าความแข็งของยางแต่ละชนิดมีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



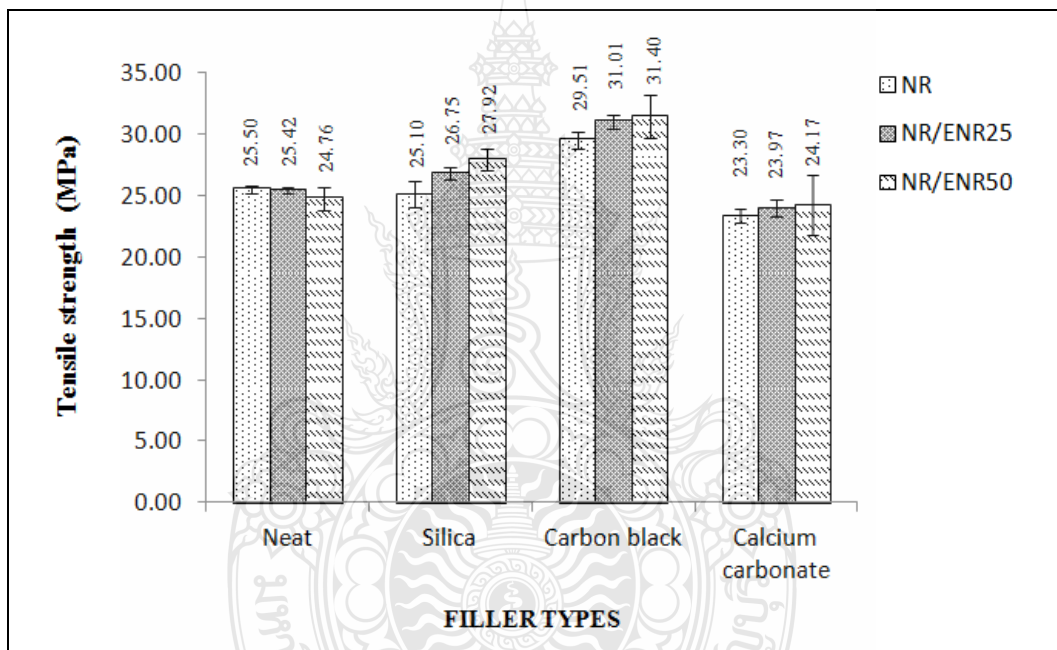
รูปที่ 4.4 ความแข็ง (Hardness : Shore A) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

รูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 คือกราฟแสดงผลการทดสอบค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength), โมดูลัสที่ระยะยืด 300% (300% Modulus) และค่าความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์โดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และใช้สารตัวเติม 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกัน คือซิลิกา, เขม่าดำเกรด N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 phr พบว่าเมื่อเทียบยางธรรมชาติกับยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่ายางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางผสมทั้งสองชนิดเล็กน้อยเนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะใกล้เคียงกันและอาจเกิดจากการทำคอมพอสิตของ ENR ลงไปในปริมาณที่น้อยจึงไม่ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไปแต่เมื่อทำการเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆลงไปพบว่ายาง ENR สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสมให้ดีขึ้นได้

เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติม ซิลิกา เขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เติมลงไปในยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าเขม่าดำจะให้ค่าความทนต่อแรงดึง, 300 % modulus และค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงที่สุดรองลงมาจะเป็นซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ เนื่องจากเขม่าดำมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตอีกทั้งยังเป็นสารตัวเติมที่สามารถเข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วจึงทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาได้มากกว่าซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งทำให้เขม่าดำสามารถเสริมแรงได้ดีกว่า [28] เมื่อเปรียบเทียบยางทั้ง 3 ชนิดที่เติมเขม่าดำพบว่ายางผสมจะให้ค่าความทนต่อแรงดึง, 300 % modulus และค่าความทนต่อการฉีกขาดสูงกว่าในยางธรรมชาติและในยางผสม NR/ENR50 จะให้สมบัติที่ดีกว่า NR/ENR25 เนื่องจากยาง ENR ทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ระหว่างยางกับสารตัวเติมได้ โดยที่ยาง ENR อาจจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันบนผิวของเขม่าดำเช่นหมู่ฟีนอลิก (phenolic) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ควิโนน (quinone) และคาร์บอกซิล (carboxyl) รวมไปถึงอนุมูลอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลของยางได้ โดยยาง ENR อาจจะไปเพิ่มอันตรกิริยาซึ่งอยู่ในรูปของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waal's) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bound) ระหว่างยางกับเขม่าดำจึงทำให้ยางผสมที่เติมเขม่าดำมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่เติมเขม่าดำ เมื่อสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อเติมเขม่าดำลงไปยางผสม NR/ENR50 พื้นที่ผิวที่พบมีความขรุขระแต่ไม่พบอนุภาคของเขม่าดำอยู่บนพื้นผิวซึ่งบ่งบอกถึงความเข้ากันได้ดีกับทั้งยางธรรมชาติและยางผสมจึงทำให้ยางที่เติมเขม่าดำให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

ในกรณีของซิลิกาที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีรองลงมาจากเขม่าดำ เมื่อเติมซิลิกาลงไปในยางธรรมชาติจะให้ค่าความทนต่อแรงดึง, โมดูลัสที่ระยะยืด 300% และค่าความทนต่อการฉีกขาดต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมลงไปยางผสมและในยางผสม NR/ENR50 จะให้ค่ามากกว่า NR/ENR25

เนื่องจากการเติมซิลิกาลงไปในยางธรรมชาติซิลิกาจะเข้ากันไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากซิลิกามีความเป็นขั้วที่ต่างกับยางธรรมชาติจึงทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวไม่ดีส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงต่ำ แต่ในกรณีของยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 ซิลิกาสามารถแตกตัวและเข้ากันได้ดีกับยางผสมเนื่องจากยาง ENR สามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Compatibilizer) ระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมที่มีขั้วเช่นซิลิกาได้ [33-34] และพบว่ายาง ENR50 สามารถช่วยเชื่อมประสานระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกาได้ดีกว่า ENR25 โดยสังเกตได้จากภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.11 พบว่าซิลิกากระจายตัวได้ดีกว่าในยางผสม NR/ENR50 และสามารถขึ้นชั้นได้จากค่าความทนต่อแรงดึง 300 % modulus และความทนต่อการฉีกขาดที่มากกว่า

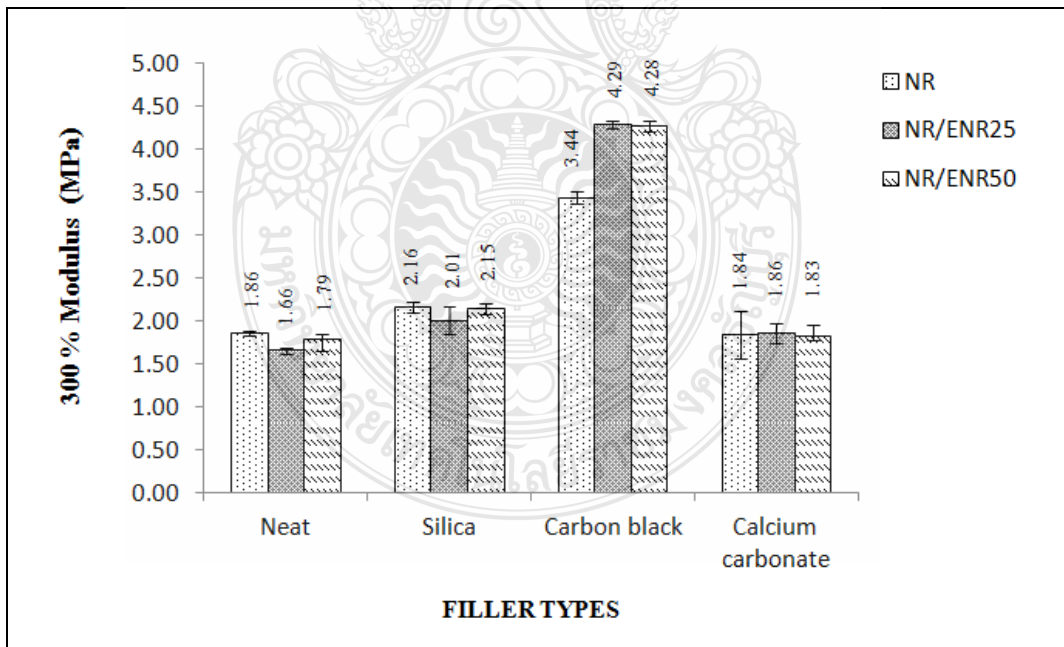


รูปที่ 4.5 ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength : MPa) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

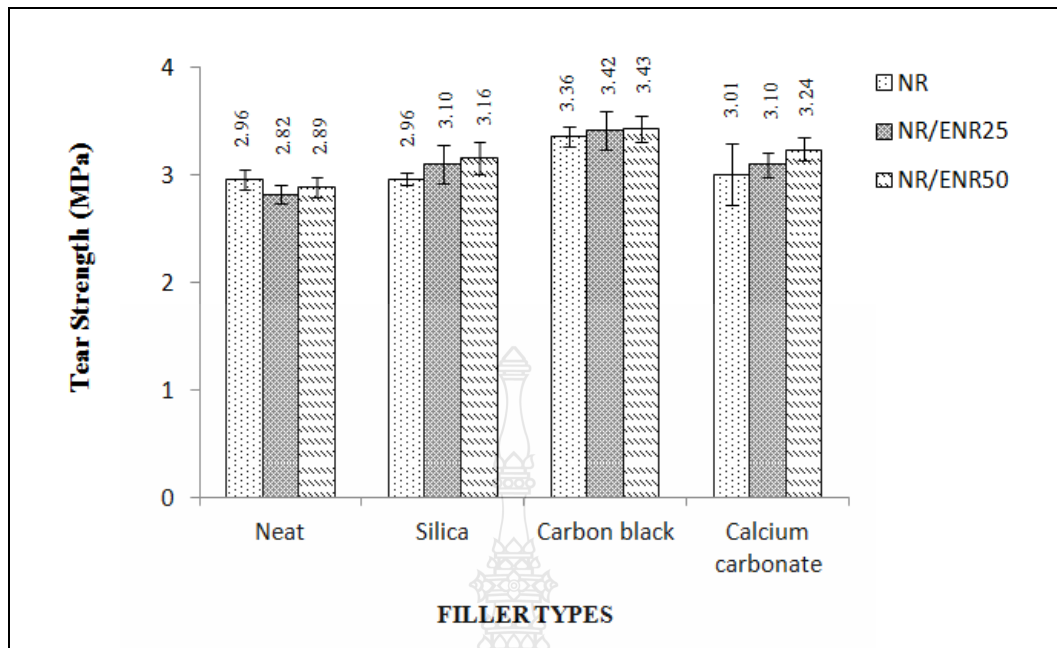
ส่วนในกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตให้ค่าความทนต่อแรงดึง, โมดูลัสที่ระยะยืด 300% และค่าความทนต่อการฉีกขาดต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกาเนื่องจากเป็นสารตัวเติมเฉื่อยหรือสารตัวเติมไม่เสริมแรงเพราะมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกาน้ำที่หลักของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในยางธรรมชาติส่วนมากเพื่อลดต้นทุน [10] จึงให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่ต่ำเมื่อเทียบกับระหว่างยางธรรมชาติและยางผสมที่ไม่เติมสารตัวเติมและใส่สารตัวเติม

เขม่าดำและซิลิกาแต่ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆคือเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปอย่างผสมมีแนวโน้มที่ค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นและในอย่างผสม NR/ENR50 มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดที่สูงกว่า NR/ENR25 เพราะในอย่างผสมแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแตกตัว กระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับอย่างผสมได้มากกว่าโดยสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยา

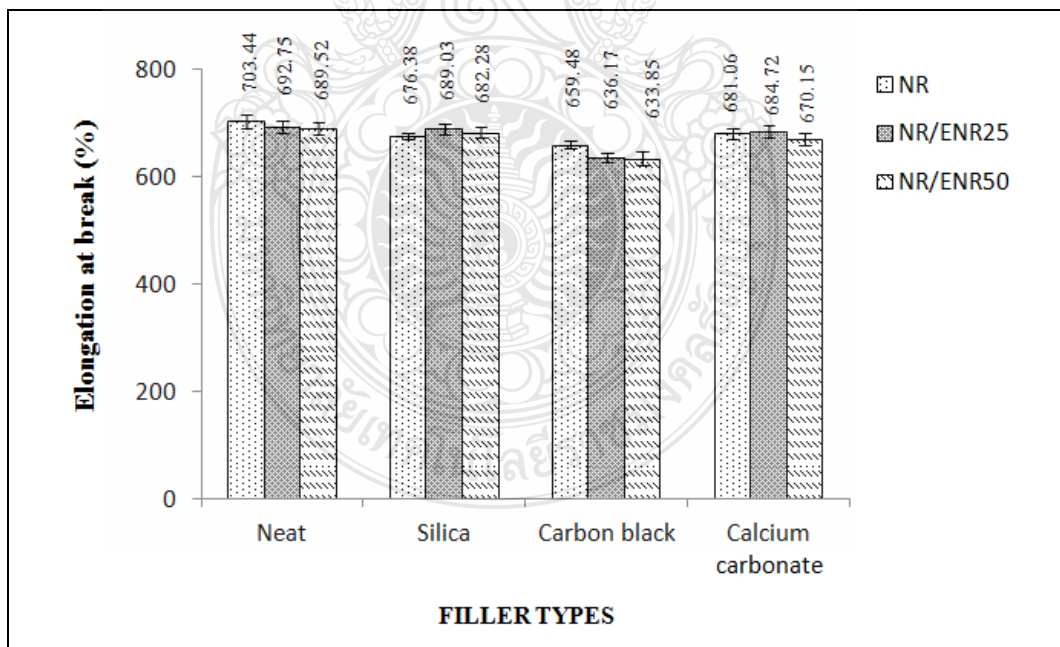
จากรูปที่ 4.8 คือกราฟแสดงผลการทดลองการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break : %) ของยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าอย่างทั้ง 3 ชนิดที่เติมสารตัวเติมชนิดเดียวกันพบว่ามีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่ายางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25, NR/ENR50 ที่ไม่เติมสารตัวเติมมีแนวโน้มจะให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงที่สุดและเมื่อเติมซิลิกา, แคลเซียมคาร์บอเนต ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเนื่องจากสารตัวเติมทำให้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางยากขึ้นจึงส่งผลให้ยางมีการยืดตัวได้น้อย ส่วนเขม่าดำให้ค่า การยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำที่สุดเนื่องมาจากเขม่าดำสามารถเกิดอันตรกิริยาและเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติและยางผสมได้มากที่สุดจึงทำให้เขม่าดำเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ได้ยากที่สุดส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงมากที่สุดเป็นเหตุให้ยืดตัวได้น้อยเมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น



รูปที่ 4.6 มอดูลัสที่ระยะยืด 300% (300% Modulus : MPa) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr



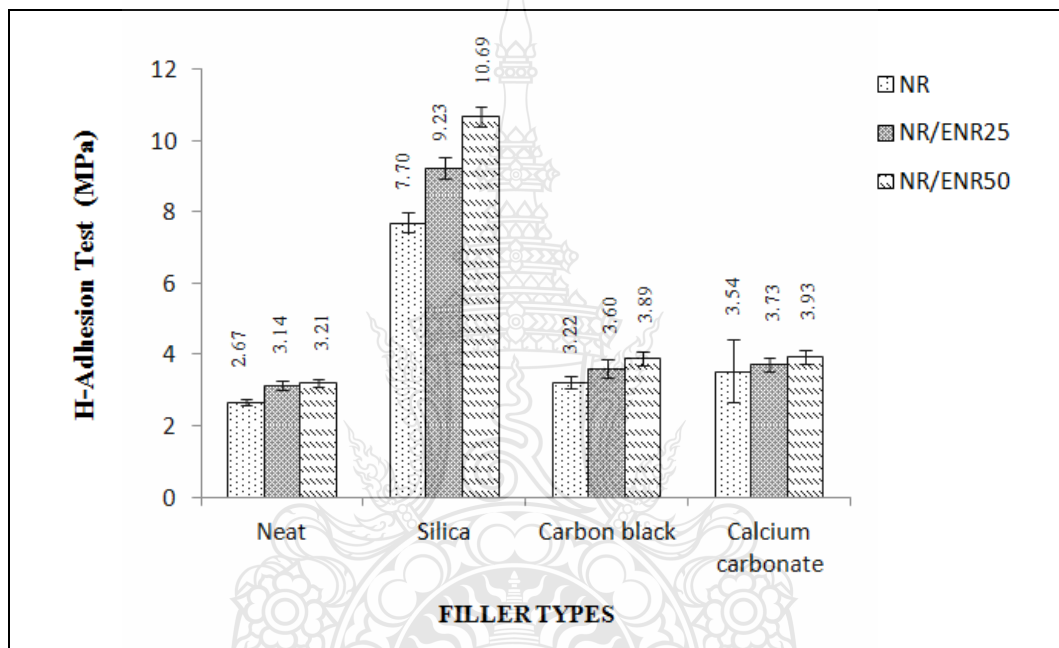
รูปที่ 4.7 ความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength : MPa) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr



รูปที่ 4.8 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break : %) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

4.4 ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอนกับยาง (H-Adhesion Test)

จากรูปที่ 4.9 คือกราฟแสดงผลการทดสอบผลการทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยาง (H-Adhesion Test) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์โดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และใช้สารตัวเติม 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกัน คือซิลิกา, เขม่าดำเกรด N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยาง (H-Adhesion Test) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง 3 ชนิดพบว่ายางผสม NR/ENR50 มีแนวโน้มที่จะให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยางที่สูงที่สุดเนื่องจากมี Epoxide group จำนวนมากที่สุดอีกทั้งยังมีความเป็นขี้เกลือเดียวกับไนลอน 6 เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 จึงทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวของเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยางได้มากที่สุดเพราะเส้นด้ายควบไนลอน 6 เต็มไปด้วย Amide group จึงสามารถเกิดอันตรกิริยา (Hydrogen bonding) กับยางผสม NR/ENR50 ตรงตำแหน่งของ Epoxide group

ของยาง ENR50 ซึ่งจะมี Epoxide group ที่มากกว่า ENR25 จึงสามารถเกิดอันตรกิริยาได้มากกว่ายางผสม NR/ENR25 และยางธรรมชาติจึงส่งผลให้เกิดการยึดติดที่ดีระหว่างยางผสม NR/ENR50 กับเส้นด้ายควบไนลอน 6

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยางของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าซิลิกาให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดที่มากที่สุดเนื่องมาจากซิลิกามีความเป็นขั้วที่สูง [10] คล้ายกับไนลอน 6 อีกทั้ง Silanol group บนผิวของซิลิกายังสามารถเกิดอันตรกิริยา (Hydrogen bonding) กับ Amide group ของเส้นด้ายควบไนลอน 6 และ Epoxide group ของยาง ENR จึงทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาได้มากที่สุดกับเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับทั้งยางธรรมชาติและยางผสมโดยเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางธรรมชาติ ยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่เติมซิลิกาพบว่า NR/ENR50 จะให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบไนลอน 6 ที่ดีที่สุดรองลงมาจะเป็น NR/ENR25 และยางธรรมชาติตามลำดับเนื่องจาก ENR50 มี Epoxide group ที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Hydrogen bonding) ระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยางได้มากที่สุด

ส่วนเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยางใกล้เคียงกันเนื่องจากเกิดอันตรกิริยากับเส้นด้ายควบไนลอนที่น้อยเมื่อเทียบกับซิลิกาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางทั้ง 3 ชนิดที่เติมเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มเหมือนกับในกรณีของยางธรรมชาติและยางผสมที่ไม่เติมสารตัวเติมซิลิกาคือเมื่อเติมเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปยางผสม NR/ENR50 จะให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบไนลอน 6 ที่ดีที่สุดรองลงมาจะเป็น NR/ENR25 และยางธรรมชาติตามลำดับเนื่องจาก ENR50 มี Epoxide group ที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Hydrogen bonding) ระหว่างเส้นด้ายควบไนลอน 6 กับยางได้มากที่สุด

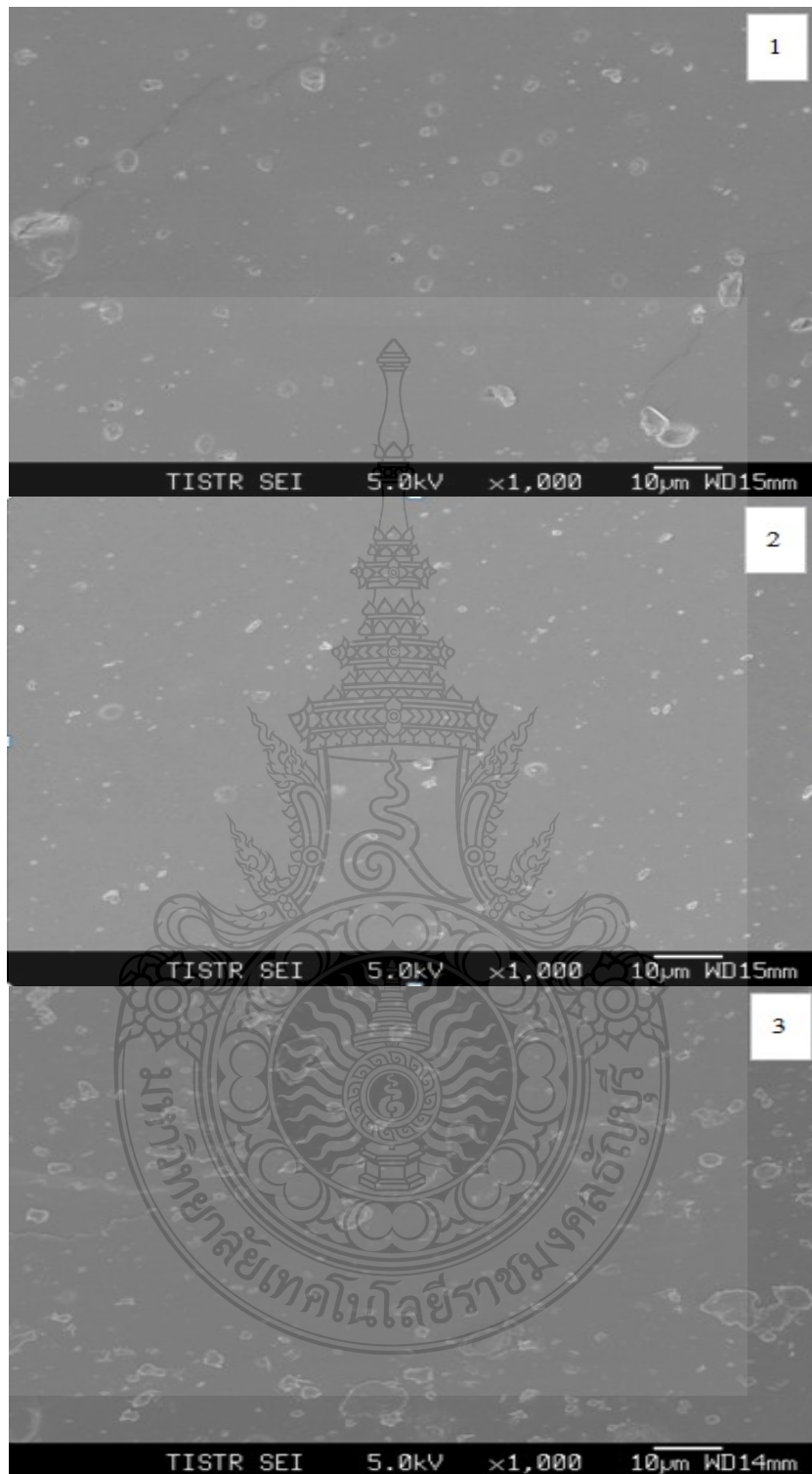
4.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

จากรูปที่ 4.10 เป็นภาพแสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่ไม่เติมสารตัวเติมพบว่ายาง ENR25 และ ENR50 สามารถเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติโดยเราไม่พบการแยกเฟสของยางทั้งสองจึงสามารถสรุปได้ว่ายางธรรมชาติกับยาง ENR สามารถเข้ากันได้ดีเพราะใส่ลงไปเพียง 10 phr

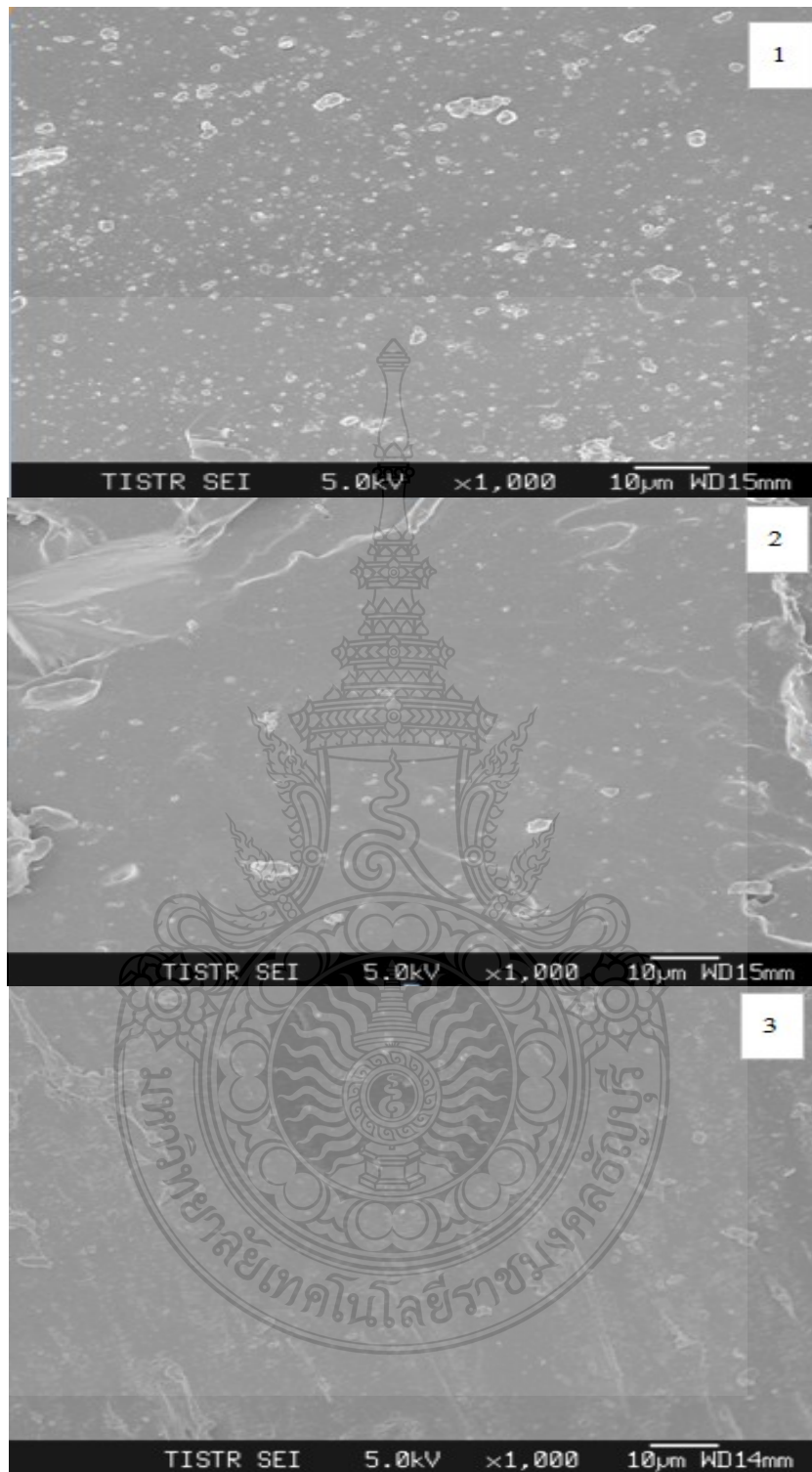
จากรูปที่ 4.11 เป็นภาพแสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเติมซิลิกา ลงไปในยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าเมื่อเติมซิลิกา ลงไปในยางธรรมชาติ (1) พบซิลิกากระจายตัวอยู่ในเฟสของยาง โดยมีทั้งอนุภาคเล็กและอนุภาคที่ใหญ่กระจายอยู่ โดยทั่วไปแล้วซิลิกามีความเป็นขั้วที่ต่างกับกับยางธรรมชาติจึงทำให้เข้ากันได้ยากแต่เมื่อเติมซิลิกาเข้าไปในยางผสม NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) พบว่าซิลิกาสามารถแตกตัวและกระจายตัวได้ดีจึงมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงในยางผสมเนื่องจากยาง ENR มีความเป็นขั้วที่ใกล้เคียงกับซิลิกามากกว่ายางธรรมชาติจึงทำให้สามารถเข้ากันได้ดีกับสารตัวเติมที่มีขั้วหรือยางที่มีขั้วได้ดีอีกทั้งยาง ENR สามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Compatibilizer) ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกา [33-34]

จากรูปที่ 4.12 เป็นภาพแสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเติมเขม่าคาร์บอน ลงไปในยางธรรมชาติและยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าเขม่าคาร์บอนสามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติและยางผสม ได้ดีซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่พบว่าเขม่าคาร์บอนให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ

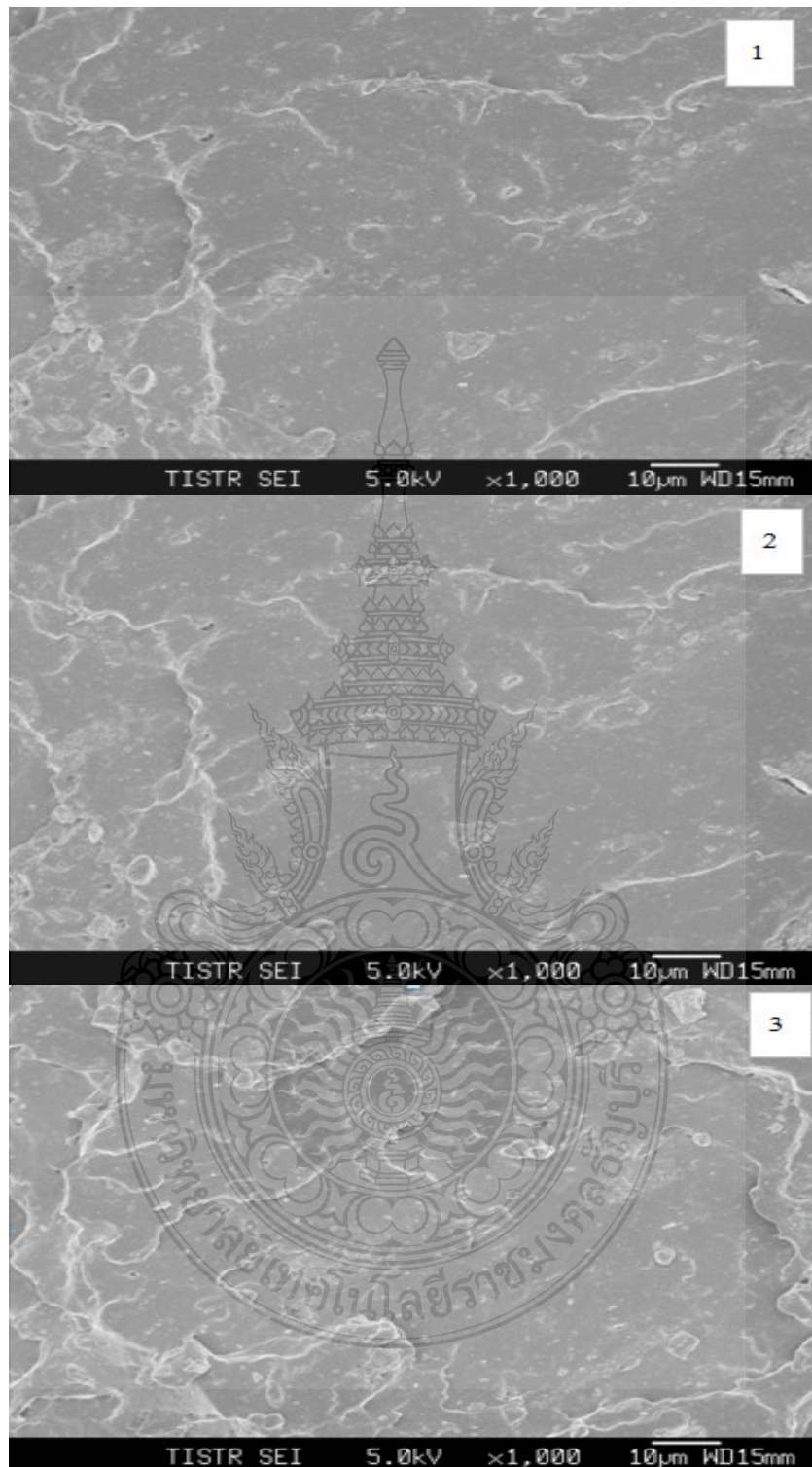
จากรูปที่ 4.13 เป็นภาพแสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในยางธรรมชาติ (1) พบแคลเซียมคาร์บอเนตเกาะกลุ่มเป็นก้อนอยู่ในเฟสของยางแต่เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปในยางผสม NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแตกตัวได้ดีขึ้น โดยและในยางผสม NR/ENR50 แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแตกตัวและกระจายตัวได้ดีกว่าในยางผสม NR/ENR25 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่พบว่า NR/ENR50 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดตามมาด้วย NR/ENR25 และยางธรรมชาติตามลำดับ



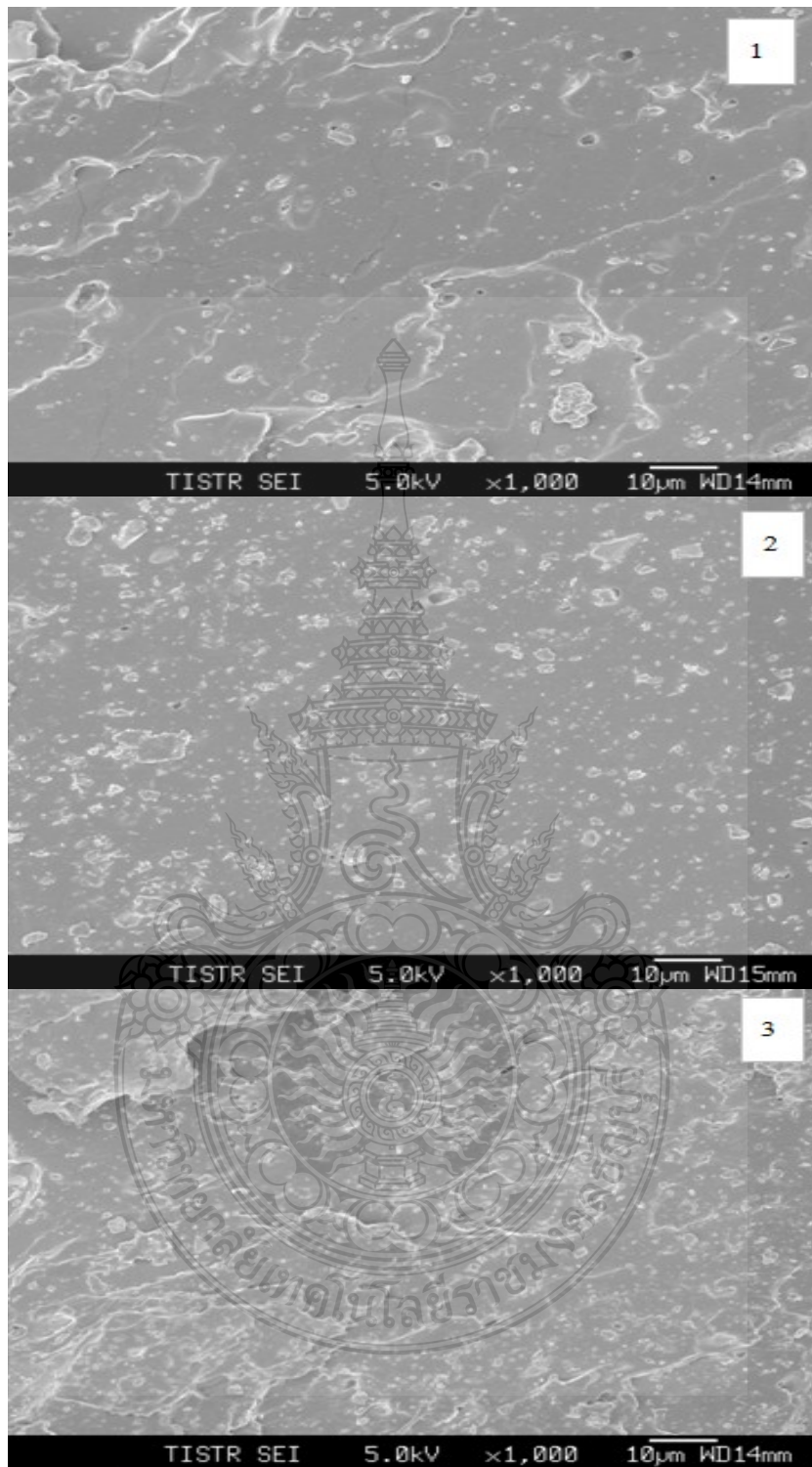
รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่างNR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10



รูปที่ 4.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมซิลิกาที่ 10 phr



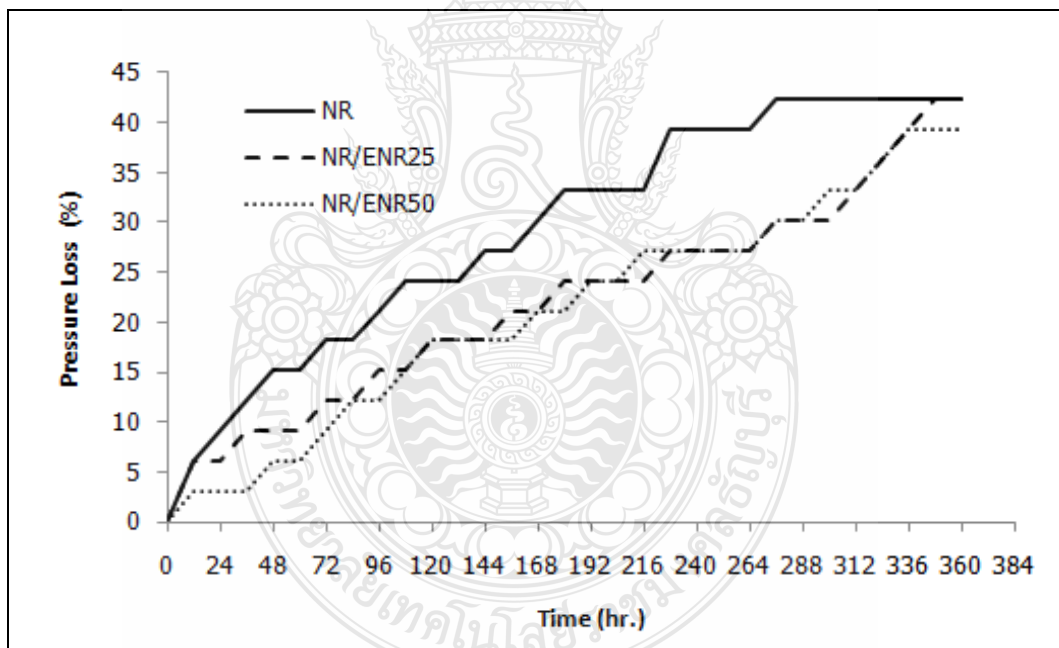
รูปที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมเขม่าดำที่ 10 phr



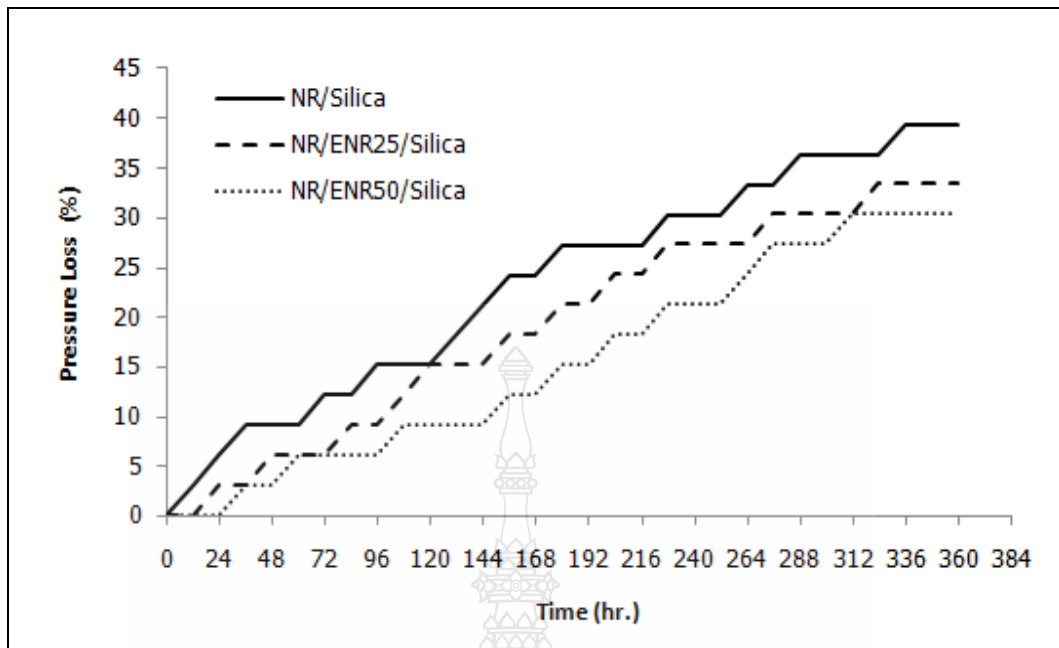
รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยาง NR (1), ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 (2) และ NR/ENR50 (3) ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 phr

4.6 การศึกษาสมบัติด้านการกักอากาศ (Gas barrier properties)

การทดสอบสมบัติด้านการกักอากาศโดยเครื่องทดสอบที่ทางทีมผู้วิจัยได้จัดสร้างขึ้นมาจากรูปที่ 4.14 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์โดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 พบว่ายางธรรมชาติมีอัตราการสูญเสียความดันในช่วงแรกที่สูงและค่อยๆลดลงตามเวลาในการทดสอบซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่ายางธรรมชาติมีอัตราการกักเก็บลมที่น้อยจึงมีการสูญเสียความดันมากที่สุดตามมาด้วยยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 ซึ่งพบว่ามีอัตราการสูญเสียความดันที่ใกล้เคียงกันแต่อัตราการสูญเสียความดันจะช้ากว่ายางธรรมชาติซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของคุณ Sabu Thomas และคณะ [23] พบว่าเมื่อปริมาณการอีพ็อกซีไคซ์ของ ENR มากขึ้นจะทำให้การซึมผ่านอากาศของลดลงในทำนองเดียวกันในยางผสมระหว่าง NR/ENR ปริมาณการซึมผ่านของอากาศจะลดลงเมื่อสัดส่วนปริมาณของ ENR ที่ผสมกับ NR เพิ่มขึ้น

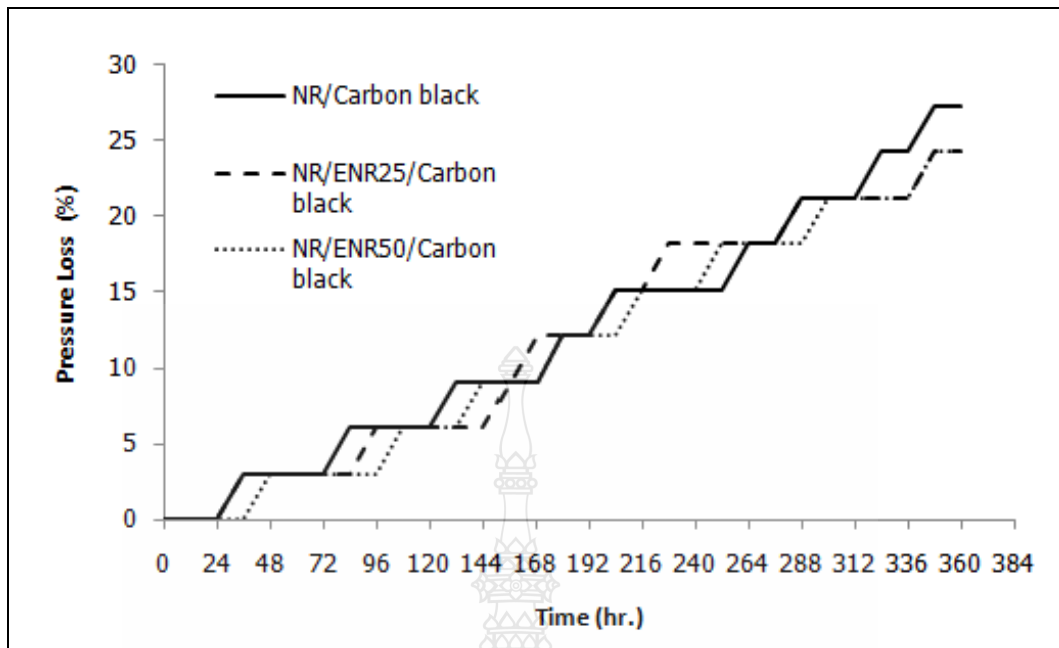


รูปที่ 4.14 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10



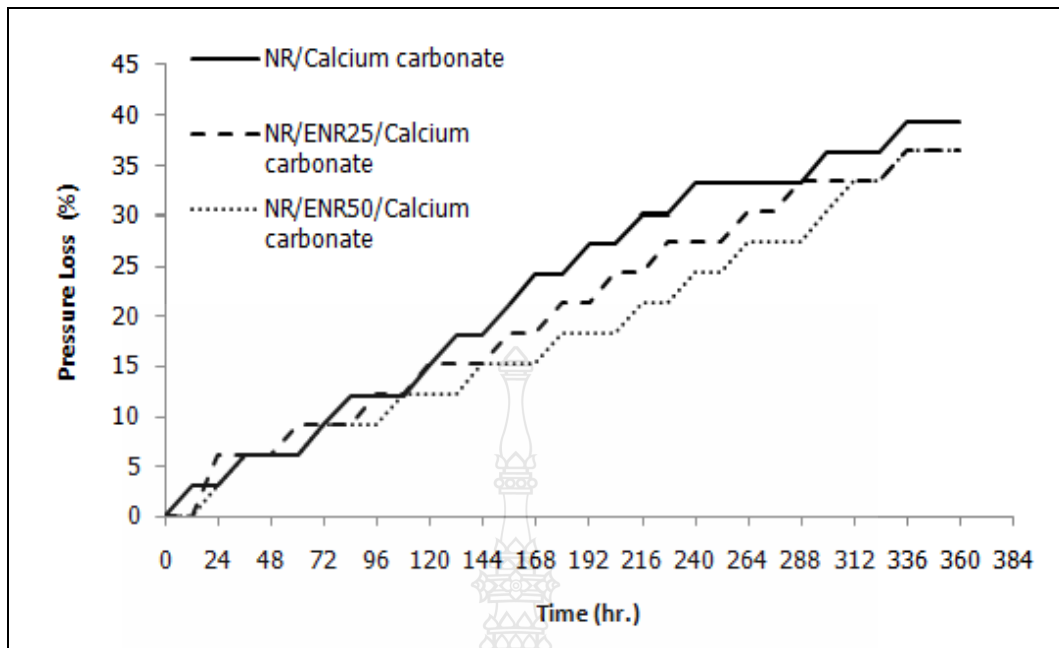
รูปที่ 4.15 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมซิลิกาที่ 10 phr

จากรูปที่ 4.15 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไคซ์โดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และทำการเติมซิลิกาที่ 10 phr พบว่าเมื่อเติมซิลิกาลงไป ในยางธรรมชาติจะมีอัตราการสูญเสียความดันที่เร็วที่สุดรองลงมาจะเป็นยางผสม NR/ENR25 และสุดท้าย NR/ENR50 ซึ่ง NR/ENR50 มีการสูญเสียความดันที่น้อยที่สุดเมื่อทดสอบจนครบ 360 ชั่วโมง พบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกับอัตราเร็วของการสูญเสียความดันคือยางผสม NR/ENR50 จะสูญเสียความดันน้อยที่สุดนั่นก็หมายความว่ามีการกักเก็บอากาศที่ดีที่สุดรองลงมาจะเป็น NR/ENR25 และยางธรรมชาติตามลำดับสาเหตุอาจจะมาจากการกระจายตัวที่ดีของซิลิกา โดยเมื่อซิลิกากระจายตัวได้ดี จึงเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากขึ้นและอนุภาคอาจจะจัดเรียงตัวได้ใกล้กันมากขึ้นจึงทำให้อากาศแพร่ ออกมาได้ยากตามไปด้วย



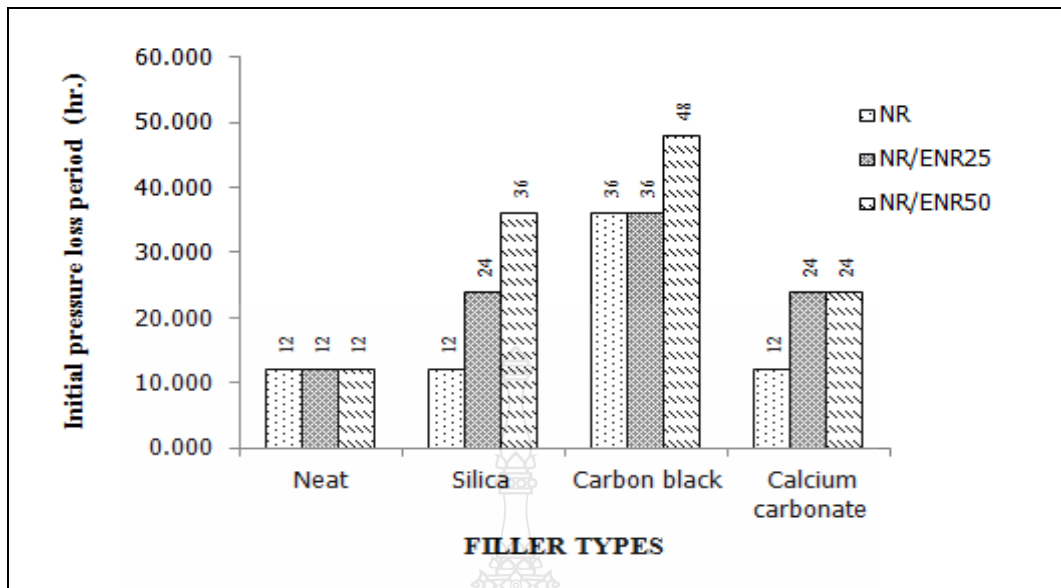
รูปที่ 4.16 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมเขม่าดำที่ 10 phr

จากรูปที่ 4.16 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์โดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และทำการเติมเขม่าดำที่ 10 phr พบว่าเมื่อเติมเขม่าดำลงไป ในยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 ให้อัตราเร็วของการสูญเสียความดันที่ใกล้เคียงกันอาจจะเป็นเพราะเขม่าดำสามารถเข้ากับยางธรรมชาติและยางผสมได้ดีจึงเกิดความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยอีกทั้งเขม่าดำยังสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติและยางผสมได้ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่ยางธรรมชาติและยางผสมที่เติมเขม่าดำจะให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดอีกทั้งเมื่อสามารถเกิดอันตรกิริยาได้มากก็จะทำให้อนุภาคของเขม่าดำอาจจะจัดเรียงตัวได้ใกล้กันมากขึ้นซึ่งเมื่อคุณลักษณะทางสัญญาณวิทยาคบคู่กันไปเผยให้เห็นถึงความเข้ากันที่ดีส่งผลให้เกิดการกักเก็บลมที่ดี

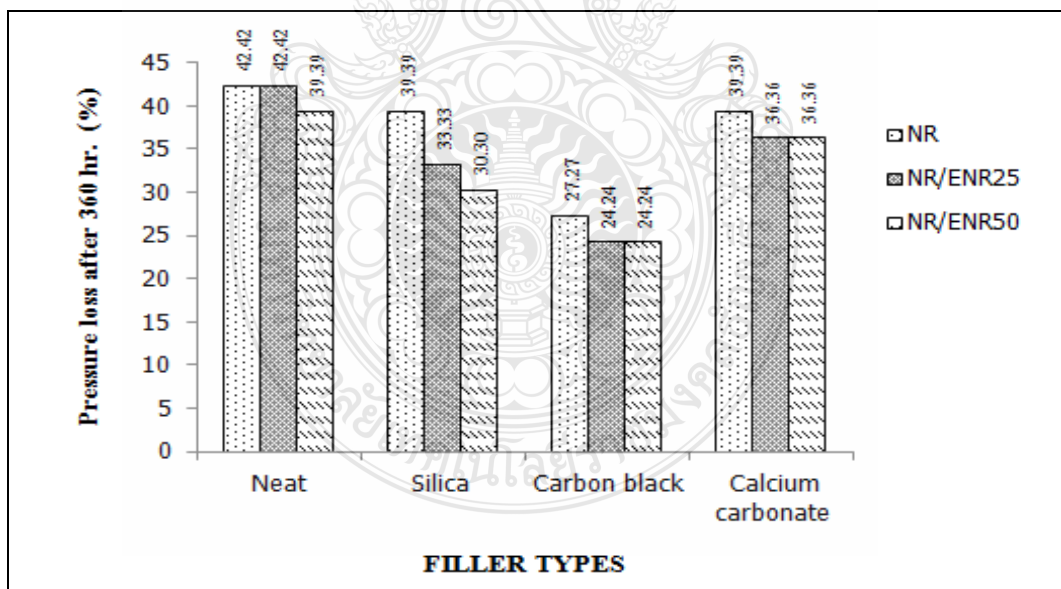


รูปที่ 4.17 ความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 phr

จากรูปที่ 4.17 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความดันที่สูญเสียไป (Pressure loss) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติฟ็อกซีไคซ์โดยใช้ยางธรรมชาติฟ็อกซีไคซ์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 phr พบว่าเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 อัตราเร็วของการสูญเสียความดันของยางธรรมชาติเร็วที่สุดตามมาด้วย NR/ENR25 และ ENR50 ตามลำดับ โดยเมื่อคุณลักษณะทางสัญญาณวิทยาควบคู่กันไปพบว่าเมื่อเติม แคลเซียมคาร์บอเนตลงไปยางธรรมชาติเกิดแตกตัวไม่ดีจึงทำให้เกิดอันตรกิริยาได้น้อยและเกิดช่องว่างในเนื้อยางมากจึงลงผลให้กักลมได้น้อยกว่าในยางผสมและเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าในยางผสม NR/ENR50 มีการสูญเสียความดันที่น้อยกว่า NR/ENR25 เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแตกตัวและเกิดอันตรกิริยาใน NR/ENR50 ได้มากกว่าจึงสามารถเก็บลมได้ดีกว่าซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัญญาณวิทยาที่ได้ทดสอบไปก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.18 ระยะเวลาการสูญเสียความดันเริ่มต้น (Initial pressure loss period) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr



รูปที่ 4.19 ความดันที่สูญเสียไปหลังจาก 360 ชั่วโมง (Pressure loss after 360 hr) ของยาง NR , ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ 10 phr

จากรูปที่ 4.18 คือกราฟแสดงผลการทดสอบระยะเวลาการสูญเสียความดันเริ่มต้น (Initial pressure loss period) และรูปที่ 4.19 คือกราฟแสดงผลการทดสอบความดันที่สูญเสียไปหลังจาก 360 ชั่วโมง (Pressure loss after 360 hr) ของยางธรรมชาติ (NR) และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ (NR/ENR) โดยใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ 2 เกรด คือ ENR25 และ ENR50 และใช้สารตัวเติม 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันคือซิลิกา, เชม่าดำเกรด N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 10 phr เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่าเชม่าดำมีแนวโน้มที่จะสูญเสียความดันช้าที่สุดอีกทั้งสูญเสียความดันน้อยที่สุดตามมาด้วยซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต การเติมเชม่าดำลงไปยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 มีการสูญเสียความดันเริ่มต้นที่เวลาเท่ากันคือเริ่มสูญเสียความดันที่ 36 ชั่วโมงแต่ในการเติมเชม่าดำลงไปยางผสม NR/ENR50 จะเกิดการสูญเสียความดันเริ่มต้นที่เวลา 48 ชั่วโมง และการเติมเชม่าดำลงไปยางธรรมชาติจะเกิดการสูญเสียความดันมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 และยางผสม NR/ENR25 สูญเสียความดันมากกว่า NR/ENR50 เนื่องจากยางผสม NR/ENR50 สามารถเกิดอันตรกิริยากับเชม่าดำได้มากที่สุดจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกักเก็บลมได้มากที่สุด

ในกรณีของการเติมซิลิกาพบว่าเมื่อเติมลงไปยางธรรมชาติจะมีการสูญเสียความดันที่มากที่สุดและสูญเสียความดันเริ่มต้นเร็วที่สุดรองลงมาจะเป็นยางผสม NR/ENR25 และสุดท้าย NR/ENR50 ซึ่ง NR/ENR50 มีการสูญเสียความดันที่น้อยที่สุดและช้าที่สุดนั้นก็หมายความว่ามีการกักเก็บอากาศที่ดีที่สุดรองลงมาจะเป็น NR/ENR25 และยางธรรมชาติตามลำดับสาเหตุอาจจะมาจากการกระจายตัวที่ดีของซิลิกาโดยเมื่อซิลิกากระจายตัวได้ดีจึงเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากขึ้นจึงทำให้อากาศแพร่ออกมาได้ยากขึ้นตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาเมื่อเติมซิลิกาลงไปในยางผสมจะไม่พบอนุภาคของซิลิกาอยู่บนพื้นผิวของยางซึ่งนั่นหมายความว่าซิลิกาสามารถเข้ากันได้ดีกับยางผสมแต่ในการเติมซิลิกาลงไปในยางธรรมชาติจะพบอนุภาคของซิลิกากระจายตัวอยู่ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเติมซิลิกาลงไปในยางผสม

เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 การสูญเสียความดันเริ่มต้นของยางธรรมชาติจะเร็วที่สุดและสูญเสียความดันมากที่สุดตามมาด้วย NR/ENR25 และ ENR50 ซึ่งจะสูญเสียความดันที่ระยะเวลาเท่ากันโดยเมื่อดูลักษณะทางสัณฐานวิทยาควบคู่กันไปพบว่าเมื่อเติม แคลเซียมคาร์บอเนตลงไปในยางธรรมชาติเกิดแตกตัวไม่ดีจึงทำให้เกิดอันตรกิริยาได้น้อยและเกิดช่องว่างในเนื้อยางมากจึงลงผลให้กักลมได้น้อยกว่าในยางผสมและเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่าไม่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบในลอนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพ็อกซีไคซ์ที่อัตราส่วน 90:10 โดยจะใช้ยาง ENR 2 เกรดคือ ENR25 และ ENR50 และทำการเติมสารตัวเติมซิลิกา เขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10 phr สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาพฤติกรรมการคงรูปของยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่ายางธรรมชาติจะให้เวลาการคงรูปที่ยาวที่สุดรองลงมาเป็น NR/ENR25 และ NR/ENR50 ตามลำดับ ซิลิกามีผลทำให้เวลาในการคงรูปยาวขึ้น เขม่าดำมีผลทำให้เวลาในการคงรูปสั้นลงและแคลเซียมคาร์บอเนตมีผลต่อเวลาในการคงรูปเล็กน้อย

2. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่ายางธรรมชาติจะให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดแต่เมื่อทำการเติมสารตัวเติมลงไป 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันพบว่าเมื่อเติมเขม่าดำจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดรองลงมาเป็นซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ

3. จากการศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบในลอน 6 กับยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่ายางผสม NR/ENR50 จะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบในลอน 6 กับยางดีที่ดีที่สุดและเมื่อทำการเติมสารตัวเติมลงไป 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันพบว่าเมื่อเติมซิลิกาจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างเส้นด้ายควบในลอน 6 ที่ดีที่สุดรองลงมาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตและเขม่าดำตามลำดับ

4. จากการศึกษาสมบัติด้านการกักอากาศของยางธรรมชาติและยางผสม NR/ENR25 และ NR/ENR50 พบว่ายางผสม NR/ENR50 จะให้สมบัติด้านการกักอากาศดีที่สุดรองลงมาจะเป็น NR/ENR25 และ ยางธรรมชาติตามลำดับแต่เมื่อทำการเติมสารตัวเติมลงไป 3 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบกันพบว่าเมื่อเติมเขม่าดำจะให้สมบัติด้านการเก็บกักอากาศที่ดีที่สุดรองลงมาเป็นซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ

บรรณานุกรม

- [1] วราภรณ์ ขจรไชยกูล.(2552).ผลิตภัณฑ์ยาง:กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี.กรุงเทพฯ.ซีโนพับลิชชิง(ประเทศไทย) จำกัด.
- [2] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรัมย์.(2543). การผลิตยางธรรมชาติ. สำนักวิทยบริการมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [3] Nelson Castaño,Mauricio de Greiff,Alberto Naranjo C. . (2001). Applied Rubber Technology. Munich.Hanser Publishers.
- [4] พงษ์ธร แซ่อูย. 2547. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [5] Alan N.Gent.(1992). Engineering with Rubber How to Design Rubber components. Munich. Hanser Publishers.
- [6] วิภาวี พัฒนกุล. (3 October 2016). ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. (Online), Available : <http://www.rubberthai.com/yang/administrator/jour/98.pdf>
- [7] Gelling, I.R. and Poster, M. 1988. Natural Rubber Science and Technology. Roberts A.D.,ed.Oxford:England. Oxford science publications.
- [8] Shinzo Kohjiya and Yuko Ikeda.(2014). Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber. Woodhead Publishing.
- [9] สถาบันพลาสติก, (7 October 2016). เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์, (Online), Available : <http://rubber.oie.go.th/box/Article/25239/เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์.pdf>
- [10] พงษ์ธร แซ่อูย.(2548).สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [11] ยางล้อ (Tyre),(7 October 2016). (Online), Available : <http://www.rubbercenter.org/files/rtec/RTEC-tyre.pdf>.
- [12] Tyre cords, fabrics market on growth path, (7 October 2016). (Online), Available : <http://tyre-asia.com/tyre-cords-fabrics-market-on-growth-path/>
- [13] Nylon 6, (8 October 2016). (Online), Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon_6

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [14] พงษ์ธร แซ่อูย และชาคริต สิริสิงห์.(2550). กระบวนการผลิตและการทดสอบยาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [15] เทคโนโลยีการผสมยาง (Mixing), (8 October 2016). สถาบันพลาสติก, (7October2016).
(Online), Available : http://rubber.oie.go.th/box/Article/3403/mixing_3403_1.pdf
- [16] 5L Laboratory Rubber Kneader Machine, (8 October 2016). (Online), Available :
http://www.yeskey.com/space/sfucjx3_1_3_1/products_info/5_L-Laboratory-Rubber-Kneader-Machine-212269.html
- [17] เทคโนโลยีการขึ้นรูปยาง (forming), (8 October 2016). (Online), Available :
<http://rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=3404>
- [18] Moving Die Rheometer (MDR), (8 October 2016). (Online), Available :
<http://www.worldoftest.com/moving-die-rheometer-mdr>
- [19] Service for Universal Testing Machine, (9 October 2016). (Online), Available :
http://www.service-testing.com/product.detail_495142_en_2250299
- [20] ASTM.(2002). Standard test method for adhesion of tire cords and other reinforcing cords to rubber compounds by H-test procedure. ASTM D4776-02.
- [21] สายันต์ แสงสุวรรณ และ กานต์ตะวัน วุฒิสเสลา.(2554). เอกสารประกอบการเรียนการวิเคราะห์พอลิเมอร์โดยเครื่องมือ (Instrumental Methods of Polymer Analysis).
- [22] ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์, เครื่องมือวิทยาศาสตร์งานกล้องจุลทรรศน์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, (10 October 2016). (Online), Available :
<http://www.rdi.ku.ac.th/cl/webpages/microscopeinstru.htm>
- [23] T.Johnson, Sabu Thomas. (1999). Nitrogen/oxygen permeability of natural rubber, epoxidised natural rubber and natural rubber/epoxidised natural rubber blends ,Polymer, vol 40, pp. 3223–3228.
- [24] Zhixin Jia , Tiwen Xua, Yuanfang Luo, Demin Jia, Zheng Peng.(2015). Interfacial interaction between the epoxidized natural rubber and silica in natural rubber/silica composites, Applied Surface Science , vol 328 , pp. 306–313.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [25] Zheng Peng, Xiuying Zhao, Kaijing Niu, Yong Xu, Li Jia, David Hui, Liqun Zhang.(2016). Morphology and performance of NR/NBR/ENR ternary rubber composites, *Composites Part B: Engineering*, vol 107, pp.106–112.
- [26] J. Karger-Kocsis, P.L. Teh, Z.A. Mohd Ishak, A.S. Hashim,U.S. Ishiaku.(2014).Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber – organoclay nanocomposites, *European Polymer Journal*, vol 40, pp.2513–2521.
- [27] Hanafi Ismail, Hazwani Syaza AhmadAzura A. Rashid.(2016). Tensile Properties and Morphology of Epoxidized Natural Rubber/Recycled Acrylonitrile-Butadiene Rubber (ENR50/NBRr) Blends, *Procedia Chemistry*, vol 19, pp.359–365.
- [28] B.T. Poh , H. Ismail, K.S. Tan.(2002). Effect of filler loading on tensile and tear properties of SMRL/ENR 25 and SMR L/SBR blends cured via a semiefficient vulcanization system, *Polymer Testing* , vol 21, pp.801–806.
- [29] Jin Kuk Kim, Lin Li, Jin Zhang,Jae Ok Jo,Sanjoy Datta.(2002). Effects of variation of oil and zinc oxide type on the gas barrier and mechanical properties of chlorobutyl rubber/epoxidised natural rubber blends, *Materials and Design*, vol 49, pp.922–928.
- [30] Cuong Manh Vu, Huong Thi Vu, Hyoung Jin Choi.(2015). Fabrication of Natural Rubber/Epoxidized Natural Rubber/Nanosilica Nanocomposites and Their Physical Characteristics, *Macromolecular Research*,vol 23, pp. 284-290.
- [31] Hana Ismail, H.M. Hairunezam. (2001). The effect of a compatibilizer on curing characteristics, mechanical properties and oil resistance of styrene butadiene rubber/epoxidized natural rubber blends, *European Polymer Journal*, vol 37, pp. 39 -44.
- [32] Hanafi Ismail, B.T. Poh. (2000). Cure and tear properties of ENR 25/SMR L and ENR 50/SMR L blends, *European Polymer Journal*, vol36, pp. 2403-2408.
- [33] M. Arroyo, M.A. Lopez - Manchado, J.L. Valentin and J. Carretero. (2007). Morphology / behavior relationship of nanocomposites basedon natural rubber/epoxidized natural rubber blend, *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 1330–1339.

บรรณานุกรม (ต่อ)

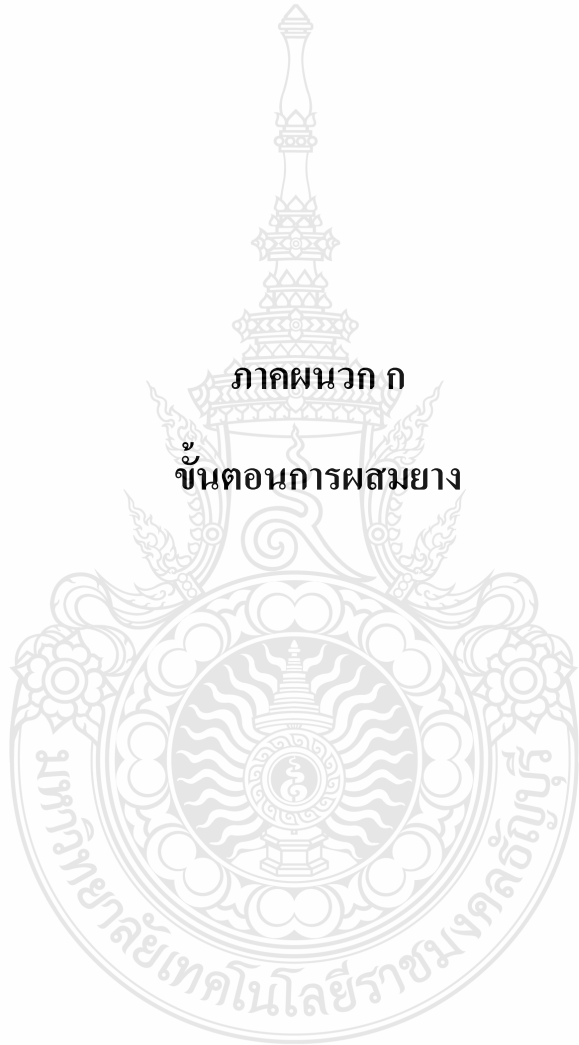
- [34] Karnda Sengloyluan, Kannika Sahakaro, Wilma K. Dierkes, and Jacques W.M. Noordermeer. (2014). Silica-reinforced tire tread compounds compatibilized by using epoxidized natural rubber, *European Polymer Journal*, vol. 51, pp. 69–79.
- [35] สุภารัตน์ รักชลธิ์, ชีรชาติ ก่อตระกูล, ปานหทัย ชื่นพุดิ และพงษ์ธร แซ่อูย. (2547). อิทธิพลของเถ้าแกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, (3) 12, 50-59.
- [36] A. M. SADEQUL, U. S. ISHIAKU, H. ISMAIL and B. T. POH. (1998). The Effect of Accelerator / Sulfur ratio on the scorch time of epoxidized natural rubber, *Eur. Polym. J.* vol. 34, No. 1, pp. 51-57.
- [37] Ansarifar A, Shiah SF, and Bennett M. (2006). Optimising the chemical bonding between silanised silica nanofiller and natural rubber and assessing its effects on the properties of the rubber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 26, pp.454–463.
- [38] Sirinthorn Thongsang, Weeraya Vorakhan, Ekachai Wimolmala, Narongrit Sombatsompop. (2012). Dynamic mechanical analysis and tribological properties of vulcanizates with fly ash/precipitated silica hybrid filler, *Tribology International*, vol. 53, pp. 134–141.
- [39] Nittaya Rattanasom, Sarawut Prasertsri. (2012). Mechanical properties, gas permeability and cut growth behaviour of natural rubber vulcanizates: Influence of clay types and clay/carbon black ratios, *Polymer Testing*, vol. 31, pp. 645-653.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการผสมยาง



ตารางที่ 1 ขั้นตอนการผสมยาง Master batch

ลำดับที่	ขั้นตอนการผสม	Time(sec.)	Temperature(°C)
1	เปิดเครื่อง	-	-
2	บดยางทั้งหมด	60	< 90°
3	ชกแรม	3	< 90°
4	ใส่เคมี	10	< 90°
5	กดแรม	3	< 90°
6	บดผสม	120	< 90°
7	ชกแรม	3	< 90°
8	ทำความสะอาด	10	< 90°
9	กดแรม	3	< 90°
10	บดผสม	60	< 90°
11	ชกแรมเพื่อให้ยางพลิกตัวแล้วกดแรม	3	< 90°
12	บดผสม	60	< 90°
13	เทยางลงในกระบะรองรับและนำไปรีดแผ่นที่ Two roll mill	-	< 90°
เวลาการผสม (Sec)		335	

หมายเหตุ เมื่อผสมเสร็จแล้วให้พักตัวยาง 2 ชั่วโมงก่อนจะนำมาผสม Curing agent

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการผสมยาง Final batch

ขั้นตอนการผสม Curing agent		
Step	Process	Time(sec.)
1	บดยางคอมปาวด์ (กรีดพับซ้าย 2 ครั้ง , กรีดพับขวา 2 ครั้ง)	60
2	ใส่สาร Curing agent ลงในยางคอมปาวด์ (กรีดพับซ้าย 5 ครั้ง , กรีดพับขวา 5 ครั้ง)	240
4	ม้วนยาง (3 ครั้ง)	60
5	รีดยางออกมาเป็นแผ่นคอมปาวด์ขนาดความหนา 10 มิลลิเมตร	30
เวลาการผสม (Sec)		390.00





ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ Specific gravity ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Specific gravity								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	0.954	0.967	0.974	0.964	0.975	0.967	0.009
	ENR25	0.947	0.964	0.981	0.957	0.914	0.953	0.025
	ENR50	0.964	0.954	0.924	0.935	0.948	0.945	0.016
NR	Silica	1.021	1.034	1.035	1.035	1.048	1.035	0.010
	N330	1.025	1.036	1.051	1.064	1.084	1.052	0.023
	CaCO ₃	1.094	1.025	1.103	1.094	1.085	1.080	0.032
NR/ENR25	Silica	1.034	1.038	1.051	1.028	1.041	1.038	0.009
	N330	1.052	1.042	1.037	1.054	1.035	1.044	0.009
	CaCO ₃	1.098	1.102	1.103	1.094	1.086	1.097	0.007
NR/ENR50	Silica	1.035	1.052	1.028	1.054	1.084	1.051	0.022
	N330	1.059	1.045	1.039	1.065	1.034	1.048	0.013
	CaCO ₃	1.101	1.106	1.057	1.085	1.092	1.088	0.019

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ Mooney viscosity (ML1+4 @ 100 °C) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Mooney viscosity (ML1+4 @ 100 °C)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	36.54	35.94	34.68	35.12	30.25	34.51	2.49
	ENR25	33.52	36.58	37.25	36.54	36.58	36.09	1.47
	ENR50	32.58	35.94	36.41	36.25	36.15	35.47	1.62
NR	Silica	58.62	57.62	55.68	56.84	53.15	56.38	2.10
	N330	49.52	47.05	45.95	46.85	47.62	47.40	1.33
	CaCO ₃	41.5	43.65	44.58	47.25	43.25	44.05	2.11
NR/ENR25	Silica	51.67	50.62	50.84	54.69	49.65	51.49	1.93
	N330	47.58	48.65	48.52	48.35	48.97	48.41	0.52
	CaCO ₃	48.52	43.25	41.25	48.25	46.52	45.56	3.19
NR/ENR50	Silica	50.25	52.15	51.56	53.65	51.62	51.85	1.23
	N330	46.15	48.65	48.67	45.68	50.25	47.88	1.91
	CaCO ₃	45.21	44.65	47.25	43.84	42.65	44.72	1.71

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบ ML (lb_f.in) จากการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

ML (lb _f .in)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	0.95	0.75	0.86	0.56	0.89	0.80	0.15
	ENR25	0.96	0.84	0.86	0.79	0.96	0.88	0.08
	ENR50	0.94	1.05	0.84	0.98	0.93	0.95	0.08
NR	Silica	1.99	2.12	2.08	1.87	1.86	1.98	0.12
	N330	2.15	2.29	2.45	2.32	2.01	2.24	0.17
	CaCO ₃	1.74	1.88	1.69	1.75	1.96	1.80	0.11
NR/ENR25	Silica	2.08	2.13	2.05	1.99	1.97	2.04	0.07
	N330	2.26	2.32	2.36	2.08	2.15	2.23	0.12
	CaCO ₃	1.75	1.86	2.06	1.97	1.58	1.84	0.19
NR/ENR50	Silica	2.12	2.06	2.05	2.16	2.03	2.08	0.05
	N330	2.29	2.26	2.34	2.19	2.25	2.27	0.06
	CaCO ₃	1.89	1.81	1.93	1.83	2.06	1.90	0.10

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบ MH (Ibf.in) จากการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยาง NR, ยางผสม ระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

MH (Ibf.in)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	11.25	11.95	12.59	10.36	10.85	11.40	0.88
	ENR25	10.69	11.47	11.94	11.63	12.58	11.66	0.69
	ENR50	11.69	12.84	12.36	11.58	10.69	11.83	0.82
NR	Silica	11.69	11.85	12.94	12.63	11.28	12.08	0.69
	N330	13.64	12.85	13.74	13.96	11.53	13.14	0.99
	CaCO ₃	12.06	11.36	11.85	11.34	11.96	11.71	0.34
NR/ENR25	Silica	11.36	13.18	12.74	12.62	11.34	12.25	0.85
	N330	13.64	12.64	14.26	13.4	13.54	13.50	0.58
	CaCO ₃	12.05	11.94	13.84	11.36	10.55	11.95	1.21
NR/ENR50	Silica	11.35	11.25	12.66	12.87	13.73	12.37	1.06
	N330	14.632	14.36	14.23	12.53	14.66	14.08	0.89
	CaCO ₃	12.36	12.12	12.654	12.64	11.05	12.16	0.66

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบเวลาในการเริ่มคงรูป (t_{s2}) จากการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

t_{s2} (Min)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	5.45	5.24	5.52	5.47	5.44	5.42	0.11
	ENR25	5.12	5.01	4.51	5.41	5.15	5.04	0.33
	ENR50	4.43	4.51	4.21	4.31	4.48	4.39	0.13
NR	Silica	8.35	8.51	8.57	8.49	8.31	8.45	0.11
	N330	4.36	4.12	4.21	4.29	4.04	4.20	0.13
	CaCO ₃	5.55	6.13	6.02	6.25	5.52	5.89	0.34
NR/ENR25	Silica	8.38	8.31	8.44	8.25	8.19	8.31	0.10
	N330	3.47	3.12	3.52	3.54	3.48	3.43	0.17
	CaCO ₃	4.57	4.55	4.51	4.41	4.58	4.52	0.07
NR/ENR50	Silica	8.13	8.41	8.31	8.26	8.11	8.24	0.13
	N330	3.32	3.21	3.25	3.28	3.34	3.28	0.05
	CaCO ₃	4.31	4.37	4.25	4.22	4.34	4.30	0.06

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบเวลาในการเริ่มคงรูป (T_{c90}) จากการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติม ชนิดต่างๆ

T_{c90} (Min)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	8.45	8.32	8.51	8.45	8.37	8.42	0.07
	ENR25	7.51	7.42	7.36	7.29	7.54	7.42	0.10
	ENR50	7.31	7.46	7.33	7.28	7.46	7.37	0.09
NR	Silica	12.46	12.41	12.37	12.29	12.46	12.40	0.07
	N330	7.33	7.21	7.42	7.37	7.26	7.32	0.08
	CaCO ₃	8.52	8.49	8.59	8.46	8.55	8.52	0.05
NR/ENR25	Silica	12.32	12.47	12.14	12.43	12.33	12.34	0.13
	N330	6.46	6.31	6.51	6.42	6.48	6.44	0.08
	CaCO ₃	7.59	7.52	8.05	7.49	7.56	7.64	0.23
NR/ENR50	Silica	12.34	12.28	12.15	12.33	12.24	12.27	0.08
	N330	6.14	6.27	6.31	6.11	6.18	6.20	0.09
	CaCO ₃	7.53	7.41	7.15	7.52	7.43	7.41	0.15

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบความแข็ง (Shore A) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Hardness (Shore A)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	39	40	39	39	39	39	0.45
	ENR25	39	38	39	39	40	39	0.71
	ENR50	40	40	40	39	40	40	0.45
NR	Silica	46	46	45	45	46	46	0.55
	N330	46	46	46	47	45	46	0.71
	CaCO ₃	41	42	42	41	42	42	0.55
NR/ENR25	Silica	45	45	45	44	45	45	0.45
	N330	46	45	46	46	47	46	0.71
	CaCO ₃	42	43	43	43	42	43	0.55
NR/ENR50	Silica	45	45	45	46	46	45	0.55
	N330	46	46	46	47	46	46	0.45
	CaCO ₃	43	43	43	42	43	43	0.45

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength (MPa)) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Tensile strength (MPa)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	22.45	22.95	22.69	22.04	22.35	22.50	0.34
	ENR25	25.47	25.12	25.69	25.15	25.68	25.42	0.28
	ENR50	25.61	24.15	23.45	24.94	25.64	24.76	0.95
NR	Silica	23.58	26.15	24.58	25.69	25.48	25.10	1.02
	N330	29.5	30.12	29.58	29.67	28.69	29.51	0.52
	CaCO ₃	23.65	23.64	24.25	22.84	22.12	23.30	0.83
NR/ENR25	Silica	26.48	26.87	26.12	27.84	26.45	26.75	0.66
	N330	30.8	31.12	31.85	30.42	30.85	31.01	0.53
	CaCO ₃	23.51	23.46	26.72	21.84	24.32	23.97	1.78
NR/ENR50	Silica	28.24	27.69	27.58	28.74	27.35	27.92	0.56
	N330	32.15	31.22	30.51	31.25	31.85	31.40	0.63
	CaCO ₃	23.14	24.27	20.61	26.42	26.42	24.17	2.44

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300% (300 % Modulus (MPa)) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

300 % Modulus (MPa)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	1.89	1.91	1.85	1.86	1.82	1.87	0.04
	ENR25	1.62	1.68	1.57	1.68	1.58	1.63	0.05
	ENR50	1.76	1.58	1.85	1.75	1.94	1.78	0.13
NR	Silica	2.15	2.08	2.04	2.18	2.19	2.13	0.07
	N330	3.48	3.51	3.34	3.15	3.52	3.40	0.16
	CaCO ₃	1.85	1.87	1.8	1.72	1.76	1.80	0.06
NR/ENR25	Silica	2.01	2.05	2.18	2.1	2.15	2.10	0.07
	N330	4.28	4.29	4.38	4.28	4.31	4.31	0.04
	CaCO ₃	1.88	1.86	1.75	1.92	1.87	1.86	0.06
NR/ENR50	Silica	2.15	2.68	2.04	1.98	2.12	2.19	0.28
	N330	4.45	4.34	4.33	4.15	4.35	4.32	0.11
	CaCO ₃	1.85	1.84	1.75	1.76	1.85	1.81	0.05

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break (%)) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Elongation at break (%)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	705.35	708.56	690.58	721.68	691.05	703.44	13.05
	ENR25	706.81	688.85	674.28	701.25	692.56	692.75	12.51
	ENR50	681.65	675.58	691.52	697.58	701.25	689.52	10.76
NR	Silica	678.59	681.58	675.25	668.25	678.25	676.38	5.07
	N330	654.25	648.25	667.25	669.31	658.36	659.48	8.83
	CaCO ₃	683.15	687.25	675.25	692.15	667.52	681.06	9.78
NR/ENR25	Silica	689.36	688.74	678.23	697.25	691.58	689.03	6.91
	N330	645.27	621.48	637.25	638.71	638.15	636.17	8.81
	CaCO ₃	691.23	664.28	694.58	684.25	689.26	684.72	12.02
NR/ENR50	Silica	684.59	681.69	697.25	672.68	675.18	682.28	9.65
	N330	632.74	635.48	642.85	642.35	615.83	633.85	10.98
	CaCO ₃	675.26	681.25	651.68	675.18	667.38	670.15	11.44

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบความทนต่อการฉีกขาด (Tear Strength (MPa)) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

Tear Strength (MPa)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	2.94	3.1	2.85	2.96	2.93	2.96	0.09
	ENR25	2.86	2.74	2.96	2.75	2.79	2.82	0.09
	ENR50	2.99	2.76	2.97	2.88	2.87	2.89	0.09
NR	Silica	2.93	3.05	2.89	2.97	2.96	2.96	0.06
	N330	3.35	3.42	3.18	3.62	3.21	3.36	0.18
	CaCO ₃	3.12	2.95	2.84	2.93	3.21	3.01	0.15
NR/ENR25	Silica	3.08	3.15	3.12	2.96	3.19	3.10	0.09
	N330	3.48	3.59	3.46	3.45	3.12	3.42	0.18
	CaCO ₃	3.05	3.07	2.94	3.16	3.28	3.10	0.13
NR/ENR50	Silica	3.15	3.58	3.25	2.84	2.97	3.16	0.28
	N330	3.36	3.48	3.59	3.45	3.29	3.43	0.12
	CaCO ₃	3.15	3.25	3.25	3.42	3.15	3.24	0.11

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างเส้นด้ายควบในลอน 6 กับยาง (H-TEST ADHESION (MPa)) ของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ

H-TEST ADHESION (MPa)								
ชนิดยาง	สารตัวเติม	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย	S.D.
Neat	NR	2.56	2.75	2.63	2.69	2.71	2.67	0.07
	ENR25	3.25	3.14	3.05	2.97	3.28	3.14	0.13
	ENR50	3.24	3.12	3.34	3.22	3.12	3.21	0.09
NR	Silica	7.56	7.45	7.51	8.12	7.84	7.70	0.28
	N330	3.12	3.58	3.45	3.12	2.84	3.22	0.29
	CaCO ₃	3.56	3.12	3.84	3.45	3.75	3.54	0.28
NR/ENR25	Silica	9.26	9.14	9.33	9.42	9.02	9.23	0.16
	N330	3.68	3.45	3.25	3.78	3.86	3.60	0.25
	CaCO ₃	3.65	3.48	3.75	3.98	3.78	3.73	0.18
NR/ENR50	Silica	10.59	11.25	11.84	10.25	9.54	10.69	0.89
	N330	3.91	3.58	3.94	4.09	3.94	3.89	0.19
	CaCO ₃	4.02	4.11	3.64	3.84	4.05	3.93	0.19

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการกักอากาศโดยวัดจากความดันที่ลดลงของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10

ความดันที่ลดลง (Pressure loss: psi)							
จำนวนวัน	1			2		3	
จำนวนชั่วโมง	0	12	24	36	48	60	72
NR	33	31	30	29	28	28	27
NR/ENR25	33	31	31	30	30	30	29
NR/ENR50	33	32	32	32	31	31	30
จำนวนวัน	4			5		6	
จำนวนชั่วโมง		84	96	108	120	132	144
NR		27	26	25	25	25	24
NR/ENR25		29	28	28	27	27	27
NR/ENR50		29	29	28	27	27	27
จำนวนวัน	7			8		9	
จำนวนชั่วโมง		156	168	180	192	204	216
NR		24	23	22	22	22	22
NR/ENR25		26	26	25	25	25	25
NR/ENR50		27	26	26	25	25	24
จำนวนวัน	10			11		12	
จำนวนชั่วโมง		228	240	252	264	276	288
NR		20	20	20	20	19	19
NR/ENR25		24	24	24	24	23	23
NR/ENR50		24	24	24	24	23	23
จำนวนวัน	13			14		15	
จำนวนชั่วโมง		300	312	324	336	348	360
NR		19	19	19	19	19	19
NR/ENR25		23	22	21	20	19	19
NR/ENR50		22	22	21	20	20	20

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการกักอากาศโดยวัดจากความดันที่ลดลงของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมซิลิกา

ความดันที่ลดลง (Pressure loss: psi)							
จำนวนวัน	1			2		3	
จำนวนชั่วโมง	0	12	24	36	48	60	72
NR/Silica	33	32	31	30	30	30	29
NR/ENR25/Silica	33	33	32	32	31	31	31
NR/ENR50/Silica	33	33	33	32	32	31	31
จำนวนวัน	4			5		6	
จำนวนชั่วโมง		84	96	108	120	132	144
NR/Silica		29	28	28	28	27	26
NR/ENR25/Silica		30	30	29	28	28	28
NR/ENR50/Silica		31	31	30	30	30	30
จำนวนวัน	7			8		9	
จำนวนชั่วโมง		156	168	180	192	204	216
NR/Silica		25	25	24	24	24	24
NR/ENR25/Silica		27	27	26	26	25	25
NR/ENR50/Silica		29	29	28	28	27	27
จำนวนวัน	10			11		12	
จำนวนชั่วโมง		228	240	252	264	276	288
NR/Silica		23	23	23	22	22	21
NR/ENR25/Silica		24	24	24	24	23	23
NR/ENR50/Silica		26	26	26	25	24	24
จำนวนวัน	13			14		15	
จำนวนชั่วโมง		300	312	324	336	348	360
NR/Silica		21	21	21	20	20	20
NR/ENR25/Silica		23	23	22	22	22	22
NR/ENR50/Silica		24	23	23	23	23	23

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบการกักอากาศโดยวัดจากความดันที่ลดลงของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมเขม่าดำ

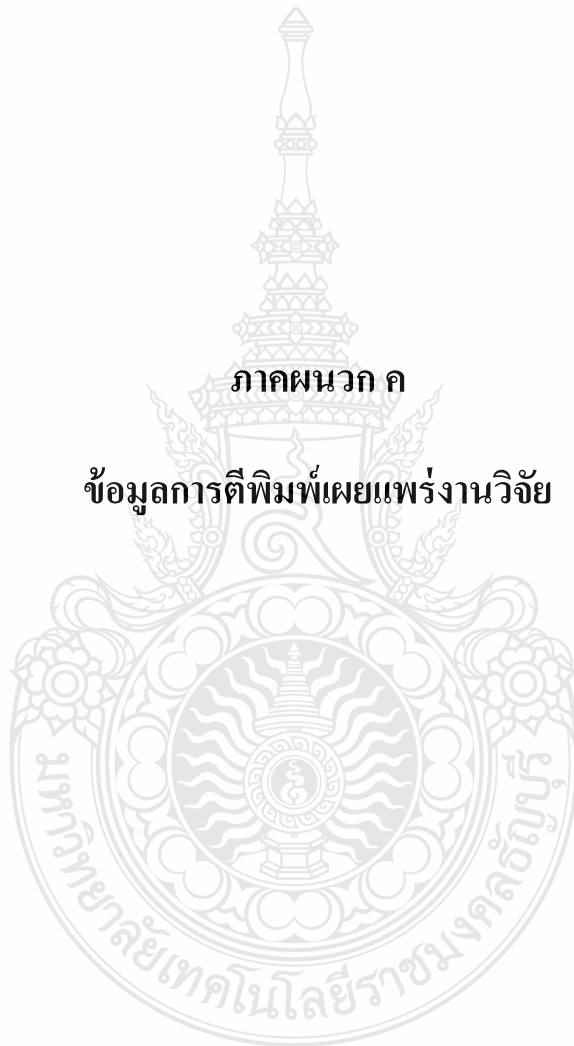
ความดันที่ลดลง (Pressure loss: psi)							
จำนวนวัน	1			2		3	
จำนวนชั่วโมง	0	12	24	36	48	60	72
NR/Carbon black	33	33	33	32	32	32	32
NR/ENR25/Carbon black	33	33	33	32	32	32	32
NR/ENR50/Carbon black	33	33	33	33	32	32	32
จำนวนวัน	4			5		6	
จำนวนชั่วโมง		84	96	108	120	132	144
NR/Carbon black		31	31	31	31	30	30
NR/ENR25/Carbon black		32	31	31	31	31	31
NR/ENR50/Carbon black		32	32	31	31	31	30
จำนวนวัน	7			8		9	
จำนวนชั่วโมง		156	168	180	192	204	216
NR/Carbon black		30	30	29	29	28	28
NR/ENR25/Carbon black		30	29	29	29	28	28
NR/ENR50/Carbon black		30	30	29	29	29	28
จำนวนวัน	10			11		12	
จำนวนชั่วโมง		228	240	252	264	276	288
NR/Carbon black		28	28	28	27	27	26
NR/ENR25/Carbon black		27	27	27	27	27	26
NR/ENR50/Carbon black		28	28	27	27	27	27
จำนวนวัน	13			14		15	
จำนวนชั่วโมง		300	312	324	336	348	360
NR/Carbon black		26	26	25	25	24	24
NR/ENR25/Carbon black		26	26	26	26	25	25
NR/ENR50/Carbon black		26	26	26	26	25	25

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการกักอากาศโดยวัดจากความดันที่ลดลงของยาง NR, ยางผสมระหว่าง NR/ENR25 และ NR/ENR50 ที่อัตราส่วน 90:10 ที่เติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

ความดันที่ลดลง (Pressure loss: psi)							
จำนวนวัน	1			2		3	
จำนวนชั่วโมง	0	12	24	36	48	60	72
NR/Calcium carbonate	33	32	32	31	31	31	30
NR/ENR25/Calcium carbonate	33	33	31	31	31	30	30
NR/ENR50/Calcium carbonate	33	33	32	31	31	31	30
จำนวนวัน	4			5		6	
จำนวนชั่วโมง		84	96	108	120	132	144
NR/Carbon black		29	29	29	28	27	27
NR/ENR25/Carbon black		30	29	29	28	28	28
NR/ENR50/Carbon black		30	30	29	29	29	28
จำนวนวัน	7			8		9	
จำนวนชั่วโมง		156	168	180	192	204	216
NR/Carbon black		26	25	25	24	24	23
NR/ENR25/Carbon black		27	27	26	26	25	25
NR/ENR50/Carbon black		28	28	27	27	27	26
จำนวนวัน	10			11		12	
จำนวนชั่วโมง		228	240	252	264	276	288
NR/Carbon black		23	22	22	22	22	22
NR/ENR25/Carbon black		24	24	24	23	23	22
NR/ENR50/Carbon black		26	25	25	24	24	24
จำนวนวัน	13			14		15	
จำนวนชั่วโมง		300	312	324	336	348	360
NR/Carbon black		21	21	21	20	20	20
NR/ENR25/Carbon black		22	22	22	21	21	21
NR/ENR50/Carbon black		23	22	22	21	21	21

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัย



The TNI Academic Conference 2017 on the topic of
“Managing innovative researches to drive Thailand 4.0”



TNIAC 2017

Conference Proceedings

19th May 2017

at Thai-Nichi Institute of Technology
Bangkok, Thailand



The TNI Academic Conference 2017 on the topic of "Managing innovative researches to drive Thailand 4.0"
The TNI Academic Conference 2017 ครั้งที่ 4 ภายใต้หัวข้อ "การจัดการวิจัยเชิงนวัตกรรมเพื่อขับเคลื่อนประเทศไทย 4.0"

Copyright © 2017 Thai-Nichi Institute of Technology (TNI)

ISBN: 978-616-7805-13-9

Paper published in TNIAC 2017's proceedings were reviewed by educational luminaries and experts.

The message and contents published in TNIAC 2017's proceedings are copyright of publisher. Anyone can refer them for the purpose of private study, research, criticism or review which is permitted under the national copyright acts. The purpose of fair dealing is prohibited and to reproduce any part of this book by any process must receive the written permission from the publisher.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในหนังสือการประชุม TNIAC 2017 ทั้งหมดนี้ได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เชี่ยวชาญ ข้อความและเนื้อหาที่ตีพิมพ์ในหนังสือการประชุม TNIAC 2017 เป็นลิขสิทธิ์ของผู้จัดพิมพ์ บุคคลได้รับอนุญาตให้อ้างอิงเฉพาะเพื่อการศึกษา การวิจัย การวิเคราะห์ หรือการวิจารณ์ ภายใต้กฎหมายลิขสิทธิ์ของประเทศ ห้ามมิให้มีการนำไปผลิตเพื่อการค้า และการดัดแปลงส่วนใดส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้จะด้วยวิธีการใดก็ตาม จะต้องได้รับการอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้จัดพิมพ์

Responsibility for the contents of the articles presented and published in TNIAC 2017, rests only upon the authors. If it is found that the whole or any part of these articles have any mistake or have been already published in other publication or have patent infringement, the offense is also the responsibility of the authors.

ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา ข้อมูล ข้อความ ภาพและตารางประกอบ ข้อคิดเห็นส่วนตัวที่ลงตีพิมพ์ในบทความวิจัยและมีการนำเสนอในการประชุม TNIAC 2017 เป็นของผู้เขียนบทความ หากมีความผิดพลาดใดๆ หรือหากตรวจพบว่ามีมีการตีพิมพ์ซ้ำซ้อน และละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว

จัดพิมพ์โดย

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

1771/1 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

โทรศัพท์ 0 2763 2600 โทรสาร 0 2763 2700

Website: <http://www.tni.ac.th>

ประธานกิตติมศักดิ์

รศ.ดร. บัณฑิต ไรจน์อารยานนท์
ประธานคณะกรรมการจัดงาน

- (1) รศ.ดร. พิเชิด สุขเจริญพงษ์
- (2) ผศ. วัชรศักดิ์ เลิศในสัจย์

อธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ
และคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
คณบดีคณะบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการจัดงาน

1. คณะกรรมการด้านวิชาการ

ประธานกรรมการด้านวิชาการ

- (1) ผศ. วัชรศักดิ์ เลิศในสัจย์
- (2) รศ. ดร. พิเชิด สุขเจริญพงษ์

คณบดีคณะบริหารธุรกิจ

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ
และคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

กรรมการด้านวิชาการ

- (1) ผศ. ดร. จักร ดิงศภักดิ์
- (2) ผศ. ดร. วุฒิ สุขเจริญ
- (3) ผศ. ดร. จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์
- (4) ผศ. ดร. วราคม เนินน้อย
- (5) ผศ. ดร. วิภาณี เพ็งเนตร
- (6) ผศ. ดร. อรรณพ หมั่นสกุล
- (7) ผศ. ดร. รชตะ รุ่งตระกูลชัย
- (8) ผศ. ดร. ธันยมัย เจียรกุล
- (9) ผศ.ดร.ชัชชนะ ตีรสுகิตติมา
- (10) ดร. บุญญาดา นาสุมบูรณ์
- (11) ดร. ปาลีรัฐ เลชะวัฒน์
- (12) ดร. พาสน์ ทิมทรัพย์
- (13) ดร. ชนิษฐา ทรงจักรแก้ว
- (14) ดร. รุ่งอรุณ กระแสสินธุ์
- (15) ดร. สุรสิทธิ์ อุดมธนาวงศ์
- (16) Dr. Yu-Chin Wen
- (17) ดร. นฤศย์วิภา ททรัพย์ไพบูลย์
- (18) ดร. ประมุข บุญเสียง
- (19) ดร. สุวิวัฒนา แดงสุภา
- (20) ดร. สรรเสริญ สัตถาวร
- (21) ดร. มิวรา เสี่ยงมงาม

- (22) ดร. ธาณีญา โชมพัตราภรณ์
(23) ดร. ภิญรดา แก้วเขียว

2. คณะกรรมการด้านการจัดประชุม

ประธานคณะกรรมการ

- (1) ผศ. รังสรรค์ เลิศในสัตย์

คณบดีคณะบริหารธุรกิจ

กรรมการด้านการจัดประชุม

- (1) ดร. วนิตา วาตีเจริญ
(2) อาจารย์ วิจิตรัฐ ภัคพรหมมินทร์
(3) อาจารย์ ปัทมทัต จอมจักร์
(4) อาจารย์ เอิบ พงษ์ทอง
(5) ผศ. เฉลิมขวัญ ครุฑบุญยงค์
(6) ผศ. อนุวัต เจริญสุข
(7) อาจารย์ น้ำพร สติรกุล
(8) อาจารย์ สุชีรา นวลทอง
(9) อาจารย์ กัลยา นันทา
(10) อาจารย์ พิชิต งามจรัสศรีวิชัย
(11) อาจารย์ สันทวุฒิ ตูลารักษ์
(12) นางสาว นุชรี แซ่ลี
(13) นาง นภาพร วิจิตร
(14) นางสาว กัญญาภัทร์ ลาดพิลา
(15) นางสาว ปุราณิ บุญศรี
(16) นางสาว รุจารินทร์ จิตต์แก้ว

3. คณะกรรมการด้านการประชาสัมพันธ์

ประธานคณะกรรมการ

- (1) อาจารย์ พรอนงค์ นิยมคำ ไชริคาวา รองอธิการบดีฝ่ายวิเทศสัมพันธ์

กรรมการ

- (1) นางสาว สุภาพร เหมพงศ์โสภา ผู้อำนวยการฝ่ายวิเทศสัมพันธ์
(2) นางสาว จรรยา สนมมิโน เจ้าหน้าที่ฝ่ายประชาสัมพันธ์

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทางด้านวิชาการภายในสถาบันฯ

- | | |
|--------------------------------------|---|
| (1) รศ. ดร. บัณฑิต โรจนอรยานนท์ | อธิการบดี |
| (2) รศ. ดร. พิเชิต สุขเจริญพงษ์ | รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ
และคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย |
| (3) รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน | รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ |
| (4) ผศ. รังสรรค์ เลิศในสัตย์ | คณบดีคณะบริหารธุรกิจ |
| (5) รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน | คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| (6) รศ. ดร. รัตติกว วรากุลศิริพันธุ์ | คณบดีคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ |
| (7) ผศ. ดร. วรวัฒน์ รุ่งธีระ | ผู้อำนวยการสำนักวิชาพื้นฐาน
และภาษา |

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิด้านวิชาการ ภายนอกสถาบันฯ

- | | |
|-----------------------------------|--|
| (1) ศ. ดร. ปราโมทย์ เตชะฮาไพ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (2) ศ. ดร. อัจฉรา วงศ์โสธร | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (3) รศ. ดร. ดาวิตย์ วิวรรณะเดช | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (4) รศ. ดร. อรรถเทพ ตันละมัย | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (5) รศ. ดร. ปารเมศ ชูติมา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (6) ผศ. ดร. พิมพ์ฉวีรัตน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (7) ผศ. ดร. วรวิทย์ จิราสมบัติ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (8) ดร. ศราวุฒิ อารีย์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| (9) ศ. กิตติคุณ อัมพิภา ไกรฤทธิ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (10) รศ. ดร. ธัญญา เกียรติวัฒน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (11) รศ. ดร. พัชราภรณ์ ญาณเกียรติ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (12) รศ. ดร. อนันต์ มุ่งวัฒนา | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (13) รศ. ดร. บดินทร์ วัศม์เทศ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (14) รศ. ปราณี จงสุจิตรธรรม | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (15) ดร. นาวิณ มีนะกรรณ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (16) รศ. ดร. ณัฐพล ชันธิไชย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| (17) รศ. ดร. ทองดี ชิวพฤษ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |
| (18) รศ. ดร. ศจีมาศ ณ นคร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |
| (19) รศ. ดร. กฤษสมันต์ เสนาณรงค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ |

(20) รศ. ดร. เชษฐวุฒิ ภูมิพัฒน์พงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
(21) รศ. ดร. วิบุรณ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
(22) รศ. ดร. สายประสิทธิ์ เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
(23) รศ. ดร. พยุง มีสังข์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
(24) ผศ. สุพิชชา ชีวพฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
(25) ดร. ปริญญา มากลีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
(26) ผศ. พัชรินทร์พร ภู่อภิสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
(27) ผศ. ดร. มาเรียม นะมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
(28) ผศ. ดร. วัลลภา พัฒนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
(29) รศ. ดร. สุพัฒน์ สุขมลสันต์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
(30) ดร. ย่าพล ชูสนุก	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
(31) ดร. สมชาย เลิศภิรมย์สุข	มหาวิทยาลัยธนบุรี
(32) รศ. สุนา สิทธิเลิศประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยธนบุรี
(33) ศ. ดร. จริญญา มะลุลีม	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(34) รศ. ดร. ตรีนท เสง่าศิริรังษีทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(35) รศ. ดร. นิยม วัชรอมฤต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(36) รศ. ดร. นงลักษณ์ เทพสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(37) รศ. ดร. พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(38) รศ. ดร. ศากุน บุญอิต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(39) รศ. ดร. เอกจิตต์ จึงเจริญ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(40) รศ. ไว จามรमान	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(41) รศ. ศรีเพ็ญ ทวีพยมนชัย	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(42) ผศ. ดร. อภิตักดิ์ ภูมิพัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(43) ดร. บัณฑิต อารมัน	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
(44) รศ. ดร. ณัฐสิทธิ์ เกิดศรี	มหาวิทยาลัยมหิดล
(45) ดร. นัยนา ไ้วศิริ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
(46) รศ. ดร. นภาพร ชันชนภา	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
(47) ผศ. ดร. บังอร พานทอง	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
(48) ดร. มาโนชย์ อารี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
(49) ผศ. ดร. ปารุง ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร

- | | |
|--------------------------------------|--|
| (50) ผศ. ดร. เสงี่ยม ไตรรัตน์ | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| (51) รศ. ดร. เซาว์ โรจนแสง | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| (52) รศ. ดร. สมบัติ ทีฆทวีปย์ | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย |
| (53) ศ. ดร. วิลาศ วุวงษ์ | สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) |
| (54) รศ. ดร. วัชรภรณ์ อธิชัยกุล | สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) |
| (55) รศ. ดร. ปรีทรรคน์ พันธบุรุษวงษ์ | สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ |
| (56) ผศ. ดร. นิตา ลาภศรีสวัสดิ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง |
| (57) ผศ. ดร. รุจิระ โรจนประภายนต์ | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ (NIDA) |
| (58) ศ. ดร. รัชเนกร ชรรณวิชัย | St. Cloud State University |



สารจากประธานคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ TNIAC 2017

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ได้เริ่มจัดประชุมวิชาการระดับชาติ ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมไปถึงการบริหารจัดการอุตสาหกรรม การศึกษา ภาษา และวัฒนธรรม ในรูปแบบของสหวิทยาการ เพื่อเป็นการประชุมแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการและงานวิจัย ระหว่างนักศึกษา คณาจารย์ และนักวิจัย ครั้งที่ 1 ในปี พ.ศ. 2554 ครั้งที่ 2 ในปี พ.ศ. 2556 และครั้งที่ 3 ในปี พ.ศ. 2558 ภายใต้ชื่อ TNIAC (Thai-Nichi Institute of Technology: Academic Conference)

โดยในปี พ.ศ. 2560 นี้ ทางคณะบริหารธุรกิจและบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น จัดการประชุมวิชาการระดับชาติ The TNI Academic Conference 2017 ครั้งที่ 4 ภายใต้หัวข้อ “การจัดการวิจัยเชิงนวัตกรรมเพื่อขับเคลื่อนประเทศไทย 4.0” (The TNI Academic Conference 2017 on the topic of “Managing innovative researches to drive Thailand 4.0) เพื่อให้ให้นักศึกษา คณาจารย์ ตลอดจน นักวิจัย จากสถาบันต่างๆ ได้นำเสนอผลงานวิจัย ที่นำไปสู่การแลกเปลี่ยนทางวิชาการ การถ่ายทอดความรู้ ความร่วมมือทางวิชาการและวิจัยต่อไปในอนาคต

ในการประชุมครั้งนี้ มีบทความส่งเข้าร่วมการพิจารณา จำนวน 217 บทความ และมีบทความที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับการตัดสินใจให้นำเสนอในการประชุมวิชาการครั้งนี้ จำนวน 130 บทความ จากสถาบันต่างๆ ภายในประเทศ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นบทความที่มีคุณภาพทั้งสิ้น

ขอขอบคุณ บริษัท โตโยต้า มอเตอร์ ประเทศไทย จำกัด บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) มูลนิธิสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระยอง ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย และการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนการประชุมวิชาการครั้งนี้

ขอขอบคุณผู้นำเสนอผลงานและผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการทุกท่าน ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความ คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ และบุคลากรทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้การจัดการประชุมวิชาการ ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ เป็นอย่างดีทุกประการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รังสรรค์ เลิศในสัตย์
คณบดี คณะบริหารธุรกิจ
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ประธานคณะกรรมการจัดการประชุม

Keynote Speaker



ดร.สมชาย หาญหิรัญ

(ปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม)

ปาฐกถาพิเศษในหัวข้อ

"บทบาทของกระทรวงอุตสาหกรรม

กับการเข้าสู่ไทยแลนด์ 4.0"



ดร. ยุทธศักดิ์ สุภสร

(ผู้อำนวยการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย)

ปาฐกถาพิเศษในหัวข้อ

"การเพิ่มขีดความสามารถของธุรกิจท่องเที่ยว

กับการเข้าสู่ยุคไทยแลนด์ 4.0"



รายชื่อผู้ประเมินบทความ (Reviewers)

รศ.ดร.เชาว์ วิจารณ์แสง	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
รศ.ดร.ณัฐสิทธิ์ เกิดศรี	มหาวิทยาลัยมหิดล
รศ.ดร.เนภาพร ชันชนภา	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รศ.ดร.ประดิษฐ์ วรรณรัตน์	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รศ.ดร.ศากุน บุญอิต	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
รศ.ดร.สมบัติ ทิฆมทรัพย์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
รศ.ดร.สิทธิพร พิมป์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
รศ.เกรียงศักดิ์ ชันชนภา	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
รศ.ผจงศักดิ์ หมวดสง	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.จักร ดิงศภักดิ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.ชัยชนะ ตีรสุกิตติมา	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.ชาย ชมภูอินไหว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผศ.ดร.ชุมพล ยวงโย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฐิติพร เลิศรัตน์เดชากุล	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.ณยศ กุรุกิจโกศล	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ดำรงเกียรติ รัตน์อมรพิน	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.ทนายวุฒิ โพธิ์ทองแสงอรุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.ธันยมัย เจียรกุล	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.บำรุง ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผศ.ดร.รชตะ รุ่งตระกูลชัย	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.รุจิภาส โพธิ์ทองแสงอรุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ บพิตรพิมุข
ผศ.ดร.วารากร ศรีเชวงทรัพย์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.วิชัย โถสุวรรณจินดา	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.วิมล แสนอุ่ม	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.วิสุทธิ์ สุพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.วุฒิ สุขเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล
ผศ.ดร.สุรพงษ์ พงษ์ยุพินพานิช
ผศ.ดร.พิพัฒน์ ชัยวิวัฒน์วรกุล
ผศ.ดร.มนัสชนก จงประสิทธิ์พร

ดร.ชนิษฐา ทรงจักรแก้ว
ดร.ฐาติญา โขมพัฒนารมณ
ดร.ทรงกลด เจริญพร
ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์
ดร.ชนัยวงศ์ กীরติวานิชย์
ดร.นฤตย์ร่ำภา ทร์พย์ไพบูลย์
ดร.บุญญาดา นาสมบูรณ์
ดร.ปาลีรัฐ เลชะวัฒนะ
ดร.เพชรพล ตัดแหวีรุพห์

ดร.พาสน์ ทิฆมทรัพย์
ดร.พีรวัฒน์ ชูเกียรติ
ดร.ภิญญาดา แก้วเขียว
ดร.รุ่งอรุณ กระแสร์สินธุ์
ดร.ฤทธิ ชูเกียรติ
ดร.สุรสิทธิ์ อุดมธนวนงศ์
ดร.อาจารย์ ประจวบเหมาะ
ดร.เอิบ พงษ์ทอง
Dr. Yu-Chin Wen

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ห้างหุ้นส่วน ที่ เค เทรนนิ่ง
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
บริษัทสยามดนตรียามาฮา จำกัด
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
บริษัทอิมแพ็ค เอ็กซ์ซิชั่น แมเนจเม้นท์ จำกัด
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

เวลา	กำหนดการ							
08.30-09.00	ลงทะเบียน ณ โถงอาคาร A ชั้น 2							
09.00-09.10	ผศ.รังสรรค์ เลิศในสัจด์ย์ คณบดี คณะบริหารธุรกิจ/ประธานจัดการประชุม กล่าวถึงวัตถุประสงค์ ณ อาคาร A ชั้น 6 ห้อง A601							
09.10-09.30	รศ.ดร.บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ อธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ประธานการประชุมวิชาการ กล่าวเปิด การประชุมวิชาการระดับชาติ TNIAC 2017							
09.30-10.45	Keynote Speaker-1: ดร.สมชาย หาญหิรัญ (ปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม) ปาฐกถาพิเศษ "บทบาทของกระทรวงอุตสาหกรรมกับการเข้าสู่ไทยแลนด์ 4.0"							
10.45-11.00	พักรับประทานอาหารว่าง							
11.00-11.45	Keynote Speaker-2: ดร.ยุทธศักดิ์ สุภสร (ผู้อำนวยการการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย) ปาฐกถาพิเศษ "การเพิ่มขีดความสามารถของธุรกิจท่องเที่ยวเกี่ยวกับการเข้าสู่ยุคไทยแลนด์ 4.0"							
11.45-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน ณ อาคาร A ชั้น 3							
13.00-14.30	นำเสนอผลงานวิจัย ณ อาคาร D							
	กลุ่ม	G1	G2-1	G2-2	G3-1	G3-2	G3-3	G4-1
	เวลา/ห้อง	D201	D202	D203	D401	D402	D403	D501
	13.00-13.15	050	044	170	010	055	136	001
	13.16-13.30	073	063	172	012	061	141	005
	13.31-13.45	105	111	173	015	077	152	040
	13.46-14.00	107	112	174	017	085	164	045
	14.01-14.15	137	119	177	018	088	166	051
	14.16-14.30	142	125	209	019	091	167	165
14.30-14.45	พักรับประทานอาหารว่าง							
14.45 เป็นต้นไป	14.45-15.00	144	148	210	022	094	169	100
	15.01-15.15	151			043	109	191	102
	15.16-15.30	178			054	115	193	106
	15.31-15.45	180			204			

G1: กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Science and technology)

G2: กลุ่มดิจิทัลและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information and digital technology)

G3: กลุ่มวิศวกรรมศาสตร์และการออกแบบ (Design and engineering technology)

G4: กลุ่มบริหารธุรกิจ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (Innovative management and business technology)

G5: กลุ่มภาษาศาสตร์ สังคมศาสตร์และการเรียนรู้ (Linguistics, social science and learning technology)

LIST OF PAPERS

G1 [D201]

- | | | |
|-----|---|----|
| 050 | การใช้เทคโนโลยีเฮอร์เทล (น้ำร้อน, สารละลายคลอรีนไดออกไซด์, ฟองก๊าซขนาดไมโคร) ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ปนเปื้อนและรักษาคุณภาพของผักกาดหอม 'คอส' ตัดแต่งพร้อมบริโภค
<i>ปาริฉัตร แซ่สาย, ณัฐชัย พงษ์ประเสริฐ, วาริช ศรีละออง, ผ่องเพ็ญ จิตอารีย์รัตน์, และ อภิรดี อุทัยรัตนกิจ</i> | 20 |
| 073 | ระบบแจ้งเตือนอุบัติเหตุอัตโนมัติโดยใช้เฟอร์เซปตรอนหลายชั้น
<i>วชิรวิทย์ หมั่นเรือคำ, วิชาญพร สุตกระโทก, สมิตา สุรโรจน์ประจักษ์, และ ชีระยุทธ ทองเครือ</i> | 26 |
| 105 | ผลของการเติมซิลิกาต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอิพ็อกซีไดซ์ : การศึกษาสมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายคอปในลอนกิติกร สโมสร, และ ฉันททิพ สกุลเขมฤทัย | 31 |
| 107 | ผลของการเติมเบนโทไนซ์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติ ; พฤติกรรมการคงรูปสมบัติเชิงกล และความต้านทานต่อการตีไฟ
<i>เกียรติศักดิ์ ทองสม, และ ฉันททิพ สกุลเขมฤทัย</i> | 37 |
| 137 | ผลกระทบของขนาดอนุภาคต่อสมบัติของถ่านชีวภาพที่ผลิตจากไม้กระถินยักษ์สับ
<i>อัมพิกา จันทร์ทองอิน, และ จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์</i> | 43 |
| 142 | การเพิ่มสารอนุผลอิสระจากกลีบดอกบัวหลวงในน้ำสมุนไพรมอง
<i>อรอุมา คำแดง, เกียรติศักดิ์ สิงห์แก้ว, และพรพาศิน ชูเชิด</i> | 49 |
| 144 | Developing High-Density Culture System of Pseudodiaptomus annandalei (Copepoda: Calanoida) with Various Microalgae Concentrate
<i>Pitchaya Chainark, Tawat Sriveerachai, Kom Silapajarn</i> | 54 |
| 151 | การพัฒนากระบวนการผลิตเส้นด้ายจากใบอ้อย
<i>พรศิริ หลงหนองคูณ, ศรีภาญจนา จตุพัฒน์วิโรตม, และ สาคร ชลสาคร</i> | 59 |
| 178 | ผลการจัดการเรียนรู้ตามแนวคิดวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสังคม มีผลต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะการแก้ปัญหาของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 จังหวัดเพชรบุรี
<i>ประวีณ์นุช งามชม, จุฬารัตน์ ชรรมะประทีป, และ ทวีศักดิ์ จินดานุรักษ์</i> | 64 |
| 180 | การออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบบริหารการบำรุงรักษาเครื่องจักร ตามแนวคิดของ SOA และคลาวด์คอมพิวติง
<i>ชัยรัตน์ ศรีพงษ์ธนากุล, และ กิตติมา เมฆาปัญญากิจ</i> | 70 |



ผลของการเติมซิลิกาต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ : การศึกษาสมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้าย

ควบไหล่อน

Effects of Silica Loading on Natural Rubber /Epoxidized Natural Rubber Blends Properties : Mechanical Properties and Nylon Cord Adhesion

กิติกรสโมสร¹และ ฉันททิพพลเกษมฤทัย²

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต.รังสิต-นครนายกถ.คลองหกทอ.ธัญบุรีจ.ปทุมธานี 12150

kitikorn@mail.rmutt.ac.th¹

chuntips@enrmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมซิลิกาที่มีต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ(NR) กับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ที่มีปริมาณการอีพ็อกซิไดซ์ที่ 50 % mol (ENR50) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ที่ 90:10 สมบัติที่ศึกษาได้แก่ ความหนืดพฤติกรรมการคงรูปสมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบไหล่อน โดยทำการผสมซิลิกาลงในยางผสมในปริมาณ 10-40 phr. โดยใช้เครื่องผสมระบบปิดศึกษาความหนืดและศึกษาพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวด์ทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปแล้วนำยางวัลคาไนซ์ที่ได้ไปทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบไหล่อนจากการทดลองพบว่า การเติมซิลิกาลงไปในยางผสมมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซิลิกามีผลในการหน่วงปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางผสม ทำให้เวลาในการเริ่มคงรูปและเวลาในการคงรูปของยางยาวนานขึ้น การเติมซิลิกาลงในยางผสมมีผลทำให้ค่าความแข็งของยางผสมเพิ่มขึ้น การเติมซิลิกาในปริมาณไม่เกิน 30 phr. ในยางผสมมีผลทำให้ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมเพิ่มขึ้น การเติมซิลิกาในปริมาณไม่เกิน 20 phr. ในยางผสมมีผลทำให้ความทนต่อแรงดึงของยางผสมเพิ่มขึ้น การเติมซิลิกาลงในยางผสมทำให้ประสิทธิภาพในการยึดติดระหว่างยางผสมกับเส้นด้ายควบไหล่อนสูงขึ้น

คำสำคัญ: ซิลิกา, ยางธรรมชาติ, ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์, ยางผสม, การยึดติดกับเส้นด้ายควบไหล่อน

ABSTRACT

The objective of this work to investigation the effects of silica loading on natural rubber(NR)/epoxidized natural rubber (ENR50) blend. The ratio of natural rubber/epoxidized natural rubber (ENR50) blend was 90:10. The viscosity, cure characteristics, mechanical properties and nylon cord adhesion of the rubber blend were studied. Silica was compounded with the rubber blend in various content, 10-40 phr. by the internal mixer (Kneader). Mooney viscosity and cure characteristics of the rubber compound were characterized. The rubber

compounds were vulcanized at 150 °C by the compression molding machine. The mechanical properties and nylon cord adhesion of the vulcanisate were investigated. The increasing of silica contents in the rubber compound significantly increased the Mooney viscosity. Silica incorporation caused vulcanization retardation and the increasing of scorch time and cure time of the rubber compounds. The increasing of silica contents resulted in the increasing of hardness. The silica content not excess to 30 phr. affect to the vulcanisate tear strength increasing. The vulcanisate tensile strength increased with silica content loading not higher than 20 phr. The silica loading significantly enhance the nylon cord adhesion of the rubber blend.

Keywords: silica, natural rubber, epoxidized natural rubber, rubber blend, nylon cord adhesion

1) บทนำ

ยางธรรมชาติ(Natural rubber : NR)มีชื่อทางเคมีคือ cis-1,4-polyisoprene ใน 1 โมเลกุลของยางจะประกอบไปด้วยหน่วยของ isoprene (C₅H₈) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรงประมาณ 3,000-5,000 หน่วยสมบัติเอกลักษณ์และลักษณะเด่นของยางธรรมชาติได้แก่ ความแข็งแรงของยางที่ไม่ได้ใส่สารตัวเติมหรือมีความแข็งแรงของยางเนื้อยางล้วนๆสูง สามารถระบายความร้อนได้ดี เห็นยวติดกันเองได้ดี ยางธรรมชาติจึงนิยมนำไปใช้ทำยางล้อชนิดต่างๆ ยางรองการสัมผัสเหมือน ซิลิกันร้ว ฉนวนไฟฟ้า ยางรองคอสพาน ยางรองอาคาร พื้นรองเท้า ท่อยาง ท่อเสริมแรง เป็นต้น[1]ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไซด์ (Epoxidized Natural Rubber : ENR) คือยางธรรมชาติที่ถูกนำมาปรับโครงสร้างโดยใช้สารเคมีจำพวกกรดเปอร์ออกซี (peroxy acid) ยางจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มกว่ายางธรรมชาติปกติสามารถเตรียมได้ทั้งชนิดน้ำยางและยางแห้งโดยมีการผลิตขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น เช่นทำให้ยางมีความเป็นขั้วมากขึ้น



สามารถทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีขึ้น สามารถทนต่อ
โอโซนและการซึมผ่านของอากาศได้ดีเพราะพันธะคู่ในโครงสร้างยาง
ธรรมชาติมีปริมาณน้อยลงอย่างไรก็ตามยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์ที่มี
สมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางธรรมชาติ เช่นมีความยืดหยุ่นต่ำลง
และหากนำไปใช้ในเวลาในชั้ด้วยกัมมันตภาพจะไม่ทนต่อความร้อนยาง
ธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์มักใช้ในอุตสาหกรรมกาวหรือสารยึดติด รองเท้า
สี และยางรถยนต์เป็นต้น[2]ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์ มีความเป็นขั้ว
มากกว่ายางธรรมชาติเนื่องจากมีหมู่ epoxide อยู่ในโครงสร้าง [3] ซึ่ง
หมู่ epoxide สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล(hydroxyl
group : -OH)ที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาได้[4] งานวิจัยที่ผ่านมาได้มี
การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์ที่เติมซิลิกา
เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาโดยไม่ใช้สารควบคู่(Coupling
agent)ผลการทดลองพบว่ายางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์ที่เติมซิลิกาให้
สมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกา [5-6] ยางธรรมชาติอีพ
ร็อกซีไซท์ถูกใช้เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ให้ยางไนไตรล์
(NBR) ที่เติมซิลิกาและในยางผสมระหว่างยางไนไตรล์กับยางธรรมชาติ
ที่เติมซิลิกาซึ่งยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล
ของยางทั้งคู่ได้ [7-8] ต่อมาได้มีการนำยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์มาใช้
เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ในยางธรรมชาติที่เติม
organoclayพบว่ายางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์สามารถปรับปรุง
พฤติกรรมการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติม
organoclay ได้[9-10] และต่อมาได้มีการนำยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์
มาใช้เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ในยางธรรมชาติที่เติมซิลิกา
พบว่ายางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ
ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาได้เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกา
แต่ไม่ใช้ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์แต่ประสิทธิภาพยังต่ำกว่าการใช้
สารควบคู่ซิลเลน(Silane Coupling Agents)[11]

ซิลิกา (SiO₂)เป็นสารตัวเติมเสริมแรง(Reinforcing filler) ชนิด
หนึ่งที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว ซิลิกาที่ใช้กันส่วนใหญ่ในภาคอุตสาหกรรม
มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร แต่ซิลิกาจะไม่
ชอบอยู่กระจายกันอยู่เป็นอนุภาคแบบปฐมภูมิแต่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม
ก้อนที่เรียกว่า “แอกกรีเกต (Aggregate)” เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ
ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ระหว่างการผสมเนื่องจากมีแรง
ดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง(Covalent bond)และแอกกรีเกตของซิลิกา
มักจะเกาะกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่า
“แอกโกลเมอเรต (Agglomerate)”ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำที่เป็น
สารตัวเติมเสริมแรงเช่นกันโครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกาจะมีความ
แข็งแรงและทำลายลงได้ยากกว่าเนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกา
เป็นแอกโกลเมอเรตมาจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ซึ่ง
มีความแข็งแรงกว่าแอกโกลเมอเรตของเขม่าดำซึ่งเกาะกลุ่มกันด้วยแรง
แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces)[12-13]ซิลิกามีความเป็นขั้วสูง
และมีพื้นผิวแบบไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) เนื่องมาจากบนพื้นผิวของซิลิกา
มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือซิลานอลอยู่ในปริมาณมากด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้
ซิลิกาเข้ากันได้ยากกับยางที่ไม่มีขั้วเช่นยางธรรมชาติ (NR) แต่มี
แนวโน้มจะสามารถเข้ากันได้ดีกับยางที่มีขั้วเช่นยางคลอโรพรีน
(CR)[14] หรือยางไนไตรล์(NBR)[15]การใช้ซิลิกาผสมกับยางที่ไม่มีขั้ว
โดยไม่ใช้สารช่วยประสาน (Compatibilizer)หรือสารควบคู่ซิลเลน

(Silane Coupling Agents) ช่วยจะทำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี
ส่งผลให้ได้สมบัติของยางที่ต่ำเนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับ
ซิลิกาจะสูง (Filler-Filler interaction) จึงทำให้ประสิทธิภาพของการ
เสริมแรงต่ำ [16]ซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรดและหมู่ซิลานอลที่ผิวของซิลิกา
สามารถดูดซับสารตัวเร่งในระบบการวัลคาไนซ์ทำให้ยางคอมพาวด์
เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและวัลคาไนซ์ได้ช้าลงอีกด้วย[17-18]

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นจะทำการศึกษาลักษณะของการ
เติมซิลิกาในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซี
ไซท์โดยทำการศึกษาลักษณะสมบัติเชิงกลและการยึดกับเส้นด้ายควบในลอน 6
เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม เช่น ยางรถยนต์ ต่อไป
ในอนาคต

2) วิธีดำเนินการวิจัย

2.1) วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติในรูปของยางแท่งSTR 20
(Standard Thai Rubber 20) บริษัทศรีตรังแอกโรอินดัสทรีจำกัด
(มหาชน) ประเทศไทยและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์ที่มีปริมาณการอีพ
็อกซีไซท์ที่ 50 % mol (ENR50)บริษัทเมืองใหม่กัณฑ์จำกัด (มหาชน)
ประเทศไทย ในการผลิตเป็นยางผสม NR/ENR ในอัตราส่วน 90/10 ทำ
การวัลคาไนซ์ในยางผสมNR/ENR โดยใช้กัมมันต (sulphur) จากบริษัท
บริษัทสยามเคมีจำกัด(มหาชน) เป็นสารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing
agent) ใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators) ได้แก่ซิงค์ออกไซด์ (zinc
oxide) จากบริษัทซีเอ็มซีแอดวานซ์จำกัดและกรดสเตียริก (stearic
acid) จากบริษัทเพชรไทยเคมีภัณฑ์จำกัดใช้สารเร่งปฏิกิริยา
(accelerators) ได้แก่N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide
(CBS) จากบริษัทเคมีภัณฑ์อินเตอร์เทรดคอร์ปอเรชันจำกัดเส้นด้ายควบ
ในลอน (Nylon 6 tyre cord fabric) เกรด 1260/D2-25บริษัทJUNMA
TYRE CORD Co.,Ltd. ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนตัวแปรที่ใช้ใน
การวิจัยนี้ได้แก่พีซีพีเทตซิลิกาเกรดCN-180 จาก บริษัท เบอร์กัน
จำกัด ประเทศไทย

2.2) การเตรียมยางคอมพาวด์และการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในกระบวนการผสมยางกับสารเคมี (compounding) ยาง
ธรรมชาติจะถูกผสมกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไซท์ที่ทำการวัลคาไนซ์
การวัลคาไนซ์และซิลิกาโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (kneader) ขนาด3
ลิตรรุ่นYFYK 3L บริษัทยงฟงแมชชีนเนอรี่จำกัดประเทศไทยอัตราส่วน
ของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมแสดงในตารางที่ 1 และ 2โดยใน
งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของการเติมซิลิกาที่มีต่อ
สมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซี
ไซท์ในอัตราส่วน 90/10 และผลของการเติมซิลิกาที่มีต่อสมบัติของยาง
ธรรมชาติ ชิ้นงานยางตัวอย่างขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป
(compression molding machine) SYR-10 ของบริษัทหงษ์วิทยาไทย
จำกัดประเทศไทยที่อุณหภูมิ150 °Cตามระยะเวลาการคงรูปที่วัดได้จาก
เครื่องmoving die rheometer (MDR) และนำยางคอมพาวด์ ที่ได้มาขึ้น
รูปร่วมกับเส้นด้ายควบในลอน เพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการ
ยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในลอน โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป



(compression molding machine) SYR-10 ของบริษัทหงษ์ยาวไทย จำกัดประเทศไทยอุณหภูมิ 150 °Cตามระยะเวลาการคงรูปที่วัดได้จากเครื่องmoving die rheometer (MDR)

ตารางที่ 1: อัตราส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมยางผสม

NR/ENR	
สารเคมี	ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ (phr)
ยางธรรมชาติ (STR20)	90
ยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดร์(ENR 50)	10
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	4
กรดสเตียริก (stearic acid)	2
N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS)	1
กำมะถัน (sulphur)	1.5
ซิลิกา (silica)	0, 10,20,30 และ 40

ตารางที่ 2: อัตราส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมยางธรรมชาติ

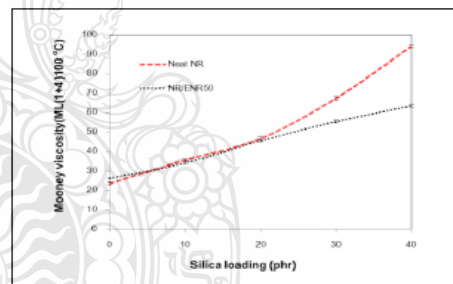
สารเคมี	ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ (phr)
ยางธรรมชาติ (STR20)	100
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	4
กรดสเตียริก (stearic acid)	2
N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS)	1
กำมะถัน (sulphur)	1.5
ซิลิกา (silica)	0, 10,20,30 และ 40

2.3) การทดสอบสมบัติของยาง

ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์วัดโดยMooney viscometer รุ่น MV 3000A ของ Gotech testing Machines, Inc. ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D 1646-00 พฤติกรรมการคงรูปของยางวัดโดยใช้ moving die rheometer (MDR) รุ่น M 3000A ของ Gotech testing Machines, Inc. ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D 5289-00 ที่อุณหภูมิ 150 °Cสมบัติของยางคงรูปที่ทดสอบได้แก่ ความแข็ง (hardness) ของยางตามมาตรฐาน ASTM D 2240-00 โดยใช้ Shore durometerรุ่น 473 ของ Pacific Transducer Crop. ประเทศสหรัฐอเมริกา สมบัติความทนแรงดึง (tensile properties) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412-00 โดยใช้ universal testing machine รุ่น AI-700-SGotech testing Machines, Inc. ประเทศไต้หวันความทนต่อการฉีกขาด(tear strength)ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624-00 โดยใช้universal testing machine รุ่นAI-700-S Gotech testing Machines, Inc. ประเทศไต้หวันสัณฐานวิทยาทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopes; SEM) รุ่น JSM 6340F ของ JEOL USA, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา ทดสอบความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายคอปเปอร์ในลอนโดยการทดสอบแบบH-Adhesion test ตามมาตรฐานASTM D4776-00โดยใช้universal testing machine รุ่นAI-700-S Gotech testing Machines, Inc. ประเทศไต้หวัน

3) ผลการทดลอง

จากการทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ในรูปที่ 1 พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นและพบว่าเมื่อปริมาณการเติมซิลิกาเกินกว่า 20 phr.ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาก็จะมีความหนืดมูนนี่ที่สูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดร์ เนื่องจากเมื่อเติมซิลิกามากกว่า 20 phr. ซิลิกาจะกระจายตัวได้ยากในยางธรรมชาติเนื่องจากความไม่เข้ากันของซิลิกากับยางธรรมชาติอันเนื่องมาจากความเป็นขั้วที่ต่างกัน [12]แต่ในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดร์ซิลิกาสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าจึงทำให้ความหนืดมูนนี่ต่ำกว่ายางธรรมชาติอีพ็อกซีไดร์สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวและอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมที่มีขั้ว[19-20]โดยเมื่อเติมซิลิกาลงไปในยางส่วนที่จับอยู่บนพื้นผิวของซิลิกาและยางส่วนที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซิลิกาจะถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของซิลิกาจึงทำให้ยางส่วนนี้จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้(immobilized rubber) ในขณะที่ยางส่วนที่เหลือซึ่งอยู่ด้านนอกจัดเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ(Mobilized rubber) ซึ่งหากซิลิกาแตกตัวได้ไม่เต็มที่จะทำให้ยางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ก็จะมีปริมาณมากส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดที่สูงเนื่องจากยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีปริมาณน้อยแต่ถ้าซิลิกาสามารถแตกตัวได้ดีจะส่งผลให้ยางที่เคยแทรกอยู่ในรูพรุนของซิลิกาถูกปลดปล่อยออกมาด้านนอกกลายเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ [21]



รูปที่ 1: ความหนืดมูนนี่ของยางที่มีการเติมซิลิกา

จากการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปในตารางที่ 3พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพ็อกซีไดร์ มีเวลาในการเริ่มคงรูป(t_{22})และเวลาในการคงรูป (t_{90})ยาวนานมากขึ้นเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกาจะเต็มไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขั้วและว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่างๆสูงดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับสารเคมีต่างๆ โดยเฉพาะสารเร่งปฏิกิริยา (accelerators) [12,22-23] ดังนั้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้สารเร่งปฏิกิริยาถูกดูดซับมากขึ้นจึงเป็นผลให้เวลาในการเริ่มคงรูป (t_{22})และเวลาในการคงรูป (t_{90}) ยาวนานมากขึ้นตามไปด้วย



ตารางที่3: พฤติกรรมการคงรูปของยางที่มีการเติมซิลิกา

ปริมาณซิลิกา (phr)	พฤติกรรมการคงรูป			
	t_{22} (min.sec)		t_{90} (min.sec)	
	NR/ENR50	NR	NR/ENR50	NR
0	4.33	5.42	7.06	8.41
10	9.17	8.22	12.54	11.18
20	12.13	8.40	15.34	11.51
30	13.09	8.45	18.12	17.50
40	13.40	8.54	18.35	18.49

ตารางที่4: สมบัติความทนแรงดึงของยางที่มีการเติมซิลิกา

ปริมาณซิลิกา (phr)	สมบัติความทนแรงดึง			
	300% มอดูลัส (MPa)		ความทนต่อแรงดึง(MPa)	
	NR/ENR50	NR	NR/ENR50	NR
0	1.79	1.86	24.58	22.35
10	2.16	2.16	25.01	23.97
20	3.05	3.37	26.97	25.01
30	3.58	3.64	23.06	22.45
40	4.78	4.84	17.02	15.23

จากการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงในตารางที่ 4 พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์โดยการเติมซิลิกา ลงไปจะมีค่าความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นและสูงที่สุดที่การเติมซิลิกา 20 phr. หลังจากนั้นค่าความทนต่อแรงดึงจะลดลงโดยยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์จะมีค่าความทนต่อแรงดึงที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกา เนื่องจากมีการที่ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์สามารถเข้ากันได้ดีกับซิลิกา มากกว่ายางธรรมชาติกับซิลิกาสาเหตุเพราะยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) ระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกาอีกทั้งสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวและอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมที่มีขั้ว [19-20]เมื่อปริมาณการเติมซิลิกามากกว่า 20 phr. ความทนต่อแรงดึงลดลงเนื่องจากซิลิกากระจายตัวได้ยากและมีแนวโน้มที่จะจับตัวกันเป็นก้อนมากกว่าที่จะกระจายตัวเนื่องจากสัดส่วนของซิลิกาในยางคอมพาวด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อยางไม่เพียงพอที่จะหุ้มรอบอนุภาคซิลิกาซิลิกาจึงมีแนวโน้มเกิดพันธะระหว่างอนุภาคของซิลิกาทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนแอกกรีเกชัน (aggregation) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดเป็นจุดอ่อนแอในเนื้อยางทำให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลง[24-26]

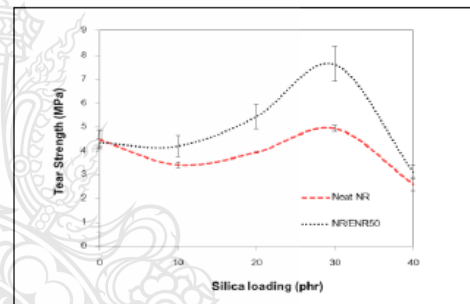
ส่วนค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300%(300 % modulus)ดังแสดงในตารางที่ 4 และค่าความแข็ง (Hardness) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ และยางธรรมชาติที่เติมซิลิกา ดังแสดงในตารางที่ 5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเติมซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมจำพวกเสริมแรง [12]

จากผลการทดสอบความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของยางธรรมชาติและยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซีไคซ์ ที่เติมซิลิกาดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าการเติมซิลิกามีผล

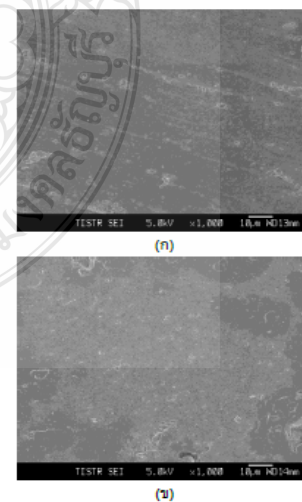
ตารางที่5: ความแข็งของยางที่มีการเติมซิลิกา

ปริมาณซิลิกา (phr)	ความแข็ง (Shore A)	
	NR/ENR50	NR
0	39	39
10	42	42
20	46	45
30	49	49
40	52	54

ทำให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นในช่วงที่เติมลงไปไม่เกิน 30 phr. แต่เมื่อเติมลงไปมากกว่านั้นจะทำให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดลดลงนั้นอาจเกิดจากการแตกตัวที่ไม่ดีของซิลิกา[24]จากผลการทดลองพบว่ายางผสมที่เติมซิลิกามีความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเนื่องจากในยางผสมซิลิกาสามารถแตกตัวได้ดีกว่าจึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาเกิดขึ้นได้สูงกว่า



รูปที่ 2: ความทนต่อการฉีกขาดของยางที่มีการเติมซิลิกา



รูปที่ 3: ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 1,000 เท่าของยางที่มีการเติมซิลิกาจำนวน 30 phr. : (ก) NR/ENR50 และ (ข) NR



รูปที่ 3 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ กำลังขยาย 1,000 เท่าของยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ประกอบไปด้วยยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ ที่มีการเติมซิลิกา 30 phr. และยางธรรมชาติที่มีการเติมซิลิกา 30 phr. ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ซิลิกามีการแตกตัวและกระจายตัวในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ได้ดีกว่าในยางธรรมชาติ

จากผลการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 (H-Adhesion test) ในตารางที่ 6 พบว่าเมื่อปริมาณการเติมซิลิกาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 มีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงที่สุดที่ปริมาณการเติมซิลิกาที่ 20 phr. หลังจากนั้นจะลดลงและยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาจะทำให้ค่าการยึดติดที่ต่ำกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ การจะช่วยให้เพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 เนื่องมาจาก การเติมซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีขั้ว [12] จึงสามารถเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 ซึ่งมีความเป็นขั้วเหมือนกันได้ดี และในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์จะทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) [19-20] ระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 อีกด้วย จึงทำให้ยางผสมที่เติมซิลิกามีความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 สูงกว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกา การลดลงของค่าความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 อาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของซิลิกาหลังจากเติมในปริมาณมาก ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่ดีของซิลิกาจะให้เห็นที่ในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อนลดลงส่งผลให้การยึดติดของยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 ลดลงตามไปด้วย

ตารางที่ 6: ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับเส้นด้ายควบในล่อน 6 (H-Adhesion test)

ปริมาณซิลิกา (phr)	H-TEST ADHESION (MPa)	
	NR/ENR50	NR
0	0.56	0.48
10	1.02	0.98
20	1.43	1.14
30	1.24	1.04
40	1.21	0.86

4) สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองผลของการเติมซิลิกาต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ที่ ต่อสมบัติเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้ายควบในล่อนซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้การเติมซิลิกาลงไปในยางผสมมีผลทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซิลิกามีผลในการหน่วงปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยางผสมทำให้เวลาในการเริ่มการขึ้นรูปและเวลาในการคงรูปของยางยาวนานขึ้น การเติมซิลิกาลงในยางผสมมีผลทำให้ค่ามอดูลัสที่ 300 % และค่าความแข็งแรงของยางผสมเพิ่มขึ้นการเติมซิลิกาในปริมาณไม่เกิน 30 phr. ในยางผสมมีผลทำให้ความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมเพิ่มขึ้น การเติมซิลิกาในปริมาณ

ไม่เกิน 20 phr. ในยางผสมมีผลทำให้ความทนต่อแรงดึงยางผสมเพิ่มขึ้น การเติมซิลิกาในยางผสมปริมาณไม่เกิน 20 phr. ทำให้ประสิทธิภาพในการยึดติดระหว่างยางผสมกับเส้นด้ายควบในล่อนสูงขึ้น

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์สามารถปรับปรุงการกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ให้ดีขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาส่งผลให้ยางผสมที่เติมซิลิกาให้สมบัติต่างๆที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกา

5) กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี บริษัท เอ็น.ดี.รับเบอร์ จำกัด (มหาชน) และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือเครื่องจักรที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

6) เอกสารอ้างอิง

- [1] วราภรณ์ ขจรไชยกูล, *ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี*, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 9-11, 2552.
- [2] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี, *การผลิตยางธรรมชาติ*, พิมพ์ครั้งที่ 2, หน้า 213-216, 2543.
- [3] Gelling IR, Porter M. In: Robert AD, editor. "Natural rubber science and technology", Chapter 10, 1988.
- [4] Chapman AV, "Natural rubber and NR-based polymers: renewable materials with unique properties", In: 24th International H.F. Mark Symposium advances in the field of elastomers & thermoplastic elastomers, Vienna, Austria, 15-16 November 2007, pp. 15-16.
- [5] Cataldo F, "Preparation of silica-based rubber compounds without the use of a silane coupling agent through the use of epoxidized natural rubber", *Macromol Mater Eng*, vol. 287(5), pp. 348-352, 2002.
- [6] Luo YY, Wang YQ, Zhong JP, He CZ and Li YZ, Peng Z, "Interaction between fumed-silica and epoxidized natural rubber", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 21(4), pp. 777-783, 2011.
- [7] Kantala C, Wimala E, Sirisinha C and Sombatsompom N, "Reinforcement of compatibilized NR/NBR blends by fly ash particles and precipitated silica", *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 20(5), pp. 448-458, 2009.
- [8] George KM, Varkey JK, Thomas KT, Mathew NM, "Epoxidized natural rubber as a reinforcement modifier for silica-filled nitrile rubber", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 85(2), pp. 292-306, 2002.
- [9] Teh PL, Mohd Ishak ZA, Hashim AS, Karger-Kocsis J and Ishiaku US, "On the potential of organoclay with respect to conventional fillers (carbon black, silica) for epoxidized natural rubber compatibilized natural rubber vulcanizates", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 94(6), pp. 2438-2445, 2004.
- [10] Teh PL, Mohd Ishak ZA, Hashim AS, Karger-Kocsis J and Ishiaku US, "Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites", *European Polymer Journal*, vol. 40(11), pp. 2513-2521, 2004.
- [11] Kamda Sengloyluan, Kannika Sahakaro, Wilma K. Dierkes, and Jacques W.M. Noordermeer, "Silica-reinforced tire tread compounds compatibilized by using epoxidized natural rubber",



- European Polymer Journal*, vol. 51, pp. 69–79, 2014.
- [12] พงษ์ธร แซ่ฮุย, สารเคมียาง, พิมพ์ครั้งที่ 2, 86-92, 2550.
- [13] Seyvet O and Nevard P. "Collision-induced dispersion of agglomerates suspensions in a shear flow". *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 78(5), pp. 1130-1133, 2000.
- [14] Das A, Debnath SC, De D and Basu DK. "Evaluation of physical properties and curing characteristics of silica-filled ethylene-propylene-diene terpolymer in the presence of chloroprene rubber". *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 93(1), pp. 196-200, 2004.
- [15] Choi S-S, "Improvement of properties of silica-filled styrene-butadiene rubber compounds using acrylonitrile-butadiene rubber". *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 79(6), pp. 1127-1133, 2001.
- [16] Donnet J-B, "Black and white fillers and tire compound". *Rubber Chemistry & Technology*, vol. 71(3), pp. 323-341, 1998.
- [17] Bachmann JH, Sellers JW, Wagner MP and Wolf RF, "Fine particle reinforcing silicas and silicates in elastomers", *Rubber Chemistry & Technology*, vol. 32(5), pp. 1286-1391, 1959.
- [18] Udo Goerl, Andrea Hunsche, Arndt Mueller and H. G. Koban, "Investigations into the Silica/Silane Reaction System", *Rubber Chem Technol*, vol. 70(4), pp. 608-623, 1997.
- [19] M. Arroyo, M.A. Lopez-Manchado, J.L. Valentin and J. Carretero, "Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blend", *Composites Science and Technology*, vol. 67, pp. 1330-1339, 2007.
- [20] Kamda Sengloyluan, Kannika Sahakaro, Wilma K. Dierkes, and Jacques W.M. Noordermeer, "Silica-reinforced tire tread compounds compatibilized by using epoxidized natural rubber", *European Polymer Journal*, vol. 51, pp. 69–79, 2014.
- [21] สุภาวดี รัชชสิทธิ์, ชีราณี ก่อตระกูล, ปานททัย ชื่นฟูดี และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของเส้นใยคาร์บอนเสริมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, (3)12, 50-59, 2547.
- [22] Ansarifard A, Shiah SF, and Bennett M. Optimising the chemical bonding between silanised silica nanofiller and natural rubber and assessing its effects on the properties of the rubber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 26, pp. 454–463, 2006.
- [23] Sirinthorn Thongsang, Weeraya Vorakhan, Ekachai Wimalmala, Narongrit Sombatsompop, "Dynamic mechanical analysis and tribological properties of NR vulcanizates with fly ash/precipitated silica hybrid filler", *Tribology International*, vol. 53, pp. 134–141, 2012.
- [24] กุขศักดิ์ ทับทอง, ชาศรีดิ ลิธิสิงห์ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, ขบวนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาในยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์มจร*, (1)24, 95-110, 2551.
- [25] จุฑาทิพย์ อัจฉมภู, เตียวยสายจันทร์ และขวัญฤทัย บุญสูง, "ประสิทธิภาพการลดพลังงานการผสมและสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท", *The 5th Rajamangala University of Technology National Conference*, 5th RMUTNC, จังหวัดกรุงเทพมหานคร, 15-16 กรกฎาคม 2556 หน้า 250-241
- [26] Sae-oui, P., Sirisinha, C. Wantana, T. and Hatthapanit, K. 2007. Influence of Silica Loading on the Mechanical Properties and Resistance to Oil and Thermal Aging of CR/NR Blends. *J Appl Polym Sci*, vol. 104, pp. 3478–3483, 2007.



สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ขอมอบเกียรติบัตรฉบับนี้เพื่อแสดงว่า

กิติกร สโมสรร, และ ฉันทพิภพ สกุลชมภูทัย

ได้ส่งผลงานเรื่อง ผลงานของการตีพิมพ์บทความวิจัยและระหว่างกิจกรรมชาติกับกิจกรรมชาติที่ออกซิดซ์:

การศึกษาลมพัดเชิงกลและการยึดติดกับเส้นด้วยตัวจับในลอน

เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิชาการ

ในการประชุมวิชาการระดับชาติ The TNI Academic Conference 2017

ภายใต้หัวข้อ "การจัดการวิจัยเชิงนวัตกรรมเพื่อขับเคลื่อนประเทศไทย 4.0"

ให้ไว้ ณ วันที่ 19 พฤษภาคม 2560

ผู้อำนวยการจารย์สุรศักดิ์ เลิศโนสตีชัย

ประธานคณะกรรมการจัดงานประชุม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายกิติกร สโมสร
วัน เดือน ปีเกิด	1 กันยายน 2534
ที่อยู่	102/1 หมู่ 6 ตำบลหนองแก้ว อำเภอกันทรารมย์ จังหวัดศรีสะเกษ
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีการยาง มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติทำงาน	2557-ปัจจุบัน เจ้าหน้าที่วิจัยและพัฒนา บริษัทเอ็นดีรับเบอร์ จำกัด (มหาชน)
เบอร์โทรศัพท์	088-3446273
อีเมลล์	Kitikorn@mail.rmutt.ac.th

