ผลของระบบวัลคาไนซ์และสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์

นางสาว จิราพรรณ ภาระบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6053-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF VULCANIZATION SYSTEMS AND FILLERS ON PHYSICAL PROPERTIES OF EPOXIDIZED NATURAL RUBBER

Miss Jirapun Paraboon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6053-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของระบบวัลคาไนซ์และสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์
โดย	นางสาว จิราพรรณ ภาระบุญ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รัจนา ศิริสุข)

จิราพรรณ ภาระบุญ : ผลของระบบวัลคาไนซ์และสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์. (EFFECTS OF VULCANIZATION SYSTEMS AND FILLERS ON PHYSICAL PROPERTIES OF EPOXIDIZED NATURAL RUBBER) อ. ที่ปรึกษา : รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง 133 หน้า. ISBN 974-17-6053-1.

งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาผลของสารตัวเติม 3 ชนิด คือ คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (ENR) โดยยาง ENR เตรียมได้จากน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงด้วยวิธี '*in situ*' epoxidation โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดฟอร์มิกที่อัตราส่วนต่างๆ กัน ในภาวะที่มีสารลดแรงตึงผิว ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 8 10 12 14 และ 16 ชั่วโมง ยาง ENR ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์อยู่ในช่วง 35–40 โมลเปอร์เซ็นต์ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเตรียมได้จากการใช้อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดฟอร์มิกเท่ากับ 0.75 : 1 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของยาง ENR และยางธรรมชาติ (ยางแท่ง STR XL) ซึ่งไม่ได้ใส่สารตัวเติมที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV semi–EV และ EV พบว่า ยาง ENR มีสมบัติทางกายภาพ และความต้านทานน้ำมันเหนือกว่ายางแท่ง STR XL ในทุกระบบการวัลคาไนซ์

ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตได้ถูกเตรียมและวัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV สำหรับตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ จากการทดลองพบว่า ยาง ENR ที่ใส่คาร์บอนแบล็กมีสมบัติทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ ความทนแรงดึง มอดุลัส ความต้านทานการฉีกขาด ความแข็ง การคืนตัว ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานน้ำมัน มากกว่าที่ใส่ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ ยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมมีสมบัติทางกายภาพเหนือกว่ายางแท่ง STR XL ซึ่งใส่สารตัวเติมประเภทเดียวกัน

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต จิราพรรณ ภาระบุญ

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์

ปีการศึกษา 2547 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4572253923 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD: EPOXIDIZED NATURAL RUBBER / MECHANICAL PROPERTIES / OIL RESISTANCE PROPERTIES / VULCANIZATION SYSTEMS / FILLERS

JIRAPUN PARABOON : EFFECTS OF VULCANIZATION SYSTEMS AND FILLERS ON PHYSICAL PROPERTIES OF EPOXIDIZED NATURAL RUBBER . THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, THESIS COADVISOR : NUCHANAT NA-RANONG, 133 pp. ISBN 974-17-6053-1.

This research investigated the effects of 3 fillers: carbon black, silica and calcium carbonate on physical properties of epoxidized natural rubber (ENR). The ENRs were prepared from high ammonia concentrated natural rubber latex via *'in situ'* epoxidation method with various ratio of hydrogen peroxide and formic acid in the presence of a surfactant at 50°C for 4, 8, 10, 12, 14 and 16 h. ENR with 35–40 mole percent of epoxide groups used in this study was prepared by a molar ratio of 0.75 : 1 hydrogen peroxide–formic acid at 50°C for 4 h. The physical properties of unfilled–ENR and unfilled natural rubber (STR XL) which vulcanized by CV, semi–EV and EV system were examined. It was found that unfilled–ENR vulcanizates showed superior physical properties and oil resistance than unfilles–STR XL vulcanizate for all vulcanized systems.

ENR filled with 50 phr of carbon black, silica and calcium carbonate were prepared and vulcanized by CV system for physical testing. It was found that carbon black–filled ENR showed higher physical properties: tensile strength, modulus, tear strength, hardness, compression set, abrasion resistance and oil resistance than those filled with silica and calcium carbonate. In addition, filled–ENRs showed superior physical properties than filled–STR XL.

Department	Materials Science	Student's signature J. Pra
Field of study	Applied Polymer Science and Textile Technology	Advisor's signature
Academic year	2004	Co-advisor's signature Nuchanat Na-Ranong

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือ และความร่วมมือจากบุคคลหลายๆท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณรองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ รศ. ไพพรรณ สันติสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราช และ ผศ. รัจนา ศิริสุข คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่างๆ ให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ กรมวิชาการเกษตร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยตลอดจนสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในส่วนการบดผสมยาง รวมไปถึงการทดสอบสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในสถาบันวิจัยยางทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ อาทิ เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ เครื่องทดสอบรีโอมิเตอร์ และเครื่องทดสอบสมบัติด้านการดึง เป็นต้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายโรงงานในกรมวิชาการการเกษตร ที่คอยให้ความรู้ และคำแนะนำในการบดผสมยางผสมสารเคมี อีกทั้งยังช่วยบดผสมยางในงานวิจัยครั้งนี้ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท ไทย รับเบอร์ ลาเท็กซ์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงปริมาณ 40 กิโลกรัม มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย

ขอขอบคุณคุณบุญศรี คู่สุขธรรม ที่เอื้อเฟื้อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 30 ลิตร มาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายใดๆ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด รวมทั้งขอบขอบคุณน้องๆ และสมาชิกครอบครัวทุกคน รุ่นพี่ และเพื่อนๆ ทุกคนในภาควิชาที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษา ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้วิจัยก็ขออภัยมา ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ฌ

สารบัญรูปภาพ.....ฒ

บทที่

1. บทนำ.....1

2. วารสารปริทัศน์.....3

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....3

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex).....3

2.1.2 น้ำยางข้น (Concentrated Latex).....4

2.1.3 องค์ประกอบของน้ำยางข้น.....7

2.2 ระบบวัลคาไนเซชัน (Vulcanization Systems).....8

2.2.1 วัลคาไนเซชันด้วยซัลเฟอร์ (Sulphur Vulcanization).....8

2.2.2 โครงสร้างการเชื่อมขวางโมเลกุล (Cross–link Structure).....9

2.3 ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber).....11

2.3.1 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....13

2.3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....16

2.4 สารตัวเติมหรือฟิลเลอร์ (Fillers).....21

2.4.1 คาร์บอนแบล็ก (Carbon Black).....21

2.4.2 ซิลิกา.....23

2.4.3 แคลเซียมคาร์บอเนต.....28

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....32

3. การทดลอง.....35

3.1 วัตถุดิบ.....35

3.2 สารเคมี.....36

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....37

บทที่ หน้า

3.4 แนวทางการทดลอง....38
3.5 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์....38
3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์....39
3.7 การศึกษาผลของระบบวัลคาไนซ์ต่อสมบัติทางกายภาพของ
ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์....40
3.8 การศึกษาผลของสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์....43
3.9 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ....45
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง....51
4.1 การวิเคราะห์ยาง ENR ด้วยเทคนิค FT–IR....51
4.2 ผลของสารเคมีและเวลาที่ใช้ในการอิพอกซิไดซ์ยางธรรมชาติ....52
4.3 พฤติกรรมการคงรูปของยาง ENR....55
4.3.1 ผลของระบบวัลคาไนซ์ต่อยาง ENR....55
4.3.2 ผลของสารตัวเติมต่อยาง ENR....58
4.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง ENR....60
4.4.1 สมบัติทางกายภาพของยาง ENR ที่ยังไม่ได้ใส่สารตัวเติม....60
4.4.2 สมบัติทางกายภาพของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติม....74
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....82
5.1 สรุปผลการทดลอง....82
5.2 ข้อเสนอแนะ....84

รายการอ้างอิง....85
ภาคผนวก....87
ภาคผนวก ก....88
ภาคผนวก ข....90
ภาคผนวก ค....104
ภาคผนวก ง....118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....133

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 สูตรโครงสร้างของไอโซพรีนและ *cis*–1,4–พอลิไอโซพรีน....3

2.2 การผลิตน้ำยางข้นชนิด 60%....5

2.3 หลักการของวิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า....6

2.4 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมน้ำยางข้นโดยวิธีทำให้น้ำระเหย....7

2.5 ลักษณะสายเชื่อมโยงโมเลกุล (Network Structure)....9

2.6 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ....11

2.7 ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบไฮดรอกซีเอสเทอร์....12

2.8 อินฟราเรดสเปคตรัมของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์....14

2.9 กราฟมาตรฐานสำหรับการหาปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ของยางธรรมชาติ อิพอกซิไดซ์ จากการวิเคราะห์ IR....14

2.10 ^{1}H–NMR สเปคตรัมของ ENR–50....15

2.11 ^{13}C–NMR สเปคตรัมของ ENR–20....16

2.12 ค่าคงที่ของการซึมผ่านของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางแต่ละชนิด....18

2.13 กระบวนการผลิต Precipitated Silica....25

2.14 ชนิดของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาสังเคราะห์....26

2.15 โครงสร้างของซิลิกา....27

2.16 การกระจายขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต....31

2.17 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด....31

2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในยางธรรมชาติ....32

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์....39

3.2 เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง....41

3.3 ลำดับการบดผสมยางด้วยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง....41

3.4 รีโอมิเตอร์ (Rheotech Protech, USA.)....42

3.5 เครื่องอัดแบบ (Compression Molding)....42

3.6 เครื่องบดผสมแบบปิด (Kneader)....44

3.7 ขั้นตอนการบดผสมยางกับสารเคมี....44

3.8 ลักษณะหัวกดของการหาความแข็งแบบ Shore A....45

3.9 เครื่องทดสอบหาค่าความแข็งแบบ Shore A....45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.10 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง....46

3.11 เครื่อง Instron testing machine series IX รุ่น 1011....46

3.12 เครื่องทดสอบความทนการฉีกขาด....47

3.13 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ....48

3.14 เครื่องทดสอบการคืนตัว....49

3.15 เครื่อง Ueshima....49

4.1 ตัวอย่าง FT–IR สเปกตรัมของยาง ENR....51

4.2 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ....52

4.3 ปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เกิดภายใต้ภาวะของปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันต่างๆ กัน....52

4.4 ผลของความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน....53

4.5 FT–IR สเปกตรัม ของยาง ENR ที่ได้จากการใช้สูตรที่ 7 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง....55

4.6 เวลาเริ่มคงรูปของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....55

4.7 แสดง active sulphurating agent ที่เกิดขึ้น โดย X คือ สารเร่งวัลคาไนซ์ และ L คือ ligan....56

4.8 เวลาที่ยาง ENR คงรูป ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....56

4.9 เปรียบเทียบเวลาเริ่มคงรูปของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซต่างๆ....57

4.10 เปรียบเทียบเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....57

4.11 เวลาเริ่มเกิดการคงรูปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....58

4.12 เวลาการคงรูปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....59

4.13 ปฏิกิริยาที่ซิลิกาจับตัวกับซิงก์บางส่วนที่มาจากซิงก์ออกไซด์....60

4.14 ความทนแรงดึงของยาง ENR ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน
ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....60

4.15 % retention ของความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....61

4.16 เปรียบเทียบความทนแรงดึง ก่อนบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติ
และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....62

4.17 เปรียบเทียบความทนแรงดึงต่างๆ หลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางธรรมชาติ
และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....63

4.18 ระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน
ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....64

4.19 % retention ของระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....65

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.20 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR ก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....65

4.21 ระยะยืด ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....66

4.22 ความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....66

4.23 ความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติและยาง ENR ก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....67

4.24 ความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติ และยาง ENR หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....68

4.25 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง....69

4.26 ค่า compression set ของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....70

4.27 ค่า compression set ของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....70

4.28 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1....71

4.29 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1....72

4.30 โครงสร้างที่ไม่มีขั้วของยางธรรมชาติ และมีขั้วของยาง ENR....72

4.31 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆในน้ำมัน IRM 903....73

4.32 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยางธรรมชาติ และยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน IRM 903....73

4.33 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1 และ IRM 903....74

4.34 ความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....75

4.35 ระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....76

4.36 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....76

4.37 ความต้านทานการฉีกขาดของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....77

4.38 ความแข็งของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....78

4.39 ค่า compression set ของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ....78

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.40 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1 79

4.41 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในน้ำมัน IRM 903 80

4.42 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ ในน้ำมัน ASTM Oil No.1 และ IRM 903 80

4.43 ปริมาตรที่หายไปของยาง ENR ที่ใส่สารตัวเติมชนิดต่างๆ 81

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 น้ำยางข้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้า....6

2.2 องค์ประกอบของน้ำยางข้นและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางข้น....8

2.3 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ชนิดต่างๆ ที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยางไนไตรล์....17

2.4 ความทนน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ และยางไนไตรล์....18

2.5 เปรียบเทียบยาง ENR ซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์แล้วที่มีซิลิกาและคาร์บอนแบล็ก เป็นสารตัวเติม....19

2.6 สูตรการเตรียมยาง ENR ซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์แล้วที่มีซิลิกาและคาร์บอนแบล็ก เป็นสารตัวเติม....20

2.7 ความต้านทานการลื่นไถลของยางที่ผ่านการวัลาไนซ์แล้ว....20

2.8 การแบ่งโครงสร้างของซิลิกาตามค่า oil absorption....26

2.9 การใช้งานของซิลิกาสังเคราะห์....27

2.10 สมบัติของแคลเซียมคาร์บอเนต....30

2.11 องค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (%) ทางการค้า....30

3.1 สมบัติของน้ำยางข้นชนิด HA....35

3.2 สมบัติยางแท่ง STR XL....36

3.3 สูตรการเตรียมยาง ENR....38

3.4 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางผสมสารเคมี....40

3.5 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางผสมสารตัวเติม....43

4.1 สูตรการเตรียมยาง ENR....51

4.2 โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ของยาง ENR ที่ภาวะต่างๆ....54

4.3 % retention ของความทนแรงดึงของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....61

4.4 % retention ของระยะยืด ณ จุดขาดของยาง ENR ที่ระบบวัลคาไนซ์ต่างๆ....64

ก–1 สูตรการเตรียมยาง ENR....88

ข–1 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ในการทดลองครั้งที่ 1....90

ตาราง หน้า

ข–2 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ในการทดลองครั้งที่ 2.....90

ข–3 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ในการทดลองครั้งที่ 3.....91

ข–4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (CV) ครั้งที่ 1.....91

ข–5 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (CV) ครั้งที่ 2.....92

ข–6 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (CV) ครั้งที่ 3.....92

ข–7 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (semi–EV) ครั้งที่ 1.....93

ข–8 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (semi–EV) ครั้งที่ 2.....93

ข–9 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (semi–EV) ครั้งที่ 3.....94

ข–10 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (EV) ครั้งที่ 1.....94

ข–11 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (EV) ครั้งที่ 2.....95

ข–12 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NR (EV) ครั้งที่ 3.....95

ข–13 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (CV) ครั้งที่ 1.....96

ข–14 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (CV) ครั้งที่ 2.....96

ข–15 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (CV) ครั้งที่ 3.....97

ข–16 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (semi–EV) ครั้งที่ 1.....97

ข–17 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (semi–EV) ครั้งที่ 2.....98

ข–18 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (semi–EV) ครั้งที่ 3.....98

ข–19 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (EV) ครั้งที่ 1.....99

ข–20 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (EV) ครั้งที่ 2.....99

ข–21 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง NR (EV) ครั้งที่ 3.....100

ข–22 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ครั้งที่ 1.....100

ข–23 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ครั้งที่ 2.....101

ตาราง หน้า

ข–24 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ครั้งที่ 3 101
ข–25 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 1 101
ข–26 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 2 102
ข–27 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 3 102
ข–28 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 1 102
ข–29 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 2 103
ข–30 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 3 103
ค–1 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ในการทดลองครั้งที่ 1 104
ค–2 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ในการทดลองครั้งที่ 2 104
ค–3 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ในการทดลองครั้งที่ 3 105
ค–4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (CV) ครั้งที่ 1 105
ค–5 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (CV) ครั้งที่ 2 106
ค–6 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (CV) ครั้งที่ 3 106
ค–7 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (semi–EV) ครั้งที่ 1 107
ค–8 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (semi–EV) ครั้งที่ 2 107
ค–9 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (semi–EV) ครั้งที่ 3 108

ตาราง หน้า

ค–10 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (EV) ครั้งที่ 1.....108
ค–11 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (EV) ครั้งที่ 2.....109
ค–12 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (EV) ครั้งที่ 3.....109
ค–13 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (CV) ครั้งที่ 1.....110
ค–14 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (CV) ครั้งที่ 2.....110
ค–15 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (CV) ครั้งที่ 3.....111
ค–16 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (semi–EV) ครั้งที่ 1.....111
ค–17 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (semi–EV) ครั้งที่ 2.....112
ค–18 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (semi–EV) ครั้งที่ 3.....112
ค–19 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (EV) ครั้งที่ 1.....113
ค–20 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (EV) ครั้งที่ 2.....113
ค–21 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (EV) ครั้งที่ 3.....114
ค–22 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ครั้งที่ 1.....114
ค–23 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ครั้งที่ 2.....114
ค–24 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV ครั้งที่ 3.....115
ค–25 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 1.....115
ค–26 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 2.....115
ค–27 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 3.....116
ค–28 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 1.....116
ค–29 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 2.....116

ตาราง หน้า

ค–30 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีระบบวัลคาไนซ์แบบ CV, semi–EV และ EV โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 3.....117
ง–1 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนตในการทดลองครั้งที่ 1.....118
ง–2 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนตในการทดลองครั้งที่ 2.....118
ง–3 ผลเวลาสคอร์ช (t_{S2}) เวลาการคงรูป (t_{90}) แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตในการทดลองครั้งที่ 3.....119
ง–4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (N330) ครั้งที่ 1.....119
ง–5 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (N330) ครั้งที่ 2.....120
ง–6 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (N330) ครั้งที่ 3.....120
ง–7 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (Hi–sil 255) ครั้งที่ 1.....121
ง–8 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (Hi–sil 255) ครั้งที่ 2.....121
ง–9 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR (Hi–sil 255) ครั้งที่ 3.....122
ง–10 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR ($CaCO_3$) ครั้งที่ 1.....122
ง–11 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR ($CaCO_3$) ครั้งที่ 2.....123
ง–12 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR ($CaCO_3$) ครั้งที่ 3.....123
ง–13 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (N330) ครั้งที่ 1.....124
ง–14 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (N330) ครั้งที่ 2.....124
ง–15 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (N330) ครั้งที่ 3.....125
ง–16 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (Hi–sil 255) ครั้งที่ 1.....125
ง–17 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (Hi–sil 255) ครั้งที่ 2.....126
ง–18 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR (Hi–sil 255) ครั้งที่ 3.....126
ง–19 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR ($CaCO_3$) ครั้งที่ 1.....127
ง–20 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR ($CaCO_3$) ครั้งที่ 2.....127
ง–21 ผลการทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาดของชิ้นทดสอบยาง ENR ($CaCO_3$) ครั้งที่ 3.....128

ตาราง หน้า

ง–22 ผลการทดสอบความแข็งของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต.....128
ง–23 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต ครั้งที่ 1.....129
ง–24 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต ครั้งที่ 2.....129
ง–25 ผลการทดสอบการคืนตัวของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต ครั้งที่ 3.....129
ง–26 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 1....130
ง–27 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1 ครั้งที่ 2....130
ง–28 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้น้ำมัน ASTM oil No. 1ครั้งที่ 3.....131
ง–29 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 1.....131
ง–30 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 2.....131
ง–31 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้น้ำมัน IRM 903 ครั้งที่ 3.....132
ง–32 ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ใส่สารตัวเติม คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา และ แคลเซียมคาร์บอเนต.....132