ความต้านทานน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์

นางสาว จริญญา เยาว์แสง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546
ISBN 974-17-3564-2
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OIL RESISTANCE AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXIDIZED NATURAL RUBBER

Miss Charinya Yaowsang

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2003
ISBN 974-17-3564-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความต้านทานน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์
โดย	นางสาว จริญญา เยาว์แสง
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ

(อาจารย์ รัจนา ศิริสุข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จริญญา เยาว์แสง : ความต้านทานน้ำมันและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (OIL RESISTANCE AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXIDIZED NATURAL RUBBER) อ.ที่ปรึกษา : รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง ; 92 หน้า ISBN 974-17-3564-2

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์จากน้ำยางธรรมชาติประเภทน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง โดยวิธี '*in situ*' epoxidation ด้วยกรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในภาวะที่มีสารลดแรงตึงผิว ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4, 8 และ 12 ชั่วโมง ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่ได้ประกอบด้วยหมู่อิพอกไซด์ 20, 45 และ 65 โมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ ซึ่งให้สัญลักษณ์เป็นยาง ENR 20, ENR 45 และ ENR 65 ตามลำดับ จากการศึกษาด้วยเครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ พบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์สูงกว่ายางธรรมชาติตามปริมาณหมู่อิพอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นโดยมีลำดับดังนี้ ยางธรรมชาติ (-62.4 องศาเซลเซียส), ยาง ENR 20 (-38.2 องศาเซลเซียส), ยางENR 45 (-27.8 องศาเซลเซียส) และ ยางENR 65 (-19.7 องศาเซลเซียส)

เมื่อนำยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ต่างๆกันไปทดลองผสมสารเคมีและเตรียมตัวอย่างทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่า ยาง ENR บวมตัวในน้ำมันน้อยกว่ายางธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด โดยยาง ENR 65 มีความต้านทานน้ำมันใกล้เคียงยางไนไตรล์ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีความต้านทานน้ำมันสูง เนื่องจากโครงสร้างของยาง ENR 65 มีสภาพเป็นขั้วใกล้เคียงกับยางไนไตรล์ นอกจากนี้ ยาง ENR 65 ยังมีค่าความแข็งและความต้านทานโอโซนสูงกว่ายาง ENR ชนิดอื่นๆ อย่างไรก็ตาม ยาง ENR 20 มีค่าความทนแรงดึงและการคืนตัวดีกว่ายาง ENR ชนิดอื่นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์-และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4472226923 : MAJOR APPIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORDS: EPOXIDIZED NATURAL RUBBER (ENR) / GLASS TRANSITION TEMPERATURE / NITRILE RUBBER / OIL RESISTANCE PROPERTIES / SWELLING

CHARINYA YAOWSANG : OIL RESISTANCE AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXIDIZED NATURAL RUBBER. THESIS ADVISOR :ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT , THESIS COADVISOR : NUCHANAT NA-RANONG, Ph.D. 92 pp.ISBN 974-17-3564-2

In this research, epoxidized natural rubber was prepared from high ammonia concentrated natural rubber latex via '*in situ*' epoxidation method with formic acid and hydrogen peroxide in the presence of a surfactant at 50 ^{0}C for 4, 8 and 12 hrs. The obtained ENRs containing 20, 45 and 65 mole percent of the epoxide groups were nominated ENR 20, ENR 45 and ENR 65, respectively. From differential scanning calorimetric studies, they exhibited the glass transition temperatures (T_gs) which were higher than that of natural rubber (-62.4 ^{0}C) at –38.2 ^{0}C for ENR 20, -27.8 ^{0}C for ENR 45 and –19.7 ^{0}C for ENR 65, respectively. It is clearly seen that their T_gs increased as the amount of epoxide groups increased.

Epoxidized natural rubbers with various amount of epoxide groups were compounded and prepared for physical testings. It was found that the swelling of ENRs in oils was substantially less than that of natural rubber. The oil resistance of ENR 65 was comparable to that of nitrile rubber which is one of the oil resistant synthetic rubber due to the polar similarity of both rubbers. Furthermore, ENR 65 showed higher hardness and ozone resistance than other ENRs. Nevertheless, ENR 20 had considerably better tensile strength and compression set than other ENRs.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Materials science Student's signature Charinya Yaowsang

Field of study Applied Polymer Science - and Textile Technology Advisor's signature

Academic year 2003 Co-advisor's signature Nuchanat Na-Ranong

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ญ
สารบัญรูปภาพ.....ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....ฑ

บทที่

1. บทนำ.....1
2. วารสารปริทัศน์.....4
   2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).....4
      2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex).....4
      2.1.2 การรักษาสภาพน้ำยาง.....5
      2.1.3 การผลิตน้ำยางข้น.....5
      2.1.4 องค์ประกอบของน้ำยางข้น.....10
      2.1.5 สมบัติของน้ำยางข้น.....12
   2.2 ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (Epoxidized Natural rubber).....15
   2.3 การหาลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....22
      2.3.1 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy : IR).....22
      2.3.2 ดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry : DSC).....23
   2.4 พารามิเตอร์การคงรูป (Curing Parameter).....24
   2.5 เครื่องวัดการบ่ม (Cure Meters).....25
   2.6 สมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานน้ำมัน.....26
      2.6.1 สมบัติความแข็ง (Hardness properties).....26
      2.6.2 สมบัติด้านการดึง (Tensile properties).....28
      2.6.3 สมบัติการคืนตัว (Compression set properties).....30

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดีโดยได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน อาทิ รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ และให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้อย่างเต็มที่

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกูลกิจ และอาจารย์ บุญศรี คู่สุขธรรม ที่กรุณาจัดหากรดฟอร์มิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

ขอขอบคุณคุณสุทิน ทองคำ เจ้าหน้าที่ฝ่ายโรงงานในสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการการเกษตร ที่ช่วยให้ความรู้และให้คำแนะนำในด้านการบดผสมยางผสมสารเคมีและช่วยบดผสมยางในงานวิจัยครั้งนี้ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงมาด้วยดี รวมทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายโรงงานในสถาบันวิจัยยางทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัยครั้งนี้จนงานสำเร็จมาด้วยดี

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการการเกษตร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยในส่วนการบดผสมยางตลอดจนการทดสอบสมบัติต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย และเจ้าหน้าที่ในสถาบันวิจัยยางทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ อาทิ เครื่องทดสอบรีโอมิเตอร์, เครื่องทดสอบสมบัติความแข็ง และ เครื่องทดสอบสมบัติด้านการดึง เป็นต้น

ขอขอบคุณบริษัท ไทย รับเบอร์ ลาเท็กซ์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงเป็นปริมาณ 60 กิโลกรัม มาใช้ในงานวิจัยโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยและภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่ช่วยเหลือด้านเงินทุนในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการของภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความกรุณาและให้ความร่วมมือในการออกหนังสือราชการที่จำเป็นที่ต้องใช้ในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆทุกคนทั้งในภาควิชาวัสดุศาสตร์, สหสาขาปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ รวมถึงเพื่อนต่างมหาวิทยาลัยที่ช่วยเป็นกำลังใจ ช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนในการศึกษาตลอดทั้งหลักสูตร ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ หากผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขอกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.4 สมบัติความต้านทานโอโซน (Ozone resistance properties).....31
2.6.5 สมบัติความต้านทานน้ำมัน (Oil resistance properties).....33
3. การทดลอง.....34
3.1 วัตถุดิบ.....34
3.2 สารเคมี.....34
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....35
3.4 แนวทางการทดลอง.....36
3.5 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (ENR).....36
3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....37
3.6.1 วิเคราะห์ปริมาณหมู่อิพอกไซด์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (IR).....37
3.6.2 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี (DSC).....38
3.7 การเตรียมยางผสมสารเคมีและการขึ้นรูป.....38
3.8 การทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานน้ำมัน.....42
3.8.1 สมบัติความแข็ง (ASTM D2240).....42
3.8.2 สมบัติด้านการดึง (ASTM D412).....43
3.8.3 สมบัติการคืนตัว (ASTM D395-98).....45
3.8.4 สมบัติความต้านทานโอโซน (ISO 1431).....45
3.8.5 สมบัติความต้านทานน้ำมัน (ASTM D471-79).....46
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....48
4.1 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (ENR).....48
4.1.1 ผลของเวลาต่อการเกิดปฏิกิริยาอิพอกซิเดชัน.....48
4.1.2 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....51
4.2 การหาพฤติกรรมการคงรูปของยางผสมสารเคมี.....53
4.3 สมบัติเชิงกลและสมบัติความต้านทานน้ำมันของยาง.....55
4.3.1 สมบัติความแข็ง (Hardness properties).....55
4.3.2 สมบัติด้านการดึง (Tensile properties).....56
4.3.3 สมบัติการคืนตัว (Compression set properties).....59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4 สมบัติความต้านทานโอโซน (Ozone resistance properties).....59
4.3.5 สมบัติความต้านทานน้ำมัน (Oil resistance properties).....61
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....64
5.1 สรุปผลการทดลอง.....64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....66

รายการอ้างอิง.....67
ภาคผนวก.....70
ภาคผนวก ก.....71
ภาคผนวก ข.....73
ภาคผนวก ค.....77
ภาคผนวก ง.....82
ภาคผนวก จ.....87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....92

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 น้ำยางข้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้า.....9

2.2 องค์ประกอบของน้ำยางข้นและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางข้น.....10

2.3 ปริมาณแอนไอออนโดยเฉลี่ยที่พบในเซรุ่มของน้ำยางข้นที่บ่มแล้ว.....11

2.4 ข้อกำหนดคุณภาพมาตรฐานน้ำยางข้นของ ISO 2004 ที่ผลิตโดยวิธีใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง และทำให้เกิดครีม.....12

2.5 ข้อกำหนดภายใต้มาตรฐาน ISO 2027 สำหรับน้ำยางข้นที่ผลิตด้วยวิธีทำให้น้ำระเหย.....13

2.6 สมบัติของน้ำมันมาตรฐาน (ASTM oils).....33

3.1 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางผสมสารเคมี.....39

4.1 สารเคมีและภาวะที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....48

4.2 ผลการทดสอบความต้านทานโอโซน.....60

ข-1 ผลเวลาสคอร์ช (t_{s1}), เวลาการคงรูป (t_{90}), แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....73

ข-2 ผลเวลาสคอร์ช (t_{s1}), เวลาการคงรูป (t_{90}), แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....74

ข-3 ผลเวลาสคอร์ช (t_{s1}), เวลาการคงรูป (t_{90}), แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....75

ข-4 ผลเวลาสคอร์ช (t_{s1}), เวลาการคงรูป (t_{90}), แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุด (min. and max. torq) ของยาง STR 5L.....76

ค-1 ผลการทดสอบความแข็งของยาง.....77

ค-2 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 20.....77

ค-3 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 45.....78

ค-4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 65.....78

ค-5 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NBR.....79

ค-6 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง STR 5L.....79

ค-7 ผลการทดสอบการคืนตัวของยาง.....80

ค-8 ผลการทดสอบความต้านทานโอโซนของยาง.....80

ค-9 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางโดยใช้น้ำมัน ASTM OIL NO.1.....81

ค-10 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางโดยใช้น้ำมัน IRM 903.....81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ง-1 ผลการทดสอบความแข็งของยาง.....82
ง-2 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 20.....82
ง-3 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 45.....83
ง-4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 65.....83
ง-5 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NBR.....84
ง-6 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง STR 5L.....84
ง-7 ผลการทดสอบการคืนตัวของยาง.....85
ง-8 ผลการทดสอบความต้านทานโอโซนของยาง.....85
ง-9 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางโดยใช้น้ำมัน ASTM OIL NO.1.....86
ง-10 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางโดยใช้น้ำมัน IRM 903.....86
จ-1 ผลการทดสอบความแข็งของยาง.....87
จ-2 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 20.....87
จ-3 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 45.....88
จ-4 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง ENR 65.....88
จ-5 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง NBR.....89
จ-6 ผลการทดสอบสมบัติด้านการดึงของชิ้นทดสอบยาง STR 5L.....89
จ-7 ผลการทดสอบการคืนตัวของยาง.....90
จ-8 ผลการทดสอบความต้านทานโอโซนของยาง.....90
จ-9 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางโดยใช้น้ำมัน ASTM OIL NO.1.....91
จ-10 ผลการทดสอบความต้านทานน้ำมันของยางโดยใช้น้ำมัน IRM 903.....91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 การผลิตน้ำยางข้นชนิด 60 %.....7

2.2 การผลิตน้ำยางข้นโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในโรงงานผลิตน้ำยางข้น.....8

2.3 ผลของอัตราการเกิดแรงเฉือนกับความหนืดของน้ำยางข้นที่อุณหภูมิ 20 ^{0}C.....14

2.4 การกระจายขนาดอนุภาคของน้ำยางข้นวัดโดย photon correlation spectroscopy (MALVERN 4600, การกระเจิง 50 ^{0}).....14

2.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....19

2.6 สเปกตรัม ^{1}H NMR ของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์.....20

2.7 ตัวอย่างกราฟรีโอมิเตอร์การคงรูป.....25

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง IRHD กับค่าอิลาสติกมอดุลัส (log_{10}E).....27

2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shore A, Shore D และ IRHD (ชิ้นทดสอบหนา 10 มม.).....28

2.10 ตัวอย่างกราฟความเค้น-ความเครียดของยาง.....29

2.11 ลักษณะการคืนตัวเมื่อได้รับความเค้นอัดเป็นเวลาช่วงหนึ่ง.....30

2.12 แสดงความหนาของชิ้นทดสอบขณะทดสอบหาค่า compression set.....31

2.13 กลไกของปฏิกิริยาระหว่างยางกับโอโซน (a) โมโลโซไนด์ (b) สวิทเทอร์ไอออนและหมู่คาร์บอนิล (c) โอโซไนด์ที่เสถียร (d) พอลิเมอริกเปอร์ออกไซด์ (e) ไฮโดรเปอร์ออกไซด์.32

3.1 เครื่อง FT-IR สเปกโทรมิเตอร์.....37

3.2 เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC).....38

3.3 เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง รุ่น K11-3FF (3338).....39

3.4 ลำดับการบดผสมยางด้วยเครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง.....40

3.5 รีโอมิเตอร์ (Rheotech, Protech, USA.).....41

3.6 เครื่องอัดแบบ (compression molding).....42

3.7 ลักษณะหัวกดของการหาความแข็งแบบ Shore A.....42

3.8 เครื่องทดสอบหาค่าความแข็งแบบ Shore A.....43

3.9 ชิ้นทดสอบความทนแรงดึง.....44

3.10 เครื่อง Instron Corporation Series IX Automated Materials Testing System 6.05 รุ่น 1011.....44

3.11 เครื่องทดสอบการคืนตัว.....45

3.12 ชิ้นทดสอบที่ถูกยึดด้วยตัวจับของเครื่อง Hampden 703.....46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.13 ตู้อบโอโซน.....46

4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของยาง ENR-A, ENR-B และ ENR-C.....49

4.2 ปริมาณโมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน.....50

4.3 DSC thermogram ของยางธรรมชาติ, ยาง ENR 20, ENR 45 และ ENR 65.....52

4.4 เวลาสคอร์ชของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....53

4.5 เวลาการคงรูป (t_{90}) ของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....54

4.6 ความแข็งของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR ก่อนการบ่มเร่งด้วยความร้อน.....55

4.7 ความแข็งของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน.....56

4.8 ความทนแรงดึงของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR ก่อนบ่มเร่งด้วยความร้อน.....57

4.9 ความทนแรงดึงของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR หลังบ่มเร่งด้วยความร้อน.....57

4.10 ระยะยืด ณ จุดขาดของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR ก่อนบ่มเร่งด้วยความร้อน.....58

4.11 ระยะยืด ณ จุดขาดของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR หลังบ่มเร่งด้วยความร้อน.....58

4.12 ค่า compression set ของยาง STR 5L, ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....59

4.13 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR ในน้ำมัน ASTM Oil No.1.....61

4.14 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR ในน้ำมัน IRM 903.....62

ข-1 กราฟรีโอมิเตอร์ของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....73

ข-2 กราฟรีโอมิเตอร์ของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....74

ข-3 กราฟรีโอมิเตอร์ของยาง ENR 20, ENR 45, ENR 65 และ NBR.....75

ข-4 กราฟรีโอมิเตอร์ของยาง STR 5L.....76

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ENR 20	Epoxidized natural rubber with 20 mol% epoxide
ENR 45	Epoxidized natural rubber with 45 mol% epoxide
ENR 65	Epoxidized natural rubber with 65 mol% epoxide
NBR	Nitrile rubber
STR 5L	Standard Thai Rubber grade 5L
DRC	Dry Rubber Content
TSC	Total Solid Content
HA	High ammonia
LA	Low ammonia
NRS	Non-rubber solid content
MST	Mechanical stability time
KOH No.	Potassium hydroxide number
^{1}H-NMR	Proton nuclear magnetic resonance
T_g	Glass transition temperature
t_c	Cure time
t_s	Scorch time
ZnO	Zinc oxide
PEG 3350	Polyethylene glycol 3350
Wingstay L	Styrenated diphenylamine
CBS	*N* – Cyclohexylbensothiazylsulphenamide
TMTD	Tetramethyl thiuram disulphide
S	Sulfur
M	Mol/L

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย