การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

นายพิชณัฐ รัตนเมธางกูร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6055-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REINFORCEMENT OF NATURAL RUBBER WITH CARDANOL FORMALDEHYDE RESINS PREPARED FROM CASHEW NUT SHELL LIQUID

Mr. Pitchanut Rattanametangkool

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 2004

ISBN 974-17-6055-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์
โดย	นายพิชณัฐ รัตนเมธางกูร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สราวารี)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รัจนา ศิริสุข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิชณัฐ รัตนเมธางกูร : การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยคาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. (REINFORCEMENT OF NATURAL RUBBER WITH CARDANOL FORMALDEHYDE RESINS PREPARED FROM CASHEW NUT SHELL LIQUID) อ. ที่ปรึกษา : รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์, 90 หน้า. ISBN 974-17-6055-8.

งานวิจัยนี้ ยางธรรมชาติได้ถูกเสริมแรงด้วยคาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ที่เตรียมจากน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ โดยคาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินทั้งชนิดโนโวแลก และชนิดรีโซลถูกสังเคราะห์จากคาร์ดานอลที่สกัดได้จากเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ การสังเคราะห์เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นของคาร์ดานอลและฟอร์มัลดีไฮด์ โดยมีกรดและด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุดของรีโซลเรซิน คือ 75.37% โดยการใช้อัตราส่วนโดยโมลของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอลเท่ากับ 2.0 ภายใต้ภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.0 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ผลได้มากที่สุดของโนโวแลกเรซิน คือ 79.68% โดยการใช้อัตราส่วนโดยของฟอร์มัลดีไฮด์/คาร์ดานอลเท่ากับ 0.8 ภายใต้ภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.2 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง และใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี (FT-IR และ ^{13}C NMR) เพื่อหาลักษณะเฉพาะโครงสร้างทางเคมีของคาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินที่เตรียมได้

เมื่อนำเรซินผสมกับยางธรรมชาติ พบว่า สามารถเข้ากันได้ดีที่อัตราส่วนต่างๆ และผลจากการตรวจสอบพฤติกรรมการบ่มของยางผสมรีโซล และโนโวแลกแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีพฤติกรรมการบ่มแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากเรซินทั้งสองชนิดมีความว่องไวทางเคมีที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ การใส่คาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินเข้าไปในยางธรรมชาติทำให้สมบัติเชิงกลได้แก่ ความแข็ง ความทนแรงดึง มอดุลัสที่จุดขาด 100% และ 300 % เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม ระยะที่จุดขาด และการคืนตัวลดลงตามที่ได้คาดไว้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2547

4572416923 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEYWORD : CARDANOL / CARDANOL FORMALDEHYDE RESINS / NATURAL RUBBER

PITCHANUT RATTANAMETANGKOOL : REINFORCEMENT OF NATURAL RUBBER WITH CARDANOL FORMALDEHYDE RESINS PREPARED FROM CASHEW NUT SHELL LIQUID. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 90 pp. ISBN 974-17-6055-8.

In this research, natural rubber was reinforced with cardanol-formaldehyde resins prepared from cashew nut shell liquid. Cardanol-formaldehyde resins both resole and novolak were synthesized from cardanol which extracted from cashew nut shell. These were done via a condensation polymerization of cardanol and formaldehyde in the presence of base and acid catalysts. Cardanol-formaldehyde resin, resole type : CF-resole, with highest yield of 75.37% was prepared by using a molar ratio of 2.0 formaldehyde/cardanol at pH 8.0 and 90°C for 8 hours. Cardanol-formaldehyde resin, novolak type : CF-novolak, with highest yield of 79.68% was prepared by using a molar ratio of 0.8 formaldehyde/cardanol at pH 2.2 with 100°C for 7 hours. Spectroscopic techniques, FT-IR and ^{13}C NMR were employed to characterize the chemical structure of the obtained cardanol-formaldehyde resins.

The resins were found to be compatible with natural rubber in various formulations. The cured behaviors of natural rubber blended with either the CF-resole or CF-novolak was investigated. It was found that the cured behaviors of CF-resole and CF-novolak samples were quite different, reflecting differences in chemical reactivities. Furthermore, the incorporation of cardanol-formaldehyde resins into natural rubber gave significant improvements in mechanical properties such as hardness, tensile strength, modulus at 100% and 300% elongation and abrasion resistance. However, elongation at break and compression set of the blends were decreased as expected.

Department of Materials Science Student's signature P. Rattanametangkool

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

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์ โดยท่านผู้ทรงคุณวุฒิเหล่านี้คือ รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอย่างดียิ่ง ตลอดจนแนะแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นทุกสิ่งทุกอย่างของงานวิจัยนี้ ด้วยความรักและความเคารพ ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณ รศ. ไพพรรณ สันติสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. อรอุษา สรวารี ผศ.ดร. ประณัฐ โพธิยะราช และ ผศ. รัจนา ศิริสุข คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณ หน่วยงานต่าง ๆ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและความช่วยเหลือสำหรับการทำวิจัย ดังรายนามต่อไปนี้

1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นสถานที่หลักในการศึกษาเล่าเรียน และการทำวิจัย ตลอดจนบุคลากรทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลืออำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

2. ดร. นุชนาฏ ณ ระนอง ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้และข้อมูลต่าง ๆ รวมทั้งสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร

3. ศูนย์เครื่องมือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. พี่ ๆ เพื่อน ๆ นิสิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน สำหรับน้ำใจ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่าง ๆ

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้การอุปการะเลี้ยงดูด้วยความรัก ความห่วงใย และความปรารถนาดีที่มีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมและส่วนรวมแล้ว ผู้วิจัยขอมอบความดีทั้งหมด แด่คุณพ่อคุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

2 วารสารปริทัศน์ 3

2.1 ยางธรรมชาติ 3

2.2 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 7

2.3 คาร์บอนแบล็ก 15

2.4 ซิลิกา 19

3 วิธีการวิจัย 24

3.1 ขอบเขตการวิจัย 24

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย 24

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 25

3.4 ขั้นตอนการวิจัย 25

3.4.1 การสังเคราะห์คาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน 27

3.4.2 การผสมเรซินกับยางธรรมชาติและสารเคมีอื่น ๆ 31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 40

4.1 ผลการสังเคราะห์คาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน 40

4.1.1 การสกัดน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ (CNSL) 40

4.1.2 การเตรียมคาร์ดานอลจาก (CNSL) 42

4.1.3 การสังเคราะห์คาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล 45

4.1.4 การสังเคราะห์คาร์ดานอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก 50

4.2 ผลการผสมเรซินกับยางธรรมชาติและสารเคมีอื่น ๆ 55

4.2.1 เวลาที่ยางผสมเริ่มวัลคาไนซ์และเวลาวัลคาไนซ์ 55

4.2.2 ความแข็ง 57

4.2.3 ความทนแรงดึง ระยะยืดที่จุดขาด และมอดุลัส 60

4.2.4 ความต้านทานการสึกหรอ 68

4.2.5 การคืนตัว 70

4.2.6 การกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ 71

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 74

5.1 สรุปผลการทดลอง 74

5.2 ข้อเสนอแนะ 74

รายการอ้างอิง 75

ภาคผนวก 78

ภาคผนวก ก 79

ภาคผนวก ข 83

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 90

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ 5
ตารางที่ 2.2 ชื่อและโครงสร้างของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดต่างๆ 6
ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของ CNSL มาตรฐาน 9
ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบลักษณะคาร์บอนแบล็กชนิดต่างๆ 16
ตารางที่ 2.5 การจำแนกเกรดเขม่าดำตามมาตรฐาน ASTM D 1765 17
ตารางที่ 2.6 การใช้งานของซิลิกาชนิดสังเคราะห์ 23
ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางแท่ง STR XL 31
ตารางที่ 3.2 ชนิดและประมาณสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางสูตรต่าง ๆ 32
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของ (CNSL) 41
ตารางที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของคาร์ดานอล 43
ตารางที่ 4.3 คาร์บอน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของคาร์ดานอล 44
ตารางที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล 46
ตารางที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล [F]/[C] ต่าง ๆ กัน 47
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล 47
ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน 48
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของเรซิน 48
ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กัน 49
ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนของเรซิน 49
ตารางที่ 4.11 หมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ชนิดโนโวแลก 51
ตารางที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อัตราส่วนโดยโมล [F]/[C] ต่าง ๆ กัน 52
ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก 52
ตารางที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้ pH ของปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน 53
ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของเรซิน 53

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์ผลได้ของเรซินที่ใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กัน 54
ตารางที่ 4.17 สมบัติทางความร้อนของเรซิน 54
ตารางที่ 4.18 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเริ่มวัลคาไนซ์ 55
ตารางที่ 4.19 เวลาที่ยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงเกิดวัลคาไนซ์ 56
ตารางที่ 4.20 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน 57
ตารางที่ 4.21 ความแข็งของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน 59
ตารางที่ 4.22 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน 60
ตารางที่ 4.23 ความทนแรงดึงของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน 61
ตารางที่ 4.24 ระยะยืดที่จุดขาดยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงก่อนอบเร่งด้วยความร้อน 62
ตารางที่ 4.25 ระยะยืดที่จุดขาดยางผสมสารตัวเติมเสริมแรงหลังอบเร่งด้วยความร้อน 63
ตารางที่ 4.26 มอดุลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 64
ตารางที่ 4.27 มอดุลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 66
ตารางที่ 4.28 ความต้านทานการสึกหรอของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง 68
ตารางที่ 4.29 การคืนตัวของยางผสมสารตัวเติมเสริมแรง 70

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ไอโซเมอร์ของพอลิไอโซพรีน 3
รูปที่ 2.2 ผลและเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 8
รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบในน้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 9
รูปที่ 2.4 กระบวนการดีคาร์บอซิเลชัน 9
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของรีโซลเรซิน 10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างเมทิลลอลคาร์ดานอลที่เกิดขึ้นได้ 11
รูปที่ 2.7 พันธะเมทิลีน 11
รูปที่ 2.8 พันธะอีเทอร์ 11
รูปที่ 2.9 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในรีโซลเรซิน 12
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของโนโวแลกเรซิน 13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างเชื่อมขวางที่เกิดในโนโวแลกเรซิน 13
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็กที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 16
รูปที่ 2.13 หมู่ฟังก์ชันซิลานอลบนพื้นผิวซิลิกา 19
รูปที่ 2.14 ชนิดของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาสังเคราะห์ 20
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของซิลิกา 20
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย 26
รูปที่ 3.2 เครื่อง BUCHI Rotavapour R-205 27
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์เรซิน 28
รูปที่ 3.4 เครื่องบดชนิดบอลมิลล์ 30
รูปที่ 3.5 เครื่อง Micromereritics Sedigraph 5100 Particle Size Analyser 31
รูปที่ 3.6 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง 33
รูปที่ 3.7 เครื่อง Monsanto Oscillating Disk Rheometer 34
รูปที่ 3.8 เครื่อง Instron Testing Machine 35
รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์สำหรับหาค่าความทนแรงดึง 36
รูปที่ 3.10 เครื่อง Hardness Indicator แบบ Shore A 36
รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ 37
รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบความต้านทานการสึกหรอ 37

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบการคืนตัว 38
รูปที่ 3.14 ชิ้นทดสอบการคืนตัว 38
รูปที่ 3.15 การบ่มเร่งด้วยความร้อนในตู้อบ 39
รูปที่ 4.1 น้ำมันเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ 40
รูปที่ 4.2 FT-IR สเปกตรัมของ CNSL 41
รูปที่ 4.3 คาร์ดานอล 42
รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล 43
รูปที่ 4.5 ^{13}C NMR สเปกตรัมของคาร์ดานอลใน $CDCL_3$ 44
รูปที่ 4.6 คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซลที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบอลมิลล์ 45
รูปที่ 4.7 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดรีโซล 46
รูปที่ 4.8 คาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลกที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบอลมิลล์ 50
รูปที่ 4.9 FT-IR สเปกตรัมของคาร์ดานอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เรซินชนิดโนโวแลก 51
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเริ่มวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง 55
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาวัลคาไนซ์กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง 57
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง
ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 58
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง
หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 59
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง
ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 60
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง
หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 61
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดที่จุดขาดกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง
ก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 62
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดที่จุดขาดกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง
หลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 64

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 65
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงก่อนผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 65
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 100% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 67
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสที่ระยะยืด 300% กับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงหลังผ่านการอบเร่งด้วยความร้อน 67
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการฉีกหรอกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง 69
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการคืนตัวกับปริมาณสารตัวเติมเสริมแรง 70
รูปที่ 4.24 การกระจายตัวของสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ 73

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย