ยางธรรมชาติเติมแต่งด้วยสารหน่วงไฟที่ปราศจากฮาโลเจน

นายชัยณัฐ เจตน์จรุงวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NATURAL RUBBER FILLED WITH HALOGEN-FREE FLAME RETARDANTS

Mr. Chainut Jatejarungwong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

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

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

501707

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ยางธรรมชาติเติมแต่งด้วยสารหน่วงไฟที่ปราศจากฮาโลเจน
โดย	นายชัยณัฐ เจตน์จรุงวงศ์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

ชัยณัฐ เจตน์จรุงวงศ์ : ยางธรรมชาติเติมแต่งด้วยสารหน่วงไฟที่ปราศจากฮาโลเจน. (NATURAL RUBBER FILLED WITH HALOGEN-FREE FLAME RETARDANTS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา, 136 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงไฟของสารหน่วงไฟที่ปราศจากฮาโลเจนเมื่อนำมาใช้ในยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบสารหน่วงไฟสองชนิดได้แก่อะลูมิเนียม-ไฮดรอกไซด์และซิงก์บอเรต และศึกษาประสิทธิภาพของการหน่วงไฟเมื่อใช้ร่วมกับสารตัวเติมได้แก่เขม่าดำ มอนต์มอริลโลไนต์ และซิลิกา ชิ้นงานยางคงรูปถูกเตรียมจากน้ำยางธรรมชาติซึ่งผสมกับสารตัวเติมและสารหน่วงไฟในอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อแบบก่อนตัดเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบหาค่า Limiting Oxygen Index (LOI) ศึกษาพฤติกรรมและอัตราการลามไฟแนว 45 องศา วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิสและการวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก รวมทั้งทดสอบสมบัติด้านแรงดึง จากผลการทดลองพบว่าไม่สามารถเตรียมชิ้นงานที่มีปริมาณสารตัวเติมรวมกับสารหน่วงไฟมากกว่า 10 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน เพราะสารตัวเติมและสารหน่วงไฟตกตะกอนออกมาระหว่างการเตรียมชิ้นงาน โดยชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้สารหน่วงไฟและสารตัวเติมมีค่า LOI เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อศึกษาพฤติกรรมการติดไฟและอัตราการลามไฟพบว่าสารตัวเติมสามารถช่วยหน่วงไฟได้เล็กน้อย แต่ส่วนสารหน่วงไฟเมื่อใช้ร่วมกับสารตัวเติมสามารถทำให้เกิดการหน่วงไฟที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาประกอบกับสมบัติด้านความต้านแรงดึงของชิ้นงานและราคาของสารหน่วงไฟ พบว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการนำไปพัฒนาเพื่อใช้งานต่อไป นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติและประสิทธิภาพการหน่วงไฟภายหลังการบ่มเร่งไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ภาควิชาวัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2550 ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4872582623 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD : NATURAL RUBBER / FLAME RETARDANT / HALOGEN-FREE

CHAINUT JATEJARUNGWONG : NATURAL RUBBER FILLED WITH HALOGEN-FREE FLAME RETARDANTS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ THESIS COADVISOR : ASST. PROF. SIREERAT CHARUCHINDA, 136 pp.

The aim of this research is to study the flame retardancy efficiency of halogen-free flame retardants, i.e. aluminium hydroxide and zinc borate, in natural rubber. The flame retardancy efficiency when using fillers, which are carbon black, montmorillonite and silica, was also investigated. The vulcanized rubber samples were prepared from natural rubber latex with various ratios of fillers and flame retardants. The casted rubbers were cut into test specimens. It was found that it was not possible to prepare the specimens when the fillers and flame retardants were over 10 part per hundred rubbers as these additives were precipitated. Limiting oxygen index (LOI), burning behavior and 45 degree flame spread rate (FR) were studied. Thermal properties, namely degradation temperature and glass transition temperature were revealed by thermogravimetric analysis and dynamic mechanical analysis techniques, respectively. Tensile properties were also examined. Although the LOI of specimens filled with the fillers and flame retardants slightly increased, the burning behavior and FR was improved to some extent when the fillers were used and was improved considerably when the flame retardants were applied in the presence of fillers. When taking the tensile properties and also cost of flame retardants into account, it was found that aluminium hydroxide was optimally suitable for further development. In addition, it was found that flame retandancy efficiency and other properties were insignificantly altered after ageing.

Department of Materials Science
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology
Academic year 2007

Student's signature Chainut Jatejarungwong
Advisor's signature Pranut Potiyaraj
Co-advisor's signature Sireerat Charuchinda

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัตถุดิบและสถานที่สำหรับทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ อย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี และอาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ(ภาษาไทย)..... ง

บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. วารสารปริทรรศน์..... 3

2.1 น้ำยางธรรมชาติ..... 3

2.1.1 สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ..... 3

2.1.1.1 ส่วนของวัฏภาค (Rubber Phase)..... 3

2.1.1.2 ส่วนที่เป็นของเหลว (Aqueous Phase)..... 4

2.1.1.3 ส่วนลูทอยด์ (Lutoid) และสารอื่นๆ..... 5

2.2 น้ำยางข้น..... 6

2.2.1 การผลิตน้ำยางข้น..... 6

2.2.1.1 วิธีการระเหยน้ำ..... 6

2.2.1.2 วิธีทำให้เกิดครีม..... 7

2.2.1.3 วิธีการปั่น..... 7

2.2.1.4 วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า..... 8

2.2.2 การรักษาสภาพน้ำยางข้น..... 9

2.2.3 สมบัติน้ำยางข้น..... 9

2.3 วัตถุดิบและสารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางคงรูป..... 10

2.3.1 น้ำยางข้น (concentration latex)..... 10

2.3.2 สารเคมีที่เป็นส่วนผสม..... 10

2.3.2.1 สารเพิ่มความคงตัว (Stabilizer)..... 10

2.3.2.2 สารในระบบการคงรูป (Vulcanizing System)..... 10
2.3.2.3 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)..... 11
2.4 การผสมสารเคมีกับน้ำยาง..... 12
2.5 สารตัวเติม (Filler) 14
2.5.1 การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต..... 14
2.5.2 การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ..... 15
2.5.2.1 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated Filler)..... 15
2.5.2.2 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous Filler)..... 15
2.5.2.3 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous Filler)..... 16
2.6 เขม่าดำ (Carbon Black) 16
2.6.1 สมบัติของเขม่าดำ..... 17
2.6.2 อิทธิพลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางคงรูป..... 18
2.7 ซิลิกา (Silica)..... 19
2.8 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)..... 20
2.8.1 ดินเบนโตไนท์..... 23
2.8.2 แร่มอนต์มอริลโลไนต์..... 23
2.9 สารหน่วงไฟ 26
2.9.1 สารหน่วงไฟที่จำแนกได้จากวิธีการที่ใช้ร่วมกับวัสดุ..... 26
2.9.1.1 สารหน่วงไฟเชิงเติม 26
2.9.1.2 สารหน่วงไฟเชิงปฏิกิริยา..... 27
2.9.2 สารหน่วงไฟที่จำแนกจากกลไกการหน่วงไฟ..... 27
2.9.2.1 การขัดขวางทางกายภาพ..... 27
2.9.2.2 การขัดขวางทางเคมี..... 28
2.9.3 สารหน่วงไฟจำแนกจากองค์ประกอบทางเคมี..... 29
2.9.3.1 สารหน่วงไฟประเภทโลหะไฮดรอกไซด์..... 29
2.9.3.2 สารหน่วงไฟประเภทบอเรต..... 30
2.9.3.3 สารหน่วงไฟประเภทที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ..... 30
2.9.3.4 สารหน่วงไฟประเภทที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ..... 32
2.9.3.5 สารหน่วงไฟประเภทที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ..... 33

3. วิธีการทดลอง..... 34
3.1 วัตถุดิบและสารเคมี..... 34
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 36
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน..... 36
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ..... 36
3.3 วิธีการทดลอง..... 37
3.3.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับผสมกับน้ำยางธรรมชาติให้อยู่ในลักษณะดิสเพอร์ชัน..... 38
3.3.2 การผสมน้ำยางและการเตรียมชิ้นงาน..... 39
3.3.3 การวิเคราะห์และทดสอบ..... 40
3.3.3.1 การตรวจสอบพฤติกรรมการลุกติดไฟและอัตราการลามไฟ.. 40
3.3.3.2 การทดสอบหาค่า Limiting Oxygen Index..... 41
3.3.3.3 การทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัว..... 42
3.3.3.4 การทดสอบหาอุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน..... 43
3.3.3.5 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง..... 43
3.3.4 การบ่มเร่ง (Ageing)..... 44

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 45
4.1 ชิ้นงานยางธรรมชาติที่เตรียมได้..... 45
4.2 Limiting Oxygen Index..... 46
4.3 พฤติกรรมการติดไฟและการลามไฟ..... 49
4.4 อุณหภูมิการสลายตัว..... 59
4.5 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน..... 67
4.6 สมบัติด้านแรงดึง..... 74

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 81
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 81
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 82

รายการอ้างอิง..... 83
ภาคผนวก..... 86

ภาคผนวก ก..... 87
ภาคผนวก ข..... 88
ภาคผนวก ค..... 89
ภาคผนวก ง..... 109
ภาคผนวก จ..... 130
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 136

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	3
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบของเนื้อยาง	4
ตารางที่ 2.3	สมบัติของอนุภาคดินเหนียวพวกซิลิเกต	21
ตารางที่ 3.1	สมบัติของน้ำยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย	34
ตารางที่ 3.2	สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ผสมกับน้ำยางธรรมชาติ	35
ตารางที่ 3.3	ปริมาณสารต่างๆ ที่ใช้เตรียมสารเติมแต่งให้อยู่ในรูปดิสเพอร์ชัน 50% โดยน้ำหนัก	38
ตารางที่ 3.4	ปริมาณสารต่างๆ ที่ใช้เตรียมสารเติมแต่งให้อยู่ในรูปดิสเพอร์ชัน 10% โดยน้ำหนัก	39
ตารางที่ 3.5	อัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการผสมยางเพื่อให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้	39
ตารางที่ 3.6	อัตราส่วนของสารหน่วงไฟที่ใช้สำหรับชิ้นงานยางธรรมชาติสูตรต่างๆ และการให้รหัสในแต่ละสูตร	40
ตารางที่ 4.1	อุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุด การสูญเสียน้ำหนักและปริมาณสิ่งที่เหลืออยู่ของยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟในอัตราส่วนต่างๆ ก่อนการบ่มเร่ง	65
ตารางที่ 4.2	อุณหภูมิการสลายตัว อุณหภูมิที่มีการสลายตัวมากที่สุด การสูญเสียน้ำหนักและปริมาณสิ่งที่เหลืออยู่ของยางธรรมชาติที่เติมแต่งสารหน่วงไฟในอัตราส่วนต่างๆ หลังการบ่มเร่ง	66

สารบัญภาพ

รูปประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	ภาพหน้าตัดตามยาวภายในของเครื่องปั่นน้ำยางข้น	8
รูปที่ 2.2	ก)หน่วยแผ่นซิลิการูปเททระฮีดรอน(silica tetrahedron) ข)สัญลักษณ์เทียบเท่า	21
รูปที่ 2.3	ก)อะลูมินารูปออกตะฮีดรอน (alumina octahedron) ข)สัญลักษณ์เทียบเท่า	21
รูปที่ 2.4	โครงสร้างผลึกของแร่มอนต์มอริลโลไนต์	22
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์	24
รูปที่ 2.6	การยึดติดกันระหว่างชั้นของเคลย์กับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของเคลย์	24
รูปที่ 2.7	ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างแคทไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นของดินกับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน	25
รูปที่ 2.8	ชนิดของออร์กาโนเคลย์	26
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนในการทดลอง	37
รูปที่ 3.2	เครื่องบดแบบใช้ลูกบด	38
รูปที่ 3.3	เครื่องทดสอบ Atlas 45° automatic flammability tester	41
รูปที่ 3.4	เครื่องทดสอบหาค่า limiting oxygen index	42
รูปที่ 3.5	เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์	42
รูปที่ 3.6	เครื่องวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก	43
รูปที่ 3.7	ขนาดส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน	44
รูปที่ 3.8	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์ซัล	44
รูปที่ 4.1	ลักษณะของชิ้นงานที่มีสารตัวเติมแยกตัวออกมา	45
รูปที่ 4.2	ลักษณะของชิ้นงานที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ	46
รูปที่ 4.3	ค่า LOI ของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้และใช้สารตัวเติม/สารหน่วงไฟ	47
รูปที่ 4.4	การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง	50
รูปที่ 4.5	การลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง	53
รูปที่ 4.6	อัตราการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง	56
รูปที่ 4.7	อัตราการลามไฟบนชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง	57
รูปที่ 4.8	ลักษณะของชิ้นงานยางธรรมชาติที่หลอมเหลวและหยดลงบนวัสดุที่ติดไฟง่าย	58
รูปที่ 4.9	บริเวณของพื้นวัสดุติดไฟง่ายที่เผาไหม้เนื่องจากชิ้นงานที่หลอมเหลวหยดลงใส	59
รูปที่ 4.10	TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง	60

รูปที่ 4.11 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 60
รูปที่ 4.12 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 61
รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 61
รูปที่ 4.14 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 62
รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 62
รูปที่ 4.16 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 63
รูปที่ 4.17 TGA เทอร์โมแกรมแสดงการสลายตัวของยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 63
รูปที่ 4.18 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้สารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 68
รูปที่ 4.19 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ไม่ใช้สารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 68
รูปที่ 4.20 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 69
รูปที่ 4.21 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 69
รูปที่ 4.22 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 70
รูปที่ 4.23 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 70
รูปที่ 4.24 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมก่อนการบ่มเร่ง..... 71
รูปที่ 4.25 DMA เทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมหลังการบ่มเร่ง..... 71
รูปที่ 4.26 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง..... 72

รูปที่ 4.27 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของชิ้นงานยางธรรมชาติการหลังบ่มเร่ง..... 73
รูปที่ 4.28 ความต้านแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง..... 75
รูปที่ 4.29 ความต้านแรงดึงของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง..... 76
รูปที่ 4.30 ระยะยืดที่จุดขาดของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง..... 77
รูปที่ 4.31 ระยะยืดที่จุดขาดของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง..... 78
รูปที่ 4.32 มอดุลัสที่ระยะยืด 300%ของชิ้นงานยางธรรมชาติก่อนการบ่มเร่ง..... 79
รูปที่ 4.33 มอดุลัสที่ระยะยืด 300%ของชิ้นงานยางธรรมชาติหลังการบ่มเร่ง..... 80