การประยุกต์ใช้ผงยางนาโนในการผลิตผ้าเบรกรถยนต์

นางสาวอมราพร รัตนมาลากุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4 8 7 0 5 5 9 9 2 1

APPLICATION OF NANORUBBER PARTICLES IN THE PRODUCTION OF AUTOMOTIVE BRAKE PADS

Miss Amaraporn Rattanamalakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

502085

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ผงยางนาโนในการผลิตผ้าเบรกรถยนต์
โดย	นางสาวอมราพร รัตนมาลากุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา จงวิศาล)

.....กรรมการ
(ดร. เรืองศักดิ์ ฐิติรัตน์สกุล)

อมราพร รัตนมาลากุล : การประยุกต์ใช้ผงยางนาโนในการผลิตผ้าเบรกรถยนต์. (APPLICATION OF NANORUBBER PARTICLES IN THE PRODUCTION OF AUTOMOTIVE BRAKE PADS) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช, 104 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของยางไนไตร์ล บิวตะไดอีน (Nitrile Butadiene Rubber, NBR) อนุภาคขนาดนาโนในปริมาณต่างๆต่อสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพของผ้าเบรกรถยนต์ เปรียบเทียบกับการใช้ยาง NBR อนุภาคขนาดไมโครที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกรถยนต์ งานวิจัยเน้นการศึกษาผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโนปริมาณ 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2% โดยน้ำหนัก เทียบกับผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR ไมโครในปริมาณเดียวกัน ผลงานวิจัยพบว่า ผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโน มีสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งดีขึ้น ส่วนการทนต่อแรงกระแทก ระดับความพรุน ระดับแรงเสียดทาน ดีขึ้นเล็กน้อย อีกทั้งมีการทนต่อความร้อนดีกว่า การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของยาง NBR นาโนในเนื้อผ้าเบรก ทำให้ผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโน นิ่มกว่า แต่สึกเร็วกว่า และมากกว่าผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR ไมโคร และระดับการต้านแรงเฉือนลดลง การวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณยาง NBR ทั้งขนาดไมโครและนาโนที่ใส่ในผ้าเบรก พบว่าปริมาณยางมีผลต่อ ค่าความแข็ง ความถ่วงจำเพาะ การต้านทานแรงเฉือน ระดับความพรุน และการทนต่อแรงกระแทกของผ้าเบรกยาง NBR เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่การเพิ่มปริมาณยาง NBR ในผ้าเบรก ทำให้ผ้าเบรกนิ่มขึ้น ส่งผลให้ผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR ไมโครและนาโน มีอัตราการสึกเร็วขึ้น และมีการสึกมากขึ้น ผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR ไมโคร 1.4%, 1.6% และ 1.8% มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเสถียรที่ในช่วงอุณหภูมิ 250 - 350°C ปริมาณการสึกน้อยและมีอัตราการสึกต่ำ โดยเฉพาะผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR ไมโคร 1.6% เกิดการสึกน้อยที่สุด ผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโน 2.0% มีระดับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเสถียรที่อุณหภูมิสูง พร้อมทั้งมีอัตราการสึกและปริมาณการสึกน้อยที่สุด พิจารณาโดยรวมผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโน 2.0% มีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด และมีต้นทุนของวัตถุดิบถูกกว่าผ้าเบรกยางไมโคร 2.2% ที่ผลิตอยู่ราว 8.4%

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต อมราพร รัตนมาลากุล

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช

ปีการศึกษา 2550

4870559921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: NANO NBR/ NITRILE BUTADIENE RUBBER / AUTOMOTIVE BRAKE PADS / COEFFICIENT OF FRICTION

AMARAPORN RATTANAMALAKUL : APPLICATION OF NANORUBBER PARTICLES IN THE PRODUCTION OF AUTOMOTIVE BRAKE PADS. THESIS ADVISOR : SIRIJUTARATANA COVAVISARUCH, PH.D., 104 pp.

This research aims to compare the effects of nano-scaled and micro-scaled nitrile butadiene rubber (NBR) on the mechanical and physical properties of automotive brake pads. The concentration of both type of NBR were varied at 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 and 2.2%. The flexural properties of the brake pads with nano NBR were clearly improved while the impact strength, porosity, coefficient of friction and resistance to thermal degradation were also improved but only slightly. Microscopic observation revealed better dispersion of nano NBR in the phenolic binder. The brake pads with nano NBR were softer, easier to shear than those with micro NBR, making them more susceptible to ware. This was evident in both the ware rate, the amount of ware and lower shear strength found in the brake pads with nano NBR. The variation in the amount of both types of NBR over the ranges studied changed the hardness, specific gravity, shear strength, porosity and the impact strength only minutely. However, an increase in the ware rate was apparent when the concentration of micro and nano NBR was raised. The brake pads with 1.4 to 1.8% micro NBR possessed greater coefficient of friction at high temperature range of 250 to 350°C and rather low ware rate. Minimum ware was found in the brake pads with 1.6% micro NBR. Among the nano NBR brake pads, the 2.0% NBR exhibited minimum ware with best overall mechanical and physical properties. Cost analysis revealed the 2.0% nano NBR brake pads to have less raw material cost than the 2.2% micro NBR formulation generally found in commercial brake pad by 8.4%.

Department Chemical Engineer Student's signature Amaraporn Rattanamalaku
Field of study Chemical Engineering Advisor's signature S. Covavisaruch .
Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ก็ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์งานวิจัยจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และ ผศ.ดร.วิจิตรา จงวิศาล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับคำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณ ดร.เรืองศักดิ์ ฐิติรัตน์สกุล สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย สำหรับคำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและการดูแลการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณเพื่อนๆและน้องๆทุกคนที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้อย่างสม่ำเสมอ ขอขอบคุณ คุณภารัต ดิศวรรณี ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำเนิดและเลี้ยงดูสั่งสอนจนมีวันนี้ รวมถึงน้องสาวที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

ขอขอบคุณบริษัท ASIA COMPACT จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการผลิตผ้าเบรกเพื่อการทดสอบสมบัติต่างๆในงานวิจัยนี้ บริษัท SIAM EXTEK จำกัด ที่เอื้อเฟื้อยางนาโนสำหรับการทดสอบ

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 4

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 แนวคิดและทฤษฎี 7

2.1.1 ยาง 7

2.1.2 วัสดุเสียดทาน 8

2.1.3 องค์ประกอบผ้าเบรกผ้าเบรก 8

2.1.4 ฟีนอลิกเรซิน 12

2.1.5 กระบวนการผลิตผ้าเบรก 14

2.1.6 ผ้าเบรก 15

2.1.7 ประเภทของผ้าเบรก 16

2.2 การศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของผ้าเบรก 19

2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ 19

i. การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 19

ii. การทดสอบความแข็ง 20

iii. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ 21

iv. การทดสอบความพรุน 21

2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล 23

i. การทดสอบการต้านแรงเฉือน 23

บทที่ หน้า

ii. การทดสอบทนต่อแรงกระแทก 23

iii. การทดสอบการทนต่อการดัดโค้ง 25

2.2.3 การศึกษาการเสื่อมสลายเมื่อร้อน โดยเทคนิค Thermogravimetric analysis 26

2.2.4 การศึกษาโครงสร้างของผ้าเบรกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 27

i. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 27

ii หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตอนแบบส่องกราด 28

iii. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 29

iv. การวิเคราะห์สำหรับเครื่อง SEM 29

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31

3 วิธีดำเนินการวิจัย 38

3.1 วัตถุดิบในการผลิตผ้าเบรก 38

3.1.1 ผงยางไนไตรล์บิวตะไดอีน 38

3.1.2 สารเติมแต่งและองค์ประกอบอื่นๆ 38

3.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบผ้าเบรก 39

3.2.1 การผสมองค์ประกอบต่างๆ ของผ้าเบรก 39

3.2.2 การอัดขึ้นรูปเย็น 40

3.2.3 การอัดขึ้นรูปร้อน 41

3.2.4 การบ่ม 41

3.2.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบจากผ้าเบรก 42

3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ 43

3.3.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการทดสอบอัตราการสึก 43

3.3.2 การทดสอบความแข็ง 45

3.3.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ 45

3.3.4 การทดสอบความพรุน 46

3.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล 47

3.4.1 การทดสอบการต้านแรงเฉือน 47

3.4.2 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก 47

บทที่ หน้า

3.4 การทดสอบการทนต่อการดัดโค้ง 48
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน 49
3.6 การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 49
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 51
4.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 51
4.2 การทดสอบความแข็ง 73
4.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ 74
4.4 การทดสอบความพรุน 75
4.5 อัตราการสึกและการสึก 77
4.6 การต้านแรงเฉือน 81
4.7 การทนต่อแรงกระแทก 82
4.8 สมบัติการทนต่อการดัดโค้ง 84
4.9 อุณหภูมิการเสื่อมสลายโดยเทคนิค Thermogravimetric Analysis 86
4.10 การศึกษาโครงสร้างผ้าเบรกในระดับจุลภาค 94
4.11 สรุปการเปลี่ยนแปลงของผ้าเบรกหลังการปรับปรุงด้วยผงยาง NBR อนุภาคขนาดนาโน 99
4.12 การประเมินราคาต้นทุนของผ้าเบรกยาง NBR 101
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 102
5.1 สรุปผลการวิจัย 102
5.2 ข้อเสนอแนะ 104
รายการอ้างอิง 105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 121

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1.1 แสดงยอดการผลิตรถยนต์ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2550 2

3.1 ขนาดชิ้นงานทดสอบ 42

4.1 สมบัติที่เปลี่ยนไปของผ้าเบรกภายหลังการเติมยาง NBR ทั้งขนาดไมโครและนาโน 99

4.2 สรุปคุณสมบัติและประสิทธิภาพของผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR ไมโครและนาโนปริมาณยางต่างๆ 100

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

1.1 แสดงยอดการผลิตรถยนต์ในประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542-2550 3

2.1 สูตรโครงสร้างของยาง NBR 7

2.2 ภาพขยายของพื้นผิวผ้าเบรก แสดงลักษณะของอนุภาค ที่เป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ถูกยึดให้อยู่ด้วยกันด้วยเรซิน 8

2.3 เส้นใยหิน 10

2.4 เส้นใยต่างๆ ที่นำมาใช้แทนใยหิน 10

2.5 ลักษณะของอนุภาคผงขัด ที่มีความคม เพื่อช่วยในด้านประสิทธิภาพของการหยุดแบบ “กัด” 11

2.6 โครงสร้างผลึกที่เป็นชั้นของ (ก) กราไฟต์ และ (ข) โมลิบดินัมไดซัลไฟด์ ซึ่งสารทั้งชนิดเป็นของแข็งที่มี สมบัติการหล่อลื่นที่ดี 12

2.7 ปฏิกิริยาการเกิดฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน 12

2.8 ปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮกซะมีน 13

2.9 แผนผังกระบวนการทั่วไปในการผลิตวัสดุเสียดทาน ชนิดดิสก์เบรก 14

2.10 การแบ่งผ้าเบรกตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตในตลาดค้าปลีกผ้าเบรกของประเทศไทย ซึ่งยังมีการใช้ผ้าเบรกแบบมีใยหินอยู่ 17

2.11 การแบ่งผ้าเบรกตามการใช้งาน 18

2.12 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุพอลิเมอร์ 19

2.13 แบบจำลองการทดสอบความแข็งแบบรอคเวลล์ 21

2.14 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod 24

2.15 การทดสอบการทนต่อการดัดโค้ง 26

2.16 แบบจำลองการทำงานของ TGA 27

2.17 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด 28

2.18 ภาพที่ได้จากสัญญาณ secondary electron 29

2.19 การแสดงภาพที่ได้จากสัญญาณ backscattered electron 30

3.1 ผงยางไนไตรล์บิวตะไดอีน 38

3.2 การผสมองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง 40

3.3 การขึ้นรูปเย็น 40

3.4 การขึ้นรูปร้อน 41

3.5 การบ่มชิ้นงานในตู้อบ 41

ภาพประกอบ หน้า

3.6 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 44
3.7 ตำแหน่งการวัดค่าความแข็งบนชิ้นงานทดสอบ 45
3.8 การทดสอบความพรุน แสดงการแช่ชิ้นงานทดสอบ
ในน้ำมันซึ่งควบคุมอุณหภูมิในอ่างน้ำร้อน 46
3.9 การทดสอบการต้านแรงเฉือน 47
3.10 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก 48
3.11 การทดสอบการทนต่อการดัดโค้งแบบ 3 จุด 48
3.12 เครื่องทดสอบการเสื่อมสลายโดยเทคนิค TGA 49
3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 50
3.14 การเคลือบตัวอย่างทดสอบด้วยทองคำ 50
4.1 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ไม่มียาง ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 57
4.2 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 58
4.3 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.4% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 59
4.4 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.6% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 60
4.5 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.8% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 61
4.6 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 2.0% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 62
4.7 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 2.2% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 63
4.8 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.2% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 64
4.9 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.4% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 65
4.10 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.6% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 66
4.11 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.8% โดยน้ำหนัก
ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 67

ภาพประกอบ หน้า

4.12 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 2.0% โดยน้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 68
4.13 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 2.2% โดยน้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ 69
4.14 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยางไมโคร ที่ปริมาณต่างๆ 71
4.15 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยางนาโน ที่ปริมาณต่างๆ 72
4.16 ความแข็งของผ้าเบรกที่มีปริมาณยาง NBR ไมโครและนาโนที่ปริมาณต่างๆ 73
4.17 ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่มียาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ 75
4.18 ความพรุนของผ้าเบรกที่มียาง NBR ไมโครและนาโนที่ปริมาณต่างๆ 76
4.19 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่ผสมด้วยยางไมโครที่ปริมาณต่าง ๆ 78
4.20 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่ผสมด้วยยางนาโนที่ปริมาณต่าง ๆ 79
4.21 ปริมาณการสึกของผ้าเบรกโดยดูจากความหนาที่หายไปของผ้าเบรก ยางไมโคร และยางนาโนที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังการทดสอบสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานและอัตราการสึก 80
4.22 การทนต่อแรงเฉือนของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร และนาโนที่ปริมาณต่างๆ 82
4.23 การทนต่อแรงกระแทกของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร และ นาโน ที่ปริมาณต่างๆ 83
4.24 การทนต่อการดัดโค้งของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและนาโนที่ปริมาณต่างๆ 85
4.25 การเสื่อมสลายของยาง NBR อนุภาคขนาดไมโคร และนาโน 90
4.26 การเสื่อมสลายขององค์ประกอบบางชนิดในผ้าเบรก 91
4.27 การเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและนาโนที่ปริมาณต่างๆ เทียบกับยาง NBR ไมโครและนาโน และองค์ประกอบอื่นๆ 92
4.28 การเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและยางนาโนที่ปริมาณต่างๆ 93
4.29 ลักษณะขององค์ประกอบที่เป็นโลหะที่เติมลงในผ้าเบรก 94
4.30 ลักษณะขององค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นเส้นใยในผ้าเบรก 95
4.31 ลักษณะของสารตัวเติมที่เติมในผ้าเบรก 95

ภาพประกอบ หน้า

4.32 ลักษณะขององค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในผ้าเบรก 96
4.33 ลักษณะขององค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นผงขัด 96
4.34 ลักษณะของ Carbon black 96
4.35 ลักษณะของฟีนอลิกเรซิน 97
4.36 ลักษณะของอนุภาคยาง NBR 97
4.37 โครงสร้างของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 97
4.38 โครงสร้างของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 98
4.39 การเปรียบเทียบต้นทุนของผ้าเบรกยาง NBR ที่ปริมาณยางต่างๆ 101