พอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์

นางสาวนิภาพรรณ โสตถิยานนท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1669-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLYMER BLENDS OF EPOXY RESIN AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER

Miss Niphaphun Soatthiyanon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2004
ISBN 974-53-1669-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์
โดย	นางสาว นิภาพรรณ โสตถิยานนท์
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 สรววารี)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิภาพรรณ โสตถิยานนท์ : พอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์. (POLYMER BLENDS OF EPOXY RESIN AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER) อ. ที่ปรึกษา : รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์, 115 หน้า. ISBN 974-53-1669-5

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินและยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (ENR) ซึ่งยาง ENR ถูกเตรียมจากน้ำยางข้นธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูงด้วยวิธี '*in situ*' epoxidation โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กรดฟอร์มิก และสารลดแรงตึงผิวปริมาณต่างๆ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 6 8 10 14 และ 16 ชั่วโมง จาก FT-IR สเปกตรัมแสดงให้เห็นว่ายาง ENR ที่เตรียมได้มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 25 40 50 60 70 และ 80 โมลเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเรียกว่ายาง ENR 25 ENR 40 ENR 50 ENR 60 ENR 70 และ ENR 80 ตามลำดับ ปริมาณยาง ENR ในพอลิเมอร์ผสม คือ 2 5 7 และ 10 ส่วนต่ออิพอกซีเรซิน 100 ส่วน ซึ่งภายหลังการบ่ม พอลิเมอร์ผสมได้ถูกนำไปตรวจสอบสมบัติเชิงกล พฤติกรรมทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า อิพอกซีเรซินที่ผสมกับยาง ENR 40 ในปริมาณ 2 ส่วน มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากหมู่อิพอกไซด์มีความแข็งตึง ส่วนความทนแรงดึงและยังส์มอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณหมู่อิพอกไซด์ในยาง ENR เพิ่มขึ้น รวมทั้งปริมาณยาง ENR ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณยาง ENR ในพอลิเมอร์ผสมไม่เกิน 5 ส่วน นอกจากนี้ ความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมเกือบทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าอิพอกซีเรซิน

พื้นผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบได้ถูกนำไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM พบว่ายาง ENR มีลักษณะเป็นเม็ดกลมที่สามารถกระจายตัวได้ดีในอิพอกซีเมทริกซ์ จึงทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงกระแทกสูงขึ้น จากการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค TGA และ DSC พบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวและอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 351-364 องศาเซลเซียส และ 51-63 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต นิภาพรรณ โสตถิยานนท์
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์
ปีการศึกษา 2547

4672307223 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD : EPOXY RESIN/ EPOXIDIZED NATURAL RUBBER/ CTBN/ NR

NIPHAPHUN SOATTHIYANON : (POLYMER BLENDS OF EPOXY RESIN AND EPOXIDIZED NATURAL RUBBER). THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 115 pp. ISBN: 974-53-1669-5.

The aim of this research was to investigate the behaviors of epoxy resin blended with epoxidized natural rubbers (ENR). ENRs were prepared from HA concentrated natural rubber latex via '*in situ*' epoxidation method with various amount of hydrogen peroxide, formic acid and surfactant at 50°C for 4, 6, 8, 10, 14 and 16 h. FT-IR spectra showed that the obtained ENRs contained epoxide groups 25, 40, 50, 60, 70 and 80 mole percent and were nominated ENR 25, ENR 40, ENR 50, ENR 60, ENR 70 and ENR 80 respectively. The amounts of ENRs in the blends were 2, 5, 7 and 10 parts per hundred of epoxy resin. After curing, mechanical properties, thermal behaviors and morphology of polymer blends were examined. From the results, it was found that epoxy resin blended with ENR 40 at the amount of 2 phr showed highest impact strength. However, a high amount of epoxide group in the blends seemed to decrease the impact strength of the specimens due to the stiffness of the epoxide group. Tensile strength and Young's modulus were found to decreased with an increasing epoxide group in ENR and also with an increasing amount of ENR in the blends. Meanwhile, percent elongation at break slightly increased when ENR content was not over 5 phr. In addition, flexural strength and flexural modulus of the blends were mostly lower than the epoxy resin.

Fracture surface of all specimens was examined by SEM. The results suggested that the toughening of epoxy resin was induced by the presence of ENR globular nodules attached to the epoxy matrix. Finally, TGA and DSC were employed to investigate thermal behaviors of polymer blends. They revealed that thermal decomposition temperature and glass transition temperature of the samples showed slightly different and were in the range of 351-364°C and 51-63°C respectively.

Department of Materials Science Student's signature Niphaphun Soatthiyanon
Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature ...
Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลหลายๆ ท่าน และหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาต่างๆ และแนะนำแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. รศ. ไพพรรณ สันติสุข รศ. อรอุษา สรววารี และ ผศ. ดร. ประณัฐ โพธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. คุณชัยวัฒน์ นรกานต์กร ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ รวมทั้งความช่วยเหลือในการติดต่อขอความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือต่างๆ ตลอดจนการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็คซ์คอร์ปอร์เรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) สำหรับความอนุเคราะห์น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง

6. บริษัท สยามเคมิคอล อินดัสตรี จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ Epiclon 850 (อิพอกซี) และ Luckamide TD-982-E (สารบ่ม)

7. บริษัท ฟาบริเนท จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ FT-IR, SEM และ DSC

8. บริษัท เมทเล่อร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ DSC

9. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine และ Charpy Impact Tester

10. ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11. บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ ครู-อาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามมุ่งหวังอย่างสมบูรณ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือเอื้อเฟื้อต่างๆ นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายซึ่งมิได้กล่าวถึง ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1

2 วารสารปริทัศน์ 3

2.1 อิพอกซีเรซิน (Epoxy resins) 3

2.1.1 การเตรียมอิพอกซีเรซิน 3

2.1.2 การบ่มอิพอกซีเรซิน 6

2.1.3 สมบัติและการใช้งานของอิพอกซีเรซิน 10

2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) 11

2.2.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) 11

2.2.2 การแปรรูปยางธรรมชาติ 15

2.3 ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (Epoxidized Natural Rubber, ENR) 18

2.3.1 การวิเคราะห์ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ 21

2.3.2 สมบัติของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ 23

2.4 คาร์บอกซีเทอร์มิเนเตทบิวตะไดอีนอะคริโลไนไตรล์

(Carboxy terminated butadiene acrylonitrile, CTBN) 23

2.5 พอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมเซตพลาสติก 24

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่		หน้า
3	วิธีการทดลอง	28
	3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	28
	3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	29
	3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	29
	3.4 ขอบเขตการทดลอง	29
	3.5 การเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์ (ENR)	29
	3.6 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์	31
	3.6.1 วิเคราะห์ปริมาณหมู่อิพอกไซด์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (IR)	31
	3.7 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์	32
	3.8 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซิน/ยาง ENR	33
	3.8.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง	33
	3.8.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงดัดโค้ง	34
	3.8.3 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก	35
	3.8.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	36
	3.8.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	36
	3.8.6 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง SEM	37
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	38
	4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อิพอกไซด์ของยาง ENR ด้วยเทคนิค FT-IR	38
	4.2 ลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง ENR	40
	4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ	41
	4.3.1 ความทนแรงกระแทก	41
	4.3.2 ความทนแรงดึง	42
	4.3.3 เปอร์เซ็นต์การยืด	44
	4.3.4 ยังส์มอดุลัส	45
	4.3.5 ความทนแรงดัดโค้ง	46
	4.4 สัณฐานวิทยาของอิพอกซีเรซินและพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ	48

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4.5 สมบัติทางความร้อนของอิพอกซีเรซินและพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยางชนิดต่างๆ 54

4.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA 54

4.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC 57

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 60

5.1 สรุปผลการทดลอง 60

5.2 ข้อเสนอแนะ 61

รายการอ้างอิง 62

ภาคผนวก 64

ภาคผนวก ก 65

ภาคผนวก ข 68

ภาคผนวก ค 70

ภาคผนวก ง 73

ภาคผนวก จ 81

ภาคผนวก ฉ 90

ภาคผนวก ช 109

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 115

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ 12
ตารางที่ 2.2 น้ำยางข้นที่ผลิตโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงในทางการค้า... 17
ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำยางข้นชนิด HA.. 28
ตารางที่ 3.2 สูตรการเตรียมยาง ENR... 30
ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมเตรียมอิพอกซีเรซินผสมกับยาง 32
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์อิพอกซิไดซ์ของยาง ENR... 39
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของยาง CTBN, ยาง NR, ยาง ENR, สารบ่ม และ
อิพอกซีเรซินที่ไม่ได้บ่ม 54
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมของอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR
และยาง ENR... 55
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของยาง ENR และอิพอกซีที่ไม่ได้ผ่านการบ่ม.................... 57
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของอิพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่ม และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
อิพอกซีเรซินกับยาง CTBN ยาง NR และยาง ENR 58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 หมู่อิพอกซี	3
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อิพอกซีกับสารที่ให้โปรตอน	3
รูปที่ 2.3 หมู่อิพอกซีแบบต่างๆ	4
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ DGEBA	4
รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์มอนอเมอริก DGEBA	5
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการบ่มอิพอกซีเรซินด้วยเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ	8
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อิพอกซีและแอลกอฮอล์ภายใต้ภาวะที่เป็นด่าง	8
รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อิพอกซีและแอลกอฮอล์ภายใต้ภาวะที่เป็นกรด	9
รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อิพอกซีและยูเรีย	9
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อิพอกซีและยูรีเทน	10
รูปที่ 2.11 กลไกของปฏิกิริยาการบ่มอิพอกซีเรซินด้วยสารไอโซไซยาเนต	10
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (*cis*-1,4-polyisoprene)	11
รูปที่ 2.13 การผลิตน้ำยางข้นชนิด 60%	17
รูปที่ 2.14 ปฏิกิริยาอิพอกซิเดชันของยางธรรมชาติ	18
รูปที่ 2.15 ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบไฮดรอกซีเอสเทอร์	19
รูปที่ 2.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์	21
รูปที่ 2.17 กราฟมาตรฐานสำหรับหาโมลเปอร์เซ็นต์อิพอกไซด์ของ ENR วิเคราะห์ด้วยเทคนิค IR	22
รูปที่ 2.18 สเปกตรัม ^{1}H NMR ของ (A) ยางธรรมชาติ และ (B) ยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์	22
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของ CTBN	23
รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติอิพอกซิไดซ์	31
รูปที่ 3.2 เครื่อง FT-IR สเปกโทรมิเตอร์	32
รูปที่ 3.3 ลักษณะและขนาดชิ้นงานดัมเบลล์สำหรับทดสอบสมบัติความทนแรงดึง	33
รูปที่ 3.4 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 10K plus	33
รูปที่ 3.5 ลักษณะการวางชิ้นทดสอบความทนแรงดัดโค้งงอแบบ 3 point bending	34
รูปที่ 3.6 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD500	34
รูปที่ 3.7 ลักษณะและขนาดชิ้นงานทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก	35
รูปที่ 3.8 เครื่อง Charpy Impact Tester รุ่น GOTECH GT-7045	35

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 3.9 เครื่อง TGA รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851^{e} 36

รูปที่ 3.10 เครื่อง DSC รุ่น DSC 822^{e} 36

รูปที่ 3.11 เครื่อง SEM รุ่น JSM-6400 37

รูปที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัม ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) ยาง ENR 38

รูปที่ 4.2 ลักษณะชิ้นงานของอิพอกซีเรซิน 40

รูปที่ 4.3 ลักษณะชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง (a) CTBN (b) NR (c) ENR 25 (d) ENR 40 (e) ENR 50 (f) ENR 60 (g) ENR 70 และ (h) ENR 80 ปริมาณ 10 phr 40

รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ 41

รูปที่ 4.5 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิลใน CTBN และหมู่อิพอกไซด์ในอิพอกซีเรซิน 42

รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ 43

รูปที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์การยืดของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ 44

รูปที่ 4.8 ค่ายังส์มอดุลัสของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ 45

รูปที่ 4.9 ค่าความทนแรงดัดโค้งของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR ปริมาณต่างๆ 46

รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัสดัดโค้งของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยางธรรมชาติ และยาง ENR 47

รูปที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของอิพอกซีเรซิน (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 2,000 เท่า 48

รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 48

รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 49

รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง NR ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 49

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง NR ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า............ 49
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 25 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 50
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 25 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า............ 50
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 40 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 50
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่รอยแตกหักของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 40 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 51
รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่รอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 50 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 51
รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 50 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า............ 51
รูปที่ 4.22 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 60 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 52
รูปที่ 4.23 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 60 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 52
รูปที่ 4.24 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 70 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 52
รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 70 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 53
รูปที่ 4.26 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 80 ปริมาณ 5 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 53
รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับ ENR 80 ปริมาณ 10 phr (a) กำลังขยาย 200 เท่า (b) กำลังขยาย 1,500 เท่า 53
รูปที่ 4.28 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NR และยาง ENR.. 56
รูปที่ 4.29 อุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอิพอกซีเรซินกับยาง CTBN, ยาง NRและยาง ENR 58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย