



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน

**Mechanical Properties of Defatted Rice Bran Filled
Natural Rubber**

โดย ดริญญา มุลชัยและคณะ

ตุลาคม 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน

Mechanical Properties of Defatted Rice Bran Filled

Natural Rubber

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. ดริญญา มุลชัย

สาขาวัสดุศาสตร์-อุตสาหกรรมการยาง
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2. ณัฐพงษ์ หมอยาดี

สาขาวัสดุศาสตร์-อุตสาหกรรมการยาง
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

3. นิพนธ์ ภูสวดแสง

สาขาวัสดุศาสตร์-อุตสาหกรรมการยาง
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ชุดโครงการ “โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้”

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน
(ภาษาอังกฤษ) Mechanical Properties of Defatted Rice Bran Filled Natural Rubber

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่

ชื่อ-สกุล ปริญญา มุลชัย

หน่วยงาน สาขาวัสดุศาสตร์-อุตสาหกรรมการยาง คณะวิศวกรรมและ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.
เชียงใหม่ 50290

โทรศัพท์ 053-875542 โทรสาร 053-498902

E-mail address darinya@mju.ac.th

3. นักศึกษาช่วยทำวิจัย

1. ณัฐพงษ์ หมอยาคี
2. นิพนธ์ ภูสวดแสง

5. ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี 3 เดือน จาก 15 กรกฎาคม 2551 ถึง 14 ตุลาคม 2552

6. ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการศึกษา วิจัย นำวัสดุทางธรรมชาติมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติมากขึ้น เช่น ผงไม้ (Wood flour) แป้ง (Starch) ชนิดต่างๆ และเส้นใย (Fiber) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีข้อดี คือ สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ นอกจากวัสดุทางธรรมชาติที่กล่าวมาข้างต้นยังมีวัสดุที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่ง คือ รำสกัดน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตข้าวในประเทศไทย และยังเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของพอลิเมอร์ธรรมชาติหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เส้นใย เป็นต้น งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำรำสกัดน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติ โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมันทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

7. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมร่าสกัดน้ำมันทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

8. ผลการดำเนินงาน

ร่าสกัดน้ำมันที่นำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติมีรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-5 ไมโครเมตร โดยที่ร่าสกัดน้ำมันที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมช จะมีการกระจายตัวในเนื้อยางผสมได้ดีกว่าร่าที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 และ 100 เมช สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของร่าต่อสมบัติเชิงกลพบว่า ร่าสกัดน้ำมันที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมช ให้ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดน้อยที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมันในช่วง 0-50 phr ส่งผลให้เวลาในการคงรูปและการบวมพองของยางลดลง จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมันจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความกระด้างกระดอนลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งแรงมอดูลัส ความต้านทานการสึกหรอ ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนระยะยืดเมื่อขาดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำยางผสมร่าสกัดน้ำมันไปทดสอบสมบัติความทนต่อความร้อนพบว่า หลังการบ่มเร่งค่าความต้านทานแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอลดลง ขณะที่ความแข็งแรงและค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการเสียรูปหลังการกดอัดจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ร่าสกัดน้ำมันปริมาณ 0-20 phr แต่หลังจากนั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับสมบัติการกระด้างกระดอนตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการบ่มเร่ง

เมื่อเปรียบเทียบชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติของยางจากฐานานวิทยาพบว่ายางผสมดินขาว (Clay) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีปริมาณของสารตัวเติมต่อหน่วยพื้นที่มากกว่ายางผสมร่าสกัดน้ำมัน แต่ร่าสกัดน้ำมันสามารถแทรกตัวเข้ากับยางได้ดี ส่วนยางผสม CaCO_3 จะพบช่องว่างระหว่างเฟสของยางกับสารตัวเติมขนาดใหญ่ และยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดใช้เวลาในการคงรูปสั้นลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติม โดยที่ยางผสมร่าสกัดน้ำมันใช้เวลาในการคงรูปน้อยที่สุด ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ายางผสมร่าสกัดน้ำมันมีค่าความแข็งแรง มอดูลัส ความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีค่าเสียรูปหลังการกดอัดน้อยที่สุดซึ่งหมายถึงยางสามารถคืนรูปหลังการกดอัดได้ดี สำหรับยางผสม Clay จะให้ค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และระยะยืดเมื่อขาดดีที่สุด ส่วนยางผสม CaCO_3 ให้ค่าการกระด้างกระดอนดีที่สุด เมื่อนำยางไปบ่มเร่งเพื่อทดสอบสมบัติความทนต่อความร้อนพบว่ายางผสมสารตัวเติมมีค่าความแข็งแรง และมอดูลัสเพิ่มขึ้น โดยที่ยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดจะเกิดการบวมพองน้อยลงหลังการบ่มเร่ง ยางผสมร่าสกัดน้ำมันมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดไม่เปลี่ยนแปลงไปจากก่อนการบ่มเร่ง ในขณะที่ยางผสม Clay มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานการ

นิกขาด ความต้านทานการสึกหรอหลังการบ่มเรงน้อยที่สุด ส่วนยางผสม CaCO_3 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด สำหรับค่าการกระเด็งกระดอนพบว่ายางผสมสารตัวเดิมทั้ง 3 ชนิดให้ค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญไปจากก่อนบ่มเรง

9. สรุปผลการวิจัย

การเพิ่มปริมาณร้าสกัดน้ำมันในยางธรรมชาติจะทำให้เวลาในการคงรูปและการบวมพองของยางลดลง ในขณะที่เมื่อปริมาณร้าสกัดน้ำมันในยางเพิ่มขึ้น สมบัติความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการสึกขาด และการกระเด็งกระดอนลดลง ส่วนความแข็ง โมดูลัส ความต้านทานการสึกหรอ และค่าการเสียรูปหลังการกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งภายหลังบ่มเรงแล้วพบว่ายางผสมร้าสกัดน้ำมันมีการบวมพองน้อยลง ค่าความแข็งและโมดูลัสสูงขึ้น ส่วนสมบัติเชิงกลอื่นๆมีค่าลดลง ยกเว้นความกระเด็งกระดอนที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมร้าสกัดน้ำมันกับการใช้ดินขาวและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเดิมในยางพบว่า ยางผสมร้าสกัดน้ำมันใช้เวลาในการคงรูปสั้นที่สุด และมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอ ความแข็ง โมดูลัสดีกว่า นอกจากนั้นยังมีการเสียรูปหลังการกดอัดน้อยกว่าการใช้ดินขาวและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเดิมในยาง

10. ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

- ศึกษาการใช้ร้าสกัดน้ำมันที่ปริมาณมากกว่า 50 phr
- ศึกษาการคงรูปยางธรรมชาติผสมร้าสกัดน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส เพื่อลดโอกาสการเสียสภาพของร้าสกัดน้ำมัน
- ศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)
- ศึกษาการนำยางธรรมชาติผสมร้าสกัดน้ำมันมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ยางปูพื้น

11. ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

- นำเสนอผลงานงานประชุมวิชาการ
- สิ่งตีพิมพ์ระดับชาติ/นานาชาติ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมร่าสกัดน้ำมัน

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของการใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติต่อสมบัติการคงรูป การบวมพอง และสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่ง โดยแปรปริมาณร่าสกัดน้ำมันในช่วง 0-50 phr ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมันในยางธรรมชาติจะทำให้เวลาในการสกอซและคงรูปของยางลดลง และการบวมพอง สมบัติความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด การกระเด็นกระดอนมีค่าลดลง ส่วนความแข็ง โมดูลัส ความต้านทานการสึกหรอ ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งภายหลังบ่มเร่งแล้วยางผสมร่าสกัดน้ำมันมีการบวมพองน้อยลง ค่าความแข็งและโมดูลัสสูงขึ้น ส่วนสมบัติเชิงกลอื่นๆ มีค่าลดลง ยกเว้นการกระเด็นกระดอนที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมร่าสกัดน้ำมันกับการใช้ดินขาวและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในยางพบว่า ยางผสมร่าสกัดน้ำมันใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่า และมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอ ความแข็ง และโมดูลัสดีกว่า นอกจากนั้นยังมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดน้อยกว่าการใช้ดินขาวและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

คำสำคัญ ยางธรรมชาติ ร่าสกัดน้ำมัน สมบัติเชิงกล

Mechanical Properties of Defatted Rice Bran Filled Natural Rubber

Abstract

Curing characteristics, swelling behavior and mechanical properties before and after aging of rice bran filled natural rubber were studied. Defatted rice bran content was varied at 0-50 phr. The results indicated that scorch time and cure time of natural rubber decreased with increasing filler content. Swelling, tensile strength, tear strength and rebound resilience also decreased with increasing filler content. Hardness, modulus, abrasion resistance and compression set increased with increasing filler content. After aging, defatted rice bran caused a decrease in swelling of natural rubber. Natural rubber filled with defatted rice bran showed an increase in hardness and modulus while most mechanical properties were adversely affected. For rebound resilience, the significant change was not observed.

The obtained results of three different fillers for natural rubber with defatted rice bran, clay and calcium carbonate were compared. It was found that natural rubber filled with defatted rice bran gave the lowest cure time, compression set and highest abrasion resistance, hardness and modulus.

KEYWORDS Natural rubber, Defatted rice bran, Mechanical properties

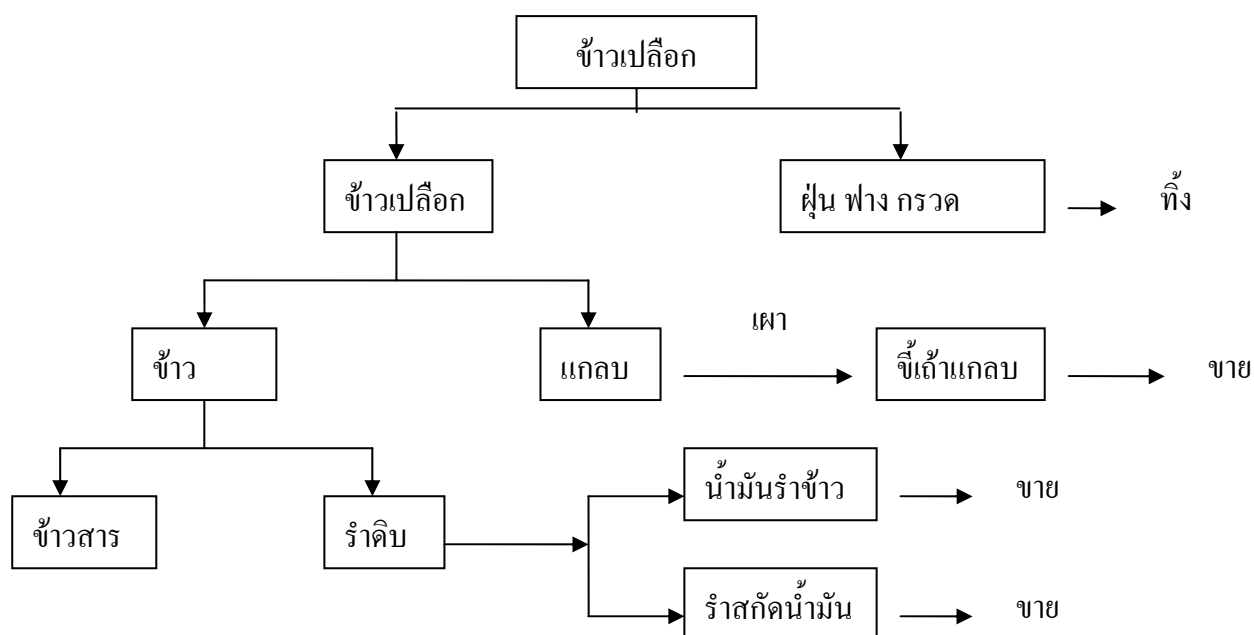
สารบัญ

	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	iv
Abstract	v
เนื้อหางานวิจัย	
1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
2. วัตถุประสงค์	2
3. ทฤษฎีแนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
4. วิธีการทดลอง	4
5. ผลการวิจัยและวิจารณ์	9
6. สรุป	23
7. ข้อเสนอแนะ	25
8. เอกสารอ้างอิง	25
ภาคผนวก	27

เนื้อหางานวิจัย

(1) ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ปัจจุบันมีการศึกษา วิจัย นำวัสดุทางธรรมชาติมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติมากขึ้น เช่น ผงไม้ (Wood flour) แป้ง (Starch) ชนิดต่างๆ และเส้นใย (Fiber) เป็นต้น เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีข้อดีคือสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ นอกจากวัสดุทางธรรมชาติที่กล่าวมาข้างต้นยังมีวัสดุที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่ง คือ รัสกัตน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตข้าวในประเทศไทย และยังเป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของพอลิเมอร์ธรรมชาติหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เส้นใย เป็นต้น กระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสารซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวหลักที่มีการซื้อขายเพื่อบริโภคเป็นอาหารหลักของประชากรกว่าครึ่งโลกนั้น จะมีผลพลอยได้จากการแปรรูป คือ ข้าวหัก ปลายข้าว รำข้าว และแกลบ ในปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดของโรงสีข้าวซึ่งโดยทั่วไปจะได้เป็นต้นข้าวสาร (Head rice) ประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ ปลายข้าว 17 เปอร์เซ็นต์ รำดิบ 10 เปอร์เซ็นต์ และแกลบ 25 เปอร์เซ็นต์ ถ้าเป็นโรงสีข้าวขนาดใหญ่จะมีจำนวนผลผลิตจากผลพลอยได้ดังกล่าวจำนวนมาก [1] รัสกัตน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากการนำรำละเอียดไปสกัดเอาน้ำมันออกโดยวิธีทางเคมี น้ำมันรำที่ได้ปัจจุบันนิยมนำมาบริโภค ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารเสริม เครื่องสำอางค์และผลิตภัณฑ์สปา ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันรำข้าวเป็นแหล่งที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids) สูงถึงประมาณ 80-85 เปอร์เซ็นต์ [2] และยังมีสารป้องกันการออกซิไดซ์ในปริมาณที่สูง จึงทำให้ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันจากรำข้าวได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นตามความต้องการของผู้บริโภค และในขบวนการสกัดน้ำมันดังกล่าวจึงก่อให้เกิดผลพลอยได้ คือ รัสกัตน้ำมันสูงขึ้นตามไปด้วย ประเทศไทยมีบริษัทผู้ผลิตน้ำมันรำข้าวดิบและรัสกัตน้ำมันที่กำลังการใช้วัตถุดิบรำข้าวมากกว่า 200,000 ตันต่อปี ซึ่งรำละเอียด 1,000 กิโลกรัม เมื่อนำมาสกัดน้ำมันจะได้ น้ำมัน 135 กิโลกรัม ได้รัสกัตน้ำมัน 787 กิโลกรัม และสูญเสียไปในรูปของความชื้น 78 กิโลกรัม จะเห็นว่าปริมาณรัสกัตน้ำมันที่ผลิตได้ในประเทศมีปริมาณมาก ปัจจุบันมีการนำรัสกัตน้ำมันมาใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ได้แต่ไม่เป็นที่นิยมเท่าการใช้รำดิบ เนื่องจากรัสกัตน้ำมันให้ระดับพลังงานต่ำกว่ารำดิบ (1,890 เทียบกับ 2,710 kcal/kg) [2] รัสกัตน้ำมันประกอบด้วยไขมันน้อยมาก ทำให้สามารถเก็บได้นานขึ้น ลดปัญหาการเหม็นหืน และประกอบไปด้วยเส้นใยในระดับสูง นักวิจัยจึงเล็งเห็นแนวทางการใช้ประโยชน์จากรัสกัตน้ำมันในการนำมาเป็นสารตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติโดยนำรัสกัตน้ำมันมาผสมเข้ากับยางแท่งธรรมชาติที่ปริมาณต่างๆ และศึกษาสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติผสมรัสกัตน้ำมัน



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์จากข้าวเปลือก [1]

(2) วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการใช้รำสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ
2. ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมันทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

(3) ทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สารตัวเติม คือ สารที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมปาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน เป็นต้น สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือที่เรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (Non-reinforcing หรือ Inert fillers) หรืออาจแบ่งตามสีของสารตัวเติมได้เป็น 2 กลุ่ม เช่นกัน ได้แก่ ผงเขม่าดำ และสารตัวเติมสีอ่อน [3] สารตัวเติมที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยาง เช่น เขม่าดำ ซิลิกา เคลย์หรือดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต

Mostafa *et.al.* [4] ศึกษาการใช้ขี้เถ้าเป็นสารตัวเติมในยางสไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) และยางไนไตรล์ (NBR) ต่อสมบัติการบวมพองและการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set) จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณขี้เถ้าในยางส่งผลให้ค่าการบวมพองลดลง ในขณะที่ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดเพิ่มขึ้น

บุญยาและวิริยญา [5] ศึกษาสูตรยางคอมปาวด์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานสำหรับพื้นสนามเด็กเล่น โดยศึกษาอิทธิพลของสารเคลือบคาร์บอนแบล็ค และซีโอไลท์ธรรมชาติต่อสมบัติของยางผสมพบว่า ที่ปริมาณสารตัวเติม 100 phr ยางที่เติมเคลือบคาร์บอนแบล็คจะสึกเร็วที่สุด และมีค่าสมบัติเชิงกลสูงที่สุด

ปัจจุบันมีการวิจัยและนำวัสดุธรรมชาติบางชนิดมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางและพอลิเมอร์ เช่น ผงไม้ แป้ง เส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

Chotirat *et. al.* [6] ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบโดยใช้ผงขี้เถ้าผสมกับ Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) พบว่าการเติมผงขี้เถ้าทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานการโค้งงอ รวมถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกลดลง นอกจากนั้นยังศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของผงขี้เถ้าด้วยไซเลนพบว่า การใช้ไซเลนปริมาณ 0.5-1.0% โดยน้ำหนักของผงขี้เถ้า สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ เนื่องจากไซเลนจะไปเพิ่มแรงดึงดูดระหว่าง ABS กับผงขี้เถ้า

Puprasert and Poonsawat [7] ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นยางธรรมชาติที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 30% และเจลดแป้งมันสำปะหลัง โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าอัตราส่วนของยาง:แป้ง:กลีเซอรอล ที่เหมาะสมคือ 70:30:5 ซึ่งให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด

Carvalho *et.al.* [8] ผสมแป้งข้าวโพดกับน้ำยางธรรมชาติ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ปริมาณน้ำยางและกลีเซอรอลที่ใช้อยู่ในช่วง 2.5-20% และ 20-40% ตามลำดับ พบว่ายางธรรมชาติจะกระจายตัวอยู่ในแป้งที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง เมื่อวัดขนาดอนุภาคของยางด้วยเทคนิค Scanning electron microscope จะได้อยู่ในช่วง 2-8 ไมโครเมตร ปริมาณยางที่ผสมถูกจำกัดโดยการเกิดการแยกตัวของวัฏภาค และยิ่งขึ้นกับปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ พบว่ากลีเซอรอลนอกจากทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แล้ว ยังสามารถช่วยทำหน้าที่เป็นสารช่วยประสานระหว่างวัฏภาคได้ด้วย จากผลการทดลองนี้ แรงดึงดูระหว่างวัฏภาคจะดีในกรณีที่มีผสมยาง 5% และใช้กลีเซอรอล 20-40 %

Yew *et. al.* [9] ศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจาก พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid)) แป้งข้าว (Rice starch) และยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidised natural rubber, ENR) โดยผสมในเครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) จากผลการทดลองพบว่ากรณีไม่ผสม ENR เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวใน Poly (lactic acid) จาก 0-50% โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ค่าความต้านทานแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดลดลง ซึ่งปริมาณของแป้งข้าวที่ทำให้ทั้งค่ามอดูลัสและ

ความต้านทานแรงดึงอยู่ในระดับดีคือ 20% ส่วนกรณีผสมยาง ENR 5 % โดยน้ำหนักเข้าไปในระบบการผสมด้วยพบว่า ค่ามอดูลัสลดลง ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดเพิ่มขึ้น

ปัจจุบันยังมีการนำกากถั่วเหลืองซึ่งเป็นวัสดุที่ประกอบด้วยโปรตีนมาใช้ผสมเข้ากับยางธรรมชาติ เพื่อผลิตวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้เองทางธรรมชาติ เนื่องจากกากถั่วเหลืองเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ เมื่อนำมาผสมกับยางธรรมชาติที่มีปริมาณการคงรูปไม่สูงมากซึ่งมีพันธะคู่ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้จากออกซิเจนและโอโซน ทำให้ขนาดโมเลกุลของยางเล็กลง จากนั้นจุลินทรีย์ก็สามารถเข้าไปย่อยสลายโมเลกุลของยางได้ [10] Amar *et.al.* [10] เตรียมวัสดุผสมจากกากถั่วเหลืองและยางธรรมชาติ โดยผสมในอัตราส่วนต่อน้ำหนัก 70:50 พบว่าวัสดุผสมที่ยางธรรมชาติมีการคงรูปด้วยกำมะถันจะมีสมบัติดีกว่าระบบที่ยางไม่มีการคงรูป

นอกจากสารตัวเติมธรรมชาติที่กล่าวมาข้างต้น รำสกัดน้ำมันซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันออกจากรำข้าว มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยาง เช่นเดียวกับกากถั่วเหลือง แป้ง และเส้นใย งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการนำรำสกัดน้ำมันมาผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณต่างๆ (0-50 phr) และในการผสมจะมีการเติมสารเคมีต่างๆให้ยางเกิดการคงรูปเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติของยางและให้ยางสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงมากกว่ายางที่ไม่ผ่านการคงรูป [3,10] หลังจากขึ้นรูปและคงรูปยางคอมปาวด์แล้ว จากนั้นจะนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์สมบัติการบวมพอง และสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

(4) วิธีการทดลอง

4.1 การเตรียมยางผสมสารเคมี

นำยางธรรมชาติ STR 5L มาบดในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 นาที ก่อนผสมสารเคมีต่างๆตามสูตรที่กำหนดในตารางที่ 1 แล้วจึงเติมสารทำให้ยางคงรูป (Sulphur) เป็นลำดับสุดท้ายบนเครื่องผสมแบบเปิด (Two-roll mill) เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นรีดเป็นแผ่น นำยางคอมปาวด์เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติการคงรูป และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดยางไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150 °C ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป โดยแบ่งการศึกษาดังนี้

ขั้นที่ 1 ศึกษาขนาดของรำสกัดน้ำมันโดยนำยางธรรมชาติผสมกับรำสกัดน้ำมันที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80, 100 และ 150 เมช ตามสูตรยางคอมปาวด์ที่แสดงดังตารางที่ 1 เพื่อเลือกขนาดรำสกัดน้ำมันที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากผลของสมบัติการกระจายตัวของรำสกัดน้ำมันในยางธรรมชาติ และสมบัติเชิงกลต่างๆ

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติผสมร่าสกัดน้ำมัน

สารเคมี	สูตร		
	1	2	3
NR (STR 5L)	100	100	100
Sulphur	2.5	2.5	2.5
Stearic acid	2	2	2
ZnO	4	4	4
MBTS	1	1	1
TMTD	0.5	0.5	0.5
CPL	1	1	1
ร่าสกัดน้ำมันขนาด 80 เมช	50	-	-
ร่าสกัดน้ำมันขนาด 100 เมช	-	50	-
ร่าสกัดน้ำมันขนาด 150 เมช	-	-	50

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของร่าสกัดน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ความชื้น	11.10
น้ำมัน	1.40
โปรตีน	17.57
ไฟเบอร์	9.19

หมายเหตุ ในการทดลองนี้ใช้ร่าสกัดน้ำมันของบริษัทไทยร่วมใจน้ำมันพืชจำกัด โดยนำร่าไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสมกับยางธรรมชาติ

ขั้นที่ 2 เมื่อได้สูตรจากขั้นที่ 1 แล้วนำมาศึกษาผลของปริมาณร่าสกัดน้ำมันต่อสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติ โดยแปรปริมาณสารตัวเติมที่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr

ขั้นที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติผสมร่าสกัดน้ำมันกับสารตัวเติมชนิดอื่นได้แก่ ดินขาว (China clay) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยผสมสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr

4.2 การทดสอบสมบัติต่างๆ

4.2.1 การทดสอบคุณลักษณะของสารตัวเติม

1) ทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) วิธี Autosorb-1 และ

2) ศึกษาขนาดอนุภาคของสารตัวเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.2.2 การทดสอบสมบัติการคงรูป

ทดสอบหาเวลาที่ยางเริ่มคงรูป (t_s) เวลาในการคงรูป (t_{90}) ค่าทอร์กต่ำสุด (ML) และค่าทอร์กสูงสุดด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C

4.2.3 การตรวจสอบลักษณะฐานวิทยา

ตรวจสอบลักษณะฐานวิทยาของยางผสมสารตัวเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยหักชิ้นตัวอย่างขนาด 1x10 cm ในไนโตรเจนเหลว แล้วนำไปส่องดูขนาดและการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

4.2.4 การทดสอบการบวมพอง (Swelling behavior)

นำตัวอย่างขนาด 1 x 1 cm มาแช่ในโทลูอินที่เวลาต่าง ๆ จนกระทั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างคงที่ แล้วคำนวณปริมาณการบวมพองโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{100 \times (W_s - W_u)}{W_u}$$

เมื่อ Q = ปริมาณการบวมพอง (เปอร์เซ็นต์)

W_s = น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่ในโทลูอิน (กรัม)

W_u = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ในโทลูอิน (กรัม)

4.2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ก. การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบโดยใช้เครื่องวัดแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ISO 37-1 โดยนำยางที่ขึ้นรูปหนา 2 mm ตัดเป็นรูป Dumbbell แล้วนำไปทดสอบที่ความเร็ว 500 mm/min ใช้โหลดเซลล์ขนาด 1 kN วัดค่าความต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัส และระยะยืดเมื่อขาด

ข. การทดสอบความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength)

ใช้เครื่องเดียวกันกับการทดสอบความต้านทานแรงดึง แต่เตรียมชิ้นทดสอบแบบมุม (Angle test piece) ที่ตัดเป็นมุม 90 องศา ตามมาตรฐาน ISO 34-1 และให้แรงที่ปลายทั้ง 2 ด้าน เพื่อให้เกิดความเครียดดึงสูงสุดที่มุม หรือตรงรอยตัดนั้นซึ่งค่าความต้านทานการฉีกขาดสามารถคำนวณจากสมการดังนี้

$$T_s = \frac{F}{d}$$

เมื่อ T_s = ความต้านทานการฉีกขาด (กิโลนิวตัน ต่อ มิลลิเมตร, kN / mm)

F = แรงดึงที่ใช้ดึงชิ้นงานจนขาด (กิโลนิวตัน, kN)

d = ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร, mm)

ค. การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ทดสอบโดยใช้เครื่อง Durometer hardness (Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM 2240-97 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างหนา 6 mm ทดสอบ 5 จุด โดยบริเวณ 5 จุดทดสอบต้องไม่อยู่บริเวณริมชิ้นงาน หรือมีฟองอากาศ

ง. การทดสอบการเสียรูปเนื่องจากการกดอัด (Compression set)

ทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 395-89 มีวิธีการทดสอบดังนี้ ชิ้นรูปชิ้นทดสอบเป็นทรงกระบอก หนา 1.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.9 เซนติเมตร นำชิ้นทดสอบวางใต้แผ่นเหล็ก กดแผ่นอัดให้ชิ้นทดสอบยุบตัวลงไป 25% ของความสูงเดิม วางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลา นำออกจากตู้อบ แกะเอาแผ่นเหล็กอัดออก แล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที วัดความสูงที่เปลี่ยนแปลง คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากการอัดจากสมการ

$$C_B = \frac{(t_0 - t_1) \times 100}{t_0 - t_n}$$

เมื่อ C_B = การเสียรูปเนื่องจากการกดอัด (ร้อยละ, %)

t_0 = ความหนาเดิม (มิลลิเมตร, mm)

t_1 = ความหนาชิ้นตัวของชิ้นทดสอบ หลังปล่อยจากการอัดยุบตัว (มิลลิเมตร, mm)

t_n = ความหนาของแผ่นกัน (มิลลิเมตร, mm)

จ.การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และหนาอย่างน้อย 8 มิลลิเมตร ให้สัมผัสกับพื้นผิวขัดที่พันอยู่รอบลูกกลิ้ง ชั่งน้ำหนัก ก่อนและหลัง เพื่อคำนวณหาเป็นปริมาตรที่หายไปตามสมการดังนี้

$$\text{Volume loss} = \left(\frac{W_1 - W_2}{D} \right) \times \left(\frac{200}{S_c} \right)$$

เมื่อ Volume loss = ปริมาตรของตัวอย่างที่สูญเสียไป (ลูกบาศก์มิลลิเมตร, mm³)

W_1 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (มิลลิกรัม, mg)

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ (มิลลิกรัม, mg)

S_c = ค่าแสดงกำลังการขัดถูที่แท้จริงของแผ่นขัด (Current abrasive power)

D = ความหนาแน่นของตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร, mg/mm³)

ฉ.การทดสอบการกระเด้งกระดอน (Rebound resilience)

ทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 1054 (Pendulum) ขึ้นรูปขึ้นทดสอบเป็นทรงกระบอก หนา 1.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.9 เซนติเมตร จากนั้นยกหัวค้อนให้อยู่ในแนวขนาน กับพื้น ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้นเพื่อปล่อยให้หัวค้อนกระแทกกับชิ้นงานตัวอย่าง ทำการทดสอบให้ ครบ 5 ชิ้นตัวอย่าง จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกระเด้งกระดอน (R) ตามสูตร

$$\%R = (1 - \cos\alpha) \times 100\%$$

เมื่อ R = ค่าการกระเด้งกระดอน (ร้อยละ, %)

α = มุมที่ตุ้มน้ำหนักกระดอนหลังตกกระทบ (องศา)

4.2.6 การทดสอบการทนต่อความร้อน (Heat aging)

นำขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ต่าง ๆ ตามที่กล่าวมา แล้วรายงานค่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล จากสมการดังนี้

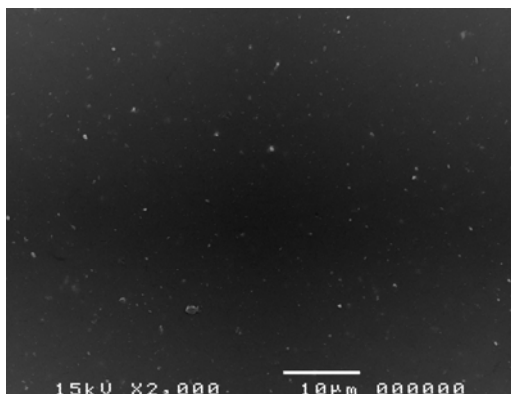
$$\% \text{ Change} = [(\text{after aging} - \text{before aging}) / \text{before aging}] \times 100$$

(5) ผลการวิจัยและวิจารณ์

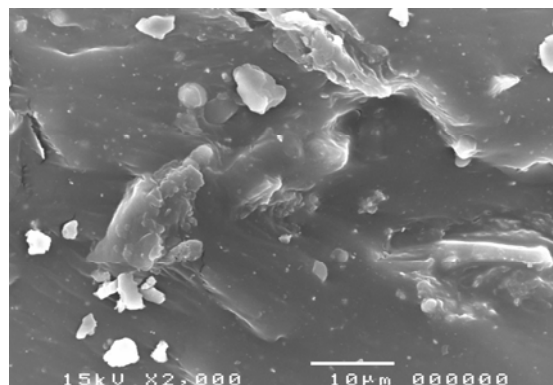
5.1 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคราสกักน้ำมันต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

5.1.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

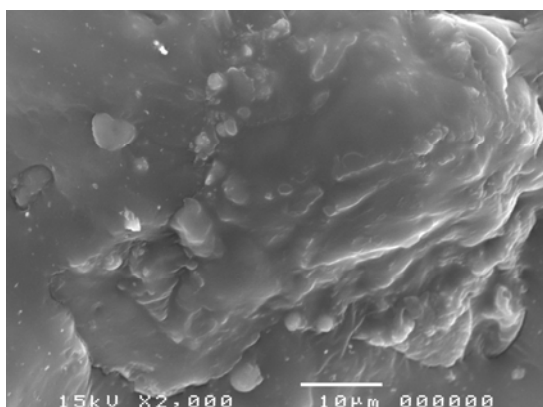
เนื่องจากในกระบวนการผลิตราสกักน้ำมันจะใช้ราดิบที่ได้จากกระบวนการขัดข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร [1] ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวทำให้ราสกักน้ำมันที่ได้มีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่นเปลือกข้าว เศษข้าวหัก เศษฟุ้งผง ปนอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อคัดแยกสิ่งเจือปนต่างๆ ออก จึงนำราสกักน้ำมันมา ร่อนผ่านตะแกรง ในการทดลองนี้ได้ทำการร่อนโดยใช้ตะแกรง 3 ขนาด คือ 80, 100 และ 150 เมช จากนั้นจึงนำราที่ร่อนแล้วไปผสมเข้ากับยางธรรมชาติในปริมาณ 50 phr และตรวจสอบโครงสร้าง สัณฐานวิทยาของยางผสมราสกักน้ำมันโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2 จะพบว่าราสกักน้ำมันมีรูปร่างค่อนข้างกลม มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-5 ไมโครเมตร และแทรกตัวอยู่ในเนื้อยางได้ดี โดยที่ราสกักน้ำมันขนาด 150 เมช มีขนาดอนุภาคเล็ก ที่สุดและมีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่าราสกักน้ำมันขนาด 80 และ 100 เมช ซึ่งจะพบการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนมากกว่า และสังเกตเห็นอนุภาครูปร่างอื่นที่มีขนาดใหญ่ นอกจากอนุภาคทรงกลม อยู่นอกเนื้อยาง ซึ่งคาดว่าจะเป็นอนุภาคของสิ่งเจือปนอื่น ซึ่งจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของราสกักน้ำมันด้วยตาเปล่า พบว่าราสกักน้ำมันที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 150 เมช ราที่ได้จะมีเนื้อที่ละเอียดและมีสิ่งเจือปนอื่นๆ อาทิเช่น เปลือกข้าว เศษข้าวหัก ฟุ้งผงต่างๆ ที่เจือปนมากับกระบวนการผลิตราดิบน้อยกว่าราสกักน้ำมันที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 และ 100 เมช ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างสัณฐานวิทยาที่ยางผสมราขนาด 150 เมช มีรูปร่างและขนาดของราที่สม่ำเสมอมากกว่า



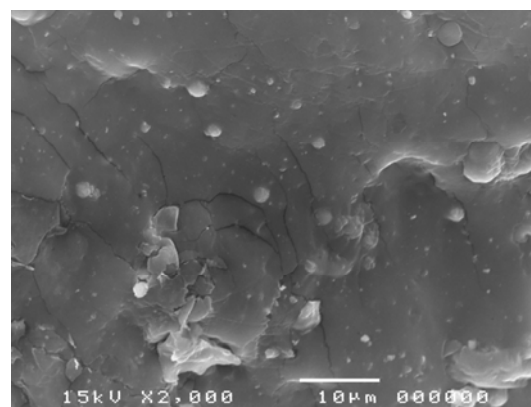
NR



80 mesh



100 mesh



150 mesh

รูปที่ 2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของยางผสมร่าสกัดน้ำมันที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80, 100 และ 150 เมชในปริมาณ 50 phr (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

5.1.2 ผลของขนาดอนุภาคร่าสกัดน้ำมันต่อสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3 แสดงผลของขนาดร่าสกัดน้ำมันต่อสมบัติเชิงกล จากตารางพบว่า ยางผสมร่าสกัดน้ำมันขนาด 80, 100, และ 150 เมช มีค่าความต้านทานแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการสึกหรอ และการกระเดื่องกระดอนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความแข็งและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ร่าที่ละเอียดขึ้น สำหรับค่าการเสียรูปหลังการกดอัดพบว่ายางผสมร่าขนาด 150 เมชมีค่าน้อยที่สุด เนื่องมาจากร่าที่ใช้ผสมมีขนาดละเอียดสม่ำเสมอ และมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า ทำให้ยางผสมรักษาสสมบัติความยืดหยุ่นของยางไว้ได้ดีกว่ายาง

ผสมร่าสกัขนาด 80 และ 100 เมช ซึ่งร่าที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่าและมีสิ่งเจือปนมากกว่า ทำให้ความยืดหยุ่นของยางน้อยลง มีผลทำให้ค่าเสียรูปหลังการกดอัดมีค่าสูงกว่า ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อไปเพื่อศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติของยางผสมร่าสกัน้ำมัน จึงเลือกใช้ร่าที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมชไปผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณต่างๆ

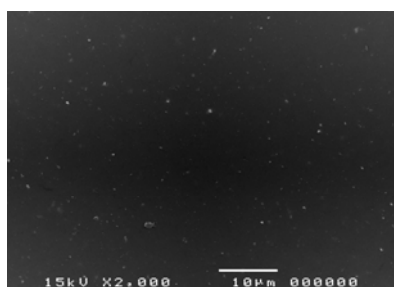
ตารางที่ 3 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมร่าสกัน้ำมันขนาดต่างๆ

Mechanical properties	NR	NR/Defatted rice bran (mesh)		
		80	100	150
Tensile strength (MPa)	20.09±1.29	8.91±0.23	6.57±0.61	7.09±0.13
Elongation at break (%)	559±71	542±25	496±25	500±28
100% Modulus (MPa)	0.97±0.07	2.05±0.05	1.93±0.21	1.81±0.19
Hardness (Shore A)	41.30±3.73	59.33±4.23	58.21±2.79	54.97±0.91
Tear strength (N/mm)	39.97±1.17	29.39±4.26	29.26±2.06	28.44±3.59
Abrasion resistance - Volume loss (mm ³)	66.27±12.08	46.30±5.64	35.30±9.29	38.05±5.35
Rebound resilience (%)	78.77±2.64	69.90±1.41	68.75±1.34	69.15±2.19
Compression set (%)	6.02±0.90	15.43±0.39	14.80±0.63	7.44±0.49

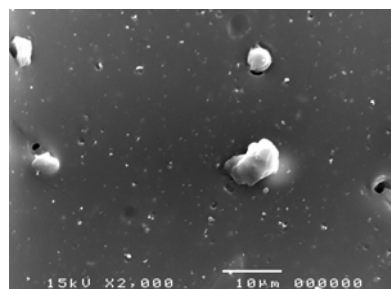
5.2 การศึกษาผลของปริมาณร่าสกัน้ำมันต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

5.2.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

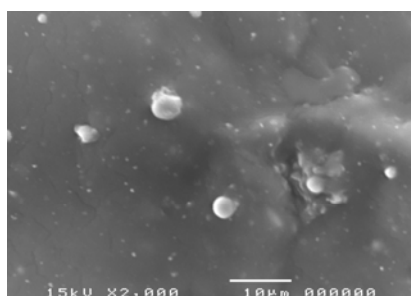
เพื่อศึกษาผลของปริมาณร่าสกัน้ำมันต่อสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ จึงนำร่าสกัน้ำมันขนาด 150 เมช มาผสมเข้ากับยางธรรมชาติที่ปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ผลการตรวจสอบโครงสร้างสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 3 พบว่าร่าสกัน้ำมันกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี และความหนาแน่นของร่าสกัน้ำมันในเนื้อยางเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณร่าในยางธรรมชาติ



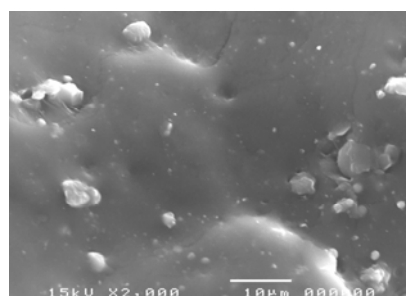
0 phr



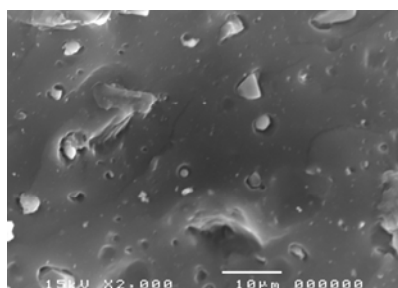
10 phr



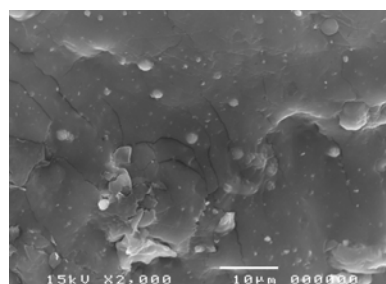
20 phr



30 phr



40 phr



50 phr

รูปที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานของยางผสมร่าสกัดน้ำมันขนาด 150 เมชที่ปริมาณ 0-50 phr
(กำลังขยาย 2,000 เท่า)

5.2.2 ผลของปริมาณร่าสกัดน้ำมันต่อสมบัติการคงรูป

จากตารางที่ 4 พบว่าเมื่อปริมาณร่าสกัดน้ำมันเพิ่มขึ้นค่าทอร์คต่ำสุดและค่าทอร์คสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเติมร่าสกัดน้ำมันลงไปส่งผลให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความแข็งที่ยางจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณร่าสกัดน้ำมันเพิ่มขึ้น ดังแสดงในหัวข้อ 5.2.3 ส่วนค่า Scorch time และ Cure time จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณร่าสกัดน้ำมัน

เพิ่มขึ้น แสดงว่ารัสกัตน้ำมันมีผลทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปของยางด้วยกำมะถันเกิดได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kuriakose and Rajendran [11] ศึกษาการเติมน้ำมันรำข้าวในสูตรยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติพบว่าน้ำมันรำข้าวมีผลทำให้เวลาในการคงรูปของยางสั้นลง ดังนั้นอาจเป็นเพราะว่ารัสกัตน้ำมันที่ใช้ในการทดลองยังคงมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ดังตารางที่ 2 จึงมีผลทำให้เวลาในการคงรูปของยางสั้นลงเมื่อเพิ่มปริมาณรัสกัตน้ำมัน

ตารางที่ 4 สมบัติการคงรูปของยางผสมรัสกัตน้ำมันขนาด 150 เมชในปริมาณต่างๆ

ปริมาณรัสกัตน้ำมัน (phr)	ML (dN.m)	MH (dN.m)	Scorch time, T_{s_2} (min)	Cure time, T_{90} (min)
0	0.90	13.49	3.30	8.08
10	1.28	14.72	3.06	6.40
20	2.12	17.44	2.42	5.40
30	2.48	21.03	2.36	5.09
40	2.24	20.24	2.11	4.43
50	2.66	21.44	2.16	4.18

5.2.3 ผลของปริมาณรัสกัตน้ำมันต่อสมบัติเชิงกล

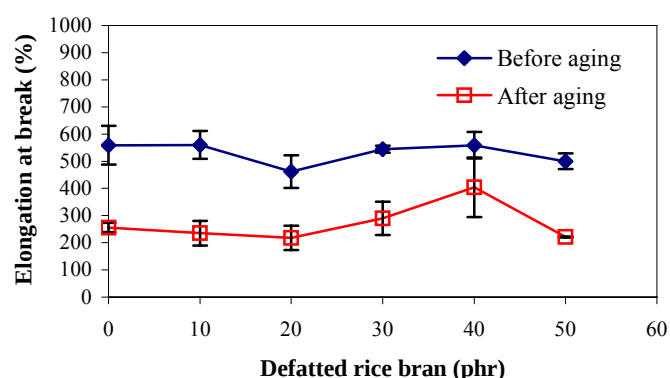
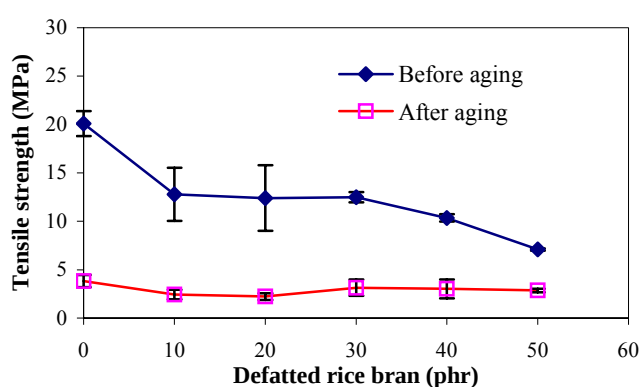
จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อปริมาณรัสกัตน้ำมันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง แต่ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งการที่ความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณรัสกัตน้ำมันเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะว่ารัสกัตน้ำมันไปยับยั้งความสามารถในการตกผลึกเมื่อถูกดึงยืด (Strain induced crystallization) ของยางธรรมชาติ เนื่องจากปกติยางธรรมชาติเป็นยางที่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านทานแรงดึงสูง [12]

ส่วนผลของปริมาณรัสกัตน้ำมันต่อค่าความแข็งและค่ามอดูลัส พบว่าค่าทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรัสกัตน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น แสดงว่ารัสกัตนั้นเป็นสารตัวเติมที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติการคงรูปที่ค่าทอร์คของยางผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติเริ่มต้น

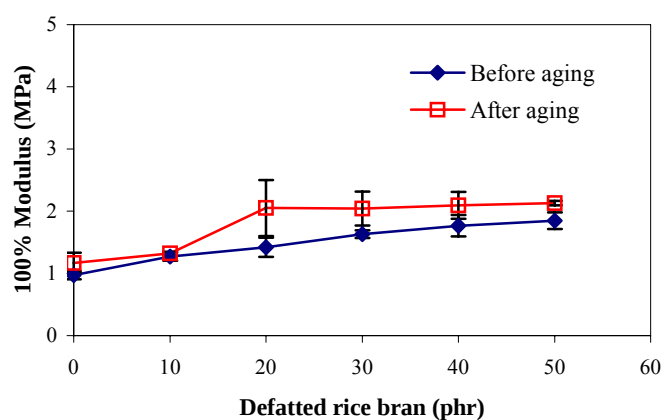
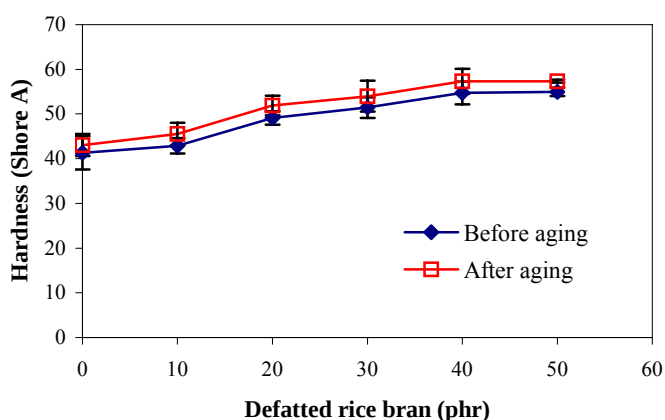
จากรูปพบว่าความต้านทานการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของรัสกัตน้ำมัน ซึ่งโดยทั่วไปยางที่มีความสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด (Strain induced crystallization) จะทำให้แรงที่ได้รับกระจายออกเนื่องจากผลึก ทำให้ความต้านทานการฉีกขาดสูง [13] ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่ารัสกัตน้ำมันไปขัดขวางความสามารถตกผลึก (Strain induced crystallization) ของยางธรรมชาติ จึงทำให้ความต้านทานการฉีกขาดของยางลดลงเมื่อเติมรัสกัตน้ำมัน ในขณะที่ความ

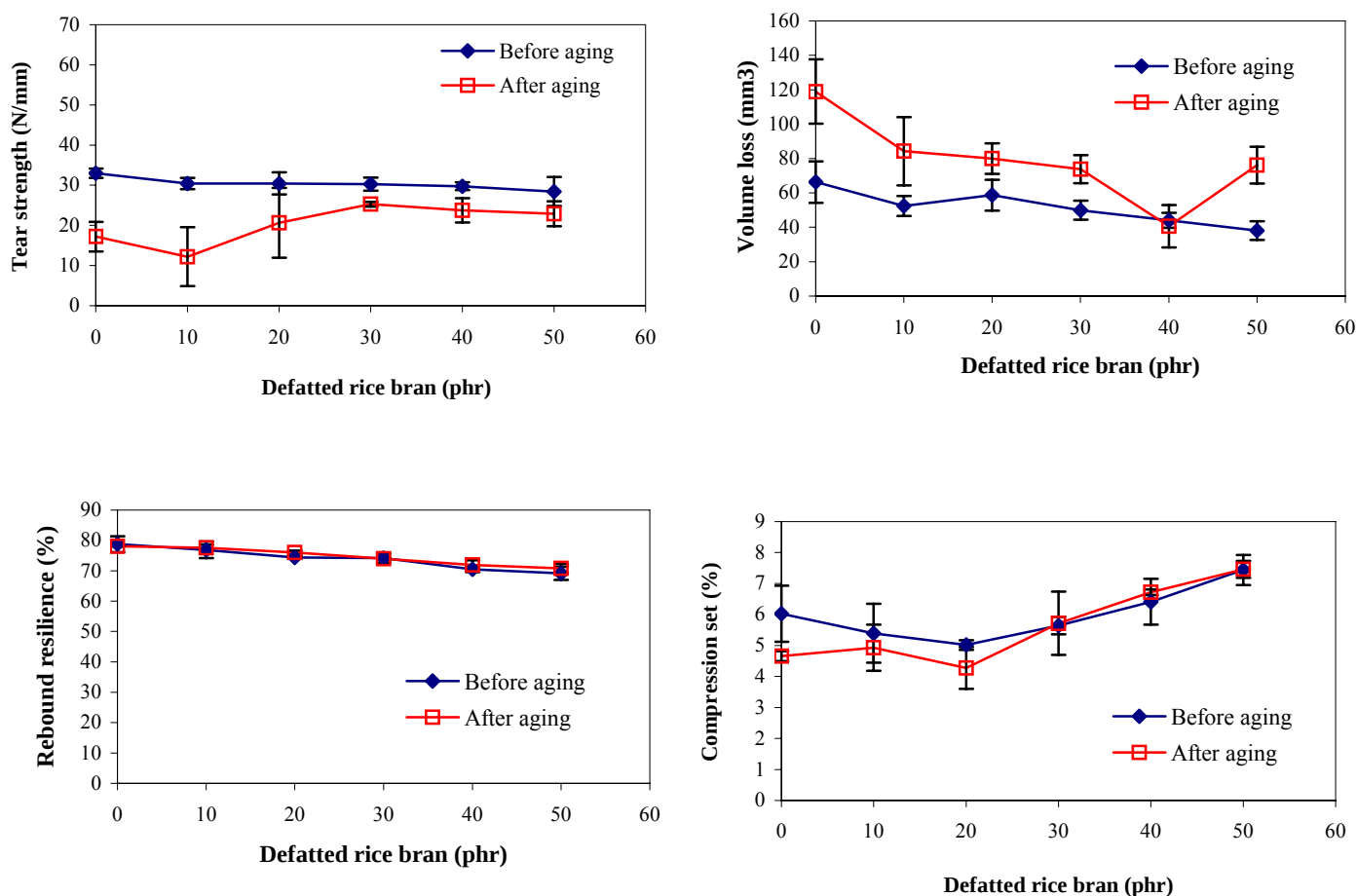
ด้านทานการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่แสดงปริมาณที่หายไปของชิ้นทดสอบหลังการขัดถูมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณรำสกัดน้ำมัน แสดงว่ารำสกัดน้ำมันส่งผลให้ยางมีค่าความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น

สำหรับผลการทดสอบค่าการกระเดื่องกระดอนกับค่าการเสียดรูปหลังการกดอัด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณรำสกัดน้ำมันทำให้การกระเดื่องกระดอนตัวลดลง สอดคล้องกับค่าการเสียดรูปหลังการกดอัดที่พบว่ามีค่าสูงขึ้นตามปริมาณรำสกัดน้ำมันที่เพิ่มขึ้น แสดงว่ารำสกัดน้ำมันที่เติมลงไปไปแทนที่เนื้อยาง ทำให้ยางสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่น ทำให้ความสามารถในการคืนรูปหลังการกดอัดและความสามารถในการกระเดื่องกระดอนตัวของยางผสมรำสกัดน้ำมันมีค่าลดลง



รูปที่ 4 ผลการวัดคุณสมบัติของยางผสมรำสกัดน้ำมันที่เติมในปริมาณ 0-50 phr

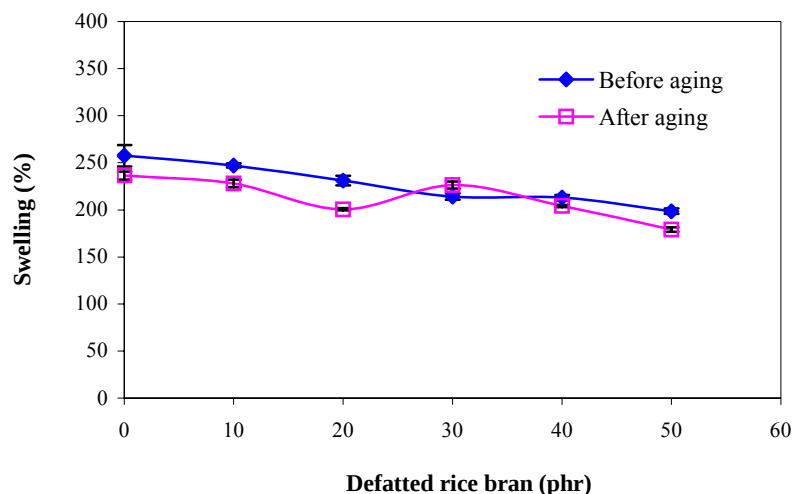




รูปที่ 4 (ต่อ) สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมันในปริมาณ 0-50 phr

5.2.4 ผลของปริมาณรำสกัดน้ำมันต่อการบวมพอง

เพื่อศึกษาผลของปริมาณรำสกัดน้ำมันต่อพฤติกรรมการบวมพองของยาง ทำโดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในโทลูอินจนน้ำหนักของชิ้นทดสอบคงที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้เวลาที่ใช้แช่ชิ้นทดสอบในโทลูอินจนน้ำหนักคงที่คือ 48 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณรำสกัดในยางมากขึ้น การบวมพองจะมีค่าลดลง อาจเป็นเพราะว่ารำสกัดน้ำมันที่ผสมอยู่ในเนื้อยางไปขัดขวางการแพร่ผ่านของโทลูอิน ทำให้ยางมีความต้านทานการบวมพองมากขึ้น โดยที่ยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมันปริมาณ 50 phr ให้ค่าการบวมพองน้อยที่สุด



รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางผสมรำสกัดน้ำมันในปริมาณ 0-50 phr

5.2.5 ผลของรำสกัดน้ำมันต่อสมบัติการทนต่อความร้อน

เพื่อศึกษาผลของรำสกัดน้ำมันต่อสมบัติการทนต่อความร้อนของยาง จึงนำชิ้นตัวอย่างไปบ่มแรงในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและการบวมพอง ผลแสดงดังรูปที่ 4-5 และตารางที่ 5 ซึ่งแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ หลังการบ่มแรง พบว่ายางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมันมีค่าความต้านทานแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดลดลงหลังการบ่มแรง ในขณะที่ค่ามอดูลัสและความแข็งหลังบ่มแรงมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการบ่มแรงทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้ยางแข็งขึ้น [14] ซึ่งสอดคล้องกับค่าการบวมพองที่มีค่าลดลงหลังการบ่มแรง แสดงว่ายางเกิดพันธะเชื่อมโยงมากขึ้นภายหลังการบ่มแรง เนื่องจากการบวมพองสัมพันธ์กับปริมาณการเชื่อมโยง คือ ถ้าการบวมพองน้อยแสดงว่ายางมีปริมาณการเชื่อมโยงสายโซ่มาก

ส่วนค่าความต้านทานการฉีกขาดและความต้านทานการสึกหรอมีค่าลดลงหลังการบ่มแรง สำหรับค่าการเสียรูปหลังการกดอัดพบว่าการใช้รำสกัดน้ำมันในช่วง 0-20 phr ส่งผลให้การเสียรูปหลังการกดอัดลดลง อาจเนื่องมาจากยางมีการเชื่อมโยงมากขึ้นหลังบ่มแรงทำให้การเสียรูปหลังการกดอัดน้อยลง เนื่องจากโดยทั่วไปยางที่มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงปริมาณมากจะมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำกว่ายางที่มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงน้อยกว่า [13] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณรำสกัดน้ำมันไปถึง 30-50 phr พบว่าค่าการเสียรูปหลังการกดอัดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับค่าการกระด้างกระดอนตัวของยางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมันที่พบว่าการกระด้างกระดอนตัวไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการบ่มแรง

ตารางที่ 5 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสมบัติของยางผสมร่าสกัค่น้ำมัน (0-50 phr) หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

Mechanical Properties	ค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล (%)					
	0 (phr)	10 (phr)	20 (phr)	30 (phr)	40 (phr)	50 (phr)
Tensile strength (MPa)	-80.93	-80.99	-81.90	-74.75	-70.77	-59.59
Elongation at break (%)	-54.16	-58.03	-52.81	-46.78	-27.75	-55.80
100% Modulus	20.20	4.20	44.36	25.36	18.49	15.34
Hardness (Shore A)	4.22	6.18	5.68	4.94	4.68	4.34
Tear strength (N/m)	-47.83	-59.86	-32.17	-16.40	-20.18	-19.50
Abrasion resistance -Volum loss (mm ³)	79.42	60.73	36.16	47.86	-8.00	100.09
Rebound resilience (%)	-0.84	0.91	2.13	-0.29	2.13	2.31
Compression set (%)	-22.74	-8.65	-14.76	1.30	4.79	0.27
Swelling (%)	-8.18	-7.76	-13.18	5.61	-4.15	-9.79

5.3 เปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

5.3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารตัวเติม

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติของยางธรรมชาติ โดยศึกษาสารตัวเติม 3 ชนิดดังนี้ รำสกัดน้ำมัน (Defatted rice bran) ที่ร่อนผ่านตระแกรงขนาด 150 mesh แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และเคลย์ (Clay) โดยทั่วไปสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กจะให้การเสริมแรงที่ดี เพราะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักสูง จึงทำให้พื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคปฐมภูมิของสารตัวเติมนิยมทำโดยการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ เทคนิคที่นิยมใช้คือ BET [3] ผลการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวเติมทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 6 พบว่าสารตัวเติมทั้งสามชนิดมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า $10 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารตัวเติมไม่เสริมแรง เนื่องจากสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงจะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 0 ถึง $10 \text{ m}^2/\text{g}$ [3] โดยที่ Clay จะมีค่ามากที่สุด ส่วนรำสกัดน้ำมัน มีค่าใกล้เคียงกับ CaCO_3 นอกจากนั้นยังพบว่า Clay มีปริมาณรูพรุนมากกว่า CaCO_3 และรำสกัดน้ำมัน ตามลำดับ ส่วนขนาดของรูพรุน Clay และ CaCO_3 มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่ารำสกัดน้ำมัน

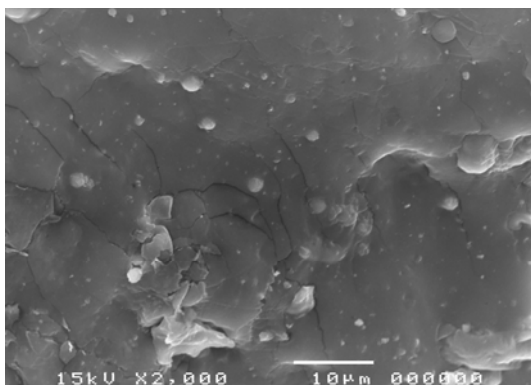
ตารางที่ 6 สมบัติกายภาพของสารตัวเติมต่างๆ

Filler types	Specific surface area (m^2/g)	Pore volume (cc/g)	Pore diameter ($^{\circ}\text{A}$)
Defatted Rice bran	4.63	0.0074	64.09
Clay	5.83	0.0182	124.80
CaCO_3	4.46	0.0136	122.00

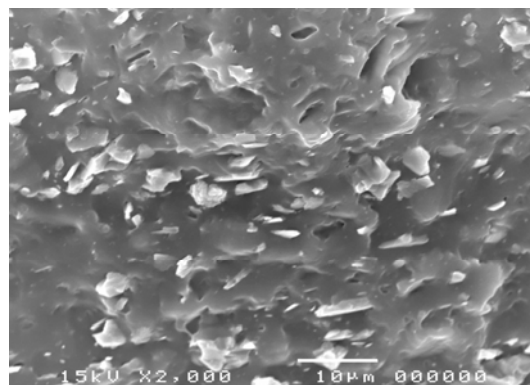
5.3.2 การตรวจสอบหลักฐานวิทยา

รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่ายางผสม Clay และ CaCO_3 จะมีความหนาแน่นของสารตัวเติมมากกว่ายางผสมรำสกัดน้ำมัน อาจเนื่องมาจากสารตัวเติมทั้งสองชนิดมีรูพรุนมากกว่าจึงมีน้ำหนักเบากว่ารำสกัดน้ำมัน ทำให้ยางผสม Clay และ CaCO_3 มีจำนวนอนุภาคสารตัวเติมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มากกว่า สำหรับยางผสมรำสกัดน้ำมันจะพบสารตัวเติมแทรกตัวอยู่ในเนื้อยางได้ดี แต่ยังพบการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนบางส่วน จากรูปแล้วไม่สังเกตเห็นช่องว่างระหว่างเฟสขนาดใหญ่เกิดขึ้น แสดงว่ารำสกัดน้ำมันสามารถผสมเข้ากับยางได้ดีระดับหนึ่ง สำหรับยางผสม Clay และ CaCO_3 จะพบสารตัวเติมกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี แต่สารตัวเติมทั้งคู่ฝังตัวอยู่ในเนื้อยางได้น้อยกว่ารำสกัดน้ำมัน เนื่องจากจะสังเกตเห็นอนุภาคของสารตัวเติม

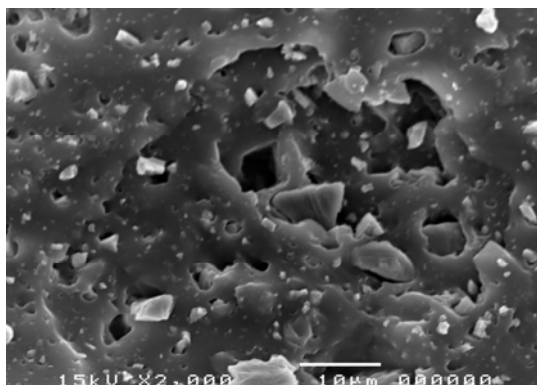
ทั้งสองหลุดออกมาอยู่นอกเนื้ออย่างค้ำว โดยเฉพาะยางผสม CaCO_3 จะพบอนุภาคสารตัวเดิมหลุดออกมาอยู่นอกเนื้ออย่างผสมอย่างชัดเจน และมีช่องว่างระหว่างเฟสขนาดใหญ่ แสดงถึงความสามารถยึดเกาะกับเนื้ออย่างได้น้อย



Rubber/Defatted rice bran



Rubber/Clay



Rubber/ CaCO_3

รูปที่ 6 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของยางผสมสารตัวเดิมชนิดต่างๆที่ปริมาณการผสม 50 phr (กำลังขยาย 2,000 เท่า)

5.3.3 ผลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติการคงรูป

ตารางที่ 7 แสดงสมบัติการคงรูปของยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าเมื่อผสมสารตัวเติมลงไปอย่างธรรมชาติ ส่งผลให้ค่าทอร์กต่ำสุด และค่าทอร์กสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยที่ยางผสมราสกัดน้ำมันให้ค่าทั้งสองมากที่สุดรองลงมาคือ Clay และ CaCO_3 ตามลำดับ และยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดมีค่า Scorch time และ Cure time ลดลง ซึ่งค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมราสกัดน้ำมันมีค่าน้อยที่สุด ส่วนยางผสม Clay และ CaCO_3 ให้ค่าทั้งสองมากกว่า เนื่องมาจากสารตัวเติม Clay และ CaCO_3 มีรูพรุนของพื้นผิวสูงกว่า อาจมีผลทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้ช้ากว่าเพราะสารตัวเร่งที่ใช้ในระบบการคงรูปถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากกว่า

ตารางที่ 7 สมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ปริมาณการผสม 50 phr

Filler types	ML (dN.m)	MH (dN.m)	Scorch time, T_{s_2} (min)	Cure time, T_{90} (min)
No filler	0.90	13.49	3.30	8.08
Defatted rice bran	2.66	21.44	2.16	4.18
Clay	1.76	18.01	3.23	6.35
CaCO_3	1.93	20.29	3.03	6.31

5.3.4 ผลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกล

จากตารางที่ 8 พบว่าการเติมสารตัวเติมในยางคอมปาวด์ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง โดยยางที่ผสม Clay จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดดีที่สุด รองลงมาคือยางผสมราสกัดน้ำมัน และ CaCO_3 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก Clay มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ทำให้มีพื้นที่ที่เกิดกระทำระหว่างยางกับสารตัวเติมสูงกว่าการใช้สารตัวเติมชนิดอื่น ส่วนยางที่ผสม CaCO_3 จะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นเพราะว่า CaCO_3 มีขนาดอนุภาคใหญ่ และจากผลของโครงสร้างสัณฐานพบว่า CaCO_3 ผสมเข้ากับเนื้อยางได้ไม่ดี เกิดช่องว่างระหว่างเฟสยางกับสารตัวเติมขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดไม่ดี

สำหรับผลของชนิดสารตัวเติมต่อค่ามอดูลัสและความแข็ง จากตารางที่ 8 พบว่าการเติมสารตัวเติมทำให้ยางผสมมีค่าทั้งสองเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ยางผสมราสกัดน้ำมันให้ค่ามอดูลัสและความแข็งมากที่สุด รองลงมา คือ ยางผสม CaCO_3 และ Clay ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบสัมพันธ์กับค่าทอร์กต่ำสุดและสูงสุดในตารางที่ 7 ที่พบว่ายางผสมราสกัดน้ำมันมีค่าทอร์กมากที่สุด รองลงมาคือยางผสม CaCO_3 และ Clay ตามลำดับ

ตารางที่ 8 สมบัติเชิงกลและการบวมพองของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆที่ปริมาณการผสม 50 phr ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่ง

Mechanical Properties	Filler types			
	No filler	Rice bran	Clay	CaCO ₃
Tensile strength (MPa)	20.09±1.29 (3.83±0.63) [-80.93]	7.09±0.13 (2.87±0.19) [-59.59]	17.50±0.53 (4.50±0.19) [-74.28]	4.39±0.72 (2.77±0.31) [-36.98]
Elongation at break (%)	559±71 (256±17) [-54.16]	500±28 (221±1) [-55.80]	594±1 (404±101) [-32.01]	360±29 (201±1) [-44.23]
100% Modulus (MPa)	0.97±0.07 (1.17±0.16) [20.20]	1.85±0.14 (2.13±0.04) [15.34]	1.80±0.53 (2.26±0.01) [25.05]	1.44±0.15 (1.74±0.02) [20.83]
Hardness (Shore A)	41.30±3.73 (43.05±2.48) [4.22]	54.97±0.91 (57.35±0.33) [4.34]	48.39±1.23 (52.07±0.12) [7.59]	51.25±2.84 (53.25±4.21) [3.89]
Tear strength (N/mm)	39.97±1.17 (17.20±3.68) [-47.83]	28.44±3.59 (22.90±3.10) [-19.50]	32.25±0.64 (33.22±4.21) [3.01]	23.83±3.01 (18.06±1.22) [-24.20]
Abrasion resistance -Volume loss (mm ³)	66.27±12.08 (118.90±18.74) [79.42]	38.05±5.35 (76.14±10.72) [100.09]	51.08±4.95 (35.48±7.81) [-30.55]	50.92±5.07 (89.28±17.75) [75.33]
Rebound resilience (%)	78.77±2.64 (78.10±0.00) [-0.84]	69.15±2.19 (70.75±1.48) [2.31]	71.85±2.33 (73.40±1.70) [2.16]	76.50±1.41 (77.35±0.07) [1.11]
Compression set (%)	6.02±0.90 (4.65±0.16) [-22.74]	7.44±0.49 (7.46±0.28) [0.27]	22.48±1.60 (6.04±0.10) [-73.11]	14.49±1.82 (4.16±0.16) [-71.32]
Swelling (%)	257.44±11.48 (236.39±4.28) [-8.18]	198.48±2.89 (179.18±18.86) [-9.79]	212.12±1.09 (179.18±18.86) [-15.53]	198.29±1.09 (179.89±20.05) [-9.28]

() = สมบัติหลังการบ่มเร่ง

[] = เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลง

ในขณะที่การเติมสารตัวเติมมีผลทำให้ยางมีค่าความต้านทานการฉีกขาดลดลง โดยที่ยางผสม Clay จะให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดมากที่สุด รองลงมาคือยางผสมรำสัคน้ำมัน และ CaCO_3 ตามลำดับ ในทางกลับกันการเติมสารตัวเติมทั้งสามชนิดมีผลทำให้ความต้านทานการสึกหรอของยางธรรมชาติดีขึ้น สืบเนื่องจากค่าปริมาตรที่สูญหายไปจากการอัดในตารางที่ 8 พบว่า ปริมาตรที่สูญหายไปในการทดสอบการสึกหรอมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสารตัวเติม โดยที่ยางผสมรำสัคน้ำมันมีปริมาตรที่หายไปน้อยที่สุด หรือกล่าวได้ว่า ยางผสมรำสัคน้ำมันมีค่าความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด อาจเป็นเพราะว่ารำสัคน้ำมันมีอนุภาคค่อนข้างกลม และสามารถฝังตัวอยู่ในเนื้อยางได้ดี ทำให้ยางผสมรำสัคน้ำมันทนต่อการขัดถูดีกว่ายางผสม Clay และ CaCO_3

ส่วนผลของสารตัวเติมต่อค่าการกระเดื่องกระดอนพบว่า การเติมสารตัวเติมส่งผลให้ค่าการกระเดื่องกระดอนของยางลดลง โดยที่ยางผสม CaCO_3 ให้ค่าการกระเดื่องกระดอนตัวดีที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่จะให้ค่าการกระเดื่องกระดอนตัวสูงกว่าการใช้สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็ก [15] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองดังกล่าว เนื่องมาจากผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะในตารางที่ 6 ที่แสดงว่า CaCO_3 มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด และผลของสารตัวเติมต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัดพบว่ายางผสม Clay มีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดมากที่สุดรองลงมา คือ ยางผสม CaCO_3 และยางผสมรำสัคน้ำมันตามลำดับ โดยที่ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดของยางผสมรำสัคน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม แสดงว่ายางผสมรำสัคน้ำมันสามารถรักษาสสมบัติการคืนตัวหลังการกดอัดไว้ได้ดีกว่าการใช้ Clay และ CaCO_3

จากตารางจะพบว่ายางที่ผสมสารตัวเติมทั้งสามชนิดให้ค่าการบวมพองน้อยกว่ายางที่ไม่ผสมสารตัวเติม แสดงว่ายางผสมสารตัวเติมมีสมบัติทนต่อการบวมพองดีขึ้น โดยที่ยางผสมรำสัคน้ำมัน และ CaCO_3 มีค่าการบวมพองใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่ายางผสม Clay การที่ยางผสม Clay มีค่าการบวมพองมากที่สุดเมื่อเทียบกับยางผสมสารตัวเติมชนิดอื่น อาจเป็นเพราะว่า Clay เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดและปริมาณของรูพรุนมากที่สุด เป็นไปได้ว่าสารตัวเร่งที่ใช้ในระบบการคงรูปถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนได้มากกว่า ส่งผลให้ปริมาณการคงรูปของยางผสม Clay น้อยกว่า เมื่อปริมาณการคงรูปของยางเกิดขึ้นน้อยกว่าทำให้ยางเกิดการบวมพองได้มากกว่านั่นเอง

5.3.6 ผลของชนิดสารตัวเติมต่อสมบัติการทนต่อความร้อน

จากตารางที่ 8 พบว่าการบ่มเร่งยางด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง มีผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงพันธะจากปฏิกิริยาการคงรูปเพิ่มขึ้นอีก สืบเนื่องจากค่าการบวมพองที่พบว่ามีค่าลดลงหลังการบ่มเร่ง แสดงว่ายางมีปริมาณการเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้ค่ามอดูลัส และความแข็งของยางมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ยางแข็งขึ้นส่งผลให้ยางถูกดึงยืดแล้วขาดเร็วขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดของยางลดลง จากตารางพบว่ายางธรรมชาติ

ผสมรำสกัดน้ำมันและยางผสม CaCO_3 มีค่าความต้านทานแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดหลังการบ่มแรงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางผสม Clay ให้ค่าทั้งสองหลังการบ่มแรงมากที่สุด

สำหรับผลของสารตัวเติมต่อความต้านทานการฉีกขาดหลังการบ่มแรงพบว่า ยางผสม Clay มีค่าความต้านทานการฉีกขาดไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนยางผสมรำสกัดน้ำมัน และยางผสม CaCO_3 มีค่าความต้านทานการฉีกขาดลดลงและการผสมสารตัวเติมลงในยางธรรมชาติส่งผลให้ยางมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการฉีกขาดน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม ส่วนค่าความต้านทานการสึกหรอพบว่ายางผสม Clay มีปริมาตรที่หายไปของชิ้นตัวอย่างจากการขัดถูน้อยกว่าหลังการบ่มแรง นั่นคือมีความต้านทานการสึกหรอมากขึ้น ในขณะที่ยางธรรมชาติและยางผสมสารตัวเติมอื่นมีค่าความต้านทานการสึกหรอลดลงเนื่องจากมีปริมาตรที่หายไปจากการขัดถูเพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรง โดยยางผสมรำสกัดน้ำมันมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานการสึกหรอมากที่สุด

สำหรับค่าการกระเดื่องกระดอนพบว่ายางธรรมชาติและยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมมีค่าการกระเดื่องกระดอนไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการบ่มแรง เมื่อพิจารณาผลของสารตัวเติมต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัดพบว่ายางผสม Clay และ CaCO_3 มีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดลดลง ในขณะที่ยางผสมรำสกัดน้ำมันมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดไม่เปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรง

(6) สรุป

6.1 ผลของขนาดอนุภาครำสกัดน้ำมันต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

รำสกัดน้ำมันที่นำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติมีรูปร่างเป็นทรงกลม ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 2-5 ไมโครเมตร โดยที่รำสกัดน้ำมันที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมชจะมีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่ารำที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 และ 100 เมช สำหรับการเปรียบเทียบขนาดของรำต่อสมบัติเชิงกลพบว่า รำสกัดน้ำมันที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมชให้ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดน้อยที่สุด

6.2 ผลของปริมาณรำสกัดน้ำมันต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

เมื่อเพิ่มปริมาณรำสกัดน้ำมันส่งผลให้เวลาในการคงรูปและการบวมพองของยางลดลง จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า การเพิ่มปริมาณรำสกัดน้ำมันจะทำให้ยางมีค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความกระเดื่องกระดอนลดลง ในขณะที่ค่าความแข็ง โมดูลัส ความต้านทานการสึกหรอ ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนระยะยืดเมื่อขาดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำยางไปทดสอบสมบัติความทนต่อความร้อนพบว่า หลังการบ่มแรงยางมีค่าความต้านทานแรงดึง ระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการสึกหรอลดลง ขณะที่ความแข็งและค่าโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการเสียรูปหลังการกดอัดจะมีค่า

ลดลงเมื่อใช้ร่าสกัดน้ำมันปริมาณ 0-20 phr แต่หลังจากนั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับสมบัติการกระเด็งกระดอนตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการบ่มเร่ง

6.3 เปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติมต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

จากการดูฐานฐานวิทยาพบว่ายางผสม Clay และ CaCO_3 มีปริมาณของสารตัวเติมต่อหน่วยพื้นที่มากกว่ายางผสมร่าสกัดน้ำมัน แต่ร่าสกัดน้ำมันสามารถแทรกตัวเข้ากับยางได้ดี ส่วนยางผสม CaCO_3 จะพบช่องว่างระหว่างเฟสของยางกับสารตัวเติมขนาดใหญ่ และยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดใช้เวลาในการคงรูปสั้นลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติม โดยที่ยางผสมร่าสกัดน้ำมันใช้เวลาในการคงรูปน้อยที่สุด ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ายางผสมร่าสกัดน้ำมันมีค่าความแข็งแรง โมดูลัส ความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด นอกจากนั้นยังมีค่าเสียรูปหลังการกดอัดน้อยที่สุดซึ่งหมายถึงยางสามารถคืนรูปหลังการกดอัดได้ดี สำหรับยางผสม Clay จะให้ค่าความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และระยะยืดเมื่อขาดดีที่สุด ส่วนยางผสม CaCO_3 ให้ค่าการกระเด็งกระดอนดีที่สุด เมื่อนำยางไปบ่มเร่งเพื่อทดสอบสมบัติความทนต่อความร้อนพบว่ายางผสมสารตัวเติมมีค่าความแข็งแรง และโมดูลัสเพิ่มขึ้น โดยที่ยางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดจะเกิดการบวมพองน้อยลงหลังการบ่มเร่ง ยางผสมร่าสกัดน้ำมันมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดไม่เปลี่ยนแปลงไปจากก่อนการบ่มเร่ง ในขณะที่ยางผสม Clay มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าระยะยืดเมื่อขาด ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการสึกหรอหลังการบ่มเร่งน้อยที่สุด ส่วนยางผสม CaCO_3 มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด สำหรับค่าการกระเด็งกระดอนพบว่ายางผสมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญไปจากก่อนบ่มเร่ง

เมื่อเปรียบเทียบราคาของร่าสกัดน้ำมันกับราคาของ Clay และ CaCO_3 พบว่า Clay มีราคาแพงที่สุดคือ 17 บาทต่อกิโลกรัม รองลงมาคือ CaCO_3 มีราคา 8 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนร่าสกัดน้ำมันมีราคาถูกที่สุดคือ 6.5 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งยางผสมร่าสกัดน้ำมันมีสมบัติที่ดีกว่ายางผสม CaCO_3 แต่มีสมบัติบางอย่างสู้ยางผสม Clay ไม่ได้ แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องราคาแล้วจะเห็นว่าร่าสกัดน้ำมันมีราคาถูกกว่า Clay ดังนั้นร่าสกัดน้ำมันจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนในยางได้ กรณีที่ผลิตภัณฑ์นั้นไม่ต้องการสมบัติที่ดีเป็นพิเศษ ซึ่งถือเป็นการนำผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และยังเป็นการลดมลภาวะได้ทางหนึ่งด้วยเนื่องจากร่าสกัดน้ำมันเป็นวัสดุทางธรรมชาติที่ช่วยส่งเสริมกระบวนการย่อยสลายทางธรรมชาติ แต่อย่างไรก็ตามยางผสมร่าสกัดน้ำมันหลังคงรูปแล้วจะมีสีน้ำตาล จึงไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีขาว

(7) ข้อเสนอแนะ

การใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติจะมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาเก็บรักษา เนื่องจากร่าสกัดน้ำมันสามารถเกิดเชื้อราและมอดได้เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน

ประเด็นวิจัยใหม่

- ศึกษาการใช้ร่าสกัดน้ำมันที่ปริมาณมากกว่า 50 phr
- ศึกษาการคงรูปยางธรรมชาติผสมร่าสกัดน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส เพื่อลดโอกาสการเสียสภาพของร่าสกัดน้ำมัน
- ศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)
- ศึกษาการนำยางธรรมชาติผสมร่าสกัดน้ำมันมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ยางปูพื้น

(8) เอกสารอ้างอิง

1. อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. **ข่าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.** ศูนย์สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. วิทวัช โมพี และคณะ. 2545. **ผลของการใช้ร่าสกัดน้ำมันในอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของไก่เนื้อ.** วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, 9, 190-196.
3. พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. **สารเคมียาง.** ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค)
4. Mostafa, A., Abouel-Kasem, A., Bayoumi, M.R. and El-Sebaie, M.G. 2009. **Effect of carbon black loading on the swelling and compression set behavior of SBR and NBR rubber compounds.** Materials and Design, 30, 1561-1568.
5. บุญยรัตน์สุภาและวิริญญา แก้ววัฒนะ. 2551. **การพัฒนาแผ่นยางปูพื้นสนามเด็กเล่น.** วิจัยยางพารา เล่มที่ 3. โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่ายุคอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 79-91.
6. Chotirat, L., Chaochanchaikul, K. and Sombatsompop, N. 2007. **On adhesion mechanisms and interfacial strength in acrylonitrile-butadiene-styrene/wood sawdust composites.** International Journal of Adhesion & Adhesives, 27, 669-678.
7. Puprasert, C. and Poonsawat, C. 2005. **Physical and mechanical properties polymer blends of natural rubber and cassava starch,** 31st Congress on Science and Technology of Thailand.
8. Carvalho, A.J.F., Job, A.E., Alves, N., Curvelo, A.A.S. and Gandini, A. 2003. **Thermoplastic starch/natural rubber blends.** Carbohydrate Polymers, 53, 95-99.

9. Yew, G.H., Mohd Yusof, A.M., Mohd Ishak, Z.A. and Ishiaku, U.S. 2005. **Water absorption and enzymatic degradation of poly (lactic acid)/rice starch composites**. Polym. Degrad. Stab., 90, 488-500.
10. Amar, K. , Wu and Susan. 2006. **Novel “green” materials from soy meal and natural rubber blends**. US Patent 20060041036, Feb 23.
11. Kuriakose, A.P. and Rajendran, G. 1995. **Rice bran oil as a novel compounding ingredient in sulphur vulcanization of natural rubber**. Eur. Polym. J., 31, 595-602.
12. พงษ์ธร แซ่อู๋. 2547. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค)
13. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. ยาง: เทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
14. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ. 2551. สมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีถั่วลันเตาเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคู่ควบไซเลน Si69 ปรับปรุงผิวถั่วลันเตา. วิจัยยางพารา เล่มที่ 3. โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ้ายอุตสาหกรรม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 205-212.
15. บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ. 2530. สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ภาคผนวก

คำชี้แจงของนักวิจัยต่อข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ
‘การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน’ สัญญาเลขที่ RDG5150042

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ
‘การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมรำสัคน้ำมัน’ สัญญาเลขที่ RDG5150042

ความเห็นด้านการพิมพ์

1. ตรวจสอบคำผิด เช่น บทคัดย่อ, หน้า 4, หน้า 6, หน้า 11 เป็นต้น และการพิมพ์คำว่า CaCO_3 ควรพิมพ์ให้ถูกต้องในทุกที่
คำชี้แจง ได้ตรวจสอบและแก้ไขแล้ว
2. ตรวจสอบความหมายที่ถูกต้องของรายงาน
 - Rebound resilience คือ การกระดอน ไม่นำใช้กระดิ่งกระดอน
คำชี้แจง นักวิจัยใช้คำว่ากระดิ่งกระดอน โดยอ้างอิงมาจากหนังสือ “ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ” เขียนโดย ดร.พงษ์ธร แซ่ฮุย และ รศ.ดร. ชาศริต สิริสิงห์, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
 - การดกผลึกควรใส่ภาษาอังกฤษด้วย เพราะการแปลมาเป็นภาษาไทยโดยตรงอาจไม่ถูกความหมาย หรือทำให้ผู้อ่านเข้าใจผิดได้
คำชี้แจง ได้แก้ไขแล้วดังหน้า 13
 - หน้า 11 ตะแกรงขนาด 150 mesh มีช่องหรือมีขนาดช่องบนตะแกรงเล็กกว่าขนาด 80 หรือ 100 mesh
คำชี้แจง ได้แก้ไขแล้วดังหน้า 11
3. บทคัดย่อภาษาไทย ไม่ต้องขึ้นต้นด้วยคำว่า “งานวิจัยนี้เป็น.....”
คำชี้แจง ได้แก้ไขในบทคัดย่อแล้ว
4. หน้า 2 หัวข้อทฤษฎี สารตัวเดิมคือ “สารที่เดิม...และบรรทัดที่ 2 จากด้านล่าง สารตัวเดิมแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สารตัวเดิมสีดำ และสารตัวเดิมที่ไม่ใช่สีดำ โปรดตรวจสอบให้ถูกต้อง
คำชี้แจง ได้แก้ไขจากสารตัวเดิมคือองค์ประกอบ... เป็นสารตัวเดิมคือสารที่เดิม... และในส่วนของบรรทัดที่ 2 จากด้านล่าง ข้อความดังกล่าวที่นักวิจัยได้เขียนโดยอ้างอิงตามเอกสารหมายเลข 3 และได้เขียนหมายเลขเอกสารอ้างอิงกำกับด้วย
5. หน้า 8 คำอธิบายสัญลักษณ์ได้สมการแรก ควรใส่หน่วยกำกับด้วย เช่น กรัม
คำชี้แจง ได้แก้ไขแล้วโดยใส่หน่วย มิลลิกรัม กำกับดังหน้า 8
6. หน้า 8 ตรวจสอบสมการของข้อ 4.2.6 อย่างไรก็ตามการรายงานผลค่าสมบัติต่างๆหลังการบ่มเร่ง ตามที่นิยมใช้จะระบุค่าลงไปตรงๆ และ/หรือคำนวณค่าที่เปลี่ยนไปเป็นบวกหรือลบจากค่าเดิม ซึ่งหน่วยก็จะขึ้นอยู่กับสมบัตินั้นๆ

คำชี้แจง ได้แก้ไขแล้วดังหน้า 8 โดยเปลี่ยนการรายงานผลสมบัติต่างๆหลังการบ่มเร่งเป็น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นบวกหรือลบจากค่าเดิม

7. หน้า 10 รูปแรกคืออะไร

คำชี้แจง รูปแรกหน้า 10 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติมนักวิจัยได้เปลี่ยนคำอธิบายได้รูปจาก No filler เป็น NR

8. หน้า 11 ตารางที่ 3 ควรรายงานค่าสมบัติต่างๆที่ไม่ได้เติม Filler ด้วย และให้ตรวจสอบ

ยืนยันค่า tensile ทุกค่าไม่น่าจะถูกต้อง เพราะค่า tensile ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

คำชี้แจง ได้เพิ่มเติมค่าสมบัติต่างๆที่ไม่ได้เติม Filler ลงในตารางที่ 3 หน้า 11 และตรวจสอบค่า tensile แล้ว สาเหตุที่ค่า tensile ต่ำอาจเนื่องมาจากสารตัวเติมที่ใช้จัดเป็นสารตัวเติมในกลุ่มไม่เสริมแรง จึงส่งผลให้ยางผสมสารตัวเติมมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ

9. ตารางที่ 5 ควรรายงานตามที่แนะนำในข้อ 6 และถ้าจะให้ดูง่ายขึ้น ควรนำค่าต่างๆหลังการบ่มเร่งมาเขียนกราฟเปรียบเทียบแต่ละสมบัติในกราฟที่ 4 และ 5

คำชี้แจง ได้แก้ไขตามที่แนะนำแล้วในตารางที่ 5 และได้นำค่าต่างๆหลังการบ่มเร่งมาเขียนกราฟเปรียบเทียบในกราฟที่ 4 และ 5

10. หน้า 21 ตารางที่ 8 ค่า tensile ของทุกสูตรที่เติม filler ไม่น่าจะถูกต้อง (ยกเว้น clay)

คำชี้แจง สาเหตุที่ค่า tensile ต่ำอาจเนื่องมาจากสารตัวเติมที่ใช้จัดเป็นสารตัวเติมในกลุ่มไม่เสริมแรง จึงส่งผลให้ยางผสมสารตัวเติมมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ

นักวิจัยได้พยายามตรวจสอบกับงานวิจัยอื่นพบว่า ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมยางเอสปีอาร์ที่มีเกล็ดลอยเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคู่ควบไซเลนปรับปรุงผิวเกล็ดลอย ที่สัดส่วนของ NR/SBR เท่ากับ 100/0 และเติมซิลิกาที่มีในเกล็ดลอยที่ปริมาณ 20 phr พบว่ายางผสมมีค่า tensile strength เท่ากับ 4.5 MPa ตามเอกสารอ้างอิงหมายเลข 14

11. หน้า 23 การรายงานของตารางที่ 9 กับ 8 (หน้า 21) ควรรายงานเป็นกราฟหรือตารางเดียว

และควรเป็นค่าบวกหรือลบจากค่าก่อนบ่มเร่ง จะเข้าใจได้ง่ายกว่า

คำชี้แจง ได้แก้ไขแล้ว โดยรายงานค่าสมบัติทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง รวมทั้งค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นค่าบวกหรือลบจากค่าก่อนบ่มเร่ง ไว้ในตารางที่ 8

ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)

1. ข้อเสนอแนะหน้า III และ หน้า 24, 25 นั้น ควรเสนอประเด็นที่ชัดเจน ที่ต้องทำวิจัยเพิ่มเติม ส่วนหนึ่งของข้อเสนอที่ระบุเป็นการวิจารณ์ผลมากกว่า อนึ่ง หากพบว่ารสชาติ น้ำมันแทรกตัวเข้ากับยางได้ดี แล้วทำไมจึงเสนอการใช้ plastiziser

คำชี้แจง _ในงานวิจัยพบว่าสกัดน้ำมันแทรกตัวเข้ากับยางได้ดี แต่ยังพบการเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนบางส่วน ดังที่เขียนวิจารณ์ในหน้า 18 ส่วนข้อเสนอแนะได้ปรับแก้แล้วหน้า III และหน้า 25

2. หน้า 7 ทำไมจึงระบุมาตรฐานทั้ง ISO และ ASTM มาตรฐานที่ควรใช้อ้างอิงและใช้ในการวิจัย ต้องเป็นมาตรฐานสากล (ถ้ามี) เท่านั้น ASTM และ DIN จัดเป็นมาตรฐานระดับประเทศ ไม่ใช่สากล

คำชี้แจง ในส่วนของการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด ได้ทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ISO ได้แก้ไขแล้วหน้า 7 และในการทดสอบในงานวิจัยนี้มีทั้งส่วนที่ส่งไปทดสอบยังหน่วยงานอื่น ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการสึกหรอ การเสียดสีเนื่องจากแรงกดอัด ในการทดสอบบางอย่างมาตรฐานที่ใช้ได้ระบุเป็น ASTM และ DIN กับในส่วนของการทดสอบความแข็ง การกระเดื่องกระดอนซึ่งทำการทดสอบเองที่มหาวิทยาลัยแม่โจ้จะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM

3. การใช้วัสดุสกัดน้ำมันผสมในสัดส่วนต่าง ๆ นั้น ค่าการทดสอบหลังการบ่มแรงมีค่า tensile ต่ำมาก ๆ เหลือประมาณ 2-5 MPa เท่านั้น ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ผลิตภัณฑ์ประเภทใดที่มีค่าความแข็งแรงขนาดนี้

คำชี้แจง จากผลการทดลองที่ได้ค่า tensile หลังการบ่มแรงของยางผสมวัสดุสกัดน้ำมันมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงไม่เหมาะนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง และผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานาน เนื่องจากว่าตัววัสดุสกัดน้ำมันเองเป็นวัสดุธรรมชาติที่สามารถเสื่อมสภาพได้เมื่อได้รับความร้อน แต่ข้อดีคือเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

4. เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่น ข้อ 5.3.4 กล่าวว่า “การเติม clay และวัสดุสกัดน้ำมัน ไม่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาดอย่างมีนัยสำคัญ” จริงหรือไม่ เพราะในตารางที่ 8 ค่า tensile ของวัสดุสกัดน้ำมันเท่ากับ 7.09 MPa แต่ clay เท่ากับ 17.50 MPa และเมื่อนำยางไปผ่านการบ่มแรง ค่า tensile ยิ่งต่ำเหลือเพียง 3-4 MPa เท่านั้น

คำชี้แจง ได้ตัดประโยค “การเติม clay และวัสดุสกัดน้ำมัน ไม่มีผลต่อระยะยืดเมื่อขาดอย่างมีนัยสำคัญ” ออกแล้ว และแก้ไขหน้า 20

ข้อสังเกต

1. การแสดงสมบัติทางกายภาพหลังการบ่มแรงเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เหลืออยู่ ทำให้การเปรียบเทียบค่าชัดเจน และอธิบายยากกว่าแสดงค่าจริง คือ
 - ต้องแปลงค่าหรือคำนวณค่าที่แท้จริง เพื่อทราบสมบัติของชิ้นงานหลังบ่มแรงว่าดีหรือไม่ และเหมาะสมทำผลิตภัณฑ์ชนิดใด หรือไม่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ชนิดใด

- ค่าสมบัติทางกายภาพอาจเท่ากันได้ในช่วง treatment แต่เมื่อแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เหลืออยู่จะไม่ทราบผลที่แท้จริง

คำชี้แจง ได้แก้ไขการแสดงผลดังกล่าวแล้ว เป็นค่าจริง และแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นค่าบวก หรือลบดังหน้า 14-17 และหน้า 21

2. ในการสรุปผลนั้น อาจเพิ่มเติมได้ในกรณีที่ใช้ร่าสกัดน้ำมัน มีข้อดีคือ การนำของเสียหรือของเหลือ ใช้นามาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น เป็นการลดมลภาวะและนำ by product มาใช้เป็นข้อดีอีกอย่างหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังมีข้อด้อยกว่า CaCO_3 ในกรณีที่ได้ผลิตภัณฑ์มีสีไม่สวย

คำชี้แจง ได้เพิ่มเติมเข้าไปในส่วนของสรุปแล้ว