



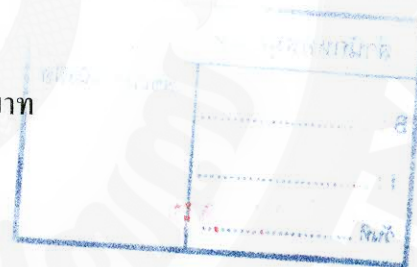
รายงานผลการวิจัย

เรื่อง โฟมยางรองกันกระแทกจากยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน

Natural Rubber Filled with Defatted Rice Bran Cushioning Foam

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2559

จำนวน 167,000 บาท



หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตรีญญา มูลชัย

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

16 /11/2560

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ก
บทคัดย่อ	1
Abstract	1
กิตติกรรมประกาศ	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์การวิจัย	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	24
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	38
สรุปผลการวิจัย	57
เอกสารอ้างอิง	58

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	องค์ประกอบทางเคมีของรำหยาบและรำละเอียดจากข้าว	12
ตารางที่ 2	สูตรยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณต่าง ๆ	31
ตารางที่ 3	สูตรยางทำมาสเตอร์แบชสารตัวเติม 70%	32
ตารางที่ 4	สมบัติการวัดคาในซ์ของยางโฟมที่ชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองต่าง ๆ	39
ตารางที่ 5	สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ OBSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง	56

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1	5
ภาพที่ 2	8
ภาพที่ 3	11
ภาพที่ 4	13
ภาพที่ 5	14
ภาพที่ 6	15
ภาพที่ 7	17
ภาพที่ 8	19
ภาพที่ 9	20
ภาพที่ 10	20
ภาพที่ 11	21
ภาพที่ 12	26
ภาพที่ 13	26
ภาพที่ 14	27
ภาพที่ 15	28
ภาพที่ 16	28
ภาพที่ 17	29
ภาพที่ 18	29
ภาพที่ 19	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 20	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
ภาพที่ 21	กระบวนการบดผสมยาง	33
ภาพที่ 22	ระยะเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ (Scorch time, t_{s2}) ที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ	40
ภาพที่ 23	ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Cure time, t_{90}) ที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ	40
ภาพที่ 24	ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque; M_L) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ	41
ภาพที่ 25	ค่าแรงบิดต่ำสุด (Maximum torque; M_H) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ	41
ภาพที่ 26	ค่าผลต่างแรงบิด (Torque difference; $M_H - M_L$) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ	42
ภาพที่ 27	ดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ (Cure rate index ;CRI) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ	42
ภาพที่ 28	ภาพถ่ายเซลล์ของโฟมยางจากกล้อง SEM ที่ชนิดและปริมาณสารก่อฟองต่าง ๆ	43
ภาพที่ 29	ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	45
ภาพที่ 30	ค่าความต้านทานแรงดึงของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	46
ภาพที่ 31	ระยะยืดเมื่อขาดของโฟมยางที่ใช้ ADC และ OBSH ในปริมาณ 0-10 phr	47
ภาพที่ 32	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ ของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 33	ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซนต์ ของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	49
ภาพที่ 34	ค่าความต้านทานการฉีกขาดของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	50
ภาพที่ 35	ค่าปริมาตรการสึกหรอของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	51
ภาพที่ 36	ค่าการโค้งงอของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	52
ภาพที่ 37	ค่าการเสียวรูปหลังการกดอัดของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	53
ภาพที่ 38	ค่าความแข็งของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	54
ภาพที่ 39	ค่าการดูดซึมน้ำของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง	55

โฟมยางรองกันกระแทกจากยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน

Natural Rubber Filled with Defatted Rice Bran Cushioning Foam

ดริญญา มุลชัย¹

Darinya Moonchai¹

¹สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง ต่อสมบัติของโฟมยางรองกันกระแทกจากยางธรรมชาติที่ใช้รำสกัดน้ำมันปริมาณ 30 phr เป็นสารตัวเติม โดยใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด ได้แก่ อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC) และ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรไซด์ (OBSH) ที่ปริมาณ 0, 2, 4, 6, 8, 10 phr ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลให้เวลาในการคงรูป และค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลของโฟมยางลดลง แต่โมดูลัส และความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ ADC เป็นสารทำให้เกิดฟอง ซึ่ง OBSH ให้โฟมยางที่มีจำนวนและความสม่ำเสมอของรูพรุนมากกว่า ADC โดยสารทำให้เกิดฟอง OBSH ที่ปริมาณ 6 phr เป็นสารทำให้เกิดฟองที่ทำให้โฟมยางมีสมบัติเหมาะสม และมีโครงสร้างสัณฐานวิทยาที่ดีที่สุด

คำสำคัญ: โฟมยางรองกันกระแทก ยางธรรมชาติ รำสกัดน้ำมัน สมบัติเชิงกล

Abstract

The objective of this project was to study the effects of type and content of chemical blowing agents on properties of natural rubber cushioning foam filled with 30 phr of defatted rice bran (DRB). The blowing agents used were Azo dicarbonamide (ADC) and Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSH), the varying contents from 0 to 10 phr. The results indicated that an increasing blowing agent loading caused an increase in cure time and water absorption and a decrease in density and mechanical properties. The addition of ADC showed an increase in modulus and abrasion resistance. However, OBSH was more effective than ADC, which gave higher cell number and better cell size distribution. From the mechanical properties and morphology, the highest content of OBSH which gave optimum properties was 6 phr.

Key words: Cushioning foam, Natural rubber, Defatted rice bran, Mechanical properties

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องโฟมยางรองกันกระแทกจากยางธรรมชาติผสมรำสกัดน้ำมัน (Natural Rubber Filled with Defatted Rice Bran Cushioning Foam) ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2559 ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ศรัณญา มุลชัย

มกราคม 2560

คำนำ

โคมยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ที่มีรูพรุนภายในเนื้อยาง เกิดจากการนำยางธรรมชาติมาผสมกับสารเคมีต่าง ๆ ได้แก่ สารทำให้ยางคงรูป สารตัวเร่ง สารกระตุ้น และสารตัวเติม แล้วต้องมีการเติมสารทำให้เกิดฟองลงไปในยางคอมพาวนด์ด้วย จากนั้นจึงนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการคงรูปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสายโซ่ และให้สารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สก่อให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนภายในเนื้อยาง ได้เป็นผลิตภัณฑ์โคมยางเพื่อนำไปใช้งานในประเภทต่าง ๆ ได้แก่ งานฉนวนความร้อน งานบรรจุภัณฑ์ และงานกันกระแทก (เอกชัยและคณะ, 2552) ในผลิตภัณฑ์บางส่วนใหญ่มักมีการเติมสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสมบัติการแปรรูป เป็นต้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน สารตัวเติมส่วนใหญ่ นอกจากใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติแล้ว ยังใช้เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตอีกด้วย ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ จึงทำให้การใช้สารตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางเป็นที่นิยมด้วยอย่างสารตัวเติมที่นิยมใช้ได้แก่ เหมะดำ ซิลิกา ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต ปัจจุบันพบว่าสารตัวเติมส่วนใหญ่ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นวัสดุที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ เช่น การใช้ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมได้จากการขุดเจาะหรือระเบิดของชั้นดินและภูเขา รวมทั้งการผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งต้องใช้วัตถุดิบ สารเคมี และพลังงานในกระบวนการผลิตสารตัวเติมอย่างมหาศาล ส่งผลต่อระบบนิเวศที่ถูกทำลาย ทรัพยากรที่ลดลง และการปล่อยมลพิษต่าง ๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม (บุญญานิช, 2555) ดังนั้นการนำชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชานอ้อย แกลบ จี้เถ้าแกลบ ฟางข้าว และรำสัคน้ำมันมาใช้ทดแทนสารตัวเติมในปัจจุบันจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีวัตถุดิบเป็นจำนวนมาก สามารถหาได้ง่ายและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการนำรำสัคน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตโคมยางธรรมชาติโดยใช้ยางแท่งชนิด STR 5L แปรรูปปริมาณรำสัคน้ำมันในช่วง 0-50 phr (Moonchai *et al.*, 2015) พบว่าโคมยางมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรำสัคน้ำมัน ดังนั้นการใช้รำสัคน้ำมันจึงสามารถเพิ่มปริมาณรูพรุนให้กับผลิตภัณฑ์โคมยางได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบาขึ้น และสามารถใช้รำสัคน้ำมันได้ถึง 30 phr โดยที่โคมยางที่ได้มีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดไม่ต่างจากกรณีที่ไม่ใช้สารตัวเติมมากนัก นอกจากนั้นการใช้รำสัคน้ำมันยังช่วยดับกลิ่นยางและสารเคมีในยางคงรูปได้ด้วย จากผลการวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่ารำสัคน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตโคมยางธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้จึงวิจัยต่อยอดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรสำหรับการผลิตโคมยางกันกระแทกจากธรรมชาติเมื่อใช้รำสัคน้ำมันเป็นสารตัวเติมสำหรับผลิต

ผลิตภัณฑ์ เช่น แผ่นยางปูพื้น และอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น โดยใช้ยางธรรมชาติชนิด STR 20 ซึ่งเป็นยางเกรดที่มีสิ่งเจือปนและสีเข้มกว่ายาง STR 5L เนื่องจากในการใช้ร่าสกดน้ำมันเป็นสารตัวเติมจะทำให้ได้ยางที่มีสีเข้มขึ้นจากสีธรรมชาติของร่าสกดน้ำมัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้มุ่งเน้นไปที่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีต้นสวยงาม โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติของโฟมยาง เนื่องจากสารก่อฟองเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่มีผลต่อลักษณะกายภาพและสมบัติของโฟมยาง โฟมยางที่ขึ้นรูปได้ถูกนำไปทดสอบสมบัติการคงรูป ความหนาแน่น โครงสร้างเซลล์ การดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกล

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารก่อฟองต่อสมบัติของโฟมยางกันกระแทกจากยางธรรมชาติโดยใช้ร่าสกดน้ำมันเป็นสารตัวเติม
2. หาสูตรยางผสมสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์โฟมยางกันกระแทกจากยางธรรมชาติเมื่อใช้ร่าสกดน้ำมันเป็นสารตัวเติม

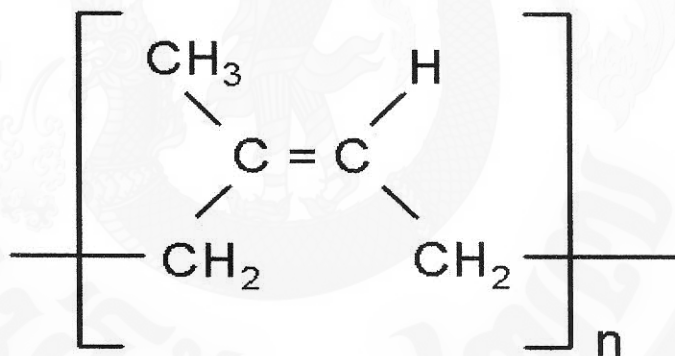
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบผลของชนิดและปริมาณสารก่อฟองต่อสมบัติของโฟมยางกันกระแทกจากยางธรรมชาติ เมื่อใช้ร่าสกดน้ำมันเป็นสารตัวเติม
2. นำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการเรียนการสอนวิชายางธรรมชาติและสารเคมีสำหรับยางสำหรับนักศึกษาหลักสูตรเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
3. สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตโฟมยางกันกระแทก โดยใช้ร่าสกดน้ำมันเป็นสารตัวเติมแทนสารตัวเติมทางการค้า
4. เพิ่มมูลค่าให้กับร่าสกดน้ำมันซึ่งถือว่าเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร

การตรวจเอกสาร

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) (พงษ์ธร, 2548)

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (*Cis-1,4-polyisoprene*) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบไปด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) ดังภาพที่ 1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนไปจากที่เคยยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ ได้แก่ น้ำยางและยางแห้งซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (พงษ์ธร, 2548)

น้ำยาง

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นมีปริมาณน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสดจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจาก 30 เปอร์เซ็นต์ เป็น 60 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) แต่เนื่องจากยางมีสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น โปรตีนและฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วย

เชื้อจุลินทรีย์หรือเชื้อแบคทีเรียได้เป็นก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือ สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบูดเน่าและสั่นกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมแอมโมเนียลงไปหรืออาจใช้ร่วมกับสารเคมีอื่น ๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพน้ำยางขึ้นให้ เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียวจะต้องใช้แอมโมเนียที่มีความเข้มข้นสูงถึง 0.7 เปอร์เซ็นต์ น้ำยางชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า High ammonia latex หรือ HA Latex ส่วนน้ำยางที่มี แอมโมเนียความเข้มข้นต่ำเพียง 0.2% ก็จำเป็นต้องใช้สารเคมีอื่น ๆ ร่วมด้วย ซึ่งจะเรียกน้ำยางชนิด นี้ว่า Low ammonia latex หรือ LA Latex

ยางแห้ง

ยางแห้งได้มาจากการเอาน้ำยางสดที่กรีดได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวออกจากน้ำ จากนั้นทำการไล่ ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

ยางแผ่น (Rubber sheet)

ยางแผ่นได้จากการนำน้ำยางสดมาใส่ในตะก่ง จากนั้นเติมน้ำเพื่อเจือจางน้ำยางให้มีปริมาณ ยางแห้งเหลือเพียงประมาณ 12-18 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำการเติมกรดเพื่อให้ยางจับตัวกันและแยกออก จากน้ำหลังจากนั้นน้ำยางไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำไปล้างน้ำ แล้วจึงทำให้ ยางแห้ง ซึ่งจะนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น ยางที่ได้เรียกว่า แผ่นยางไม่ รมควัน (Air dried sheet, ADS) แต่หากนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ยางที่ได้ เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน

ยางเครพ (Crepe rubber)

ยางเครพส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยาง (เช่น ยางก้อนถ้วย เศษยางที่ติดกับเปลือก ไม้หรือติดบนดิน หรือเศษยางแผ่นรมควัน เป็นต้น) ไปรีดด้วยเครื่องเครพ (Creping machine) พร้อมทั้งใช้น้ำทำความสะอาดเอาสิ่งสกปรกต่างๆ ออกไปจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำ ยางแผ่นที่ได้ไปผึ่งลมให้แห้ง

ยางแท่ง (Block rubber)

ยางแท่ง หรือที่เรียกว่า Standard thai rubber (STR) ผลิตจากน้ำยางสด หรือน้ำยางแห้ง ซึ่ง วัตถุดิบยางที่มีคุณภาพดี จะผลิตได้ ยางแท่ง ที่มีเกรดสูง และสมบัติทางกายภาพที่ดี โดยเฉพาะค่า ความอ่อนตัวแรกเริ่ม (Po), ค่าดัชนีความอ่อนตัว (PRI) และค่าความหนืด ซึ่งเป็นสมบัติที่ผู้ใช้ ต้องการ และเป็นตัวกำหนดในการซื้อขาย

ก) ยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด

ยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด จะเป็นยางแท่งที่มีสมบัติทางกายภาพสูง มีความสะอาด ความยืดหยุ่นและความหนืดสูง จึงมักนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง อีกทั้งยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด ยังมีสีใสสวย เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสดต่าง ๆ

น้ำยางสดที่นำมาผลิตยางแท่ง จะต้องมีการควบคุมคุณภาพทุกขั้นตอน เป็นอย่างดี ซึ่งยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยางสด มี 4 เกรด ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่น คือ ปริมาณสิ่งสกปรกต่ำ ความอ่อนตัวเริ่มแรกสูง, ค่าดัชนีความอ่อนตัวสูง แต่จะแตกต่างกันในเรื่องปริมาณสิ่งสกปรกและค่าสี (ค่าสีจะระบุเฉพาะยางแท่ง STR XL และ STR 5L เท่านั้น)

ยางแท่ง STR ที่ผลิตจาก น้ำยางสด มี 4 เกรด คือ

(1) ยางแท่ง STR XL จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.02% และมีค่าสี ไม่เกิน 4 หน่วยโลวิบอนด์

(2) ยางแท่ง STR 5L จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.04% และมีค่าสี ไม่เกิน 6 หน่วยโลวิบอนด์

(3) ยางแท่ง STR 5 จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.04% (ไม่จำกัดค่าสี จึงสามารถนำไปใช้กับ ผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ที่ไม่เน้นสีสดมากนัก)

(4) ยางแท่ง STR 5CV จะจำกัดปริมาณสิ่งสกปรก ไม่เกิน 0.04% (ไม่จำกัดค่าสี จึงสามารถนำไปใช้กับ ผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง ที่ไม่เน้นสีสดมากนัก)

ข) ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากยางแห้ง

ยางแท่ง STR ที่ผลิตจากยางแห้ง หรือวัตถุดิบยาง ที่จับตัวกันแล้ว เช่น ยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย ยางก้นถ้วย ยางแผ่นรมควัน และเศษยางชนิดต่าง ๆ จะมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่สม่ำเสมอ และมักแปรปรวนตามความหลากหลายของวัตถุดิบ

ยางแท่งที่ผลิตจากยางแห้งแบ่งออกเป็น 4 เกรด ซึ่งยางแท่งทุกชั้น จะระบุค่าปริมาณสิ่งสกปรก ความอ่อนตัวเริ่มแรก ดัชนีความอ่อนตัว ปริมาณเถ้า ปริมาณสิ่งระเหย และปริมาณไนโตรเจน

ยางแท่ง ที่ผลิตจากยางแห้ง แบ่งออกเป็น 4 เกรด คือ

(1) ยางแท่ง STR 10 มีค่าปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน 0.08% สำหรับค่า Po และ PRI ไม่เกิน 30 และ 50 ตามลำดับ ได้มาจากการนำยางก้อนถ้วย และยางแผ่นดิบคุณภาพดีมาผลิต ทำให้สมบัติด้าน Po, PRI และปริมาณสิ่งสกปรกดีกว่า ยางแท่ง STR 20

(2) ยางแท่ง STR 10 CV

(3) ยางแท่ง STR 20 เป็นยางแท่งที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่เป็นเศษยางเป็นส่วนใหญ่ ผสมกับยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย หรือ ยางแผ่นรมควัน จะจำกัดค่าปริมาณสิ่งสกปรกไม่เกิน 0.16% สำหรับค่า Po และ PRI ไม่เกิน 30 และ 40 ตามลำดับ

(4) ยางแท่ง STR 20 CV

ค) ยางแท่ง CV (Constant Viscosity)

ยางแท่ง CV นับเป็นยางแท่งที่มีความหนืดคงที่ ด้วยการเติมสารควบคุมความหนืด ทำให้ยางแท่งมีความหนืดอยู่ในระดับที่ควบคุมได้ เช่น ยางแท่ง CV60 ยางจะมีค่าความหนืดอยู่ที่ 55-67 หน่วย เป็นต้น ซึ่งการควบคุมความหนืดนี้เอง ที่จะช่วยลดพลังงานในขั้นตอนการบด ผสมยาง กับสารเคมีในกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์

ง) การผลิตยางแท่ง

ภาพที่ 2 แสดงการจัดชั้น และสมบัติของยางแท่งชั้นต่าง ๆ ตามมาตรฐาน

Parameter	STR XL	STR SL	STR 5	STR 5 CV	STR 10	STR 10 CV	STR 20	STR 20 CV
วัตถุดิบที่ผลิต	น้ำยาง		น้ำยาง/ยางแผ่น		ยางก้อน /ยางแผ่น			
ปริมาณสิ่งสกปรก, % ไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า, % ไม่เกิน	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน, % ไม่เกิน	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย, % ไม่เกิน*	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po), ไม่ต่ำกว่า	35	35	30	-	30	-	30	-
ดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI), ไม่ต่ำกว่า	60	60	60	60	50	50	40	40
สีเทียบด้วยไลวีนอนด์ ไม่เกิน	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืด (Moony Viscosity)	-	-	-	**	-	**	-	**
รหัสชั้นใช้สี	ฟ้า	เขียวอ่อน	เขียวอ่อน	ตัวอักษรขาวบนพื้นเขียว	น้ำตาล	ตัวอักษรขาวบนพื้นน้ำตาล	แดง	ตัวอักษรขาวบนพื้นแดง

ภาพที่ 2 มาตรฐานยางแท่งไทย (Standard Thai rubber scheme)

- * เป็นขีดจำกัดสำหรับผู้ใช้ ถ้าผู้ผลิตต้องมีปริมาณสิ่งระเหย ไม่เกิน 0.05 %
- ** ขีดจำกัดของผู้ผลิต คือ

STR 5 CV มีค่าความหนืด 70 (+7,-5), 60 (+7,-5) และ 50 (+7,-5)

STR 10 CV มีค่าความหนืด 60 (+7,-5)

STR 20 CV มีค่าความหนืด 65 (+7,-5)

ในกระบวนการผลิตยางแท่งให้มีคุณภาพดีได้สมบัติตรงตามชั้นนั้น ๆ นอกจากจะเลือกใช้เครื่องจักรชนิดต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับหน้าที่ตามตำแหน่งแล้วการเลือกใช้ชนิดของวัตถุดิบยางที่ใช้ในการผลิตเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง นอกจากนี้ ยังมีเทคนิคการบ่มยาง การอบยาง การใช้สารเคมีน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต เป็นต้น

ยางแท่งรูปแบบอื่น ๆ

ยางธรรมชาติยังสามารถผลิตให้อยู่ในรูปแบบอื่น ๆ ได้อีก เช่น ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV ยางที่แปรรูปได้ดี (Superior rubber, SP/PA Grade) ยางที่ผสมน้ำมัน (Oil extended natural rubber, OENR) ยางธรรมชาติที่มีโปรตีนต่ำ (Deproteinized natural rubber, DPNR) ยาง ENR (Epoxidized natural rubber) ยางเทอร์โมพลาสติก และยางผง เป็นต้น

สารตัวเติม (พวงษ์ธร, 2548)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่างเช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เพื่อให้ยางคอมพาวนด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน เป็นต้น สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามประสิทธิภาพของการเสริมแรง คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือที่เรียกว่า สารตัวเติมเฉื่อย (Non-reinforcing fillers หรือ Inert fillers) หรืออาจแบ่งตามสีของสารตัวเติมได้เป็น 2 กลุ่มเช่นกัน ได้แก่ ผงเขม่าดำและสารตัวเติมสีอ่อน

ผงเขม่าดำ (Carbon black)

ผงเขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็คเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง คาร์บอนแบล็คแบ่งออกได้เป็น เกรด และกรุป จำนวนมาก (เฉพาะที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางมีมากกว่า 40 เกรด) อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งกลุ่มใหญ่ ๆ เป็น 5 กลุ่มตามระบบของ IUPAC (IARC, 2010) ได้แก่

1) แชนแนลแบล็ค (Channel black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการชูดตะแกรงเหล็ก (Iron channel) ซึ่งเป็นตัวรองรับคราบเขม่า ที่เกิดจากการฟั่นเปลวไฟและควันไฟ ออกจากหัวฉีดเชื้อเพลิง แชนแนลแบล็คมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10-30 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 50-200 นาโนเมตร

2) เฟอร์นาซแบล็ค (Furnace black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่เกิดในเตาเผา น้ำมัน (Oil furnace หรือ Refractory chamber) หรือไฮโดรคาร์บอนในสถานะที่เป็นไอ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 10-400 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 50-400 นาโนเมตร

3) อะเซทิลีนแบล็ค (Acetylene Black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาย่อยสลายก๊าซอะเซทิลีนในสถานะไร้อากาศ อนุภาคที่เกิดขึ้นมีการนำไฟฟ้าที่ดี จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตถ่านไฟฉาย อะเซทิลีนแบล็คมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 30-50 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 350-400 นาโนเมตร

4) แลัมพ์แบล็ค (Lamp black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาบน้ำมัน (Oil) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสกัดจากน้ำมันดิน (Coal tar creosote) โดยเผาในถาดแบนภายในเตาเผาที่ควบคุมอากาศเพื่อให้ได้ควันดำ มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 60-200 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 300-600 นาโนเมตร

5) เทอร์มัลแบล็ค (Thermal black) มีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำที่ได้จากการเผาย่อยสลายก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) ในสถานะไร้อากาศ โดยผ่านเชื้อเพลิงดังกล่าวลงบนผิวของเตาที่ร้อน (Heated refractory) มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิประมาณ 120-500 นาโนเมตร และมีขนาดของกลุ่มมวลประมาณ 400-600 นาโนเมตร

คุณสมบัติของ Carbon black ตามลักษณะโครงสร้าง

ก) โครงสร้างแบบ High structure ให้ Shade สีที่ไม่ดำสนิท เนื่องจากโครงสร้างเป็นสายโซ่ต่อกันยาว ๆ จึงมีคุณสมบัติการเป็นตัวนำ เช่น Conductive black

ข) โครงสร้างแบบ Low structure ให้ Shade สีที่ดำกว่า แต่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าจะด้อยกว่า

คุณสมบัติของ Carbon black ตามขนาด Particle

ก) Particle ใหญ่ ให้ Shade สีที่ดำน้อยกว่า (Jetness ต่ำกว่า)

ข) Particle เล็ก ให้ Shade สีที่ดำมากกว่า (Jetness สูงกว่า)

หน้าที่และการใช้งานของเขม่าดำบางเกรด

เขม่าดำเกรด N330 มีหน้าที่การใช้งานคือ ให้ความต้านทานต่อการขัดถู ความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาดสูง ยางมีสมบัติการกระเดื่องกระดอนที่ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่ายสามารถใช้งานได้หลากหลายทั้งในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ นิยมใช้ในการผลิตยางล้อและผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเชิงกลต่าง ๆ (พงษ์ธร, 2548)

PROPERTY	Target	Tolerance	ASTM test method
1. Iodine adsorption, g/kg	82	± 6	D 1510
2. Oil absorption number, $\text{cm}^3/100\text{g}$	102	± 6	D 2414
3. Sieve residue 45 μm (No.325), %		≤ 0.05	D 1514
4. Sieve residue 500 μm (No.35), %		≤ 0.001	D 1514
5. Heating loss, %		≤ 1.0	D 1509
6. Ash content, %		≤ 0.75	D 1506
7. Pour density, kg/m^3	380	± 25	D 1513
8. Fines content, %		≤ 7	D 1508
9. pH value		$7 \div 10$	D 1512
10. Sulfur content, %		≤ 1.1	D 1619
11. Individual pellet hardness (average of 20), g		≤ 55	D 5230
12. Individual pellet hardness (max of 20), g		≤ 90	D 5230
13. Toluene discoloration, %		≥ 85	D 1618
14. BET surface area (NSA), m^2/g	78	± 5	D 6556
15. External surface area (STSA), m^2/g	75	± 5	D 6556
16. Tint strength	104	± 5	D 3265
17. Oil absorption number of compressed sample, $\text{cm}^3/100\text{g}$	88	± 5	D 3493

ภาพที่ 3 สมบัติพื้นฐานของเขม่าดำเกรด N330

สารตัวเติมสีอ่อน (Light colored fillers)

นอกจากเขม่าดำแล้ว ยังมีการนำสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ มาใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อจุดประสงค์ต่าง ๆ เช่น ลดต้นทุนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิตหรือเพื่อเสริมแรงในยาง เป็นต้น สารตัวเติมสีอ่อนมีบทบาทสำคัญต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีเนื่องจากไม่สามารถใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในกรณีนี้ได้ โดยทั่วไป สารตัวเติมชนิดที่มีสีอ่อนแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่

- สารตัวเติมเสริมแรง (Active non-black fillers) หรือ ซิลิกา (SiO_2)
- สารตัวเติมกึ่งเสริมแรงและสารตัวเติมไม่เสริมแรง (Semi-active and inactive non-black fillers)

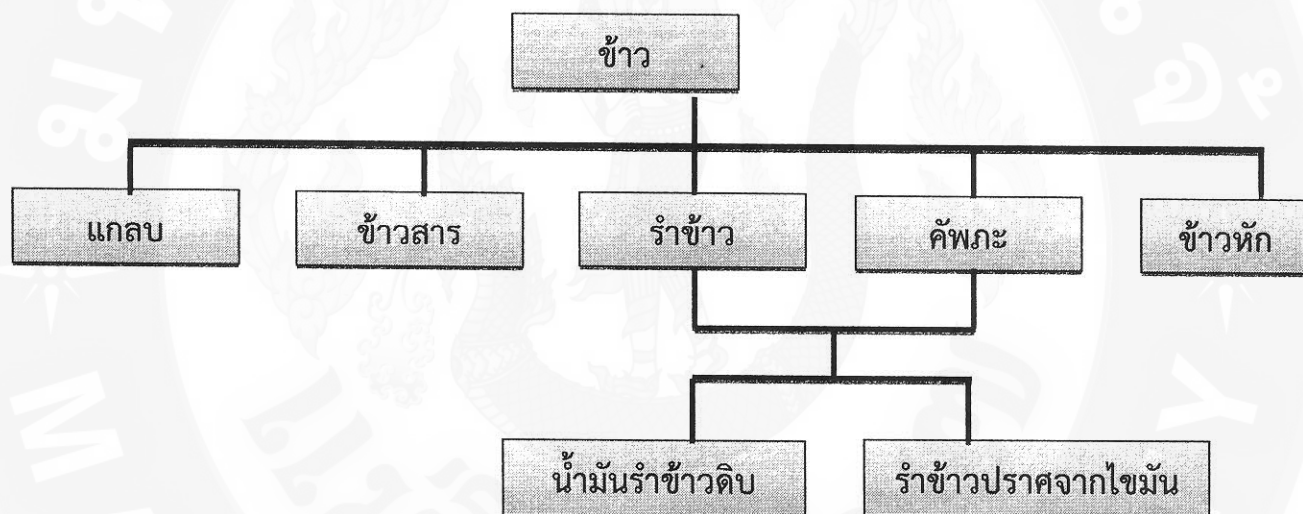
รำสดค่น้ำมัน (อรอนงค์, 2548)

รำ หมายถึง ส่วนเชื้อหุ้มผล เชื้อหุ้มเมล็ด นิวเคลลัส ชั้นแกลวโรน และชั้นชั้นแกลวโรน และมักรวมส่วนของคัพภะด้วย เนื่องจากกระบวนการขัดสีให้เป็นข้าวสาร ส่วนใหญ่ต้องการข้าวสารที่ขาวจนขัดสีข้าวกล้องจนถึงชั้นชั้นแกลวโรน ทำให้คัพภะหลุดออกจากเนื้อเมล็ดรวมอยู่ด้วย ดังนั้น ปริมาณชนิดของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวที่ได้จากกระบวนการสีข้าว นับจากการกะเทาะเปลือกหุ้มแข็ง (แกลบ) ออกไปแล้ว ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว และสภาวะแวดล้อมที่ปลูกจนถึงกรรมวิธีในการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้อง การขัดขาว และการขัดมันเพื่อให้ข้าวสารขาว และมันขาว ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าว ขึ้นอยู่กับส่วนของรำที่ได้จากกระบวนการสีข้าวซึ่งโดยทั่วไปจะ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ รำหยาบ (Bran) ซึ่งได้จากการขัดผิวเมล็ดข้าวกล้อง และรำละเอียด (Polish) การขัดขาวและขัดมัน ทำให้มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันบ้าง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของรำหยาบและรำละเอียดจากข้าว (อรอนงค์, 2548)

องค์ประกอบทางเคมี (คิดที่ความชื้น 14%)	รำหยาบ	รำละเอียด
โปรตีน (%Nx6.25)	12.0-15.6	11.8-13.0
ไขมัน (%)	15.0-19.7	10.1-12.4
เส้นใยหยาบ (%)	7.0-11.4	2.3-3.2
คาร์โบไฮเดรต (%)	34.1-52.3	51.1-55.0
เถ้า (%)	6.6-9.9	5.2-7.3
- แคลเซียม (มิลลิกรัม/กรัม)	0.3-1.2	0.5-0.7
- แมกนีเซียม (มิลลิกรัม/กรัม)	5-13	6-7
- ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/กรัม)	11-25	10-22
- ไฟทิน ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/กรัม)	9-22	12-17
- ซิลิกา (มิลลิกรัม/กรัม)	6-11	2-3
- สังกะสี (มิลลิกรัม/กรัม)	43-258	17-60
วิตามิน		
- ไทอะมิน (บี 1) (ไมโครกรัม/กรัม)	12-24	3-19
- ไรโบเฟลวิน (บี 2) (ไมโครกรัม/กรัม)	1.8-4.3	1.7-2.4
- ไนอะซิน (ไมโครกรัม/กรัม)	267-499	224-389

รำหยาบจะมีโปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า แร่ธาตุบางชนิด และวิตามินบางชนิดมากกว่า รำละเอียด ยกเว้นคาร์โบไฮเดรตที่มีปริมาณน้อยกว่า ดังนั้น จึงมีการนำรำข้าวไปสกัดน้ำมัน สกัดโปรตีนและสารอาหารอื่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงจากเดิมที่ใช้เป็นอาหารสัตว์เท่านั้น ในรำข้าวมีน้ำมัน (ไขมัน) อยู่ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบไปด้วยไขมันที่มีประโยชน์ต่อร่างกายประเภทกรดไขมันอิ่มตัว และไขมันที่จำเป็นในปริมาณมาก น้ำมันรำข้าว เป็นผลิตภัณฑ์รำข้าวดิบ ซึ่งหมายถึง ส่วนผสมของรำละเอียดและคัพพะจากกรรมวิธีการทำน้ำมันรำข้าว ได้รำที่สกัดน้ำมันออกแล้ว ซึ่งนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์อื่นได้ต่อไป ภาพที่ 4 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปเมล็ดข้าว



ภาพที่ 4 ข้าวและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปเมล็ดข้าว (อรอนงค์, 2548)

ยางเซลลูโลส (เอกชัย และคณะ, 2552)

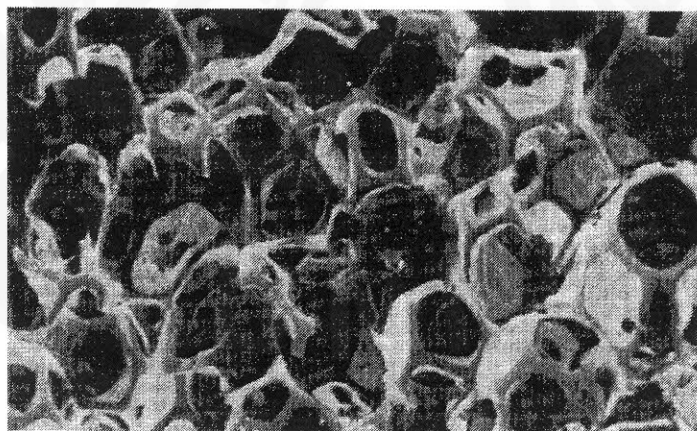
ยางเซลลูโลสเตรียมจาก Solid rubber ที่ประกอบไปด้วยสารเชื่อมขวางและสารช่วยในการเชื่อมขวางกับสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ซึ่งให้ก๊าซในโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนืด อุณหภูมิการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟอง ต่อลักษณะยางว่าเกิดเป็นเซลล์เปิด (Open cell) หรือเซลล์ปิด (Closed cell) โดยในขั้นเริ่มต้นให้ความร้อน ให้ความหนืดของยางลดลงและเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่เริ่มเกิดการเชื่อมขวาง ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น จุดที่ยางเกิดเซลลูโลส ฟองอากาศต้องเกิดก่อนที่ยางจะเกิดการเชื่อมขวาง

โดยสมบูรณ์ โดยหากแต่การแตกตัวของสารทำให้เกิดฟองก่อนที่จะเริ่มมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด เนื่องจากผนังเซลล์ (ที่บางเป็นลักษณะฟิล์ม) มีความแข็งแรงน้อยซึ่งไม่เพียงพอที่จะช่วยพยุงก๊าซได้ ทำให้ก๊าซทะลุผนังทำให้เกิดการเชื่อมกันของเซลล์ ในทางตรงกันข้าม หากเกิดการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟองหลังจากที่ยางได้เริ่มมีการเชื่อมขวางและมีความหนืดเพิ่มขึ้นแล้วผนังเซลล์มีความแข็งแรงเพียงพอที่ทำให้ผนังเซลล์ไม่เกิดการพังและเกิดการเชื่อมกันของเซลล์

คำว่ายางเซลล์ลู่ (Cellular rubber) มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ที่มีเซลล์ หรือช่องว่าง หรือรูพรุนเล็ก ๆ โดยครอบคลุมถึง โฟมลาเท็กซ์ (Latex foam) ยางฟองน้ำ (Sponge rubber) และยางโฟมแบบขยาย (Expanded rubber) ในลักษณะที่มีเซลล์แทรกอยู่ปริมาณมากในเนื้อยาง ทั้งเซลล์ที่เป็นรูแบบเปิด และเซลล์ที่เป็นรูแบบปิด มีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

(1) โครงสร้างเซลล์เปิด

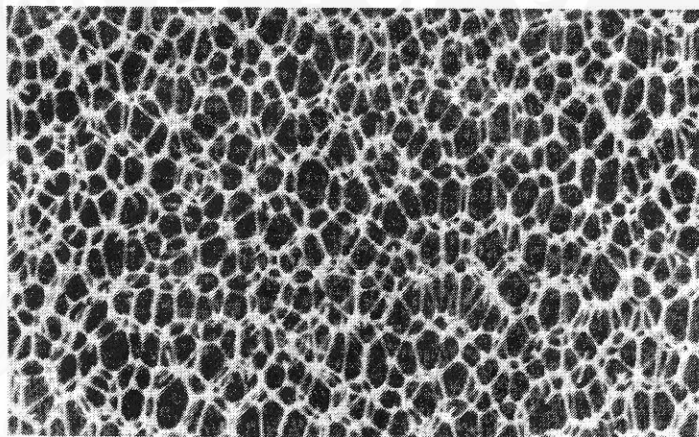
ภาพที่ 5 แสดงลักษณะของเซลล์เปิด โครงสร้างของผนังกันระหว่างเซลล์มีการแตกหรือทะลุทะลวงถึงกันทำให้อากาศหรือก๊าซสามารถผ่านได้อย่างอิสระ ทำให้โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะเชื่อมต่อกันของโครงสร้างเนื้อยางที่สามารถดูดซับแรงไว้ได้ด้วยตัวของมันเอง โดยยางประเภทเซลล์เปิดมักมีสมบัติการกระด้างกระดอนและการคืนตัวกลับ ความแข็งแรงเชิงกล และความเป็นฉนวนความร้อนต่ำ



ภาพที่ 5 โครงสร้างเซลล์เปิด (สุภัทรชัย, 2550)

(2) โครงสร้างเซลล์ปิด

โครงสร้างเซลล์ปิดหรือ Expanded rubber ประกอบไปด้วยโครงสร้างผนังเซลล์ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกัน ซึ่งเกิดจากการที่เนื้อเยื่อมีการกักอากาศเก็บไว้อย่างแยกออกจากกัน เนื่องจากผนังเซลล์ไม่ได้มีการทะลุทะลวงถึงกันทำให้วัสดุประเภทเซลล์ปิดนี้ มีการดูดซึมน้ำได้น้อย มีการกระดอนที่ดี และมีสมบัติฉนวนความร้อนที่ดี มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างเซลล์ปิด (สุภัทรชัย, 2550)

ทฤษฎีการเกิดโฟม (สุภัทรชัย, 2550)

ระบบที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โฟมจะเกี่ยวข้องกับ 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ การเกิดฟองก๊าซ (Bubble formation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกี่ยวกับการเกิดนิวเคลียสของฟองก๊าซขึ้นในพอลิเมอร์หลอมเหลวต่อมาคือ ขั้นตอนการเติบโตของฟองก๊าซ (Bubble growth) เป็นกระบวนการที่เกิดฟองก๊าซเติบโตและเกิดการเสถียร และกระบวนการสุดท้ายคือ กระบวนการเสถียรของฟองก๊าซ (Bubble stabilization) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เฟสของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งที่ผ่านกระบวนการ เชื่อมโชนหรือโดยการหล่อเย็น ทำให้ได้ระบบโครงสร้างของเซลล์ที่เสถียร

ก) กระบวนการเกิดฟองก๊าซ

ขั้นตอนแรกของการผลิตโฟมคือ การเกิดฟองก๊าซขึ้นในระบบของพอลิเมอร์หลอมเหลวถ้าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างสมบูรณ์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า Self-nucleation แต่ส่วนมากจำเป็นที่จะต้องมีการเติมอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก เช่น ผงแป้ง (Talc) หรือซิลิกาลงไปในระบบเพื่อทำหน้าที่เป็น Nucleating agent เพื่อควบคุมขนาดและการกระจายตัวของเซลล์แต่ในกระบวนการที่ไม่มีการเติม Nucleating agent เฟสของพอลิเมอร์

ลอมเหลวมักประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งจะเป็นจุดที่ฟองก๊าซเติบโตต่อไปได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการเกิดฟองก๊าซขึ้นใหม่

การเกิดฟองก๊าซในระบบของเหลวนั้นค่า Free energy (ΔF) ของระบบจำเป็นต้องมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการ 1

$$\Delta F = \gamma A \quad \dots (1)$$

เมื่อ γ คือ ค่าแรงตึงผิวของเหลว (N/m)
 A คือ พื้นที่ของผิวสัมผัสทั้งหมด (m²)

จากสมการแสดงให้เห็นว่า ถ้าของเหลวมีค่าแรงตึงผิวที่ต่ำจะทำให้ฟองก๊าซสามารถที่จะเกิดขึ้นได้ง่าย การเติม Nucleating agent จะมีผลทำให้เกิดฟองก๊าซได้ง่ายขึ้น เนื่องจาก Nucleating agent จะช่วยลดแรงตึงผิวที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของเหลวหรืออาจไปทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัส

ข) กระบวนการเติบโตของฟองก๊าซ

เมื่อความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลงจะทำให้โอกาสในการเกิดฟองก๊าซขึ้นใหม่ในพอลิเมอร์ หลอมเหลวลดลง ก๊าซที่ละลายอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงแพร่เข้าไปในฟองก๊าซทำให้ฟองก๊าซเกิดการขยายตัว เริ่มแรกฟองก๊าซจะมีลักษณะเป็นทรงกลมและเกิดการขยายตัวเนื่องจากผลของความแตกต่างของความดัน (ΔP) ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ที่สมดุล ความดันก๊าซในฟองก๊าซทรงกลมจะมีค่ามากกว่าความดันของของเหลวที่ล้อมรอบ ซึ่งค่าความแตกต่างของความดันที่สมดุลสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad \dots (2)$$

เมื่อ γ คือ ค่าแรงตึงผิว (N/m)
 r คือ รัศมีของฟองก๊าซ (mm)

ค่าความแตกต่างระหว่างความดันภายในและภายนอกเซลล์ของฟองก๊าซขนาดเล็กจะมีค่าสูงกว่าฟองก๊าซขนาดใหญ่ ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กมีแนวโน้มจะลดความแตกต่างของความดันโดยการขยายขนาดอย่างรวดเร็วทั้งโดยการไปรวมตัวกับฟองก๊าซอื่น ๆ หรือโดยการแพร่ของก๊าซจาก

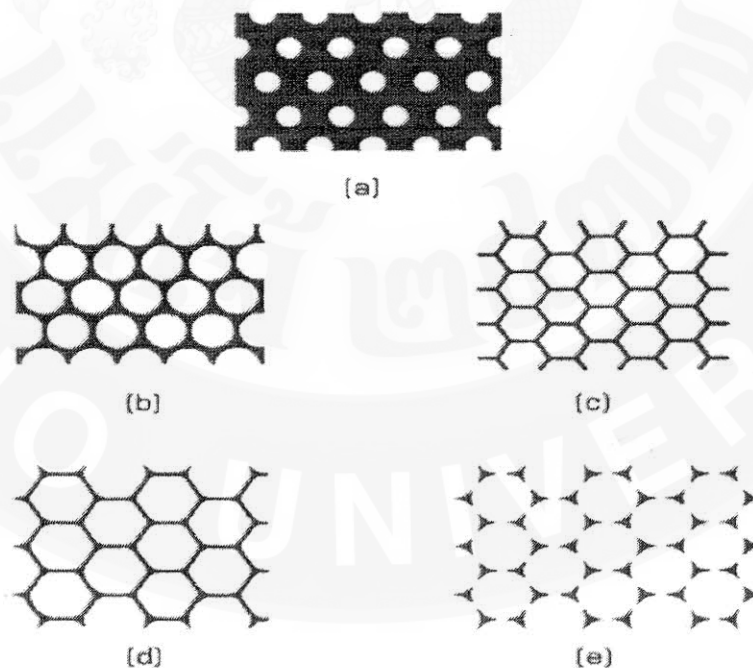
พอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าไป ซึ่งความแตกต่างของค่าความดันในฟองก๊าซของฟองก๊าซขนาดเล็ก และฟองก๊าซขนาดใหญ่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3

$$\Delta P_d = 2\gamma \left[\left(\frac{1}{r_1} \right) - \left(\frac{1}{r_2} \right) \right] \quad \dots (3)$$

เมื่อ ΔP_d คือ ค่าความแตกต่างของความดันระหว่างเซลล์ที่มีรัศมี r_1 และ r_2

อัตราการโตของเซลล์นี้จะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมความยืดหยุ่นของวัสดุพอลิเมอร์ ความดันก๊าซ ขนาดของเซลล์ และอัตราการแพร่ของ สารก่อฟอง ผ่านผนังเซลล์ของพอลิเมอร์

ระบบที่มีเซลล์ขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของเซลล์อย่างสม่ำเสมอ จะเกิดได้เมื่อระบบแรงตึงผิวต่ำ โดยภาพที่ 7 (a) จะแสดงให้เห็นว่าฟองก๊าซเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์ หลอมเหลวถ้าทำให้โฟมเสถียรโดยการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งที่สภาวะนี้จะทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นสูง แต่หากปริมาณของฟองก๊าซยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปดังแสดงในภาพที่ 7 (b) ทำให้โฟมมีความหนาแน่นลดลง สำหรับฟองก๊าซที่มีลักษณะเป็นทรงกลมโฟมมีความหนาแน่นลดลงเมื่อฟองก๊าซมาอยู่ใกล้กันมากขึ้น



ภาพที่ 7 โครงสร้างของเซลล์ที่ขึ้นตอนการขยายตัวของฟองก๊าซต่าง ๆ (สุภัทรชัย, 2550)

เมื่อฟองก๊าซเกิดการขยายตัวต่อไปจนกระทั่งสัมผัสกันความดันภายในฟองก๊าซหลักเซลล์ให้เกิดการรวมตัวกัน พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกผลักออกไปอยู่ในช่องว่างด้านข้างและเซลล์เปลี่ยนรูปร่างกลายเป็นแบบ Pentagonal dodecahedron ที่รูปร่างของผนังเซลล์แต่ละด้านเป็น Polyhedral ที่มีความหนาเท่ากันในแต่ละระนาบ เมื่อพิจารณาใน 2 มิติ เซลล์มีรูปร่างเป็นแบบ Hexagonal honeycomb ดังแสดงในภาพที่ 7 (c) ลักษณะโครงสร้างของเซลล์ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์หลอมเหลว เช่น ความหนืดและพลังที่ผิวหน้า แรงโน้มถ่วงและแรงดันของก๊าซที่ดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไปอยู่ในบริเวณรอยต่อของเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 7(d) ที่สถานะดังกล่าวโฟมที่ได้จะมีลักษณะเป็นเซลล์ปิด แต่ผนังเซลล์อาจเกิดการแตกออกได้ทำให้เซลล์ที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ระดับการแตกออกของผนังเซลล์ที่แตกต่างกันทำให้ได้โฟมที่มีปริมาณเซลล์เปิดเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 7(e)

ปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของฟองก๊าซระหว่างเกิดการขยายตัว คือชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว อัตราการขยายตัวของฟองก๊าซ ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวความแตกต่างของความดันภายในฟองก๊าซ และการมีสิ่งเจือปน เช่น อนุภาคของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซไปรบกวนการเจริญเติบโตของก๊าซ

ค) กระบวนการเสถียรของฟองก๊าซ

ฟองก๊าซถูกทำให้เสถียรได้ทั้งโดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์เมทริกซ์ หรืออิทธิพลทางกายภาพด้วยการหล่อเย็นพอลิเมอร์หลอมเหลวให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอ่อนตัวเพื่อป้องกันการเกิดการไหลของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เปลี่ยนเป็นของแข็งทำให้รูปร่างของฟองก๊าซเสถียรไปเนื่องจากการเกิดการไหลของโฟมหรือเนื่องจากน้ำหนักของโฟม ทำให้โครงสร้างของเซลล์โฟมจะอยู่ในสภาวะสมดุลเป็นระยะเวลาหนึ่งภายใต้สภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิและความดันที่ล้อมรอบ ทำให้สมบัติของโฟมเปลี่ยนแปลงตามเวลาเนื่องจากการเกิดการแพร่ของอากาศเข้าไปทดแทนก๊าซภายในเซลล์ สถานะดังกล่าวจะเกิดลดลงเมื่อก๊าซที่อยู่ภายในเซลล์คืออากาศหรือก๊าซที่มีสมบัติคล้ายกับอากาศเช่น ก๊าซไนโตรเจน แต่หากก๊าซที่ใช้เป็นไฮโดรคาร์บอนจะทำให้เกิดการแพร่ของก๊าซออกมาภายนอกมากกว่าอัตราการแพร่ของอากาศเข้าไปในเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้โครงสร้างของโฟมมีแนวโน้มจะเสถียรหลังการผลิต

สารทำให้เกิดฟอง (เอกซัย และคณะ, 2552)

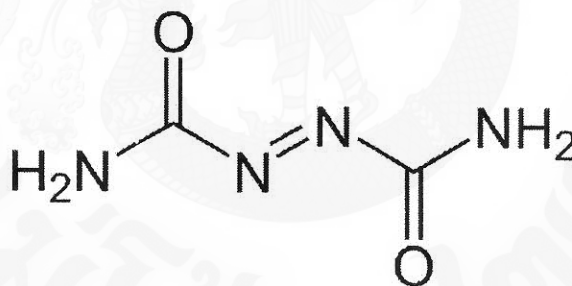
สารที่ใส่เข้าไปในยางคอมพาวนด์ เมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน เป็นสารเสถียรที่อุณหภูมิห้องจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงจะปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงก่อนหรือระหว่างกระบวนการคงรูปก๊าซที่ปล่อยออกมาทำให้ยางมีรูพรุนหรือมีฟองกระจายอยู่ทั่วไป สารทำให้เกิดฟองควรมีสมบัติเบื้องต้น ดังนี้

- สามารถปลดปล่อยก๊าซออกมาได้มาก
- ไม่เป็นพิษ
- สารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวไม่ควรมีกลิ่นเหม็น
- ไม่ควรทำให้ยางคงรูปเกิดการเปลี่ยนสี
- ควรกระจายตัวในยางได้ดีเพื่อฟองเกิดอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน
- ไม่ควรมีผลต่อปฏิกิริยาการคงรูปและไม่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็ว
- มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่เหมาะสม
- ราคาถูก

สารทำให้เกิดฟองสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ สารอินทรีย์ (Organic blowing agent) และ สารอนินทรีย์ (Inorganic blowing agent) สารเคมีทำให้เกิดฟองที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่

Azodicarbonamide (ADCA)

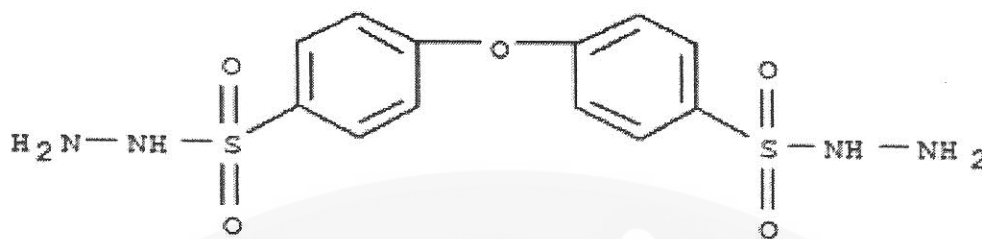
สารทำให้เกิดฟองชนิดนี้จะมีสีเหลืองส้ม ละลายในยางได้ดี ไม่ติดไฟ ให้ก๊าซร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก ไม่เป็นพิษ ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารได้ ละลายในยางได้ดี ทำให้การกระจายตัวของสารทำให้เกิดฟองเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ Azodicarbonamide มีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟอง Azodicarbonamide

Sulfonyl hydrazine

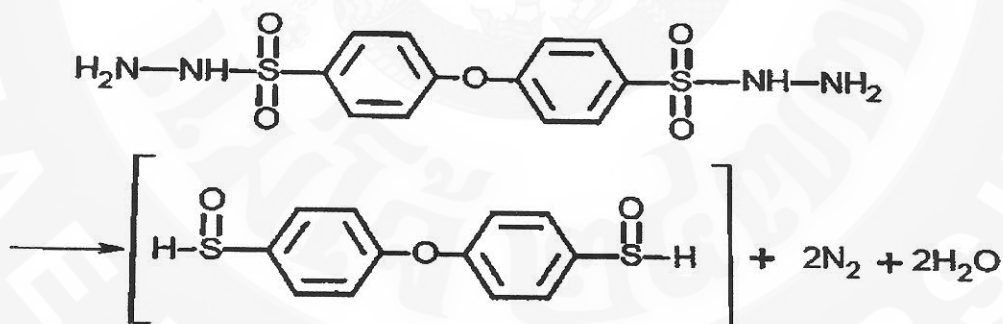
สารทำให้เกิดฟอง Sulfonyl hydrazine ชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดคือ 4,4 Oxybis (Benzene sulfonyl hydrazide) (OBSH) เป็นสารที่สลายตัวต่ำมาก ทำให้ต้องควบคุมอุณหภูมิของการแปรรูป เป็นสารที่ติดไฟและลุกไหม้ได้เมื่อมีประกายไฟ ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ และไม่เปลี่ยนสียาง คือ 4,4 Oxybis (Benzene sulfonyl hydrazide) มีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟอง 4,4 Oxybis (Benzene sulfonyl hydrazide)

ลักษณะทางกายภาพของ OBBSH เป็นผงสีขาวที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 160°C โดยให้ก๊าซประมาณ 125 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งเป็นก๊าซในโตรเจนและน้ำปริมาณเล็กน้อย และเป็นสารที่มีประสิทธิภาพมากเนื่องจากไม่เปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ ไม่ทำให้เกิดคราบ ให้ก๊าซในโตรเจนและน้ำที่ไร้กัลน OBBSH สามารถกระจายตัวได้ดีในยางระหว่างการผสมในเครื่องบดผสมระบบเปิด ส่วนการผสมในเครื่องบดผสมระบบปิดสามารถทำได้โดยไม่ต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 110°C องศาเซลเซียส และขนาดของอนุภาคของ OBBSH ไม่ส่งผลต่อการสลายตัวเนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำและมีอัตราสลายตัวที่ค่อนข้างเร็ว ปฏิกริยาการสลายตัวของ OBBSH แสดงดังภาพที่

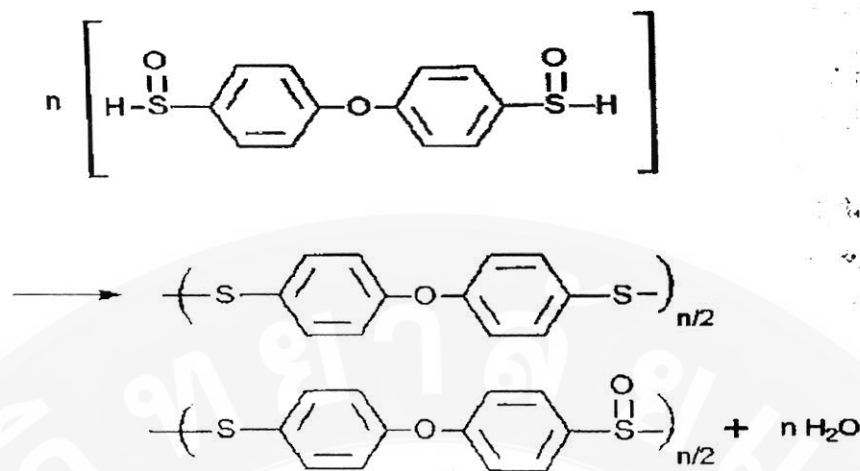
10



ภาพที่ 10 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง OBBSH

(เอกชัย และคณะ, 2552)

โดยการสลายตัวเกิดเป็นซัลโฟไฮดราไซด์ในช่วงแรกนั้นจะเกิดเป็นกรดซัลฟินิกที่ไม่เสถียร ซึ่งเสถียรได้โดยกระบวนการ Disproportionation เกิดเป็นสายโซ่ไดซัลไฟด์และไทโอซัลโฟเนต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งไม่มีสี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ปฏิกริยาการเกิดของแข็งที่เหลือจากการสลายตัวของ OBSH

(เอกชัย และคณะ, 2552)

แนวความคิดของงานวิจัย

มีการศึกษาการนำร่าสกัดน้ำมันมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตโฟมยางธรรมชาติโดยใช้ยางแท่งชนิด STR 5L แปรปริมาณร่าสกัดน้ำมันในช่วง 0-50 phr (Moonchai *et al.*, 2015) พบว่าโฟมยางมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมัน ดังนั้นการใช้ร่าสกัดน้ำมันจึงสามารถเพิ่มปริมาณรูพรุนให้กับผลิตภัณฑ์โฟมยางได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบาขึ้น และสามารถนำร่าสกัดน้ำมันได้ถึง 30 phr โดยที่โฟมยางที่ได้มีค่าการเสียดรูปหลังการกดอัดไม่ต่างจากกรณีที่ไม่ใช้สารตัวเติมมากนัก นอกจากนั้นการใช้ร่าสกัดน้ำมันยังช่วยดับกลิ่นยางและสารเคมีในยางคงรูปได้ด้วย จากผลการวิจัยที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าร่าสกัดน้ำมันสามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตโฟมยางธรรมชาติได้ งานวิจัยนี้จึงวิจัยต่อยอดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรสำหรับการผลิตโฟมยางกันกระแทกจากธรรมชาติเมื่อใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ เช่น แผ่นยางปูพื้น และอุปกรณ์กีฬา เป็นต้น โดยใช้ยางธรรมชาติชนิด STR 20 ซึ่งเป็นยางเกรดที่มีสิ่งเจือปนและสีเข้มกว่ายาง STR 5L เนื่องจากในการใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมจะทำให้ได้ยางที่มีสีเข้มขึ้นจากสีธรรมชาติของร่าสกัดน้ำมัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้มุ่งเน้นไปที่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอ่อนสวยงาม โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติของโฟมยาง เนื่องจากสารก่อฟองเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่มีผลต่อลักษณะกายภาพและสมบัติของโฟมยาง จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติการคงรูป ความหนาแน่น โครงสร้างเซลล์ การดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกล ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Moonchai *et al.* (2012) ศึกษาการนำร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูปที่ได้กับการใช้เคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณที่ 50 phr เท่ากัน พบว่ายางที่ใส่ร่าสกัดน้ำมันมีค่าระยะเวลาที่ยางคงรูปสั้น และมีความอดุลัส ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอมากที่สุด

S. Moonchai and D. Moonchai (2013) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณร่าสกัดน้ำมันและแคลเซียมกับค่าความแข็งและการกระด้างกระดอน พบว่าการใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในปริมาณที่เท่ากับการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ยางคงรูปแข็งมากกว่าการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้น ค่าความแข็งที่ต้องการทำให้สามารถใช้ร่าสกัดน้ำมันได้ในปริมาณที่น้อยกว่าส่งผลให้ได้ยางคงรูปที่มีค่าการกระด้างกระดอนมากกว่า

คริธญาและอรุณศรี (2556) ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของร่าสกัดน้ำมันต่อสมบัติของยางพองน้ำ ที่เตรียมจากน้ำยางธรรมชาติความเข้มข้น 60 เปอร์เซนต์ พบว่าปริมาณร่าสกัดน้ำมันที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมได้คือไม่เกิน 30 Phr พองน้ำยางธรรมชาติที่ผสมร่า 10 phr มีสมบัติยางพองน้ำผ่านตามมาตรฐาน มอก. 173-2519 ร่าสกัดน้ำมันสามารถเป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนได้

Moonchai *et al.* (2015) ศึกษาการใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมในโพลียูรีเทนยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเกรด STR 5L และใช้ OBSH ปริมาณ 6 phr เป็นสารก่อพอง ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมันส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปยาง ค่าผลต่างแรงบิด ค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึง และระยะยืดเมื่อขาดมีค่าลดลง ขณะที่ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมันถึง 20 phr หลังจากนั้นสมบัติทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้น จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโพลียูรีเทนยางมีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณร่าสกัดน้ำมัน ที่ปริมาณร่าสกัดน้ำมันไม่เกิน 30 phr ได้ โพลียูรีเทนที่มีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดไม่ต่างจากกรณีไม่ใช้สารตัวเติมมากนัก และร่าสกัดน้ำมันยังสามารถช่วยดักจับกลิ่นยางและสารเคมีในโพลียูรีเทนได้

Srilathakutty *et al.* (2010) ศึกษาการใช้ซีลล์เกลบมาเป็นสารตัวเติมในการผลิตพื้นรองเท้า (Microcellular soles) จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางไนไตรล์และพอลิไวนิลคลอไรด์ (NBR/PVC) พบว่าเมื่อใช้ซีลล์เกลบเป็นสารตัวเติมแทนการใช้ซิลิกา ส่งผลให้ความแข็งของแผ่นโพลียูรีเทนเพิ่มขึ้น และค่าการดูดซึมน้ำ ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดลดลง

Wimolmala *et al.* (2009) ศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลียูรีเทนจากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสทรีร์เสริมแรงโดยผงถ่านล้อย ซิลิกา และเขม่าดำ เมื่อบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสียูวีพบว่า การบ่มเร่งด้วยความร้อนและรังสียูวี ทำให้ค่าความอดุลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานการฉีกขาดและความสามารถในการยืดของยางลดลง และการใช้ผงถ่านล้อยส่งผลให้โพลียูรีเทนมีความยืดหยุ่นดีกว่าการใช้เขม่าดำและซิลิกา

Najib *et al.* (2009) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารก่อฟองต่อโครงสร้างเซลล์และสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของโฟมยางธรรมชาติ โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารก่อฟองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟองทำให้ความหนาแน่นของโฟมยางลดลง เนื่องจากโฟมยางมีจำนวนเซลล์ที่เพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการรับแรงกระแทกของโฟมยางมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟอง



อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องมือและสารเคมี

ยางและสารเคมี

1) ยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเกรด STR 20 ได้จากการนำน้ำยางสดมาผ่านกระบวนการเติมกรดให้อนุภาคยางจับตัวเป็นก้อน หลังจากนั้นนำมารีดให้เป็นแผ่นพรมและตัดย่อยเป็นชิ้นเล็กนำไปอบและอัดเป็นยางแท่ง จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จังหวัดนนทบุรี

2) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 3.57 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 81.37 กรัมต่อโมล (g/mol) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator) ในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จังหวัดนนทบุรี

3) กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง มีสูตรเคมีคือ $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์ มีความหนาแน่น 0.85 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 284.48 กรัมต่อโมล ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วมกับซิงค์ออกไซด์ในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติ จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จังหวัดนนทบุรี

4) ไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl disulfide, MBTS) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มเมอร์แคปโต ซึ่งตัวเร่งกลุ่มนี้ใช้ได้กับยางทุกประเภททำให้ยางมีอัตราคงรูปปานกลางและยางคงรูปที่ได้ก็จะสมบัติเชิงกลที่ดี มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จังหวัดนนทบุรี

5) เทตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไทูรัมเกิดจากการนำโมเลกุลของไดไทโอคาร์บาเมต 2 โมเลกุลมาต่อกันด้วยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า “ไดเมอร์เซชัน (Dimerization)” จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จังหวัดนนทบุรี

6) Lowinow[®] CPL มีชื่อทางเคมีคือ Polymeric sterically hindered phenol อยู่ในกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol derivatives) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 1.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidant) ในยางทำให้ยางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จังหวัดนนทบุรี

7) น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยแปรรูป (Processing oil) และ

เป็นสารหล่อลื่นในยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีอะตอมของคาร์บอนมาต่อกันเป็นอะลิฟาติก (Aliphatic) คือ เรียงต่อกันเป็นสายโซ่ตรงหรือมีกิ่งก้านสาขาด้วยพันธะเดี่ยวเท่านั้น น้ำมันพาราฟินจึงจัดเป็นน้ำมันที่อิมตัวสูง สูตรทั่วไปของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพาราฟินิก คือ C_nH_{2n+2} เช่น C_5H_{12} เป็นต้น จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้ไฟร์ จังหวัดนนทบุรี

8) ออกซิบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (Oxybis (Benzene sulfonyl) Hydrazide, OBSH) ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ในยาง มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว อุณหภูมิการสลายตัว 160-180 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซปริมาณ 350-400 ml/g จัดจำหน่ายโดย บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร

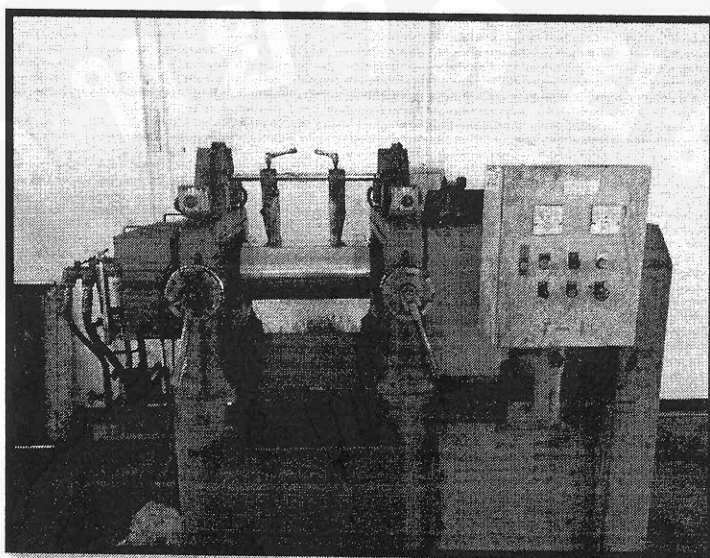
9) อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, ADC) ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดฟอง ซึ่งจะมีลักษณะเป็นผงสีเหลืองส้ม มีอุณหภูมิการสลายตัว 197-203 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซปริมาณ 210-220 ml/g ขนาดอนุภาค 10-12 ไมครอน ความชื้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ จัดจำหน่ายโดย บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร

10) กำมะถัน (Sulphur) ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่มีกำมะถันอยู่ 8 อะตอม มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีความถ่วงจำเพาะ 2.07 g/cm^3 และมีจุดหลอมเหลว 112.8-119 องศาเซลเซียส จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้ไฟร์ จังหวัดนนทบุรี

11) รัสกัดน้ำมัน (Defatted rice bran, DRB) ได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันรำข้าวออกจากรำดิบ มีความชื้น 11.27 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.45 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีน 15.50 เปอร์เซ็นต์ ค่าความเป็นกรดต่าง 6.74 จัดจำหน่ายโดยบริษัท กสิสุริย์ จำกัด จังหวัดลำพูน

เครื่องมือ

1) เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ใช้ในการบดผสมยางกับสารเคมี ซึ่งมีอัตราส่วนความเร็ว ลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1:1.5 ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery รุ่น YFTR-8 แสดงดังภาพที่ 12



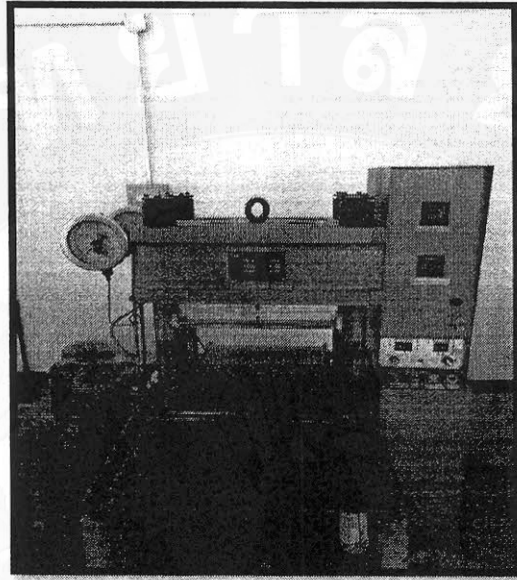
ภาพที่ 12 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

เครื่องทดสอบหาเวลาคงรูป (Moving die rheomer, MDR) เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที ผลิตโดย U-Can Dynatex Inc. รุ่น UR-2010 ประเทศไต้หวัน แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 เครื่องทดสอบหาเวลาคงรูป

เครื่องอัดขึ้นรูปยางโดยใช้ความร้อน (Compression moulding machine) เป็นเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก ใช้ในการอัดขึ้นรูปขึ้นตัวอย่าง ประกอบด้วยแผ่นอัดบนและล่าง มีความดันเท่ากับ 20 MPa ผลิตโดยบริษัท Oomn Sem-automatic moulding press รุ่น HPC-100 (D) แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 เครื่องอัดขึ้นรูปยางโดยใช้ความร้อน

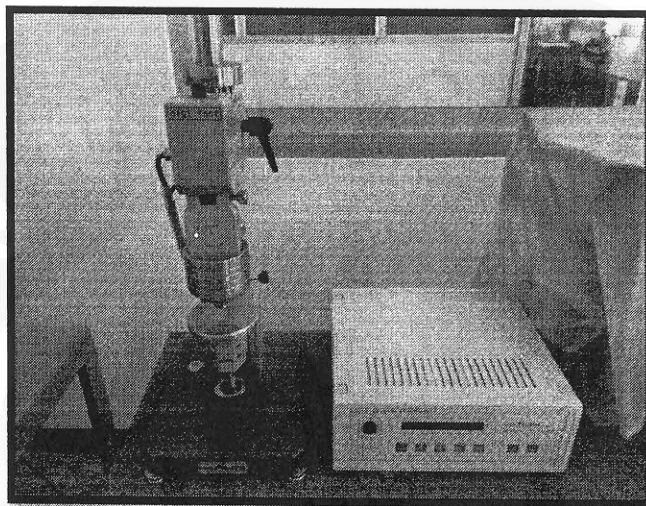
4) ตู้อบความร้อน (Hot air oven) ใช้สำหรับได้ความชื้นของวัสดุ น้ำมันและทดสอบความต้านทานการบ่มเร่ง (Aging resistance) และการทดสอบสมบัติการเสียรูปเมื่อได้แรงกดอัด (Compression set) ของยางวัลคาไนซ์

5) เครื่องซังทดสอบ 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ ADVENTURE รุ่น AR 120 ใช้ซังสารเคมีและการดูดซึม

6) เครื่องซังทดสอบ 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ ADVENTURE รุ่น AR 2140 ใช้ซังน้ำหนักของยางที่หายไปในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance)

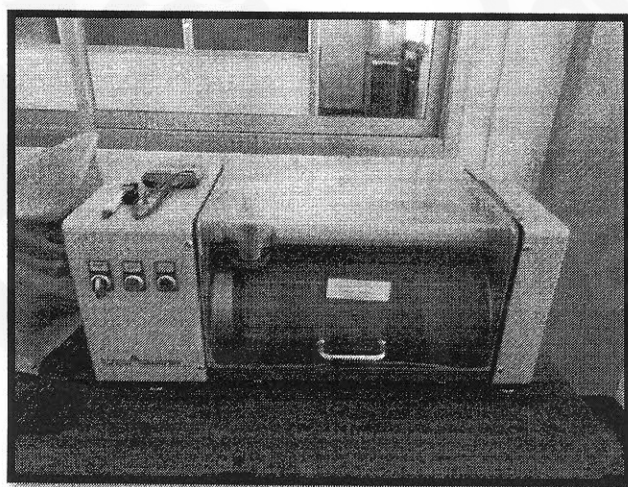
7) เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile testing machine) เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงดึงและทดสอบการฉีกขาดของยาง ด้วยแรงขนาด 1 กิโลนิวตัน ใช้ความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5565

8) เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester) เป็นเครื่องวัดความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore A ใช้ทดสอบหาค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์ ยี่ห้อ Bareiss รุ่น Digi test แสดงดังภาพที่ 15



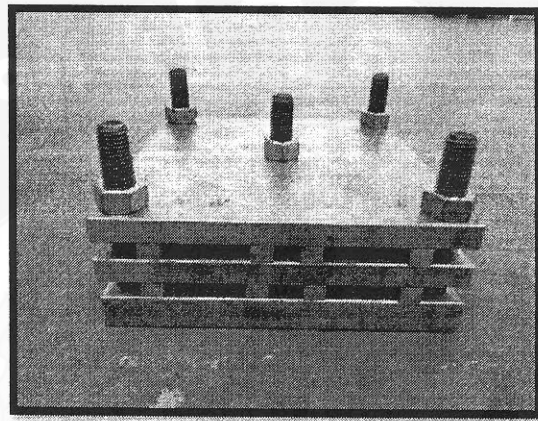
ภาพที่ 15 เครื่องทดสอบความแข็ง

9) เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ แบบ DIN (Abrasion resistance tester) เป็นเครื่องทดสอบวัดความต้านทานการสึกหรอ โดยจะหมุนชิ้นทดสอบอยู่บนลูกกลิ้งทรงกระบอกที่มีกระดาษทรายคลุมอยู่ในทิศตั้งฉากกับชิ้นทดสอบ ยี่ห้อ Bariess รุ่น AB 6252 แสดงดังภาพที่ 16



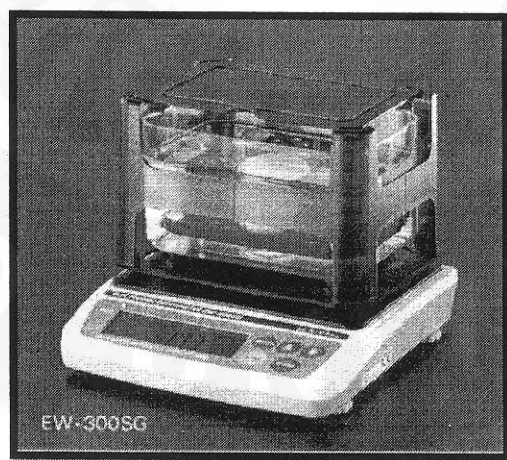
ภาพที่ 16 เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอ แบบ DIN

10) เครื่องทดสอบการเสียรูปเนื่องจากได้รับแรงกด (Compression set) ใช้ในการทดสอบการเสียรูปหลังได้รับแรงกดอัดของยางวัลคาไนซ์ โดยการทดสอบการเสียรูปเนื่องจากได้รับแรงกดอัดจะมีแผ่นเหล็กประกบขึ้นทดสอบแล้วกดขึ้นทดสอบให้ยุบลงไป 25% ของความสูงเดิมของชิ้นทดสอบ



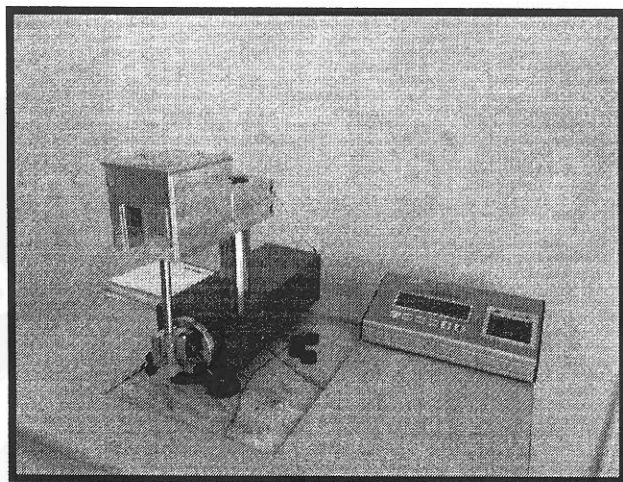
ภาพที่ 17 เครื่องทดสอบการเสียรูปเนื่องจากได้รับแรงกดอัด

11) เครื่องทดสอบความหนาแน่น (Densometer) เป็นเครื่องวัดค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ โดยมีการชั่งน้ำหนักในอากาศและในน้ำ รุ่น MD-300S โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 297 ดังแสดงในภาพที่ 18



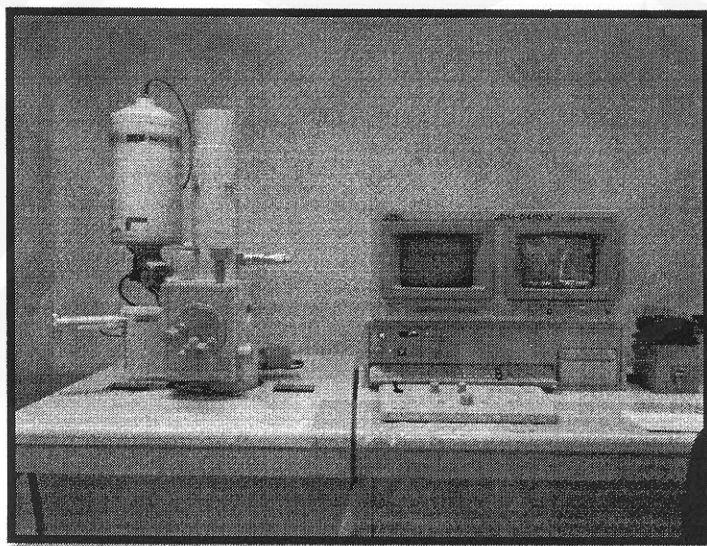
ภาพที่ 18 เครื่องทดสอบความหนาแน่น

12) เครื่องทดสอบความกระด้างตัวของยาง (Rebound resilience tester) เป็นเครื่องที่ใช้ทดสอบความกระด้างกระดอนของยาง ตามมาตรฐาน DIN 53512(b) ยี่ห้อ Gibitre



ภาพที่ 19 เครื่องทดสอบความกระด้างตัวของยาง

13) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) เป็นกล้องที่ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนเข้าระบบภายใต้สภาวะสุญญากาศ สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าผ่านระบบตรวจวัด ซึ่งจะถูกระบุบันทึกและแปล สัญญาณทางอิเล็กตรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพถ่ายบนจอโทรทัศน์ ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิธีการวิจัย

เพื่อหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติ โดยใช้ร่าสกัดน้ำมัน (DRB) ที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช เป็นสารตัวเติม ดังนั้น ใครงานนี้จึงศึกษาปริมาณสารก่อฟองที่เหมาะสมทั้งหมด 6 สูตร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ผสมสารทำให้เกิดฟองในปริมาณต่าง ๆ

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)					
	0	1	2	3	4	5
STR20	100	100	100	100	100	100
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
ZnO	5	5	5	5	5	5
OBSH/ADC	0	2	4	6	8	10
DRB 80 mesh	30	30	30	30	30	30
MBTS	1	1	1	1	1	1
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Lowinox® CPL	1	1	1	1	1	1
Paraffinic oil	3	3	3	3	3	3
Sulfur	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

ตารางที่ 3 สูตรการทำมาสเตอร์แบชสารตัวเติม 70%

ส่วนผสม	น้ำหนัก (g)
สารตัวเติม	70
ยาง STR20	25
Stearic acid	1
Paraffinic oil	4

*หมายเหตุ : การทำมาสเตอร์แบชสารตัวเติม 70% คิดจากน้ำหนักที่ใช้จริงของสูตรยางคอมพาวนด์

การเตรียมวัสดุก่อนการผสม

ก) นำร่าสกัดน้ำมันมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช แล้วนำมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 17 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีบีอีที (Brunauer-Emmett-Teller; BET) พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.43 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g)

ข) นำร่าสกัดน้ำมันที่ผ่านการอบไล่ความชื้น มาทำเป็นมาสเตอร์แบชตามส่วนผสมในตารางที่ 3 สูตรการทำมาสเตอร์แบชสารตัวเติม 70%

การเตรียมยางผสมสารเคมี

มีขั้นตอนการบดผสมยางและสารเคมีดังภาพที่ 21

ก) ชั่งสารเคมีตามสูตรยางในตารางที่ 2

ข) นำยาง STR 20 มาทำการบดในเครื่องผสมแบบเปิด (Two roll mill) ประมาณ 4 นาที เพื่อลดความหนืดของยางและสามารถผสมกับสารเคมีอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น

ค) เริ่มใส่สารเคมี โดยใส่ Stearic acid ผสม 1 นาที

ง) ใส่ Zinc oxide ลงไปผสมต่ออีก 1 นาที

จ) ใส่มาสเตอร์แบชสารตัวเติม 70% ลงไปผสมต่อ 5 นาที

ฉ) Paraffinic oil ลงไปผสมอีก 1 นาที

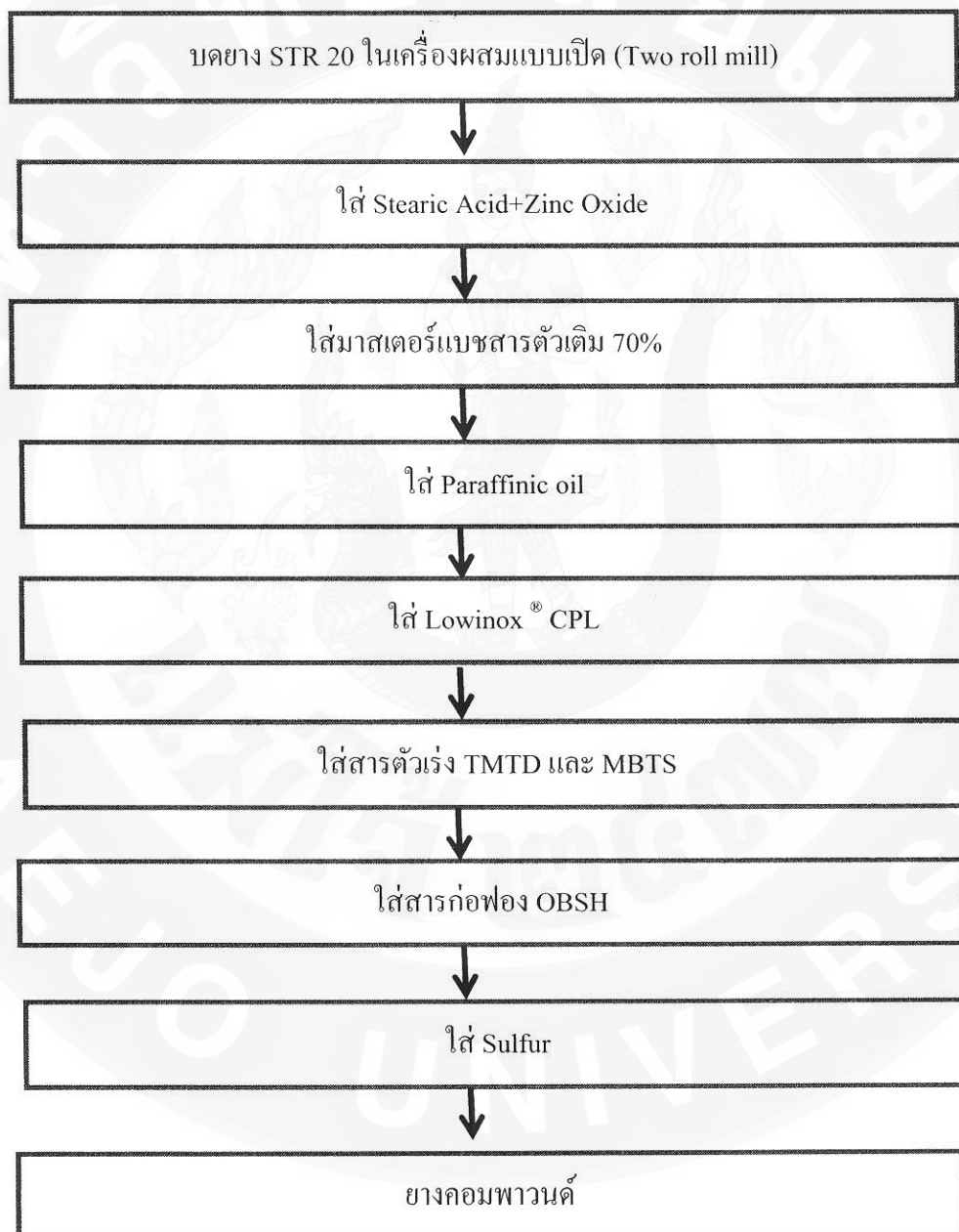
ช) ใส่ Lowinow[®] CPL ลงไปผสม 1 นาที

ซ) ใส่สารตัวเร่ง TMTD และ MBTS บดผสมต่ออีก 2 นาที

ฉ) ใส่สารก่อฟอง ผสมต่อ 5 นาที

ญ) ใส่ Sulfur บดผสมอีก 4 นาที

*หมายเหตุ เวลาการผสมมาสเตอร์แบชรัสกัสน้ำมันในปริมาณต่างๆ จะใช้เวลา 4-7 นาที ตามปริมาณมาสเตอร์แบชรัสกัสน้ำมัน สังเกตการณ์กระจายตัวของสารเคมีเบื้องต้นด้วยสายตา และเมื่อนำไปขึ้นรูปจะใช้ปริมาณยางคอมพาวนด์ 75% ของเบ้าพิมพ์



ภาพที่ 21 กระบวนการบดผสมยาง

การทดสอบ

การทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

นำยางคอมพาวนด์มาตัดให้ได้ปริมาณ 4-5 กรัม แล้วนำมาทดสอบหาสมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง ได้แก่ เวลาที่ยางเริ่มวัลคาไนซ์ (Scorch time, t_{s2}) เวลาในการวัลคาไนซ์ (Cure time, t_{90}) ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_H) ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ยี่ห้อ U-CAN DYNATEX INC รุ่น 2010 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 150°C โดยทำการทดสอบ 3 ครั้ง รายงานผลเป็นค่ากลาง

การทดสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์

เตรียมชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร และหนา 0.64 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทดสอบด้วยใช้เครื่อง Densometer แล้วรายงานเป็นค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ดังสมการที่ 4

$$D = \frac{F}{S} \quad \dots (4)$$

D = ความหนาแน่นสัมพัทธ์

F = ความหนาแน่นของโฟมยาง (g/cm^3)

S = ความหนาแน่นของยางต้น (g/cm^3)

การตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ของโฟมยาง

ตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ของโฟมยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยมีขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบดังนี้

- 1) ตัดชิ้นทดสอบขนาดกว้าง 0.5 เซนติเมตร $\times$ 10 เซนติเมตร
- 2) นำชิ้นทดสอบที่ได้จุ่มลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวรองชิ้นทดสอบ
แข็งตัว
- 3) ใช้คีมหนีบชิ้นทดสอบขึ้นมาแล้วทำการหักชิ้นทดสอบ
- 4) นำชิ้นทดสอบมาติดที่ฐานรองชิ้นงาน (Stub) โดยใช้เทปคาร์บอน
- 5) นำชิ้นทดสอบที่เตรียมเรียบร้อยแล้วมาเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ โดยใช้เครื่องเคลือบผิวชิ้นทดสอบ

6) ตรวจสอบโครงสร้างเซลล์ของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยปรับความดันให้อยู่ในช่วง 10^{-4} - 10^{-3} บาร์ (Bar)

การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1) การทดสอบความต้านทานแรงดึง

ทดสอบโดยใช้เครื่องวัดแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ISO 37-1 โดยนำยางที่ขึ้นรูปหนา 2 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปคัมเบล แล้วนำไปทดสอบที่ความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ใช้โหลดเซลล์ขนาด 1 กิโลนิวตัน (kN) วัดค่าความต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัส ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ 300 เปอร์เซ็นต์ และระยะยืดเมื่อขาด

2) การทดสอบความแข็ง

ทดสอบโดยใช้เครื่อง Durometer Hardness (Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM 2240-97 โดยใช้ชิ้นตัวอย่างหนา 6 มิลลิเมตร ทดสอบ 3 จุด โดยบริเวณ 3 จุดทดสอบต้องไม่อยู่บริเวณริมชิ้นงาน

3) การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

ทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยมีน้ำหนักในการกดขึ้นทดสอบ 2.5 นิวตัน ระยะทางในการทดสอบ 40 เซนติเมตร ใช้ชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร และหนา 0.64 เซนติเมตร ให้สัมผัสกับพื้นผิวขัดที่พื้นอยู่รอบลูกกลิ้งซึ่งน้ำหนักก่อนและหลัง เพื่อคำนวณหาเป็นปริมาตรที่หายไปตามสมการที่ 5

$$\text{Volume Loss} = \frac{(W_1 - W_2)}{D} \times \frac{200}{S_c} \quad \dots(5)$$

เมื่อ Volume Loss	=	ปริมาตรของตัวอย่างที่สูญเสียไป (ลูกบาศก์มิลลิเมตร, mm ³)
W ₁	=	น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (มิลลิกรัม, mg)
W ₂	=	น้ำหนักตัวอย่างหลังการทดสอบ (มิลลิกรัม, mg)
S _c	=	น้ำหนักที่สูญเสียไปของยางมาตรฐาน (มิลลิกรัม, mg)
D	=	ความหนาแน่นของตัวอย่าง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร, mg/mm ³)

4) การทดสอบความต้านทานการฉีกขาด

ใช้เครื่องเดียวกันกับการทดสอบความต้านทานแรงดึง ซึ่งขึ้นทดสอบตัดด้วยวิธี B ขึ้นทดสอบแบบมุม โดยทำตามมาตรฐาน ISO 34-1 ซึ่งค่าความต้านทานการฉีกขาดสามารถคำนวณจากสมการที่ 6

$$T_s = \frac{F}{d} \quad \dots(6)$$

เมื่อ	T_s	=	ความต้านทานการฉีกขาด (กิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร, kN/mm)
	F	=	แรงดึงที่ใช้ดึงชิ้นงานจนขาด (กิโลนิวตัน, kN)
	D	=	ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร, mm)

5) การทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากการอัด

การเสียรูปหลังการกดอัดจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D395-03 โดยนำชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกหนา 1.3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 เซนติเมตร มาวางระหว่างแผ่นอัด ขึ้นเกลียวให้แผ่นอัดอัดลงไป 25% ของความหนาเริ่มต้น จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบตามกำหนดเวลานำออกจากตู้อบ แกะเอาแผ่นเหล็กอัดออกแล้ววางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจากสมการที่ 7

$$\% \text{ Compression Set} = \frac{(t_0 - t_1)}{(t_0 - t_n)} \times 100 \quad \dots(7)$$

เมื่อ	t_0	=	ความสูงของชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบ (มิลลิเมตร, mm)
	t_1	=	ความสูงของชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ (มิลลิเมตร, mm)
	t_n	=	ความสูงของแผ่นกั้น (มิลลิเมตร, mm)

6) การทดสอบการกระด้งกระดอน (Rebound resilience)

ทดสอบการกระด้งกระดอนตามมาตรฐาน DIN 53512 โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้ ใช้
 ชี้นทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร และหนา 13 มิลลิเมตร การ
 ทดสอบจะยกหัวค้อนให้อยู่ในแนวระนาบกับพื้น ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้น แล้วเปิดสวิทช์ Power
 ด้านหลังของ Console และชี้นทดสอบใส่ที่จุดวางชี้นตัวอย่าง (Simple holder) กดปุ่มสวิทช์สีเขียว
 เพื่อปล่อยให้หัวค้อนกระทบกับยาง ดังสมการที่ 8

$$R (\%) = (1 - \cos \alpha) \quad \dots (8)$$

โดย α = มุมที่ค้อนน้ำหนักระดอนหลังตกกระทบ (องศา)

สามารถอ่านค่า % Impact resilience, mean และค่า Deviation ได้จากหน้าจอ Console และสามารถ
 พิมพ์ค่าผลการทดสอบได้

การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การดูดซึมน้ำจะทำการทดสอบ โดยชี้นทดสอบโพรมาธรรมชาติที่มีขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลาง 1.4 เซนติเมตร และหนา 0.64 เซนติเมตร ซึ่งจะชั่งน้ำหนักก่อนนำไปแช่ในภาชนะที่บรรจุ
 น้ำ จนชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 23°C และมีการเก็บตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักเป็น
 ระยะ ๆ แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำโดยใช้สมการ ดังสมการที่ 9

$$Q = \frac{(100 \times (W_s - W_u))}{W_u} \quad \dots (9)$$

เมื่อ Q = ปริมาณการดูดซึมน้ำ (เปอร์เซ็นต์, %)
 W_s = น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่ในน้ำ (กรัม, g)
 W_u = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนแช่ในน้ำ (กรัม, g)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้ร่าสกัดน้ำมัน
เป็นสารตัวเติม

สมบัติการวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

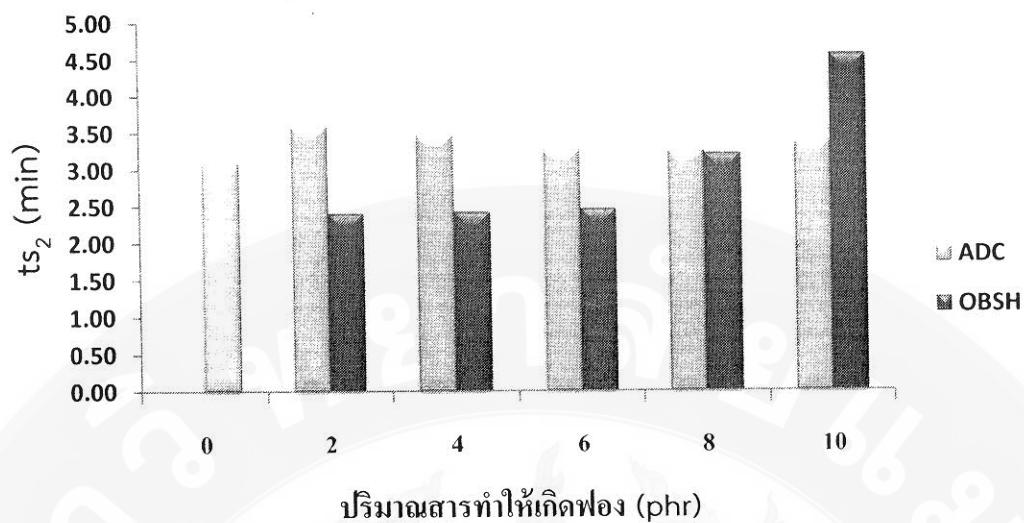
ตารางที่ 4 และภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 27 แสดงสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางโฟมที่ใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมโดยแปรชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟอง คือ ADC และ OBSH ที่ปริมาณต่าง ๆ โดยจะเห็นได้ว่าระยะเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ (Scorch time, t_{s2}) เมื่อใช้ OBSH จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากยางมี ML น้อยจึงส่งผลทำให้ยางสามารถไหลได้นานขึ้น ขณะที่การใช้ ADC ไม่ค่อยมีผลต่อระยะเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ ในส่วนของระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Cure time, t_{90}) การใช้สารทำให้เกิดฟอง ADC ส่งผลให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารทำให้เกิดฟอง OBSH ทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารทำให้เกิดฟอง เนื่องจากสารทำให้เกิดฟองทั้งสอง เกิดการสลายตัวเกิดรูพรุนภายในยาง เมื่อมีรูพรุนมากจึงทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านเซลล์โฟมได้ช้าจึงทำให้ยางสุกช้า ซึ่ง OBSH ให้รูพรุนมากกว่า ADC สังเกตได้จากภาพที่ 28 เป็นผลทำให้ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของ OBSH มากกว่า ADC ตามไปได้

ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque; M_L) เป็นค่าความแข็งแรงของยางก่อนวัลคาไนซ์ และบ่งบอกความสามารถในการไหลของยางได้ ผลที่ได้พบว่ามีแนวโน้มที่แปรปรวน อาจเป็นเพราะปริมาณสารทำให้เกิดฟอง มีการกระจายตัวได้ดีในยางคอมพาวนด์ จึงทำให้ยางมีความหนืดสูงขึ้น ในส่วนค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque; M_H) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางหลังการวัลคาไนซ์ ค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่ายางที่ใช้สารก่อฟอง ADC และ OBSH ให้ค่าแรงบิดสูงสุด แปรผกผันกัน ซึ่ง ADC มีค่าแรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณ อาจเป็นเพราะ ADC มีการสลายตัวไม่สมบูรณ์เนื่องจาก ADC มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ 197–203 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการปล่อยก๊าซ จะอยู่ที่ 160 จึงไปทำหน้าที่คล้ายกับสารตัวเติมทำให้ยางมีความแข็งแรงขึ้น ส่วน OBSH มีการสลายตัวดี เมื่อปริมาณสารมากขึ้น ยางจึงมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของยางหลังวัลคาไนซ์ลดลง สอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิด ($M_H - M_L$) ยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟอง ADC มีค่าผลต่างแรงบิดเพิ่มขึ้น บ่งบอกได้ว่าการเชื่อมโยงโมเลกุลยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของ ADC ไม่สมบูรณ์ จึงเป็นผลทำให้สารที่สลายตัวไม่หมดไปทำหน้าที่คล้ายสารตัวเติมซึ่งอาจจะมีอันตรกิริยากับยางและสารเคมี ส่วนยางที่ใช้สารก่อฟอง OBSH ค่าผลต่างแรงบิดลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น เพราะยางมีความเป็นฟองมากขึ้น การเชื่อมโยงโมเลกุลยางจึงลดลง

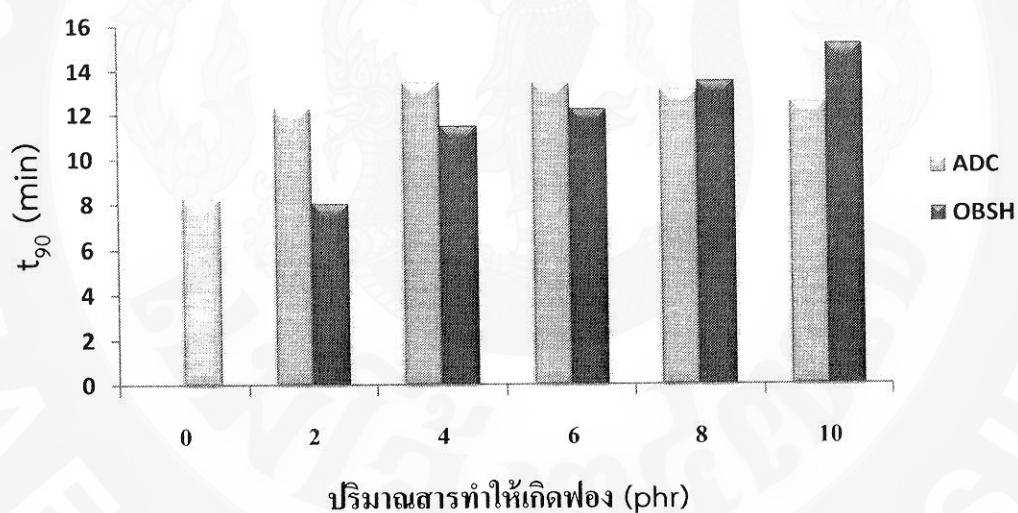
ดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ (Cure rate index ;CRI) จากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่ายางที่ใส่สารก่อฟอง ADC ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์จะลดลงและค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าผกผันกับระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ เช่นเดียวกับ OBSH ค่าดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ ผกผันกับระยะเวลาในการวัลคาไนซ์เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อฟอง ค่าดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์จะลดลง

ตารางที่ 4 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางโพลีที่ชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองต่าง ๆ

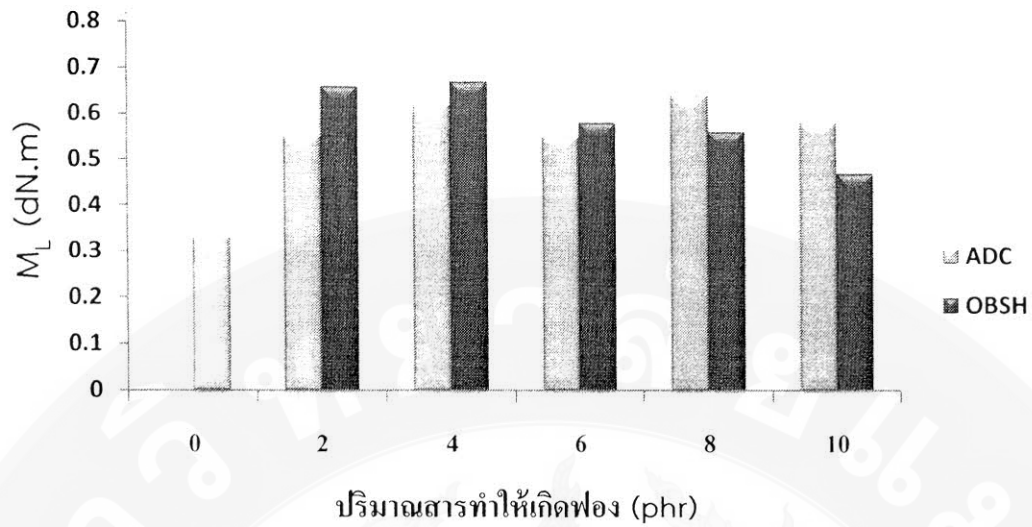
Blowing agent	Scorch time ; t_{s_2} (min)	Cure time ; t_{90} (min)	Minimum torque ; M_L (dN.m)	Maximum torque ; M_H (dN.m)	M_H-M_L (dN.m)
0	3.08	8.23	0.33	5.83	5.83
ADC 2 phr	3.58	12.31	0.55	7.65	7.1
ADC 4 phr	3.46	13.46	0.62	8.71	8.09
ADC 6 phr	3.26	13.44	0.55	9.79	9.25
ADC 8 phr	3.24	13.11	0.64	11.04	10.4
ADC 10 phr	3.36	12.55	0.58	10.65	10.09
OBSH 2 phr	2.4	8.03	0.66	6.46	5.8
OBSH 4 phr	2.42	11.47	0.67	6.12	5.45
OBSH 6 phr	2.46	12.24	0.58	5.27	4.68
OBSH 8 phr	3.21	13.51	0.56	4.87	4.3
OBSH 10 phr	4.57	15.17	0.47	4.13	3.67



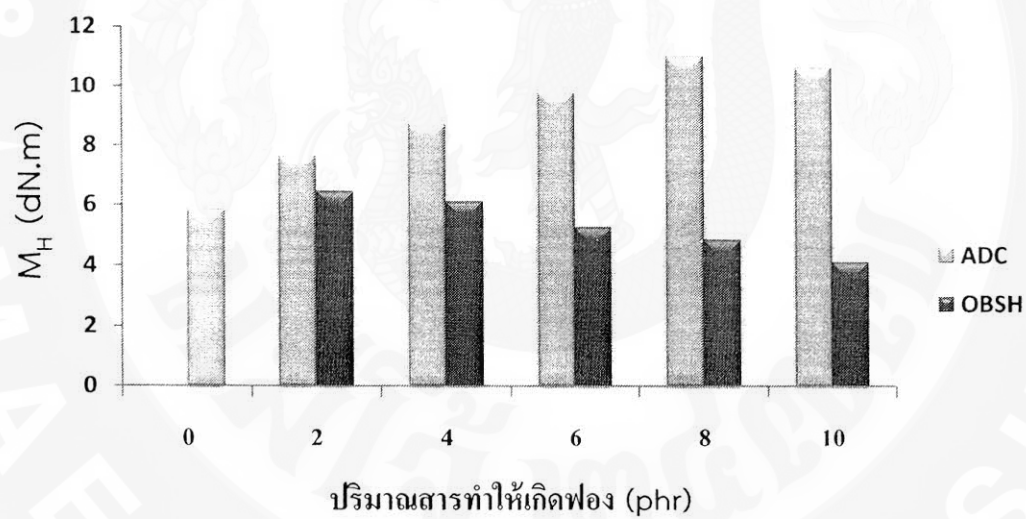
ภาพที่ 22 ระยะเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ (Scorch time, t_{s2}) ที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ



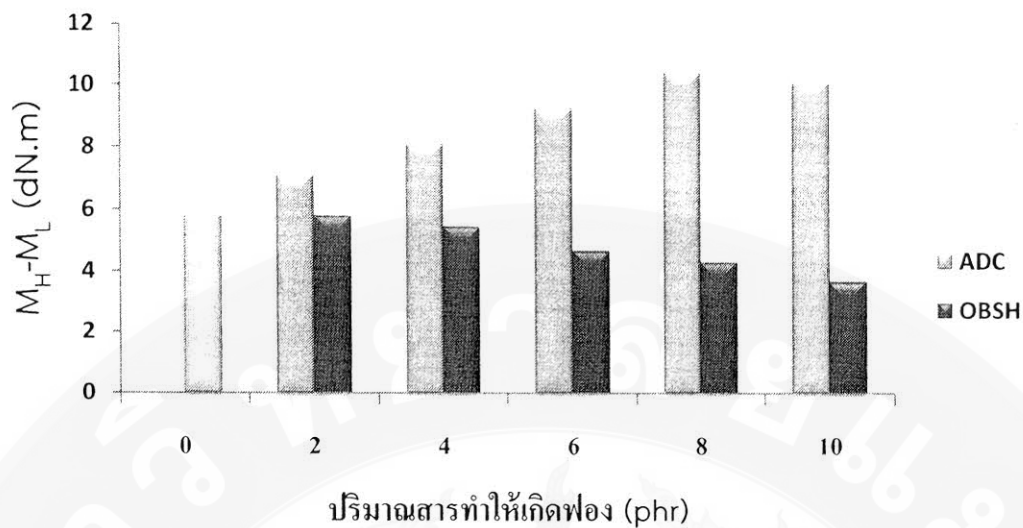
ภาพที่ 23 ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Cure time, t_{90}) ที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ



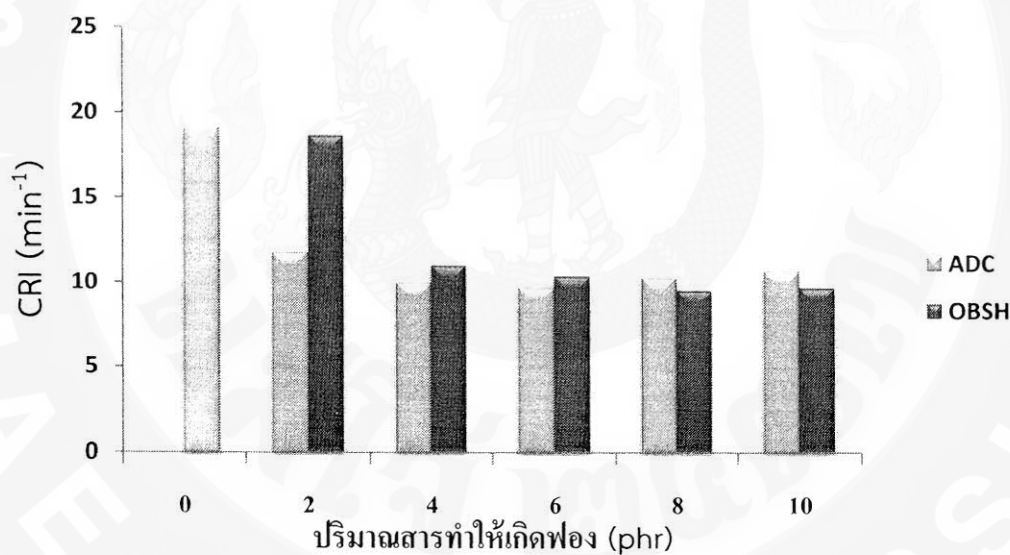
ภาพที่ 24 ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque; M_L) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ



ภาพที่ 25 ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque; M_H) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ

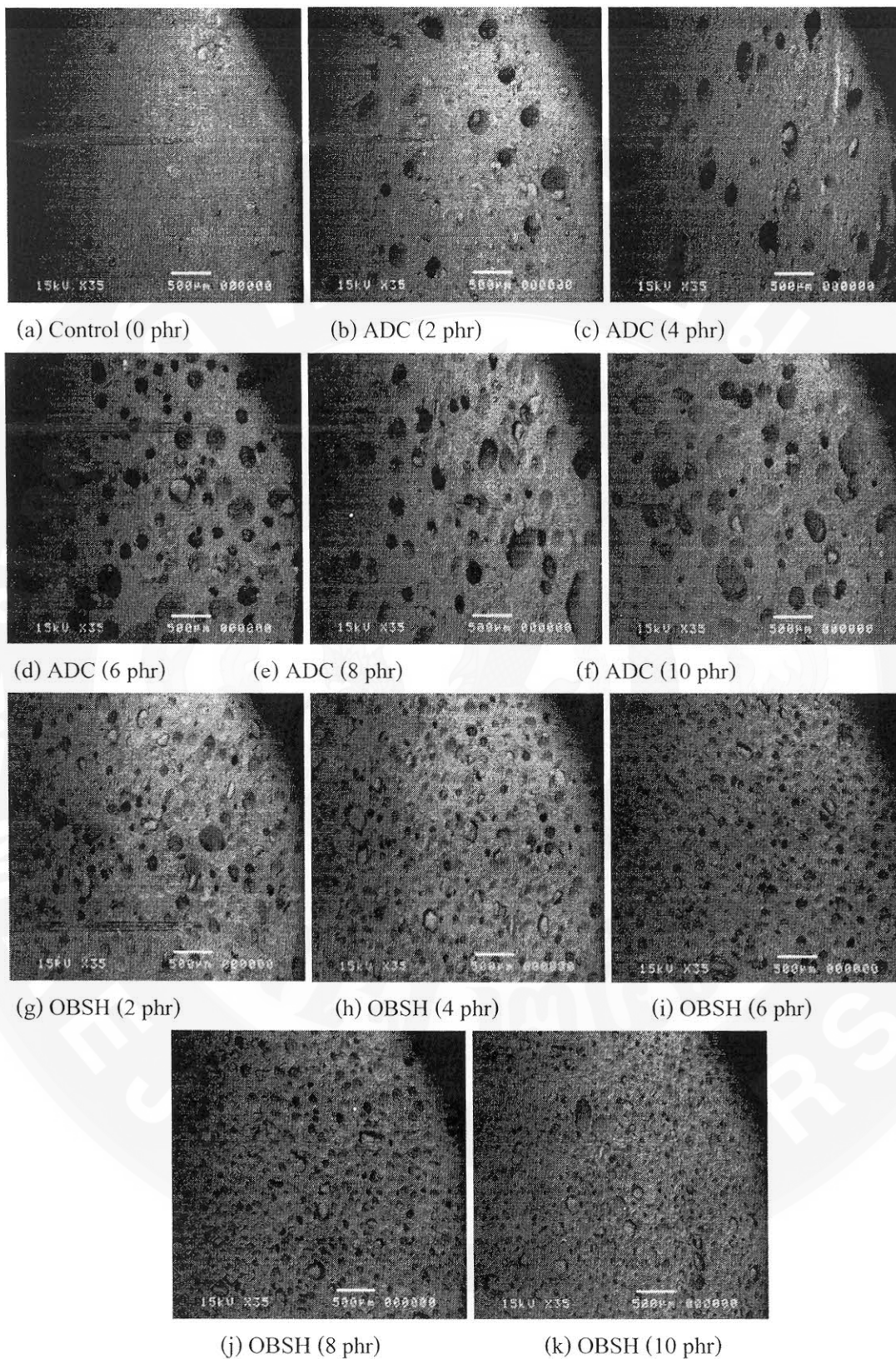


ภาพที่ 26 ค่าผลต่างแรงบิด (Torque difference; $M_H - M_L$) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ



ภาพที่ 27 ดัชนีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ (Cure rate index ; CRI) ของยางที่ใช้สารทำให้เกิดฟองที่ชนิดและปริมาณต่าง ๆ

โครงสร้างเซลล์ของโฟมยาง

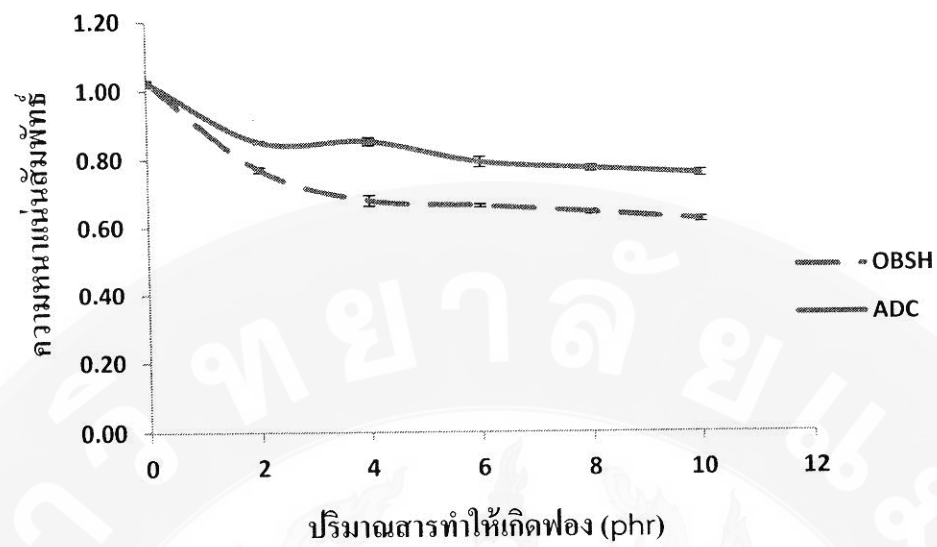


ภาพที่ 28 ภาพถ่ายเซลล์ของโฟมยางจากกล้อง SEM ที่ชนิดและปริมาณสารก่อฟองต่าง ๆ

ภาพที่ 28 แสดงลักษณะโครงสร้างเซลล์ของโคมยางธรรมชาติที่ใช้ร่าสกดน้ำมันที่ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช ในปริมาณ 30 phr โดยแปรชนิดและปริมาณสารก่อฟอง ได้แก่ ADC และ OBSH ในปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 35 เท่า พบว่าชนิดและปริมาณสารก่อฟองนั้นมีผลต่อลักษณะโครงสร้างเซลล์หรือโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของยางโคม ซึ่งสารก่อฟอง OBSH ให้จำนวนรูพรุน และการกระจายตัวที่มากกว่า ADC เนื่องจาก OBSH ได้สลายตัวโดยสมบูรณ์ ปล่อยก๊าซในโตรเจนออกมามากขึ้น ตามปริมาณสารทำให้เกิดฟอง สังเกตจากภาพ (g) ถึง (k) จากที่รูพรุนมีขนาดใหญ่และกระจายตัวได้ไม่ดี จะเริ่มมีขนาดเล็กลงและการกระจายตัวดีขึ้น ตามปริมาณสารที่เพิ่มขึ้น ส่วนสารก่อฟอง ADC ให้จำนวนรูพรุนน้อย แต่ขนาดรูพรุนใหญ่กว่า OBSH เนื่องจากการสลายตัวของ ADC อาจยังไม่สมบูรณ์ เมื่อเพิ่ม ADC ถึง 6 phr หลังจากนั้นถึงแม้จะเพิ่มปริมาณ ADC แต่ลักษณะเซลล์ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโคมยาง

จากภาพที่ 29 พบว่าเมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองเข้าไปทำให้ความหนาแน่นของยางลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารทำให้เกิดฟองเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซภายในเนื้อยางทำให้ภายในเนื้อยางเกิดรูพรุนเป็นจำนวนมากเป็นผลทำให้ยางมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งจะเห็นว่าสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH จะทำให้เกิดฟองได้มากกว่า ADC สังเกตได้จากภาพที่ 28 แสดงภาพถ่าย SEM พบว่าโคมยางที่เติม OBSH มีจำนวนรูพรุนมากกว่า ดังนั้นยางที่เติม OBSH จึงมีความหนาแน่นน้อยกว่ายางที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC เหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากการคงรูปยางใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ OBSH สามารถสลายตัวได้ดีกว่า ADC โดย OBSH มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 150-160 องศาเซลเซียส และ ADC มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า OBSH โดย ADC มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 160-203 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้ ADC เกิดการสลายตัวได้ไม่เต็มความสามารถ จึงทำให้ยางที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH มีความหนาแน่นน้อยกว่ายางที่เติม ADC

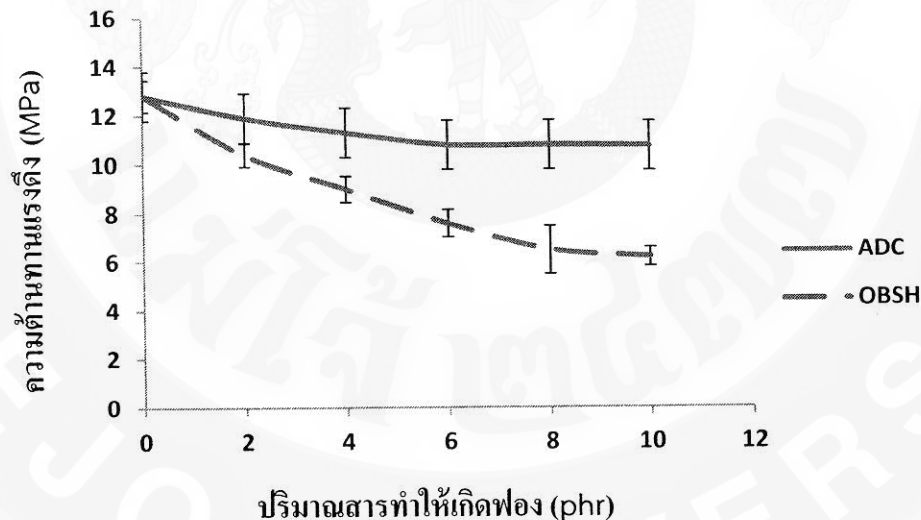


ภาพที่ 29 ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

สมบัติเชิงกล

ก) ความต้านทานแรงดึง

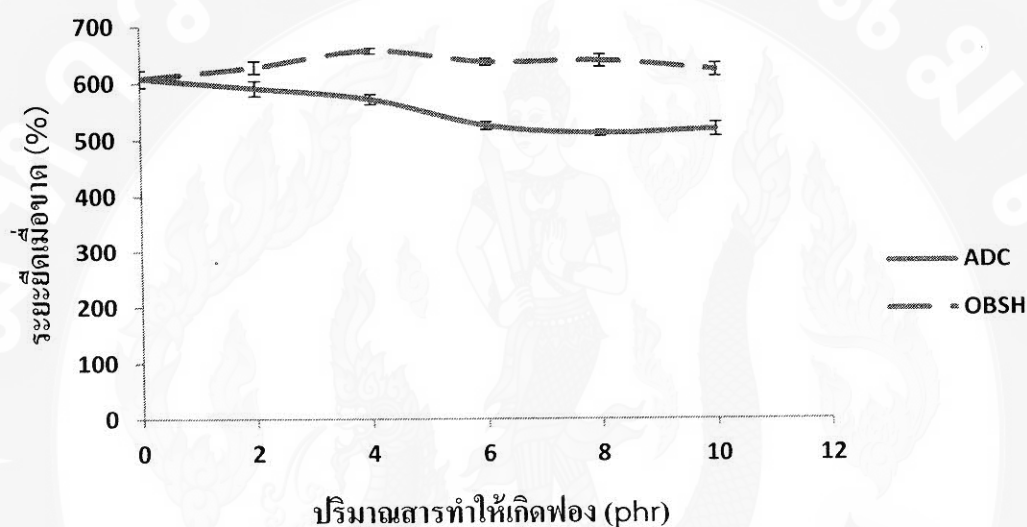
ภาพที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารทำให้เกิดฟองกับความต้านทานแรงดึง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟองจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากยางโพลีมีปริมาณของรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 28 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลียางที่เติม OBSH พบว่าโพลียางมีปริมาณรูพรุนมากขึ้นดังนั้นเมื่อให้แรงดึงจึงทำให้ยางสามารถต้านทานต่อแรงที่มากระทำได้น้อยเนื่องจากในยางมีรูพรุนมากจึงมีส่วนที่เป็นเนื้อยางน้อยจึงสามารถรับแรงได้น้อย ดังนั้นความต้านทานแรงดึงจึงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟอง และจากกราฟจะเห็นว่ายางที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH จะสามารถต้านทานแรงดึงได้น้อยกว่า ยางที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC เนื่องจาก OBSH เกิดการสลายตัวได้ดีกว่าการใช้สาร ADC เนื่องจาก OBSH สามารถสลายตัวเป็นก๊าซที่อุณหภูมิต่ำกว่า ADC โดยที่อุณหภูมิการสลายตัวของ OBSH จะอยู่ที่ 160-170 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวของ ADC อยู่ที่ 160 องศาเซลเซียส จึงทำให้โพลียางที่ใช้ OBSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง มีปริมาณรูพรุนมากกว่า



ภาพที่ 30 ค่าความต้านทานแรงดึงของโพลียางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

ข) ระยะยืดเนื้อจุดขาด

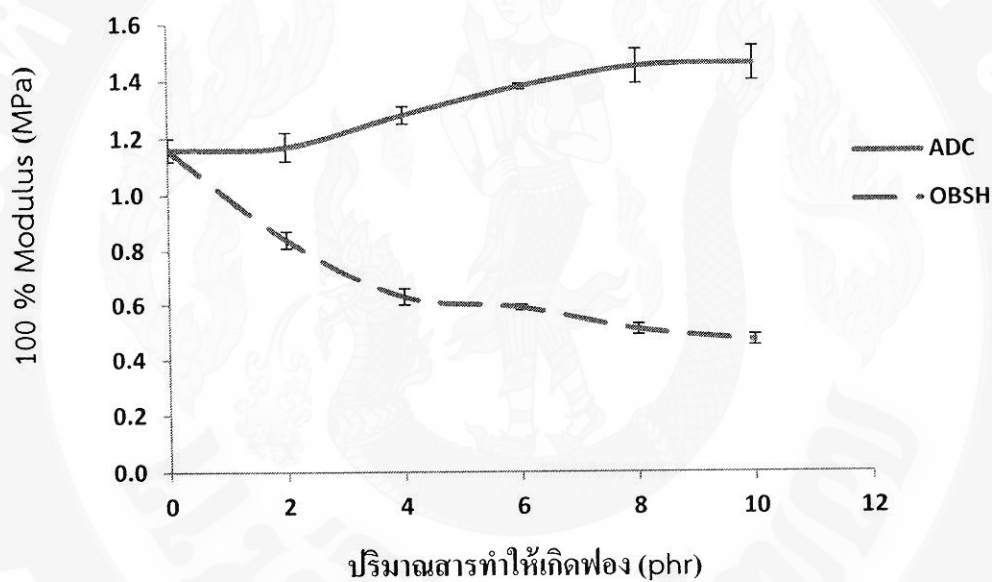
ภาพที่ 31 พบว่าระยะยืดเนื้อจุดขาด ของยางทั้งสองแตกต่างกัน โดยโฟมยางที่ใช้ OBSH จะมีค่าระยะยืดเนื้อจุดขาด เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีแนวโน้มจะคงเมื่อเพิ่มปริมาณ OBSH ขณะที่ยางที่ใช้ ADC กลับมีค่า ระยะยืดเนื้อ จุดขาด ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ ADC เนื่องจากยางที่เติม ADC จะมีพันธะการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดที่มีค่าเพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุทำให้ยางมีความสามารถในการยืดตัวลดลงและเป็นผลจากการมีฟองก๊าซกระจายอยู่ในเนื้อยาง



ภาพที่ 31 ระยะยืดเนื้อจุดขาดของโฟมยางที่ใช้ ADC และ OBSH ในปริมาณ 0-10 phr

ค) ค่ามอดูลัสที่ร้อยละ 100 เปอร์เซนต์

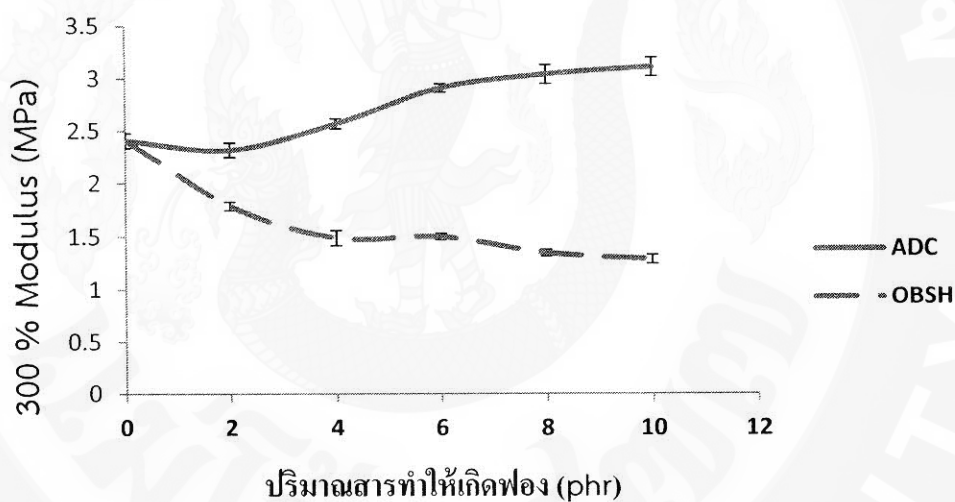
จากภาพที่ 32 พบว่ามอดูลัสที่ร้อยละ 100 เปอร์เซนต์ ของโพลียเอทิลีนทั้งสอง จะแตกต่างกัน โดยยางที่เติม OBSH จะมีแนวโน้มของค่ามอดูลัสที่ร้อยละ 100 เปอร์เซนต์ ลดลงตามปริมาณ OBSH ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณ OBSH เพิ่มขึ้นทำให้ยางเกิดรูพรุนมากขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับภาพที่ 28 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลียเอทิลีนที่เติม OBSH พบว่าโพลียเอทิลีนที่มีปริมาณรูพรุนมาก ในขณะที่ยางที่เติม ADC กลับมีค่ามอดูลัสที่ร้อยละ 100 เปอร์เซนต์ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ADC เนื่องจากยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่มากขึ้น ดูได้จากตาราง 4 ที่แสดงถึงค่าผลต่างแรงบิดของโพลียเอทิลีนที่เติม ADC จะมีค่าค่าผลต่างแรงบิดเพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้โพลียเอทิลีนที่เติม ADC กลับมีค่ามอดูลัสที่ร้อยละ 100 เปอร์เซนต์ เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 32 ค่ามอดูลัสที่ร้อยละ 100 เปอร์เซนต์ ของโพลียเอทิลีนที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

ง) ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์

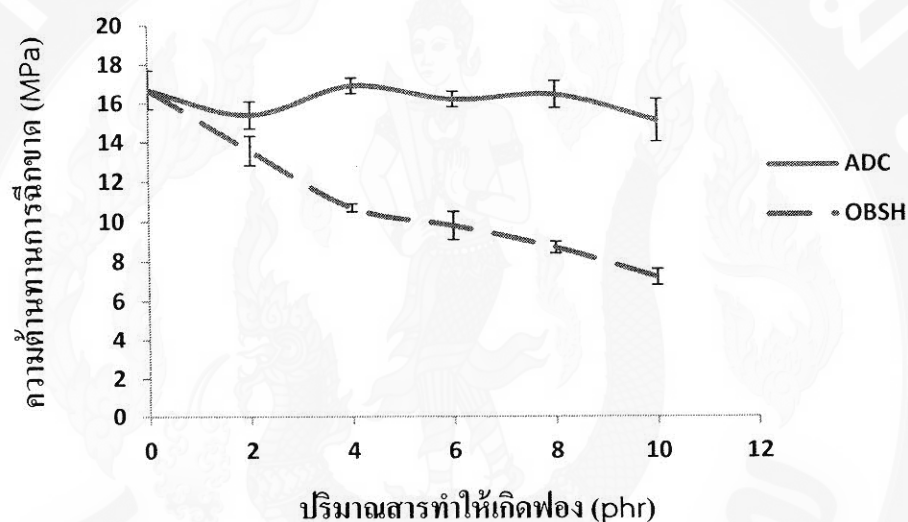
ภาพที่ 33 แสดงให้เห็นว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ของโพลียเอทิลีนทั้งสองมีความคล้ายคลึงกับค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ โดยยางที่เดิม OBSH มีมอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ลดลง ตามปริมาณ OBSH ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณ OBSH เพิ่มขึ้นทำให้ยางเกิดรูพรุนมากขึ้นตามปริมาณ ซึ่งจะสอดคล้องกับภาพที่ 28 แสดงภาพถ่าย SEM ของโพลียเอทิลีน OBSH พบว่าโพลียเอทิลีนมีปริมาณรูพรุนมาก จึงทำให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ลดลงตามไปด้วย ในขณะที่ยางที่เดิม ADC กลับมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ADC เนื่องจากยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่มากขึ้น ดูได้จากตารางที่ 4 ที่แสดงถึงค่า Torque difference ของโพลียเอทิลีนที่เดิม ADC จะมีค่า Torque difference เพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้โพลียเอทิลีนที่เดิม ADC กลับมีค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 33 ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ ของโพลียเอทิลีนที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

จ) ความต้านทานการฉีกขาด

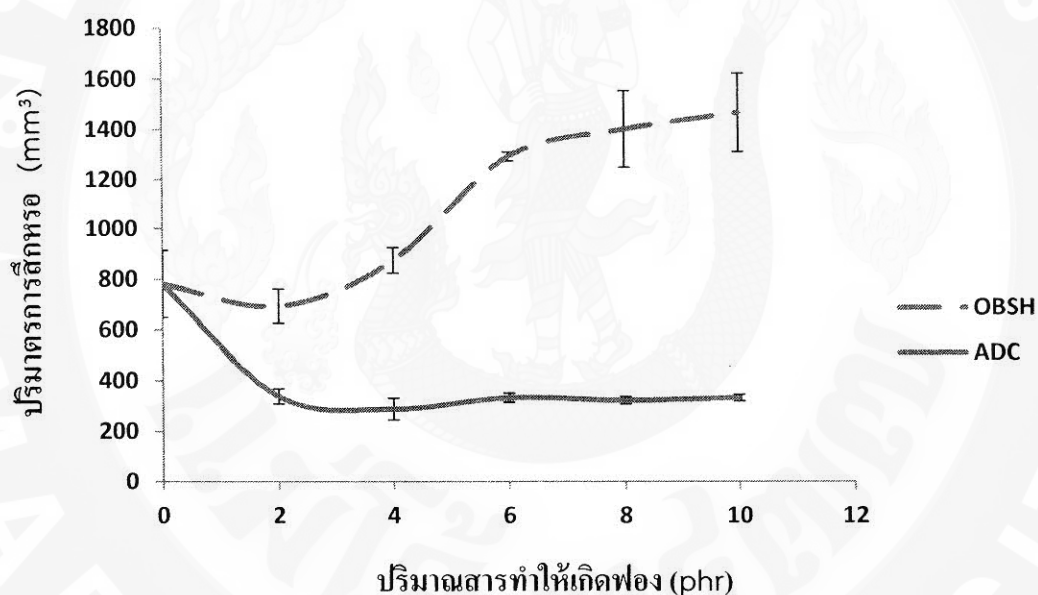
จากภาพที่ 34 พบว่าความต้านทานการฉีกขาดของโพลีเอทิลีน OBSH มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ OBSH ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางมีรูพรุนจำนวนมากขึ้นทำให้ส่วนที่เป็นเนื้อยางลดลง จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการฉีกขาดลดลง ในขณะที่ยางที่เติม ADC ความต้านทานการฉีกขาดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากยางที่เติม ADC ตั้งแต่ 2, 4, 6, 8, 10 phr มีปริมาณของรูพรุนภายในยางไม่แตกต่างกันมากนัก จึงทำให้มีค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 34 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของโพลีเอทิลีนที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

ฉ) ปริมาตรการสึกหรอ

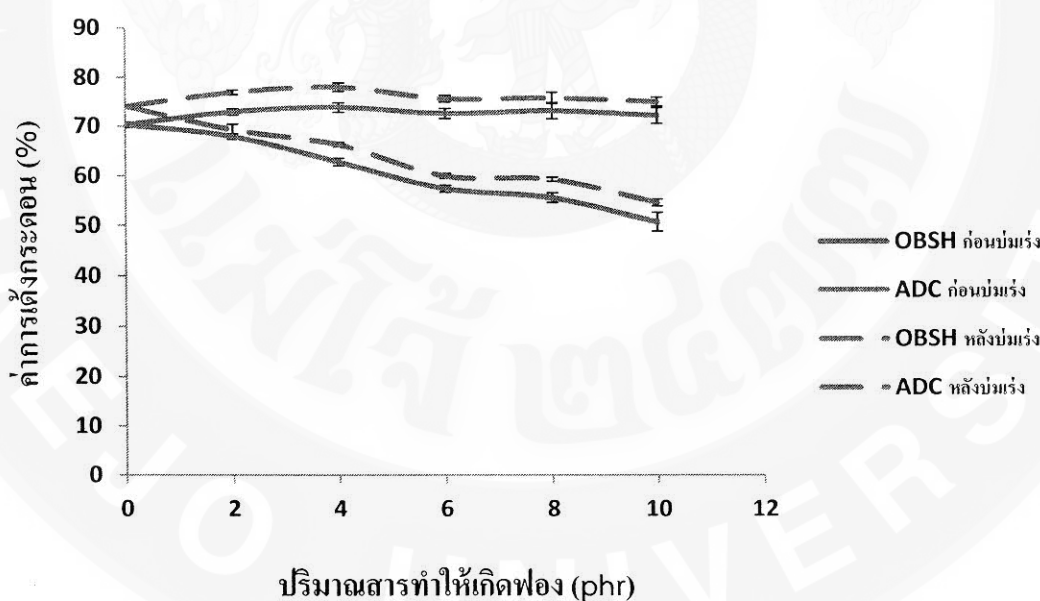
จากภาพที่ 35 พบว่าโฟมยางที่ใช้ OBSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง มีปริมาตรการสึกหรอที่เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ OBSH ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะยางมีรูพรุนเพิ่มขึ้นพื้นที่ความเป็นยางน้อยลง และจากค่า $M_H - M_L$ ในตารางที่ 4 แสดงถึงค่า Torque difference พบว่าโฟมยางที่เติม OBSH มีค่า Torque difference ต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณ OBSH บ่งบอกถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่น้อยลงจึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการขจัดผู้น้อยลง ในขณะที่โฟมยางที่เติม ADC มีปริมาตรการขจัดผู้น้อยลงและมีค่าสม่ำเสมอเมื่อปริมาณ ADC ตั้งแต่ 2-10 phr เนื่องมาจากเมื่อใช้ ADC เป็นสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลให้ค่าผลต่างแรงบิดมีค่าสูงขึ้น (ตารางที่ 4) แสดงถึงการเกิดพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลที่มากขึ้น จึงทำให้ยางโฟมมีสมบัติความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น



ภาพที่ 35 ค่าปริมาตรการสึกหรอของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

ข) การเค้นกระดูก

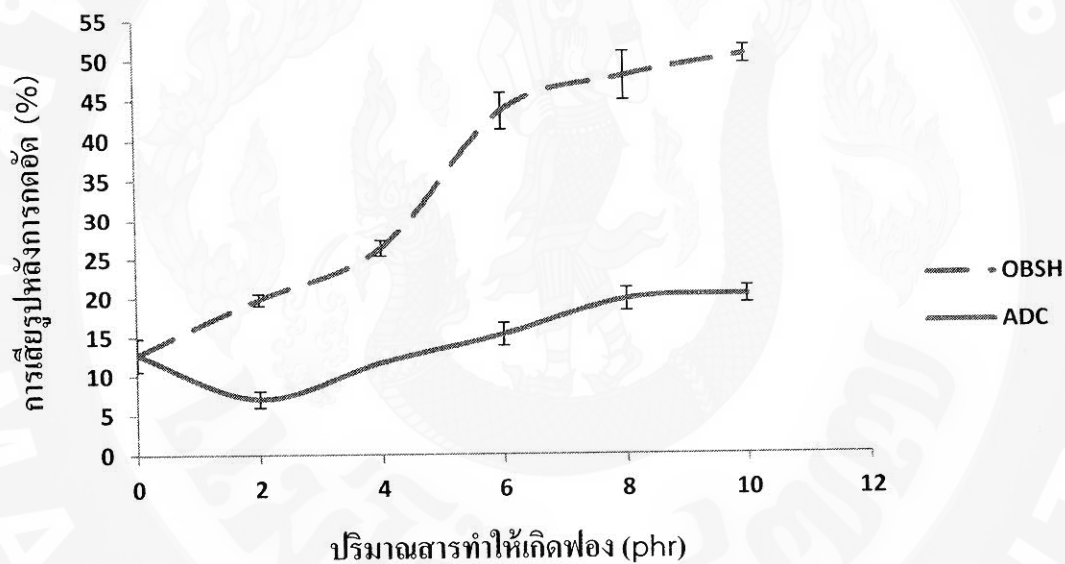
จากภาพที่ 36 พบว่าค่าการเค้นกระดูกของยางที่เติม OBSH จะมีค่าลดลงตามปริมาณของ OBSH ที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากสารทำให้เกิดฟอง OBSH สามารถปล่อยก๊าซออกมาได้มากจึงทำให้ยางเกิดรูพรุนมากจึงมีส่วนที่เป็นเนื้อยางน้อย ซึ่งเนื้อยางเป็นส่วนที่ทำให้ยางโฟมมีอีลาสติซิตีต่ำ เมื่อส่วนที่เป็นเนื้อยางน้อยจึงทำให้มีอีลาสติซิตีสูง การเค้นกระดูกของยางจึงต่ำลงตามปริมาณ OBSH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ยางที่เติม ADC เมื่อใส่ ADC 2 และ 4 phr ค่าการเค้นกระดูกจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีค่า Torque difference เพิ่มขึ้นแสดงว่าโฟมยางมีปริมาณการเชื่อมโยงมากขึ้นทำให้ยางมีการเค้นกระดูกมากขึ้นและเมื่อเพิ่ม ADC เป็น 6, 8, และ 10 phr จะเห็นค่าการเค้นกระดูกจะมีค่าค่อนข้างคงที่เนื่องจาก ปริมาณของ ADC ไม่มีผลต่อปริมาณรูพรุน สอดคล้องกับภาพที่ 28 แสดงภาพ SEM ของโฟมยางที่เติม ADC ปริมาณ 6, 8, 10 phr จะเห็นว่าปริมาณรูพรุนไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก และเมื่อนำยางไปบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่ายางจะมีค่าการเค้นกระดูกเพิ่มมากขึ้นจากเดิมเนื่องจากโฟมยางที่นำมาทดสอบ ใช้ระยะเวลาในคงรูปที่ 90 % ฉะนั้นเมื่อยางได้รับความร้อนจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นอีกจึงส่งผลทำให้ยางมีค่าการเค้นกระดูกเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย



ภาพที่ 36 ค่าการเค้นกระดูกของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

ณ) การเสีรูปหลังการกดอัด

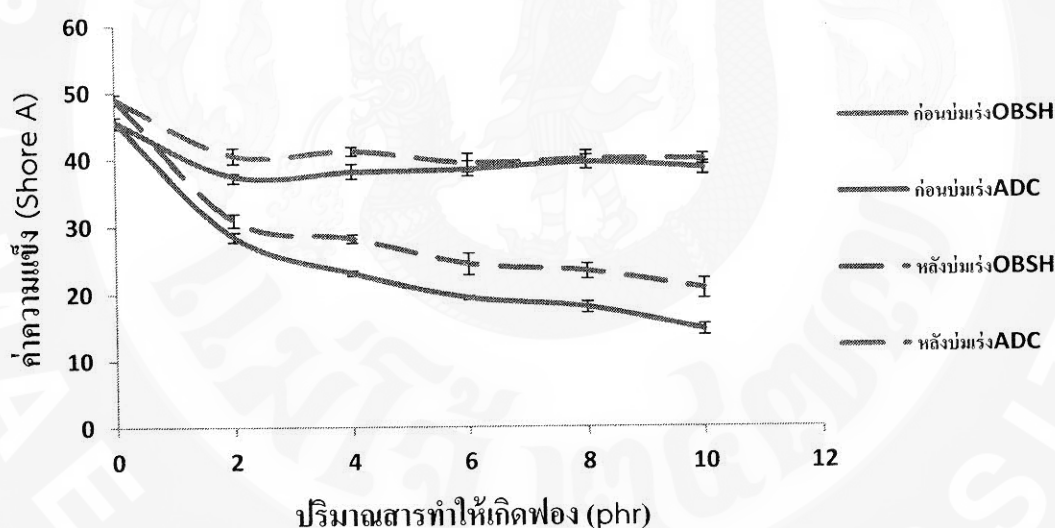
จากภาพที่ 37 พบว่าการเสีรูปหลังการกดอัดของยางจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟองจะทำให้ภายในโฟมยางเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เหตุที่การเสีรูปเพิ่มเนื่องมาจากเมื่อยางได้รับแรงกดอัดจะทำให้เซลล์เกิดการเสีรูป เนื่องจากยางมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณสาร เมื่อเปรียบเทียบสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดจะเห็นว่า OBSH จะเสีรูปหลังการกดอัดมากกว่า ADC เนื่องจากยางที่เติม OBSH จะมีรูพรุนมากกว่าในขณะที่ ADC สามารถเกิดฟองได้น้อยกว่าจึงทำให้ยางสามารถคืนตัวได้ดีกว่ายางที่เติม OBSH



ภาพที่ 37 ค่าการเสีรูปหลังการกดอัดของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

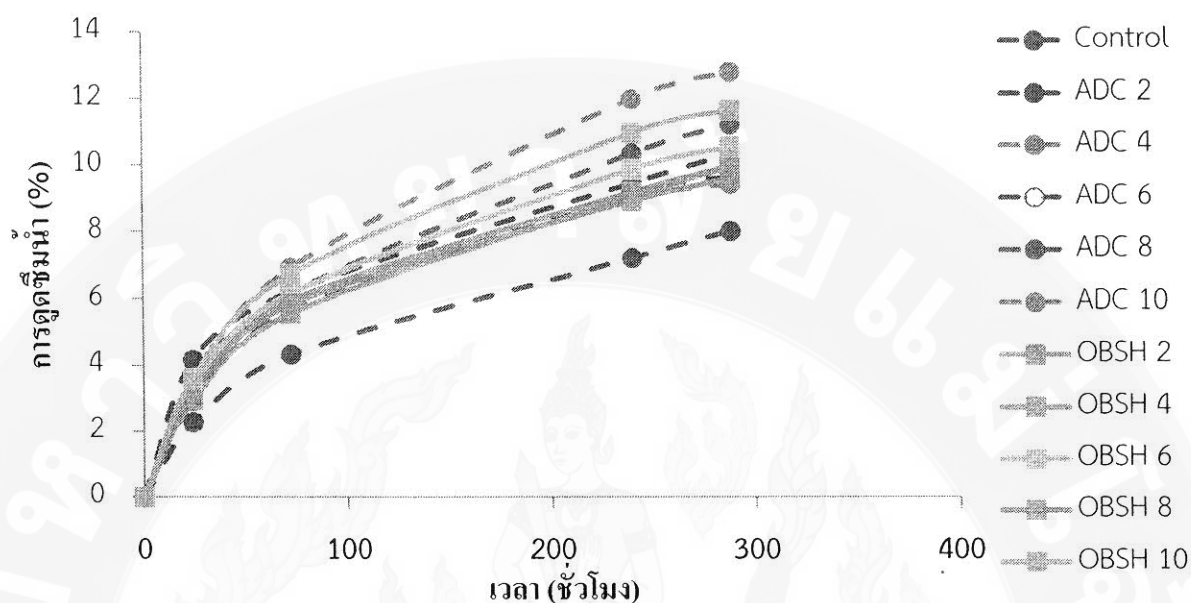
ญ) ความแข็งของโฟมยาง

จากภาพที่ 38 พบว่าโฟมยางที่เดิมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ค่าความแข็งจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากยางที่เดิม OBSH จะมีปริมาณรูพรุนที่มากขึ้นเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นดังนั้นจึงส่งผลทำให้ยางมีความแข็งลดลงซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นที่ลดลงด้วย (ดังภาพที่ 29) ในขณะที่ยางที่เดิม ADC ที่ 2 phr ค่าความแข็งจะลดลง จากนั้นจะมีแนวโน้มที่จะคงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณ ADC เป็น 4, 6, 8 และ 10 phr เนื่องจากปริมาณ ADC ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณรูพรุนเพียงเล็กน้อย สังเกตได้จากภาพที่ 28 จึงทำให้ค่าความแข็งของยางที่เดิม ADC มีแนวโน้มที่จะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเมื่อนำยางไปบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 22 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ายางจะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้นจากเดิมเนื่องจากโฟมยางที่นำมาทดสอบ ใช้ระยะเวลาในคงรูปที่ 90% ฉะนั้นเมื่อยางได้รับความร้อนจึงทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะของสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้นอีกจึงส่งผลทำให้ยางมีค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 38 ค่าความแข็งของโฟมยางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

ก) การดูดซึมน้ำของโพลียาง



ภาพที่ 39 ค่าการดูดซึมน้ำของโพลียางที่แปรชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง

จากภาพจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่การใช้ ADC ที่ปริมาณ 10 phr ทำให้โพลียางมีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด อาจเนื่องมาจากโพลียางมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่ ในส่วนการใช้ OBSH ปริมาณ 10 phr ทำให้โพลียางมีค่าการดูดซึมน้ำรองลงมาจาก ADC ปริมาณ 10 phr อาจเป็นเพราะโพลียางมีขนาดรูพรุนน้อย แต่จำนวนรูพรุนมาก ตามภาพถ่าย SEM ดังภาพที่ 28

การหาสูตรยางผสมสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์โพลียางกันกระแทกจากยางธรรมชาติเมื่อใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม

จากผลการทดลองที่ผ่านมาดังกล่าวพบว่าสารทำให้เกิดฟอง OBSH ที่ปริมาณ 6 phr เป็นสารทำให้เกิดฟองที่ทำให้โพลียางที่ใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม มีสมบัติเหมาะสม และมีโครงสร้างฐานานวทยาที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับสารทำให้เกิดฟอง ADC ที่ปริมาณต่างๆ ดังนั้นสูตรยางผสมสารเคมีสำหรับโพลียางกันกระแทกจากยางธรรมชาติเมื่อใช้ร่าสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมที่ได้จากงานวิจัยนี้สรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สูตรยางคอมพาวนด์ที่ใช้ OBSH เป็นสารทำให้เกิดฟอง

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)
STR20	100
Stearic acid	2
ZnO	5
OBSH	6
DRB 80 mesh	30
MBTS	1
TMTD	0.5
Lowinox® CPL	1
Paraffinic oil	3
Sulfur	1.2

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้รำสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม พบว่าระยะเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ เมื่อใช้ OBSH จะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่การใช้ ADC ไม่ค่อยมีผลต่อระยะเวลาก่อนยางวัลคาไนซ์ เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟอง ADC และ OBSH จะทำให้ยางมีระยะเวลาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น สำหรับค่าแรงบิดต่ำสุดพบว่ามีความโน้มที่แปรปรวน ในส่วนค่าแรงบิดสูงสุดและค่าผลต่างแรงบิด พบว่ายางที่เติม ADC มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ขณะที่ยางที่ใช้ OBSH มีค่าลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟอง

เมื่อเติม ADC จะทำให้ยางมีรูพรุนขนาดใหญ่และมีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ADC และมีแนวโน้มคงที่เมื่อมีปริมาณ ADC ที่ 6, 8, และ 10 phr กรณีเติม OBSH จะทำให้ยางมีปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ OBSH และรูพรุนมีขนาดเล็กและทั้งสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด ทำให้ยางมีความหนาแน่นลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นโดย OBSH ทำให้ยางมีความหนาแน่นลดลงมากกว่า ADC จากรูปถ่ายแสดงลักษณะรูพรุนจะเห็นได้ว่า การใช้สารทำให้เกิดฟอง OBSH จะให้โฟมที่มีรูพรุนขนาดเล็ก มีปริมาณและจำนวนรูพรุนมากกว่าการใช้สารทำให้เกิดฟอง ADC ที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปยาง 150 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเติม OBSH จะทำให้ยางมีสมบัติความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความสามารถคืนตัวหลังการกดอัด การกระด้างกระดอน ความต้านทานการสึกหรอ ความแข็ง และค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มลดลง และสมบัติที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ระยะยืด ณ จุดขาด ค่าการดูดซึมน้ำ เมื่อปริมาณ OBSH เพิ่มขึ้น และเมื่อเติม ADC จะพบว่ายางโฟมมีค่าต้านทานแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาด ความสามารถคืนตัวหลังการกดอัด การกระด้างกระดอน และความแข็งลดลง และสมบัติที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ค่าการดูดซึมน้ำ มอดูลัสที่ระยะยืด 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณ ADC ในขณะที่โฟมยางที่เติม ADC มีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นและมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อปริมาณ ADC เพิ่มขึ้น โดยที่สารทำให้เกิดฟอง OBSH ที่ปริมาณ 6 phr เป็นสารทำให้เกิดฟองที่ทำให้โฟมยางที่ใช้รำสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติม มีสมบัติเหมาะสม และมีโครงสร้างพื้นฐานวิทยาศาสตร์ที่ดีที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาสมบัติของโฟมยางธรรมชาติที่ใช้รำสกัดน้ำมันเป็นสารตัวเติมเปรียบเทียบกับโฟมยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมทางการค้าเสริมแรง ได้แก่ เขม่าดำ
2. ควรทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น แผ่นยางกันกระแทก เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- คริณญา มูลชัย และอรุณศรี เอี่ยมรัมย์. 2556. อิทธิพลของร่าสกัค่น้ำมันต่อสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติ. *ว.วิทยาศาสตร์ มข.* 41(4): 1019-1029.
- บุญญานิช อินทรพันธ์. 2555. สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล. *ว.วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.* 14 (1), 30-43.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่นจำกัด (มหาชน): กรุงเทพฯ. 150 น.
- สุภัทรชัย แสงวงษ์. 2550. สมบัติเชิงกลพลวัตและสัณฐานวิทยาของโฟมคอมโพสิตพอลิโพรไพลีนและผงไม้ยางพารา. *วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.*
- เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และกฤษฎา คงนวล. 2552. ยางเซลลูลาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก : เสริมแรงโดยผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ. *รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัย ขนาดเล็กเรื่องยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)*
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2548. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่นจำกัด (มหาชน): กรุงเทพฯ. 366 น.
- Moonchai, D., P. Juntamui and R. Ruankum. 2015 Utilization of defatted rice bran as a filler for cellular natural rubber. *RMUTI J. Special Issue* 1. 451-457.
- Moonchai, D., N. Moryadee and N. Poosodsang. 2012. Comparative properties of natural rubber vulcanisates filled with defatted rice bran, clay and calcium carbonate. *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 6(02): 249-258.
- Moonchai, S. and D. Moonchai. 2013. Modelling and optimization of rebound resilience and hardness of defatted rice bran/calcium carbonate-filled NR vulcanisates. *Polym. Test.* 32: 1472-1478.
- Najib, N.N. , Z.M. Ariff, N.A. Manan, A.A. Bakar and C.S. Sipaut. 2009. Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam. *Journal of Physical Science*, 20(1): 13-25.
- Srilathakutty, R., K.E. George and R. Joseph. 2010. Rice hull ash as a filler in microcellular soles. *Int. J. Environ. Stud.* 59(1): 133-142.