



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ยางเชลูลาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์สำหรับ
ผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก: เสริมแรงโดย
ผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอกชัย วิมลมาลา และคณะ

มีนาคม 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

ยางเชลลูลาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์สำหรับ
ผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก: เสริมแรงโดย
ผงถ่านลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ

คณะผู้วิจัย

1. ผศ. เอกชัย วิมลมาลา
2. ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
3. นายกฤษรา คงนวล

สังกัด

ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ม.เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา(Medium Projects on Rubber; MPR)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

ชื่อโครงการวิจัย

- (ภาษาไทย) ยางเซลล์ูลาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางกันกระแทก: เสริมแรงโดยผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ
- (ภาษาอังกฤษ) Cellular NR/SBR vulcanizates for gasket and cushion products: fly ash, silica and carbon black reinforcements

ชื่อหัวหน้าโครงการ

ผศ. เอกชัย วิมลมาลา
 กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)
 สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 126 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140
 โทรศัพท์ / โทรสาร (02) 470-8647
 E-mail ekachai.wim@kmutt.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย

ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
 กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)
 สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 126 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140
 โทรศัพท์ (02) 470-8645 โทรสาร (02) 470-8647
 E-mail narongrit.som@kmutt.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย

นายกฤษรา คงนวล
 กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)
 สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ระยะเวลาดำเนินการ 19 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กันยายน 2550 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2552

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ให้สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของปะเก็นยาง หรือยางกันกระแทก โดยเน้นด้านความสามารถในการรับแรงเชิงกล และความยืดหยุ่นที่ดี โดยศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่เติมสารเสริมแรงชนิดต่างๆ ดังนี้ ผงถั่วลันเตา ผงซิลิกาเกรดการค้า หรือผงเขม่าดำ โดยที่ผงซิลิกาและผงเขม่าดำใช้ในการเปรียบเทียบกับผงถั่วลันเตา และมีการศึกษาการเติมสารทำให้เกิดฟอง ในลักษณะรูปแบบของผลิตภัณฑ์ยางผสมแบบฟองน้ำ ซึ่งผลการวิจัยนี้จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้ในโรงงานของการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์ งานวิจัยนี้ เป็นการริเริ่มการใช้สารเติมแต่งผงถั่วลันเตาในยางแบบฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของการใช้วัตถุดิบจากยางธรรมชาติให้ผลิตในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มมากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ ในรูปแบบของยางฟองน้ำ สำหรับผลิตภัณฑ์ปะเก็นยางหรือยางรองกันกระแทก ที่สามารถรับแรงเชิงกลและความยืดหยุ่นได้ดี
2. เพื่อศึกษาผลของสารเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุผสมยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์

ผลการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของประเภทและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองทางเคมีในยางผสมที่เป็นโพลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่อัตราส่วนยางผสมเท่ากัน (1:1) ที่มีผลต่อสมบัติการสึกตัว ทางกล และทางโครงสร้างจุลภาค โดยใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ ออกซิบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรไซด์ (Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide; OBSH) และเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azo dicarbonamide; ADC) ที่ปริมาณ 0-10 phr สารเติมแต่งที่ใช้ คือ ผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วนคงที่ 40 phr โดยที่ผงถั่วลันเตาและผงซิลิกาทำการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ผลการทดลองพบว่า เวลาในการสุกตัว ความหนาแน่น สมบัติเชิงกลของยางผสมลดลงตามปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง โดยที่ OBSH มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารทำให้เกิดฟอง ADC ยางผสมที่เติมผงเขม่าดำมีขนาดของเซลล์ฟองขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมที่เติมผงซิลิกา และผงถั่วลันเตา ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ไม่มีผลต่อสมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด แต่สมบัติดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วย

รังสียูวี และสูตรยางพองน้ำจากการวิจัยสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นปะเก็นยางในระดับโรงงานได้ โดยพบว่า การเติมผงเขม่าดำในยางผสมให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ แต่มีการพองตัวที่น้อยกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้ำในยางผสม ส่วนการเติมผงเถ้าลอยในยางผสมทำให้ยางผสมมีราคาลดลง

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ โดยใช้ผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง สามารถสรุปได้เป็น 2 ส่วน คือ (1) ยางผสมในรูปแบบยางเนื้อตัน และ (2) ยางผสมในรูปแบบยางพองน้ำ ดังนี้

1. ผลของการวิจัยในส่วนของยางผสมรูปแบบยางเนื้อตัน พบว่า

- ความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ
- การเติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR ไม่ส่งผลต่อเวลาในการสุกตัวของยางผสม
- การเติมผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเกรดการค้ำในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 30-40 phr ให้สมบัติเด่นด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% การยืดตัวที่จุดขาดและความแข็งที่ดี และผงเถ้าลอยให้สมบัติการต้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนที่ดีกว่าผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ
- การเติมผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 40-60 phr ให้สมบัติเด่นด้านความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และการต้านต่อการขีดถูที่ดี
- การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมที่เติมสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

2. ผลของการวิจัยในส่วนของยางผสมรูปแบบยางพองน้ำ พบว่า

- การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ในยางผสมที่มีผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ทำให้เวลาในการสุกตัวของยางผสมลดลง และการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารทำให้เกิดฟอง ADC
- ปริมาณของสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด ที่ 4 - 6 phr ให้สมบัติความต้านแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด และความต้านการฉีกขาด ของยางพองน้ำ เพิ่มสูงขึ้น

- โครงสร้างจุลภาคยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำ มีเซลล์ฟองขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่ดีกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้ำและถั่วลันเตา
- ความหนาแน่นจำเพาะของยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำมีความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่าการเติมผงถั่วลันเตา
- ยางพองน้ำจากยางผสมที่เติมผงถั่วลันเตา ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ ก่อนและหลังการเร่งสภาวะด้วยความร้อน สมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด ไม่แตกต่างกัน ส่วนมอดุลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนหลังการเร่งสภาวะพบว่าสมบัติการยืดตัวที่จุดขาดลดลง
- การบ่มเร่งสภาวะด้วยรังสีแกมมาของยางพองน้ำจากยางผสม ทำให้ความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ส่วนมอดุลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และยางผสมมีการยืดตัวลดลง
- สมบัติการคืนกลับของยางผสมเมื่อได้รับแรงอัด ลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น และยางผสมที่เติมผงถั่วลันเตามีการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัด ดีกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้ำหรือผงเขม่าดำ
- การนำสูตรยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วนเท่ากัน ที่เติมผงถั่วลันเตา ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ ปริมาณ 40 phr ที่มีสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ขึ้นรูปที่โรงงานความหนา 2 และ 10 มิลลิเมตร พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปะเก็นยางพองน้ำในระดับโรงงานได้ โดยที่ยางปะเก็นพองน้ำที่เติมผงถั่วลันเตา ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ จากการวิจัย พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าปะเก็นยางพองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้ำ ที่ความหนาชิ้นงานเท่ากัน
- ยางปะเก็นพองน้ำจากยางผสมที่เติมผงถั่วลันเตา ที่ขึ้นรูปในโรงงานมีสมบัติการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม

- ควรมีการทดลองนำไปใช้เชิงพาณิชย์กับผลิตภัณฑ์เป้าหมายอื่นๆ อาทิเช่น ซีลแผ่นฉนวนกันความร้อน ซึ่งควรมีการตรวจสอบสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มเติม
- ควรศึกษาเพิ่มเติมขยายขอบเขตการใช้งานด้านการทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น เช่น การผสมด้วยชนิดยางอื่นปียอร์ หรือการผสมด้วยยางอีพิดีเอ็ม เป็นต้น
- ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกับสารเติมแต่งการค้ำชนิดอื่นๆ เช่น ซิลิโคน (แร่ควอทซ์ที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก) หรือนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้ำ ผงถั่วลันเตา และผง เขม่าดำ โดยเปรียบเทียบกับด้านสมบัติและราคา

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับ

จากโครงการ “ยางเซลลูลาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางกันกระแทก: เสริมแรงโดยผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ” สามารถเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ จำนวน 2 บทความ คือ

- **ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ**

K. Khongnual, N. Sombatsompop and E. Wimolmala*, 2009, “Properties of Cellular NR/SBR Vulcanizates with Fly Ash, Silica and Carbon Black Reinforcements” – **6th Conference in Materials Processing Technology**, 6-7th January 2009, Ramada Plaza Menam Riverside Hotel, Bangkok, Thailand, pp.66-73

- **ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในบทความระดับนานาชาติ**

E. Wimolmala*, K. Khongnual and N. Sombatsompop, 2009, “Mechanical and Morphological Properties of Cellular NR/SBR Vulcanizates under Thermal and Weathering Ageing”, **Journal of Applied Polymer Science**, 114 (5): 2816-2827.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาอย่างผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber; SBR) ศึกษาด้านพฤติกรรมการสึกตัวของยาง ความสามารถในการรับแรงทางเชิงกลและความยืดหยุ่นที่ดี โดยศึกษาอย่างผสม NR/SBR ที่อัตราส่วนเท่ากัน (1:1) สารเติมแต่งที่ใช้คือ ผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วน 0-40 phr และผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วน 0-100 phr ที่มีต่ออย่างผสม NR/SBR โดยที่ผงถั่วลอ่ยและผงซิลิกาเกรดการค้ำทำการปรับปรุงผิวด้วยสารกลุ่มควาไซเลน ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติของยางผสม 2 รูปแบบ คือ อย่างผสมรูปแบบยางเนื้อตัน และยางผสมรูปแบบยางฟองน้ำ โดยใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ ออกซิบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSH) และเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC) ที่สัดส่วน 0-10 phr ที่ปริมาณสัดส่วนสารเติมแต่งแต่ละชนิดคงที่ที่ 40 phr

ผลของการวิจัยในส่วนของยางผสมรูปแบบยางเนื้อตัน พบว่า ความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเติมแต่ง และเวลาการสึกตัวของยางผสมไม่เปลี่ยนแปลงหลังการเติมผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ ทั้งนี้ปริมาณของสารเติมแต่งที่เติมในยางผสมของผงถั่วลอ่ยและผงซิลิกาเกรดการค้ำที่เหมาะสม คือ 30-40 phr ส่วนปริมาณสารเติมแต่งผงเขม่าดำที่เหมาะสมคือ 40-60 phr ยางผสมที่เติมผงถั่วลอ่ยมีสมบัติด้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด รวมทั้งการกระดอนของยางผสมที่ดีกว่ายางที่เติมผงซิลิกาหรือผงเขม่าดำ นอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% การต้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด การกระดอน และความแข็งแรงที่ดี ส่วนการเติมผงเขม่าดำในยางผสมให้สมบัติเด่นความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และการต้านต่อการขูดถู และหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมที่เติมสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้นยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

ส่วนผลของการวิจัยในส่วนของยางผสมรูปแบบยางฟองน้ำ พบว่า การเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ในยางผสมที่เติมผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ทำให้เวลาในการสึกตัวของยางผสมลดลง และการเติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH มีประสิทธิภาพในการเร่งให้ยางผสมสึกตัวได้เร็วกว่าสารทำให้เกิดฟอง ADC และยางผสม NR/SBR มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น และพบว่ายางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำมีขนาดของฟองก๊าซที่เล็กและการกระจายของฟองก๊าซที่ดีกว่า ส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงกว่ายางผสมที่เติมผงถั่วลอ่ยและผงซิลิกาเกรดการค้ำ ส่วนผลการบ่มแรงด้วยความร้อนและการบ่มแรงสภาวะด้วยรังสียูวีของยางผสม มอดูลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และมีการยืดตัวลดลง ส่วนสมบัติการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถั่วลอ่ย มีค่าสูงกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้ำและผงเขม่าดำ และการคืนตัวกลับของยางผสมลดลงตามปริมาณสารทำให้

เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น การกระดอนของยางผสมเพิ่มขึ้นเมื่อยางผสมมีส่วนของฟองก๊าซอยู่ในเนื้อยาง ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่เติมในยางผสม NR/SBR คือ 4 phr นำสูตรยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ปริมาณ 40 phr ที่มีสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ขึ้นรูปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นที่โรงงานที่มีความหนาต่างกัน (2 และ 10 มิลลิเมตร) และทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับยางปะเก็นเกรดการค้าที่มีความหนาที่เท่ากัน โดยที่ยางปะเก็นยางฟองน้ำจากการวิจัยที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ มีสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่ายางปะเก็นยางฟองน้ำเกรดการค้า

Abstract

This work studied property development of natural rubber (NR) and styrene-butadiene rubber (SBR) blends, focused on cure characteristics, mechanical and elasticity properties. The NR/SBR blending ratio used was 1:1. The fillers used in this work were fly ash particles and commercial precipitated silica at loadings of 0-40 parts per hundred rubber (phr) and carbon black at contents of 0-100 phr. The fly ash and silica particles were chemically silane-treated. The rubber blends used in this work were studied in forms of solid and cellular rubbers. The chemical blowing agents that used in this work were Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSH) and Azodicarbonamide (ADC). The dosages of blowing agent varying from 0 to 10 phr at fixed filler content of 40 phr.

For solid vulcanizates, the Moony viscosity of NR/SBR rubber blend increased with increasing additive content. All fillers hardly affected the cure time properties. The optimum concentrations of fly ash, precipitated silica and carbon black were, 30-40, 30-40 and 40-60 phr, respectively. The tensile modulus at 200% elongation, compression set, resilience and hardness for fly ash filled NR/SBR vulcanizates were better than those for silica and carbon black filled NR/SBR vulcanizates. Carbon black was found to give the maximum tensile strength, tear strength and abrasive resistance. The thermal aging was found to improve the overall mechanical properties, except for the elongation at break.

For cellular NR/SBR vulcanizates, the results suggested that the overall cure time decreased with increasing OBSH and ADC contents. The OBSH appeared to be more effective in cure-acceleration of the NR/SBR blend than the ADC. The NR/SBR vulcanized foams produced by OBSH and ADC agents in this work had closed-cell structures. The relative density and mechanical properties of the NR/SBR blend tended to decrease with increasing blowing agent contents. The carbon black gave NR/SBR foams with smaller cell size, better cell dispersion and higher mechanical properties as compared with the precipitated silica and fly ash particles. The heat ageing and weathering resulted in an increase in tensile modulus at 200% elongation and hardness, but lowered the tensile strength, ultimate elongation and tear strength. The elastic recovery for cellular

NR/SBR vulcanizates with fly ash filler was superior to that with carbon black and silica fillers, the elastic recovery of the blends decreasing with blowing agent content. Resilience property was improved by the presence of gas phases. The optimum concentration of OBSH and ADC to be used for NR/SBR vulcanizates was 4 phr. The cellular NR/SBR vulcanizates containing 40 phr of fly ash particles or precipitated silica or carbon black with 4 phr of OBSH blowing agent were used for production of a gasket having two different thicknesses (2 and 10 mm). The mechanical properties of the cellular NR/SBR vulcanizates were compared with commercial gaskets with the same thickness. It was found that the mechanical properties of the cellular NR/SBR vulcanizates with all fillers were greater than those of the commercial gaskets.

สารบัญ

หน้า

ปกใน	ก
บทสรุปผู้บริหาร	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ช
Abstract	ฅ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ค
รายการรูปประกอบ	ด

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2. ทฤษฎีเบื้องต้น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น	4
2.1.1 ยางธรรมชาติ	4
2.1.2 ยางเอสปีอาร์	6
2.1.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม	7
2.1.4 สารเติมแต่ง	9
2.1.5 เถ้าลอย	10
2.1.6 ผงเขม่าดำและซิลิกา	12
2.1.7 กลไกยึดเกาะระหว่างยางกับสารเติมแต่ง	13
2.1.8 ทฤษฎีการเกิดโฟม	14
2.1.9 วัสดุเซลล์ลูลาร์	16
2.1.10 สารทำให้เกิดฟอง	18
2.1.11 โครงสร้างแบบเซลล์ลูลาร์	23

หน้า

2.1.12	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แบบเซลลูลาร์	24
2.1.13	การใช้งานของพอลิเมอร์แบบเซลลูลาร์	26
2.1.14	การเสื่อมสภาพของยาง	27
2.1.15	การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน	30
2.1.16	การทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อม โดยวิธีเร่งสภาวะด้วยเครื่อง QUV Accelerated Weathering	32
2.2	เอกสารบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง	34
3.	วัตถุดิบ และขั้นตอนการดำเนินงาน	40
3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในโครงการวิจัย	40
3.2	สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.3	แผนการดำเนินงานวิจัยโดยรวม	44
4.	ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล	57
4.1	การตรวจสอบคุณลักษณะของเส้นลวดและซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม	58
4.1.1	การตรวจสอบขนาดและรูปร่างของเส้นลวด	58
4.1.2	การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเส้นลวด	58
4.1.3	การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเส้นลวดและซิลิกาเกรดการค้า	59
4.2	การตรวจสอบสมบัติการไหลและการสุกของยางผสม NR/SBR	62
4.2.1	การตรวจสอบหาเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR	63
4.2.2	การตรวจสอบค่าความหนืดมูนิของยางผสม NR/SBR	64
4.3	การเติมสารเติมแต่งเส้นลวดและผงซิลิกาเกรดการค้าในยางผสมและการ บ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน	66
4.3.1	การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเส้นลวด และ ผงซิลิกาเกรดการค้า และการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน	66
4.4	การเติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR และการบ่มเร่ง สภาวะด้วยความร้อน	74
4.4.1	การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำ และ การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน	75

4.5	การเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ	80
4.5.1	การเลือกปริมาณของสารเติมแต่งในยางผสม ที่ใช้ในการศึกษาของผสมรูปแบบยางฟองน้ำ	80
4.5.2	บทสรุปงานวิจัยส่วนของยางผสม NR/SBR ในรูปแบบยางเนื้อตัน	85
4.6	การตรวจสอบสมบัติการสึกัดและสมบัติทางกายภาพของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC	86
4.6.1	การตรวจสอบสมบัติการสึกัดของยางฟองน้ำ	87
4.6.2	การตรวจสอบความหนาแน่นจำเพาะของยางฟองน้ำ	88
4.6.3	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหน้าตัดของยางผสมด้วยเทคนิค SEM	89
4.7	การตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งสภาวะของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC	96
4.7.1	ผลการทดลองการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ในยางผสม NR/SBR การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน และการบ่มเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV	97
5.	การนำงานวิจัยไปทดลองผลิตในระดับโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง	108
5.1	การนำผลงานวิจัยไปทดลองผลิตในระดับโรงงานยาง	108
5.2	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	111
5.3	การเปรียบเทียบสมบัติยางปะเก็นจากการวิจัยกับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นเกรดการค้า	112
6.	สรุปผลการทดลอง และการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	116
6.1	สรุปผลการทดลอง	116
6.1.1	สรุปผลการทดลองยางผสมในรูปแบบของยางเนื้อตัน	116
6.1.2	สรุปผลการทดลองยางผสมในรูปแบบของยางฟองน้ำ	116
6.2	การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	117
6.3	การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ จากยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ	119
6.4	ข้อเสนอแนะ	120



หน้า

เอกสารอ้างอิง	121
ภาคผนวก	127
1. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	127
1.1 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ	128
1.2 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในบทความวิจัยระดับนานาชาติ	136
2. ตอบข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ	148

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารที่ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ADC	20
2.2 องค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของ ADC	20
3.1 ส่วนประกอบของยางที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.2 การเปรียบเทียบปริมาณของซิลิกาเกรดการค้ากับซิลิกาจากถ้ำลอย	44
3.3 ลำดับการผสมสารเคมีและเวลาในการเติมสารเคมีในยางผสมรูปแบบยางตัน	50
3.4 สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นตามมาตรฐาน ASTM C864-05	52
3.5 ลำดับการผสมสารเคมีและเวลาในการเติมสารเคมีในยางผสมรูปแบบยางฟองน้ำ	53
4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ	59
4.2 ส่วนประกอบของยางผสมที่ใช้ขึ้นรูป	63
4.3 ความเหนียวของ NR SBR และยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดและปริมาณ สารเติมแต่ง	65
4.4 การสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ้ำลอยและ ผงซิลิกาเกรดการค้าปริมาณต่างๆ	73
4.5 การสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำ ปริมาณต่างๆ	79
4.6 สมบัติโดยสรุปของยางผสม NR/SBR รูปแบบยางเนื้อตัน ที่เติมผงถ้ำลอย ปริมาณต่างๆ	81
4.7 สมบัติโดยสรุปของยางผสม NR/SBR รูปแบบยางเนื้อตัน ที่เติมสารเติมแต่ง ผงซิลิกาเกรดการค้าปริมาณต่างๆ	82
4.8 สมบัติโดยสรุปของยางผสม NR/SBR รูปแบบยางเนื้อตัน ที่เติมสารเติมแต่งผง เขม่าดำปริมาณต่างๆ	83
4.9 สมบัติของยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดสารเติมแต่งที่ปริมาณ 40 phr ที่ได้เลือก นำไปศึกษาในรูปแบบยางฟองน้ำ	84
4.10 ส่วนประกอบของยางผสมที่ทดลองขึ้นรูปในรูปแบบยางฟองน้ำ	87
4.11 ผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความหนาแน่น สัมพัทธ์ของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ้ำลอย ผงซิลิกา และผงเขม่า ดำ โดยขึ้นงานที่ทดสอบหนา 9 mm	89

ตารางที่

หน้า

4.12 ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด ของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถ่านลอย ซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง ชิ้นงานที่ทดสอบหนา 12.5 mm	102
4.13 ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถ่านลอย ซิลิกาเกรดการการค้า และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง ชิ้นงานที่ทดสอบหนา 4 mm	104
4.14 ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการสูญเสียเนื่องจากการทดสอบการขัดถูของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถ่านลอย ซิลิกาเกรดการการค้า และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง ชิ้นงานที่ทดสอบหนา 9 mm	105
4.15 การเปรียบเทียบระหว่างยางเนื้อตันที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆกับยางฟองน้ำสูตรที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ 40 phr	106
5.1 สูตรยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ทดลองใช้ผลิตในโรงงานผลิตภัณฑ์ปะเก็นยาง	109
5.2 การเปรียบเทียบสมบัติของยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทก จากยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมถ่านลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้จากการวิจัยที่ขึ้นรูปที่โรงงาน กับยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทก เกรดการค้า	114
6.1 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุของยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่เติมผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำ	118
6.2 การเปรียบเทียบข้อดี / ข้อเสีย ของขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง	119

รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ	4
2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางเอสบีอาร์	6
2.3 รูปร่างลักษณะต่างๆ ของถั่วลันเตา	11
2.4 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์เปิด	16
2.5 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์ปิด	17
2.6 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์	19
2.7 ปฏิกริยาการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง ADC	19
2.8 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟอง OBSH	21
2.9 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง OBSH	22
2.10 ปฏิกริยาการเกิดของแข็งที่เหลือจากการสลายตัวของ OBSH	22
2.11 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แบบ Pentagonal dodecahedrons	23
2.12 การยึดตัวของเซลล์ขณะเกิดโฟม	24
2.13 การเสียรูปจากแรงที่มากระทำของเซลล์เปิด	25
2.14 การเสียรูปจากแรงที่มากระทำของเซลล์ปิด	25
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมแบบยืดหยุ่น	25
2.16 ชนิดการเชื่อมโยงด้วยกัมมันต์	27
2.17 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับพันธะกัมมันต์ในยางธรรมชาติ	29
2.18 การเกิดผลิตภัณฑ์สารโมเลกุลขนาดเล็กจากการเกิดออกซิเดชันของยางธรรมชาติ	30
2.19 ภาพตัดขวางของเครื่องเร่งสภาวะแสดงการให้ความชื้นสัมผัสกับชิ้นทดสอบ	33
2.20 เครื่องเร่งสภาวะ QUV Accelerated Weathering	33
3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม	45
3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวมในส่วนของยางเนื้อตัน	46
3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวมในส่วนของยางฟองน้ำ	47
3.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาความหนาแน่นสัมพัทธ์	55
4.1 ลำดับการวิเคราะห์ผลการทดลอง	57
4.2 ลักษณะรูปร่างอนุภาคถั่วลันเตาด้วยเทคนิค SEM	58
4.3 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของถั่วลันเตา	59
4.4 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า	60

รูปที่	หน้า
4.5 ภาพขยายสเปกตรัมหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า และผงเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวด้วย Couplink 89C ที่เลขคลื่น $2700 - 3300 \text{ cm}^{-1}$	60
4.6 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารกึ่งควบไซเลน Couplink 89C	61
4.7 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติการไหลและการสุกตัว	62
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ	63
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ	64
4.10 แผนการดำเนินงานในส่วนการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง	66
4.11 ความสัมพันธ์ของมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	67
4.12 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	68
4.13 ภาพถ่ายอนุภาคผงเถ้าลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายใน โดยใช้เทคนิค SEM	69
4.14 ความสัมพันธ์ค่าการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	70
4.15 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	70
4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	71
4.17 ความสัมพันธ์ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนซิลิกาต่างๆ	72
4.18 ความสัมพันธ์ของการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนซิลิกาต่างๆ	73

รูปที่	หน้า
4.19 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง	74
4.20 ความสัมพันธ์ของมอดุลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	75
4.21 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	76
4.22 ความสัมพันธ์ของการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	76
4.23 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	77
4.24 ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ	78
4.25 ความสัมพันธ์ของการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ	78
4.26 ความสัมพันธ์ของการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ	79
4.27 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติการสึกตัว และสมบัติทางกายภาพของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC	86
4.28 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อเวลาในการสึกตัวของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำ	88
4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงถ่านลอย ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ ของชิ้นงานที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร	91
4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงซิลิกา ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ ของชิ้นงานที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร	92
4.31 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงเขม่าดำปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ ของชิ้นงานที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร	93

รูปที่

หน้า

4.32	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR ที่เติม และไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณ 6 phr ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และ ผงเขม่าดำ ที่ ปริมาณ 40phr	95
4.33	แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC	96
4.34	อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อคุณสมบัติการยืดตัว 200%ของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)	97
4.35	อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงดึง ของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)	99
4.36	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงเถ้าลอย ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH ที่ปริมาณ 6 phr	99
4.37	อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อการยืดตัวที่จุดขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือ ผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)	100
4.38	อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)	101
4.39	อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความแข็งแรงของยาง ผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)	101
4.40	ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา เกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ที่ 6 phr ก่อนและหลังการทดสอบการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด ชิ้นงานที่ทดสอบหนา 12.5 mm	103

รูปที่	หน้า
5.1 แผนการดำเนินงานทดลองผลิตในโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง	108
5.2 แผ่นปะเก็นยางฟองน้ำยางผสม NR/SBR ที่มีผงเถ้าลอย ซิลิกา และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง ที่ขึ้นรูปจากโรงงาน ที่ใช้แม่พิมพ์ขนาด 310x310x2 mm	110
5.3 แผ่นปะเก็นยางฟองน้ำยางผสม NR/SBR ที่มีผงซิลิกา ผงเขม่าดำ และผงเถ้าลอย เป็นสารเติมแต่ง ที่ขึ้นรูปจากโรงงาน ที่ใช้แม่พิมพ์ขนาด 310x310x10 mm	110
5.4 ลักษณะชิ้นงานยางฟองน้ำแผ่นเรียบจากยางผสม NR /SBR ที่เติมผงซิลิกาเกรด การค้า	111
5.5 ชิ้นงานยางฟองน้ำแผ่นเรียบจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรด การค้า และผงเขม่าดำที่เตรียมขึ้นรูป ที่ใช้ทดสอบความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด	112
5.6 ยางปะเก็น/แผ่นยางกันกระแทกเกรดการค้า วัสดุยางธรรมชาติ จากบริษัท Techno Foam จำกัด ที่เตรียมขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด	113

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ

อุตสาหกรรมยางพาราเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญยิ่งของประเทศไทย มีการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบหลัก หรือมีการใช้ยางธรรมชาติร่วมกับยางสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น อุตสาหกรรมยางผสม (Rubber blend) จึงมีการใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อต้องการสมบัติเด่น และข้อได้เปรียบของยางแต่ละชนิด เช่น อุตสาหกรรมผลิตสายพานลำเลียง (ในส่วนของยางฉาบผ้าใบ) เลือกใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านความเหนียวและความยืดหยุ่นที่ดี ส่วนยางสังเคราะห์เอสปีอาร์มีสมบัติเด่นด้านการต้านทานต่อการเสียดสี (Abrasive resistance) ได้ดี ซึ่งผลิตภัณฑ์สายพานลำเลียงต้องการสมบัติทางด้านความเหนียวและนุ่มที่สามารถยึดติดกับผ้าได้ดี ดังนั้น จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติใส่เข้าไปในวัสดุผสม และเลือกใช้ยางเอสปีอาร์เพื่อสมบัติการต้านต่อการขัดถูกับผิวโลหะขณะใช้งานได้ดี

ปัจจุบันในต่างประเทศมีการนำวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ (ยางผสม NR/SBR) มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบยางซีลปะเก็นที่ทนต่อความร้อน [1] และยางพองน้ำในรูปแบบของเซลล์ปิดที่มีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดี และมีการใช้สารเติมแต่งทั่วไป (ผงเขม่าดำหรือซิลิกา) [2] แต่ยังไม่พบการนำถั่วลอ (ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ) เป็นสารเติมแต่งในยางผสมดังกล่าว

จากผลงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีถั่วลอเป็นสารเติมแต่ง” โดยณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ [3-4] ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการนำถั่วลอเป็นสารเสริมแรงในวัสดุผสมยาง NR/SBR โดยศึกษาการใช้ซิลิกาจากผงถั่วลอ และการปรับปรุงผิวผงถั่วลอ ที่สัดส่วนปริมาณซิลิกาจากถั่วลอเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า และทำการปรับปรุงผิวสารเสริมแรงทั้งสองชนิดด้วยสารคู่ควบชนิดไฮเลน คือ บีส-(3-ไตรเอททอกซีไซลิล โพรพิล) เตตระซัลเฟน (Couplink 89C) และทดสอบสมบัติการสึกของยาง สมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกลพลวัต และการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ผลการวิจัยโดยรวมพบว่า เมื่อนำถั่วลอที่ผ่านการปรับปรุงผิว เติมในยางผสม NR/SBR ทำให้เวลาในการสึกของยางลดลง และสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาด ส่วนการปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้าด้วยสารคู่ควบไฮเลน Couplink 89C ความ

เข้มข้นที่ 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักซิลิกา ที่สัดส่วนของยางผสม NR/SBR เท่ากัน (1:1) พบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาเกิดการค้ำเพิ่มขึ้น เวลาในการสุกของยางมีแนวโน้มลดลงและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

ผลจากการวิจัยโครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีถั่วลอ่ยเป็นสารเติมแต่ง” [3-4] และสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง [5] ทำให้คณะผู้วิจัยฯ มีแนวความคิดที่มีความต้องการพัฒนาต่อจากการนำวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ในรูปแบบอื่นๆ เช่น ปะเก็นยางหรือยางกันกระแทก เน้นด้านความสามารถในการรับแรงเชิงกลและความยืดหยุ่นที่ดี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่เติมสารเสริมแรงชนิดต่างๆ เช่น ผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ (โดยที่ผงซิลิกาและผงเขม่าดำใช้ในการเปรียบเทียบกับผงถั่วลอ่ย) ที่ปริมาณสัดส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 40 phr และสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ปริมาณ 0 ถึง 10 phr และทำการตรวจสอบสมบัติการไหลและการสุกตัวของยาง ความหนาแน่นสมบัติเชิงกล ด้านความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด การต้านทานต่อการขาด ความยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด ความแข็ง และการกระดอน โครงสร้างจุลภาค ตรวจสอบการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและรังสียูวี ในลักษณะรูปแบบของผลิตภัณฑ์ยางผสมแบบฟองน้ำ ซึ่งการเติมผงถั่วลอ่ยในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์นี้ นับเป็นนวัตกรรมใหม่ของการผลิตผลิตภัณฑ์ยางผสมแบบฟองน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมปะเก็นยาง หรือยางรองกันกระแทก ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำไปใช้งานอุตสาหกรรมยางโฟมที่ผลิตจากยางธรรมชาติได้ด้วย

ความคิดริเริ่มในงานวิจัย

จากการค้นคว้าเอกสารวิจัย ยังไม่พบมีการศึกษายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่ทำเป็นผลิตภัณฑ์ในลักษณะของยางฟองน้ำที่มีการเติมผงถั่วลอ่ยเป็นสารเติมแต่ง ดังนั้น งานวิจัยนี้ถือเป็นการริเริ่มนำผงถั่วลอ่ยเป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ ในรูปแบบของยางฟองน้ำ สำหรับผลิตภัณฑ์ปะเก็นยางหรือยางรองกันกระแทก ที่สามารถรับแรงเชิงกลและความยืดหยุ่นได้ดี

- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุผสมยางพองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 วัสดุยางธรรมชาติเกรด STR 20 จากบริษัท ช่วยชวน จำกัด
- 1.3.2 วัสดุยางเอสปีอาร์ เกรด 1712 จากบริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ส จำกัด
- 1.3.3 วัสดุเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 1.3.4 เตรียมสารประกอบยางผสมกับสารเติมแต่งเถ้าลอยด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่
- 1.3.5 ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน
- 1.3.6 ทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐานที่ระบุในรายละเอียดของแผนงาน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

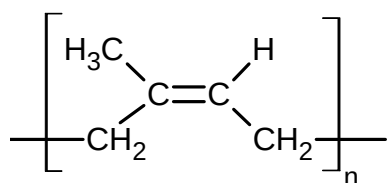
- 1.4.1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้เกี่ยวกับวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีสารเสริมแรงผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ให้มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานด้านยางโฟม
- 1.4.2 ด้านเศรษฐกิจและสังคม เป็นการนำสารเสริมแรงผงเถ้าลอยเป็นวัสดุทดแทนสารตัวเติมทางการค้าอื่นๆ ในการผลิตยางพองน้ำจากวัสดุผสมยาง NR/SBR เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดการนำเข้าสารเติมแต่งจากต่างประเทศ
- 1.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อม เป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้ (ผงเถ้าลอย) มาใช้ประโยชน์ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อลดการก่อให้เกิดของเสีย
- 1.4.4 ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์ สามารถนำผลงานวิจัยวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ไปใช้ในอุตสาหกรรมยางพองน้ำเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ปะเก็นและยางกันกระแทกได้จริง
- 1.4.5 ด้านวิชาการ จัดทำวิทยานิพนธ์และเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบบทความวิจัยในวารสารวิชาการ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ
- 1.4.6 ด้านอื่นๆ เป็นแนวทางในการเชื่อมโยงงานวิจัยระหว่างภาครัฐ และภาคอุตสาหกรรมที่อาจจะสามารถนำผลงานไปใช้จริง

บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) โครงสร้างหลักประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนดังโครงสร้างทางเคมี รูปที่ 2.1 จึงทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมันแต่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [5]

เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน สายโซ่ของยางธรรมชาติเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย จึงทำให้คงสภาพยืดหยุ่นได้ดีนอกจากนี้ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับการยืดออก ทำให้มีความทนแรงดึงสูงมาก เนื่องจากยางธรรมชาติมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาว เพื่อนำไปใช้งานต้องทำการบดให้สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลงและเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดพันธะข้ามสำหรับการเพิ่มความแข็งแรงของยางธรรมชาติ สามารถทำได้โดยการเติมสารตัวเติมแบบเสริมแรงได้ เช่น ผงเขม่าดำ หรือผงซิลิกา

2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ความยืดหยุ่น (Elasticity) ลักษณะที่เด่นประการหนึ่งของยางธรรมชาติ คือยางธรรมชาติที่ผ่านการคงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับสู่รูปร่างเดิมหรือใกล้เคียงเดิมอย่างรวดเร็ว

ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูปมีสมบัติที่ดีในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องประกอบหลายชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน เช่นยางล้อรถยนต์

ความต้านแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารเสริมแรงเข้าช่วย การเติมสารเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น ซึ่งจะต่างจากยางสังเคราะห์ทั่วไปที่มีค่าความต้านแรงดึงต่ำซึ่งมักเติมสารเสริมแรงเพื่อให้ค่าความต้านแรงดึงสูงขึ้น

ความต้านต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานการขัดถูในกลุ่มที่สูงมาก

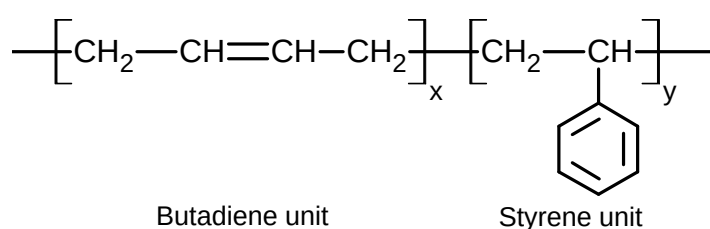
การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆจะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยางด้วยเหตุนี้ในระหว่างการผลิต ผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Anti degradants) และไข (Wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ยางธรรมชาติมีการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดค่อนข้างต่ำที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึก ทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไปในขณะที่ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมคุณภาพ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดลดลง

การกระดอน (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในขณะการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี Hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะกับการใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูง อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

2.1.2 ยางเอสปีอาร์ (SBR)

ยางเอสปีอาร์ (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) หรือยางสังเคราะห์สไตรีนบิวตะไดอิน เป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของสไตรีน และมอนอเมอร์ของบิวตะไดอิน ได้จากการปฏิกิริยาของการพอลิเมอไรส์แบบอิมัลชัน มักประกอบด้วยสไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene monomer) ประมาณ 23.5% และบิวตะไดอินโมโนเมอร์ (Butadiene monomer) ประมาณ 76.5% ซึ่งโมโนเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random copolymer) โครงสร้างของยางเอสปีอาร์ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางเอสปีอาร์ [5]

2.1.2.1 สมบัติทั่วไปของยางเอสปีอาร์

ยางเอสปีอาร์เป็นยางประเภทที่มีการใช้งานได้ทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ เพราะสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง และเนื่องจากเป็นยางสังเคราะห์จึงมีสมบัติที่สม่ำเสมอ สิ่งเจือปนน้อยและไม่ต้องบดยางให้ نرم ก่อนทำการผสมเนื่องจากถูกสังเคราะห์มาโดยกำหนดไม่ให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากนัก ยางจึงมีความเหนียวเหมาะสมและสารเคมีกระจายตัวได้ดี

ความเหนียวติดกัน ยาง SBR มีสมบัติความเหนียวติดกันต่ำ ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่นยางล้อรถยนต์ จึงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติที่มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดีเข้าช่วย (หรือใช้กาวจากยางธรรมชาติเข้าช่วยโดยการทาที่บริเวณพื้นผิวของยาง SBR)

ความยืดหยุ่น ยาง SBR มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ และค่าความยืดหยุ่นของยางลดลงเมื่อปริมาณของสไตรีนสูงขึ้น

ความต้านแรงดึง เนื่องจากยาง SBR ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางชนิดนี้จึงมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ (ต่ำกว่ายางธรรมชาติประมาณ 7- 10 เท่าในกรณีที่ไม่มีสารเสริมแรง) อย่างไรก็ตาม การเติมสารเสริมแรงสามารถทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเล็กน้อย

ความทนทานต่อการฉีกขาด ยาง SBR มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ เนื่องจากยางชนิดนี้ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเสริมแรงลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านนี้

ความต้านทานต่อการขูดขีด ยาง SBR มีสมบัติที่เด่นในด้านการต้านการขูดขีด การเติมสารเสริมแรงลงไปยาง SBR ทำให้ความต้านทานการขูดขีดสูงกว่ายางธรรมชาติ 10-20%

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากยาง SBR มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลดังนั้นยางเอสบีอาร์ จึงเสื่อมสภาพได้เร็วในสภาวะที่มี ออกซิเจน แสงแดด โอโซน หรือความร้อนเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ และเมื่อเกิดการเสื่อมสภาพทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นเพราะเกิดการเชื่อมโยงของสายโมเลกุล (Crosslinking) มากกว่าเกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปจะช่วยยืดอายุการใช้งานของยางชนิดนี้

ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี ยาง SBR จัดเป็นยางที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน แต่ยางชนิดนี้จะทนต่อกรดและด่างเจือจาง แอลกอฮอล์ น้ำ ไกลคอล เกลือ และน้ำมันซิลิโคนได้เป็นอย่างดี

การกระดอน ยาง SBR เป็นยางที่มีการกระดอนต่ำกว่ายางธรรมชาติมาก คือในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนสูง (มี hysteresis สูง) ดังนั้นเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยาง SBR จึงมีความร้อนสะสมสูงกว่ายางธรรมชาติ ด้วยเหตุนี้ยาง SBR จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตล้อรถบรรทุก หรือล้อรถยนต์ขนาดใหญ่เพราะความร้อนที่สะสมสูงอาจทำให้ยางระเบิดได้

2.1.3 หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) หมายถึง โครงสร้างแบบที่มีสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มากกว่าหนึ่งชนิดมาอยู่รวมกัน และระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์สองชนิดที่เชื่อมต่อกันด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าการเป็นพันธะเคมี เหตุผลโดยทั่วไปในการทำพอลิเมอร์ผสม คือการปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้นเพื่อตอบสนองต่อเงื่อนไขของสภาพการใช้งาน โดยนำไปผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติตามต้องการ

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ [6]

1. พอลิเมอร์ผสมที่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend)
2. พอลิเมอร์ผสมแบบแยกเฟส (Immiscible blend)

ซึ่งในส่วนของพอลิเมอร์ผสมที่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 แบบ คือ Homogeneous blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันแต่ต่างเกรดกัน และ Heterogeneous blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เนื้อเดียวกันที่มาจากสารตั้งต้นที่ต่างชนิดกัน (เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ผสมกับยางไนไตรด์) ส่วนพอลิเมอร์ผสมแบบ Immiscible มีโครงสร้างแบบแยกเฟสซึ่งเกิดจากการที่พอลิเมอร์ไม่ละลายเข้ากันเป็นเนื้อเดียว ซึ่งแบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ Compatible blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะที่เหนียวแน่นระหว่างเฟส และ Incompatible blend ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ไม่ดีทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ แต่การยึดเกาะและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer หรือ Coupling agent) ลงไป

พอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างแบบแยกเฟส (Immiscible blend) สมบัติขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมมีพอลิเมอร์ชนิดใดเป็นหลัก หรือเป็นเฟสที่มีปริมาณมากกว่า ซึ่งตัวแปรหลักที่กำหนดว่าพอลิเมอร์ใดเป็นเฟสที่ต่อเนื่อง (Matrix) ซึ่งสัดส่วนในการผสมและสัดส่วนความหนืด โดยทั่วไปพอลิเมอร์ตัวที่มีปริมาณอัตราส่วนมากกว่าหรือมีความหนืดน้อยกว่ามีโอกาสเกิดเป็น Matrix ได้มากกว่า

การผสมยางธรรมชาติกับยางชนิดต่างๆ

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆ ได้ดี เช่น ยาง SBR ยางพอลิไอโซพรีน (IR) และยางบิวตะไดอิน (BR) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมสมบัติของยางนั้นเข้าด้วยกัน เช่นการผสมกับยาง SBR จะทำให้อย่างผสมมีความต้านทานการฉีกขาดดีกว่ายางธรรมชาติและมีสมบัติความต้านแรงดึงที่ดีกว่ายาง SBR หรือพัฒนา

สมบัติการทนต่อน้ำมันโดยการผสมกับยางไนไตรล์ หรือยางคลอโรพรีน แต่อย่างไรก็ตามในการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์นั้น ผู้ทำการผสมจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติ ได้แก่ ความหนืด และระบบการคงรูปของยางทั้งสองชนิด โดยก่อนทำการผสมต้องทำการบดยางธรรมชาติให้มีความหนืดที่ใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์ก่อนเพราะจะทำให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ส่วนการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์บางตัวที่มีพันธะอยู่ในโมเลกุลน้อย เช่น ยางบิวไทล์ หรือยางเอทิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) ก็ควรเลือกระบบการคงรูปให้เหมาะสม ไม่เช่นนั้นยางทั้งสองชนิดที่มีสมบัติการคงรูปที่ต่างกันมากนี้อาจเกิดการแยกเฟสกันระหว่างการคงรูปได้ การเลือกใช้ยางสังเคราะห์เกรดที่มีปริมาณพันธะอยู่ในโมเลกุลอาจช่วยลดปัญหานี้ได้ส่วนหนึ่ง นอกจากนี้ในกรณีที่ผสมยางที่ความเป็นขั้วต่างกันมาก ๆ มาผสมกันอาจต้องพิจารณาถึงความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือสารเคมีในแต่ละเฟสของยางที่นำมาผสมกันด้วย เพราะสารตัวเติมแต่ละชนิดก็มักจะเข้าได้ดีกับยางที่มีขั้วชนิดเดียวกับสารนั้นๆ ทำให้สมบัติของยางคงรูปที่ได้มีสมบัติต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

2.1.4 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง ตัวอย่างเช่น ผงเขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต ไซนาเคลย์ และซิลิกา เป็นต้น ซึ่งถูกใส่เข้าไปในยาง [9] โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อลดต้นทุนการผลิต
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและกายภาพของยาง
3. เพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต
4. เพื่อช่วยลดการพองตัวหรือบวมตัวของยางในน้ำมัน
5. เพื่อเพิ่มหรือยืดอายุการใช้งานของยาง เช่น ป้องกันไม่ให้แสงส่องผ่านเข้าไปในยางได้

ลักษณะของสารเติมแต่ง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารเติมแต่งชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เมื่อใส่เข้าไปในยางแล้ว ทำให้สมบัติต่างๆ เช่น ความทนแรงดึง ความต้านทานการขาดฉีก ความต้านทานการสึกกร่อนสูงขึ้น ชนิดของสารเติมแต่งชนิดนี้ที่นิยมใช้ คือ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เป็นต้น ส่วนใหญ่อ่อนนุ่มจะมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 180-600 อังสตรอม
2. สารเติมแต่งชนิดไม่เสริมแรง (Inert fillers) สารเหล่านี้มีราคาถูก และมีขนาดตั้งแต่ 10000 อังสตรอมขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไซนาเคลย์ แบไรต์ และทัลคัม เป็นต้น สารบาง

ตัวมีอนุภาคขนาดปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกต จัดอยู่ในประเภท สารกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing fillers)

สารเติมแต่งที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมได้แก่ ผงเขม่าดำ และซิลิกา เนื่องจากมีความสามารถในการเสริมแรงได้ดี แต่ถ้าใช้สารตัวเติมในปริมาณมากเกินไปจนเมทริกซ์ของยางไม่สามารถยึดสารตัวเติมเข้าด้วยกัน ทำให้ยางมีความแข็งแรงกระด้างและเปราะ ความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์จึงสูญเสียไป นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่มีขนาดเล็ก ทำให้ความต้านแรงดึงสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และอนุภาคขนาดเล็กมีหน้าสัมผัสระหว่างยางกับสารตัวเติมได้มากกว่า จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อแน่น มีช่องว่างหรือความพรุนตัวต่ำ

2.1.5 เถ้าลอย

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized Fuel Ash) ได้จากการเผาถ่านหินจาก โรงไฟฟ้าถ่านหิน เถ้าลอยถูกดักจับไว้ด้วยตัวดักจับแล้วรวบรวมเก็บไว้ในไซโล เถ้าลอยมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล มีส่วนประกอบหลักเป็นอนุรูปของซิลิกาและอะลูมินา เมื่ออยู่ในสภาพแห้งและป่นเป็นฝุ่น [7-8]

ลักษณะเถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ

1. เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash หรือ Dry ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกไปสู่ปล่องควันโดยอาศัยเครื่องจับฝุ่นด้วยไฟฟ้า แล้วเก็บรวบรวมไว้ในไซโล
2. เถ้าหนัก (Bottom ash หรือ Wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณเผาไหม้ (Combustion zone) อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่ทำให้เกิดการหลอมเถ้าที่ปะทะกันรวมเป็นเม็ดหรือก้อนตกลูกกันเตา

สมบัติพื้นฐานทางด้านเคมีของเถ้าลอย

1. ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ซึ่งส่วนประกอบของเถ้าลอยมี 2 กลุ่มใหญ่ คือ ส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นกรด ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 พบได้ทั่วไปในเถ้าถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ ส่วนอีกกลุ่มคือส่วนประกอบที่แสดงฤทธิ์เป็นด่าง ได้แก่ Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O พบได้ในเถ้าถ่านหินที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence เถ้าลอยประกอบด้วยองค์ประกอบออกไซด์ของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์

(SiO₂) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าลอย ขบวนการเผาอุณหภูมิที่ใช้เผา

2. ส่วนประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอย (Mineralogical composition) ขณะที่มีการเผาถ่านหินและมีการเย็นตัวของเถ้าลอยหลังจากการเผา ทำให้องค์ประกอบทางแร่วิทยาของเถ้าลอยด้านการเกิดผลึก (Crystalline) แตกต่างกัน สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์ จะมีความเป็นอสัณฐาน (noncrystalline) มากกว่า 90% อันเป็นส่วนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่มีองค์ประกอบของ Crystalline จำพวก Quartz Anhydrite Calcite Hematite Mullite ที่มีความเกี่ยวข้องต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction

สมบัติพื้นฐานทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยมีรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลม ส่วนรูปร่างอื่นๆ อาจพบมีลักษณะเป็น รูพรุน ซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม ดังแสดงรูปที่ 2.3



เถ้าลอยลักษณะกลม



เถ้าลอยลักษณะที่มีรูพรุน



เถ้าลอยที่มีลักษณะไม่แน่นอน

รูปที่ 2.3 รูปร่างลักษณะต่างๆ ของเถ้าลอย [4]

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินก่อนเผาและชนิดของถ่านหิน

ปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1. การกำจัดทิ้ง ในปัจจุบันผงเถ้าลอยที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าได้ต่อวันมีปริมาณค่อนข้างมาก หากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ได้ก็เป็นรายได้เพิ่มของหน่วยงาน
2. มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ผงเถ้าลอยเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งเข้าข่ายถูกกำหนดให้เป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ต้องกำจัดทิ้ง

ดังนั้น หากสามารถนำผงเถ้าลอยไปใช้ประโยชน์ได้ในปริมาณที่มาก ก็จะสามารถลดหรือกำจัดปัญหาทั้ง 2 ประการนี้ออกไปได้ สำหรับปริมาณของเถ้าลอยในปัจจุบันที่มีปริมาณมาก โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในประเทศ โดยมีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปี แต่ในปี 2540-2545 มีการใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะมากที่สุดเป็นจำนวน 400,000 ตันต่อปี คิดเป็น 13 เปอร์เซ็นต์ของที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังมีโรงงานที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพของเถ้าลอยที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น โรงงานในนิคมอุตสาหกรรมจังหวัดระยอง จังหวัดสมุทรสาคร และจังหวัดกาญจนบุรี

2.1.6 ผงเขม่าดำและซิลิกา

2.1.6.1 ตัวแปรปฐมภูมิ: ขนาดและโครงสร้างของสารตัวเติม

ตัวแปรที่สำคัญต่อการเสริมแรงในยางคือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 1000 nm ไม่สามารถเสริมแรงได้ดี ซึ่งต่างจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 nm สามารถแสดงการเสริมแรงได้เด่นชัดมากกว่า นอกจากนี้โครงสร้างยังเป็นอีกตัวแปรหนึ่งโดยที่ผงเขม่าดำเป็น สารตัวเติมที่มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างซับซ้อนของอนุภาคทรงกลมขนาดในช่วง 10-90 nm อนุภาคเหล่านี้สามารถก่อตัวอยู่ในรูปของ Aggregate แบบต่างๆ และเมื่อ Aggregate หลายกลุ่มมาก่อตัวรวมกันเรียกว่า Agglomerate โดยที่โครงสร้างของผงเขม่าดำควรมีการก่อตัวของ Aggregate ขนาดเล็กๆ เพื่อให้มีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดี

สารตัวเติมชนิดซิลิกาแบบ Precipitated หรือ Fumed มีรูปทรงที่คล้ายกัน โดยการก่อตัวของโครงสร้างเริ่มจากอนุภาคทรงกลมชั้นต้นก่อตัวเป็น Aggregate จากนั้นหลายๆ Aggregate ก่อตัวกันเป็น Agglomerate และหลายๆ Agglomerate ก่อตัวเป็น Cluster ในที่สุด ด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงมาก ซึ่ง Aggregate ของอนุภาคซิลิกาไม่สามารถแตกตัวได้ขณะผสม แต่มักก่อตัวเป็น agglomerate จึงทำให้มีการก่อตัวที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น Cluster แบบหลวมๆ ด้วยพันธะไฮโดรเจน หากเปรียบเทียบสารตัวเติมระหว่างซิลิกากับผงเขม่าดำที่มีความสามารถในการเสริมแรงที่เท่ากัน พื้นที่ผิวจำเพาะของซิลิกาสูงกว่าผงเขม่าดำมาก [10]

2.6.1.2 ตัวแปรทฤษฎีภูมิ: คุณลักษณะของผิวสารตัวเติม

ผงเขม่าดำมีส่วนประกอบของหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนหลากหลาย เช่น หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล ฟีนอล แลคโตน คิวโนน คีโตน อัลดีไฮด์ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ซับซ้อนเหล่านี้สามารถแตกตัวเป็นฟรีเรดิคัลและสามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับยางได้ เป็นการเสริมแรงให้กับยางได้ดี

สำหรับพื้นผิวของซิลิกานั้นมีปริมาณไฮดรอกเซนและหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกาจำนวนมาก ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคกับอนุภาคแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้อนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวในเนื้อยางไม่ดีเหมือนกับผงเขม่าดำ จึงต้องใช้สารคู่ควบไฮดรอกซิล TESPT (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfane) ช่วยให้มีการกระจายตัวได้ดีขึ้นและยังทำให้สารคู่ควบ TESPT มีการเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมกับยางด้วย [10]

2.1.7 กลไกยึดเกาะระหว่างยางกับสารเติมแต่ง [11]

ในวัสดุคอมโพสิต เมทริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่อินเทอร์เฟซได้หลายวิธี กลไกการยึดเกาะหลักๆ ที่อินเทอร์เฟซของวัสดุคอมโพสิตมี 5 กลไก ซึ่งอาจเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดร่วมกัน ดังนี้

1. การดูดซับและการเปียก (Adsorption and wetting) เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอ ทำให้เกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (Physical attraction) เช่น การเปียกของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิด อยู่ใกล้กันมากถึงระดับไมครอน หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส
2. การแพร่เข้าหากันหรืออินเทอร์ดิฟฟิวชัน (Interdiffusion) ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพัวพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ว่ามีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โพลิเมอร์ที่เกิดการพัวพันกัน การยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลายทาที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสมาไซเซอร์ทำให้สายโซ่โพลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย

3. **แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction)** แรงดึงดูดเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นบวก และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส และพันธะไอออนิก เช่นการยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวกมีการยึดติดที่ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว เป็นต้น
4. **พันธะเคมี (Chemical bonding)** เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญ เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวและเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น
5. **การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking)** การยึดเกาะเชิงกลเกิดระหว่างในกระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิต เรซินเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใยในขณะที่เป็นของไหลสามารถแทรกตัวไปตามพื้นผิวที่ขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอกร่องและช่องว่างอื่นๆ บนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ ทำให้เมทริกซ์ถูกจับติดอยู่กับพื้นผิวของเส้นใย

2.1.8 ทฤษฎีการเกิดโฟม

หลักการทั่วไปในการผลิตโฟมเป็นการผ่านก๊าซลงไปในพอลิเมอร์เหลว และทำให้ฟองอากาศอยู่ภายใน และส่วนมากระบบโฟมขยายตัวโดยการขยายขนาดของฟองอากาศก่อนทำให้อยู่ตัว

กลไกในการเกิดฟองมี 3 ขั้นตอนคือ

1. ขั้นการเกิดฟอง (Bubble formation)
2. ขั้นการขยายตัวของฟอง (Bubble growth)
3. ขั้นการทำให้ฟองอยู่ตัว (Bubble stabilization)

ปัจจัยที่มีผลกับกระบวนการคือ แรงตึงผิว ซึ่งมีส่วนอย่างมากกับการเกิดปฏิกิริยาทั้งสามขั้นตอน โดยในขั้นการเกิดฟองนั้น ต้องมี Microviod ในปริมาณที่มากๆ หรือมี Nucleating agent เล็กๆ เพื่อ

ช่วยในการเกิดฟองก๊าซในพอลิเมอร์ ส่วนในขั้นการขยายตัวของฟองนั้น เป็นผลมาจากก๊าซที่แทรกซึมจากของเหลวเข้าสู่ Microvoid หรือเข้าสู่ฟองก๊าซที่มีอยู่แล้ว

ปัจจัยด้านอื่นที่ช่วยในการเกิดโฟม [11]

1. การเพิ่มความหนืดของพอลิเมอร์จากการให้ความเย็น หรือจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในด้านการพองฟอง
2. การลดความหนาของผนังเซลล์ (ลดความแข็งแรงของแรงตึงผิว) ซึ่งเมื่อฟองก๊าซขยายตัวทำให้ผนังซึ่งบางเป็นฟิล์มมีความบางลงเรื่อยๆ ผนังในส่วนอื่นที่มีความหนามากกว่าจะมาช่วยเสริมทดแทนในส่วนของผนังที่บางลงได้ เรียกว่า Self healing
3. การเพิ่มพื้นที่ผิวต้องมีการเพิ่ม Free energy โดยพื้นที่เล็กๆที่เพิ่มขึ้นนั้นก็จะนำไปสู่การพังทลายของผนังเซลล์ ซึ่งพลังงานในส่วนนี้ คือ ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดการพังทลาย
4. Electric double layer effect มีผลให้ผิวหน้าของผนังเซลล์ 2 ผิว เกิดการผลักกัน

ปัจจัยที่ทำให้ผนังเซลล์เกิดพังทลาย (Collapse)

1. การไหลของของไหลจากส่วนที่เป็นผนังไปยังส่วนแกน ซึ่งขึ้นกับ Capillary action และแรงโน้มถ่วง
2. การขยายตัวของฟองที่มากเกินไป ทำให้ไม่มีพอลิเมอร์ที่เพียงพอที่จะเป็นทั้งผนังเซลล์และส่วนแกน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดระดับการขยายตัว
3. แรงแวนเดอร์วาล ระหว่างพื้นที่ผิวของฟิล์มบางๆ ทำให้ฟิล์มมีความบางลง
4. การลดลงของแรงตึงผิว ซึ่งขึ้นกับความร้อนที่ให้มากเกินไป หรือการที่มีการเติม Antifoam agent ซึ่งอาจทำให้ผนังมีความแข็งแรงลดลง นำไปสู่การพังทลายของผนังเซลล์

ทั้งนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้เกิดโฟมได้ยากขึ้น นั่นคือ การเพิ่มพลังงานอิสระของระบบซึ่งจะเกิดขณะที่เริ่มเกิดโฟม ซึ่งพลังงานมีสัดส่วนโดยตรงกับการเพิ่มพื้นที่ผิว ซึ่งตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ มักเกิดการพังของผนัง อีกประการหนึ่ง คือ ความสมดุลของความแข็งแรงของผนังเซลล์ความแข็งแรงของส่วนแกน และเวลาที่ทำให้โฟมมีขนาดใหญ่ที่สุด ซึ่งส่วนแกนต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่คงปริมาตรของโฟมได้

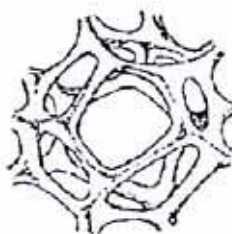
2.1.9 วัสดุเซลลูลาร์ (Cellular Materials)

2.1.9.1 ยางเซลลูลาร์

ยางเซลลูลาร์เตรียมจาก Solid rubber ที่ประกอบด้วย สารเชื่อมขวาง และสารช่วยในการเชื่อมขวางกับสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ซึ่งให้ก๊าซในโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนืด อุณหภูมิการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟอง ต่อผลที่ลักษณะยางจะเกิดเป็นเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด [12] โดยในขั้นเริ่มต้นการให้ความร้อน ให้ความหนืดของยางลดลง และเมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่เริ่มเกิดการเชื่อมขวาง ความหนืดก็จะเพิ่มสูงขึ้น จุดที่เกิดฟองอากาศต้องเกิดก่อนที่ยางเกิดการเชื่อมขวางโดยสมบูรณ์ โดยหากการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟองเกิดก่อนที่ยางเกิดการเริ่มมีความหนืดที่เพิ่มขึ้นยางมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด เนื่องจากผนังของเซลล์ (ที่บางเป็นลักษณะฟิล์ม) มีความแข็งแรงน้อยซึ่งไม่เพียงพอที่จะช่วยพยุงก๊าซได้ ทำให้ก๊าซทะลุผนังเกิดการเชื่อมกันของเซลล์ ในทางตรงข้ามหากเกิดการแตกตัวของสารทำให้เกิดฟองหลังจากยางได้เริ่มมีการเชื่อมขวางและมีความหนืดเพิ่มขึ้นแล้ว ผนังของเซลล์จะมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้ผนังไม่เกิดการพังและเกิดการเชื่อมกันของเซลล์

คำว่ายางเซลลูลาร์ (Cellular rubber) มีการใช้อย่างกว้างขวางในยางธรรมชาติ และ ยางสังเคราะห์ที่มีเซลล์ หรือช่องว่าง หรือรูพรุนเล็กๆ โดยครอบคลุมถึง โฟมลาเท็กซ์ (Latex foam) ยางฟองน้ำ (Sponge rubber) และ ยางโฟมแบบขยาย (Expanded rubber) ในลักษณะที่มีเซลล์แทรกอยู่ปริมาณมากในเนื้อยาง ทั้งเซลล์ที่เป็นรูปแบบเปิด และเซลล์ที่เป็นรูปแบบปิด [13]

2.1.9.2 โครงสร้างของเซลล์เปิด (Open Cell Structure)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์เปิด (Open cell) [12]

ลักษณะของเซลล์เปิดหรือยางฟองน้ำ โครงสร้างของผนังที่กั้นระหว่างเซลล์มีการแตก หรือทะลุถึงกัน ทำให้อากาศหรือก๊าซสามารถผ่านได้อย่างอิสระ ทำให้โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะเป็นการเชื่อมต่อกัน

ของโครงสร้างเนื้อเยื่อที่สามารถดูดซับแรงไว้ได้โดยตัวมันเอง ทำให้วัสดุประเภทนี้มีสมบัติที่เด่นในด้านการรับแรงแบบ Load bearing วัสดุประเภทนี้ได้ถูกนำไปใช้ในงานประเภท ยางกันกระแทกหรือยางกันซึม โดยลักษณะของเซลล์ประเภทนี้สามารถทำได้โดยการใช้สารเคมีที่สลายตัวแล้วเกิดก๊าซผสมลงไปกับยาง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ที่สลายตัวแล้วทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะการให้ความร้อนในกระบวนการวัลคาไนเซชันเกิดเป็นฟองก๊าซที่ทะลุถึงกันในเนื้อเยื่อ โดยยางประเภทเซลล์เปิดนี้ก็มีสมบัติการกระดอน และการคืนตัวกลับ สมบัติความแข็งแรงเชิงกล และความเป็นฉนวนความร้อนต่ำ

ผลิตภัณฑ์ประเภทเซลล์เปิดมักขึ้นรูปในรูปแบบแผ่น แบบแท่ง (Strips) และตามลักษณะการใช้งานต่างๆ และนำไปใช้งานในรูปแบบของการรับแรงเป็นรอบๆ หรือแบบการรับแรงกระแทกแบบทันทีทันใดเนื่องจากวัสดุประเภทนี้สามารถกระจายแรงที่มากระทำได้ดี ซึ่งนอกจากกลไกในเชิงโครงสร้างที่กระจายแรงได้ดีแล้วอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเสริมการรับแรงคือการผ่านเข้าออกอย่างอิสระของอากาศ

2.1.9.3 โครงสร้างของเซลล์ปิด (Closed Cell Structure)



รูปที่ 2.5 ลักษณะ โครงสร้างของเซลล์ปิด (Closed cell) [12]

โครงสร้างของเซลล์ชนิดเซลล์ปิดหรือ Expanded rubber ประกอบด้วยโครงสร้างที่ผนังของเซลล์ไม่ได้มีการเชื่อมต่อกัน ซึ่งเกิดจากการที่เนื้อเยื่อมีการกักฟองก๊าซเอาไว้อย่างแยกออกจากกัน โดยการทำให้เกิดเป็นวัสดุประเภทนี้ต้องคำนึงถึงความพอดีกันระหว่าง การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง และระบบที่ทำให้ยางสุกตัว ซึ่งต้องทำให้ยางสุกตัวในขณะที่เกิดก๊าซและยังไม่ได้แพร่ออกจากเนื้อเยื่อ ซึ่งหากยางสุกช้าเกินไปอาจทำให้ก๊าซออกนอกเนื้อเยื่อไปจนหมดทำให้ยางขยายตัวได้น้อย และมีความหนาแน่นสูง การเกิดการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองก่อนการเริ่มสุกตัวของยางทำให้เกิดเซลล์ที่มีการทะลุถึงกัน ซึ่งอาจทำให้เกิดการติดกันเป็นกลุ่มของฟองก๊าซทำให้เนื้อเยื่อเกิดผิวที่ไม่สม่ำเสมอจนถึงเกิดเป็นโครงสร้างแบบเซลล์เปิด

สารทำให้เกิดฟองที่มักใช้กับวัสดุชนิดเซลล์ปิดมักเป็นสารที่สลายตัวแล้วให้ก๊าซในโตรเจน มากกว่าสารทำให้เกิดฟองที่ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากก๊าซในโตรเจนมีการซึมผ่านที่น้อยกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [14]

เนื่องจากลักษณะของเซลล์ที่ผนังไม่ได้มีการทะลุถึงกันทำให้วัสดุประเภทเซลล์ปิดนี้มีการดูดซึมน้ำได้น้อย มีการกระดอนที่ดี และมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วย ซึ่งเหมาะต่อการนำไปเป็นวัสดุลอยน้ำ วัสดุที่รับแรงกระแทกแบบทันทีทันใด และวัสดุฉนวนกันความร้อน

วัสดุประเภทเซลล์ปิดส่วนมากขึ้นรูปในรูปแบบเดียวกับวัสดุเซลล์เปิด เช่นแบบแผ่น แบบแท่ง และตามรูปร่างการใช้งานเฉพาะต่างๆ โดยนำมาตัดเป็นแผ่นที่บางลงในภายหลังหรือตัดเป็นรูปทรงต่างๆ ในการทำเป็นวัสดุปะเก็นหรือขึ้นส่วนในเครื่องปรับอากาศ เครื่องทำความร้อน วัสดุกันซึม โดยหน้าตัดของชิ้นงานสามารถเห็นเป็น โครงสร้างของผนังเซลล์ ส่วนชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยเครื่องอัดรีด (Extruder) ผนังมีลักษณะผิวเรียบยกเว้นด้านที่ถูกตัด สามารถเห็นเป็น โครงสร้างของเซลล์เช่นกัน

2.1.10 สารทำให้เกิดฟอง (Blowing Agent)

สารทำให้เกิดฟอง คือ สารที่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง ที่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูงและปลดปล่อยก๊าซในโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาในช่วงก่อน หรือระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของรูปก๊าซที่ปล่อยออกมาทำให้ยางมีรูพรุน หรือมีฟองกระจายอยู่ทั่วไป [15] สารทำให้เกิดฟองที่ดีควรมีสมบัติเบื้องต้นดังต่อไปนี้

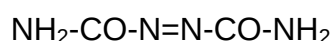
1. สามารถปลดปล่อยก๊าซออกมาได้มาก
2. ไม่เป็นพิษ
3. สารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวไม่ควรมีกลิ่นเหม็น
4. ไม่ควรทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนสี
5. ควรกระจายตัวในยางได้ดีเพื่อให้ฟองอากาศเกิดได้สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน
6. ยางเสื่อมสภาพเร็วไม่ควรมีผลต่อปฏิกิริยาการสุก และไม่ทำให้
7. มีช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวที่เหมาะสม
8. ราคาถูก

สารทำให้เกิดฟองสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ สารอินทรีย์ (Organic blowing agent) และสารอนินทรีย์ (Inorganic blowing agent) ซึ่งสารประเภทอนินทรีย์มีราคาถูกแต่สารทำให้เกิดฟอง

กลุ่มนี้กระจายตัวในยางได้ยาก ทำให้ความสม่ำเสมอของขนาดและชนิดของฟองน้ำที่เกิดขึ้นไม่ดี ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งนิยมใช้ร่วมกับกรดอินทรีย์อย่างอ่อน เช่น กรดทาทริก กรดสเตียริก กรดโอลีนิก ด้วยอัตราของกรดต่อโซเดียมไบคาร์บอเนต 1:2 หรือ 1:3 โดยน้ำหนัก ปัจจุบัน การผลิตยางเซลลูลาร์นิยมใช้สารอินทรีย์ที่สลายตัวให้ก๊าซในโตรเจนมากกว่าสารอินทรีย์ สารเคมีที่ทำให้เกิดฟองที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

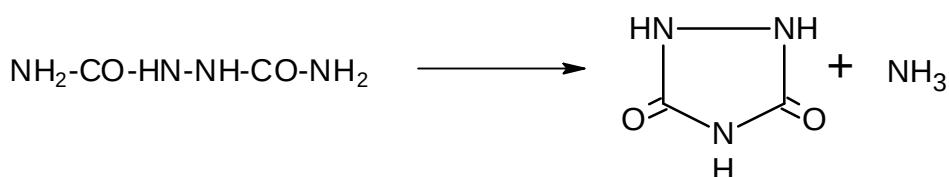
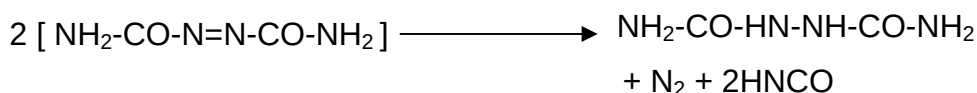
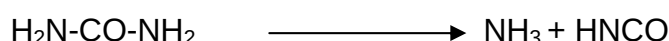
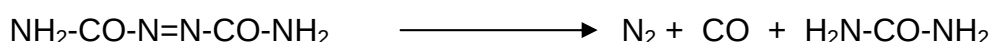
2.1.10.1 เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, ADC)

เอโซไดคาร์บอนาไมด์ มีสูตรโครงสร้างเคมีดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC)

สารทำให้เกิดฟองชนิด ADC ช่วงแรกได้ถูกนำมาใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ซึ่งช่วงแรกในการใช้งานนั้น การสลายตัวของสาร ADC ต้องใช้อุณหภูมิที่สูง ทำให้การนำมาใช้กับยางต้องใช้อุณหภูมิที่สูงในการทำให้ยางสุกด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Naugatuck Chemicals พบว่า สารไกลคอล และกลีเซอรอล สามารถลดอุณหภูมิการสลายตัวของ ADC ได้ ปฏิกิริยาการสลายตัวของ ADC แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง ADC [16]

สมบัติของสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์

สารทำให้เกิดฟอง ADC เป็นสารสีเหลืองส้มที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ $195 - 216^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นสารทำให้เกิดฟองที่มีประสิทธิภาพชนิดหนึ่งที่มีการให้ก๊าซขณะเกิดการสลายตัวประมาณ $220 \text{ cm}^3/\text{g}$ โดยให้ก๊าซส่วนใหญ่เป็นก๊าซไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย [16] โดยการสลายตัวที่สมบูรณ์ของ ADC นั้นให้เถ้าที่เป็นสีขาวเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้องค์ประกอบต่างๆของ ADC หลังการสลายตัวแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารที่ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ADC [16]

สารจากการสลายตัว	อัตราส่วน (% by weight)
ก๊าซ	32
เถ้าของแข็ง (Solid residue)	41
ผลิตภัณฑ์เหลือจากการระเหิด (Sublimate)	27

ส่วนองค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ADC แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของ ADC [16]

องค์ประกอบของก๊าซ	อัตราส่วน (% by weight)
ไนโตรเจน	65
คาร์บอนมอนอกไซด์	32
คาร์บอนไดออกไซด์	3

การกระตุ้นสารทำให้เกิดฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์

อุณหภูมิการสลายตัวของ ADC โดยปกติสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้อย่างสุกตัว แต่สามารถทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงได้โดยการทำการผสมเป็นคอมปาวด์กับสารที่เรียกว่า Blow activator

โดยการใช้สารเคมีหลายชนิดที่ใช้เป็นส่วนผสมในการคอมปาวด์ซึ่งมีหน้าที่หลักคือกระตุ้นให้ ADC สลายตัวได้เร็วขึ้น ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide) และเกลือของสังกะสี (Salt of zinc) ส่งผลอย่างมากต่อการลดอุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิการสลายตัวลงได้ถึง 140°C ซึ่งเหมาะกับอุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปร่าง คือระหว่าง $140 - 180^{\circ}\text{C}$

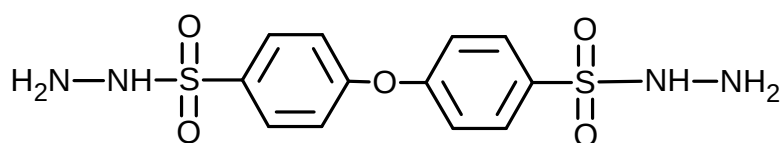
ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสารทำให้เกิดฟองไฮโดรคาร์บอนาไมด์

อัตราการสลายตัวของ ADC แปรผันตามอุณหภูมิ ชนิดของสารกระตุ้น ปริมาณที่ใช้ รวมทั้งขนาดของอนุภาคของแต่ละเกรดของ ADC โดยตัวกระตุ้นที่ใช้ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลง ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ ซิงก์สเตียเรท ซิงก์ออกเตท สารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organic metal complex) ไกลคอล และ ยูเรียที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว โดยการเติมสารกระตุ้นดังกล่าวอย่างทีละเล็กละน้อยในชนิดและปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ได้ ADC ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวตรงตามความต้องการ

สารกลีเซอรอล และยูเรียที่ผ่านการปรับปรุงผิวแล้ว มีผลต่อการกระตุ้นการสลายตัวของยางด้วย ดังนั้นในการเลือกใช้สูตรยางหากเลือกใช้สารประเภทนี้จึงควรคำนึงถึงการลดปริมาณสารกระตุ้น เพื่อชดเชยจากอิทธิพลของสารนี้ เนื่องจากเวลาในการสลายตัวก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งต่อปริมาตรของฟองก๊าซซึ่งส่งผลต่อลักษณะของเซลล์ที่ต้องการในที่สุด

2.1.10.2 ซัลโฟนิลไฮไดรไซด์ (Sulfonyl Hydrazide)

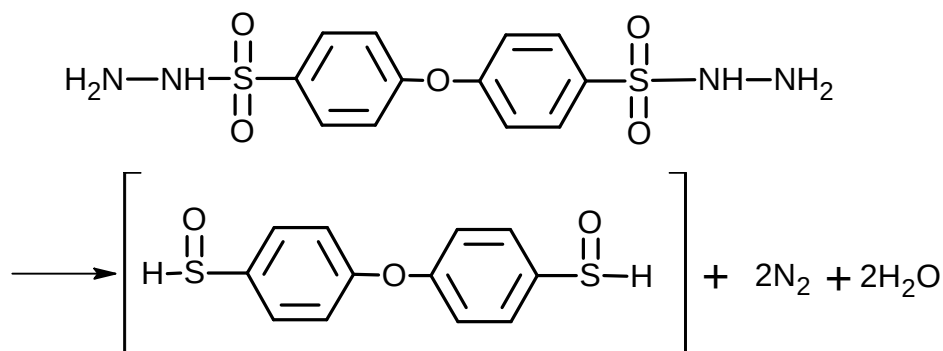
สารทำให้เกิดฟองชนิดซัลโฟนิลไฮไดรไซด์ที่ใช้มากที่สุดคือ ออกซิบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรไซด์ [p,p'-oxybis(benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh)] และในปัจจุบันเป็นที่นิยมใช้กันมาก โดย OBSh ได้ถูกค้นพบโดย Loren Schoene ในปี 1951



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสารทำให้เกิดฟอง OBSh [13]

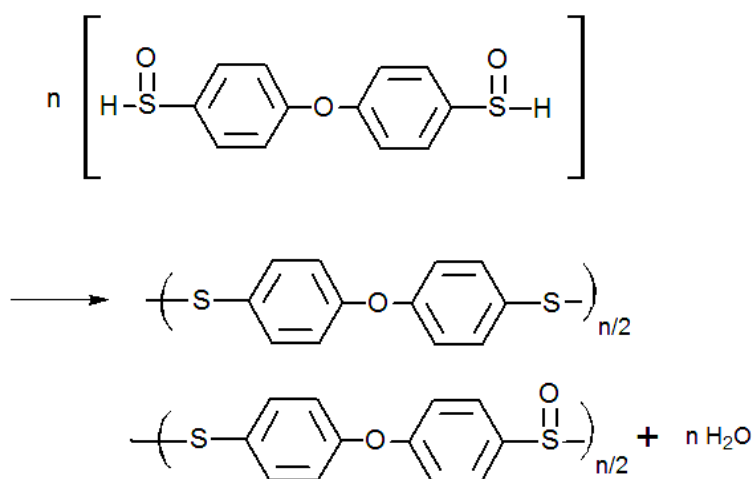
สมบัติของสารทำให้เกิดฟอง OBSh

ลักษณะทางกายภาพของ OBSh เป็นผงสีขาวที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 160°C โดยให้ก๊าซประมาณ 125 cm³/g [17] ซึ่งเป็นก๊าซในโตรเจนและน้ำปริมาณเล็กน้อย และเป็นสารที่มีประสิทธิภาพมาก เนื่องจาก ไม่เปลี่ยนสีของพอลิเมอร์ ไม่ทำให้เกิดคราบ ให้ก๊าซในโตรเจนและน้ำที่ไร้ก๊อลลิ่น OBSh สามารถกระจายตัวได้ดีในยางระหว่างการผสมในเครื่องบดผสมระบบเปิด ส่วนการผสมในเครื่องบดผสมในระบบปิดสามารถทำได้โดยต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 110°C และขนาดของอนุภาคของ OBSh ไม่ส่งผลต่อการสลายตัวเนื่องจากมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำและมีอัตราการสลายตัวที่ค่อนข้างเร็ว ปฏิบัติการสลายตัวของ OBSh แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารทำให้เกิดฟอง OBSH [13]

โดยการสลายตัวเกิดเป็นซัลโฟไคราไซด์ในช่วงแรกนั้นจะเกิดเป็นกรดซัลฟินิกที่ไม่เสถียร ซึ่งเสถียรได้โดยกระบวนการ Disproportionation เกิดเป็นสายโซ่ไดซัลไฟด์และไทโอซัลโฟเนต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งไม่มีสี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเกิดของแข็งที่เหลือจากการสลายตัวของ OBSH [13]

การกระตุ้นสารทำให้เกิดฟอง OBSH

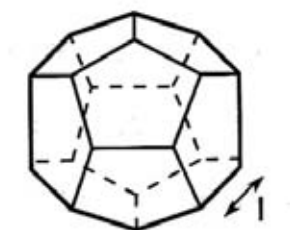
การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิที่ประมาณ 125°C โดยช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวได้ทันทีคือ 143 – 160°C ซึ่งอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนี้ไม่ต่ำเกินไปสามารถใส่สารลงไปผสมผสมกับยางได้ โดยทั่วไปแล้วสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH มักใช้กับยางหรือพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการขึ้นรูปประมาณ 135 – 170°C การลดอุณหภูมิการสลายตัวสามารถทำได้โดยการเติมสารกระตุ้น เช่น ยูเรีย หรือไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine) (TEA) ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้สามารถเป็นตัวกระตุ้น ได้ทั้งการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง และกระตุ้นให้เกิดการคงรูปยาง

การใช้งานสารทำให้เกิดฟอง OBSH

สารทำให้เกิดฟอง OBSH สามารถใช้ในการเป็นสารทำให้เกิดฟองในระบบที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ และระบบที่ขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง (เช่น Extrusion) ของโฟมยางแบบขยายได้ เช่น ใช้กับยาง EPDM ยางคลอโรพรีน ยางเอสบีอาร์ และเทอร์โมพลาสติก เช่น PVC และ LDPE โดยการใช้งานที่สำคัญมักใช้ OBSH ในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิความร้อน ปะเก็นยางที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ และอุปกรณ์ลอยน้ำต่างๆ ปริมาณที่ใช้งานตั้งแต่ 1 – 15 phr

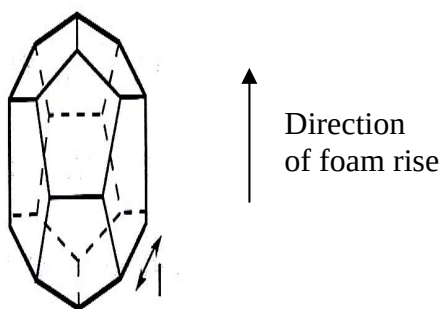
2.1.11 โครงสร้างแบบเซลล์ดูลาร์

ลักษณะโครงสร้างของโฟมประกอบด้วยเซลล์หลายรูปร่าง และหลายขนาด เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม จตุรัส ห้าเหลี่ยม หกเหลี่ยม ทำให้รูปร่างของเซลล์ในสามมิตินั้นมีหลายรูปแบบ ส่วนมากที่พบบ่อยเป็นแบบ Pentagonal dodecahedrons (รูปห้าเหลี่ยม 12 หน้าต่อหนึ่งเซลล์) [16] แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แบบ Pentagonal dodecahedrons [12]

โฟมที่ยังเหลว (Liquid foam) จะมีความเสถียรมากที่สุดเมื่อฟองก๊าซในโฟมเหลวนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมเนื่องจากพื้นที่ผิวและ ความดันคาพิลลารี (Capillary pressure) มีค่าต่ำที่สุดเมื่ออยู่ในสภาวะนี้ สำหรับ Monodispersed spherical cellular structure การจัดตัวจะจัดได้ชิดที่สุดเมื่อทรงกลมนั้นติดกับทรงกลมอื่นๆ อีก 12 ทรงกลมจะทำให้ก๊าซมีอัตราส่วนในปริมาตรโฟมถึง 74% ถ้าอัตราส่วนของก๊าซต่อปริมาตรเพิ่มขึ้น ทรงกลมจะเปลี่ยนรูปร่างไปเนื่องจากปริมาตรของก๊าซที่เพิ่มขึ้น เกิดเซลล์ที่มีลักษณะที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม (Polyhedral) โดยทั่วไป พบว่า เซลล์ดูลาร์พอลิเมอร์มีลักษณะเป็น Anisotropic คือ เซลล์มีลักษณะที่ยืดยาวตามแนวทิศทางการเกิดโฟม ทั้งนี้มาจากการเกิดขึ้นขณะที่มีการกระจายของฟองก๊าซที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งโฟมเป็นผลให้ฟองก๊าซมีแนวโน้มที่จะขยายตัวในทิศทางที่มีความเค้นที่มากหรือน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.12

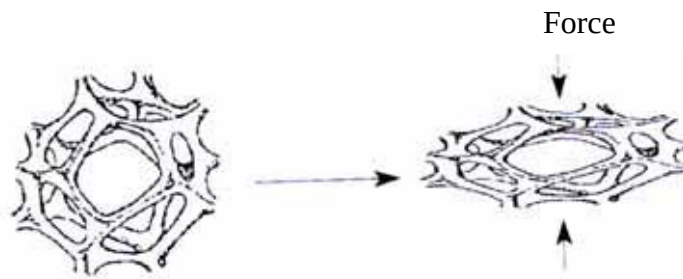


รูปที่ 2.12 การยืดตัวของเซลล์ขณะเกิดโฟม [12]

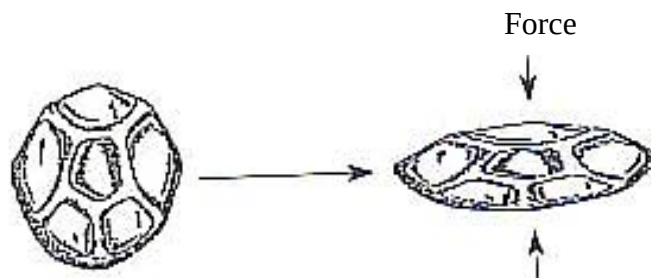
เมื่อโฟมขยายตัวในระบบปิด การเกิดเซลล์ในลักษณะ Anisotropic เกิดน้อยกว่าการเกิดโฟมในระบบเปิด และการเกิดเซลล์ที่มีลักษณะยืดจะเกิดเฉพาะบริเวณใกล้ๆผิวของแม่พิมพ์ ทั้งนี้ความดันที่เพิ่มสูงขึ้นในแม่พิมพ์จะทำให้เซลล์มีความเป็นทรงกลมมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่พื้นผิวเซลล์ด้านนอกของโฟมส่วนใหญ่มีเซลล์ขนาดเล็ก และที่ความดันสูงมากๆ พื้นผิวที่ได้จะค่อนข้างเรียบ

2.1.12 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์

สมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง (Rigid Foam) มีความแตกต่างจากโฟมที่ยืดหยุ่น (Flexible foam) ทำให้การทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะมีวิธีการที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน สมบัติ Compressive เป็นสมบัติที่สำคัญของ พอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์ ค่าการดูดซับพลังงานจากการกดอัด และลักษณะการเสียรูปของโฟมขึ้นกับความหนาแน่นของโฟม ชนิดของพอลิเมอร์ ลักษณะของเซลล์อยู่ในรูปแบบเซลล์เปิดหรือเซลล์ปิด เป็นปัจจัยหลัก ในโฟมแบบเซลล์เปิดนั้นการเสียรูปขึ้นกับการงอและการโค้งของผนังเซลล์ และเป็นแบบกลับคืนตัวได้ เซลล์ที่กักอากาศมีขนาดเล็กลงเมื่อมีแรงกดอัด ทำให้อากาศผ่านเข้าออกได้ช้าลง ซึ่งมีผลต่อความต้านทานต่อการเสียรูปขณะกดอัด อีกนัยหนึ่งการผ่านของอากาศจะไม่ใช่ว่าต้องคำนึงหากเป็นเซลล์ที่ปิด ซึ่งในกรณีเซลล์ปิดการเสียรูปขึ้นกับการงอหรือโค้งของผนังเซลล์ (Reversible) ความดันของก๊าซ ผนังเซลล์เกิดการดึงยืด และเกิด Yield (Non-reversible) กดอัดทำให้เซลล์เกิดการพังทลายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14

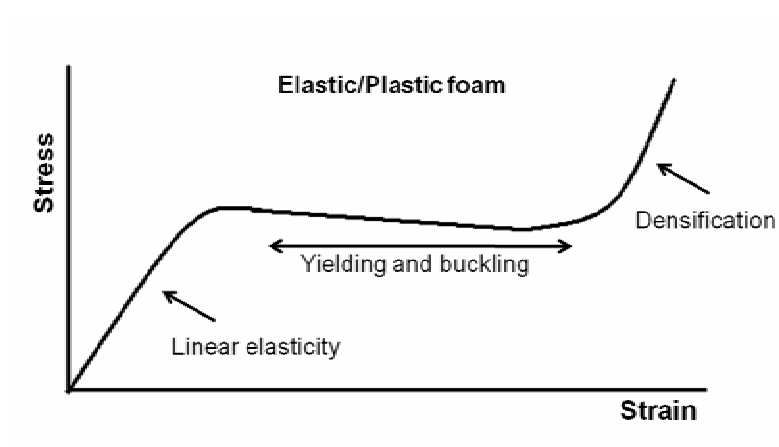


รูปที่ 2.13 การเสียรูปจากแรงที่มากระทำของเซลล์เปิด (Open cell) [17]



รูปที่ 2.14 การเสียรูปจากแรงที่มากระทำของเซลล์ปิด (Close cell) [17]

ลักษณะการดูดซับพลังงานของโฟมสามารถอธิบายได้ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของโฟมแบบยืดหยุ่น [17]

ในกรณีของพลาสติกโฟมที่มีเซลล์ปิดแบบยืดหยุ่นได้ การเสียรูปที่ความเครียดต่ำๆ แสดงความเป็นอิลาสติก เนื่องจากผนังเซลล์ถูกยืด จากนั้นมีช่วงความเค้นค่อนข้างคงที่ระยะหนึ่ง เนื่องจากการกดอัดอากาศที่เกิดจากผนังเซลล์เกิด Yield และโก่ง และเมื่อเซลล์เกือบพังทลายหมด ผนังเซลล์ที่อยู่ตรงข้ามจะเริ่มเข้าไปชิดกับผนังอื่นจากนั้นความเครียดที่มากขึ้น ทำให้วัสดุชิดกันมากขึ้นจนลักษณะเกือบเป็นเนื้อของแข็ง โดยเซลล์ปิดแสดงลักษณะการเพิ่มที่ค่อยเป็นค่อยไปแสดงในกราฟความเค้นกับความเครียด จนถึงช่วงที่เซลล์มีการทลาย นอกจากนั้นการเกิดการอัดชิดกันของผนังในเซลล์เปิดจะเกิดที่ความเค้นที่ต่ำกว่าเซลล์ปิด

2.1.13 การใช้งานของพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์

การใช้งานพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย มักใช้สมบัติด้านความเป็นฉนวนความร้อนและการดูดซับพลังงานที่มักกระทำเป็นสมบัติหลัก ตัวอย่างการใช้งานมีดังต่อไปนี้

งานประเภทฉนวนกันความร้อน โฟมความหนาแน่นต่ำมีค่าการนำความร้อนที่ประมาณ 10^{-2} W/m-K โดยโฟมแบบเซลล์ปิดจะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเซลล์แบบเปิด ส่วนใหญ่มักใช้วัสดุโฟมแข็ง (Rigid foam) เช่น พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน มากกว่าการใช้โฟมแบบยืดหยุ่น (Flexible foam) การใช้งานโฟมในด้านนี้แพร่หลายและมีอัตราการใช้งานในด้านนี้มากกว่าการใช้งานด้านอื่นๆ

งานประเภทบรรจุภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพต้องมีการดูดซับพลังงานจากการกระแทกโดยการลด Damping stress ที่จะส่งผ่านไปยังตัวผลิตภัณฑ์ โดยวัสดุพอลิเมอร์แบบเซลล์ลูลาร์ให้การดูดซับแรงได้ดี และสามารถกระจายแรงกระแทกได้ ทำให้ลดแรงที่กระทำให้น้อยลง สมบัตินี้ขึ้นอยู่กับเนื้อวัสดุที่นำมาทำโฟม โครงสร้างของเซลล์ ความหนาแน่น ความหนา พื้นที่ที่รับแรง ซึ่งปรับเปลี่ยนได้ตามวัตถุประสงค์ โดยพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิสไตรีน พอลิยูรีเทน

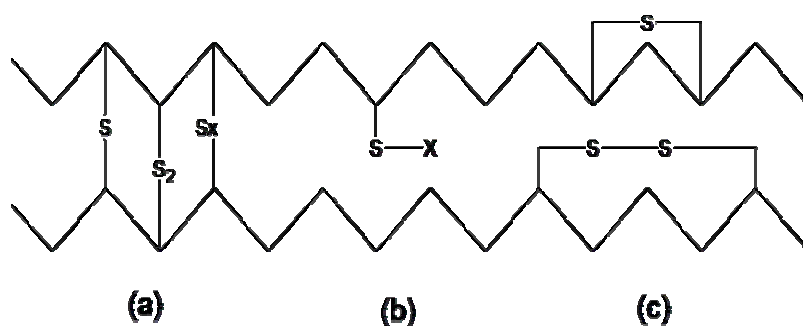
งานประเภทการรองกันกระแทก (Cushioning) การใช้งานโฟมกับงานชนิดนี้ใช้ โฟมแบบยืดหยุ่นได้เป็นหลัก โดยสมบัติประการที่สำคัญในการใช้งานประเภทนี้ คือ สมบัติการคืนตัวที่เหมาะสม มีการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่น้อย มีการกระดอนสูง มีค่าการทนต่อแรงดึงสูง และการยืดตัวที่จุดขาดสูง เนื่องจากวัสดุโฟมมีช่วงการได้รับแรงกดอัดได้กว้างซึ่งขึ้นกับสมบัติด้านกายภาพ และองค์ประกอบเคมีที่ใช้ทำให้เกิดโฟม ทำให้มีการใช้งานด้านการกันกระแทกได้หลากหลาย การใช้โฟมยืดหยุ่นเป็นยางรองกันกระแทกใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เฟอร์นิเจอร์ พื้นพรม และอุปกรณ์กีฬา

นอกจากนี้ พอลิเมอร์ชนิดเซลลูลาร์ยังมีการใช้งานในงานประเภทวัสดุลอยน้ำ วัสดุดูดซับเสียง งานโครงสร้างที่ไม่รับแรงมากแต่ต้องการน้ำหนักที่เบา เป็นต้น

2.1.14 การเสื่อมสภาพของยาง

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหรือพลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อมีการนำไปใช้งานกลางแจ้งหรืองานภายนอกอาคารคือ แสงแดด ความชื้น และความร้อน เมื่อยางสัมผัสกับอากาศ ออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับโครงสร้างทางเคมีของยาง ทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางขาดออกจากกัน (Chain scission) ส่งผลให้ยางมีความแข็ง (Hardness) และความตึงตัว (Stiffness) ลดลง ในขณะเดียวกันออกซิเจนก็ทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางเกิดการเชื่อมโยงระหว่างกัน (Crosslinking) ได้เช่นเดียวกัน หรือ ในกรณีที่ยางซึ่งผ่านการคงรูปด้วยกำมะถัน ก็จะทำให้โครงสร้างทางเคมีของยางนั้น เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ยางมีความแข็ง และความตึงตัวเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเปราะในที่สุด เมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น การเกิดการขาด และการเชื่อมโยงของโครงสร้างทางเคมีของยาง มักเกิดพร้อม ๆ กันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการใดจะเกิดขึ้นมากกว่ากัน ซึ่งส่งผลให้สมบัติของยางเปลี่ยนแปลงไปในที่สุด

สมบัติต่างๆของยางที่สุกด้วยกำมะถันนั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของการเชื่อมโยง (Type of crosslinking) และจำนวนของการเชื่อมโยง (Number of crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ชนิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน [18]

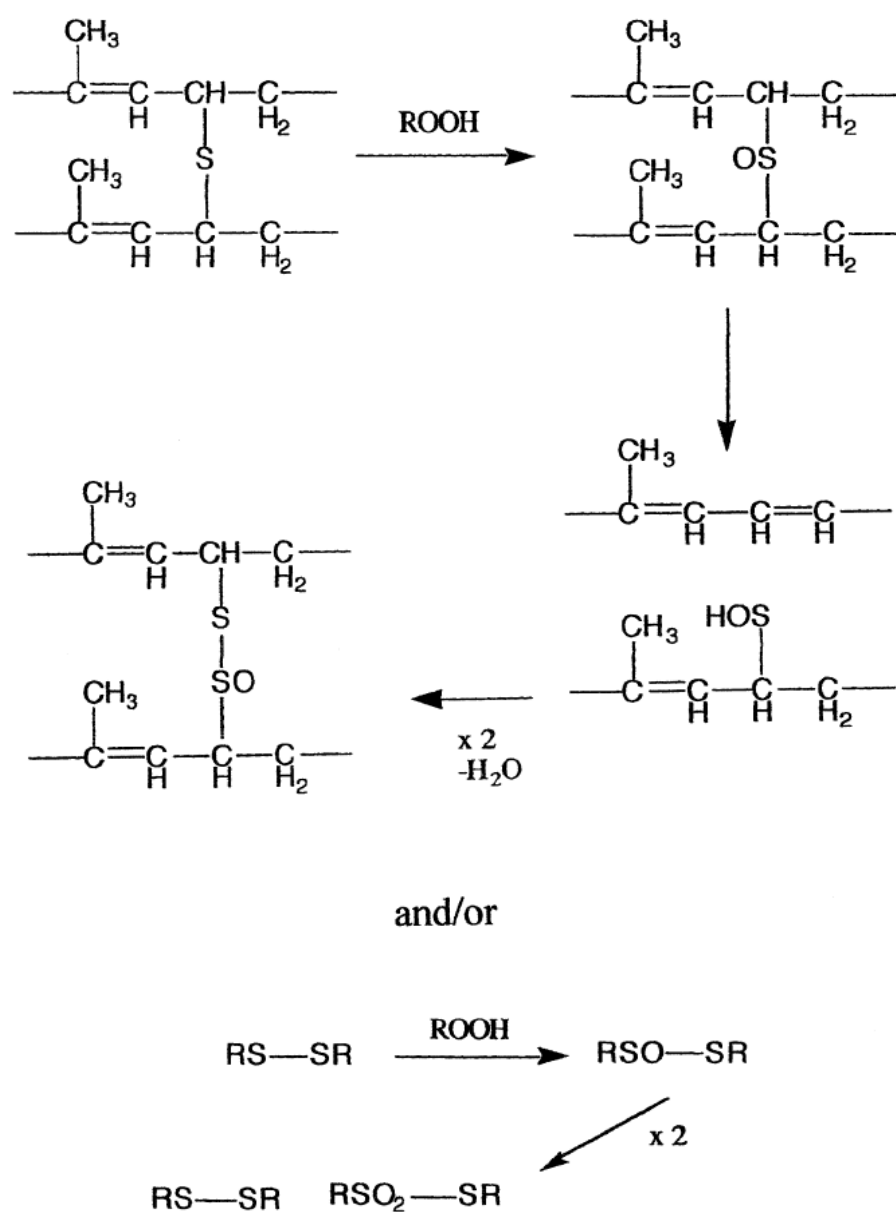
จากรูปที่ 2.16 แสดงชนิดการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันโดยที่รูป (a) เป็นการเชื่อมโยงของกำมะถันแบบ โมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic) ไดซัลฟิดิก (Disulfidic) และพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic) ตามลำดับ ส่วนรูป (b) นั้นแสดงการเชื่อมโยงแบบเพนแดนท์กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลื่อมอยู่ (Accelerator Pendant Sulfur) สำหรับรูป (c) แสดงการเชื่อมโยงของกำมะถันในสายโซ่โมเลกุลของยาง (Intramolecular linkage) ทั้งนี้ชนิดของการเชื่อมโยงนั้นจะขึ้นกับชนิดของตัวเร่งและอัตราส่วนของตัวเร่งกับกำมะถัน

โดยลักษณะของการเชื่อมโยงแบบไดซัลฟิดิก และพอลิซัลฟิดิกมักไม่ทนต่อปฏิกิริยา Thermal-oxidative ซึ่งผลที่ตามมาคือพันธะเชื่อมโยงบ้างกล่าวนี้สามารถเกิด การขาดของพันธะ หรือการเปลี่ยนแปลงชนิดของพันธะที่เชื่อมโยงเป็นพันธะที่สั้นลง ซึ่งทำให้ยางที่มีการเชื่อมโยงแบบ พอลิซัลฟิดิกเป็นส่วนมาก หลังการเกิดปฏิกิริยา Thermal-oxidative จึงมีความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น มากกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยพันธะ โมโนซัลฟิดิก หรือพันธะคาร์บอน-คาร์บอน [19]

การเกิดปฏิกิริยา Thermal-oxidation ของยางธรรมชาติเกิดผ่านกลไก การเกิดเป็นชั้นที่เหนียว (sticky surface layer) ก่อนและตามมาด้วยการเกิดลักษณะที่แข็งเปราะเนื่องมาจากการเพิ่มความหนาแน่นของ พันธะ (Crosslink density) ทำให้ Free volume ลดลง ส่งผลต่อการแทรกซึมของออกซิเจน

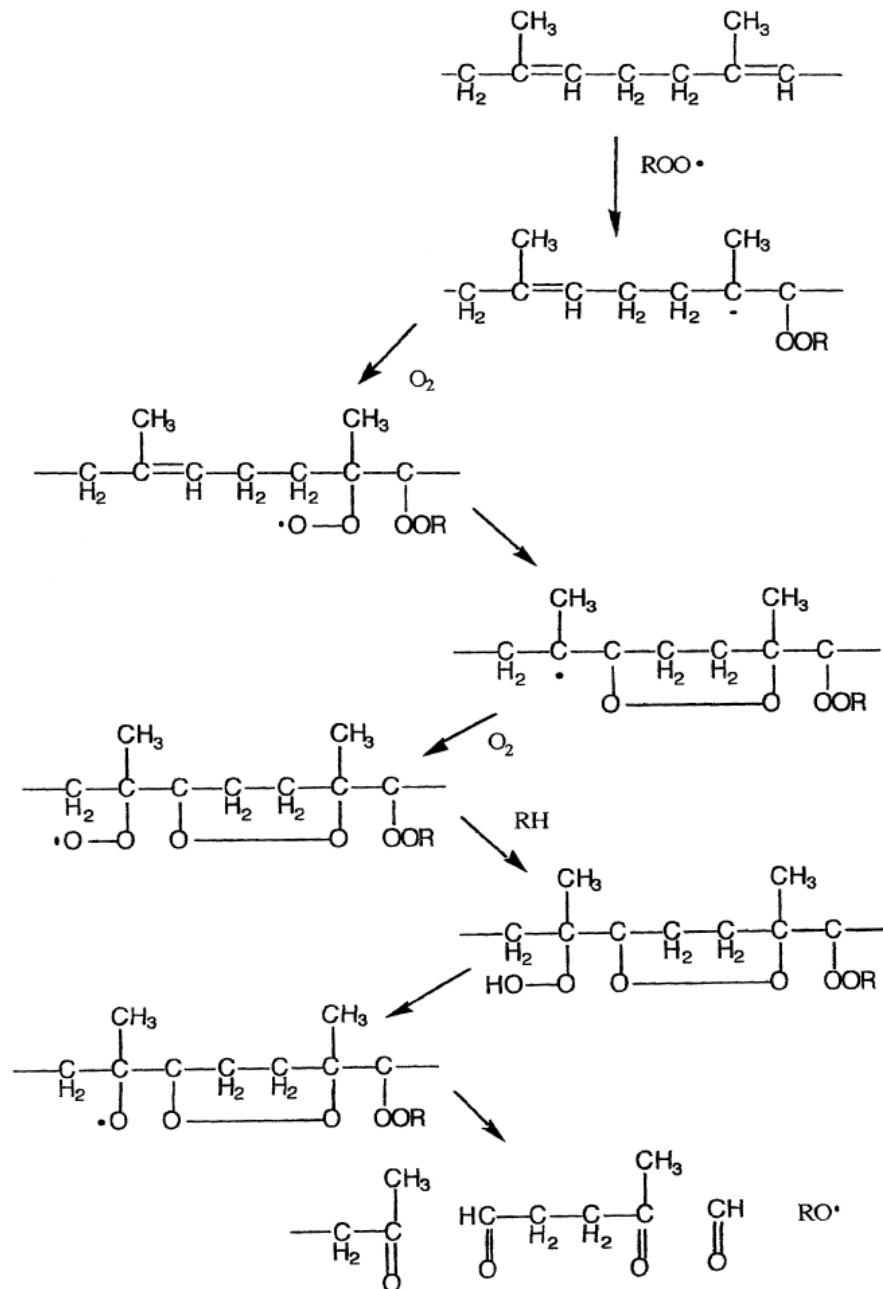
ภายใต้สภาวะสถิตย์ (Static condition) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่บริเวณผิวภายนอกเป็นการ ป้องกันการผ่านของออกซิเจนที่จะผ่านไปเกิดปฏิกิริยากับเนื้อยางภายในได้ แต่อย่างไรก็ตามภายใต้ สภาวะพลวัต (Dynamic condition) ยางมีความทนต่อแรงดึงมากแต่มีการยืดตัวที่จุดขาดลดลง เนื่องจากพื้นผิวภายนอกถูกออกซิไดส์ทำให้มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงที่มาก

ในยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยกำมะถัน ออกซิเจนที่เข้ามาส่วนหนึ่งจะอยู่ในรูปของ หมู่ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และอีกส่วนหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยาโดยตรงกับพันธะกำมะถัน เกิดเป็นพันธะ กำมะถันลักษณะใหม่ที่เรียกว่า Sulphoxide และ Sulphenic acids ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นกับพันธะกำมะถันในยางธรรมชาติ [20]

ปฏิกิริยา Autooxidation เชื่อกันว่าเกิดผ่านกระบวนการ Intramolecular radical additions ซึ่งทำให้สามารถเกิดสารโมเลกุลเล็กขึ้น เช่น Leuvalnic aldehyde และ limonene ดังรูปที่ 2.18 โดยในขั้นตอนแรกของการเกิดการเสื่อมสภาพ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการขาดออกของสายโซ่เกิดอย่างรวดเร็วและเกิดสารโมเลกุลเล็กจำนวนมากทำให้ผิวของยางที่เกิดออกซิเดชันขณะนั้นมักมีลักษณะเหนียว (Sticky)



รูปที่ 2.18 การเกิดผลิตภัณฑ์สารโมเลกุลขนาดเล็กจากการเกิดออกซิเดชันของยางธรรมชาติ [20]

2.1.15 การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน (Heat aging)

ในสภาวะอุณหภูมิที่สูง (Elevated temperature) ทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเร็วขึ้น และเร่งการเสื่อมสภาพของยางให้เร็วขึ้น ดังนั้น จึงมีวิธีทดสอบมาตรฐานที่เรียกว่า การเร่งอายุ

ด้วยความร้อน หรืออุณหภูมิสูง (Heat aging) เพื่อประเมินสมบัติของยางเมื่อมีอายุการใช้งานมากขึ้น โดยการทดสอบคือนำยางไปอบในตู้อบที่มีอากาศไหลเวียนอย่างสม่ำเสมอ หรือ อบภายใต้บรรยากาศของออกซิเจนที่มีความดันสูง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เช่น ยางธรรมชาติ อบที่ 70°C สำหรับยางสังเคราะห์ อบที่ 100°C หรือ 120°C เป็นต้น แต่ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของยางที่ผ่านการอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ กับระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของยางขณะใช้งานจริง ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่แท้จริงได้

นอกจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเกิดได้เร็วขึ้น และเร่งให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นแล้ว โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในเนื้อของยาง ได้แก่ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ เนื่องจากไอออนของโลหะเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการทำให้เกิด Chain scission ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง แสงแดดและโอโซนในบรรยากาศ สามารถทำให้ผิวหน้าของยางเกิดรอยแตก และเสื่อมสภาพได้เช่นเดียวกับออกซิเจน ยางที่มีเขม่าดำ (Carbon black) เป็นองค์ประกอบสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพจากรังสี UV (Ultraviolet radiation) ที่มีในแสงแดดได้ โดยเขม่าดำจะดูดกลืนรังสี UV อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ยางส่วนใหญ่จะถูกใช้งานในที่ร่ม ซึ่งมีความเข้มของรังสีน้อยกว่ากลางแจ้ง โอโซนปริมาณเล็กน้อยในบรรยากาศ ซึ่งมีความเข้มข้นในระดับตั้งแต่ 1 ส่วนในร้อยล้านส่วน (1 ppbm) หรือถ้าคิดเป็นปริมาตรของโอโซนต่อปริมาตรของอากาศทั้งหมดเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อหนึ่งร้อยลูกบาศก์เมตรสามารถทำให้ผิวหน้าของยางที่มีความเครียด (Strain) เนื่องจากมีแรงมาทำให้รูปร่างของยางเปลี่ยนไปจากเดิม เกิดรอยแตกได้ โดยลักษณะของรอยแตกตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่มากระทำ ซึ่งจะแตกต่างจากรอยแตกที่เกิดจากแสงแดด ที่มีลักษณะกระจายคล้ายรอยแตกของผิวหน้าดิน ซึ่งขาดน้ำในหน้าแล้ง ขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกที่เกิดจากโอโซน จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดที่เพิ่มขึ้นของยางที่มีการนำไปใช้งานในเชิงวิศวกรรม เช่น แผ่นยางรองคานสะพาน แผ่นยางรองฐานของเครื่องจักรกล เป็นต้น การเสื่อมสภาพของยางเหล่านั้น เนื่องจากโอโซน และออกซิเจน เป็นปัจจัยในอันดับต้น ๆ ที่ใช้ในการตัดสินใจความทนทาน หรืออายุของยางขึ้นนั้น โอโซนจะทำปฏิกิริยากับยางเฉพาะที่ผิวหน้าของยางเท่านั้น ในขณะที่ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับยางทั่วทั้งก้อน โดยจะเริ่มทำปฏิกิริยาที่ผิวด้านนอกของยางก่อนแล้วค่อย ๆ ซึม และ แพร่เข้าไปภายใน อย่างไรก็ตามการซึมผ่านของออกซิเจนถูกจำกัดโดยความหนาของยาง ผิวหน้าของยางส่วนที่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้ว ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกัน (Protective layer) ไม่ให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อยางภายในที่เหลืออยู่ได้ จึงทำให้ยางมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมาก

2.1.16 การทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อม โดยวิธีเร่งสภาวะด้วยเครื่อง

QUV Accelerated Weathering

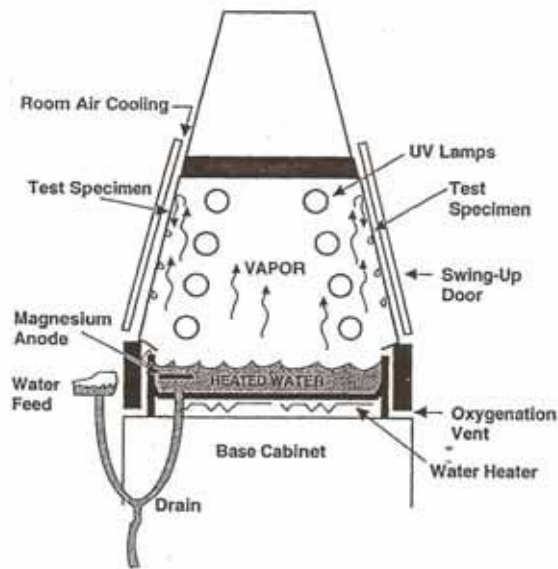
เมื่อมีการผลิตหรือพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆขึ้น การทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ก่อนนำไปใช้งานมีความสำคัญมาก การทดสอบที่สภาวะการใช้งานโดยนำผลิตภัณฑ์ไปวางไว้กลางแจ้ง (Outdoor test) และสังเกตผลที่เกิดขึ้นจะต้องใช้เวลานานหลายปีจึงจะทราบผลการทดสอบ ดังนั้นเพื่อเป็นลดเวลาการทดสอบให้เร็วขึ้นจึงทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องเร่งสภาวะ เครื่องเร่งสภาวะนี้ได้ออกแบบมาเพื่อให้ขึ้นทดสอบสัมผัสกับปัจจัยหลักที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมสภาพนั้นโดยตรง ทำให้สามารถทราบผลที่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น

รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นปัจจัยแรกที่มีความสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ยางและพลาสติก ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีอุลตราไวโอเล็ตหรือรังสียูวี (Ultraviolet, UV) นั้นมีพลังงานสูงสามารถทำลายพันธะเคมีในโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ยางและพลาสติกทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ การทดสอบด้วยเครื่องเร่งสภาวะ ขึ้นทดสอบจะได้รับรังสียูวีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงยูวีเอ (315-400 นาโนเมตร) หรือยูวีบี (280-315 นาโนเมตร) สลับกับความชื้นที่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ปัจจัยความชื้นในสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์สามารถทดสอบโดยขึ้นทดสอบจะได้รับความชื้นจากการให้ความร้อนแก่น้ำในถาดเก็บน้ำด้านล่างของตัวเครื่องเร่งสภาวะ เมื่อน้ำกลายเป็นไอจนในห้องทดสอบมีความชื้นถึงระดับอิ่มตัว ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงเมื่อมากระทบกับความเย็นที่ผิวตัวอย่างจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนผิวตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.19

ส่วนความร้อนซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่เสริมให้เกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เครื่องเร่งสภาวะได้ออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการทดสอบให้สูงกว่าสภาวะแวดล้อมปกติทั้งในช่วงที่ให้แสงยูวีและช่วงที่ให้ความชื้น

การทดสอบการเร่งสภาวะตามมาตรฐาน ASTM G 154 ซึ่งนอกจากผลิตภัณฑ์ยางและพลาสติกแล้วยังสามารถทดสอบวัสดุอื่นๆ ที่ไม่ใช่โลหะ (Nonmetallic material) ได้ ทั้งนี้ขึ้นทดสอบต้องหนาไม่เกิน 20 มิลลิเมตร หลังการทดสอบทำการตรวจพินิจลักษณะภายนอก เช่น การแตก การขึ้นเหลือง ความมันวาว การเปลี่ยนแปลงของสี หรือนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านแรงดึง และการยืดตัวเมื่อขาด เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบชุดควบคุมที่ถูกเก็บไว้ในที่มีคในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง การเลือกสภาวะการทดสอบขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานจริงของตัวอย่าง เช่น พลาสติก ABS ที่ใช้ทำตู้

รับจดหมาย จะใช้สภาวะทดสอบคือให้แสงยูวีบีความยาวคลื่นหลัก 313 นาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงสลับกับไอน้ำควบแน่นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สลับกันไปจนครบเวลา 1 สัปดาห์



รูปที่ 2.19 ภาพตัดขวางของเครื่องเร่งสภาวะแสดงการให้ความชื้นสัมผัสกับชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.20 เครื่องเร่งสภาวะ QUV Accelerated Weathering

อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีเร่งสภาวะในห้องปฏิบัติการสามารถบอกความทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ในระดับหนึ่ง และเป็นตัวบ่งชี้หรือแนวโน้มการคงทนของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ทำให้สามารถเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ได้เหมาะสมกับงานและเปิดโอกาสให้มีการพัฒนาของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ให้คงทน

และมีอายุการใช้งานยาวนาน นับเป็นประโยชน์ของการใช้เครื่องเร่งสภาวะ ทำให้ประหยัดเวลาการทดสอบ และหากคำนึงถึงสภาพความเป็นจริง ปัจจัยอื่นๆ ก็มีผลต่อความทนต่อสภาพแวดล้อมนั้นๆ ของผลิตภัณฑ์ เช่น ความแตกต่างกันของดินฟ้าอากาศในแต่ละปี ตำแหน่งที่ตั้งของบริเวณที่ใช้งานไอเท็มจากทะเลและปัจจัยร่วมในการเกิดการเสื่อมสภาพอื่นๆ รวมทั้งลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2.2 เอกสารบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ [3-4] ศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยเป็นสารเสริมแรงในวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ โดยศึกษาการใช้ซิลิกาจากผงเถ้าลอย และการปรับปรุงผิวผงเถ้าลอย ที่สัดส่วนปริมาณซิลิกาจากเถ้าลอยเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า และทำการปรับปรุงผิวสารเสริมแรงทั้งสองชนิดด้วยสารคู่ควบชนิดไซเลน คือ บิส-(3-ไตรเอทอกซีไซลิลโพรพิล)เตตระซัลเฟน (Si69) และได้ทดสอบสมบัติการคงรูปยาง สมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค สมบัติเชิงกลพลวัต และการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ผลการวิจัยโดยรวม พบว่า เมื่อนำเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงผิวมาใส่ในยางผสม NR/SBR ทำให้เวลาในการคงรูปยางลดลง และสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ส่วนการปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้าด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ความเข้มข้นที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิกา ที่สัดส่วนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ 50 : 50 พบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าเพิ่มขึ้น เวลาในการคงรูปยางมีแนวโน้มลดลงและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ในกรณีการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ลดลง

วัชรพงศ์ แซ่เต้ และคณะ [21] ศึกษาเกี่ยวกับโพลียาคริลิกเทอร์โมพลาสติก โดยใช้กระบวนการไดนามิกสวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติด้วย Dicumylperoxide (DCP) ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งยางมีการกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทำให้เกิดโพลียาคริลิกเทอร์โมพลาสติกโดยใช้สารพองฟู (blowing agent) ชนิด Azodicarbonamide (ADC) โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโพลีกับปริมาณของสารพองฟู และปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น พบว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับยางธรรมชาติที่อัตราส่วน 40 : 60 มีความแข็งแรงสูงสุด และเมื่อปริมาณของ พอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย แต่การยืดตัวของโพลียางลดลง

Ghazali และคณะ [22] ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุโพลีโพรพิลีนผสมระหว่างยางธรรมชาติกับอีวีเอ ที่ปริมาณสัดส่วน 60 : 40 ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง (lowing agent) ชนิด AZO-R และ AZO-K ที่มีสาร Azodicarbonamide ที่ปริมาณ 64.5 และ 67.5 % โดยการใช้การแผ่รังสีของลำอิเล็กตรอนที่ปริมาณ 20-200 kGy เพื่อให้เกิดการ Crosslinking ในวัสดุโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 160-180°C และ 190-210°C ตามลำดับ และตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของโพลีเมอร์กับปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง พบว่าการเติมสารพองฟูชนิด AZO-R ในวัสดุผสมต้องใช้ปริมาณความเข้มของลำแสงอิเล็กตรอนมากกว่า 100 kGy ส่วนการเติมสารพองฟูชนิด AZO-K ต้องใช้ปริมาณความเข้มของลำแสงอิเล็กตรอน ระหว่าง 40-60 kGy

Lin และคณะ [23] ศึกษาการเติมเส้นใยสั้นพอลิเอไมด์ลงในยางธรรมชาติ โดยมีการเติมสารพองฟูที่ปริมาณต่างๆ ให้มีลักษณะขึ้นงานแบบไมโครเซลลูลาร์โพรพิลีน โดยเลือกเส้นใยแบบปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมเส้นใยที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวในยางโพรพิลีน ทำให้เกิดเซลล์อยู่บริเวณรอบๆ เส้นใย แต่ไม่พบช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเนื้อโพรพิลีนเมื่อเติมเส้นใยที่ปรับปรุงผิว ส่งผลให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดูลัสแรงอัด ความแข็งแรงอัด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงผิวทำให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

Choi [24] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและสมบัติการคงรูปยางของซิลิกาที่เติมในสารประกอบยางเอสบีอาร์ โดยการทดสอบการเติมสารเติมแต่งลงในยางเอสบีอาร์ 2 แบบ คือแบบซิลิกาอย่างเดียวดังแต่ 20-70 phr และแบบซิลิกากับผงเขม่าดำโดยปริมาณสารตัวเติมรวมทั้งหมดเท่ากับ 80 phr สำหรับสมบัติด้านการคงรูปยาง พบว่า แบบการเติมซิลิกาอย่างเดียวทำให้เวลาในการคงรูปยางไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับการเติมแบบซิลิกากับผงเขม่าดำทำให้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่วนพฤติกรรมการไหลของยาง พบว่า ทั้งการเติมซิลิกาอย่างเดียวและการเติมซิลิกาและผงเขม่าดำทำให้แรงบิดต่ำสุดและค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วง 50-70 phr ค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าความหนืดเพิ่มขึ้นสูงกว่าในช่วง 20-40 phr เนื่องจากซิลิกามีกลุ่มไฮดรอกซิลที่บริเวณผิวจำนวนมาก ทำให้เกิดพันธะระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิลที่ผิวอนุภาคและเกิดการยึดเกาะกันมากขึ้น

Kruger และคณะ [25] ศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ โดยใช้เถ้าลอยเกรดการค้า 2 เกรด คือ Plasfill 5 และ Plasfill 15 เปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต (Kulu 15 และ Kulu 5) และดินขาว (Kaolin 5) ที่ปริมาณ 50 100 และ 150 phr โดยทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ พบว่าการเติมเถ้าลอยลงในยางธรรมชาติทำให้ยางมีค่าความหนืดลดลง อนุภาคของเถ้าลอยสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับยางได้เร็วและยังผลิตได้ง่ายกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่น เนื่องจากอนุภาคมีลักษณะที่กลม

และละเอียดมากจึงทำหน้าที่เสมือนกับเป็นสารหล่อลื่นเมื่อทำการบดผสมกับยาง ในขณะที่การเติมเถ้าลอยลงในยางธรรมชาตินั้นไม่มีผลกับกระบวนการคงรูปของยาง สำหรับสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งมีค่าไม่แตกต่างกับการใช้สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

สมเจตน์ พชรพันธ์ และคณะ [26] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกา (Silica, SiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) ที่มีต่อสมบัติการผสม สมบัติเชิงกล กายภาพและโครงสร้างจุลภาค ของยางธรรมชาติที่มีลักษณะโฟม (Cellular natural rubber) ซึ่งผ่านกระบวนการคงรูปแบบทั่วไป (Conventional vulcanization) อุณหภูมิคงรูปที่ 160°C และเวลาให้ยางคงรูปที่ 7 นาที และใช้สารทำให้เกิดฟองชนิด Oxybis(benzene sulphonyl hydrazide) (OBSH) ผลการทดลองพบว่า ยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr ให้สมบัติความต้านแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณการบวมตัวในโหลอื่นที่สถานะสมดุลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น สำหรับในกรณีของยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณคงที่ 20 phr ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 20 ถึง 30 phr ซึ่งทำให้สามารถคงสมบัติที่ต้องการ และไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวในโหลอื่นที่สถานะสมดุล ปริมาณสารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือ 20 phr

สมเจตน์ พชรพันธ์ และคณะ [27] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างของรูพรุนที่เกิดภายในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ที่มีลักษณะโฟม ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปขึ้นงาน และใช้ปริมาณเส้นใยแก้วที่ผสมใน LDPE โฟม ตั้งแต่ 0 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สมบัติเชิงกลที่ศึกษาได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวที่จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงอัด (Flexural strength) และทำการศึกษาโครงสร้างภายใน ดังนี้ ปริมาณและขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานโฟม พบว่า ปริมาณเส้นใยแก้วที่ผสมลงใน LDPE โฟม ที่ 10%wt ค่าความต้านแรงดึงและความต้านทานต่อแรงดัดเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยมีสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกและการยืดตัวที่จุดขาดก่อนการแตกหักที่สูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณเส้นใยแก้วที่ 20 และ 30%wt ตามลำดับ เนื่องจากเส้นใยแก้วเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) และเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวที่ได้รับแรงดึง ซึ่งเป็นผลมาจากกรรมวิธีการขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีด เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน LDPE โฟมที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณต่างๆ กัน พบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบปิด (Closed cell) ตลอดจนปริมาณและขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยแก้วที่ผสมลงในพอลิเมอร์ทำหน้าที่เสมือน Nucleating agent ช่วยในการเกิดรูพรุนได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความหนาแน่นน้อย และมีน้ำหนักเบา ใกล้เคียงกับชิ้นงานพอลิเอทิลีนโฟม ที่ไม่มีการผสมเส้นใยแก้ว แต่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า จึงมีความเหมาะสมที่นำไปประยุกต์ใช้งานด้านวัสดุรับแรงเชิงกลด้านการกระแทก

Matuana และคณะ [28] ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการผลิตและรูปร่างเซลล์ของ โฟมวัสดุผสม PVC กับเส้นใยไม้ พบว่า การเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น สาร Surface treatment ของเส้นใยไม้ เวลาของการขึ้นรูป และอุณหภูมิขึ้นรูปโฟมนั้นส่งผลต่อรูปร่างเซลล์ของโฟมวัสดุผสม โดยที่เมื่อการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นนั้น ทำให้ความหนืดลดลงและเกิดปริมาณก๊าซมากขึ้น ส่วนการเติมสาร Surface treatment นั้นช่วยในการยึดเกาะระหว่างผิวของเส้นใยไม้กับ PVC ให้ดีขึ้น ซึ่งป้องกันการรั่วของก๊าซ โดยที่ 2 ตัวแปรนี้ทำให้วัสดุมีความเป็นเซลล์ที่เพิ่มขึ้น สำหรับเวลาในการขึ้นรูป และอุณหภูมิของการขึ้นรูปโฟมนั้น มีผลต่อขนาดของเซลล์ ซึ่งเวลาในการขึ้นรูปเมื่อเพิ่มขึ้น ขนาดของเซลล์เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีการรวมตัวของเซลล์เข้าด้วยกัน แต่สำหรับอุณหภูมิของการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นค่อยลดลง เนื่องจากในช่วงแรกเซลล์มีการรวมตัวกัน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซเริ่มรั่วออกจากเซลล์ จึงทำให้มีขนาดของเซลล์ลดลง

Jo และ Naguib [29] ได้ทำการศึกษาโฟมเชิงประกอบในระดับนาโนของ HDPE/Clay โดยศึกษาปริมาณ Nano clay และสภาวะการเกิดโฟมที่มีต่อสมบัติด้านการต้านแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบนี้ โดยตัวอย่าง Microcellular-closed cell nanocomposite เตรียมโดยที่มีปริมาณของ Nano clay ที่สัดส่วน 0.5 0.1 และ 2.0 %wt ทำให้เกิดฟองโดยใช้ก๊าซ Carbon dioxide พบว่า ผลของปริมาณ Clay ที่ใส่ลงไปวัสดุ จะทำให้ขนาดของเซลล์ ปริมาตรในการขยายตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณ Clay มากขึ้น เมื่อสังเกตสมบัติเชิงกลในด้านความต้านทานแรงดึง สัดส่วนค่าการยึดดึงสูงสุดสูงกว่าการใส่ clay ลงไปทำให้ทั้งใน Nanocomposite และ Nanocomposite foam มีสมบัติด้าน Elastic modulus และ Tensile strength at yield ดีขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างโฟม HDPE ที่เติม Clay กับไม่ได้เติม Clay พบว่าโฟม HDPE ที่เติม Clay มีความต้านทานแรงดึงที่ดีกว่า ทั้งนี้ที่ปริมาณการเติม Clay ลงไป 5.0%wt สมบัติเชิงกลของทั้ง Nanocomposite และ Nanocomposite foam เพิ่มขึ้นมากที่สุด

Sombatsompop และ Lertkamolsin [30] ศึกษาผลกระทบของสารทำให้เกิดฟองและสารเติมแต่งที่มีผลต่ออย่างธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ในด้านผลของสารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ Azodicarbonamide (ADC) และ Oxybis(benzene sulphonyl hydrazide) (OBSh) ซึ่งมีการแตกตัวที่อุณหภูมิ 150-190°C และ 150-170°C ตามลำดับ โดยเติมสารทำให้เกิดฟองแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยจะทำการสังเกตความหนาแน่นของโฟมและพฤติกรรมการบวมตัว ผลจากพฤติกรรมการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองแต่ละชนิดจะมีผลให้พฤติกรรมการบวมตัวที่แตกต่าง พบว่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSh เพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อสารทำให้เกิดฟอง ADC โดยที่สารทำให้เกิดฟองชนิด OBSh มีช่องว่างในยางได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ADC ซึ่งนั่นทำให้การบวมตัวจาก OBSh มีมากกว่าอัตราการบวมตัวจากการใช้ ADC ยางโฟมส่วนใหญ่มีสมบัติการทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [31] ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำและพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคยัดหุ่่นที่ใช้แล้วเป็นสารเติมแต่ง ทำการทดสอบแรงดึง เปอร์เซ็นต์การคืนรูปของชิ้นงาน การทดสอบด้วยแรงดัดอย่างต่อเนื่อง และการบวมตัวของชิ้นงานยาง พบว่า การใช้อนุภาคของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคเหมาะสม อยู่ระหว่าง 20-30 phr สำหรับการใส่เขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสม 50-60 phr ในกรณีที่ต้องการให้ชิ้นงานคงความเป็นอีลาสติค การเติมแต่งพอลิยูรีเทนโพลีเมอริคให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าการใช้เขม่าดำในช่วงความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่ำๆ ส่วนระดับการบวมตัว (Swelling ratio) ของชิ้นงานยางที่มีสารเติมแต่งเป็นองค์ประกอบ ขึ้นกับความยืดหยุ่นของชิ้นงานยางและระดับของการเสริมแรงระหว่างโมเลกุลของยางกับสารเติมแต่ง

Findik และคณะ [32] ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยมีสารเสริมแรงเป็นผงเขม่าดำสองเกรด คือ ISAF และ HAF พบว่า ค่า Hardness ของเกรด ISAF มีค่ามากกว่าเกรด HAF จนถึงอัตราส่วน NR/SBR 40 : 60 แต่หลังจากอัตราส่วนนี้จะลดลงต่ำกว่าค่าความแข็งของเกรด HAF ที่เพิ่มอิทธิพลตามอัตราส่วน SBR ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า Elastic modulus ของยางผสมที่เติมเกรด HAF จะมีค่ามากกว่าเกือบทุกอัตราส่วน แต่ค่า Tensile strength ของเกรด ISAF จะมีค่ามากกว่าเกรด HAF ในทุกอัตราส่วน ส่วนผลต่อ Scorch time และ Cure time นั้นเกรด ISAF ไม่ต่างกันในทุกอัตราส่วน แต่ที่เติมเกรด HAF ค่า Scorch time และ Cure time มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน SBR ที่เพิ่มขึ้น

Chand [33] ศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้ภาพถ่าย SEM รอยหักของวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอสเตอร์กับแก้วลอย ในการทดลองนี้ใช้แก้วลอยที่มีขนาด 15-75 ไมครอน และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยการหล่อ โดยมีการเติมแก้วลอยลงในพอลิเอสเตอร์ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า ค่าความต้านแรงดึง และความทนแรงกระแทกมีค่าน้อยลงเมื่อมีปริมาณแก้วลอยมากขึ้น และเมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM พบว่า ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่รอยต่อระหว่างแก้วลอยกับพอลิเอสเตอร์

Stieber และ Hannon [34] จดสิทธิบัตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ Azodicarbonamide treatment for carbon black and rubber compounds โดยพบว่า Azodicarbonamide สามารถช่วยการยึดเกาะระหว่าง ผงเขม่าดำและยางได้ ซึ่งผลจากการเกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้นนี้ทำให้ยางมีสมบัติที่ดีขึ้นในด้านพลวัต (dynamic properties) เช่นการลด Hysteresis แต่สมบัติการ Scorch จะเกิดได้เร็วขึ้น โดยประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมยางรถยนต์ และยางนาบผ้าใบ โดยอัตราการเติมสาร Azodicarbonamide จะใช้ที่ปริมาณ 0.1 – 20 phr และทำการผสมที่อุณหภูมิที่มากกว่า 160 °C

Omura [35] จดสิทธิบัตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ Material for a gasket coated with foam rubber โดยใช้ยางโฟมเคลือบวัสดุโลหะทั้งสองด้านบนและล่างเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการยืดหยุ่น และลดการเกิดการบวมตัวกรณีการใช้อย่างโฟมเพียงอย่างเดียว โดยยางไนไตรล์ซึ่งมีอัตราการบวมตัวสูงเมื่อใช้งานกับน้ำมัน และพบว่าสมบัติของยางไนไตรล์ที่ใช้เคลือบวัสดุควรมีสัดส่วนของ Acrylonitrile ในยางสังเคราะห์ที่ปริมาณน้อยกว่า 30% และค่าความหนืดมูนิควรมีค่ามากกว่า 60 และสามารถเพิ่มสารเติมแต่งที่เป็น inorganic fillers ได้แก่ clay หรือ calcium carbonate ที่อัตราส่วน 0 – 80 phr

Nord และคณะ [36] จดสิทธิบัตรที่ประเทศสหรัฐอเมริกา ในหัวข้อ Cushioned rubber floor mat and process พัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทยางรองพื้นกันกระแทก (Cushion) โดยมีเป้าหมายให้สามารถดักจับฝุ่นได้ โดยการทำวัสดุเป็นสองชั้นที่ต่างกันโดยชั้นด้านบนเป็นยางตัน (Solid rubber) และชั้นด้านล่างเป็นยางโฟม (Foam rubber) ซึ่งชั้นที่เป็นยางตันนั้นมีส่วนที่ยื่นออกมาเพื่อดักจับฝุ่น ใช้วัสดุชนิดยาง SBR EPDM หรือ NBR และส่วนยางโฟมชั้นล่างทำหน้าที่รับแรงกระแทกและต้องมีสมบัติเป็นเซลล์ปิดเพื่อให้มีการกระดอนที่ดี และไม่สูญเสียความแข็งแรงหรือมอดูลัสหลังการทำความสะอาด ใช้วัสดุชนิดยาง NBR SBR carboxylate-NBR carboxylate-SBR หรือยางผสม NBR/SBR และความหนาของชั้นโฟมควรมีความหนาอย่างน้อย 25 mm

Guriya และ Tripathy [37] ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของยาง Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer (EPDM) ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT) และผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่าการเติมผงเขม่าดำส่งผลต่อขนาดเซลล์เฉลี่ยที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากผิวของผงเขม่าดำที่มีสมบัติเป็นเบส และการเติมผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อความหนาแน่นของการเกิดฟองที่ลดลง และการเกิดเป็นเซลล์ปิดมีผลทำให้ยางมีค่ามอดูลัสที่สูงขึ้นที่การดึงยืดสูงๆ และที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่ามอดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าลดลง พฤติกรรม Stress relaxation มีค่าที่ขึ้นกับปริมาณสารทำให้เกิดฟองซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของฟองก๊าซ

Kim และคณะ [38] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดฟองของสารทำให้เกิดฟองชนิด N,N'-dinitroso pentamethylene tetramine (DPT) และปริมาณการเติมผงเขม่าดำ ที่มีต่อพฤติกรรมการสึกตัว และ สมบัติเชิงกลของโฟมยางธรรมชาติ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันพร้อมทั้งทำให้เกิดโฟมคือ 155°C และความหนาแน่นของโฟมยางธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำให้ยางสึกตัว และสมบัติความต้านทานการฉีกขาด ความต้านแรงดึง มอดูลัสแรงดึง มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น แต่การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าลดลง

บทที่ 3 วัตถุดิบและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ยางธรรมชาติเกรด STR20

ยางธรรมชาติเกรด STR20 (Standard Thai Rubber 20) ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีการใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย หาซื้อได้ง่าย ราคาค่อนข้างต่ำกว่าเกรดอื่นๆ มีค่า Mooney viscosity [ML (1+4)100°C] เท่ากับ 72 จากบริษัท ส่วยชวน จำกัด

3.1.2 ยางสังเคราะห์เอสบีอาร์ เกรด SBR1712

ยางเอสบีอาร์ เกรด SBR1712 (Styrene Butadiene Rubber, SBR) เป็นยางสังเคราะห์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางอย่างแพร่หลาย มีส่วนประกอบของ สไตรีน 24.5% น้ำมัน 28.8% และกรดอินทรีย์ 5.7% มีค่า Mooney viscosity [ML (1+4)100°C] เท่ากับ 46 ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ส จำกัด

3.1.3 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นสารทำหน้าทีกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท ซิออน เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.1.4 กรดสเตียริก (Stearic acid)

กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารทำหน้าทีกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเทรียล จำกัด

3.1.5 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เกรด PEG # 4000 จากบริษัท นิกส์เคมี จำกัด

3.1.6 เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzthiazol, MBT)

เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง โดยที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกรด ZAP ACCEL M-R จากบริษัท Zeon Advanced Polymix จำกัด

3.1.7 บิวทิลเลทไฮดรอกซีโทลูอิน (Butylated hydroxy toluene ,BHT)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางจากออกซิเจนและสภาวะแวดล้อม ในงานวิจัยเลือกใช้ชนิด BHT (Butylated hydroxytoluene) ที่สามารถใช้ได้กับยางและพลาสติกได้ จากบริษัท Behn Meyer จำกัด

3.1.8 กำมะถัน (Sulfur)

กำมะถัน (Sulfur) เป็นสารช่วยในการคงรูปยางในกระบวนการผลิตยาง ในงานวิจัยนี้ใช้การคงรูปยางระบบ CV (Conventional Vulcanization system) กำมะถันที่ใช้มีขนาด 325 mesh จากบริษัท สยามเคมี จำกัด (มหาชน)

3.1.9 เถ้าลอย (Fly ash)

เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้ (By product) จากการเผาถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่น่าสนใจ คือ มีซิลิกาประมาณ 40% และยังมีโลหะออกไซด์ประมาณ 60% ซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาได้อีกทางหนึ่ง และสามารถใช้ทดแทนสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อให้ต้นทุนการผลิตลดลง ในงานวิจัยนี้เลือกเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ (แม่เมาะ) จังหวัดลำปาง ทำการคัดขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 ไมครอน เถ้าลอยมีความหนาแน่น 2.65 กรัม/ลบ.ซม. จากบริษัท K.N.R. Group จำกัด

3.1.10 ซิลิกาเกรดการค้า (Commercial silica)

ซิลิกาเกรดการค้าเป็นสารประเภทสารเสริมแรง ที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมผลิตยาง จึงนำมาใช้เปรียบเทียบกับสมบัติของซิลิกาที่ได้จากเถ้าลอย ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ซิลิกาแบบตกผลึก

(Precipitated) เกรด TOKUSIL 233 มีขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 ไมครอน ค่า pH 6.8 และมีค่า Bulk density 0.232 g/cm^3 จากบริษัท Tokuyama Siam Silica จำกัด

3.1.11 ผงเขม่าดำ (Carbon black)

ผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งประเภทสารเสริมแรงที่ใช้มากทางการค้าเช่นเดียวกับซิลิกา แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีดำ จึงนำมาใช้เปรียบเทียบกับสมบัติของเถ้าลอยซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งในยางผสมยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ผงเขม่าดำเกรด HAF N330 มีขนาดอนุภาค 26-30 nm จากบริษัท ไทย คาร์บอนแบล็ค จำกัด (มหาชน)

3.1.12 สารคู่ควบไซเลน Couplink 89C

สารคู่ควบ (Coupling agents) ประเภทไซเลน (Bis-[3-(triethoxysilyl)-propyl]-tetrasulfide), $[(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{-Si-(CH}_2)_3\text{-S}_4\text{-(CH}_2)_3\text{-Si-(C}_2\text{H}_5\text{O})_3]$ ซึ่งเป็นประเภทสารคู่ควบไซเลน ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นสารที่ใช้ในการปรับปรุงผิวเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้า เพื่อช่วยการยึดเกาะระหว่างเฟสของยางกับสารเติมแต่ง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท Behn Meyer จำกัด ชื่อทางการค้า คือ Couplink 89C

3.1.13 สารทำให้เกิดฟองชนิด Oxybis(benzenesulfonylhydrazide), OBSH

มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว อุณหภูมิการสลายตัว $160\text{--}170^\circ\text{C}$ ปริมาตรฟองก๊าซ 122-136 ml/g จากบริษัท เอ เอฟ กู๊ดริช เคมีคัลส์ จำกัด

3.1.14 สารทำให้เกิดฟองชนิด Azodicarbonamide (ADC)

มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลือง เกรด Supercell-522 อุณหภูมิการสลายตัว $150\text{--}160^\circ\text{C}$ ปริมาตรฟองก๊าซ 188-192 ml/g จากบริษัท เอ เอฟ ซูเปอร์เซลล์ จำกัด

3.2 สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย

สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย มีส่วนประกอบอย่างดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของยางที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ (phr)*
1. ยางธรรมชาติ STR20 และ ยางเอสบีอาร์ SBR1712	เมทริกซ์	100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	5.0
3. กรดสเตียริก	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	3.0
4. บิวทิลไฮดรอกซีโทลูอิน (Butylated hydroxytoluene, BHT)	สารป้องกันการเกิด ออกซิเดชัน	1.0
5. สารเติมแต่ง - ผงถั่วลอย - ผงซิลิกาเกรดการค้ำ - ผงเขม่าดำ	สารเสริมแรง	0, 10, 20, 30, 40 0, 10, 20, 30, 40 0, 20, 40, 60, 80, 100
6. พอลิเอทิลีนไกลคอล	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	5% ของน้ำหนักซิลิกา เกรดการค้ำ
7. เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT)	สารเร่งการกระตุ้น ปฏิกิริยา	1.0
8. สารทำให้เกิดฟอง - ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ [Oxybis(benzene sulfonyl hydrazide), OBSH] - เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azo dicarbonamide, ADC)	สารทำให้เกิดฟอง	0, 2, 4, 6, 8, 10 0, 2, 4, 6, 8, 10
9. กำมะถัน	สารคงรูปยาง	1.5

* phr: parts per hundred of rubber by weight

งานวิจัยนี้เตรียมสัดส่วนผสมของเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในวัสดุผสมยาง NR/SBR เชิงปริมาณสารตัวเติมและเชิงปริมาณซิลิกาที่มีในเถ้าลอย การเติมเถ้าลอยลงในวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์เชิงปริมาณสารตัวเติมใช้อัตราส่วน 25, 50, 75 และ 100 phr ส่วนการเติมเถ้าลอยลงในวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์เชิงปริมาณซิลิกาที่มีในเถ้าลอยนั้นโดยคำนวณปริมาณซิลิกาที่มีในเถ้าลอยคิดเป็นร้อยละ 40 ซึ่งปริมาณซิลิกาจากเถ้าลอยเพิ่มขึ้นในสัดส่วนเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบปริมาณของซิลิกาเกรดการค้ากับซิลิกาจากเถ้าลอย

ปริมาณซิลิกาเกรดการค้า ที่ใช้ในงานวิจัย (phr)	ปริมาณผงเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย (phr)	
	ซิลิกาจากเถ้าลอย	เถ้าลอยที่ใช้จริง
10	10	25
20	20	50
30	30	75
40	40	100

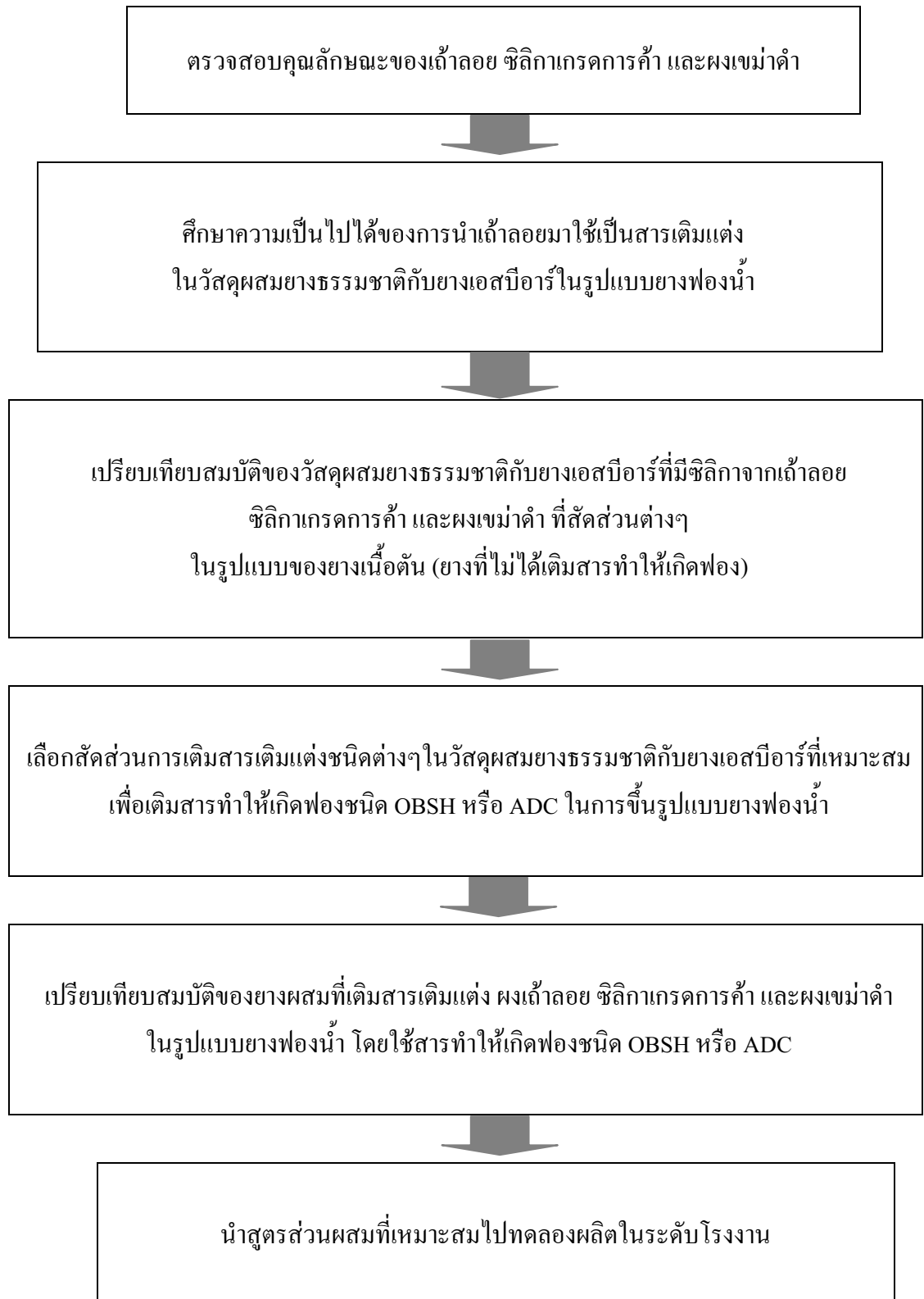
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนงานในการดำเนินการวิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่สำคัญ คือ

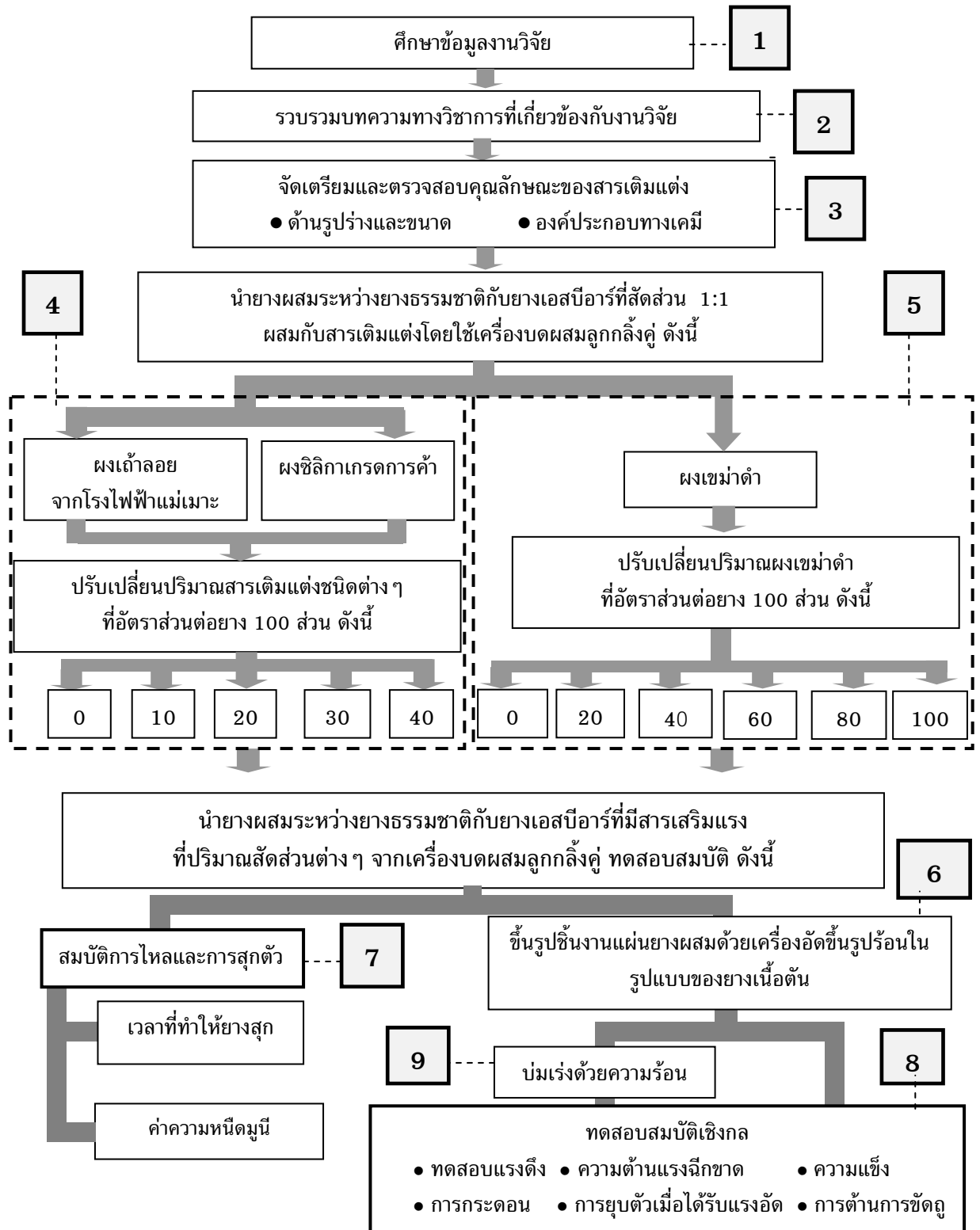
1. ศึกษาผลของปริมาณสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่เติมลงในยางผสม NR/SBR
2. หาสัดส่วนของสารทำให้เกิดฟองที่เหมาะสมในยางผสม NR/SBR
3. ศึกษาเปรียบเทียบชนิดของสารทำให้เกิดฟองในยางผสม NR/SBR

ในส่วนแรกของงานวิจัยได้ศึกษาปริมาณของสารเติมแต่ง ได้แก่ ซิลิกาจากเถ้าลอย เทียบกับสารเติมแต่งซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ จากนั้นนำสัดส่วนของการเติมสารเติมแต่งในวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่สนใจหรือที่มีความเป็นไปได้ที่น่าไปพัฒนาสมบัติเป็นยางฟองน้ำต่อไป ทำการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด [Oxy bis(benzene sulfonyl hydrazide)], OBSH และชนิด Azodicarbonamide (ADC) และทำการเปรียบเทียบกัน ทดสอบสมบัติสมบัติการไหล การสุกตัว

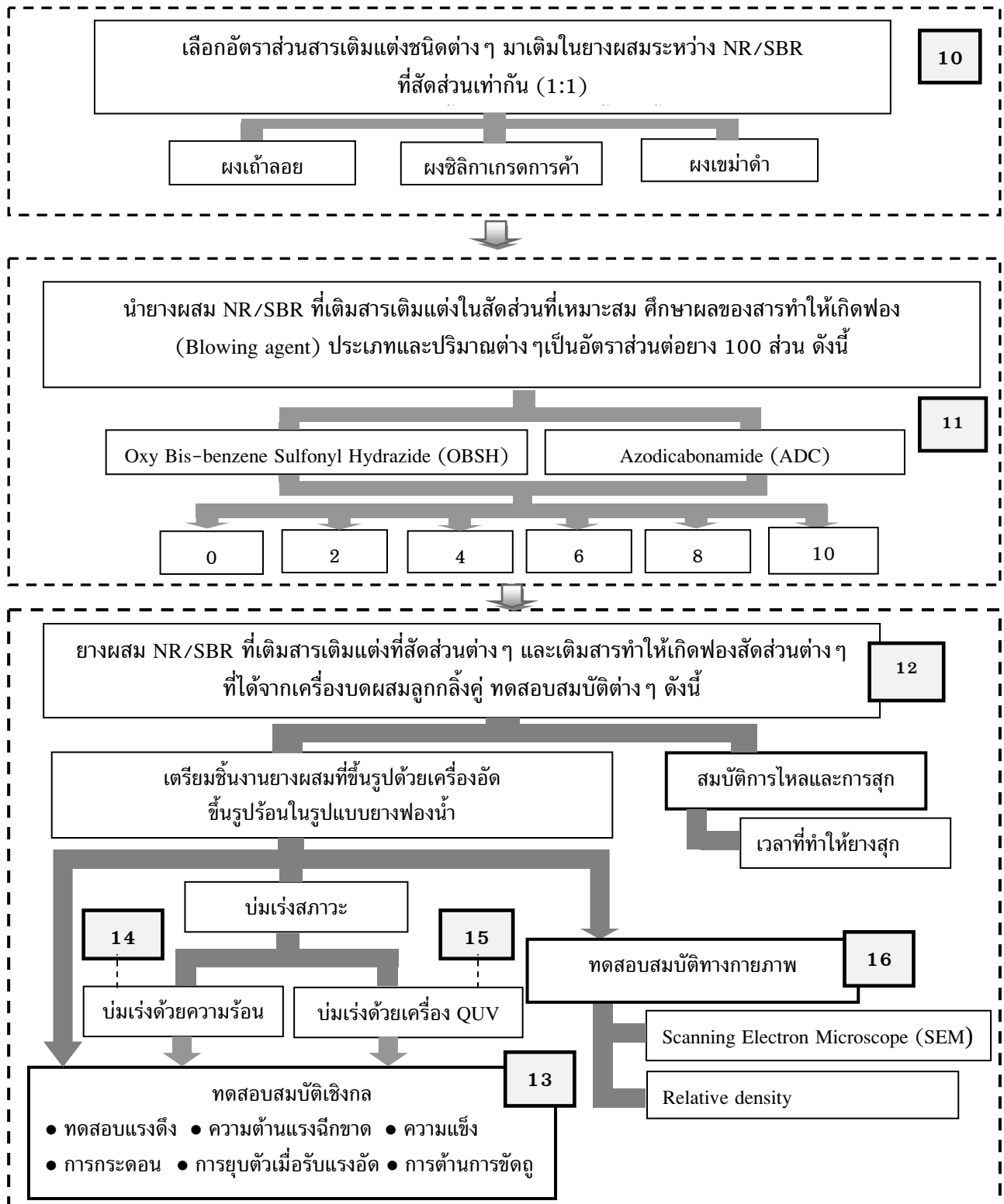
สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การบ่มเร่งสภาวะ ลำดับการดำเนินงานวิจัยโดยรวม ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม



รูปที่ 3.2 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวมในส่วนของการขึ้นรูปยางเนื้อตัน



รูปที่ 3.3 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวมในส่วนของการขึ้นรูปยางฟองน้ำ

รายละเอียดของแผนงาน

งานหมายเลข 1 และ 2 ศึกษาข้อมูลงานวิจัยและรวบรวมบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อยอดจากโครงการวิจัย “การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง” [3] เป็นการศึกษาอย่างผสมในรูปแบบยางฟองน้ำ การดำเนินงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับทฤษฎีการเกิดโฟม สารทำให้เกิดโฟม และสมบัติของยางฟองน้ำ และรวบรวมบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานหมายเลข 3 ตรวจสอบคุณลักษณะของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า

ผงเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัย ใช้จาก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยตรวจสอบคุณลักษณะของเถ้าลอยเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า โดยต้องการนำเถ้าลอยที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักทดแทนซิลิกาเกรดการค้า ทำการเก็บตัวอย่างเถ้าลอยผ่านหินลิกไนต์ (แม่เมาะ) และซิลิกาเกรดการค้า จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจสอบคุณลักษณะด้านรูปร่างและขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากบริษัท JEOL รุ่น JSM-5800 จากนั้นตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer รุ่น MESA-500W และตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR จากบริษัท Nicolet รุ่น Nexus 470, USA

งานหมายเลข 4 การเติมผงเถ้าลอย หรือ ซิลิกาเกรดการค้า ในยางผสม NR/SBR

เถ้าลอย: ทำการปรับปรุงผิวของเถ้าลอยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน Couplink 89C, bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphide (Couplink 89C), $[(C_2H_5O)_3-Si-(CH_2)_3-S_4-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$ มีขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C ที่ปริมาณ 2% ของน้ำหนักเถ้าลอย และเตรียมเอทานอลในอัตราส่วน 100 มิลลิลิตรต่อเถ้าลอย 100 กรัม
2. เติมสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C ลงในเอทานอลและกวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที

3. นำเถ้าลอยเทลงในสารละลายระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเอทานอล ใช้แท่งแก้วกวนให้ของผสมเข้ากัน เป็นเวลา 15 นาที
4. ทำการอบเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนแล้ว ที่อุณหภูมิ 100-110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ดังนั้น ถ้าใช้ Couplink 89C ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก นั้นหมายความว่า ใช้ Couplink 89C ปริมาณ 2 กรัม ต่อเถ้าลอย 100 กรัม และเอทานอล 100 มิลลิลิตร

ซิลิกาเกรดการค้า: ทำการปรับปรุงผิวของซิลิกาเกรดการค้าโดยใช้สารคู่ควบไซเลน Couplink 89C มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C ที่ปริมาณ 2% ของน้ำหนักซิลิกา และเตรียมเอทานอลในอัตราส่วน 100 มิลลิลิตรต่อซิลิกา 100 กรัม
2. เติมสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C ลงในเอทานอลและกวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที
3. นำซิลิกาเกรดการค้าและสารละลายระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเอทานอลเทลงในเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High Speed Mixer) จากนั้นจึงทำการผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 5 นาที
4. ทำการอบซิลิกาเกรดการค้าที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนแล้ว ที่อุณหภูมิ 100-110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

เตรียมยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วน 1:1 มาผสมกับสารเติมแต่งผงเถ้าลอย (คิดที่ปริมาณซิลิกาที่มีในเถ้าลอย 40%) และผงซิลิกาเกรดการค้า ตั้งแต่ 0 10 20 30 และ 40 phr จากนั้นนำยางผสม NR/SBR บดขยี้ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่เป็นเวลา 8 นาที แล้วจึงผสมสารเคมีและสารเติมแต่งต่างๆ ลงไป ซึ่งใช้เวลาทั้งหมด 40 นาที โดยมีขั้นตอนการผสมดังแสดงในตารางที่ 3.3

งานหมายเลข 5 การเติมผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR

นำผงเขม่าดำ (ไม่ปรับปรุงผิว) ผสมใน NR/SBR ที่สัดส่วน 1:1 ซึ่งมีขั้นตอนการผสมเช่นเดียวกันกับงานหมายเลข 4 ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ ตั้งแต่ 0 20 40 60 80 และ 100 phr

ตารางที่ 3.3 ลำดับการผสมสารเคมีและเวลาในการเติมสารเคมีในยางผสมรูปแบบยางเนื้อตัน

ลำดับการผสมสารเคมี	หน้าที่	เวลาการเติมสาร ขณะบดผสมยาง (นาที)
1. ยางธรรมชาติ STR 20 และ ยางเอสปีอาร์ SBR 1712	เมทริกซ์	8 (ผสมยางทั้งสองชนิด)
2. Zinc Oxide (ZnO) and Stearic acid	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	2
3. Butylated hydroxytoluene (BHT)	สารป้องกันการเกิด ออกซิเดชัน	2
4. สารเติมแต่ง - ผงถั่วลอ่ย หรือ - ผงเขม่าดำ หรือ - ผงซิลิกาเกรดการค้ำ /PEG	สารเติมแต่ง สารเติมแต่ง สารเติมแต่ง/สารกระตุ้น ปฏิกิริยา	20
5. Mercaptobenzothiazole (MBT)	สารเร่งการกระตุ้นปฏิกิริยา	3
6. กำมะถัน	สารคงรูปยาง	5

งานหมายเลข 6 การเตรียมชิ้นงานแผ่นยางที่คงรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

นำวัสดุเชิงประกอบยางผสม NR/SBR กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ไปทดสอบเวลาที่ใช้ในการสุกตัว ยางตามค่า tc_{90} ของแต่ละสูตรยางจากเครื่อง ODR ไปเตรียมขึ้นรูปแผ่นยางทดสอบที่คงรูปด้วย เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot press) โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนจาก บริษัท แลปเทค จำกัด อุณหภูมิการ ขึ้นรูปที่ 160°C ใช้แรงดันแม่พิมพ์ที่ 170 kg/cm^2 และเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึง เป็นรูปดัมเบลล์ ชนิด Die C

งานหมายเลข 7 การทดสอบสมบัติการไหลและการสุกตัว

1. การตรวจสอบสมบัติการไหล โดยวิธีหาค่าความหนืดมูนีของยางผสมที่มีผงถั่วลอ่ย และซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Mooney viscometer ยี่ห้อ Gibitre รุ่น Mooney Check ใช้ในการทดสอบหาค่าความหนืดของยาง โดยใช้สภาวะ

การทดสอบที่ความเร็วรอบการหมุน 2 ± 0.02 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิทดสอบที่ 100°C ในการทดสอบยางจะได้รับความร้อน 1 นาที ก่อนเริ่มหมุนจานโลหะ และทำการอ่านค่ามูนิ เมื่อจานโลหะหมุนไป 4 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1646-00

2. การทดสอบสมบัติการสึกตัว โดยนำวัสดุเชิงประกอบยางผสม NR/SBR กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ไปทดสอบหาเวลาในการสึกที่ 90 เปอร์เซนต์ (tc_{90}) และค่าแรงบิดของสารประกอบยาง ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) จาก บริษัท โกเท็ค เทคดิง แมชชีน อินดัสตเรียล รุ่น GT 70-70-S2 จากประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 ที่อุณหภูมิ 160°C

งานหมายเลข 8 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำวัสดุเชิงประกอบยางผสม NR/SBR กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ตามรายละเอียดดังนี้

1. ทดสอบความต้านแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบยางผสม ด้วยเครื่อง Universal Testing Machines จากบริษัท ซิมาสุ รุ่น Autograph AG-I, Japan ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D412-03 ใช้ความเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ทดสอบหามอดูลัสที่การยืดตัว 200 เปอร์เซนต์ ความต้านแรงดึง และการยืดตัวที่จุดขาด ตามมาตรฐาน ASTM D412-03
2. ทดสอบความแข็งที่ผิวของแผ่นยางรูป ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง จากบริษัท เทค ลีค จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 Shore A
3. ทดสอบการต้านแรงฉีกขาดของวัสดุยางผสม ตามมาตรฐาน ASTM D624-00
4. ทดสอบความต้านต่อการขาดของวัสดุยางผสม ตามมาตรฐาน DIN 53516
5. ทดสอบเปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงอัด (Compression set) ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D395-01
6. ทดสอบการกระดอน (Resilience resistance) ของวัสดุเชิงประกอบยางผสมด้วยเครื่องทดสอบ Dunlop Tripsometer

งานหมายเลข 9 การทดสอบบ่มเร่งสภาวะขึ้นงานด้วยความร้อน (Thermal Ageing)

นำวัสดุเชิงประกอบยางผสม NR/SBR กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ไปบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เพื่อทดสอบความต้านทานต่อความร้อน (Thermal aging resistance) ของยางรูป ตามมาตรฐาน

ASTM D573-04 โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

งานหมายเลข 10 เลือกสัดส่วนปริมาณสารเติมแต่งที่เติมในยางผสม NR/SBR ที่เหมาะสมนำมาศึกษาในรูปแบบของยางฟองน้ำ

เลือกสูตรยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำที่ปริมาณที่มีสมบัติเหมาะสมเมื่อเทียบปริมาณการเติมต่างๆกัน ไปศึกษาชนิดและปริมาณการเติมสารทำให้เกิดฟองในลักษณะของยางฟองน้ำต่อไป

ในการพัฒนายางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ผลิตในรูปแบบผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำเพื่อนำไปใช้งานผลิตภัณฑ์ยางปะเก็น/ยางรองกันกระแทก ผู้วิจัยฯ จึงกำหนดสมบัติการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นตามมาตรฐานสากล ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นตามมาตรฐาน ASTM C864-05*

สมบัติ	ผลิตภัณฑ์ยางปะเก็น	มาตรฐานทดสอบ
ความต้านแรงดึง (MPa)	10.3-12.4	ASTM D412
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	200-300	ASTM D412
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	17.5-26.3	ASTM D624
ความแข็ง (Shore A)	50-70	ASTM D2240
การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดสูงสุด (%)	30	ASTM D395
สมบัติที่เปลี่ยนไปหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน (70 h, 100°C)		ASTM D573
ความแข็ง (Shore A)	±10	
ความต้านแรงดึง(MPa)	±15	
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	±40	

* อ้างอิงข้อมูลจาก ASTM C 864-05, Standard Specification for Dense Elastomeric Compression Seal Gaskets, Setting Blocks, and Spacers

งานหมายเลข 11 การเติมสารทำให้เกิดฟอง

นำสูตรยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านล่อย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้เลือกตามความเหมาะสม มาเติมสารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) ชนิด OBSH และ ADC ที่สัดส่วนตั้งแต่ 0 2 4 6 8 และ 10 phr โดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ตามส่วนประกอบของสารประกอบยาง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยใช้เวลาในการผสมเท่ากันที่ 40 นาที

งานหมายเลข 12 การขึ้นรูปยางผสมในรูปแบบยางฟองน้ำ

นำยางผสมยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติด้านต่างๆ การหาเวลาในการสุกยางโดยใช้เครื่อง ODR เช่นเดียวกับงานหมายเลข 7 และนำเวลาในการคงรูปยางที่ได้จากการทดสอบ ไปใช้ในการขึ้นรูปแผ่นยางทดสอบในแต่ละสูตรด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปรีดระบบแรงดันเป็นยางฟองน้ำโดยใช้สถานะเดียวกันกับงานหมายเลข 6 เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.5 ลำดับการผสมสารเคมีและเวลาในการเติมสารเคมีในยางผสมรูปแบบยางฟองน้ำ

ลำดับการผสมสารเคมี	หน้าที่	เวลาการเติมสาร ขณะบดผสมยาง (นาที)
1. ยางธรรมชาติ STR 20 และ ยางเอสปีอาร์ SBR 1712	เมทริกซ์	8 (ผสมยางทั้งสองชนิด)
2. Zinc Oxide and Stearic acid	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	2
3. Butylated hydroxytoluene (BHT)	สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน	2
4. สารเติมแต่ง ผงถ่านล่อย หรือ ผง เขม่าดำ หรือ PEG / ซิลิกาเกรด การค้า	สารเติมแต่ง	15
5. สารทำให้เกิดฟอง OBSH หรือ - ADC	สารทำให้เกิดฟอง	5
6. Mercaptobenzothiazole (MBT)	สารเร่งการกระตุ้นปฏิกิริยา	3
7. กำมะถัน	สารคงรูปยาง	5

งานหมายเลข 13 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ

ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ โดยทดสอบ เช่นเดียวกับงานหมายเลข 8

งานหมายเลข 14 การทดสอบบ่มเร่งสภาวะขึ้นงานด้วยความร้อน ของยางผสมที่ขึ้นรูปเป็นยางพองน้ำ

ทำการทดสอบบ่มเร่งสภาวะขึ้นงานด้วยความร้อนของยางพองน้ำ ในสภาวะเช่นเดียวกับงานหมายเลข 9

งานหมายเลข 15 การทดสอบบ่มเร่งสภาวะขึ้นงานด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ของยางผสมที่ขึ้นรูปเป็นยางพองน้ำ

ทำการบ่มเร่งสภาวะด้วยเครื่อง Accelerated Weathering Tester: QUV ยางผสมเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM G154-06 Cycle 3 โดยฉายรังสี UVB ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง สลับกับการควบแน่นไอน้ำที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป็นเวลา 96 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานออกไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

งานหมายเลข 16 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ

1. **ตรวจสอบพื้นผิวหน้าตัด (Razor cut surface)** [39] ของยางผสมโดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope – SEM) รุ่น JEOL JSM-5800LV ที่ 15 kV accelerating voltage โดยเลือกชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ขนาดและการกระจายตัวของสารเติมแต่ง
2. **การตรวจสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)** ของยางพองน้ำ NR/SBR ตามมาตรฐาน ASTM D792-08 Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement โดยมีชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์ในการทดสอบหาความหนาแน่นสัมพัทธ์

โดยมีรายละเอียดดังนี้

ความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Specific gravity or Relative density, sp gr 23/23°C) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของสารที่ปริมาตรหนึ่งที่อุณหภูมิ 23°C ต่อมวลของน้ำที่ปริมาตรเดียวกันที่อุณหภูมิเท่ากันความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

ความหนาแน่น (Density, D^{23C}) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรที่อุณหภูมิ 23°C มีหน่วยเป็น kg/m^3 และการแปลงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์เป็นค่าความหนาแน่นสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 3.1

$$D^{23C} = \text{sp gr } 23/23^\circ\text{C} \times 997.5 \quad (3.1)$$

โดยตัวแปรต่างๆของสมการ 3.1 เป็นดังนี้

D^{23C} คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น kg/m^3 ที่อุณหภูมิ 23°C

sp gr 23/23°C คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 23°C

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ได้แก่ เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยมหนึ่งตำแหน่งเป็นอย่างต่ำ โดยที่เครื่องชั่งจะติดตั้งไว้กับอ่างน้ำเหนือเครื่องชั่ง พร้อมทั้งติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ ส่วน Sinker เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกดชิ้นตัวอย่างที่มี

ความหนาแน่นน้อยกว่า 1.00 (ลอยเหนือน้ำ) ให้อยู่ได้น้ำ อุปกรณ์นี้ต้องมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มากกว่า 7 และมีน้ำหนักที่มากพอที่จะกดชิ้นงานตัวอย่างให้จมได้ หากชิ้นงานจมน้ำไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์นี้

วิธีการทดสอบคือ เตรียมชิ้นงานที่มีปริมาตรมากกว่า 1 cm³ และมีความหนาแน่นมากกว่า 1 mm และน้ำหนักไม่เกิน 5g จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ ทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างในอากาศ บันทึกค่าน้ำหนัก จากนั้นนำตัวอย่างจุ่มลงในอ่างน้ำที่วางบนเครื่องชั่งแล้วบันทึกค่าน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักของ Sinker และ Sample holder ที่อยู่ในน้ำและอากาศ (ในกรณีที่ใช้) การคำนวณหาความหนาแน่นสัมพัทธ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

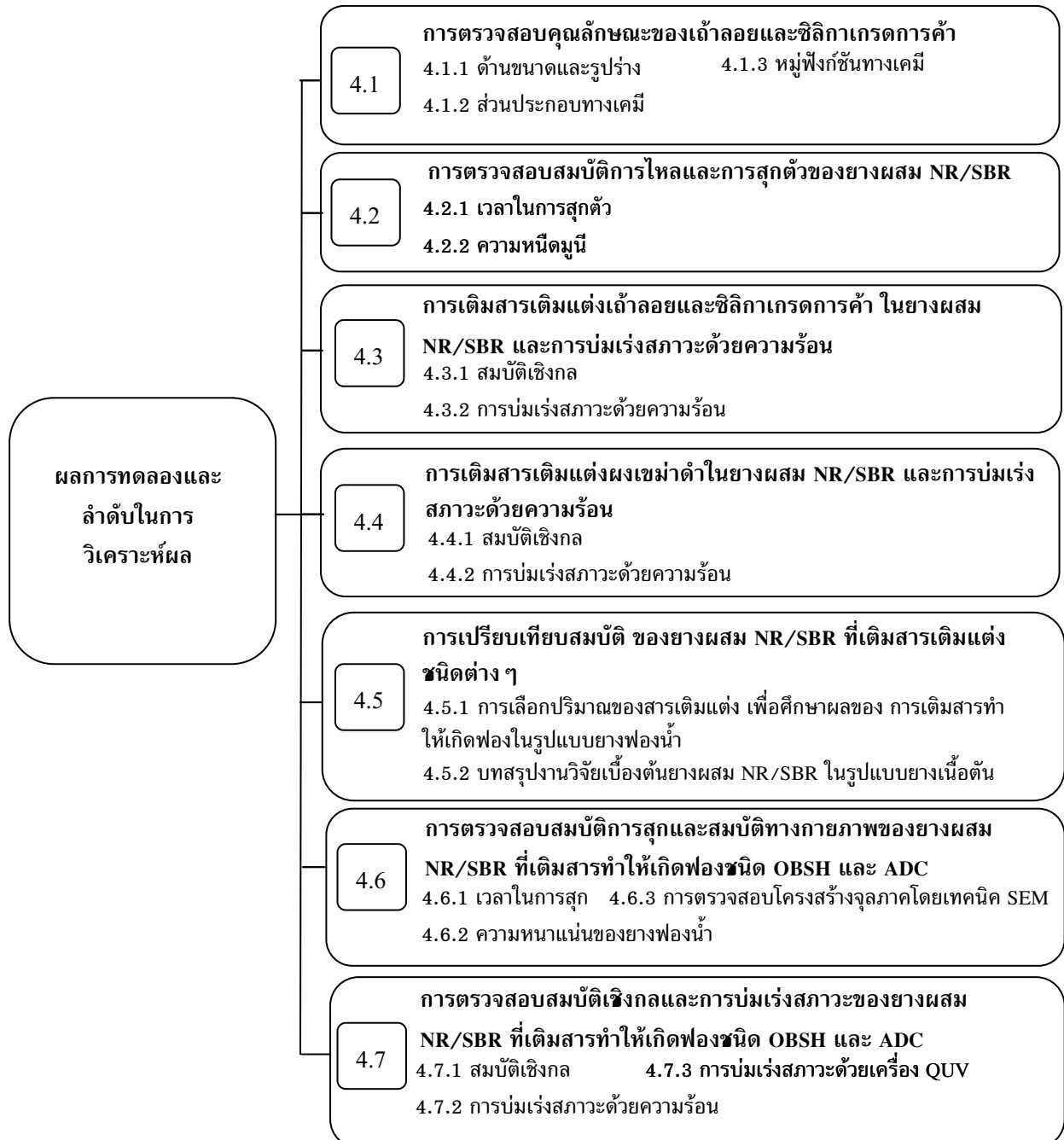
$$\text{sp gr } 23/23^{\circ}\text{C} = a / (a + w - b) \quad (3.2)$$

โดยตัวแปรต่างๆ ของสมการ 3.2 เป็นดังนี้

- a คือ น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างที่อยู่ในอากาศที่ไม่รวมน้ำหนักของ Sample holder หรือ Sinker
- b คือ น้ำหนักของชิ้นงาน และ Sample holder หรือ Sinker (ในกรณีที่มีการใช้) ที่อยู่ในน้ำที่วางบนเครื่องชั่ง
- w คือ น้ำหนักของ Sample holder หรือ Sinker (ในกรณีที่มีการใช้)

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองทั้งหมดในภาพรวม และลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1

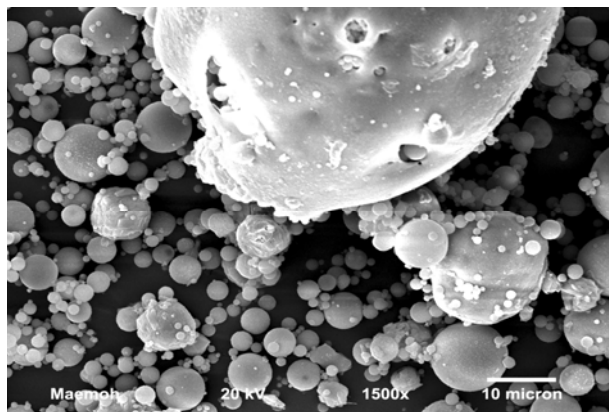


รูปที่ 4.1 ลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า

4.1.1 การตรวจสอบขนาดและรูปร่างของเถ้าลอย

เถ้าลอยมีรูปร่างและขนาดของอนุภาคแตกต่างกันมาก แต่อย่างไรก็ตามเถ้าลอยมีขนาดอนุภาคไม่เกิน 300 ไมครอน ดังแสดงรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปร่างอนุภาคเถ้าลอยด้วยเทคนิค SEM (กำลังขยาย 1500 เท่า)

รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะรูปร่างเถ้าลอยจากแม่เมาะด้วยเทคนิค SEM พบว่า เถ้าลอยมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลมมีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ผสมกัน เถ้าลอยที่มีขนาดเล็กมากมีลักษณะตัน แต่เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่มีความพรุนตัวสูง ซึ่งแต่ละอนุภาคของเถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน [3-4]

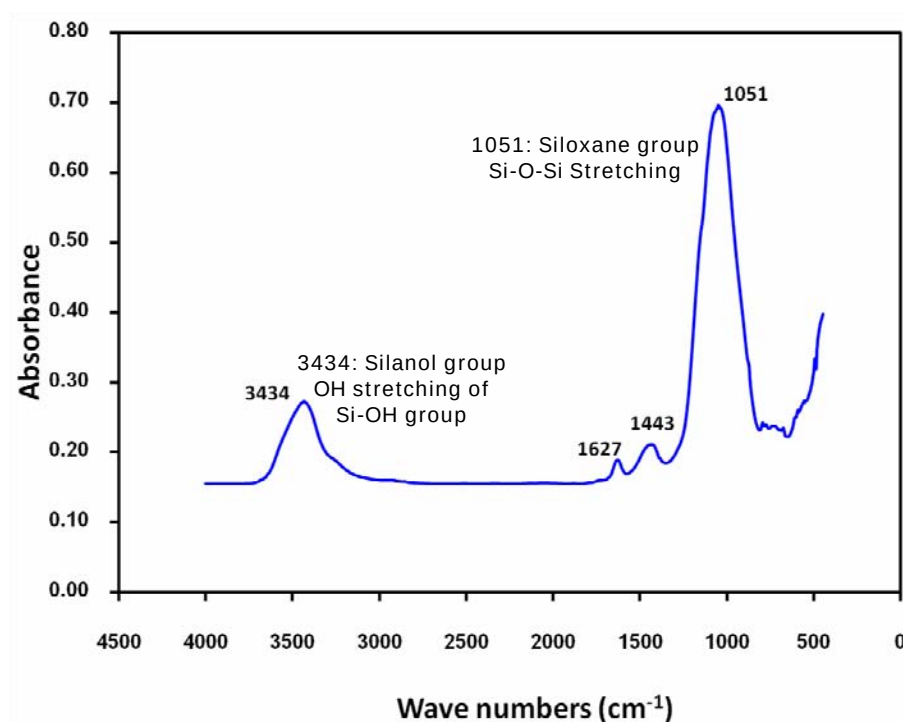
4.1.2 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer พบว่า เถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก และมีส่วนประกอบของกลุ่มโลหะออกไซด์ ที่ปริมาณต่างๆ ในเถ้าลอย ดังแสดงตารางที่ 4.1

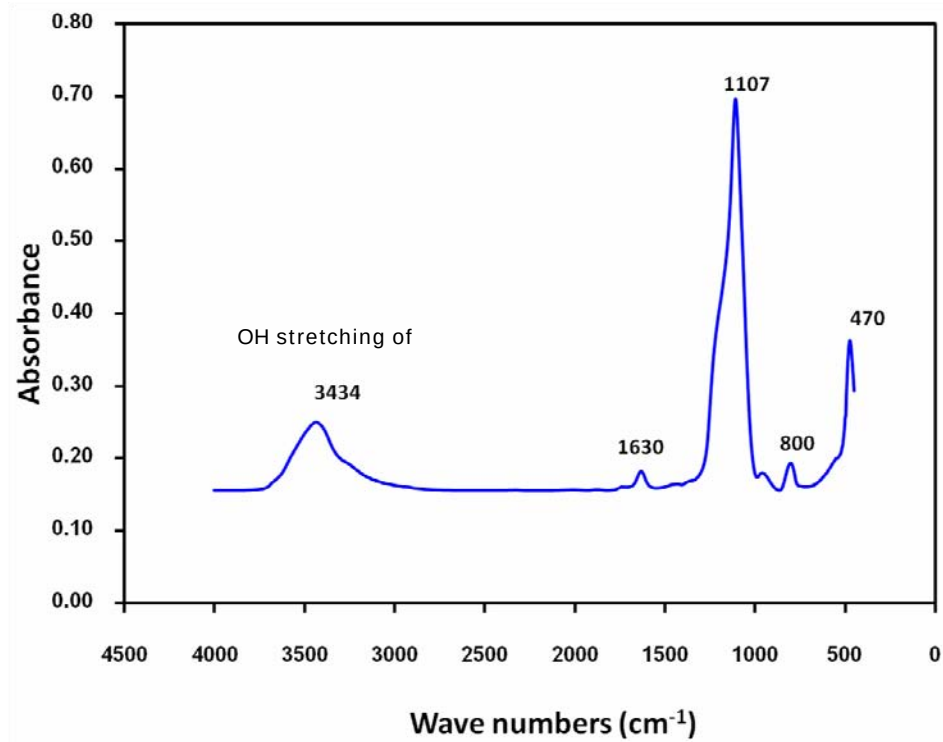
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

ส่วนประกอบทางเคมี	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)	46.2
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide)	26.4
เหล็กออกไซด์ (Iron oxide)	10.7
แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide)	7.6
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)	2.2
โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide)	1.1
โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide)	3.1
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur trioxide)	1.8
อื่นๆ	0.9

4.1.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า

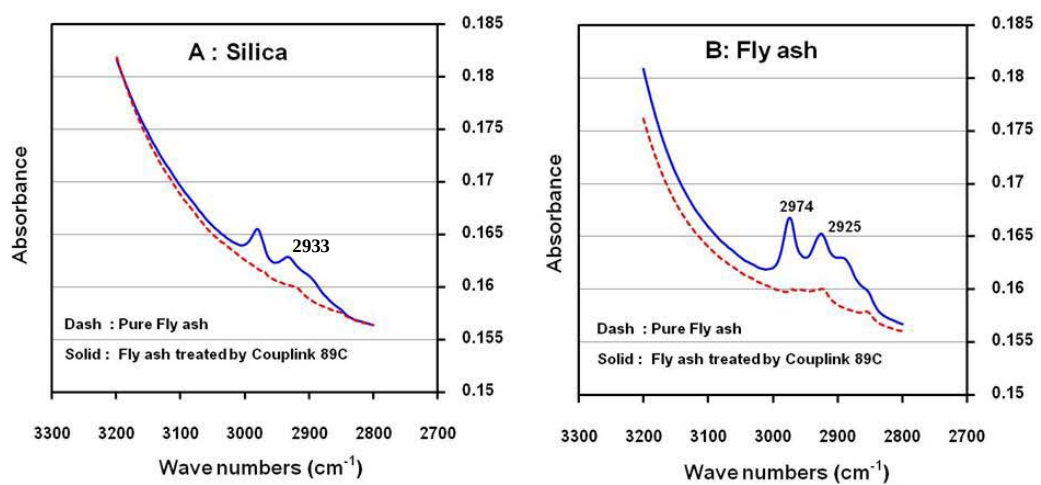


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเถ้าลอย



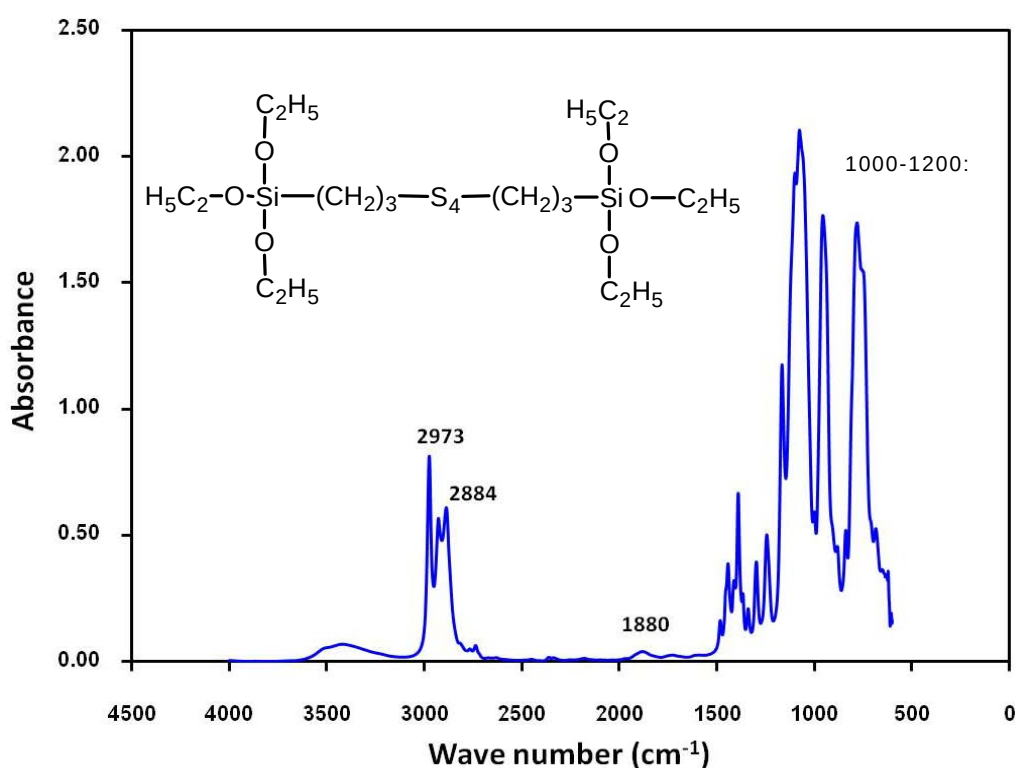
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า

รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า ตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่าเถ้าลอยมีตำแหน่งเลขคลื่นที่ตรงกับหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า ที่ประมาณ 3400-3500 และ 1000-1100 cm⁻¹ ที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและซิลอกเซน ตามลำดับ [40] นั้นหมายความว่า เถ้าลอยมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับซิลิกาเกรดการค้าจริง



รูปที่ 4.5 ภาพขยายสเปกตรัมหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า (A) และผงเถ้าลอย (B) ที่ไม่ปรับปรุงผิว (เส้นประ) และปรับปรุงผิวด้วย Couplink 89C (เส้นทึบ) ที่เลขคลื่น 2700 -3300 cm⁻¹

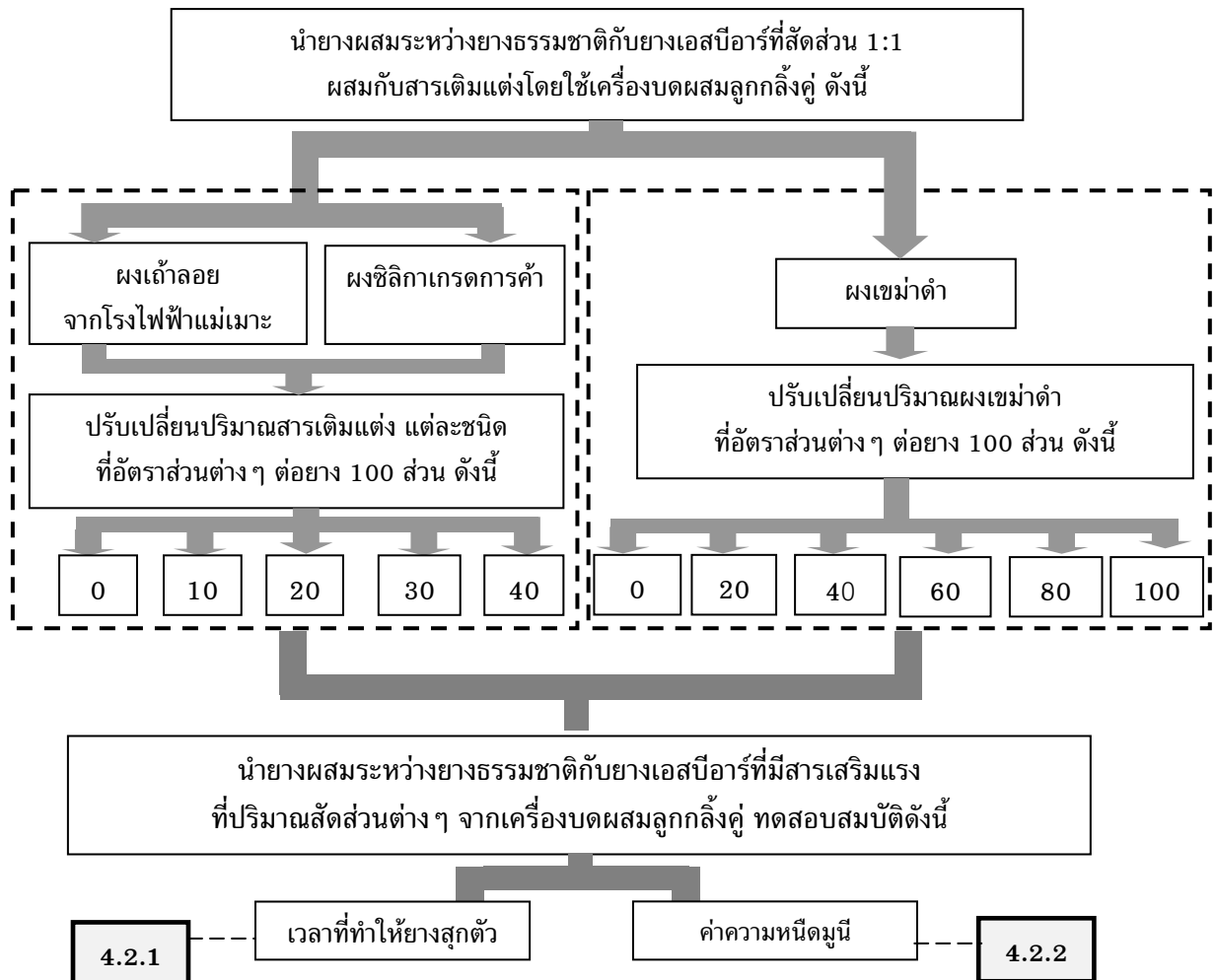
ส่วนผลของการปรับปรุงผิวของ ซิลิกาเกรดการค้า และผงเถ้าลอย ในรูปที่ 4.5 เป็นภาพขยายสเปกตรัมหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า และผงเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวด้วย Couplink 89C ที่เลขคลื่น $2700 - 3300 \text{ cm}^{-1}$ มีตำแหน่งของเลขคลื่นที่ประมาณ $2900 - 3000$ ของตัวอย่างที่ทำการปรับปรุงผิวทั้งซิลิกาเกรดการค้า และผงเถ้าลอย แต่ไม่มีตำแหน่งของเลขคลื่นนี้ในตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ซึ่งตำแหน่งเลขคลื่นนี้เป็นตำแหน่งของพันธะ C-H จากหมู่เอทอกซีของสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C แสดงถึงสารคู่ควบนี้สามารถจับที่ผิวของผงซิลิกาและเถ้าลอยได้ ซึ่งกราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของสารคู่ควบไซเลนนี้แสดง ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C

ผลการทดลองนี้ได้สเปกตรัมของการปรับปรุงผิวของซิลิกาสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Marrone และคณะ [41] ที่ทำการศึกษาการปรับปรุงผิวของซิลิกา ด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิดเดียวกันนี้โดยใช้เทคนิค FTIR โดยพบตำแหน่งสเปกตรัมการยืดของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น $2800 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ จากหมู่เอทอกซีของสารคู่ควบไซเลน ซึ่งมาจากการดูดซับของสารคู่ควบไซเลนที่ผิวซิลิกาเช่นเดียวกัน และลักษณะของสเปกตรัมหลังการปรับปรุงผิวคล้ายกันกับสเปกตรัมงานวิจัยนี้

4.2 การตรวจสอบสมบัติการไหลและการสึกตัวของยางผสม NR/SBR



รูปที่ 4.7 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติการไหลและการสึกตัว

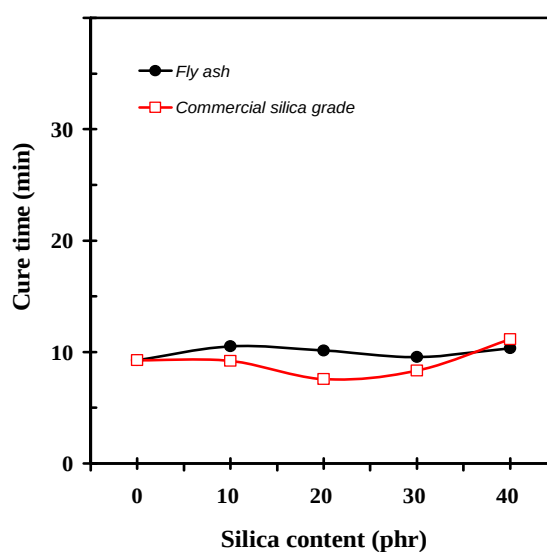
ทำการเตรียมยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งต่างๆ ในรูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง) โดยใช้สูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของยางผสมที่ใช้ขึ้นรูป

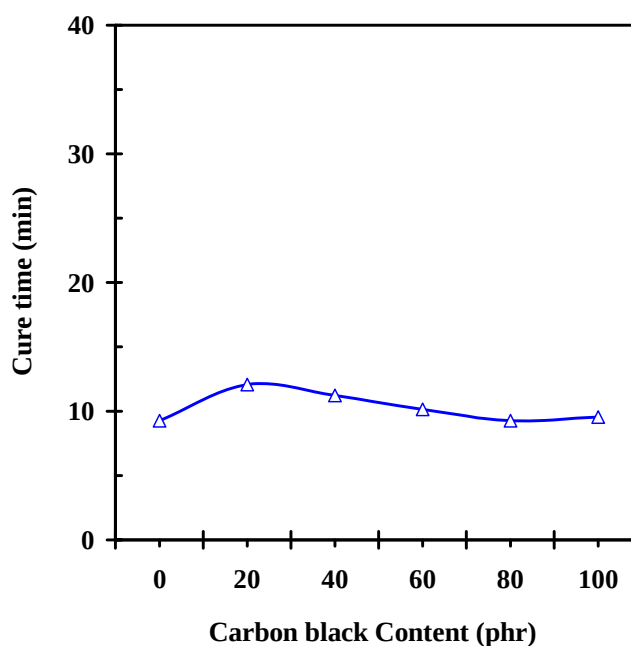
สารเคมี	ปริมาณ (phr)
1. ยางธรรมชาติ STR20 และ ยางเอสปีอาร์ SBR1712 (1:1)	100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.0
3. กรดสเตียริก	3.0
4. Butylated hydroxytoluene (BHT)	1.0
5. สารเติมแต่ง - พงเถ้าลอย - พงซิลิกาเกรดการค้ำ - พงเขม่าดำ	0, 10, 20, 30, 40 0, 10, 20, 30, 40 0, 20, 40, 60, 80, 100
6. พอลิเอทิลีน ไกลคอล	5% ของน้ำหนักซิลิกาเกรดการค้ำ
7. Mercaptobenzothiazole (MBT)	1.0
8. กำมะถัน	1.5

4.2.1 การตรวจสอบหาเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR

การตรวจสอบเวลาในการสุกตัวของยางผสมที่มีพงเถ้าลอย และพงซิลิกาเกรดการค้ำ และพงเขม่าดำ ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) จากบริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 ใช้ในการทดสอบหาเวลาในการสุกของยางที่ 90% (t_{c90}) ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 ที่อุณหภูมิทดสอบ 160°C ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้ำที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเติมสารเติมแต่งในยางผสม ทำให้เวลาในการสุกตัวของยางไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งโดยปกติการเติมซิลิกาเกรดการค้าในยาง จะใช้เวลาในการสุกยางที่ใช้เวลามาก แต่สูตรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีการเติม PEG ที่ช่วยทำให้เวลาในการสุกตัวของยางลดลง เนื่องจาก โครงสร้างเคมีของ PEG มี Ether linkage ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ Silanols ที่ผิวของซิลิกาเป็น PEG barrier ขึ้น จึงทำให้ลดการดูดซับ Curative ที่ผิวของซิลิกาได้ [42] ส่วนการเติมปริมาณผงเถ้าลอยที่ทำให้เวลาในการสุกตัวไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ (ส่วนประกอบของเถ้าลอยใน ตารางที่ 4.1) ที่เป็นส่วนหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาคัลคาไนชันในยางได้เร็วขึ้น [43] ส่วนการเติมผงเขม่าดำในยางผสมเวลาในการสุกตัวของยางไม่เพิ่มขึ้น

4.2.2 การตรวจสอบค่าความหนืดมูนี ของยางผสม NR/SBR

การตรวจสอบสมบัติการไหล โดยวิธีหาค่าความหนืดมูนี (Mooney viscosity) ของยางผสมที่มีผงเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ในงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบยางธรรมชาติที่มีค่าความหนืดมูนี (ML 1+4 100°C) เท่ากับ 72 และยางเอสปีอาร์ที่มีค่าความหนืดมูนี (ML 1+4 100°C) เท่ากับ 46

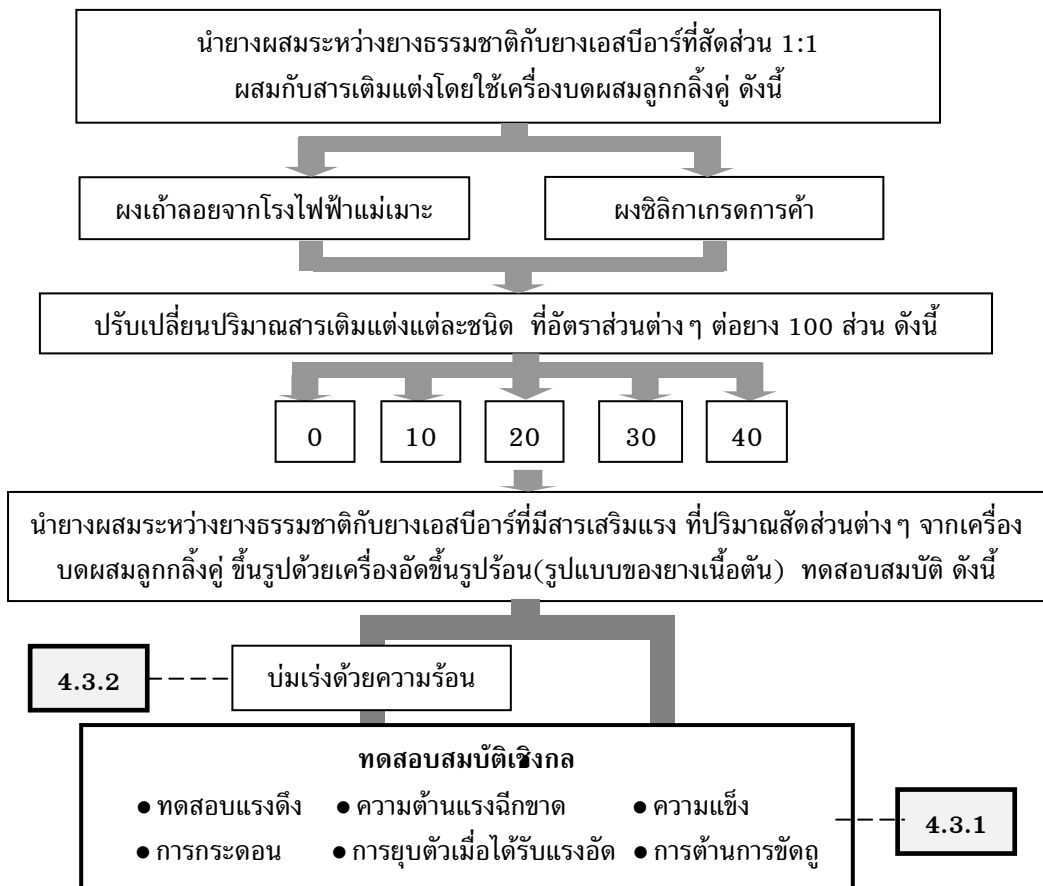
ทดสอบความหนืดยางคอมปาวด์ด้วยเครื่อง Mooney viscometer ยี่ห้อ Gibitre รุ่น Mooney Check ใช้ในการทดสอบหาค่าความหนืดของยาง โดยใช้สภาวะการทดสอบที่ความเร็วรอบการหมุน 2 ± 0.02 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิทดสอบที่ 100°C ในการทดสอบยางจะได้รับความร้อน 1 นาที ก่อนเริ่มหมุนจานโลหะ และทำการอ่านค่าความหนืดมูนี เมื่อจานโลหะหมุนไป 4 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1646-00 ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนืดมูนีของ NR, SBR และยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง	ความหนืดมูนี [ML(1+4) 100°C]									
	NR	SBR	ยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วน 1:1							
			ที่เติมสารเติมแต่ง ที่ปริมาณต่างๆ (phr)							
			0	10	20	30	40	60	80	100
ไม่มีสารเติมแต่ง	7.1	23.8	19.1	-	-	-	-	-	-	-
ผงถ่านลอย	-	-		18.8	21.2	29.5	28.8	-	-	-
ผงซิลิกา	-	-		18	23.6	39.3	-	-	-	-
ผงเขม่าดำ	-	-		-	18.6	-	26.7	39.5	62.7	84.3

การตรวจสอบความหนืดมูนี ของ NR, SBR และยางผสม NR/SBR ที่ทำการ Masticate กับสารเติมแต่ง พบว่าความหนืดมูนีของยาง NR และ SBR มีความหนืดไม่สูงมาก และไม่เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการผสมหรือการนำไปขึ้นรูป ความหนืดของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งต่ำกว่ายางเอสปีอาร์ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และยางผสม NR/SBR ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งความหนืดอยู่ระหว่างความหนืดของยางทั้งสองชนิด เมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำในยางผสม ความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเติมแต่งเข้าไปขัดขวางการไหลตัวของยางผสม ความหนืดมูนีของยางผสมที่เติมผงถ่านลอย ต่ำกว่าซิลิกาเกรดการค้ำ ทั้งนี้เนื่องจาก ในการบดผสมยางผงถ่านลอยมีการแตกย่อยของอนุภาคที่มีขนาดเล็กถึง $43\mu\text{m}$ และผงถ่านลอยมีลักษณะที่กลม อีกทั้งส่วนที่แตกออกมาไม่ได้ถูกปรับปรุงผิวทำให้การยึดเกาะกับเฟสของยางผสมได้ไม่ดี ส่งผลต่อการไหลตัวของยางผสมง่ายกว่าซิลิกาเกรดการค้ำ ส่วนความหนืดมูนีของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ พบว่าความหนืดมูนีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเฟสของยางมีการดูดซับที่ผิวของผงเขม่าดำได้ในปริมาณที่มาก จึงทำให้ไปต้านการไหลของยางผสม ส่งผลให้ยางผสมไหลตัวได้ยากขึ้น

4.2 การเติมสารเติมแต่งเถ้าลอยและผงซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม และการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน



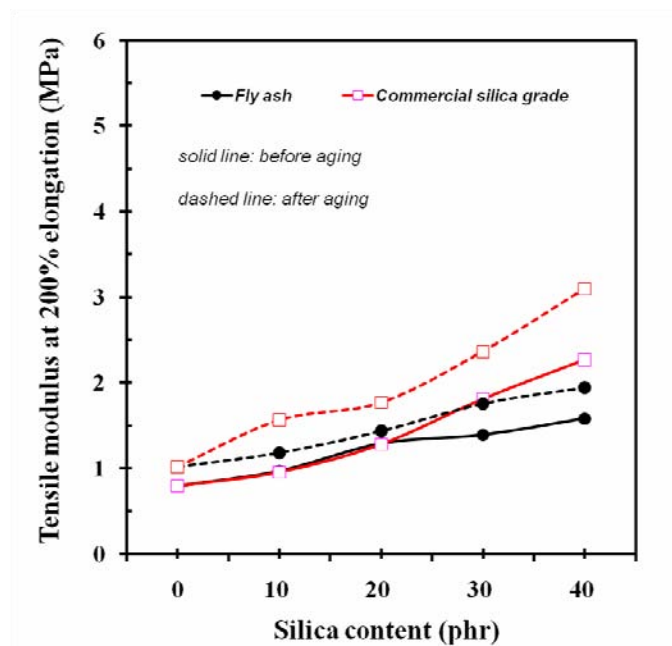
รูปที่ 4.10 แผนการดำเนินงานในส่วนการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง

4.3.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเกรดการค้า และการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน (งานหมายเลข 4.3.1 และ 4.3.2)

ความสัมพันธ์ของค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.11 เห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณผงเถ้าลอยและผงซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม มอดูลัสที่การยืดตัว 200% ของยาง

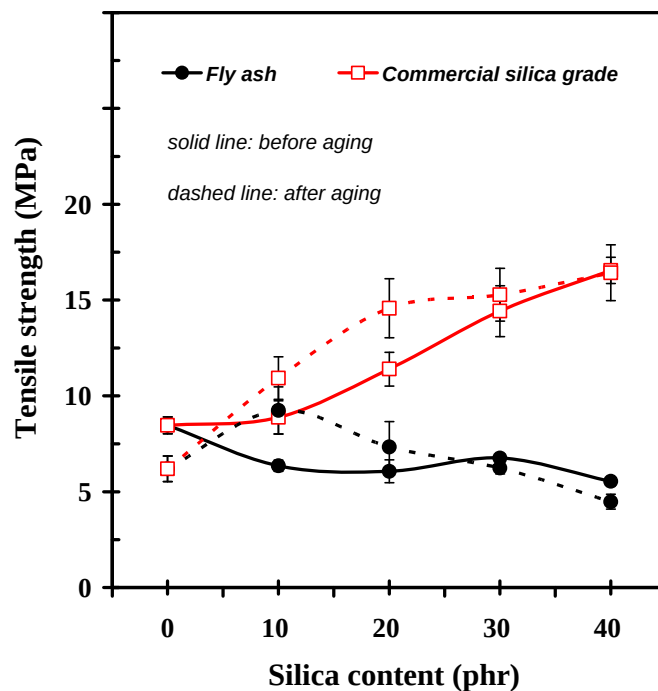
ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของผงเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า เป็นวัสดุที่มีความแข็งเกร็งสูง (Rigidity) และยังพบว่าเมื่อเติมปริมาณผงซิลิกาในยางผสมมากกว่า 20 phr มอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีค่าสูงกว่าการเติมผงเถ้าลอย

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะยางผสมที่การเติมผงซิลิกา เนื่องจาก Curative ที่เหลืออยู่จากการอบสุกของยางที่ 90% (t_{c90}) ทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางผสมเพิ่มขึ้นหลังจากการที่อบสุกมากกว่า 90% ตามที่วัดได้จากเครื่อง ODR



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่าการเติมผงเถ้าลอยในยางผสม NR/SBR มีค่าความต้านแรงดึงที่ต่ำกว่าผงซิลิกาเกรดการค้าและเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นความต้านทานแรงดึงของยางผสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่การเพิ่มปริมาณของผงซิลิกาความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

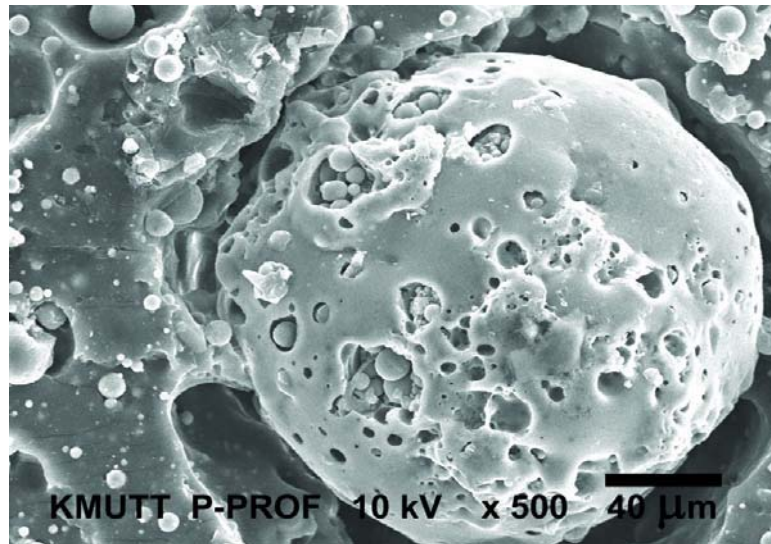
ทั้งนี้พิจารณาได้จากประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. พงเถ้าลอยมีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมได้น้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า เนื่องจาก ที่ผิวพองเถ้าลอยมีหมู่ Hydroxy(-OH) ที่น้อยกว่า พงเถ้าลอยจึงมีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมแบบ rubber filler interaction ที่น้อยกว่าพองซิลิกา [44-45]
2. อนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบ Couplink 89C แล้ว ในขณะการบดผสมอาจเกิดการแตกย่อยของอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งมีอนุภาคนาขนาดเล็กอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งอนุภาคของเถ้าลอยขนาดเล็กที่แตกย่อยออกมานี้ เป็นส่วนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน จึงทำให้มีการยึดเกาะแบบ Rubber filler interaction ที่ลดลง [44]
3. เถ้าลอยมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่นอกเหนือจากสารประกอบซิลิกา เช่น กลุ่มของโลหะออกไซด์ ที่อาจส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมขวางของยางผสม

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนยางผสม ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อพันธะเชื่อมขวางในยางได้ 2 กรณี คือ

1. ยางผสมเกิดการเชื่อมโยงพันธะเชื่อมขวางมากขึ้นจากปริมาณของกำมะถันในยางที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง

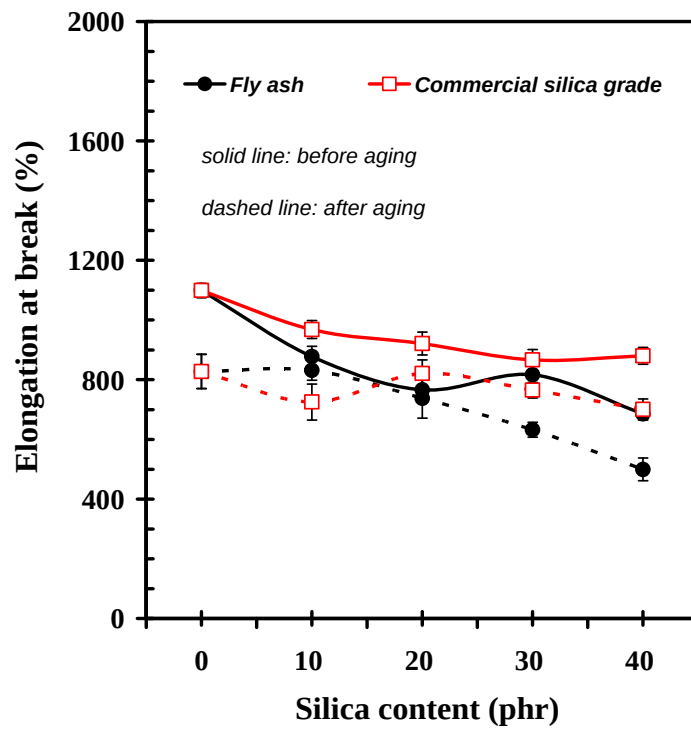
2. โดยปกติยางผสมในสูตร Conventional Vulcanization มีพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิก (Poly sulfidic crosslinks) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นแบบโมโนซัลฟิดิก หรือไดซัลฟิดิกที่สั้นลง หลายๆ พันธะ [18] ทำให้โมเลกุลของยางชิดกันมากขึ้นเนื่องจากถูกยึดด้วยพันธะที่สั้นลง ส่งผลให้ยางผสมมีความแข็ง และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น



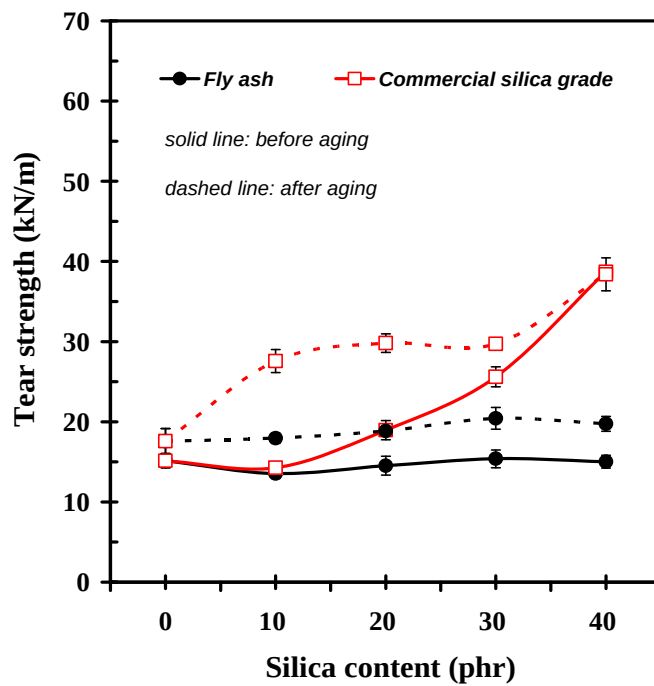
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายอนุภาคผงเถ้าลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคนาขนาดเล็กอยู่ภายใน โดยใช้เทคนิค SEM (กำลังขยาย 500 เท่า)

ความสัมพันธ์ของการยึดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.14 เห็นได้ว่าการเติมผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม มีค่าการยึดตัวที่จุดขาดไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อผงเถ้าลอย ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น การยึดตัวที่จุดขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลงมากกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีหมู่ (-OH) ที่พว้นน้อยกว่าผงซิลิกาทำให้เถ้าลอยมีการยึดเกาะแบบ rubber filler interaction ต่ำ ส่งผลทำให้ยางผสมมีการยึดตัวได้น้อยกว่า

ส่วนหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม การยึดตัวที่จุดขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางผสมเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มขึ้นหลังการสุก ทำให้มีพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ยางผสมมีการยึดลดลง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ค่าการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

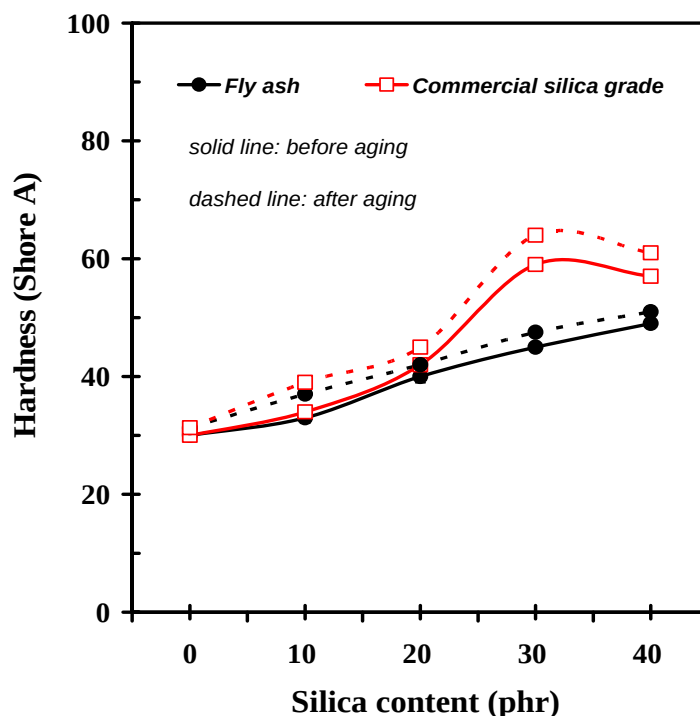


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ เห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณซิลิกาเกรดการค้าในยางผสมที่ปริมาณมากกว่า 10 phr ความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องเช่นเดียวกันกับความต้านแรงดึงของยางผสมดังที่กล่าวมาแล้วในรูปที่ 4.12 ในขณะที่ปริมาณของผงเถ้าลอยในยางผสมไม่ส่งผลต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางผสม

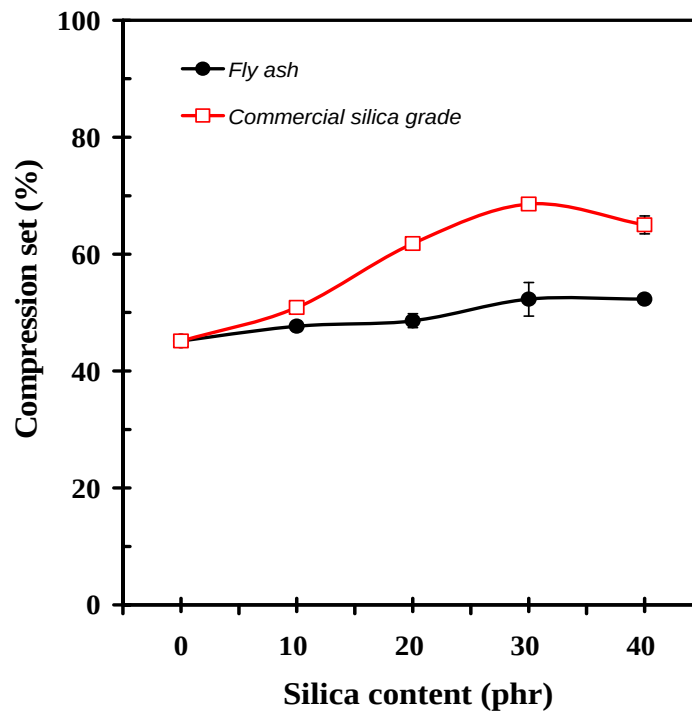
ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางผสมเพิ่มขึ้นหลังการอบสุก

ความสัมพันธ์ของความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.16 เห็นได้ว่า ความแข็งของยางผสมโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคของผงซิลิกา และผงเถ้าลอย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง (Rigidity) ส่งผลให้ยางผสมมีความแข็งโดยรวมที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ของยางผสมที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

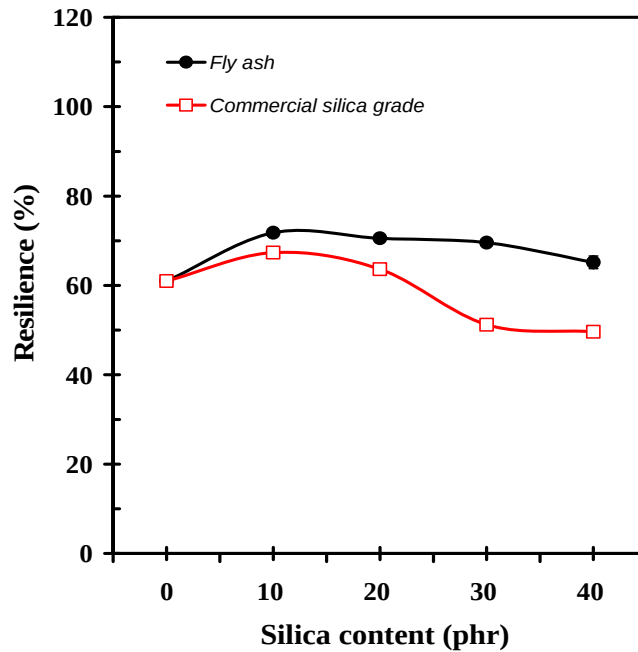


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดและการกระดอนของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนซิลิกาต่างๆ เมื่อเติมเถ้าลอยในยางผสม พบว่า เปอร์เซ็นต์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดลดลง (มีค่าการกลับคืนตัวมากขึ้น) และเปอร์เซ็นต์การกระดอนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นอีลาสติกที่มากกว่า เมื่อเทียบกับการเติมซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าผงซิลิกา การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางเกิดได้น้อยกว่าผงซิลิกาที่มีขนาดเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวที่รับแรงได้โดยรวมมากกว่า และเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การกระดอนลดลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณเนื้อยางที่เป็น matrix ลดลง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนซิลิกาต่างๆ



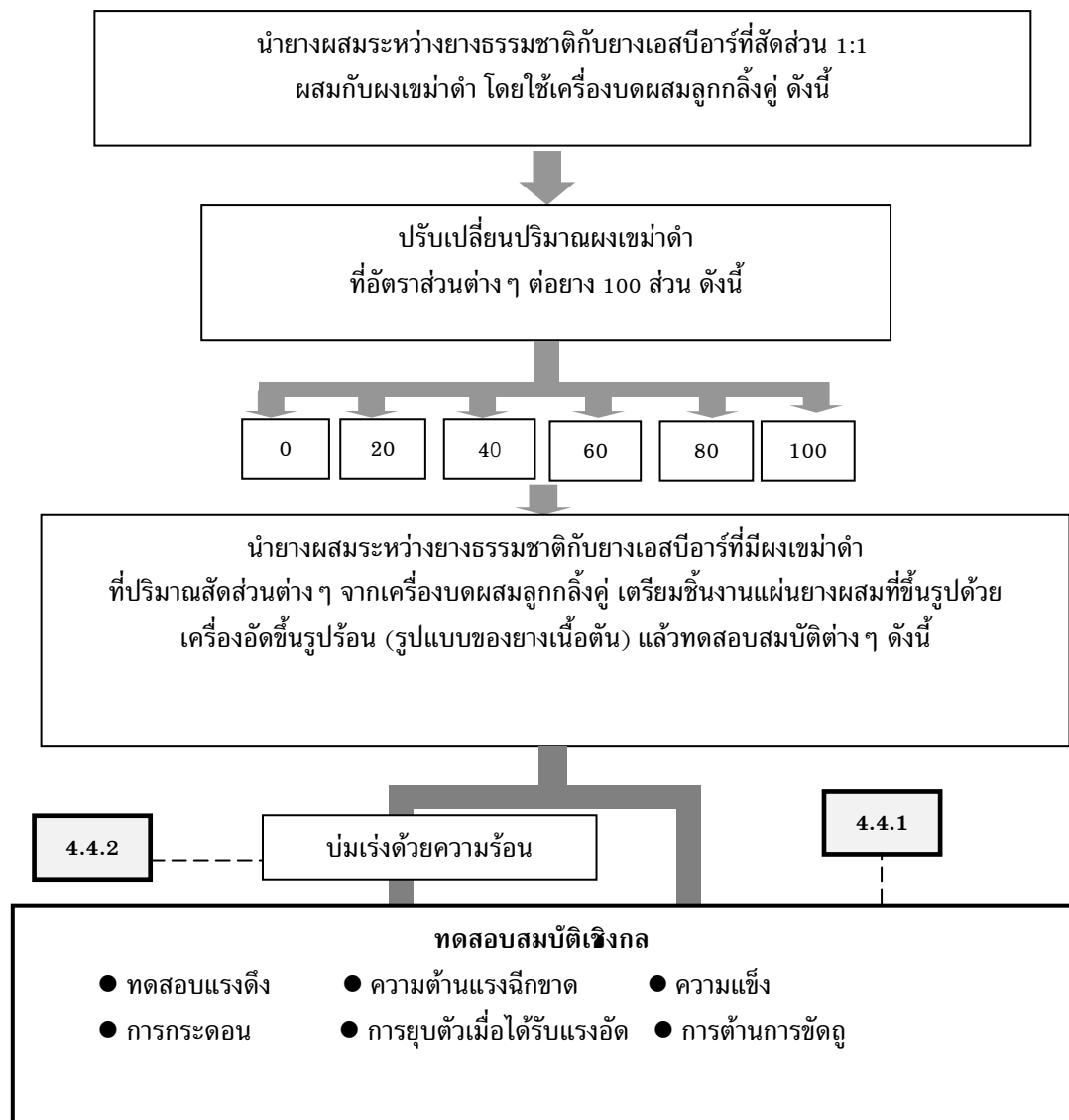
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนของซิลิกาต่างๆ

ส่วนการขจัดของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้าดังแสดงใน **ตารางที่ 4.4** ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ยางผสม NR/SBR ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง มีค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุที่มาก แต่เมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งผงเถ้าลอย และผงซิลิกา การสูญเสียเนื้อวัสดุโดยรวมมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากการยึดเกาะกับเฟสยางได้ดี และยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากเฟสของสารเติมแต่งจึงช่วยด้านการขจัด

ตารางที่ 4.4 การสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอยและผงซิลิกาเกรดการค้าปริมาณต่างๆ

ชนิดสารเติมแต่ง	การสูญเสียของเนื้อวัสดุ (mm ³)				
	ยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง ที่ปริมาณต่างๆ (phr)				
	0	10	20	30	40
ผงเถ้าลอย	136	116	112	91	92
ผงซิลิกาเกรดการค้า	136	29	29	16	10

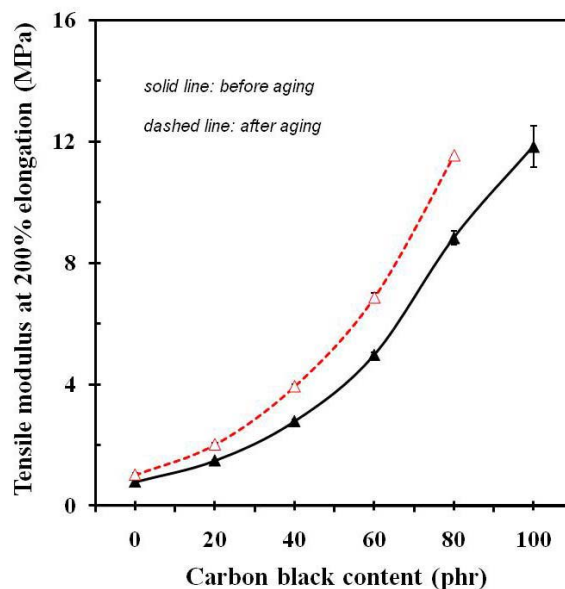
4.4 การเติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR และการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน



รูปที่ 4.19 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง

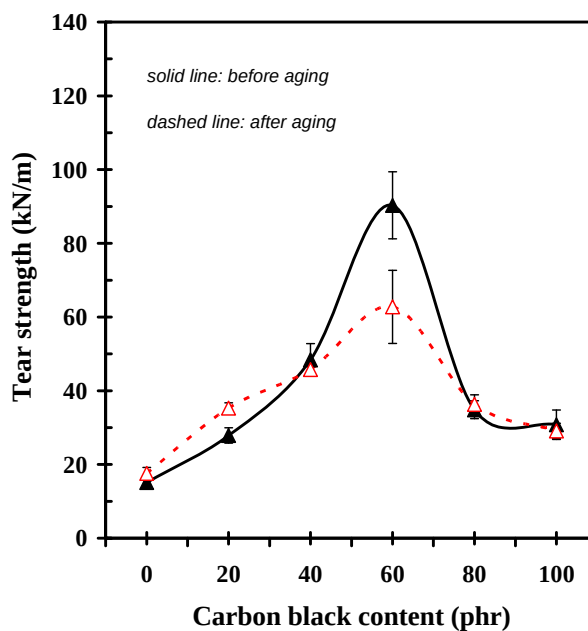
4.4.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำ และการบ่มเร่ง สถานะด้วยความร้อน (งานหมายเลข 4.4.1 และ 4.4.2)

ความสัมพันธ์ของมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า มอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผงเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความแข็งเกร็งสูง (Rigidity) จึงส่งผลทำให้ยางผสมมีค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% สูงขึ้นด้วย ส่วนหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางผสม ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนผลการทดลองรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน ของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ พบว่าความต้านแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมปริมาณผงเขม่าดำ ในช่วง 0-40 phr เนื่องจาก ผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงในยางได้ดีมีกลไกการเสริมแรงโดยที่ผิวอนุภาคของผงเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิด interaction กับโมเลกุลของยางได้ [44] และเฟสผงเขม่าดำที่แข็งแรงมีการยึดเกาะเฟสของยางที่ดี แต่เมื่อปริมาณผงเขม่าดำเพิ่มขึ้น ในช่วง 60-100 phr ความต้านแรงดึงกลับมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจาก ผงเขม่าดำที่มีปริมาณมากเกินไป ทำให้ปริมาณเนื้อของยางผสมที่เป็นเมทริกซ์เฟสลดลง ส่งผลต่อความต้านแรงดึงของยางผสมลดลงด้วย ส่วนหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าความต้านแรงดึงโดยรวมไม่มีการเปลี่ยนแปลง



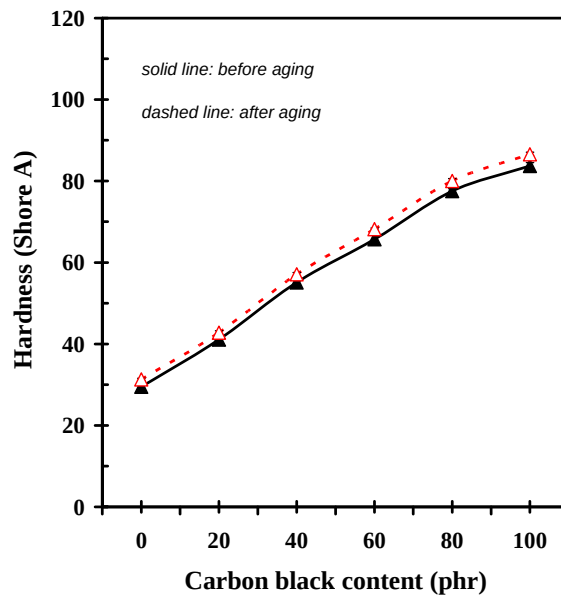
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อเติมปริมาณผงเขม่าดำในยางผสม ที่ปริมาณตั้งแต่ 10-60 phr ความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผงเขม่าดำ ที่มีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมได้ดีคล้ายกับผลของความต้านแรงดึง แต่เมื่อปริมาณผงเขม่าดำเพิ่มขึ้น ในช่วง 80-100 phr ความต้านแรงฉีกขาดกลับมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากผงเขม่าดำที่มีปริมาณมากเกินไป ทำให้ปริมาณเนื้อของยางผสมที่เป็นเมทริกซ์เฟสลดลง ทำให้มี Rubber filler interaction ลดลง ส่งผลต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางผสมลดลงด้วย สอดคล้องกับสมบัติความต้านแรงดึงที่ลดลง ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ความต้านแรงฉีกขาดมีค่าลดลง ที่ปริมาณผงเขม่าดำ 60 phr ส่วนที่ปริมาณผงเขม่าดำที่สัดส่วนอื่นๆ ความต้านแรงฉีกขาดโดยรวม ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



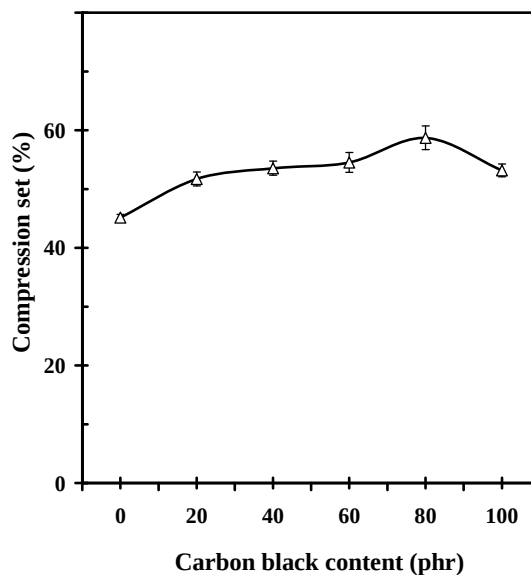
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าความแข็งแรงของยางผสมโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของผงเขม่าดำที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคผงเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง (Rigidity) และผงเขม่าดำมีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมที่ดี สอดคล้องกับค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200%ที่เพิ่มขึ้น ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมความแข็งแรงโดยรวมเพิ่มขึ้น

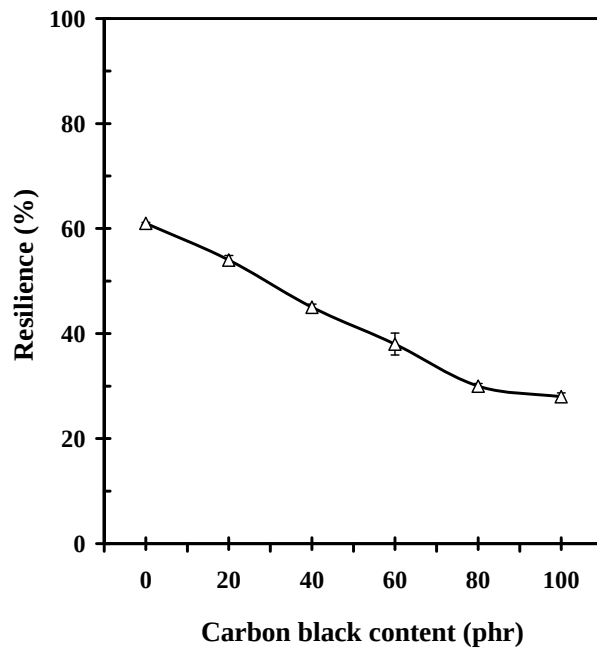


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

ความสัมพันธ์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดและการกระดอนของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่า มีค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดเพิ่มขึ้น และค่าการกระดอนลดลง เนื่องจาก ปริมาณที่ลดลงของเนื้อยางซึ่งเนื้อยางแสดงถึงเฟสที่มีสมบัติความเป็นอีลาสติคของยาง ส่งผลทำให้ยางผสมมีการกระดอนที่ลดลง



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ

ส่วนผลการสูญเสียเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งได้แสดงค่าการสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำ ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ยางผสม NR/SBR ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง มีค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุที่มาก แต่เมื่อเติมปริมาณเติมผงเขม่าดำเพิ่มขึ้น ค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุโดยรวมมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากการยึดเกาะกับเฟสยางได้ดี และการเติมผงเขม่าดำเป็นการเพิ่มความแข็งแรงกับยาง ส่งผลทำให้ยางมีการต้านการขาดุดได้ดีขึ้นมีการสูญเสียเนื้อวัสดุลดลง

ตารางที่ 4.5 การสูญเสียเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำปริมาณต่างๆ

สารเติมแต่ง	การสูญเสียของเนื้อวัสดุ (mm ³)					
	ยางผสม NR/SBR					
	ที่เติมสารเติมแต่ง ที่ปริมาณต่างๆ (phr)					
	0	20	40	60	80	100
ผงเขม่าดำ	136	58	40	29	37	36

4.5 การเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง เอสปีอาร์ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ

4.5.1 การเลือกปริมาณของสารเติมแต่งในยางผสม ที่ใช้ในการศึกษาอย่างผสมรูปแบบยาง ฟองน้ำ

การเลือกสัดส่วนของยางผสม NR/SBR โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณของสารเติมแต่งแต่ละชนิด
แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.6 – 4.8

การเปรียบเทียบสมบัติที่ได้ทดสอบของยางผสมที่เติมถั่วลันเตาในปริมาณต่างๆ ดังตารางที่ 4.6 ได้เลือก
ปริมาณผงถั่วลันเตาที่เติมลงในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 40 phr โดยพิจารณาการเพิ่มสมบัติเชิงกล
ที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติมที่ปริมาณต่างๆ

การเปรียบเทียบสมบัติที่ได้ทดสอบของยางผสมที่เติมซิลิกาเกรดการค้าในปริมาณต่างๆ ใน ตารางที่
4.7 ได้เลือกปริมาณซิลิกาเกรดการค้าที่เติมลงในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 40 phr โดยพิจารณา
การเพิ่มสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติมที่ปริมาณต่างๆ

เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบสมบัติที่ได้ทดสอบของยางผสมที่เติมผงเขม่าดำในปริมาณต่างๆ ใน
ตารางที่ 4.8 ได้เลือกปริมาณผงเขม่าดำที่เติมลงในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 40 phr โดยพิจารณา
การเพิ่มสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติมที่ปริมาณต่างๆ

โดยเลือกยางผสมที่เติมสารเติมแต่งชนิดและปริมาณดังกล่าว นำไปศึกษาสมบัติในรูปแบบยางฟองน้ำ
ต่อไป

ตารางที่ 4.6 สมบัติโดยสรุปของยางผสม NR/SBR รูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง) ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ปริมาณต่างๆ

สมบัติของยางผสม	ปริมาณผงถ่านลอย (phr)				
	0	10	20	30	40
เวลาในการสุกตัว ที่อุณหภูมิ 160 °C (min : sec)	9 : 3	11 : 0	10 : 1	10 : 0	10 : 3
ความหนืดมูนิ [ML(1+4)100°C]	19	19	21	30	29
สมบัติเชิงกล					
มอดุลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	0.8 ± 0	1.0 ± 0	1.3 ± 0	1.4 ± 0	1.6 ± 0
ความต้านแรงดึง (MPa)	8 ± 0	6 ± 0	6 ± 1	7 ± 0	6 ± 0
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	1099 ± 23	878 ± 34	766 ± 37	816 ± 16	686 ± 18
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	15 ± 1	14 ± 1	15 ± 1	15 ± 1	15 ± 1
ความแข็ง (Shore A)	30 ± 0	33 ± 0	40 ± 0	45 ± 0	49 ± 0
การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (%)	45 ± 1	48 ± 1	49 ± 1	52 ± 3	52 ± 1
การกระดอน (%)	61 ± 0	72 ± 1	71 ± 0	70 ± 0	65 ± 1
การสูญเสียเนื้อวัสดุ (mm ³)	136	116	112	91	92
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน (%)					
มอดุลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	+25	+20	+8	+29	+25
ความต้านแรงดึง (MPa)	-25	+50	+16	-14	-16
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	-24	-5	-4	-23	-27
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	+13	+29	+27	+33	+33
ความแข็ง (Shore A)	+3	+12	+5	+7	+4

หมายเหตุ (+) : ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรงสภาวะ

(-) : ค่าที่ลดลงหลังการบ่มแรงสภาวะ

ตารางที่ 4.7 สมบัติโดยสรุปของยางผสม NR/SBR รูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง) ที่เติมสารเติมแต่งฟงซิลิกาเกรดการค้าปริมาณต่างๆ

สมบัติของยางผสม	ปริมาณซิลิกาเกรดการค้า (phr)				
	0	10	20	30	40
เวลาในการสุกตัวที่อุณหภูมิ 160 °C (min : sec)	9 : 3	9 : 2	7 : 6	8 : 3	11 : 2
ความหนืดมูนี [ML(1+4)100°C]	19	18	24	39	-
สมบัติเชิงกล					
มอดุลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	0.8 ± 0	1.0 ± 0	1.3 ± 0	1.8 ± 0	2.3 ± 0
ความต้านแรงดึง (MPa)	8 ± 0	9 ± 1	11 ± 1	14 ± 1	17 ± 1
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	1099 ± 23	968 ± 30	921 ± 38	866 ± 35	880 ± 28
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	15 ± 1	14 ± 1	19 ± 1	26 ± 1	39 ± 0
ความแข็ง (Shore A)	30 ± 0	34 ± 0	42 ± 0	59 ± 0	57 ± 0
การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (%)	45 ± 1	51 ± 1	62 ± 1	69 ± 0	65 ± 2
การกระดอน (%)	61 ± 0	67 ± 0	64 ± 1	51 ± 1	50 ± 2
การสูญเสียเนื้อวัสดุ (mm ³)	136	29	29	16	10
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน (%)					
มอดุลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	+25	+60	+38	+21	+35
ความต้านแรงดึง (MPa)	-25	+22	+27	+7	0
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	-24	-25	-11	-11	-20
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	+13	+92	+57	+15	0
ความแข็ง (Shore A)	+3	+15	+7	+8	+7

หมายเหตุ (+) : ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรงสภาวะ

(-) : ค่าที่ลดลงหลังการบ่มแรงสภาวะ

ตารางที่ 4.8 สมบัติโดยสรุปของยางผสม NR/SBR รูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง) ที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำปริมาณต่างๆ

สมบัติของยางผสม	ปริมาณผงเขม่าดำ (phr)					
	0	20	40	60	80	100
เวลาในการสุกตัวที่อุณหภูมิ 160 °C (min : sec)	9 : 3	12 : 0	11 : 2	10 : 1	9 : 3	9 : 5
ความหนืดมูนิ [ML(1+4)100°C]	19	19	27	40	63	84
สมบัติเชิงกล						
มอดุลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	0.8 ± 0	1.5 ± 0	2.8 ± 1	5.0 ± 1	8.8 ± 1	11.8 ± 0
ความต้านแรงดึง (MPa)	8 ± 0	17 ± 2	19 ± 1	18 ± 1	17 ± 1	13 ± 0
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	1099 ± 23	984 ± 19	769 ± 12	550 ± 14	362 ± 13	220 ± 9
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	15 ± 0	28 ± 0	48 ± 0	90 ± 0	35 ± 0	31 ± 0
ความแข็ง (Shore A)	30 ± 0	41 ± 0	55 ± 0	66 ± 0	78 ± 0	84 ± 0
การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (%)	45 ± 1	52 ± 1	54 ± 1	55 ± 2	59 ± 2	53 ± 1
การกระดอน (%)	61 ± 0	54 ± 1	45 ± 1	38 ± 2	30 ± 1	28 ± 1
การสูญเสียเนื้อวัสดุ (mm ³)	136	58	40	29	37	36
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน (%)						
มอดุลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	+25	+29	+58	+105	+158	N/A
ความต้านแรงดึง (MPa)	-25	-6	+5	0	-12	-8
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	-24	-21	-15	-19	-28	-30
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	+13	+25	-6	-31	+3	-6
ความแข็ง (Shore A)	+3	+5	+4	+5	+4	+4

หมายเหตุ N/A : ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากชิ้นงานมีการยืดตัวไม่ถึง 200%

(+) : ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรงสภาวะ

(-) : ค่าที่ลดลงหลังการบ่มแรงสภาวะ

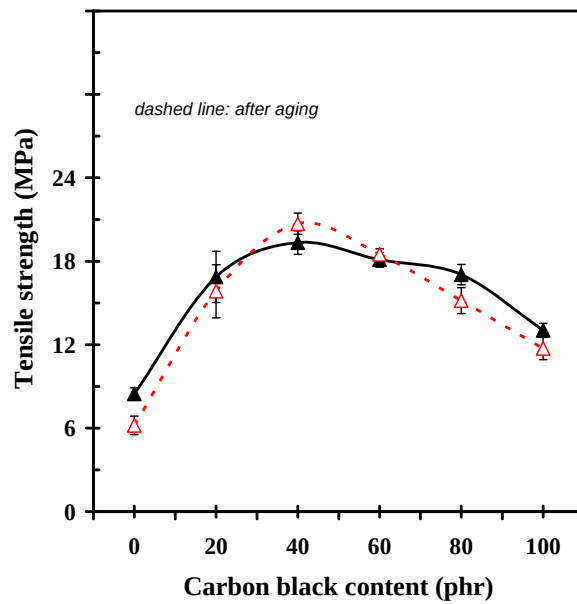
ซึ่งสามารถสรุปเลือกสูตรยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วน 1:1 ที่เติมชนิดของสารเติมแต่งที่สัดส่วนต่างๆ ที่ปริมาณ 40 phr ที่นำไปศึกษาต่อถึงผลของชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองในยางผสม เพื่อให้บรรลุถึงเป้าหมายที่วางไว้ สามารถสรุปสมบัติของยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดของสารเติมแต่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมบัติของยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดสารเติมแต่งที่ปริมาณ 40 phr ที่ได้เลือกนำไปศึกษาในรูปแบบยางฟองน้ำ

สมบัติของยางผสม	ชนิดสารเติมแต่งและปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสม (phr)		
	ผงถ่านลอย	ผงซิลิกา	ผงเขม่าดำ
สมบัติการไหลและการสุกตัว			
ความหนืดมูนิ [ML(1+4)100°C]	29	-	27
เวลาในการสุกตัวที่อุณหภูมิ 160°C (min)	10	11	11
สมบัติเชิงกล			
มอดูลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	1.6	2.3	2.8
ความต้านแรงดึง (MPa)	6	17	19
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	686	880	769
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	15	39	48
ความแข็ง (Shore A)	49	57	55
การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (%)	52	65	54
การกระดอน (%)	65	50	45
การสูญเสียเนื้อวัสดุ (mm ³)	92	10	40
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน (%)			
มอดูลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	+25	+35	+58
ความต้านแรงดึง (MPa)	-16	0	+5
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	-27	-20	-15
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	+33	0	-6
ความแข็ง (Shore A)	+4	+7	+4

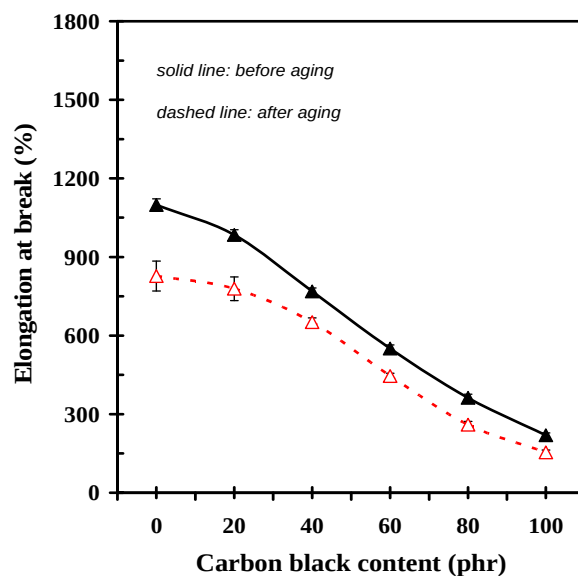
(+): ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรงสภาวะ

(-): ค่าที่ลดลงหลังการบ่มแรงสภาวะ



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

ความสัมพันธ์ของการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.22 จากรูปเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณผงเขม่าดำเพิ่มขึ้น ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเนื้อยางผสมที่เป็นเมทริกซ์เฟสลดลง จึงส่งผลทำให้ยางผสมมีการยืดตัวลดลง ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางผสมเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มมากขึ้น

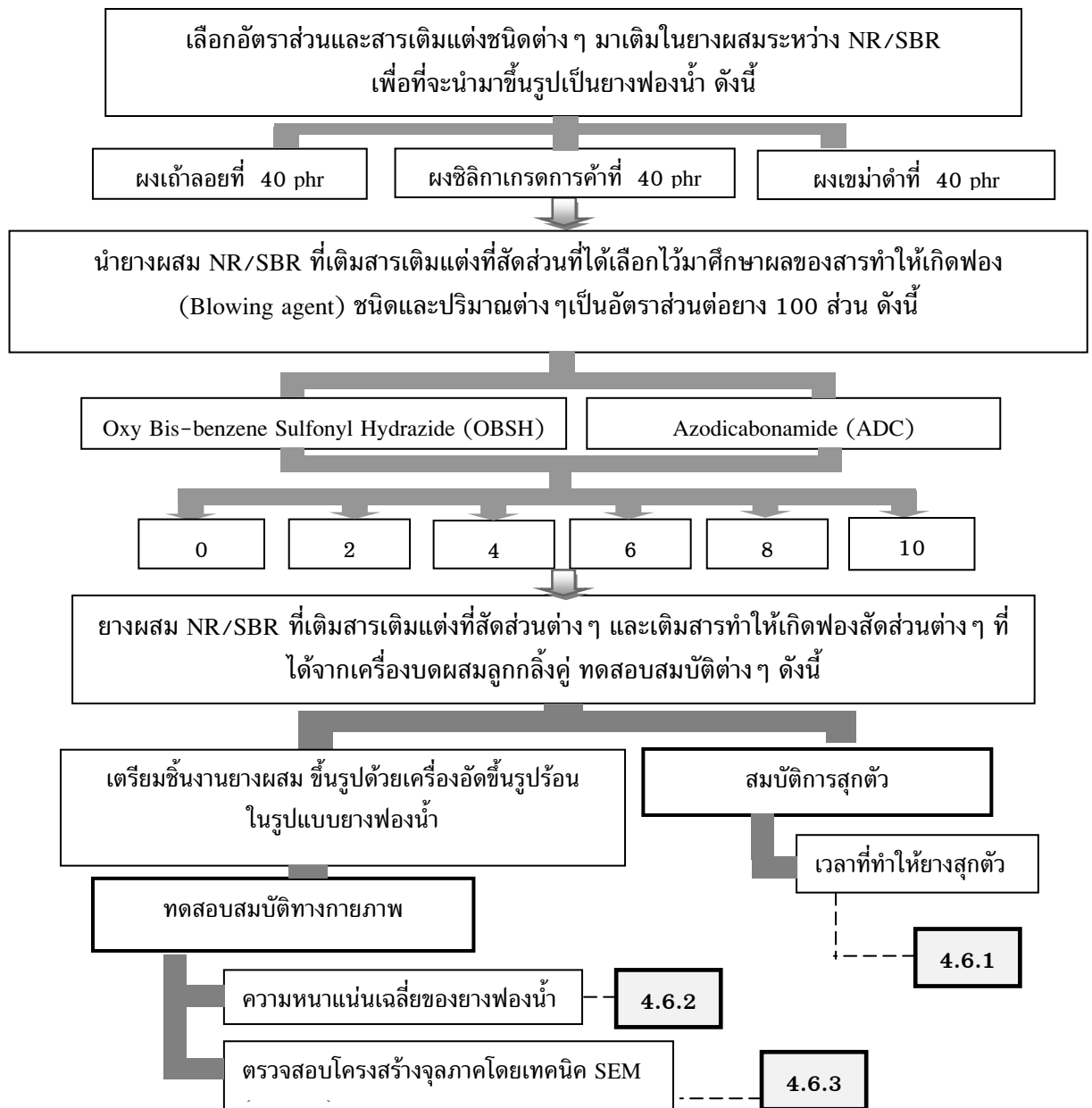


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

4.5.2 บทสรุปงานวิจัยส่วนของยางผสม NR/SBR ในรูปแบบยางเนื้อตัน (ที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง)

1. การเติมผงเถ้าลอยในยางผสม NR/SBR ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนิ และทำให้ค่าความหนืดมูนิต่ำกว่ายางผสมที่มีผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ
2. การเติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการการค้า และผงเขม่าดำ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาในการสุกตัวของยาง
3. สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางผสม NR/SBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำ ผงซิลิกาเกรดการการค้า และผงเถ้าลอย โดยละเอียด ดังนี้
 - 3.1 การเติมผงเถ้าลอยในปริมาณ 30-40 phr ในยางผสม NR/SBR ให้สมบัติด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ความยวบตัวเมื่อได้รับแรงอัด การกระดอน และความแข็งแรงที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับการเติมผงเถ้าลอยที่ปริมาณอื่นๆ และได้ทำการเลือกปริมาณของผงเถ้าลอยที่ 40 phr เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของยางฟองน้ำต่อไป
 - 3.2 การเติมซิลิกาเกรดการการค้าในปริมาณ 30-40 phr ในยางผสม NR/SBR ให้สมบัติด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ความต้านแรงดึง และความแข็งแรงที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับการเติมซิลิกาเกรดการการค้าที่ปริมาณอื่นๆ และได้ทำการเลือกปริมาณของซิลิกาเกรดการการค้า 40 phr เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของยางฟองน้ำต่อไป
 - 3.3 การเติมผงเขม่าดำในปริมาณ 40-60 phr ในยางผสม NR/SBR ให้สมบัติด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด ความแข็งแรง และการต้านต่อการขาดที่ที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับการเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณอื่นๆ และได้ทำการเลือกปริมาณของผงเขม่าดำ 40 phr เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของยางฟองน้ำต่อไป
4. ยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอยมีการคืนกลับตัวตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดีกว่า และค่าการกระดอนที่มากกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการการค้าและผงเขม่าดำ
5. การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

4.6 การตรวจสอบสมบัติการสุกตัวและสมบัติทางกายภาพ ของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC



รูปที่ 4.27 แผนการดำเนินงานในส่วนการตรวจสอบสมบัติการสุกตัว และสมบัติทางกายภาพของ ยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC

การเตรียมยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ และการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC โดยใช้สูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ส่วนประกอบของยางผสมที่ทดลองขึ้นรูปในรูปแบบยางฟองน้ำ

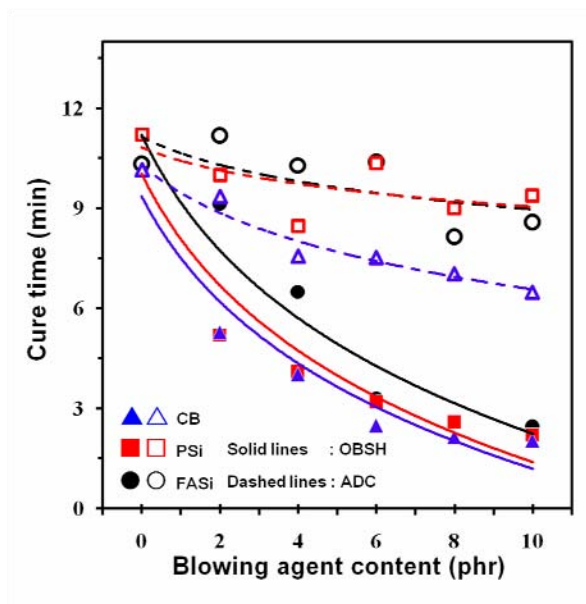
สารเคมี	
1. ยางธรรมชาติ STR 20 และ ยางเอสบีอาร์ SBR 1712	100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.0
3. กรดสเตียริก	3.0
4. Butylated hydroxytoluene (BHT)	1.0
5. สารเติมแต่ง - ผงเถ้าลอย หรือ - ผงซิลิกาเกรดการค้า หรือ - ผงเขม่าดำ	40
6. พอลิเอทิลีน ไกลคอล (PEG)	5% ของน้ำหนักซิลิกา
7. Mercaptobenzothiazole (MBT)	1.0
8. สารทำให้เกิดฟอง - Oxybis(benzene sulfonyl hydrazide) (OBSH) - Azo dicarbonamide (ADC)	0, 2, 4, 6, 8, 10 0, 2, 4, 6, 8, 10
9. กำมะถัน	1.5

4.6.1 การตรวจสอบสมบัติการสุกตัวของยางฟองน้ำ

ความสัมพันธ์ของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย (FA-Si) ผงซิลิกาเกรดการค้า (Commercial Silica, P-Si) และผงเขม่าดำ (Carbon black, CB) แสดงในรูปที่ 4.28 ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ลงในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา ผงเขม่าดำ เวลาในการสุกตัวของยางผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ทำให้ยางผสมมีเวลาสุกตัวที่ต่ำกว่า เนื่องจาก การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อยางซึ่งการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดเป็นแบบการคายความร้อน (Exothermic) [16, 47] ความร้อนในฟองนั้นความร้อนนี้ทำให้ช่วยเร่งให้ยางสุกเร็วขึ้น นอกจากนี้ในกลไกของการสลายตัวของ ADC สามารถใช้ Zinc oxide เป็น

ตัวกระตุ้นให้เกิดการสลายตัว [13] ซึ่งสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC อาจใช้ Zinc oxide ของระบบที่ทำหน้าที่หลักเป็นตัวกระตุ้นในกระบวนการวัลคาไนเซชันมากระตุ้นการทำให้สลายตัว ทำให้เวลาในสูกของยางใช้เวลา นานกว่า OBSH

และเมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของสารเติมแต่งต่อเวลาในการสูกตัว พบว่ายางผสมที่เติมผงเขม่าดำใช้เวลาในการสูกน้อยที่สุด อาจเนื่องมาจากสมบัติของผงเขม่าดำที่ค่อนข้างมีความเป็นเบส (มีค่า pH ประมาณ 7-8) และมีปริมาณของออกซิเจนที่ต่ำ ทำให้เร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันให้เกิดเร็วขึ้น [48-49]



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อเวลาในการสูกตัวของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ

4.6.2 การตรวจสอบความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำ

การตรวจสอบความหนาแน่นของยางฟองน้ำ NR/SBR ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D792-08 ด้วยวิธี Archimedes water replacement technique ตามตารางที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น เนื่องจาก ปริมาณฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง และให้ก๊าซซึ่งแทรกตัวอยู่ภายในยางทำให้ยางมีการขยายตัวใหญ่ขึ้นขณะที่น้ำหนักของยางยังเท่าเดิมส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางผสมมีค่าลดลง ความ

หนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยของยางผสมในระบบที่เดิม OBSH มีค่าน้อยกว่าระบบที่เดิมชนิด ADC ซึ่งอาจเป็นผลจาก การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิดที่แตกต่างกัน [14] โดยที่สาร ADC สลายตัวให้ก๊าซ 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่สาร OBSH สลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนเพียงชนิดเดียว ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าไนโตรเจนประมาณ 12 เท่า [14]

ตารางที่ 4.11 ผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ (ชิ้นงานทดสอบหนา 2 mm)

ปริมาณสาร ทำให้เกิดฟอง (phr)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์					
	OBSH			ADC		
	ผงถั่วลย	ผงซิลิกา	ผงเขม่าดำ	ผงถั่วลย	ผงซิลิกา	ผงเขม่าดำ
0	1.33	1.15	1.11	1.33	1.15	1.11
2	1.33	1.12	1.08	1.34	1.11	1.11
4	1.25	1.03	1.03	1.28	1.10	1.08
6	1.09	1.00	1.03	1.20	1.02	1.04
8	1.07	0.89	0.93	1.12	0.93	0.98
10	1.03	0.90	0.86	1.10	1.00	0.94

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางผสมที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เห็นได้ว่ายางผสมที่เติมผงถั่วลยมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคผงถั่วลยมี bulk density มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสารเติมแต่งทั้งสามชนิด [50] และมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีความหนาแน่นสูง จึงทำให้ยางผสมมีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากที่สุด ส่วนยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้า มีความหนาแน่นต่ำ อาจเนื่องจากมีเซลล์ฟองในยางผสมมากที่สุด

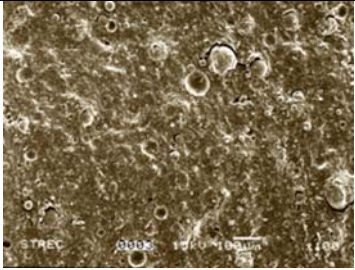
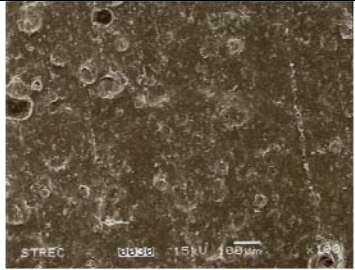
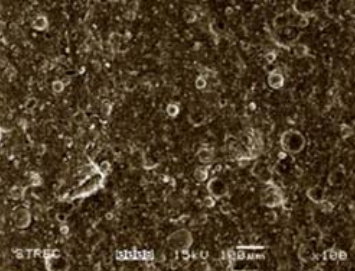
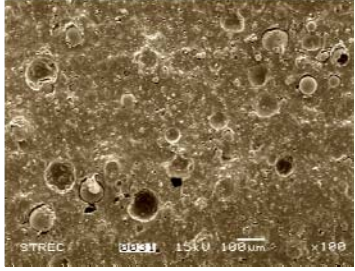
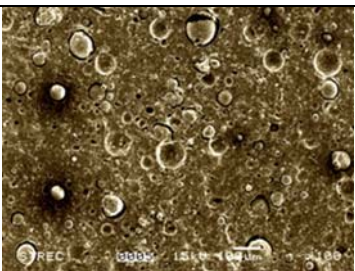
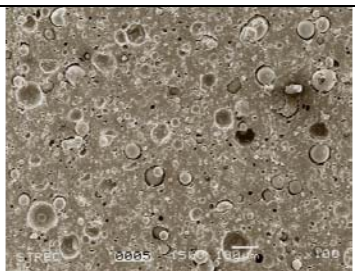
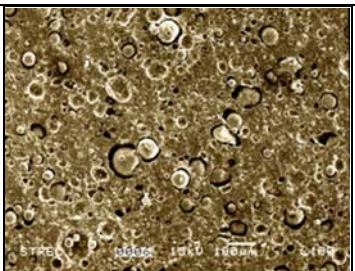
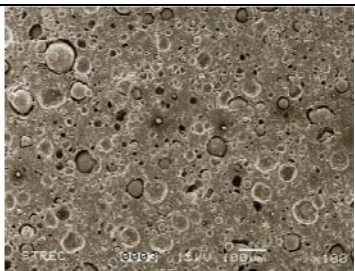
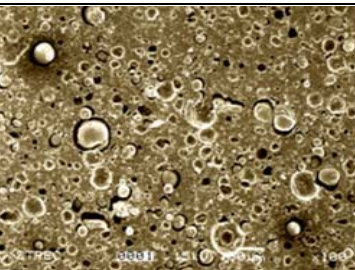
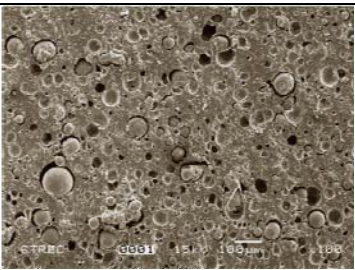
4.6.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหน้าตัดของยางผสมโดยด้วยเทคนิค SEM

การตรวจสอบพื้นผิวหน้าตัด (Razor cut surface) ของยางผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM-5800LV ที่ 15 kV Accelerating

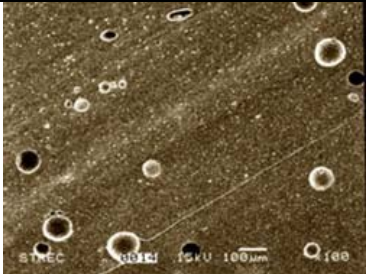
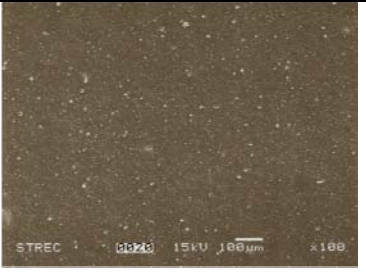
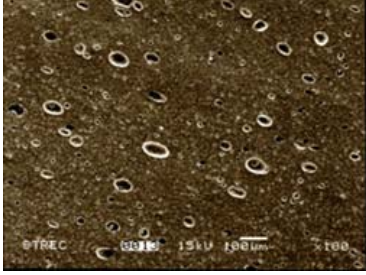
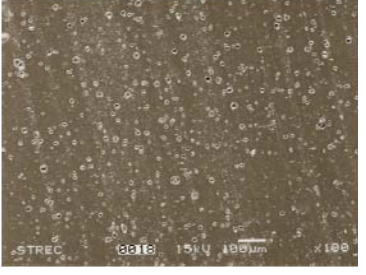
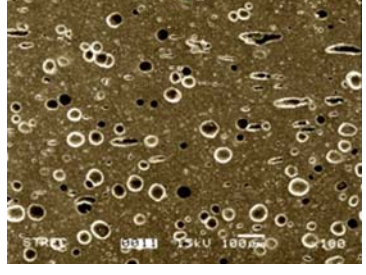
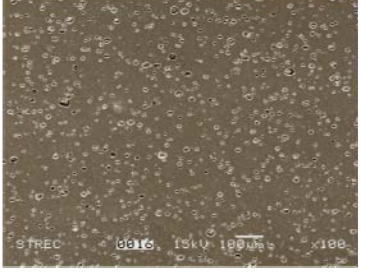
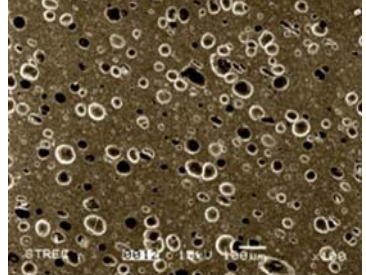
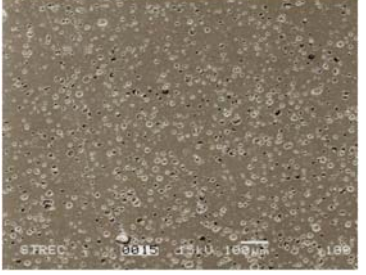
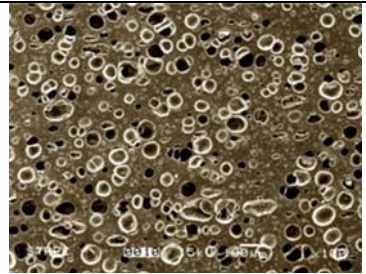
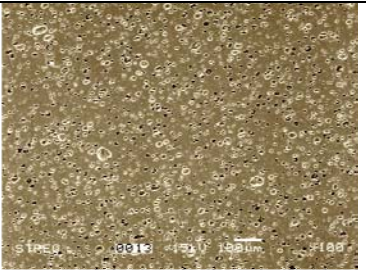
4.6.3.1 การตรวจสอบจากหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของยางผสม (ความหนาชิ้นงาน 2 mm)

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านล้อย ที่ปริมาณ 40phr และเติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH หรือ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ที่ปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่มากขึ้น ทำให้มีฟองก๊าซที่มากขึ้น และพื้นผิวยางไม่เรียบ เนื่องจากอนุภาคผงถ่านล้อยส่วนมากมีขนาดใหญ่ทำให้เกิดผิวหน้าตัดที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคถ่านล้อยที่มีขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C แล้ว ในขณะการบดผสมอาจเกิดการแตกย่อยของอนุภาคถ่านล้อยเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ ลงอีก ซึ่งอนุภาคของถ่านล้อยขนาดเล็กที่แตกย่อยออกมานี้ เป็นส่วนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน จึงทำให้มีการยึดเกาะแบบ Rubber filler interaction ที่ลดลง [44] นอกจากนี้ อาจเกิด Coalescence ของฟองก๊าซรอบๆ ผิวอนุภาคของถ่านล้อยที่มีขนาดใหญ่จนเกิดเป็นช่องว่างรอบๆ อนุภาคผงถ่านล้อยได้ชัดเจน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติมปริมาณ สารทำให้เกิดฟองตั้งแต่ที่ปริมาณ 6 -10 phr เนื่องจาก การสลายตัวของฟองก๊าซในเนื้อยางผสมเกิดการรวมกันที่บริเวณผิวรอบๆผิวถ่านล้อย เพื่อรักษาเสถียรภาพของฟองก๊าซ ซึ่งเกิดกับยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด

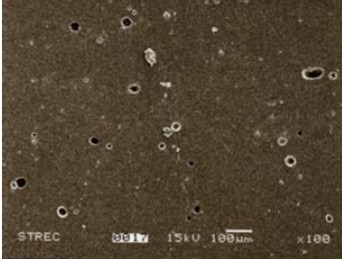
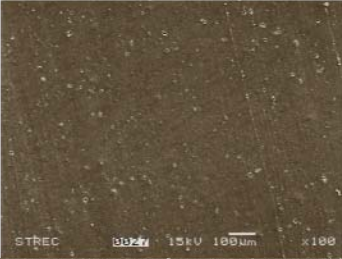
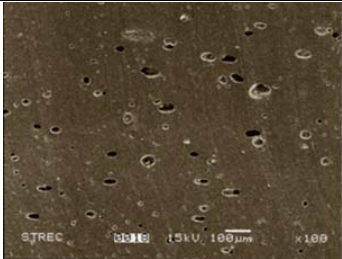
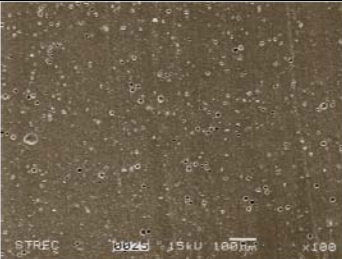
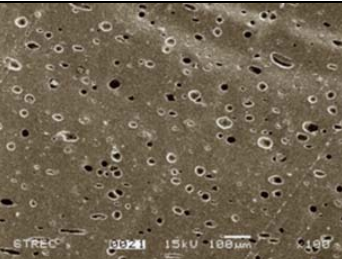
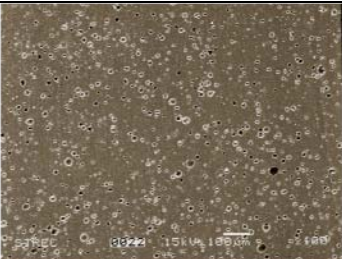
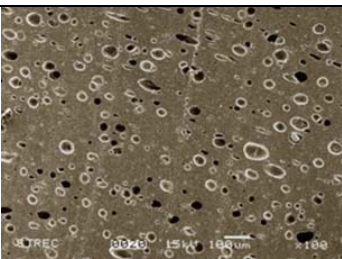
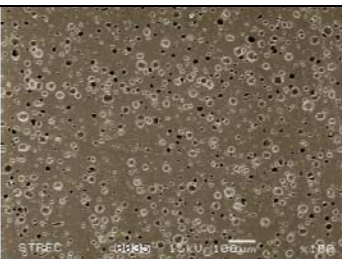
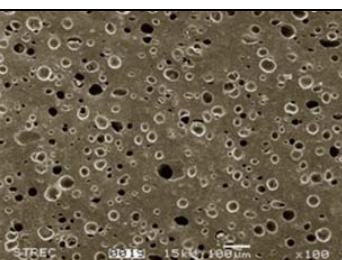
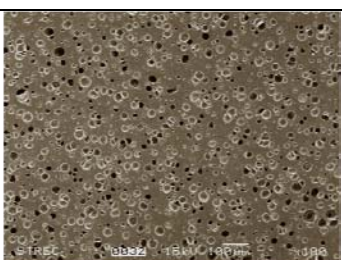
ส่วน **รูปที่ 4.30** แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง ผงซิลิกา ที่ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสมที่เติมซิลิกาเป็นสารเติมแต่งนั้น มีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอ การกระจายปริมาณของฟองมีความสม่ำเสมอ ซึ่งฟองก๊าซมีลักษณะกลม และมีปริมาณฟองก๊าซมากขึ้นเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น โดยลักษณะของฟองก๊าซแยกกัน ซึ่งเป็นลักษณะของเซลล์ปิด [18] และพบอีกว่าฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ OBSH เซลล์ฟองขยายติดกันที่ปริมาณ 10 phr ส่วนลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดจาก ADC มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจาก การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิดที่แตกต่างกัน โดยที่สาร ADC สลายตัวให้ก๊าซ 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่สาร OBSH สลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนเพียงชนิดเดียว ซึ่งก๊าซไนโตรเจนมีค่าการซึมผ่านที่ดีกว่า และ**รูปที่ 4.31** แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำ ที่ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสมที่เติมผงเขม่าดำ มีลักษณะพื้นผิวยางผสมที่สม่ำเสมอ และมีการกระจายปริมาณของฟองมีความสม่ำเสมอ ฟองก๊าซมีลักษณะกลม และมีปริมาณฟองก๊าซมากขึ้น เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของฟองก๊าซนั้นเป็นเซลล์

ปริมาณสารทำให้เกิดฟอง (phr)	สารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH	สารทำให้เกิดฟองชนิด ADC
2		
4		
6		
8		
10		

รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงถั่วลย ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ ของชิ้นงานที่มีความหนา 2 mm (กำลังขยาย 100 เท่า)

ปริมาณสารทำให้เกิดฟอง(phr)	สารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH	สารทำให้เกิดฟองชนิด ADC
2		
4		
6		
8		
10		

รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงซิลิกาปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ ของชิ้นงานที่มีความหนา 2 mm (กำลังขยาย 100 เท่า)

ปริมาณสารทำให้เกิดฟอง(phr)	สารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH	สารทำให้เกิดฟองชนิด ADC
2		
4		
6		
8		
10		

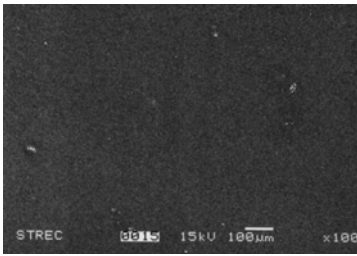
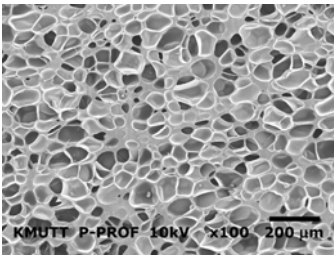
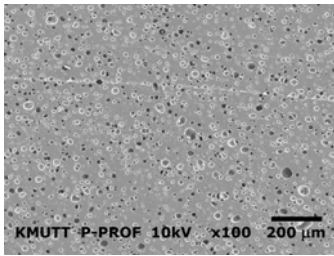
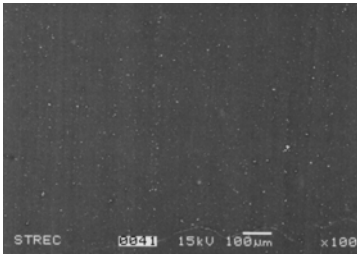
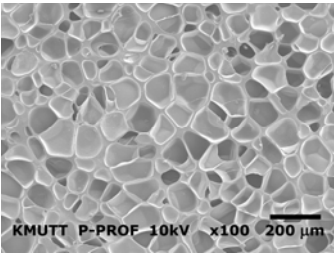
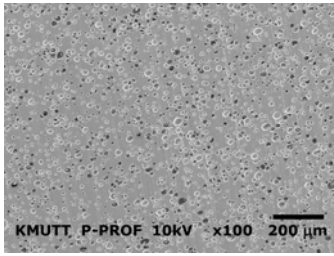
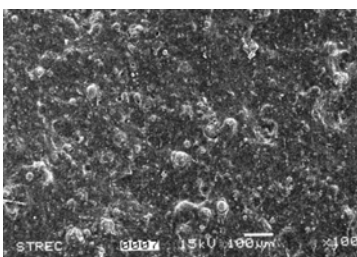
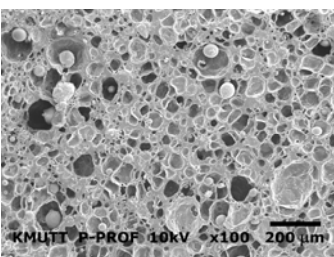
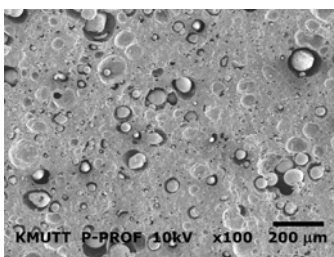
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR /ผงเขม่าดำปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ ของชิ้นงานที่มีความหนา 2 mm (กำลังขยาย 100เท่า)

4.6.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานจากการทดสอบการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม (ความหนาชิ้นงาน 12.5 mm)

รูปที่ 4.32 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางฟองน้ำ NR/SBR ที่เติมและไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณ 6 phr ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอยผงซิลิกา และ ผงเขม่าดำ ที่ ปริมาณ 40phr โดยชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบผิวหน้าตัดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm และหนา 12.5 mm พบว่าในยางผสมที่เติม OBSH ลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดในชิ้นงานที่มีความหนาเพิ่มขึ้นขนาดของฟองก๊าซจะสามารถขยายได้มากขึ้นจนเกิดการชนกันของผนังฟองก๊าซ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ชิ้นงานมีความหนาที่มากขึ้นในการขึ้นรูปโดยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Compression moulding) ความร้อนที่ถ่ายเทให้ทั้งชิ้นงานที่จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ต้องใช้เวลาที่มากกว่าทำให้ฟองก๊าซมีเวลาที่จะขยายตัวได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความบางซึ่งมีการเกิดพันธะเชื่อมขวางได้ทั่วถึงเร็วกว่า และ OBSH สามารถกระจายในเนื้อยางได้ดี [13] แต่ในยางผสมที่เติม ADC ความหนาของชิ้นงานไม่ส่งผลต่อลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น

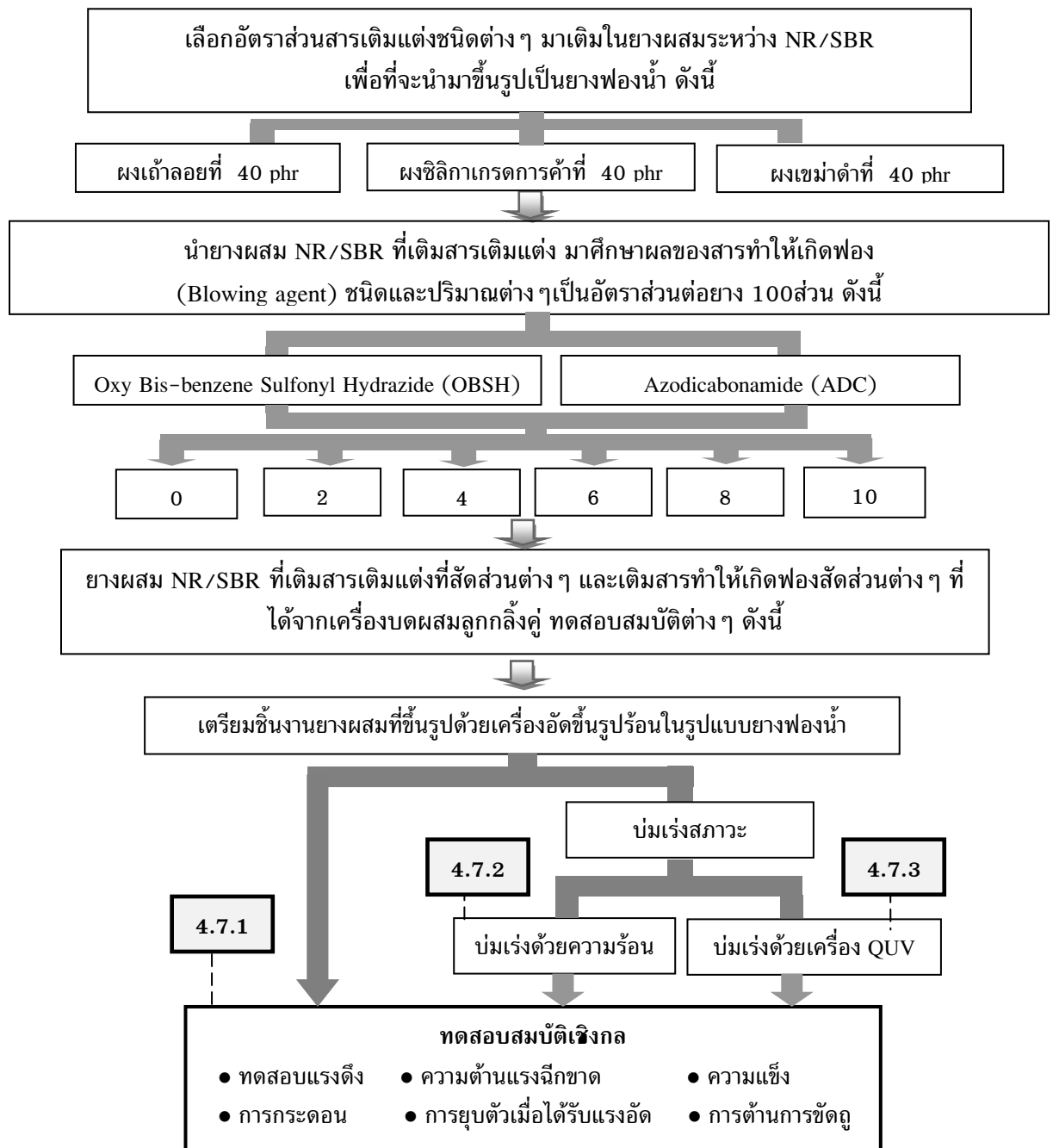
ส่วนลักษณะฟองก๊าซที่เกิดจากสาร OBSH มีขนาดใหญ่กว่าและปริมาณฟองน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟองก๊าซที่เกิดจากสาร ADC ดังเหตุผลของการสลายตัวที่ได้กล่าวในตอนต้น ฟองก๊าซที่เกิดจาก ADC ในยางผสมที่เติมผงเขม่าดำกับยางผสมที่เติมผงซิลิกา พบว่ามีขนาดไม่แตกต่างกัน แต่ฟองก๊าซที่เกิดจาก OBSH ของยางผสมที่เติมผงซิลิกามีขนาดที่ใหญ่กว่าฟองก๊าซของ OBSH ที่เกิดในยางผสมที่เติมผงเขม่าดำมาจากสาเหตุ 2 ประการ คือ

1. การเกิด Coalescence ของยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากผงซิลิกาเกิด Agglomeration
2. การเกิด Rubber-filler interaction ของผงซิลิกากับยางผสมเกิดได้น้อยกว่าผงเขม่าดำ ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้มากกว่า

สารเติมแต่ง	ไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง	OBSH ที่ปริมาณ 6 phr	ADC ที่ปริมาณ 6 phr
ผงเขม่าดำ			
ผงซิลิกา			
ผงถั่วลอย			

รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR ที่เติมและไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณ 6 phr ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณ 40 phr ของชิ้นงานที่มีความหนา 12.5 mm (กำลังขยาย 100 เท่า)

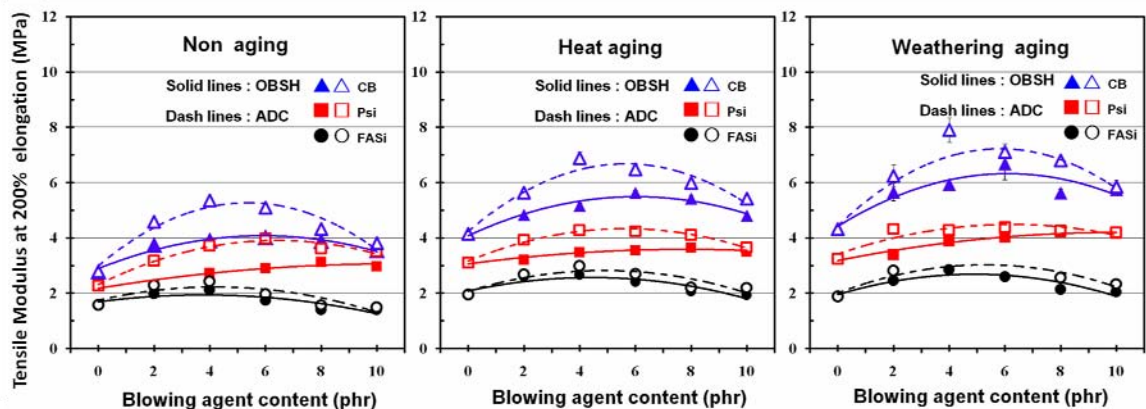
4.7 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งสถานะของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC



รูปที่ 4.33 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC

4.7.1 ผลการทดลองการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ในยางผสม NR/SBR การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน และการบ่มเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV (งานหมายเลข 4.7.1 4.7.2 และ 4.7.3)

อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อมอดูลัสที่การยืดตัว 200%ของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV แสดงในรูปที่ 4.34 พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น [37] เนื่องจาก สารทำให้เกิดฟองที่เติมลงไป 4-6 phr จะเกิดเซลล์ฟองยางผสมในรูปแบบปิด ดังแสดงภาพถ่าย SEM รูปที่ 4.29 – 4.32 การอัดตัวของก๊าซในรูพรุนเมื่อมีแรงดึงทำให้ความดันของก๊าซสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านหรือแรงดันภายในรูพรุนต้านแรงกระทำจากภายนอก ส่งผลทำให้ต้องใช้แรงจากภายนอกมากขึ้น [14] แต่เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ปริมาณของฟองมากขึ้นจนถึงจุดที่ผนังของเซลล์ทะลุถึงกัน (Gas containment limit) [51] ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลง ทำให้มอดูลัสที่การยืดตัว 200% ของยางพองน้ำมีค่าลดลง



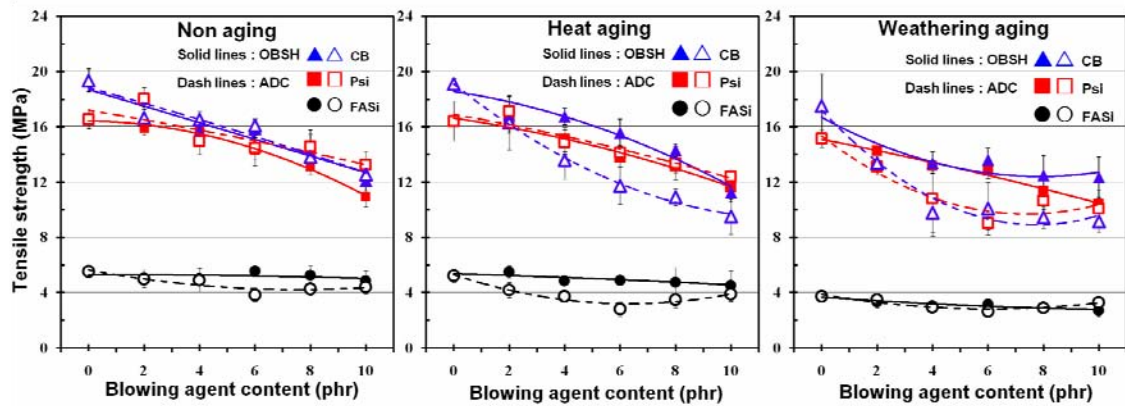
รูปที่ 4.34 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อมอดูลัสที่การยืดตัว 200%ของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงาน 2 mm)

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC พบว่าสาร ADC ให้ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% ที่สูงกว่าการเติม OBSH ในทุกอัตราส่วน ทั้งนี้เนื่องจาก การเกิดฟองก๊าซในยางผสมที่มีขนาดเล็กกว่าจึงมีเนื้อยางที่รับแรงได้มากกว่า สารเติมแต่งที่ให้ค่ามอดูลัสสูงที่สุด คือผงเขม่าดำ เนื่องมาจากความแข็ง (Rigidity) ของวัสดุ [38] และส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม

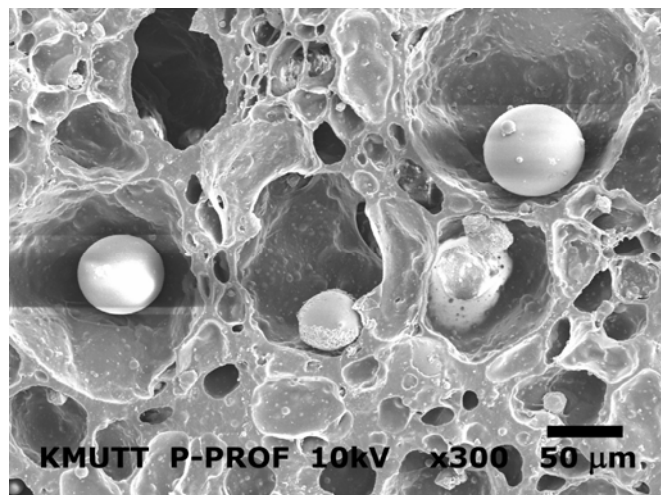
ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางผสมเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มขึ้นหลังการอบสุกที่ t_{c90} และการบ่มเร่งสภาวะของยางผสมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่ายางผสมที่บ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เนื่องมาจากการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมนั้นมีการฉายรังสียูวี พร้อมทั้งให้ความร้อนเป็นการเร่งทำให้ยางผสมมีการเสื่อมสภาพที่เร็วขึ้น โดยการเสื่อมสภาพส่งผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่แล้วเกิดการเชื่อมต่องานพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเกิดได้กับยางเอสปีอาร์มีมีการเสื่อมสภาพแบบเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟดิก [18] เกิดเป็นพันธะที่สั้นลงส่งผลทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.35 แสดงอิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงดึงของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV พบว่า ความสัมพันธ์ความต้านแรงดึงของยางผสม NR/SBR/ผงเถ้าลอย เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองในยางผสมเพิ่มขึ้น ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคผงเถ้าลอยเกิดเป็นช่องอากาศรอบๆ อนุภาค และเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิด Coalescence ของฟองก๊าซรอบผิวเถ้าลอยมากขึ้นด้วย ดังแสดงจากภาพถ่าย SEM เห็นได้ชัดเจนที่กำลังขยายมากขึ้น ดังรูปที่ 4.36 จึงทำให้การส่งถ่ายแรงที่มากกระทำจากเนื้อยางผสมไปยังเฟสของเถ้าลอยเกิดได้ยาก ความต้านแรงดึงจึงมีค่าลดลง ส่วนความสัมพันธ์ความต้านแรงดึงของยางผสม NR/SBR/ผงซิลิกาเกรดการค้า และยางผสม NR/SBR/ผงเขม่าดำ ที่เติมสาร ทำให้เกิดฟองชนิด OBSH หรือ ADC ปริมาณต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่คล้ายคลึงกัน คือ เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสม NR/SBR เพิ่มขึ้น ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางผสมมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยลง และมีฟองก๊าซแทรกอยู่ในเนื้อยาง

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนยางผสมที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ค่าความต้านแรงดึงโดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นหลังการอบสุก แต่ยางผสมที่เติมสาร ADC กลับมีค่าความต้านแรงดึงลดลง เนื่องมาจากการสลายตัวของ ADC เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้นในระบบ ซึ่งอาจไปเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมทุกสูตรมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดการเสื่อมสภาพของยางผสมที่สภาวะที่รุนแรงกว่า โดยยางผสมที่เติมสาร ADC มีการลดลงที่มากกว่าสูตรที่เติมสารชนิด OBSH ในลักษณะเหมือนกับการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน



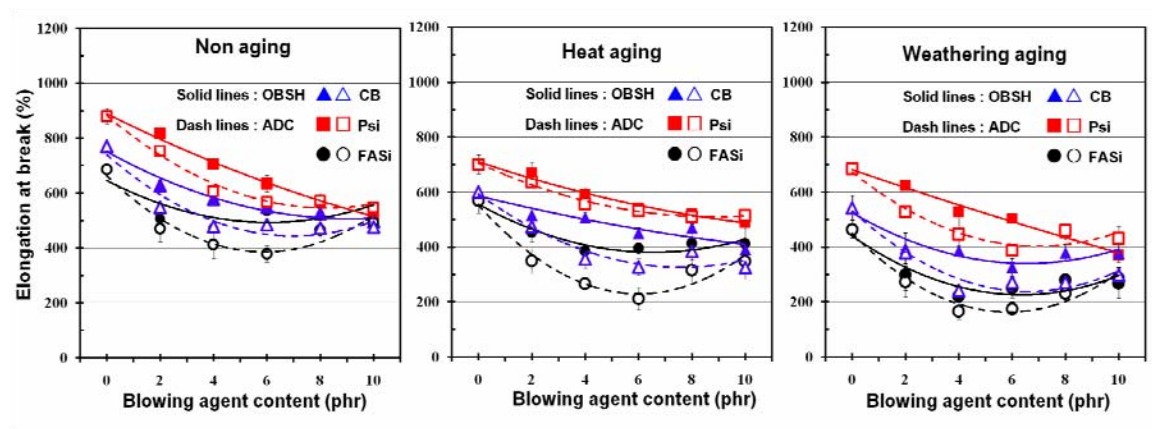
รูปที่ 4.35 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงดึงของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านล่อย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)



รูปที่ 4.36 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงถ่านล่อย ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH ที่ปริมาณ 6 phr (กำลังขยาย 300 เท่า)

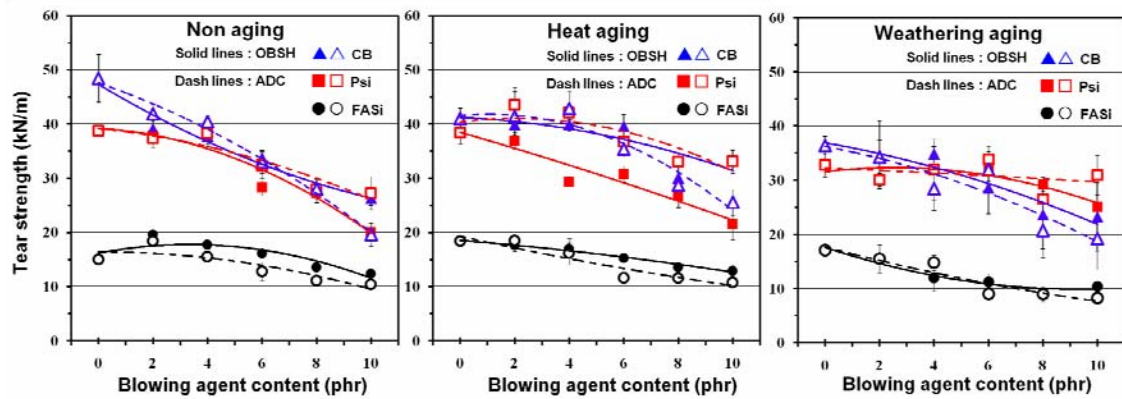
อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อการยึดตัวที่จุดขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านล่อย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV แสดงใน รูปที่ 4.37 เห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสม ค่าการยึดตัวที่จุดขาดจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดฟองเป็นการทำให้พื้นที่ในการรับ

แรงลดลงทำให้การดึงยึดมีค่าลดลง ทั้งนี้ยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC การยืดตัวที่จุดขาดมีค่าต่ำกว่ายางผสมที่เติมสาร OBSH เนื่องจากยางสูตรที่เติมสาร ADC เกิดฟองก๊าซที่มีขนาดเล็กทำให้มีเฟสของเนื้อยางมากกว่าทำให้การดึงยึดลดลง ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าการยืดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงของพันธะเชื่อมขวางมากขึ้น (เพราะได้ทำให้ยางสุกที่ 90% ก่อนทดสอบ) และเป็นพันธะที่สั้นลงดังที่กล่าวมาแล้ว การบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV มีค่าการยืดตัวที่จุดขาดน้อยกว่าการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เนื่องมาจากยางมีความแข็งเปราะมากขึ้นเนื่องจากการเกิดการเชื่อมสภาพของยางผสม สอดคล้องกับความต้านแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีที่ลดลง



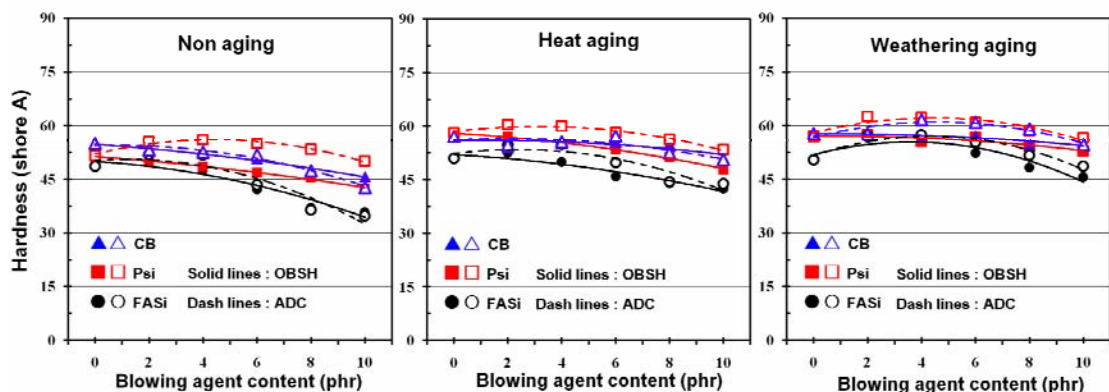
รูปที่ 4.37 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อการยืดตัวที่จุดขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)

อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV แสดงในรูปที่ 4.38 เห็นได้ว่า เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด ความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมความต้านแรงฉีกขาดของยางผสมมีการเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นหลังการอบสุกที่มากกว่า 90% เมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ยางผสมมีค่าความต้านแรงฉีกขาดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความต้านแรงดึงที่ลดลงหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.38 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)

อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความแข็งแรงของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV ที่แสดงในรูปที่ 4.39 พบว่า การเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ลงในยางผสม NR/SBR ที่สารเติมแต่งแต่ละชนิด เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น ความแข็งแรงของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มเฟสของฟองก๊าซซึ่งเป็นเฟสที่ทำให้ยางอ่อนลง ซึ่งยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟอง ADC มีค่าความแข็งแรงมากกว่ายางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH เนื่องจากมีเฟสของเนื้อยางมากกว่า ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ของยางผสม ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับสอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่การยืดตัว 200% แสดงในรูปที่ 4.34



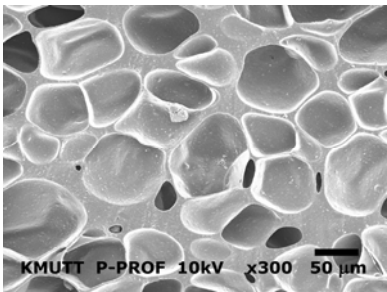
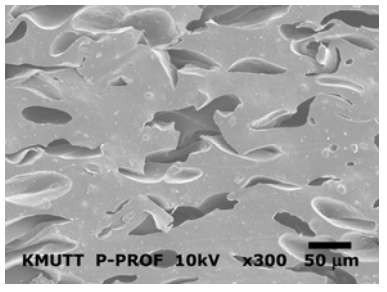
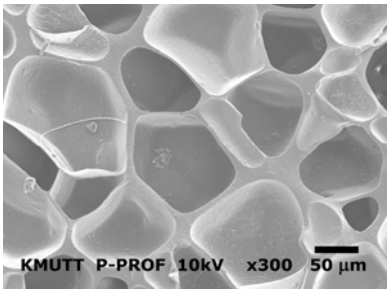
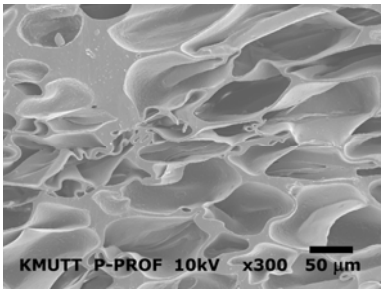
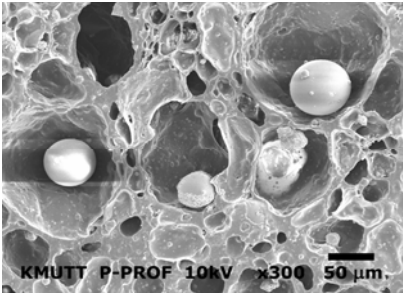
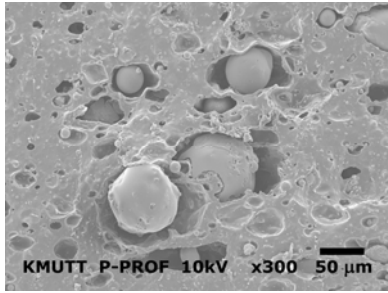
รูปที่ 4.39 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความแข็งแรงของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)

ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถ่านล้อย ซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง แสดงใน ตารางที่ 4.12 โดยการขึ้นรูปทดสอบนี้ตามมาตรฐาน ASTM D395 Method B ซึ่งทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเป็นทรงกระบอกตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm และมีความสูง 12.5 mm ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในยางผสมที่เติม OBSH สามารถขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่ปริมาณการเติม OBSH สูงสุดที่สัดส่วน 6 phr ทุกชนิดของสารเติมแต่ง จากนั้นจะไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐานทดสอบได้ และในส่วนของยางผสมที่เติม ADC ที่เติมผงถ่านล้อย สามารถขึ้นรูปที่ปริมาณการเติม ADC สูงสุดที่สัดส่วน 6 phr โดยการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่มีค่าน้อยแสดงถึงค่าการคืนตัวของยางผสมที่มีความเป็นอีลาสติกที่ดี โดยยางผสมที่เติมผงถ่านล้อยให้ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดน้อยที่สุด และยางผสมที่เติมซิลิกาเกรดการค้าให้การยุบตัวมากที่สุด และการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดเพิ่มขึ้น นั่นคือความสามารถในการคืนตัวกลับของยางผสมลดลง โดยค่าการคืนตัวกลับที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากการแตกออกหรือฉีกขาดของผนังเซลล์ ดังแสดงจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.40 การฉีกขาดของผนังเซลล์นี้ทำให้ก๊าซที่อยู่ในเซลล์มีการซึมออกในขณะที่ทำการทดสอบทำให้การคืนตัวกลับมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.12 ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถ่านล้อย ซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 12.5 mm)

ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง	สารเติมแต่ง	การยุบตัวของยางผสม (%)					
		ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	ผงถ่านล้อย	52.3	50.2	56.4	66.0	N/A	N/A
	ผงซิลิกา	58.4	76.0	72.7	74.4	N/A	N/A
	ผงเขม่าดำ	53.5	56.4	69.0	69.8	N/A	N/A
ADC	ผงถ่านล้อย	52.3	52.6	59.9	63.9	N/A	N/A
	ผงซิลิกา	58.4	72.5	75.1	80.8	80.9	78.3
	ผงเขม่าดำ	53.5	52.0	55.1	56.1	56.2	58.0

N/A: ไม่สามารถทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้ เนื่องจากชิ้นงานมีการพองตัวมาก

สารเติมแต่ง	ก่อนการทดสอบ การยวบตัวเมื่อได้รับแรงอัด	หลังการทดสอบ การยวบตัวเมื่อได้รับแรงอัด
ผงเขม่าดำ		
ผงซิลิกา		
ผงถั่วลอย		

รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมผงถั่วลอย ผงซิลิกา และ ผงเขม่าดำ ที่ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ที่ 6 phr ก่อนและหลังการทดสอบการยวบตัวเมื่อได้รับแรงอัด ชิ้นงานที่ทดสอบหนา 12.5 mm (กำลังขยาย 300เท่า)

ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถั่วลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง แสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งพบว่าค่าการกระดอนมีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งต่างจากค่าการกระดอนของยางผสมที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง โดยที่ผงถั่วลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ให้ค่าการกระดอนสูงสุดและรองลงมาตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดฟองก๊าซเป็นยางพองน้ำในลักษณะของเซลล์ปิดดังที่กล่าวมาแล้วมีการ

กระดอนมากกว่าทำให้ยางผสมในรูปแบบยางฟองน้ำที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ มีค่าการกระดอนที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับยางผสมที่เติมถั่วลย

ตารางที่ 4.13 ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถั่วลย ซิลิกาเกรดการการค้า และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง (ความหนาขึ้นงานทดสอบ 4 mm)

ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง	สารเติมแต่ง	การกระดอน (%)					
		ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	ผงถั่วลย	65.2	62.8	64.1	63.3	63.4	63.2
	ซิลิกา	55.5	56.5	61.3	61.7	65.5	64.0
	ผงเขม่าดำ	45.0	60.5	62.1	64.3	64.7	63.3
ADC	ผงถั่วลย	65.2	72.4	74.7	68.8	65.9	63.6
	ซิลิกา	55.5	58.9	61.9	62.6	60.3	60.8
	ผงเขม่าดำ	45.0	63.8	66.3	65.1	63.9	63.2

ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อการสูญเสียเนื้อยางผสม NR/SBR ที่มีผงถั่วลย ซิลิกาเกรดการการค้า และ ผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งแสดงใน**ตารางที่ 4.14** พบว่าค่าการสูญเสียเนื้อมีส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้นจะทำให้ผนังของเซลล์บางลงจนเซลล์ทะลุถึงกันได้ ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลงทำให้การสูญเสียเนื้อเนื่องจากการขัดถูมีเพิ่มขึ้น และยางผสมที่เติมถั่วลยมีค่าการสูญเสียเนื้อสูงสุด รองมาคือผงเขม่าดำและซิลิกา ตามลำดับเนื่องจากผงถั่วลยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และยังเกิดการแตกตัวออกได้ในขณะผสมแต่ส่วนที่แตกออกนี้ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวทำให้การยึดเกาะของยางกับผงถั่วลยเกิดได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังเกิด Coalescent ของฟองก๊าซรอบๆผิวถั่วลยชัดเจนกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ จึงเป็นปัจจัยให้ยางผสมที่เติมถั่วลยมีการสูญเสียเนื้อวัสดุมากที่สุด

ตารางที่ 4.14 ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการสูญเสียเนื่องจากการทดสอบการขัดถูของยางผสม NR/SBR ที่มีผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง (ความหนาชั้นงานทดสอบ 9 mm)

ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง	สารเติมแต่ง	การสูญเสียเนื้อ (mm ³)					
		ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	ผงเถ้าลอย	91.0	58.0	62.2	71.4	72.7	86.3
	ผงซิลิกา	10.0	19.8	21.6	N/A	N/A	N/A
	ผงเขม่าดำ	40.0	43.0	43.1	53.9	71.7	90.4
ADC	ผงเถ้าลอย	91.0	82.9	78.1	92.6	89.3	60.0
	ผงซิลิกา	10.0	10.0	20.2	32.7	59.7	N/A
	ผงเขม่าดำ	40.0	40.0	41.2	42.7	45.4	42.8

N/A: ไม่สามารถทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบได้ เนื่องจากชิ้นงานมีการพองตัวมาก

งานวิจัยนี้สามารถสรุปในการเลือกสูตรยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า หรือผงเขม่าดำ ที่สัดส่วน 40 phr เปรียบเทียบระหว่างยางเนื้อตันกับยางฟองน้ำที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ซึ่งเป็นสูตรที่ได้จากการวิจัยที่สามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางปะเก็น หรือยางรองกันกระแทกได้ ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยแสดงสมบัติของยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดของสารเติมแต่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.15



ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่างยางเนอตันที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับยางฟองน้ำที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 40 phr

สมบัติของยางผสม	ผลิตภัณฑ์ ยางปะเก็นตาม ASTM	ชนิดของสารเติมแต่ง/ประเภทของยางคงรูป					
		ผงถั่วลย		ผงซิลิกาเกรดการค้า		ผงขม่าดำ	
		ยางเนอตัน	ยางฟองน้ำ	ยางเนอตัน	ยางฟองน้ำ	ยางเนอตัน	ยางฟองน้ำ
ความหนาแน่นสัมพัทธ์	-	1.33	1.25	1.08	1.03	1.11	1.03
เวลาในการสุกตัวที่อุณหภูมิ 160°C (min : sec)	-	10 : 3	8 : 31	11 : 2	4 : 17	11 : 2	4 : 03
สมบัติเชิงกล							
มอดูลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	-	1.6 ± 0	2.1 ± 0	2.3 ± 0	2.7 ± 0	2.8 ± 1	3.9 ± 1
ความต้านแรงดึง (MPa)	มากกว่า 12.4	6 ± 0	5 ± 0	17 ± 1	16 ± 1	19 ± 1	16 ± 1
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	มากกว่า 200	686 ± 18	472 ± 15	880 ± 28	704 ± 16	769 ± 12	578 ± 19
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	มากกว่า 17.5	15 ± 1	18 ± 1	39 ± 0	38 ± 2	48 ± 0	38 ± 0
ความแข็ง (Shore A)	50 - 70	49	48	57	49	55	52
การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (%)	ไม่เกิน 30%	52	56	65	73	54	69
การกระดอน (%)	-	65	64	65	61	45	62
การสูญเสียเนื้อวัสดุ (mm ³)	-	92	62	10	22	40	43

ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

สมบัติของยางผสม	เกณฑ์ผลิตภัณฑ์ ยางปะเก็น	ชนิดของสารเติมแต่ง/ประเภทของยางคงรูป					
		ผงถั่วถั่ว		ผงซิลิกาเกรดการค้า		ผงเอนต้า	
		ยางเอนต้า	ยางพองน้ำ	ยางเอนต้า	ยางพองน้ำ	ยางเอนต้า	ยางพองน้ำ
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน (%)							
มอดูลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	-	+25	+29	+35	+30	+58	+33
ความต้านแรงดึง (MPa)	-	-16	-20	0	-6	+5	+6
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	± 20	-27	-18	-20	-16	-15	-12
ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	± 85	+33	+33	0	+21	-6	+42
ความแข็ง (Shore A)	± 20	+4	+4	+7	+12	+4	+6

หมายเหตุ (+) : ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งสถานะ

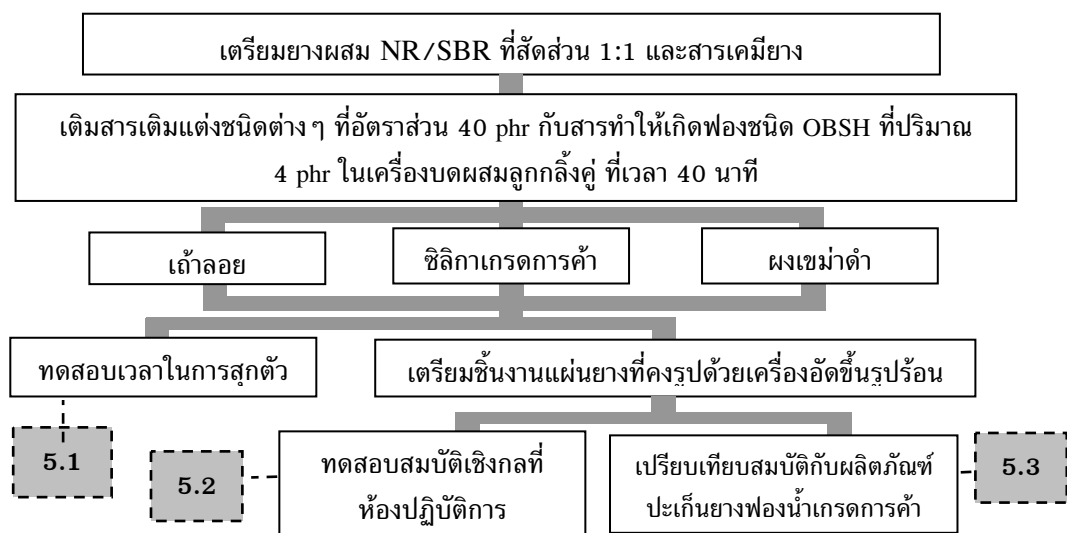
(-) : ค่าที่ลดลงหลังการบ่มเร่งสถานะ

บทที่ 5 การนำผลการวิจัยทดลองผลิตในระดับโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง

ผลการวิจัยยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำในห้องปฏิบัติการ การตรวจสอบลักษณะการเกิดฟองและสมบัติเชิงกลของยางผสม พบว่า ยางฟองน้ำที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำมีการเกิดเซลล์ฟองที่มากกว่ายางผสมที่เติมสารเติมแต่งถั่วลันเตา และมีสมบัติความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาดและความแข็งที่สูงกว่า ส่วนยางฟองน้ำที่เติมผงถั่วลันเตา พบว่ายางฟองน้ำมีสมบัติการคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้ำและผงเขม่าดำ ดังนั้น ผู้วิจัยได้นำสูตรยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ทดลองผลิตชิ้นงานปะเก็นยางในระดับโรงงาน และทดสอบเปรียบเทียบชิ้นงานปะเก็นเกรดการค้ำ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

5.1 การนำผลการวิจัยทดลองผลิตในระดับโรงงานยาง

นำสูตรยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ไปทดลองผลิตในระดับโรงงาน โดยได้รับความอนุเคราะห์เครื่องผสมลูกกลิ้งคู่ แม่พิมพ์ขึ้นรูปแผ่นชิ้นงาน และเครื่องอัดขึ้นรูปจากบริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด ตั้งอยู่ที่ 7/29 หมู่ 1 ถนนบางขุนเทียน-ชายทะเล กรุงเทพฯ โดยเลือกสูตรยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วน 1:1 ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วน 40 phr สารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ที่ปริมาณ 4 phr แสดงขั้นตอนแผนการดำเนินงาน และสูตรยางที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 ตามลำดับ ดังนี้



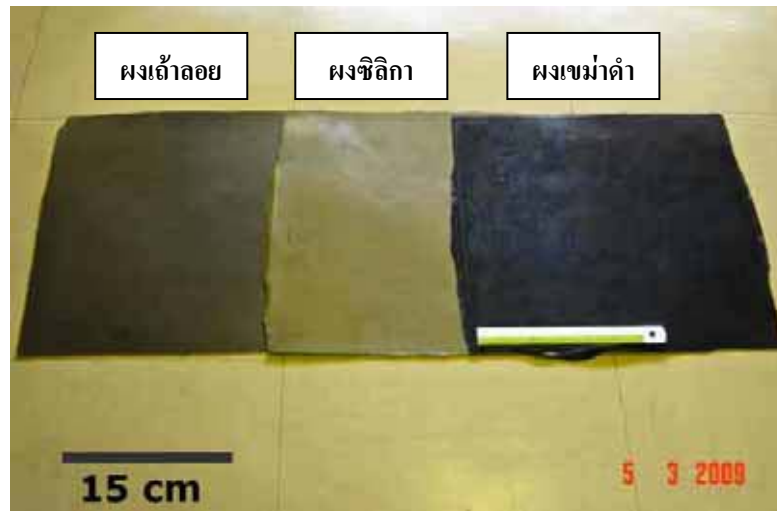
รูปที่ 5.1 แผนการดำเนินงานทดลองผลิตในโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง

ตารางที่ 5.1 สูตรยางพองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ทดลองใช้ผลิตในโรงงานผลิตภัณฑ์ปะเก็นยาง

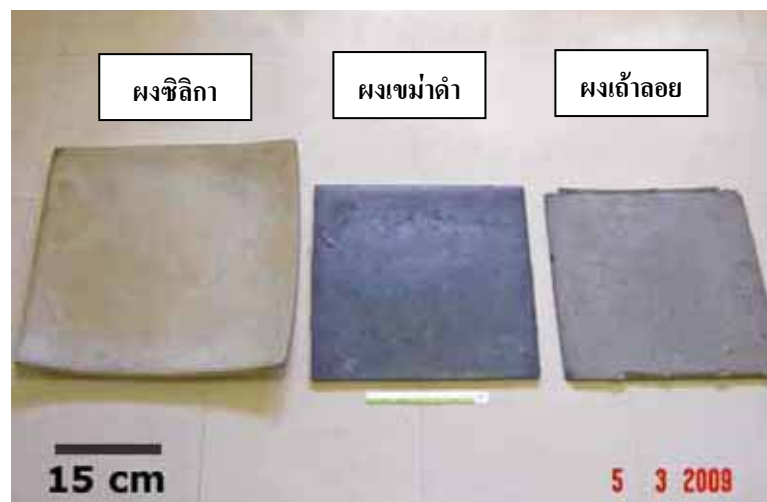
สารเคมี	ปริมาณ (phr)
1. ยางธรรมชาติ STR20 และยางเอสบีอาร์ SBR1712	100 ส่วน
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.0
3. กรดสเตียริก	3.0
4. บิวทิลเลทไฮดรอกซีโทลูอิน (Butylated hydroxy toluene, BHT)	1.0
5. สารเติมแต่ง - ผงเถ้าลอย* - ผงซิลิกาเกรดการค้า - ผงเขม่าดำ	40
6. พอลิเอทิลีนไกลคอล	5% น้ำหนักซิลิกาเกรดการค้า
7. เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT)	1.0
8. สารทำให้เกิดฟองชนิดออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ [Oxybis(benzene sulfonyl hydrazide), OBSH]	4
9. กำมะถัน	1.5

* คิดจากปริมาณของซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าลอยที่ 40%

ขั้นตอนการดำเนินงาน มีดังนี้ นำสูตรยางใน**ตารางที่ 5.1**ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ โดยใช้เวลาในการผสมเท่ากันทั้ง 3 สูตร (ผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ) ที่ 40 นาที หลังจากนั้นนำยางคอมปาวด์ที่ได้ ทดสอบสมบัติการสุกตัวของยางตาม**งานหมายเลข 5.1** เวลาในการคงรูปยางที่ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 160°C ต่อจากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานปะเก็นพองน้ำยางแผ่นเรียบ / แผ่นยางกันกระแทก โดยใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน ลักษณะแผ่นเรียบที่โรงงาน ความหนาแม่พิมพ์ 2 ขนาด คือ 310x310x2 mm และ 310x310x10 mm ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน ที่อุณหภูมิขึ้นรูป 160°C แรงดันแม่พิมพ์ 100 kg/cm³ ดังแสดงใน**รูปที่ 5.2** และ**5.3** ดังนี้



รูปที่ 5.2 แผ่นปะเก็นยางฟองน้ำยางผสม NR/SBR ที่มีผงถั่วลย ซิลิกา และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งที่ขึ้นรูปจากโรงงาน ที่ใช้แม่พิมพ์ขนาด 310x310x2 mm



รูปที่ 5.3 แผ่นปะเก็นยางฟองน้ำยางผสม NR/SBR ที่มีผงซิลิกา ผงเขม่าดำ และผงถั่วลย เป็นสารเติมแต่งที่ขึ้นรูปจากโรงงาน ที่ใช้แม่พิมพ์ขนาด 310x310x10 mm

รูปที่ 5.2 และ 5.3 แสดงชิ้นงานแผ่นปะเก็นยางฟองน้ำยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถั่วลย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ขึ้นรูปจากโรงงานที่ใช้แม่พิมพ์ขนาดความหนาต่างๆ พบว่า ชิ้นงานความหนา 2 mm ขนาดของชิ้นงานไม่แตกต่างกัน และผิวชิ้นงานมีความเรียบ แต่เมื่อขึ้นรูปที่ความหนาชิ้นงาน 10 mm พบว่า ยางฟองน้ำยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถั่วลย ชิ้นงานมีสีน้ำตาลเข้ม ผิวชิ้นงานมีลักษณะหยาบ และมีรอยขีดข่วน ชิ้นงานมีการพองตัวขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 46% เมื่อเทียบกับขนาดของแม่พิมพ์ และการตรวจสอบชิ้นงานยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำ พบว่า ชิ้นงานมีสีดำ ผิว

มันและมีความเรียบ ชิ้นงานมีการพองตัวขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 31% เมื่อเทียบกับขนาดของแม่พิมพ์ ส่วนการเติมผงซิลิกาเกรดการค้าในยางพองน้ำยางผสม พบว่า ชิ้นงานมีสีขาวขุ่น บริเวณผิวและขอบ ชิ้นงานมีความเรียบ แสดงในรูปที่ 5.4 ส่วนขนาดชิ้นงานยางพองน้ำของยางผสมที่เติมซิลิกาที่มีการพองตัวมากกว่าการเติมผงเถ้าลอยและผงเขม่าดำ ชิ้นงานมีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 150% เมื่อเทียบกับขนาดของแม่พิมพ์



รูปที่ 5.4 ลักษณะชิ้นงานยางพองน้ำแผ่นเรียบจากยางผสม NR /SBR ที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้า

5.2 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นำชิ้นงานแผ่นปะเก็นยางพองน้ำแผ่นเรียบจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นปะเก็นยาง/แผ่นยางกันกระแทก จากโรงงาน ที่มีความหนาทั้งสองขนาด ทำการเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐานทดสอบ ที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด การยืดตัวที่จุดขาด และความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และเตรียมชิ้นงานทดสอบการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดและสมบัติการกระดอนของยางพองน้ำ



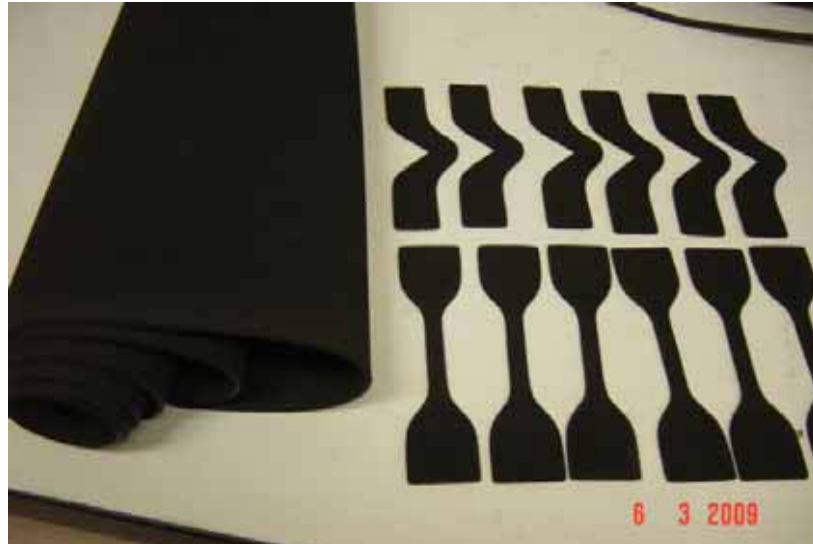
รูปที่ 5.5 ชิ้นงานยางพองน้ำแผ่นเรียบจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำที่เตรียมขึ้นรูป ที่ใช้ทดสอบความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด

5.3 การเปรียบเทียบสมบัติยางปะเก็นจากการวิจัยกับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นเกรดการค้า

ทำการเปรียบเทียบสมบัติผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นพองน้ำแผ่นเรียบ/แผ่นยางกันกระแทก ที่ได้จากการวิจัย กับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็น/แผ่นยางกันกระแทกเกรดการค้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ยางปะเก็นพองน้ำแผ่นเรียบ/แผ่นยางกันกระแทก จากวัสดุยางธรรมชาติ ความหนา 2 mm ชื่อการค้า Gomspor® เกรด N145 จากบริษัท Inoac Corporation Co., Ltd. Tokyo, Japan จัดจำหน่ายโดยบริษัท Techno Foam จำกัด จังหวัดกรุงเทพฯ การนำใช้งานของผลิตภัณฑ์ทางด้าน Shock absorbing, Seals lamp gaskets, Anti-vibration materials, Heat insulation seals ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด การยืดตัว และความแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 5.6
2. ยางปะเก็นพองน้ำแผ่นเรียบ/แผ่นยางกันกระแทก จากวัสดุยางธรรมชาติ ความหนา 10 mm โดยเลือกเกรดที่ใช้งานทั่วไป สำหรับผลิตภัณฑ์ปะเก็นยาง/แผ่นยางกันกระแทก ผลิตจากบริษัท ศรีสุวรรณ คอนเวเยอร์เบลท์ แอนด์ รีบเบอร์ จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ จำหน่ายโดยร้านนันทพงศ์การยางและยูรีเทน เขตราชบุรีบูรณะ จังหวัดกรุงเทพฯ ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด การยืดตัว และความแข็ง เช่นเดียวกับรูปที่ 5.6 และเตรียมชิ้นงาน

ทดสอบการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดและสมบัติการกระดอนของยางพองน้ำ ตามมาตรฐานทดสอบ



รูปที่ 5.6 ยางปะเก็น/แผ่นยางกันกระแทกเกรดการค้า วัสดุยางธรรมชาติ จากบริษัท Techno Foam จำกัด ที่เตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด

ส่วนงานหมายเลข 5.2 และ 5.3 เป็นการตรวจสอบสมบัติของยางปะเก็นพองน้ำ/แผ่นยางกันกระแทกจากยางผสม NR/SBR ที่ได้จากการวิจัย ที่ขึ้นรูปจากโรงงานยาง ที่ความหนาชิ้นงานขนาด 2 mm และควาหนา 10 mm เปรียบเทียบกับยางปะเก็นพองน้ำ/แผ่นยางกันกระแทกเกรดการค้า ที่ความหนาชิ้นงาน 2 ขนาดเช่นเดียวกัน และทำการศึกษาสมบัติด้านความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด การยืดตัวที่จุดขาด ความแข็ง การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอน ตามมาตรฐานทดสอบ ผลการทดสอบสมบัติยางปะเก็นพองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้า แสดงในตารางที่ 5.2 ดังนี้



ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบสมบัติของยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทก จากยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมถั่วลันเตา ชิโกลาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้จากการวิจัยที่ขึ้นรูปที่โรงงานกับยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้า

สมบัติ	ยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทก จากยางผสม NR/SBR ขึ้นรูปที่โรงงานยาง (บริษัท ยักษ์ไทย การยาง จำกัด)						ยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทก เกรดการค้า	
	ความหนา 2 mm			ความหนา 10 mm			ความหนา 2 mm ^(a)	ความหนา 10 mm ^(b)
	เถ้าลอย	ชิโกลา	เขม่าดำ	เถ้าลอย	ชิโกลา	เขม่าดำ		
1. ความหนาแน่นสัมพัทธ์	1.25	1.03	1.03	1.00	0.40	0.93	0.22	0.42
2. เวลาในการสุกตัว (min : sec)	8 : 31	4 : 17	4 : 03	8 : 31	4 : 17	4 : 03	N/A	N/A
3. มอดูลัสที่การยืดตัว 100% (MPa)	1.1 ± 1	1.2 ± 1	1.6 ± 1	0.7 ± 1	0.4 ± 0	1.5 ± 1	0.6 ± 1	1.7 ± 1
4. ความต้านแรงดึง (MPa)	6 ± 0	14 ± 1	16 ± 1	2 ± 0	3 ± 0	8 ± 1	1 ± 0	2 ± 0
5. การยืดตัวที่จุดขาด (%)	544 ± 20	725 ± 16	610 ± 13	279 ± 36	447 ± 18	456 ± 16	162 ± 7	152 ± 1
6. ความต้านแรงฉีกขาด (kN/m)	13 ± 1	27 ± 1	30 ± 1	12 ± 0	12 ± 1	27 ± 0	3 ± 0	10 ± 0
7. ความแข็ง (Shore A)	42	47	50	36	30	48	20	38
8. การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด (%)	N/A	N/A	N/A	56	73	69	N/A	100
9. การกระดอน (%)	N/A	N/A	N/A	72	66	70	N/A	41

หมายเหตุ การทดสอบข้อ 1 และ 9 จากห้องปฏิบัติการทดสอบทางกายภาพ ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง

การทดสอบข้อ 2 – 8 จากห้องปฏิบัติการของคณะวิจัยฯ

^(a) ยางปะเก็น/แผ่นยางกันกระแทก จากวัสดุยางธรรมชาติ ชื่อการค้า Gomspor® เกรด N145 จากบริษัท Inoac Corporation Co., Ltd., Japan

^(b) ยางปะเก็น/แผ่นยางกันกระแทก จากวัสดุยางธรรมชาติ ผลิตจาก บริษัท ศรีสุวรรณ คอนเวเยอร์เบลท์ แอนด์ รีบเบอร์ จำกัด

N/A ไม่สามารถทดสอบ ได้/ขนาดชิ้นงานทดสอบ ไม่ได้มาตรฐาน

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทก จากยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้จากการวิจัยที่ขึ้นรูปจากโรงงานยาง กับยางปะเก็นฟองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้า ที่ความหนาชิ้นงาน 2 mm และ 10 mm สามารถสรุป ได้ดังนี้

1. ชิ้นงานยางปะเก็นฟองน้ำที่ได้จากการวิจัย ที่ขึ้นรูปจากโรงงานยาง ขนาดความหนา 2 mm ลักษณะผิวเรียบและขนาดของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนชิ้นงานที่ขนาดความหนา 10 mm ที่เติมผงเถ้าลอย พบว่า ชิ้นงานมีผิวหยาบและมีรอยขีดข่วน ส่วนการเติมผงซิลิกาและผงเขม่าดำ ทำให้ชิ้นงานมีผิวเรียบ
2. ยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงซิลิกาเกรดการค้า มีการพองตัวมากที่สุด รองลงมาเป็นยางปะเก็นฟองน้ำที่เติมผงเถ้าลอย และผงเขม่าดำ ตามลำดับ
3. ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้ามีค่าน้อยสุด ส่วนยางฟองน้ำที่เติมผงเขม่าดำ ผงเถ้าลอย มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ตามลำดับ
4. สมบัติเชิงกลของยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ความหนา 2 mm ที่ได้จากการวิจัยที่ขึ้นรูปจากโรงงานยาง มีสมบัติเชิงกล ดังนี้ มอดูลัสที่การยืดตัว 100% ความต้านแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด ความต้านแรงฉีกขาด และความแข็ง สูงกว่ายางปะเก็นฟองน้ำ ที่ความหนา 10 mm
5. สมบัติเชิงกลของยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้จากการวิจัยขึ้นรูปจากโรงงานยาง พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวม สูงกว่าปะเก็นยางฟองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้า ที่ความหนาชิ้นงานเท่ากัน
6. ยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย มีสมบัติการต้านต่อการยุบตัว เมื่อได้รับแรงอัด (การคืนกลับตัวที่ดี) และการกระดอนที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

6.1 สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาวัดคุณสมบัติระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ โดยใช้ผงถั่วลย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง ผลการวิจัยสามารถสรุปเป็น 2 ส่วน คือ (1) ยางผสมในรูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่มีสารทำให้เกิดฟอง) และ (2) ยางผสมในรูปแบบยางฟองน้ำ ดังนี้

6.1.1 สรุปผลการทดลองยางผสมในรูปแบบของยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่มีสารทำให้เกิดฟอง)

1. ความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเติมแต่งผงถั่วลย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ
2. การเติมผงถั่วลย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR ไม่ส่งผลต่อเวลาในการสุกตัวของยางผสม
3. การเติมผงถั่วลย และผงซิลิกาเกรดการค้ำในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 30-40 phr ให้สมบัติเด่นด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% การยืดตัวที่จุดขาดและความแข็งแรงที่ดี และผงถั่วลยให้สมบัติการต้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนที่ดีกว่าผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ
4. การเติมผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 40-60 phr ให้สมบัติเด่นด้านความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และการต้านต่อการขัดถูที่ดี
5. การบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อนของยางผสมที่เติมสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

6.1.2 สรุปผลการทดลองยางผสมในรูปแบบของยางฟองน้ำ

1. การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ในยางผสมที่เติมผงถั่วลย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ทำให้เวลาในการสุกตัวของยางลดลง และการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH มีประสิทธิภาพดีกว่าสารทำให้เกิดฟอง ADC
2. ปริมาณของสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด ที่ 4 phr ให้สมบัติความต้านแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด และความต้านการฉีกขาด ของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้น
3. โครงสร้างจุลภาคของยางผสม NR/SBR มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด และสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH เซลล์ฟองมีขนาดใหญ่กว่าการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC

4. ยางฟองน้ำจากยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำมีความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่าการเติมผงถ่านล้อย
5. ยางฟองน้ำจากยางผสมที่เติมผงถ่านล้อย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ก่อนและหลังการเร่งสภาวะด้วยความร้อน สมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดไม่แตกต่างกัน สมบัติมอดูลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนหลังการบ่มเร่งพบว่าสมบัติการยืดตัวที่จุดขาดลดลง
6. การบ่มเร่งสภาวะด้วยรังสียูวีของยางฟองน้ำจากยางผสม ทำให้ความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ส่วนมอดูลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และยางผสมมีการยืดตัวลดลง
7. สมบัติการคืนกลับของยางผสมเมื่อได้รับแรงอัด มีการคืนกลับลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น และยางผสมที่เติมผงถ่านล้อยมีการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัด ดีกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้าหรือผงเขม่าดำ
8. การนำสูตรยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วนเท่ากัน ที่เติมผงถ่านล้อย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ปริมาณ 40 phr ที่มีสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ขึ้นรูปที่โรงงานความหนา 2 และ 10 มิลลิเมตร พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปะเก็นยางฟองน้ำแผ่นเรียบในระดับโรงงานได้ โดยที่ยางปะเก็นฟองน้ำที่เติมผงถ่านล้อย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้จากการวิจัย พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าปะเก็นยางฟองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้า ที่ความหนาชิ้นงานเท่ากัน
9. ยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสมที่เติมผงถ่านล้อย มีสมบัติการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนที่ดี ซึ่งแสดงสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีของยางปะเก็นฟองน้ำ

6.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

คณะวิจัยฯ นำสูตรยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการไปใช้งาน ดังนี้ ยาง NR/SBR ที่สัดส่วนของเท่ากัน (1:1) ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ที่ปริมาณสัดส่วน 4 phr ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านล้อย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วน 40 phr ได้นำมาเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเพื่อวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง ดังแสดงในตารางที่ 6.1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเติมแต่งผงถ่านล้อย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ในยางฟองน้ำของยางผสม NR/SBR มีต้นทุนในการผลิต (ไม่รวมค่าแรงงานและเครื่องจักร) ตามลำดับของสารเติมแต่ง ดังนี้ ราคา 53.95 บาท 71.36 บาท และ 64.58 บาทต่อกิโลกรัม และมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับต้นทุนและสมบัติและการนำไปใช้งาน แสดงในตารางที่ 6.1 (ท้ายตาราง)

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุของยางพองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง เอสบีอาร์ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำโดยคิดราคาต่อน้ำหนัก

ต้นทุนการผลิตยางพองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ ที่มีสารเติมแต่ง		
ผงเถ้าลอย	ผงซิลิกาเกรดการค้ำ	ผงเขม่าดำ
ราคาวัตถุดิบ (เนื่องจากสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้เหมือนกันจึงไม่นำมาคำนวณในที่นี้ด้วย)		
- ยางธรรมชาติ ประมาณ 53 บาทต่อกิโลกรัม - ยางเอสบีอาร์ ประมาณ 90 บาทต่อกิโลกรัม - เถ้าลอย ประมาณ 2 บาทต่อกิโลกรัม	- ยางธรรมชาติ ประมาณ 53 บาทต่อกิโลกรัม - ยางเอสบีอาร์ ประมาณ 90 บาทต่อกิโลกรัม - ซิลิกาเกรดการค้ำ ประมาณ 30 บาทต่อกิโลกรัม	- ยางธรรมชาติ ประมาณ 53 บาทต่อกิโลกรัม - ยางเอสบีอาร์ ประมาณ 90 บาทต่อกิโลกรัม - ผงเขม่าดำ ประมาณ 30 บาทต่อกิโลกรัม
ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ใน 1 batch		
- ยางธรรมชาติ 500 กิโลกรัม - ยางเอสบีอาร์ 500 กิโลกรัม - เถ้าลอย 500 กิโลกรัม (คิดจากปริมาณซิลิกาจริงในเถ้าลอยที่ 40%) - สารคู่ควบไซเลน 17 กิโลกรัม	- ยางธรรมชาติ 500 กิโลกรัม - ยางเอสบีอาร์ 500 กิโลกรัม - ซิลิกาเกรดการค้ำ 200 กิโลกรัม - สารคู่ควบไซเลน 17 กิโลกรัม	- ยางธรรมชาติ 500 กิโลกรัม - ยางเอสบีอาร์ 500 กิโลกรัม - ผงเขม่าดำ 200 กิโลกรัม (ไม่ต้องทำการปรับปรุงผิว)
ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ 1 ล็อต (น้ำหนัก 1000 กิโลกรัม)		
- ยางธรรมชาติ 26,500 บาท - ยางเอสบีอาร์ 45,000 บาท - เถ้าลอย 1,000 บาท - สารคู่ควบไซเลน 9,350 บาท รวมทั้งสิ้น 81,850 บาทต่อน้ำหนัก 1,517 กิโลกรัม ราคา 53.95 บาทต่อกิโลกรัม	- ยางธรรมชาติ 26,500 บาท - ยางเอสบีอาร์ 45,000 บาท - ซิลิกาเกรดการค้ำ 6,000 บาท - สารคู่ควบไซเลน 9,350 บาท รวมทั้งสิ้น 86,850 บาทต่อน้ำหนัก 1,217 กิโลกรัม ราคา 71.36 บาทต่อกิโลกรัม	- ยางธรรมชาติ 26,500 บาท - ยางเอสบีอาร์ 45,000 บาท - ผงเขม่าดำ 6,000 บาท รวมทั้งสิ้น 77,500 บาทต่อน้ำหนัก 1,200 กิโลกรัม ราคา 64.58 บาทต่อกิโลกรัม
ข้อเสนอแนะในการเลือกสมบัติของยางพองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง		
การพองตัวน้อย/ยางมีสีน้ำตาล/ น้ำหนักมาก/ต้นทุนลดลง	การพองตัวมาก/ยางมีสีขาว เดิมสีได้ตามความต้องการ/น้ำหนักมาก	การพองตัวน้อย/ยางมีสีดำ

6.3 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ จากยางผสมNR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ

การวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียขั้นตอนการผลิตของผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ ที่มีผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง ดังแสดงในตารางที่ 6.2 เพื่อเป็นปัจจัยหนึ่งสำหรับการเลือกไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตปะเก็นยางหรือยางกันกระแทก

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบข้อดี / ข้อเสีย ของขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่มีผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง

ขั้นตอนการผลิต		ข้อดีและข้อเสียของขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง		
		ผงถั่วลอ่ย	ผงซิลิกาเกรดการค้า	ผงเขม่าดำ
การเตรียมวัตถุดิบ		ต้องทำการปรับปรุงผิวก่อนนำไปใช้งาน		ไม่ต้องทำการปรับปรุงผิว
กระบวนการผสม		ถั่วลอ่ยสามารถผสมเข้าเนื้ออย่างได้ง่าย จึงนับว่าเป็นการช่วยทางด้านการประหยัดพลังงาน	ซิลิกาเกรดการค้าฟุ้งกระจายและผสมให้เข้าในเนื้ออย่างยาก ต้องใช้ทั้งเวลาและแรงในการบดผสมสูง	ผงเขม่าดำสามารถผสมเข้าเนื้ออย่างได้ง่าย
ลักษณะเครื่องมือ/อุปกรณ์/สถานที่หลังการผลิต		ทำความสะอาดง่าย ทำให้อะไหล่ประหยัดเวลา	ทำความสะอาดค่อนข้างยากเนื่องจากซิลิกาฟุ้งกระจาย	ทำความสะอาดยากต้องใช้เวลานานมาก
กระบวนการขึ้นรูป	การไหลตัวของยาง	ไหลตัวง่าย ซึ่งช่วยลดพลังงานแรงอัดจากเครื่องจักรได้เป็นอย่างดี	ไหลตัวยาก ซึ่งต้องใช้แรงอัดขึ้นรูปสูง	ไหลตัวง่าย
	เวลาในการขึ้นรูป	เวลาในการคงรูปยาวนาน	เวลาในการคงรูปสั้น	
ลักษณะชิ้นงาน/สี		ผิวหยาบ/พองตัวน้อย/สีน้ำตาล	ผิวเรียบ/พองตัวมาก/สีขาวขุ่นสามารถเติมสีได้	ผิวเรียบมัน/พองตัวน้อย/สีดำ

6.4 ข้อเสนอแนะ

- 6.4.1 ควรทดลองนำไปใช้เชิงพาณิชย์กับผลิตภัณฑ์เป้าหมายอื่นๆ อาทิ ซิลิโคนแผ่นฉนวนกันความร้อนซึ่งควรมีการตรวจสอบสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มเติม
- 6.4.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมทางด้านขยายขอบเขตการใช้งานด้านการทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น เช่น การผสมด้วยยางเอ็นบีอาร์ หรือการผสมด้วยยางอีพ็อกซีเป็นต้น
- 6.4.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เช่น ซิลิโคน (ที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก) หรือนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า ผงเถ้าลอย และผงเขม่าดำ โดยเปรียบเทียบด้านสมบัติและราคา
- 6.4.4 ยางฟองน้ำที่ได้จากงานวิจัยนี้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นหรือยางรองกันกระแทกเกรดการค้า โดยสามารถนำไปใช้ทดแทนได้ แต่มีข้อสังเกตประการหนึ่งด้านการกลับคืนตัวของยางเมื่อได้รับแรงอัด จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว ทั้งนี้อาจประยุกต์นำยางฟองน้ำที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลิตภัณฑ์ในรูปอื่นๆ เช่น วัสดุห่อหุ้มกันการกระแทก เบาะรองกันกระแทก เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. GARLOCK RUBBER TECHNOLOGIES, [online],
Available: <http://www.grtco.com/esr/index.htm> [19 April 2009].
2. ERIKS GROUP, [online], Available: <http://rubbertechology.info/en/datasheets/cellular-rubber/ERIKS%20-%20900%20K%20500%20HOPNR.pdf> [19 April 2009].
3. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา และธีระศักดิ์ หมากรพิน, 2549, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, ฝ่ายอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5).
4. Sombatsompop, N., Wimolmala, E. and Markpin, T., 2007, "Fly-Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers: Part II. Effects of Silica Content and Si69-Treatment in NR/SBR Vulcanizates", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 104, No. 5, pp. 3396-3405.
5. พรพรรณ นิธิอุทัย, 2540, ยาง: เทคนิคการออกสูตร, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 4-24.
6. เอกชัย วิมลมาลา, 2543, การเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์กับยางอะคริลิก, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 16-33.
7. วราภรณ์ คุณวานากิจ, 2540, "การวิเคราะห์ถ่านและเถ้าลิกไนต์ในโรงไฟฟ้า", วารสาร กฟผ., ปีที่ 6, ฉบับที่ 7, หน้า 68-77.
8. สมชัย กกกำแหง, 2539, "ศึกษาภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่มาะไปใช้ประโยชน์", วารสาร กฟผ., ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 48-57.
9. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, เทคโนโลยียาง, เอกสารประกอบการสอน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ หน้า 140-142.

10. Leblanc, J.L., 2002, “Rubber–Filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds, **Progress in Polymer Science**, Vol. 27, No. 4, pp. 627-809.
11. อธิพิณ แจ่มชัด, 2544, **พอลิเมอร์คอมโพสิต**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, หน้า 63-67.
12. Klempner, D. and Frisch, K.C., 1991, **Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology**, Hanser Publishers, Munich, pp. 6-15.
13. Annicelli, R.A. and Dick, J.S., 2001, “**Rubber Technology Compounding and Testing for Performance**”, Hanser Publishers, Munich, pp. 476 – 485.
14. พิสุทธิ เลิศกมลสิน, 2543, **การศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติของยางโฟม**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 55-63.
15. พงษ์ธร แซ่อูย, 2548, **สารเคมียาง**, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), กรุงเทพฯ, หน้า 115–116.
16. Hurnik, H. Gachter, R. and Muller, H., 1990, **Plastics Additives**, Hanser Publishers, NewYork, USA, pp. 815-824.
17. Pentrakoon, D. and Ellis, J.W., 2005, **An Introduction to Plastic Foams**, Chulalongkorn University Press, Bangkok, pp. 12-19.
18. Roberts, A.D., 1990, **Natural Rubber Science and Technology**, Oxford University Press, New York, pp. 516-627.
19. Barnard, D. and Lewis, P.M., 1993, **Natural Rubber Science and Technology**, Marcel Dekker, New York, pp. 510-650.

20. Edge, M., Allen N.S., Sanchez, R.G., Liauw, C.M., Read, S.J. and Whitehouse, R.B., 1999, The Influence of Cure and Carbon Black on The High Temperature Oxidation of Natural Rubber I. Correlation of Physico-Chemical changes, **Polymer Degradation and Stability**, Vol. 64, No. 2, pp. 197-205.
21. วัชรพงศ์ แซ่เต๋, ชลดา เลวิส และวิรัช ทวีปรีดา, 2548, “โพลิเมอร์ธรรมชาติเทอร์โมพลาสติก”, **การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วทท.)**, ครั้งที่ 32, วันที่ 10-12 ตุลาคม, ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์, กรุงเทพฯ.
22. Ghazali, Z., Johnson, A.F. and Dahlan, K.Z., 1999, “Radiation Crosslinked Thermoplastics Natural Rubber (TPNR) Foams”, **Radiation Physics and Chemistry**, Vol. 55, No. 1, pp. 73-79.
23. Lin, G., Zhang, X.J., Liu, L., Zhang, J.C., Chen, Q.M. and Zhang, L.Q., 2004, “Study on Microstructure and Mechanical Properties Relation of Short Fibers/Rubber Foam Composites”, **European Polymer Journal**, Vol. 40, No. 8, pp. 1733-1742.
24. Choi, S.S., 2001, “Influence of the Silica Content on Rheological Behaviour and Cure Characteristics of Silica-Filled Styrene-Butadiene Rubber Compounds”, **Polymer International**, Vol. 50, No. 5, pp. 524-530.
25. Kruger, R.A., Hovy, M. and Wardle, D., 1999, “The Use of Fly Ash Fillers in Rubber”, **1999 International Ash Utilization Symposium**, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper #72, Available: <http://www.flyash.info> [11 April 2009].
26. สมเจตน์ พชรพันธ์, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, วีระเดช พิณเสนาะ และศิริพงษ์ จันทร์พูนทรัพย์, 2546, “อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และสารตัวเติมผสมที่มีต่อสมบัติของยางโพลิธรรมชาติ”, **วารสารสงขลานครินทร์ วทท.**, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 75-90.
27. สมเจตน์ พชรพันธ์, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เกลิงศักดิ์ ตราชู และอลงกรณ์ สงวนหล่อสิทธิ, 2546, “อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาคของพอลิเอททิลีนโพลิในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน”, **วิศวกรรมสาร มก.**, ปีที่ 16, ฉบับที่ 48, หน้า 109-116.

28. Matauna, L.M., Park, C.B. and Balatinecz, J.J., 1997, "Processing and Cell Morphology Relationships for Microcellular Foamed PVC/Wood-Fiber Composites", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 37, No. 7, pp. 1137-1147.
29. Jo, Ch. and Naguib, H.E., 2007, "Constitutive Modelling of HDPE Polymer/Clay Nanocomposite Foams", **Polymer**, Vol. 48, No. 11, pp. 3349-3360.
30. Sombatsompop, N. and Lertkamolsin, P., 2000, "Effect of Chemical Blowing Agent on Swelling Properties of Expanded Elastomers", **Journal of Elastomers and Plastics**, Vol. 32, No. 4, pp. 311-328.
31. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, 2541, "การเปรียบเทียบคุณสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำและพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่นที่ใช้แล้วเป็นสารเติมแต่ง", **วิศวกรรมสาร มข.**, ปีที่ 25, ฉบับที่ 3, หน้า 27-39.
32. Findik, F., Yilmaz R. and Kuoksal, T., 2004, "Investigation of Mechanical and Physical Properties of Several Industrial Rubbers", **Materials and Design**, Vol. 25, No. 4, pp. 269-276.
33. Chand, N., 1988, "SEM Observation of Fractured Fly ash-Polyester Composites", **Journal of Materials Science Letters**, Vol. 7, No. 1, pp. 36-38.
34. Stieber, J.F. and Hannon, M.J., 2006, **Azodicarbonamide Treatment for Carbon Black and Rubber Compounds**, US. Patent, No. 7,053,137.
35. Omura, A., 1999, **Material for a gasket coated with foam rubber**, US. Patent, No. 5,958,571.
36. Nord, T.D., Kobayashi, S. and Nagahama, Y., 2002, **Cushioned Rubber Floor Mat and Process**, US. Patent, No. 6,420,015.



37. Guriya, K.C. and Tripathy, D.K., 1996, “Morphology and Physical Properties of Closed-Cell Microcellular Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer (EPDM) Rubber Vulcanizates: Effect of Blowing Agent and Carbon Black Loading”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 62, No. 1, pp. 117-127.

38. Kim, J.H., Koh, J.S., Choi, K.C., Yoon, J.M. and Kim, S.Y., 2007, “ Effects of Foaming Temperature and Carbon Black Content on the Cure Characteristics and Mechanical Properties of Natural Rubber Foams”, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Vol. 13, No. 2, pp. 198-205.

39. Yamsangsung, W. and Sombatsompop, N., 2008, “Foam Characteristics, Peel Strength and Thermal Conductivity for Wood/NR and Expanded EPDM Laminates for Roofing Applications”, **Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics**, Vol. 47, No. 5, pp. 967-985.

40. Kravlevich, M. and Koenig, J., 1998, “FTIR Analysis of Silica-Filled Natural Rubber”, **Rubber Chemistry and Technology**, Vol. 71, No. 2, pp. 300-309.

41. Marrone, M., Montanari, T., Busca, G., Conzatti, L., Costa, G., Castellano, M., and Turturro, A., 2004, “A Fourier Transform Infrared (FTIR) Study of the Reaction of Triethoxysilane (TES) and Bis[3-triethoxysilylpropyl]tetrasulfane (TESPT) with the Surface of Amorphous Silica”, **The Journal of Physical Chemistry. B**, Vol. 108, No. 11, pp. 3563-3572.

42. Da Costa, H.M., Abrantes, T.A.S., Nunes, R.C.R., Visconte, L.L.Y. and Furtado, C.R.G., 2003, “Design and Analysis of Experiments in Silica Filled Natural Rubber Compounds-Effect of Castor Oil”, **Polymer Testing**, Vol. 22, No. 7, pp. 769-777.

43. Sombatsompop, N., Thongsang, S., Markpin, T. and Wimolmala, E., 2004, “Fly Ash and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers. I. Untreated Fillers in Natural Rubber and Styrene-Butadiene Rubber Compounds”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 93, No. 5, pp. 2119-2130.



44. Thongsang, S. and Sombatsompop, N., 2006, "Effect of NaOH and Si69 Treatments on the Properties of Fly Ash Filled NR Composites", **Polymer Composites**, Vol. 27, No. 1, pp. 30-40.
45. Thongsang, S. and Sombatsompop, N., 2007, "Dynamic Rebound Behaviour of Silica/Natural Rubber Composites: Fly Ash Particles and Precipitated Silica Fillers", **Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics**, Vol. 46, No. 4, pp. 825-840.
46. Ica, M.Z. and Zehev, T., 1994, **Mixing and Compounding of Polymer**, Carl Hanser Verlag, New York, pp. 502-505.
47. Chovancova, V., Pekarovicova, A. and Fleming, P.D., 2005, "Hot Melt Inks for 3D Printing", **International Conference on Digital Fabrication Technologies**, Western Michigan University, USA, pp. 143-147.
48. Lewis, C., Buanpa, R. and Kiatkamjornwong, S., 2003, "Effect of Rubber Ratio, Carbon Black Level, and Accelerator Level on Natural Rubber/Bromobutyl Rubber Blend Properties", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 90, No. 11, pp. 3059-3068.
49. Ansarifar, A., Lim, M.P. and Nijhawan, R., 2004, "Assessment of The Effect of a Bifunctional Organosilane on the Bound Rubber and Properties of Some Natural Rubber Compounds", **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Vol. 24, No. 1, pp. 9-22.
50. Wypych, G., 1999, **Handbook of Fillers**, Chem Tec Publishing, New York, pp. 32-146.
51. Thomas, N.L., Eastup, R.P. and Quirk, J.P., 1997, "Aspects of Formulation Technology of Rigid Poly(Vinyl Chloride) Foam", **Plastics, Rubber and Composites Processing Applications**, Vol. 26, No. 2, pp. 47-54.

ภาคผนวก

1. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1.1 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ

Khongnual, K., Sombatsompop, N. and Wimolmala E., 2009, Properties of Cellular NR/SBR Vulcanizates with Fly Ash, Silica and Carbon Black Reinforcements – **6th Conference in Materials Processing Technology**, 6-7th January 2009, Ramada Plaza Menam Riverside Hotel, Bangkok, Thailand, pp.66-73.

1.2 ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในบทความวิจัยระดับนานาชาติ

Wimolmala E., Khongnual K. and Sombatsompop N., Mechanical and Morphological Properties of Cellular NR/SBR Vulcanizates under Thermal and Weathering Ageing, **Journal of Applied Polymer Science**, 114 (5): 2816-2827.

2. ตอบข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมระดับชาติ

การประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุ ครั้งที่ 6
6-7 มกราคม 2552 กรุงเทพมหานคร

สมบัติยางเซลล์ลูลาร์จากวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติ กับยางเอสปีอาร์เสริมแรงโดยผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ Properties of Cellular NR/SBR Vulcanizates with Fly Ash, Silica and Carbon Black Reinforcements

กฤษรา คงนวล ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ เอกชัย วิมลมาลา*
กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จ.กรุงเทพมหานคร 10140
โทร 02-470-8647 โทรสาร 02-470-8647 *อีเมล ekachai.wim@kmutt.ac.th

Kritsara Khongnual, Narongrit Sombatsompop, and Ekachai Wimolmala*
Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials
King Mongkut's University of Technology Thonburi, (KMUTT), Bangkok, 10140, Thailand
Tel: 02-470-8647, Fax: 02-470-8647, *E-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของประเภทและปริมาณของสารทำให้เกิดฟองทางเคมีในยางผสมที่เป็นโพลิเมอร์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ที่อัตราส่วนยางผสมเท่ากัน (1:1) ที่มีผลต่อสมบัติการสุกตัว ทางกล และทางโครงสร้างจุลภาค โดยใช้สารทำให้เกิดฟอง 2 ชนิด คือ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮไดรราไซด์ (Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide; OBSH) และเอโซไดคาร์บอนไมด์ (Azo dicarbonamide; ADC) ที่ปริมาณ 0-10 phr สารเติมแต่งที่ใช้ คือ ผงเถ้าลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วนคงที่ 40 phr โดยที่ผงเถ้าลอยและผงซิลิกา ทำการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน ผลการทดลองพบว่าเวลาในการสุกตัว ความหนาแน่น สมบัติเชิงกลของยางผสมลดลงตามปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง โดยที่ OBSH มีประสิทธิภาพสูงกว่าสารทำให้เกิดฟอง ADC ยางผสมที่เติมผงเขม่าดำมีขนาดของเซลล์ฟองขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมที่เติมผงซิลิกา และผงเถ้าลอย ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมไม่มีผลต่อสมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด แต่สมบัติความต้านแรงดึงและความต้านแรงฉีกขาดลดลง เมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี

Abstract

This article studied the effect of type and content of chemical blowing agents in cellular rubber blend of natural rubber (NR) and styrene-butadiene rubber (SBR) at a fixed blending ratio of 1:1 on cure characteristics, and mechanical and morphological properties. The blowing agents used were Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSH) and Azo dicarbonamide (ADC), the dosages varying from 0 to 10 phr. The fillers used in this work were fly ash particles, precipitated silica, carbon black at a fixed content of 40 phr, the fly ash and silica particles being silane-treated. The results suggested that the cure time, density and mechanical properties of the NR/SBR blend decreased with increasing blowing agent content. The OBSH was more effective than the ADC. The NR/SBR blends with carbon black gave rubber foams with smaller cell size and better cell dispersion when comparing with those with silica and fly ash particles. The thermal aging hardly affected the tensile and tear strength while the UV ageing worsened the tensile and tear properties of the NR/SBR blends.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบยางซีลปะเก็นที่ทนต่อความร้อน [1] ที่มีการใช้สารเติมแต่งทั่วไป เช่น ผงเขม่าดำหรือผงซิลิกา และงานวิจัยโครงการวิจัยเรื่อง "การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง

เอสบียอร์ที่มีแก๊สลอยเป็นสารเติมแต่ง" [2, 3] ได้มีการนำแก๊สลอยที่เป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดจากกระบวนการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางผสม ซึ่งในผงแก๊สลอยมีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ถึงประมาณ 40% ผลการวิจัยพบว่า เมื่อนำแก๊สลอยที่ผ่านการปรับปรุงผิวเติมในยางผสม NR/SBR ทำให้เวลาในการคงรูปยางลดลง และสมบัติเชิงกลต้านมอดูลัสแรงดึง ความแข็ง ความต้านแรงฉีกขาด เปอร์เซนต์การยวบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงอัดเพิ่มขึ้น และเมื่อบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR สมบัติเชิงกลต้านมอดูลัสแรงดึง ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น ยกเว้นเปอร์เซนต์การยวบตัวถาวรลดลง และสมบัติเพ้นของยางธรรมชาติและยางเอสบียอร์เป็นที่ทราบกันดี [4] ทำให้มีแนวความคิดในการพัฒนาต่อยอด การนำวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบียอร์ ศึกษาในรูปแบบของยางเซลล์ลูลาร์ ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นหรือยางกันกระแทก ที่มีความสามารถในการรับแรงเชิงกลและความยืดหยุ่นที่ดี ในขณะที่เดียวกันก็มีความสามารถในการต้านต่อการขีดถูเนื่องจากการเสียดสีได้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาถึงชนิดและปริมาณของสารทำให้เกิดฟอง ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบียอร์ในรูปแบบยางเซลล์ลูลาร์ ที่มีต่อสมบัติก่อนและหลังบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน และรังสียูวี ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ดังนั้น ผงแก๊สลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ใช้สารเคมี ดังแสดงใน Table 1 ดังนี้ ยางธรรมชาติเกรด STR20 จากบริษัท อ้วยชวน จำกัด ยางเอสบียอร์ เกรด SBR 1712 จาก บริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ส จำกัด ผงแก๊สลอยขนาดอนุภาคไม่เกิน 125 μm จากถ่านหินลิกไนต์โรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผงซิลิกาแบบตกผลึก เกรด Tokusil 233 ขนาดอนุภาค ประมาณ 50-100 μm จากบริษัท โตกุยามา สยามซิลิกา จำกัด ผงเขม่าดำเกรด HAF N330 ขนาดอนุภาคประมาณ 32 μm จากบริษัท Siam united rubber จำกัด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารทำให้เกิดฟองที่มีลักษณะเป็นผง 2 ชนิด ดังนี้ Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide; OBSH อนุกรมมีการสลายตัวที่ 160–170°C ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ที เอ็ม เค ซูสโปรดักชั่น จำกัด และชนิด Azodicarbonamide; ADC เกรด Supercell-AZ07 อนุกรมมีการสลายตัว 160°C จากห้างหุ้นส่วนจำกัด กิจไพบูลย์เคมี

2.1 การผสมยางผสมกับสารเติมแต่ง

การเตรียมยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่ปริมาณ 50:50 กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ โดยที่ผงแก๊สลอย (ใช้อัตราส่วนที่คิดจากปริมาณซิลิกาที่มีในแก๊สลอย 40% โดยไม่ได้แยกซิลิกาออกจากแก๊สลอย) ผงซิลิกาเกรดการค้า หรือผงเขม่าดำ ที่สัดส่วนเท่ากันที่ 40 phr ซึ่งผงแก๊สลอยและผงซิลิกาได้ทำการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (Bis-[3-(triethoxysilyl)-propyl]-tetrasulfide) (Couplink 89C) ที่ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก [2] ใช้สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) 2 ชนิด ดังนี้ OBSH และ ADC ที่สัดส่วนตั้งแต่ 2 4 6 8 และ 10 phr ทำการผสมโดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ตามส่วนประกอบของสารประกอบยาง ตามลำดับที่แสดงใน Table 1 โดยใช้เวลาในการผสม

สารประกอบยางเท่ากันที่ 40 นาที สภาวะการผสมเหมือนกันทุกสูตร โดยจะทำการเติมสารทำให้เกิดฟองและเติมแก๊สใน 10 และ 5 นาทีสุดท้าย ตามลำดับ

Table 1 Formulation of NR/SBR blend compounds

Ingredients	Content (phr)
1. NR:SBR (1:1)	100
2. Zinc Oxide	5.0
3. Stearic acid	3.0
4. Mercaptobenzothiazole (MBT)	1.0
5. Antioxidant BHT	1.0
6. Filler (Silica from fly ash, Silica or Carbon black)	40
7. Blowing agent (OBSH or ADC)	2 4 6 8 and 10
8. Sulfur	1.5

2.2 การหาเวลาคงรูปยาง การขึ้นรูปและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นำสารประกอบยางผสม NR/SBR ที่ได้จากเครื่องผสมทดสอบหาเวลาในการคงรูปที่ 90% (t_{90}) ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer; ODR รุ่น GT 70-70-S2 บริษัท GOTECH Testing Machine จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 ที่อุณหภูมิ 160°C นำยางคอมปาวด์ที่เตรียมได้ ขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot press) จากบริษัท LAB TECH จำกัด อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 160°C ใช้แรงดันโมลต์ที่ 170 กก./ตร.ซม. และเตรียมชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบการต้านแรงดึงด้วยแม่พิมพ์ตัดเป็นรูปปดัมเบลล์ ชนิด Die C

2.3 การทดสอบสมบัติของยางผสม

- การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของยางผสมที่มีผงแก๊สลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า หรือผงเขม่าดำ โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machines จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I ความเร็วในการดึงคงที่ 500 มม./นาที ตามมาตรฐาน ASTM D412-03 และทดสอบความต้านแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624-00
- การทดสอบค่าความแข็งของแผ่นยางผสมที่คงรูป โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง จากบริษัท Tech Lock จำกัด ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D2240-03 Shore A
- การบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน โดยนำยางผสมไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D573-04 จากนั้นนำชิ้นงานออกไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกล
- การบ่มแรงสภาวะด้วยเครื่อง Accelerated Weathering Tester; QUV ของยางผสมเป็นเวลา 96 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM G154-06 Cycle 3 โดยฉายรังสี UVB ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมงสลับกับการควบแน่นไอน้ำที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เป็นเวลา 96 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานออกไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

- การตรวจสอบพื้นผิวหน้าตัด (Razor cut surface) และการกระจายของฟองในยางผสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope – SEM) รุ่น JEOL-JSM-5800LV ที่ 15 kV Accelerating Voltage ตรวจสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า โดยตรวจสอบยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH หรือ ADC ปริมาณ 0 และ 6 phr
- การตรวจสอบความหนาแน่นของยางเซลล์ลูลาร์ NR/SBR ตามมาตรฐาน ASTM D792-68 ด้วยวิธี Archimedes water replacement technique

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

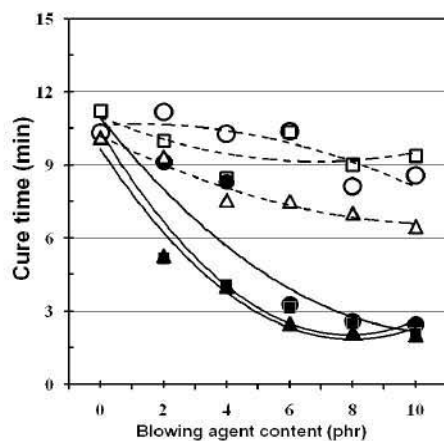


Figure 1 Effect of blowing agent content on cure time for NR/SBR rubber: Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSH, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, ▲△-CB.

ผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อเวลาการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา (FA-Si) ผงซิลิกาเกรดการค้า (Commercial precipitated Silica; P-Si) และผงเขม่าดำ (Carbon black; CB) แสดงใน Figure 1 ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ลงในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา ผงเขม่าดำ เวลาในการสุกตัวของยางผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ทำให้ยางผสมเวลาสุกตัวที่ต่ำกว่า เนื่องจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อยางซึ่งมีการเก็บความร้อนภายในฟองทำให้ช่วยเร่งให้ยางสุกเร็วขึ้น

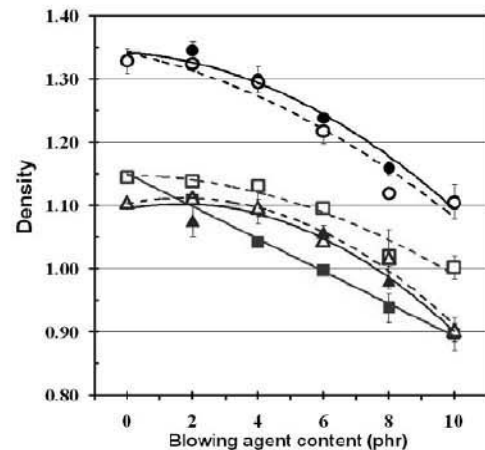


Figure 2 Effect of blowing agent content on density for NR/SBR rubber: Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSH, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, ▲△-CB.

ผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกาและผงเขม่าดำ แสดงใน Figure 2 พบว่า ความหนาแน่นของยางเซลล์ลูลาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น เนื่องจาก ปริมาณรูพรุนที่เกิดจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองและให้ก๊าซซึ่งแทรกตัวอยู่ภายในยางทำให้ยางมีการขยายตัวใหญ่ขึ้นขณะที่น้ำหนักของยางยังเท่าเดิมส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของยางผสมมีค่าลดลง ในยางผสมที่เติมซิลิกาความหนาแน่นเฉลี่ยของยางผสมในระบบที่เติม OBSH มีค่าน้อยกว่าระบบที่เติมชนิด ADC ชัดเจนซึ่งอาจเป็นผลจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซทั้ง 2 ชนิดที่แตกต่างกัน [5] ซึ่งสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC อาจเกิดการสลายตัวที่สมบูรณ์มากกว่าการใช้สาร OBSH โดยที่สาร ADC สลายตัวให้ก๊าซ 3 ชนิด คือ ไนโตรเจน คาร์บอนมอนนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่สาร OBSH สลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนเพียงชนิดเดียว ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ คาร์บอนมอนนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าไนโตรเจน นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความหนาแน่นยางผสมที่เติมผงถั่วลันเตาหรือผงเขม่าดำที่เติม OBSH และ ADC มีค่าใกล้เคียงกัน

การตรวจสอบยางผสม NR/SBR ที่เติมและไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณ 6 phr ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณ 40 phr ด้วยภาพถ่ายจากเทคนิค SEM แสดงใน Figure 3 พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองในยางผสม NR/SBR ที่เติมซิลิกา หรือผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง มีลักษณะพื้นผิวชิ้นงานยางผสมที่เกิดจากการตัดที่มีความสม่ำเสมอและเรียบ

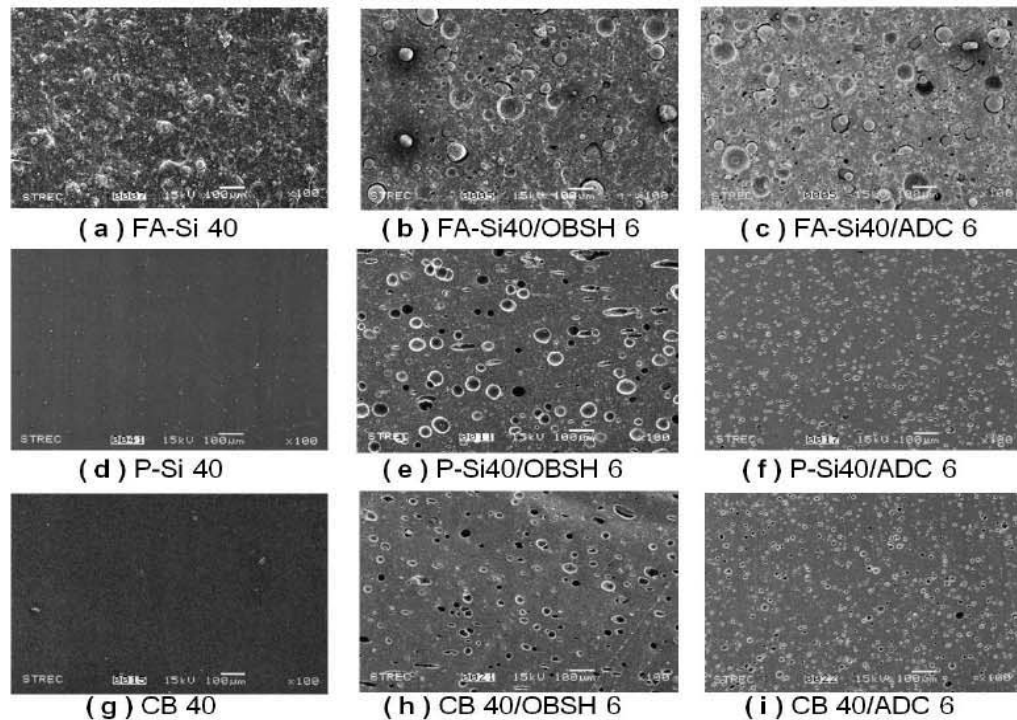


Figure 3 SEM micrographs at 100X of NR/SBR rubber of unfilled blowing agent and filled with OBSH or ADC blowing agent at 6 phr, (a - c): Silica from fly ash 40 phr, (d - f): Precipitated silica 40 phr, (g - i): Carbon black 40 phr

เนื่องจากอนุภาคของสารเติมแต่งมีขนาดอนุภาคเล็กและสามารถเข้ากับเนื้อยางได้ดี ขณะที่อนุภาคผงเถ้าลอยส่วนมากมีขนาดใหญ่เกิดผิวหน้าตัดที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน Si69 แล้ว ในขณะการบดผสมอาจเกิดการแตกย่อยของอนุภาคเถ้าลอยเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงอีก ซึ่งอนุภาคของเถ้าลอยขนาดเล็กที่แตกย่อยออกมาเป็นส่วนใหญ่ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน จึงทำให้มีการยึดเกาะระหว่างอนุภาคยางกับสารเติมแต่ง (Rubber filler interaction) ที่ลดลง [6] นอกจากนี้ยังเกิดการรวมตัวกัน (Coalescence) ของฟองก๊าซรอบๆ ผิวอนุภาคของเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะรักษาเสถียรภาพของฟองก๊าซจนเกิดเป็นช่องว่างรอบๆ อนุภาคผงเถ้าลอยชัดเจน แสดงใน Figure 4

ส่วนลักษณะฟองก๊าซที่เกิดจากสาร OBSH มีขนาดใหญ่กว่าและปริมาณฟองน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฟองก๊าซที่เกิดจากสาร ADC ดังเหตุผลของการสลายตัวที่ได้กล่าวในตอนต้น ฟองก๊าซที่เกิดจาก ADC ในยางผสมที่เติมผงเถ้าดำกับยางผสมที่เติมผงซิลิกา พบว่ามีขนาดไม่แตกต่างกัน แต่ฟองก๊าซที่เกิดจาก OBSH ของยางผสมที่เติมผงซิลิกามีขนาดใหญ่กว่าฟองก๊าซของ OBSH ที่เกิดในยางผสมที่เติมผงเถ้าดำ น่าจะมาจากสาเหตุ 2 ประการคือ ประการแรก คือ การเกิดการรวมตัวของฟองก๊าซในยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากผงซิลิกามีการเกิดเกาะกลุ่มกัน (Agglomeration) และอีกประการหนึ่งการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคยางกับสารเติมแต่งของผงซิลิกากับยาง

ผสมเกิดได้น้อยกว่าผงเถ้าดำ ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้มากกว่า

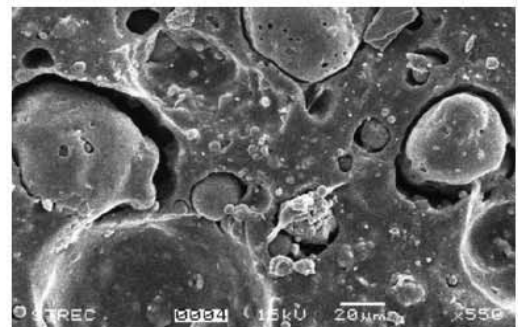


Figure 4 SEM micrographs at 550X of NR/SBR/FA with OBSH blowing agent at 6 phr displaying bubble coalescence around fly ash particle

ส่วนผลปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อสมบัติมอดูลัสแรงดึงที่การยืดตัว 200% ของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเถ้าดำ เมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อนและรังสียูวี แสดงใน Figure 5 พบว่าเมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด

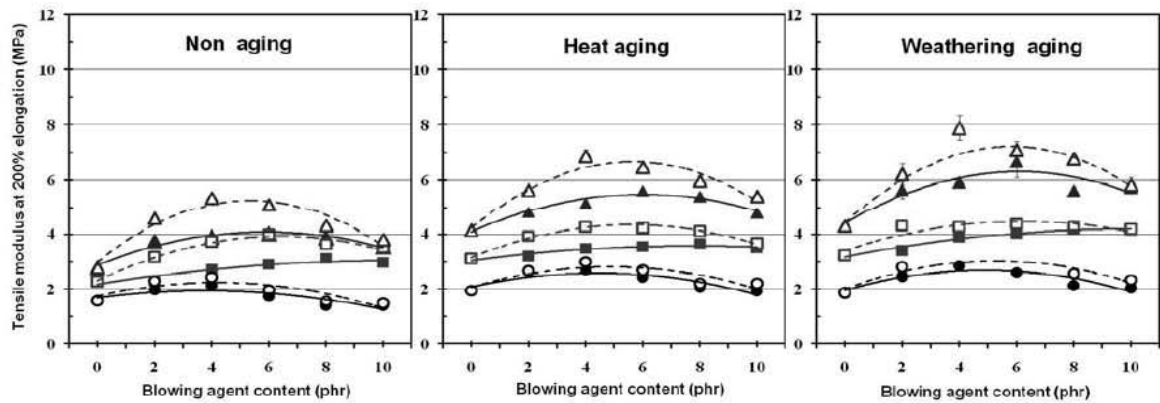


Figure 5 Effect of blowing agent content and aging conditions on tensile modulus at 200% elongation for NR/SBR rubber:

Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSh, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, △▲-CB

ค่ามอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก สารทำให้เกิดฟองปริมาณดังกล่าว (6 phr) เกิดเซลล์ฟองในยางผสมในรูปแบบปิด ดังแสดงภาพถ่าย SEM ใน Figure 3 การอัดตัวของก๊าซในรูพรุนเมื่อมีแรงดึงทำให้ความดันของก๊าซสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านหรือแรงดันภายในรูพรุนด้านแรงกระทำจากภายนอก ส่งผลทำให้ต้องใช้แรงจากภายนอกมากขึ้น [5] แต่เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ปริมาณของฟองมากขึ้นพื้นที่ในการรับแรงของฟองก๊าซลดลง และอาจเนื่องจากการทดสอบแรงดึงนี้ทำการวัดขนาดชิ้นงานทั้งหมดโดยไม่ไดหักลบเนื้อวัสดุที่หายไปจากการเกิดฟองทำให้ค่ามอดูลัสมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารทำให้เกิดฟอง OBSh และ ADC พบว่าสาร ADC ให้ค่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงกว่าการเติม OBSh ในทุกอัตราส่วน ทั้งนี้เนื่องจาก การเกิดฟองก๊าซในยางผสมที่มีขนาดเล็กกว่าจึงมีเนื้อยางที่รับแรงได้มากกว่า และพบว่ายางผสมที่เติมผงเขม่าดำทำให้ค่ามอดูลัสสูงกว่าผงซิลิกา และผงถ่านล้อย ตามลำดับ ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมค่ามอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางผสมเกิดปฏิกิริยาหลังการอบสุก

(Post curing) ต่อไปได้อีก และการบ่มเร่งสภาวะของยางผสมด้วยเครื่อง QUV ค่ามอดูลัสแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่ายางผสมที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เนื่องมาจากการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมนั้นมีการฉายรังสียูวี พร้อมทั้งให้ความร้อนเป็นการเร่งทำให้ยางผสมมีการเชื่อมสภาพที่เร็วขึ้น โดยการเชื่อมสภาพจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่แล้วเกิดการเชื่อมต่อนเป็นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเกิดได้กับยางเอสบีอาร์ที่มีการเชื่อมสภาพแบบเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลไฟดิก [7] เกิดเป็นพันธะที่สั้นลงส่งผลทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ส่วนสมบัติความต้านแรงดึงของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านล้อย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่มีการเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSh และ ADC ทำการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และรังสียูวี ดังแสดงใน Figure 6 พบว่า ยางผสม NR/SBR/ผงถ่านล้อยความต้านแรงดึงของยางผสมมีค่าต่ำที่สุด เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองในยางผสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก เกิดเป็นช่องอากาศรอบๆอนุภาคผงถ่านล้อย

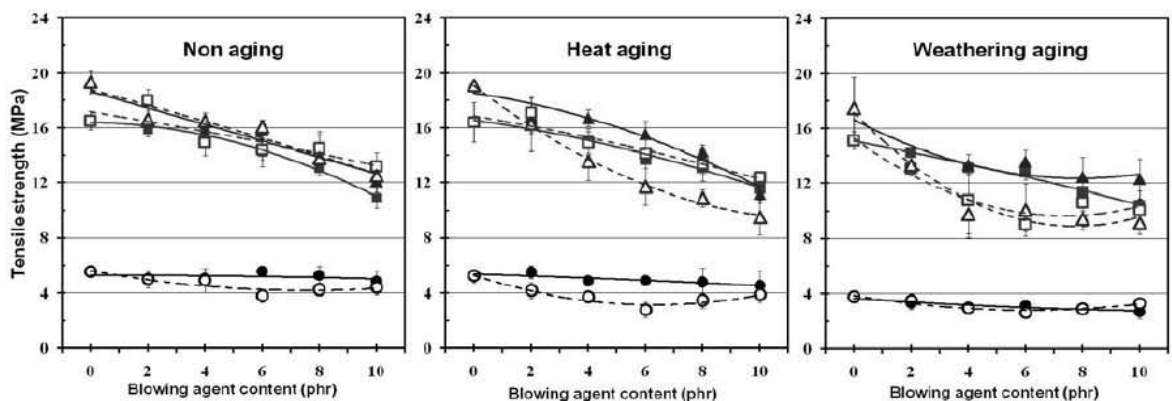


Figure 6 Effect of blowing agent content and aging conditions on tensile strength for NR/SBR rubber:

Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSh, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, △▲-CB

และเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการรวมตัวของฟองก๊าซรอบผิวแก๊สลอยมากขึ้นด้วย ดังแสดงจากภาพถ่าย SEM ใน Figure 4 จึงทำให้การส่งถ่ายแรงที่มาจากเนื้อยางผสมไปยังเฟสของแก๊สลอยเกิดได้ยาก ความต้านแรงดึงจึงมีค่าต่ำ ส่วนยางผสม NR/SBR/ผงซิลิกาเกิดการการค้ำ และยางผสม NR/SBR/ผงเขม่าดำ ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH หรือ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่คล้ายคลึงกัน เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสม NR/SBR เพิ่มขึ้น ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก ยางผสมมีฟองก๊าซแทรกแทนอยู่ในเนื้อยาง ทำให้ยางผสมมีพื้นที่ในการรับแรงลดลง

ส่วนการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนยางผสมที่เติมผงแก๊สลอยผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ค่าความต้านแรงดึงโดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก สารเคมีที่ใช้ในยางผสมที่หลงเหลืออยู่เกิดปฏิกิริยาหลังการอบสูก (Post curing) ต่อไปได้อีก แต่ยางผสมที่เติมสาร ADC กลับมีค่าความต้านแรงดึงลดลงเนื่องมาจาก การสลายตัวของ ADC เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้นในระบบ [8] ซึ่งอาจจะไปเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางผสมเพิ่มขึ้น และเมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยเครื่อง QUV ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดการเสื่อมสภาพของยางผสมในที่สภาวะที่รุนแรงกว่า โดยยางผสมที่เติมสาร ADC มีการลดลงมากกว่ายางผสมที่เติม OBSH

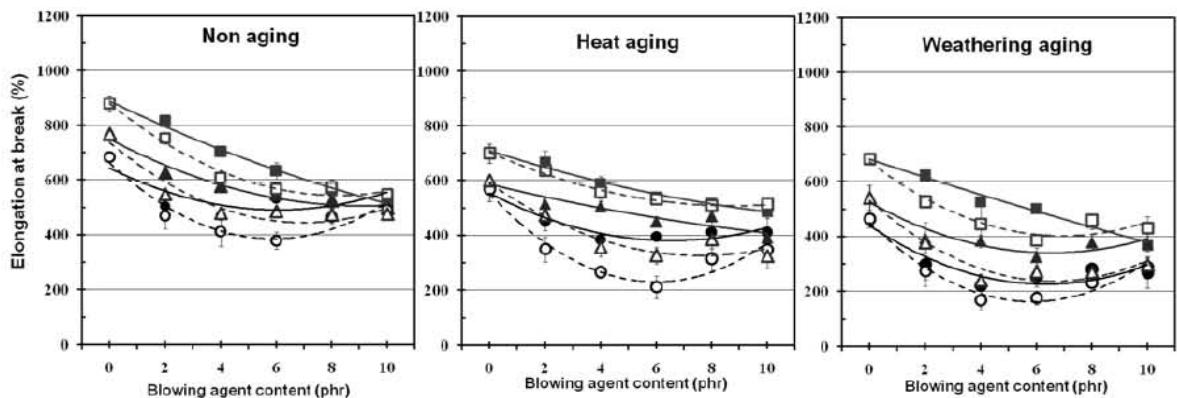


Figure 7 Effect of blowing agent content and aging conditions on elongation at brake for NR/SBR rubber:
Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSH, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, △▲-CB

ส่วนสมบัติการยึดตัวที่จุดขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีสารเติมแต่งผงแก๊สลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และรังสียูวี ดังแสดงใน Figure 7 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารทำให้เกิดฟองในยางผสม NR/SBR ค่าการยึดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดฟองเป็นการทำให้พื้นที่ในการรับแรงลดลง ส่งผลทำให้การดึงยึดมีค่าลดลงทั้งนี้ยางผสมที่เติมสารชนิด ADC การยึดตัวที่จุดขาดต่ำ

กว่ายางผสมที่เติมสาร OBSH เนื่องจาก ยางผสมสูตรที่เติมสาร ADC จะเกิดฟองก๊าซที่มีขนาดเล็กทำให้มีเฟสของเนื้อยางมากกว่าทำให้การดึงยึดลดลง ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าการยึดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาหลังการอบสูก ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของพันธะเชื่อมขวางมากขึ้น และเกิดพันธะที่สั้นลง การบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่อง QUV ทำให้ยางผสมมีการยึดตัวที่น้อยกว่าการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและ

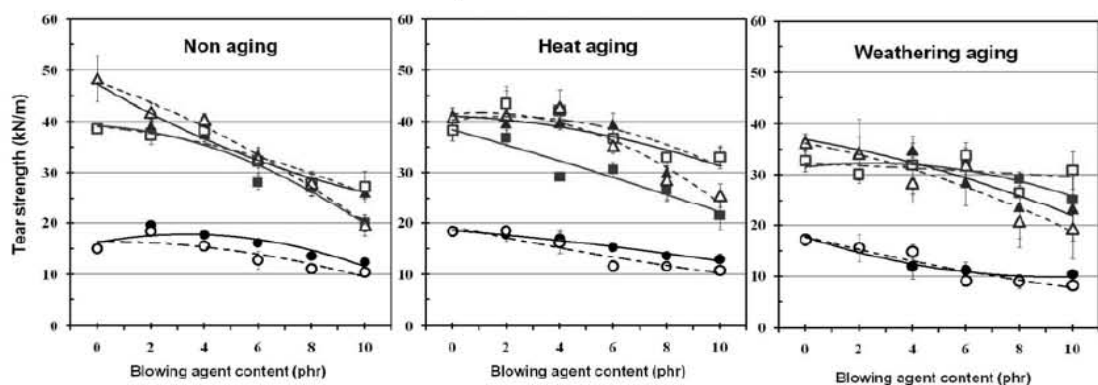


Figure 8 Effect of blowing agent content and aging conditions on tear strength for NR/SBR rubber:
Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSH, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, △▲-CB

ยางผสมมีความแข็งเปราะมากขึ้น เนื่องจาก การเกิดการเสื่อมสภาพของยางผสม สอดคล้องกับความต้านแรงดึงที่ลดลงหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยรังสียูวี

ส่วนความต้านแรงฉีกขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และรังสียูวี ดังแสดงใน Figure 8 พบว่า เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด ความต้านแรงฉีกขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าความต้านแรงฉีกขาดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในยางผสมที่หลงเหลืออยู่เกิดปฏิกิริยาหลังการอบสุก (Post curing) ต่อไปได้อีก

เมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่อง QUV ยางผสมมีค่าความต้านแรงฉีกขาดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความต้านแรงดึงที่ลดลงหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยเครื่อง QUV แสดงใน Figure 6

ส่วนสมบัติความแข็งของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และรังสียูวี แสดงใน Figure 9 พบว่า การเติมสารทำให้เกิดฟองทั้ง 2 ชนิด ในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ค่าความแข็งของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยางผสมมีเฟสของฟองก๊าซ ซึ่งเฟสของฟองก๊าซทำให้ยางผสมมีความแข็งลดลง โดยที่ยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง ADC มีค่าความแข็งที่มากกว่ายางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH

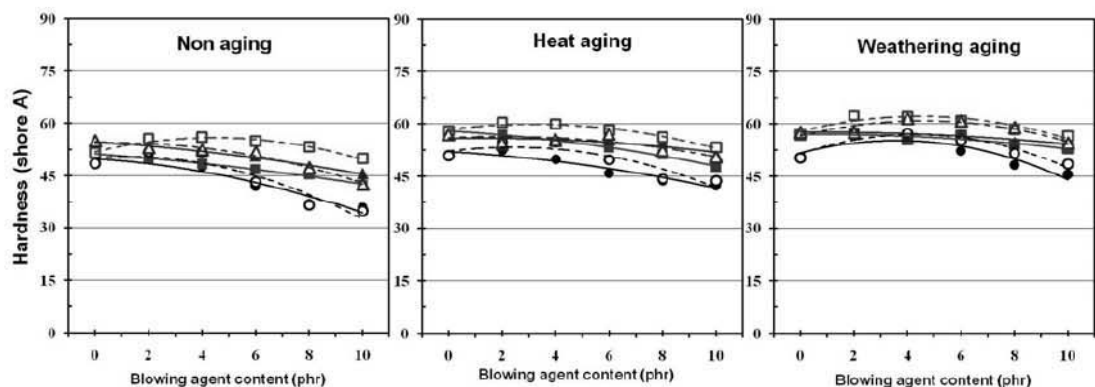


Figure 9 Effect of blowing agent content and aging conditions on hardness for NR/SBR rubber;

Open-dashed lines for ADC, Close-solid lines for OBSH, ○●-FA_Si, ■□-P_Si, △▲-CB

เนื่องจากมีเฟสของเนื้อยางมากกว่า ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่อง QUV ของยางผสม ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่ามอดูลัสแรงดึงที่เพิ่มขึ้น แสดงใน Figure 5

4. สรุปผลการทดลอง

การนำยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วน 1:1 ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ทำให้เวลาในการสุกตัวและความหนาแน่นของยางผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ส่วนสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ที่ปริมาณ 4-6 phr ให้สมบัติเชิงกลของยางผสมโดยรวม (ความต้านแรงดึง การยืดตัวที่จุดขาด) ที่เหมาะสมกว่า ยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC ที่ให้สมบัติเด่นเฉพาะทางด้านมอดูลัสแรงดึงที่เพิ่มขึ้น และยังพบว่า ยางผสมที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกา และผงถั่วลันเตา ตามลำดับ

ส่วนการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน ไม่ส่งผลต่อสมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด แต่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสแรงดึง และความแข็งที่เพิ่มขึ้น เมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยเครื่อง QUV ยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC มีสมบัติ

เชิงกลโดยรวมลดลง (ความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด การยืดตัวที่จุดขาด) ยกเว้นมอดูลัสแรงดึงที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ตามสัญญาโครงการเลขที่ RDG5050094

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Garlock Rubber Technologies, [online], Available:<http://www.grtco.com/esr/index.htm> (accessed on November 2008).
- [2] ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ เอกชัย วิมลมาลา และ วีระศักดิ์ หมากรพันธ์, 2549. "การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่มีถั่วลันเตาเป็นสารเติมแต่ง" รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สกว.
- [3] Sombatsompop, N., Wilmolmala, E., and Markpin, T., 2007. "Fly-Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers: Part II. Effects of Silica Content and Si69-Treatment in

- NR/SBR Vulcanizates". *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 104, No. 5, pp. 3396-3405.
- [4] พรพรรณ นิธิอุทัย, 2540. ยาง:เทคนิคการออกสูตร. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, หน้า 4-24.
- [5] พิสุทธิ์ เลิศกมลสิน, 2543. การศึกษาความสัมพันธ์ของโครงสร้างและสมบัติของยางโฟม. คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [6] Thongsang, S., and Sombatsompop, N., 2007. Dynamic Rebound Behavior of Silica/Natural Rubber Composites: Fly Ash Particles and Precipitated Silica Fillers. *Journal of Macromolecular Science Part B: Physics*, Vol. 46, No. 4, pp. 825-840.
- [7] Roberts, A.D., 1990. *Natural Rubber Science and Technology*, Oxford university press, New York, USA, pp. 570-576.
- [8] Gatcher, H., Muller, 1990. *Plastic Additives Handbook*, 3rd ed, Hanser, NewYork , USA, pp. 815-821.

2. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในบทความวิจัยระดับนานาชาติ

Mechanical and Morphological Properties of Cellular NR/SBR Vulcanizates Under Thermal and Weathering Ageing

Ekachai Wimolmala, Kritsara Khongnual, Narongrit Sombatsompop

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140, Thailand

Received 12 February 2009; accepted 10 May 2009

DOI 10.1002/app.30763

Published online 16 July 2009 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).

ABSTRACT: The effects of addition of two chemical blowing agents in cellular rubber blend of natural rubber (NR) and styrene-butadiene rubber (SBR) at a fixed blend ratio of 1 : 1 on cure characteristics, and mechanical and morphological properties were investigated. The chemical blowing agents used in this work were Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSh) and Azo dicarbonamide (ADC). Three different fillers, fly ash (FA) particles, precipitated silica, carbon black (CB) at their optimum concentrations of 40 phr were used, the FA and silica particles being chemically treated by bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphide. The results suggested that the overall cure time decreased with OBSh and ADC contents. The OBSh was more effective in cure-acceleration of the NR/SBR blend than the ADC. The NR/SBR vulcanized foams produced by OBSh and ADC agents had closed-cell structures. The specific density and mechanical properties of

the blend tended to decrease with increasing blowing agent content. The CB gave NR/SBR foams with smaller cell size, better cell dispersion, and higher mechanical properties than the precipitated silica and FA particles. The heat ageing and weathering resulted in an increase in tensile modulus and hardness, but lowered the tensile strength, ultimate elongation and tear strength. The elastic recovery for cellular NR/SBR vulcanizates with FA was superior to that with CB and silica, the elastic recovery of the blends decreasing with blowing agent content. Resilience property was improved by the presence of gas phases. The optimum concentration of OBSh and ADC to be used for NR/SBR vulcanizates was 4 phr. © 2009 Wiley Periodicals, Inc. *J Appl Polym Sci* 114: 2816–2827, 2009

Key words: cellular rubber; blowing agent; natural rubber; mechanical properties; foam

INTRODUCTION

Cellular rubbers or expanded rubbers are composite materials made up of a rubber matrix and a gas phase. Such materials have been used commercially in a wide range of applications including thermal insulations, gaskets, buoyancy, and impact sound deadening products. The mechanical properties of cellular rubbers are related to both the foam cells and the properties of the rubbers used. Structural variables include rubber crosslink density, foam cell density, cell structure, average cell size, and the cell geometry (open or closed cell). The processing of rubber foams involves curing an unvulcanized rubber compound that contains a blowing agent in a mould under high temperature and pressure until the blowing agent has decomposed on opening the mould, allowing expansion of the rubber compound.¹

The morphological and mechanical properties of cellular rubbers are known to be affected by the type and content of blowing agents used.^{2–6} Sombatsompop and Lertkamolsin² investigated the effects of additions of Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSh) and Azo dicarbonamide (ADC) blowing agents on density, degree of crosslinking, and swelling behaviour in cellular natural rubber (NR) vulcanizates. They showed that apparent foam density and crosslink density for NR vulcanizates decreased with increasing blowing agent content. The rubber swelling greatly changed with OBSh, but unaffected by ADC content. Similar behavior was also observed for synthetic rubbers.^{3,4} The mechanical properties of cellular ethylene-propylene rubber (EPDM) usually decreased with increasing blowing agent content and this could be explained by a decrease in crosslink density during foam expansion.³ In rubber composites, the mechanical properties of the foam vulcanizates are dependent on the type, concentration, filler, fiber orientation, and adhesion between the fiber (or filler) and the rubber matrix.^{5,6} Lin et al.⁵ studied microstructure and mechanical properties of nylon 6,6-fiber/NR foam composites with and without surface treatment of the fiber. The results suggested that the addition of nylon-fibers improved the overall

Correspondence to: E. Wimolmala (ekachai.wim@kmutt.ac.th).

Contract grant sponsor: Thailand Research Fund (Medium Projects on Rubber; MPR-2550); contract grant number: RDG5050094.

Journal of Applied Polymer Science, Vol. 114, 2816–2827 (2009)
© 2009 Wiley Periodicals, Inc.

mechanical properties of the rubber foams. The mechanical properties of the rubber composite foams were strongly dependent on the density of the micro-cellular foam, fiber orientation. The relationship between the foam density and mechanical properties was also studied by Kim et al.,⁶ who examined the influences of foaming temperature and carbon black (CB) content on cure behavior and mechanical properties for the NR foams. They found that the densities and tensile strength of the NR foam decreased with increasing curing temperature. Increasing CB content increased the tensile modulus, tensile strength and tear strength, but decreased the elongation at break. Recent literatures show that published articles on the structure-property relationships of expanded single-rubbers are extensively evidenced, but there has been very little attention given to expanded rubber blend and rubber composite systems.

Fly ash (FA) particles obtained from thermal power plant stations has been reported as a natural silica that gave good dynamic properties and compression set when used with appropriate silane coupling agents.^{7,8} According to a previous work,⁸ FA particles contained silica approximately 40–46 wt % with similar silanol groups on its surfaces. Comparing with precipitated silica, FA particles yield superior elasticity. As a result, FA could become alternative reinforcing filler for cellular rubbers, both natural and synthetic rubbers,^{9,10} and rubber blends^{11,12} vulcanizates for gasket and cushion applications.

This article was aimed to extend our works^{7–12} on use of silica-based FA particles in rubber materials. This present work reported cure characteristics, and (mechanical and morphological properties of cellular rubber vulcanizates of natural rubber (NR)) and styrene-butadiene rubber (SBR) blend varying types and contents of chemical blowing agents (OBSh and ADC) and fillers (CB, precipitated silica, silica-based FA particles). The changes in mechanical properties of the foamed NR/SBR vulcanizates were also monitored before and after thermal and weathering ageing. It should be noted that the filler type, ageing conditions, and the mechanical properties tested, which were performed in this work, were designed and selected based on potential applications in thermal insulation, cushions, gaskets, buoyancy and impact sound deadening products.

EXPERIMENTAL

Raw materials

Rubber

NR (NR, STR20) used was supplied by Huay Chuan Co., Ltd., (Bangkok, Thailand). SBR (SBR1712) was supplied by BST Elastomers (Bangkok, Thailand) with a styrene content of 24.5%, 28.8% oil, and 5.7% organic acid.

Fillers

CB (HAF-N330 by Thai Carbon Black Public Co., Ltd., Bangkok, Thailand). The CB had an average particle size of 32 μm . Commercial precipitated silica (Tokusil 233) was designated as PSi and supplied by Tokuyama Siam Silica (Bangkok, Thailand) having an average particle size of 50 μm , pH of 6.8, a bulk density of 0.232 g/cm^3 , and a BET surface area of 128 m^2/g . Silica from FA particles (FASi) was also used as alternative filler in this work. The FA particles were supplied by Mae Moh Power Station of KNR Group Co., Ltd. (Lampang, Thailand) having an average particle size of 125 μm . The characteristics (dimensions, average particle size, shape, and surface area, density, and pH) of the FA particles can be found in elsewhere.^{7,11} According to our previous results^{7,8,11} on chemical compositions of the FA particles, the major component of FA was SiO_2 (46.0%). The FA used had the same functional groups (e.g., silanol and siloxane groups at wave-numbers of around 3400 and 1100 cm^{-1} , respectively) as the commercial silica. The required silica (FASi) content in the FA particles added to the NR/SBR compound was calculated based on the fact that there was 46.0 wt % silica in FA.

Silica-surface treatment

Bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphide (trade name designated as Couplink 89C), $[(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3\text{Si}-(\text{CH}_2)_3-\text{S}_4-(\text{CH}_2)_3-\text{Si}-(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_3]$, was used as a chemical coupling agent for surface treatment of precipitated silica and FA particles. The Couplink 89C was supplied by Behn Meyer Chemical Co. (Bangkok, Thailand). The experimental procedure for surface treatment by Couplink 89C was the same as used for bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si69) which can be found in previous studies.^{8,11} In this work, the Couplink 89C content used was 2.0 %wt of silica.

Chemical blowing agents

Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSh) and modified ADC (Grade Supercell-522), supplied by A.F. Goodrich Chemical Co., Ltd., (Bangkok, Thailand) were used as the chemical blowing agents. According to the suppliers, both blowing agents had the decomposition temperature of around 160°C.

Rubber blending and sample preparation

Compounding and vulcanization of cellular NR/SBR rubber

In this work, the formulations of NR/SBR blend compounds reinforced with CB, precipitated silica and silica-based FA particles in parts per hundred rubber

TABLE I
Vulcanizing Recipes for NR/SBR Vulcanizates

Ingredients	Function	Content (phr)
1. NR : SBR (1 : 1)	Matrix	100
2. Zinc oxide	Activator	5.3
3. Stearic acid	Activator	3.0
4. Mercaptobenzothiazole (MBT)	Accelerator	1.0
5. BHT	Antioxidant	1.0
6. Polyethylene glycol	Activator	5 wt % of silica
7. Filler (silica from FA, silica or CB)	Reinforcing filler	
8. OBSH or ADC	Blowing agent	Varied; 0, 2, 4, 6, 8, and 10
9. Sulfur	Cross-linker	1.5

(phr), are given in Table I. The blend ratio of NR : SBR used was fixed at 1 : 1.¹¹ The compounding process was commenced by masticating the NR/SBR on a laboratory two-roll mill (Yong Fong Machinery Co., Ltd., Samutsakon, Thailand) for 5 min, followed by adding the required vulcanizing agents and blowing agents on the two-roll mill for a further 35 min, the compound being then kept at 25°C with 50% relative humidity prior to further use. The resultant rubber compounds were then compression-molded to a 90% cure with a hydraulic press (LAB TECH Co., Ltd., Bangkok, Thailand) at 170 kg/cm², using a 160°C cure temperature to produce vulcanized NR/SBR blend. It should be noted that the sample configurations (shape and size) were dependent on the type of testing standard used. The cure time used for any individual compound was pre-determined by an Oscillating Disk Rheometer (Model ODR GT 7070-S2, GOTECH Testing Machine, Taiwan) followed ASTM D2084-01 (2001) at a test temperature of 160°C before the vulcanization process proceeded.

Characterizations

Cure characteristics

Cure time values of the NR/SBR compounds were measured using an Oscillating Disk Rheometer (Model ODR GT 7070-S2, GOTECH Testing Machine, Taiwan) at a test temperature of 160°C.

Specific density

Specific density of the cellular NR/SBR vulcanizate was determined according to ASTM D792-68 (1968) using Archimedes water replacement technique.

Mechanical properties

Tensile properties of NR/SBR vulcanizates were monitored in terms of modulus at 200% elongation,

tensile strength, and elongation at break using ASTM D412-03 (2003) with dumbbell-shaped samples, the tests being carried out using the universal testing machine Model Autograph AG-I, Shimadzu (Tokyo, Japan). Tear strength was determined according to ASTM D624-00 (2000) using angle-specimens (die C) and a Shimadzu tear strength testing machine. Both tensile and tear properties used a testing speed of 500 mm/min A hardness durometer (Shore A) Model 475, PTC instruments, (MA) was used for hardness tests in accordance with ASTM D 2240-03 (2003).

Compression set

The test conditions and procedure of compression set testing followed ASTM D395 Method B (under a constant deflection in air). The NR/SBR sample was in a cylindrical disk form, having a diameter of 29 mm and a thickness of 12.5 mm. A space bar of 9.5 mm thick was used to maintain the compression deflection. The original thickness (t_o) of test samples was measured by micrometer. The testing time was conditioned in an oven at 100°C for 22 h before cooled down at room temperature for 30 min and then the final thickness (t_i) of the sample was measured. The percentage compression set can be expressed using eq. (1).

$$\% \text{Compression set} = \frac{t_o - t_i}{t_o - t_n} \times 100 \quad (1)$$

where t_o is the original thickness of the test specimen (mm); t_i is the final thickness of the test specimen (mm); t_n is distance of space bars (mm).

Resilience property

The resilience test was conducted using ASTM D2632-01 (2001), performed on a Wallance Dunlop Tripsometer (H.W. Wallance & Co., Ltd., Kingston, UK).

Heat ageing properties

The effect of heating ageing on the mechanical properties of the NR/SBR filled with CB, FASi, or PSi filler was studied through ASTM D573-04 (2004) at an oven temperature of 70°C for 96 h. The changes in mechanical properties before and after the heat ageing conditions were then evaluated.

Accelerated weathering test

UV and water condensation for the NR/SBR filled with CB, PSi, or FASi fillers were studied using ASTM G154-06 (2006) using a Q-UV apparatus with

TABLE II
Cure Time, Mooney Viscosity and Mechanical Properties of Solid NR/SBR Vulcanizates for Different Concentrations of CB

Properties	CB content (phr)					
	0	20	40	60	80	100
Cure time (min : sec)	9 : 3	12 : 0	11 : 2	10 : 1	9 : 3	9 : 5
Mooney viscosity, ML (1 + 4)100°C	19	19	27	40	63	84
Property, original						
Tensile Modulus at 200% ($\times 10^5$ Pa)	8 $\pm$ 0	17 $\pm$ 0	19 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1	17 $\pm$ 1	13 $\pm$ 0
Tensile strength (MPa)	8 $\pm$ 0	17 $\pm$ 2	19 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1	17 $\pm$ 1	13 $\pm$ 0
Elongation at break (%)	1099 $\pm$ 23	984 $\pm$ 19	769 $\pm$ 12	550 $\pm$ 14	362 $\pm$ 13	220 $\pm$ 9
Tear strength (kN/m)	15 $\pm$ 1	28 $\pm$ 0	48 $\pm$ 0	90 $\pm$ 0	35 $\pm$ 0	31 $\pm$ 0
Hardness (Shore A)	30 $\pm$ 0	41 $\pm$ 0	55 $\pm$ 0	66 $\pm$ 0	78 $\pm$ 0	84 $\pm$ 0
Compression set (%)	45 $\pm$ 1	52 $\pm$ 1	54 $\pm$ 1	55 $\pm$ 2	59 $\pm$ 2	53 $\pm$ 1
Resilience (%)	61 $\pm$ 0	54 $\pm$ 1	45 $\pm$ 1	38 $\pm$ 2	30 $\pm$ 1	28 $\pm$ 1
Abrasion (mm ³)	136	58	40	29	37	36
Property change, after thermal aged 70°C at 96 h						
Tensile Modulus at 200% ($\times 10^5$ Pa)	+2	+5	+11	+19	+27	N/A
Tensile strength (MPa)	-2	-1	+1	0	-2	-1
Elongation at break (%)	-271	-206	-118	-105	-103	-66
Tear strength (kN/m)	+2	+7	-3	-28	+1	-2
Hardness (Shore A)	+2	+2	+2	+3	+3	+3

N/A indicates not obtainable due to pre-mature fracture, and positive (+) and negative (-) values mean increase and decrease as compared with non-aged samples, respectively.

UV-B Neon Fluorescence Lamps emitting spectrum at a wavelength of 313 nm with Cycle 3 at 2 steps. The first step was UV exposure at 70°C for 8 h, and the second step was water condensation at 50°C for 4 h for the total time of 96 h. It should be noted that all the samples were kept and UV-degraded in the UV

apparatus at the same time, the samples being taken out periodically at required UV exposure times for further characterizations. The changes in mechanical properties were monitored before and after the UV and water condensation, the reported results being averaged by at least five determinations.

TABLE III
Cure Time, Mooney Viscosity and Mechanical Properties of Solid NR/SBR Vulcanizates for Different Concentrations of Precipitated Silica

Properties	Silica content (phr)				
	0	10	20	30	40
Cure time (min : sec)	9 : 3	9 : 2	7 : 6	8 : 3	11 : 2
Mooney viscosity, ML (1 + 4) 100°C	19	18	24	39	94
Property, original					
Tensile modulus at 200% ($\times 10^5$ Pa)	8 $\pm$ 0	10 $\pm$ 0	13 $\pm$ 0	28 $\pm$ 0	23 $\pm$ 0
Tensile strength (MPa)	8 $\pm$ 0	9 $\pm$ 1	11 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	17 $\pm$ 1
Elongation at break (%)	1099 $\pm$ 23	968 $\pm$ 30	921 $\pm$ 38	866 $\pm$ 35	880 $\pm$ 28
Tear strength (kN/m)	15 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	19 $\pm$ 1	26 $\pm$ 1	39 $\pm$ 0
Hardness (shore A)	30 $\pm$ 0	34 $\pm$ 0	42 $\pm$ 0	59 $\pm$ 0	57 $\pm$ 0
Compression set (%)	45 $\pm$ 1	51 $\pm$ 1	62 $\pm$ 1	69 $\pm$ 0	65 $\pm$ 2
Resilience (%)	61 $\pm$ 0	67 $\pm$ 0	64 $\pm$ 0	69 $\pm$ 0	65 $\pm$ 2
Abrasion (mm ³)	136	29	29	116	86
Property change, after thermal aged 70°C at 96 h					
Tensile modulus at 200% ($\times 10^5$ Pa)	+2	+6	+5	+6	+8
Tensile strength (MPa)	-2	+2	+3	+1	0
Elongation at break (%)	-271	-243	-101	-101	-180
Tear strength (kN/m)	+2	+13	+11	+4	0
Hardness (shore A)	+2	+5	+3	+5	+4

Positive (+) and negative (-) values mean increase and decrease as compared with non-aged samples, respectively.

TABLE IV
Cure Time, Mooney Viscosity and Mechanical Properties of Solid NR/SBR Vulcanizates for Different Concentrations of Silica in FA

Properties	Silica in FA content (phr)				
	0	10	20	30	40
Cure time (min : sec)	9 : 3	11 : 0	10 : 1	10 : 0	10 : 3
Mooney viscosity, ML (1 + 4) 100°C	19	19	21	30	29
Property, original					
Tensile modulus at 200% ($\times 10^5$ Pa)	8 $\pm$ 0	10 $\pm$ 0	13 $\pm$ 0	14 $\pm$ 0	16 $\pm$ 0
Tensile strength (MPa)	8 $\pm$ 0	6 $\pm$ 0	6 $\pm$ 1	7 $\pm$ 0	6 $\pm$ 0
Elongation at break (%)	1099 $\pm$ 23	878 $\pm$ 34	766 $\pm$ 37	816 $\pm$ 16	686 $\pm$ 18
Tear strength (kN/m)	15 $\pm$ 1	14 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1	15 $\pm$ 1
Hardness (shore A)	30 $\pm$ 0	33 $\pm$ 0	40 $\pm$ 0	45 $\pm$ 0	49 $\pm$ 0
Compression set (%)	45 $\pm$ 1	48 $\pm$ 1	49 $\pm$ 1	52 $\pm$ 3	52 $\pm$ 1
Resilience (%)	61 $\pm$ 0	72 $\pm$ 1	71 $\pm$ 0	70 $\pm$ 0	65 $\pm$ 1
Abrasion (mm ³)	136	116	112	91	92
Property change, after thermal aged 70°C at 96 h					
Tensile modulus at 200% ($\times 10^5$ Pa)	+2	+2	+1	+4	+4
Tensile strength (MPa)	-2	+3	+1	-1	-1
Elongation at break (%)	-271	-46	-28	-184	-186
Tear strength (kN/m)	+2	+4	+4	+5	+5
Hardness (shore A)	+2	+4	+2	+3	+2

Positive (+) and negative (–) values mean increase and decrease as compared with non-aged samples, respectively.

SEM studies

The foam structures and distributions of NR/SBR samples prepared by razor cut surfaces were viewed using a JEOL (JSM-5800LV) Scanning Electron Microscope (SEM) at 10 kV accelerating voltage.

whereas that for PSi and FASi were 40 and 30–40 phr, respectively. At the optimum concentrations of the three fillers, CB yielded the best reinforcing performance, especially for the tensile and tear strengths as expected. However, the compression set for the FASi filled NR/SBR vulcanizates was better than that for CB- and PSi-filled vulcanizates. This

RESULTS AND DISCUSSION

Solid NR/SBR blend vulcanizates

This part was studied to seek the optimum concentrations for CB, precipitated silica (PSi), and silica from FA (FASi) using solid NR/SBR blend ratio of 1 : 1. These optimum concentrations of the three fillers will then be used when examining the properties of cellular NR/SBR blend vulcanizates. Tables II–IV show the effect of filler content on the cure and mechanical properties of solid NR/SBR vulcanizates for CB (0–100 phr), PSi (0–40 phr), and FASi (0–40 phr) fillers, respectively. For all fillers, the Mooney viscosities appeared to increase with increasing filler contents, the effect being less pronounced for FASi filler. This was expected because the FASi particles were larger in size and had smaller surface area and a weaker filler-filler interaction as compared with the PSi particles. Cure times in all cases slightly changed within 1–2 minutes. In terms of mechanical properties (especially the tensile and tear strengths) and their changes after thermal ageing, it was found that the optimum filler content to be added in the NR/SBR vulcanizates for CB were 40–60 phr

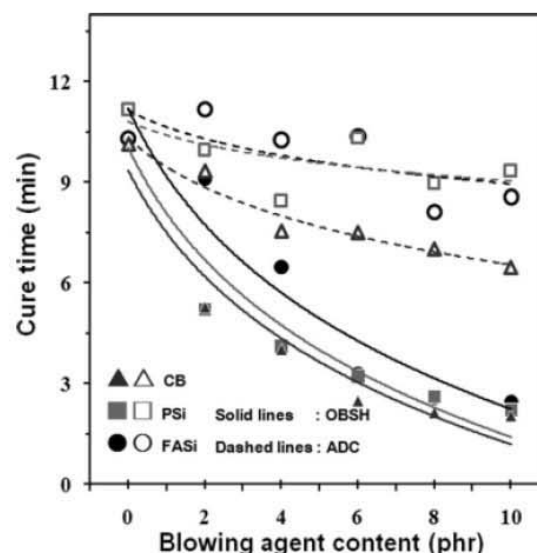


Figure 1 Effect of blowing agent content on cure time for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi (Solid line: OBSh and Dashed line: ADC).

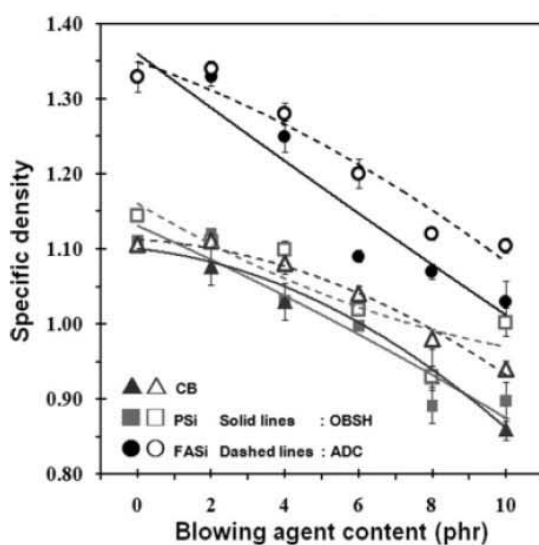


Figure 2 Specific density for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi as a function of blowing agent loading (Solid line: OBSH and Dashed line: ADC).

finding was in line with our previous work¹¹ stating the improved elastic properties of the NR/SBR blend through use of FA particles as extending filler.

It should be noted that the results in Tables II–IV were given in order to select the optimum contents of the three fillers used in solid NR/SBR vulcanizates, and therefore, the discussion to the results were not fully given due to that this work focused on the properties of the cellular NR/SBR blend vulcanizates.

Cellular NR/SBR vulcanizates

Cure time properties

In this section, fixed filler loading at 40 phr for CB, PSi, and FASi fillers was used for property comparison purposes in cellular NR/SBR vulcanizates, which were added with different concentrations of two chemical blowing agents (OBSH and ADC). Figure 1 shows the effect of blowing agent contents on cure time of NR/SBR blend vulcanizates for OBSH and ADC. It was found that the cure time decreased with increasing blowing agent content. This was because the blowing agents used exhibited exothermic phenomenon when decomposed within the rubber blend structure.^{13,14} This suggested that there was an additional heat occurring in the rubber compound during the vulcanization process, and this would probably accelerate the crosslinking reaction,

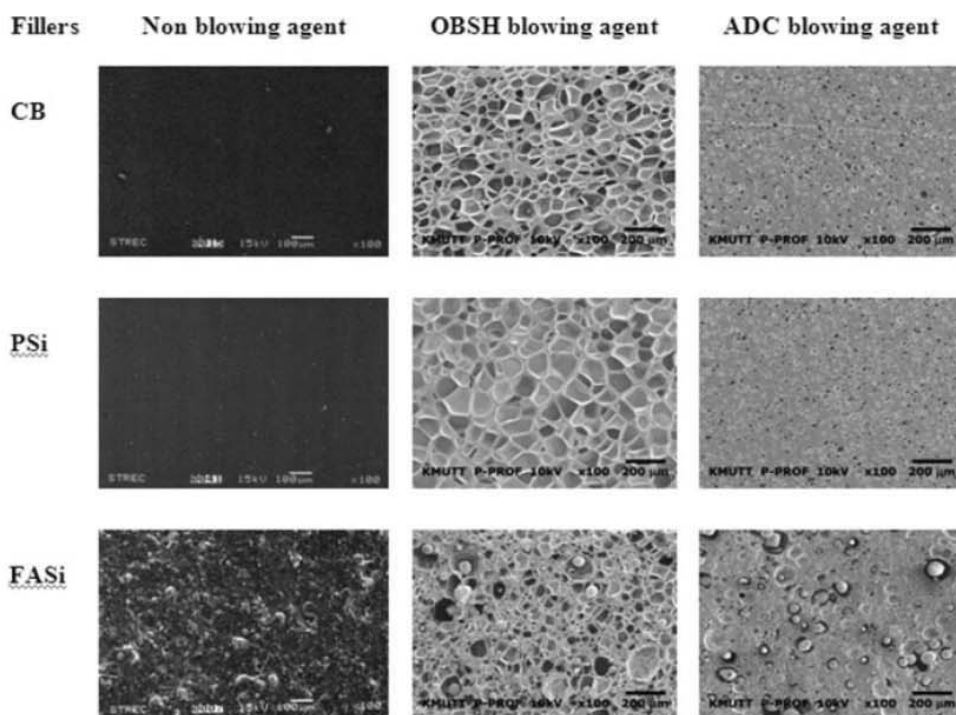


Figure 3 SEM micrographs for NR/SBR vulcanizates with CB, PSi, or FASi using with and without OBSH or ADC blowing agent at 6 phr ($\times 100$).

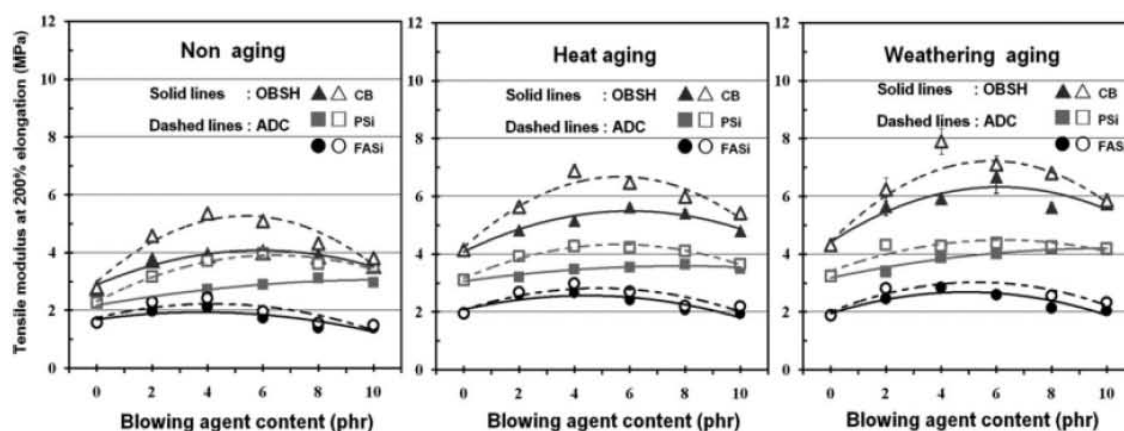


Figure 4 Effects of OBSH and ADC contents and ageing on tensile modulus at 200% elongation for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi.

and thus reduced the cure time. It was also observed that the ADC agent showed a lesser drop in the cure time than the OBSH; i.e., the vulcanizates with OBSH had a faster curing than those with ADC. It was evident¹⁵ that ADC agent could consume the zinc oxide acting as the activator in the rubber formulations to achieve a complete decomposition. If this was the case, the amount of zinc oxide for the crosslinking reaction of the vulcanizates with ADC agent would reduce as compared with OBSH agent and this caused the slower curing. When considering the effect of filler type, it was found that the cure time for CB filled NR/SBR vulcanizates had the lowest cure time as compared to that for PSi and FASi filled vulcanizates, this being very obvious for ADC case. This was because the CB itself is slightly alkaline (pH of around 7–8) with low oxygen content, and this may have an acceleration effect on the vulcanization reaction.^{16,17}

Specific density and morphology

Specific density is one of the important characteristics and is related to cell structure and the overall weight of the foamed products. Figure 2 shows the specific density of the cellular NR/SBR vulcanizates with ADC and OBSH agents. It was noticeable that the specific density gradually decreased with increasing OBSH and ADC contents as expected due to production of gas phases in the rubber blend structure. The vulcanizates with FASi filler had the highest specific density. This can be explained by bulk densities of the three fillers used. The density of FASi has been reported to be around 2.2 g/cm³ whereas those of CB and silica are approximately 1.8 and 1.9 g/cm³, respectively.¹⁸ The NR/SBR vulcanizates with OBSH agent had slightly lower density than those with ADC, this being the case for all fillers used. This could be explained using the scanning

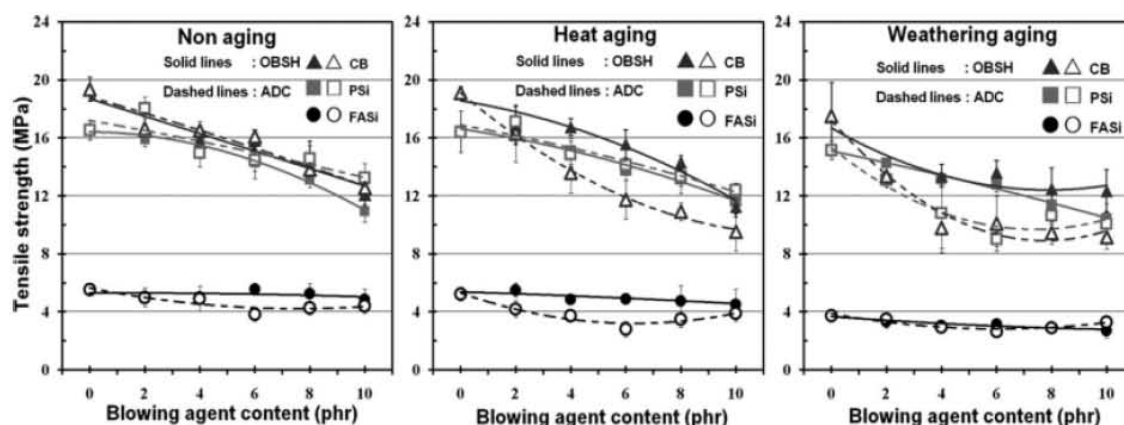


Figure 5 Effects of OBSH and ADC contents and ageing on tensile strength for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi.

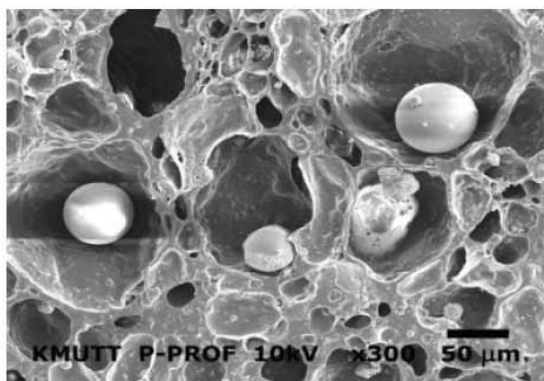


Figure 6 SEM micrographs for FASi filled NR/SBR vulcanizates with OBSH blowing agent at 6 phr, displaying bubble coalescence around FA particle ($\times 300$).

electron micrographs shown in Figure 3. It was found that the NR/SBR vulcanized foams produced by OBSH and ADC agents in this work had closed-cell structures. The vulcanizates with OBSH agent has greater size of foam cells as compared to those with ADC agent. The greater cell size by OBSH resulted from better dispersion and faster decomposition to produce gas phases of the OBSH as compared to ADC in the rubber matrix. This view was supported by Annicelli and Dick.¹⁵ Figure 3 also shows that the cell sizes of the vulcanizates by the OBSH were relatively smaller than those by ADC, this being in good agreement with previous work by Sombatsompop and Lertkamolsin.²

Mechanical properties and heat-weathering ageing

Figure 4 shows tensile modulus at 200% elongation for the cellular NR/SBR vulcanizates reinforced by

CB, PSi, and FASi before and after heat and weathering ageing. In non-aged samples, the tensile modulus of the foamed vulcanizates increased with increasing blowing agent contents up to 6 phr and started to drop at higher loadings, except for the PSi filler. The increases in tensile modulus by the presence of the blowing agents were associated with closed-cell structures of the vulcanizates¹⁹ whereas the decreases in the modulus at higher blowing agent loadings were due to gas containment limit.²⁰ For a given blowing agent content, the foamed vulcanizates with OBSH had lower tensile modulus than those with ADC due to greater number of foam cells in the NR/SBR structures as mentioned earlier. When considering the effect of filler type, CB gave the vulcanizates with highest tensile modulus due to the reinforcement effect and rigidity of CB.⁶ After heat and weathering conditions, the tensile moduli for the foamed vulcanizates with all three fillers tended to increase due to increases in crosslink densities in the vulcanizates as a result of a post-curing effect.¹¹ The effect of thermal and weathering conditions seemed to be more pronounced in the NR/SBR vulcanizates with CB. This may be due to that the chemical interaction between CB and the rubber molecules were more sensitive to the crosslinking process.¹

Figure 5 shows the effect of blowing agent content of OBSH and ADC on tensile strength of filled NR/SBR vulcanizates before and after heat and weathering ageing. It can be seen that the tensile strengths of CB and PSi filled NR/SBR vulcanizates for all blowing agent contents were much higher than those of FASi filled NR/SBR vulcanizates. This could be explained by the particle size and adhesion effects. As already stated in Experimental section, the particle size of the FASi was the largest and this would attribute to lower surface area for molecular

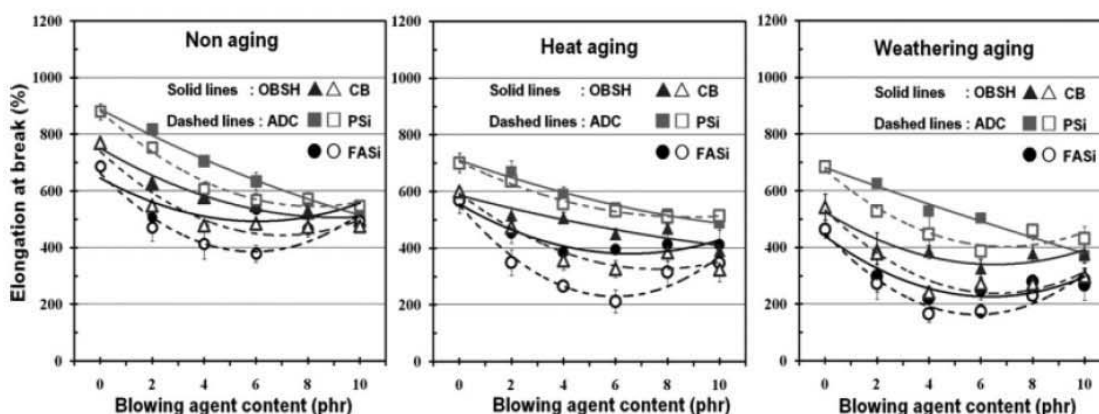


Figure 7 Effects of OBSH and ADC contents and ageing on elongation at break for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi.

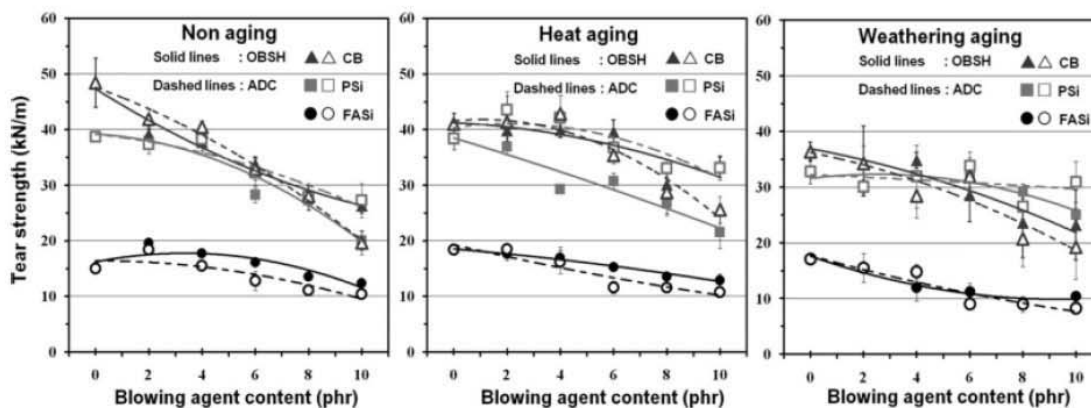


Figure 8 Tear strength for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi as a function of blowing agent loading.

interaction with the rubber although the FASi were chemically treated. In addition, it was evident in our previous work²¹ that the FASi had broken into smaller pieces during the compounding process and these smaller pieces of the FASi filler were untreated during the filler surface treatment, and therefore resulted in particle aggregation and an increased filler-filler interaction. Another possible reason in the low tensile strength of the foamed vulcanizates with FASi was a coalescence of the gas phase around the ash particles shown in Figure 6. For the effect of blowing agent content, it was observed that the tensile strengths of CB and PSi filled NR/SBR vulcanizates decreased progressively with increasing blowing agent contents as expected because the rubber matrix phase to resist the tensile force had been reduced or replaced by the presence of gas phases. The higher the blowing agent content the greater the gas phases, and thus decreased tensile strength. After heat and weathering ageing, the tensile strength

slightly decreased. This may be due to two concurrent reactions of molecular degradation and crosslinking desulphuration, the latter reaction being referred to as a crosslink transformation from polysulphidic to mono or di-sulphidic crosslinks.¹ However, it was interesting to note that the effect of heat and weathering ageing was more sensitive and pronounced to the decrease in tensile strength for CB reinforced NR/SBR vulcanizates for ADC blowing agent system. This was postulated to be associated with the incomplete decomposition of the ADC during the initial crosslinking process, as compared to OBSH as mentioned earlier. Therefore, un-reacted (non-decomposed) ADC radicals may have resulted in further degradation of rubber molecules, and thus decreased tensile strength. The explanations for the changes in tensile strength in Figure 5 could also be used to describe the changes in elongation at break and tear strength in Figures 7 and 8, respectively.

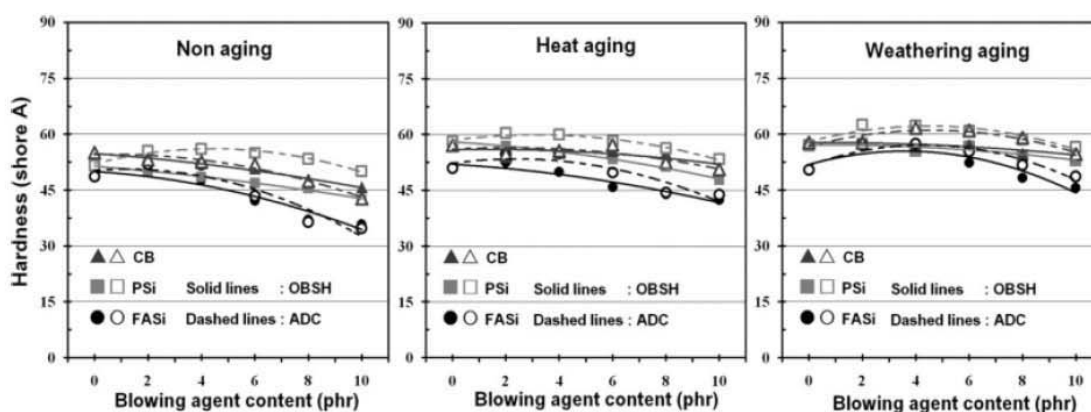


Figure 9 Effects of OBSH and ADC contents and ageing on hardness for NR/SBR vulcanizates filled with CB, PSi, or FASi.

TABLE V
Effects of OBSH and ADC Contents on Compression Set for NR/SBR Vulcanizates Filled with CB, PSi, or FASi
(N/A: Could Not Be Molded)

Chemical blowing agent type	Fillers	Compression set (%)					
		Blowing agent content (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	FA	52.3	50.2	56.4	66.0	N/A	N/A
	Silica	58.4	76.0	72.7	74.4	N/A	N/A
	CB	53.5	56.4	69.0	69.8	N/A	N/A
ADC	FA	52.3	52.6	59.9	63.9	N/A	N/A
	Silica	58.4	72.5	75.1	80.8	80.9	78.3
	CB	53.5	52.0	55.1	56.1	56.2	58.0

Figure 9 shows hardness results of the cellular NR/SBR vulcanizates as a function of blowing agent content. The trend and the explanations to the hardness results were very similar to those of the tensile modulus for both non-aged and aged rubber foams.

A slight difference in the modulus and hardness results was caused by the fact that the hardness measured the rigidity at the surface (solid) whereas the modulus had taken account the stiffness of the whole sample (solid and gas phases).²²

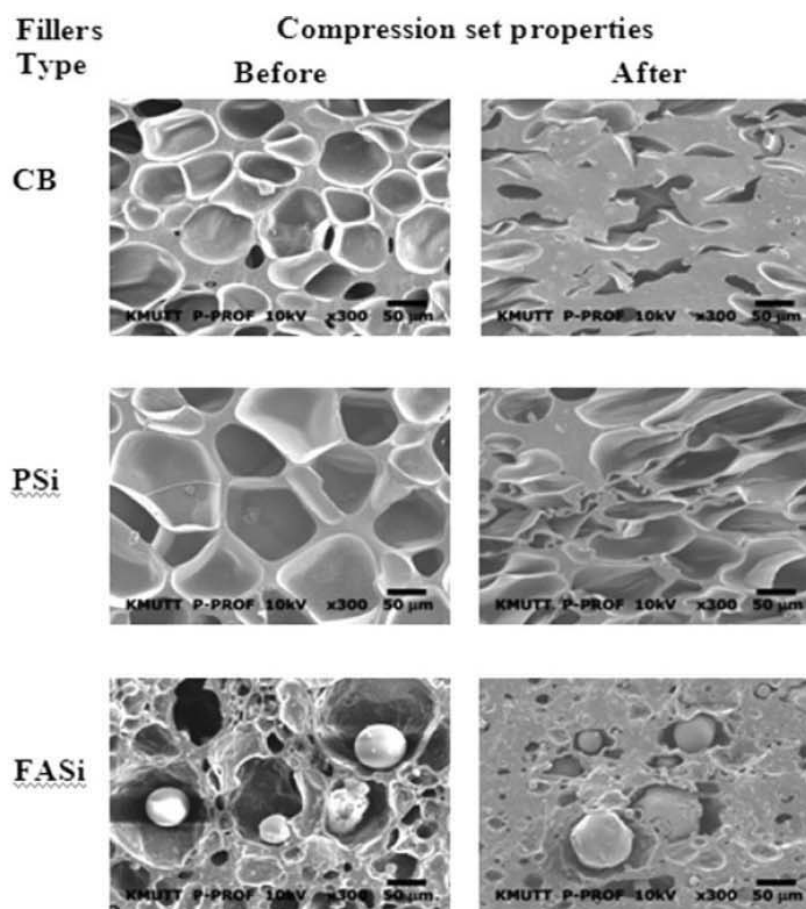


Figure 10 SEM micrograph of the foamed NR/SBR samples with 6phr OBSH before and after compression set testing.

TABLE VI
Effects of OBSH and ADC Contents on Resilience for NR/SBR Vulcanizates Filled with CB, PSi, or FASi

Chemical blowing agent type	Fillers	Resilience (%)					
		Blowing agent content (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	FA	65.2	62.8	64.1	63.3	63.4	63.2
	Silica	55.5	56.5	61.3	61.7	65.5	64.0
	CB	45.0	60.5	62.1	64.3	64.7	63.3
ADC	FA	65.2	72.4	74.7	68.8	65.9	63.6
	Silica	55.5	58.9	61.9	62.6	60.3	60.8
	CB	45.0	63.8	66.3	65.1	63.9	63.2

Elastic response of cellular NR/SBR

Table V shows effects of OBSH and ADC loadings on compression set for NR/SBR foamed vulcanizates loaded with CB, PSi, or FASi filler. As mentioned in the Experimental section that the vulcanizate sample used for assessing the compression set was cylindrical and had a diameter of 29 mm with 12.5 mm thick. With this sample configuration, there was a limit for OBSH loadings at 6 phr in all fillers and for ADC loadings at 6 phr only for FASi filler to obtain the foamed vulcanizates. Above these loadings, the foam samples could not be moulded. Considering the effect of filler type in OBSH system, it was found that the lowest compression, which corresponded to the best elastic recovery, was obtained by FASi filler whereas the poorest elastic recovery was given by PSi filler, especially at low blowing agent contents. For the ADC system, the FASi and CB exhibited similar compression set properties. Increasing the OBSH and ADC loadings reduced the elastic recovery. The decreases in elastic recovery of the NR/SBR vulcanizates could be explained using selected SEM micrographs (at 6 phr OBSH) as shown in Figure 10 which suggested that, after compression set testing there was a bubble-collapse or a breaking of the cell structures. This resulted in gas diffusion through the cell walls and lost the abilities to recover. Figure 10 also indicates more severe bubble-collapses occurring in the case of PSi. Effects of OBSH and ADC loadings on resilience for NR/SBR vulcanizates with CB, PSi, or FASi filler are given in Table VI. It was interesting to note that the elastic properties of solid NR/SBR vulcanizates with FASi were much better than those with CB and PSi fillers, but when foamed, the resilience properties for all fillers were indifferent. It suggested that the magnitudes of resilience changes for the vulcanizates with CB and PSi were greater than those with FASi by the presence of closed-cell foam structures. This was the case because the number of gas phases (foam structures) in the vulcanizates with CB and PSi were relatively greater. Taking the compression set and resilience results, it was suggested that the optimum concen-

tration of OBSH and ADC to be used for NR/SBR vulcanizates for cushion and gasket applications were 4 phr.

CONCLUSIONS

The cure characteristics, mechanical, and morphological properties of filled NR/SBR vulcanizates were studied through the effects of additions of OBSH and ADC blowing agents at various concentrations. Closed-cell structures of NR/SBR blend were obtained in all cases. The OBSH was more effective in reducing the cure time of the NR/SBR vulcanizates than the ADC. The mechanical properties for NR/SBR vulcanizates with CB were higher than those with precipitated silica and silica-based FA particles. The specific density of the NR/SBR blend progressively decreased with increasing OBSH and ADC contents. Tensile modulus and hardness increased after experiencing thermal ageing and weathering whereas the tensile strength, ultimate elongation, and tear strength reduced slightly after experiencing the heat and weathering ageing. The optimum concentration of OBSH and ADC to be used for NR/SBR vulcanizates was 4 phr. The elastic recovery for cellular NR/SBR vulcanizates decreased with increasing OBSH and ADC contents. For a given blowing agent content, the elastic recovery with silica-based FA particles was better than with CB and precipitated silica. The resilience properties for cellular NR/SBR vulcanizates increased with increasing blowing agent content.

References

1. Roberts, A. D. *Natural Rubber Science and Technology*; Oxford University Press: New York, 1990.
2. Sombatsompop, N.; Lertkamolsin, P. *J Elast Plast* 2000, 32, 311.
3. Yamsaengsung, W.; Sombatsompop, N. *J Macromol Sci B* 2008, 47, 967.
4. Eraki, M. H. El; Lawindy, A. M. Y. El; Hassan, H. H.; Mahmoud, W. E. *Polym Degrad Stab* 2006, 91, 1417.
5. Lin, G.; Zhang, X. J.; Liu, L.; Zhang, J. C.; Chen, Q. M.; Zhang, L. Q. *Eur Polym J* 2004, 40, 1733.



6. Kim, J. H.; Koh, J. S.; Choi, K. C.; Yoon, J. M.; Kim, S. Y. *J Ind Eng Chem* 2007, 13, 198.
7. Sombatsompop, N.; Thongsang, S.; Markpin, T.; Wimolmala, E. *J Appl Polym Sci* 2004, 93, 2119.
8. Thongsang, S.; Sombatsompop, N. *Polym Compos* 2006, 27, 30.
9. Thongsang, S.; Sombatsompop, N. *J Macromol Sci Polym Phys* 2007, 46, 825.
10. Sombatsompop, N.; Wimolmala, E.; Sirisinha, C. *J Appl Polym Sci* 2008, 110, 2877.
11. Sombatsompop, N.; Wimolmala, E.; Markpin, T. *J Appl Polym Sci* 2007, 104, 3396.
12. Kantala, C.; Wimolmala, E.; Sirisinha, C.; Sombatsompop, N. *Polym Adv Tech* 2009, 20, 448.
13. Chovancova, V.; Pekarovicova, A.; Fleming, P. D. *Hot Melt Inks for 3D Printing*, International Conference on Digital Fabrication Technologies: 2005, p 143.
14. Hurnik, H.; Gachter, R.; Muller, H. *Plastics Additives*; Hanser Publishers: New York, 1990.
15. Annicelli, R. A.; Dick, J. S. *Rubber Technology Compounding and Testing for Performance*; Hanser Publishers: Munich, 2001.
16. Lewis, C.; Buanpa, R.; Kiatkamjornwong, S. *J Appl Polym Sci* 2003, 90, 3059.
17. Ansarifar, A.; Lim, M. P.; Nijhawan, R. *Int J Adhes Adhes* 2004, 24, 9.
18. Wypych, G. *Handbook of Fillers*; Chem Tec Publishing: Canada, 1999.
19. Guriya, K. C.; Tripathy, D. K. *J Appl Polym Sci* 1996, 62, 117.
20. Thomas, N. L.; Eastup, R. P.; Quirk, J. P. *Plast Rubb Compos Proc Appl* 1997, 26, 47.
21. Thongsang, S.; Sombatsompop, N.; Ansarifar, A. *Polym Adv Tech* 2008, 19, 1296.
22. Groover, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*; John Wiley & Sons: New York, p 39.



ตอบข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
สัญญาเลขที่ RDC5050094
โครงการ “ayangseeludlakarajatsadomsangthammaditkanyangeseeor”
ผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก: เสริมแรงโดยผงเถ้าลอย พงชลิโก และผงขี้เถ้า”
โดย ผศ. เอกชัย วิมลมาลา และคณะ

ลำดับที่	ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
1.1	นักวิจัยยังไม่ได้แก้ไขตามข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะรายงานครั้งที่ 2 ของผู้ทรงคุณวุฒิอีกหลายส่วน โดยเฉพาะคุณภาพของรายงาน	คณะวิจัยฯ ทำการแก้ไขการใช้ค่าตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ ดังนี้ มอดูลัสที่การยืดตัว 200% (Tensile modulus at 200% elongation) แทนคำว่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus)
1.2	การเขียนรายงานการใช้ค่าทางเทคโนโลยีายังไม่ได้แก้ไขทั้งหมดตามที่ได้ชี้แจงมา ควรทบทวนทั้งหมด เช่น “Modulus” ปกติทั่วไปในอุตสาหกรรมยางใช้มอดูลัส ระบุเปอร์เซ็นต์การยืด เช่น Modulus ที่ 100% หรือ 300%	โปรดพิจารณาในหน้าที่ 67 และ 97 ของรายงานฉบับสมบูรณ์
1.3	การรายงานค่า Mooney Viscosity (MV) ของทั้ง NR และ SBR ที่ต่ำมาก แสดงว่า เป็นค่าที่ได้จากการ Masticate เหนื่อน ดังนั้น จึงควรระบุ MV ของยางตอนเริ่มต้นก่อนการ Masticate	ค่า Mooney Viscosity (MV) ของ NR และ SBR เป็นค่าที่ได้จากการ Masticate และผสมกับสารเคมียางแล้ว และคณะวิจัยฯ ได้ระบุ MV ของยางตอนเริ่มต้นก่อนการ Masticate ในรายงานฉบับสมบูรณ์ โปรดพิจารณาในหน้าที่ 40 และ 64
1.4	รายงานค่าค่าหลังการบ่มแรง สมบัติจึงกลเพิ่มขึ้นน่าจะมีความหมายว่า ยาง Undercure	ผลของสมบัติจึงกลของยางที่เพิ่มขึ้น เป็นค่าหลังจากการอบสุกยางที่มากกว่า 90% ตามที่วัดได้จากเครื่อง ODR โปรดพิจารณาในหน้าที่ 67 และ 100 ของรายงานฉบับสมบูรณ์



ลำดับที่	ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
1.5	นักวิจัยมีการศึกษาอย่างเป็นระบบแต่มีบางเรื่องที่อาจเข้าใจคลาดเคลื่อน ทำให้การแปลผล/อภิปราย น่าจะไม่สอดคล้องกับทางวิชาการ โดยเฉพาะเรื่องค่า Compression set	ผลจากการวิจัย ค่า Compression set พบว่า ยางผสมเมื่อเติมสารเติมแต่งผงถ่านลอมมีค่าการคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับยางผสมที่เติมผงซิลิกาและผงเขม่าดำ โปรดพิจารณาในตารางที่ 4.15 หน้า 106 ของรายงานฉบับสมบูรณ์
1.6	หน้าที่ 50 ตารางที่ 3.3 และหน้าที่ 53 ตารางที่ 3.5 นักวิจัยเติม Zinc Oxide (ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยานักวิจัยไม่ได้รับการเติมกรดเตตระคัลควายไม่ทราบว่าเติมลงไปด้วยหรือไม่	ในงานวิจัยนี้มีการเติมกรดเตตระคัลควายในยางทุกสูตร ซึ่งคณะวิจัยฯ ทำการแก้ไขเพิ่มเติมเรียบร้อยแล้ว โปรดพิจารณาในตารางที่ 3.3 หน้า 50 และในตารางที่ 3.5 หน้า 53 ของรายงานฉบับสมบูรณ์
1.7	หน้าที่ 65 ตารางที่ 4.3 ควรตรวจสอบค่า Mooney Viscosity (MV) ของ NR ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง เท่ากับ 7.1 และ ค่า Mooney Viscosity (MV) ของยางผสม NR/SBR ที่ 1:1 และเติมผงซิลิกา 40 phr เท่ากับ 94.4	ค่า Mooney Viscosity (MV) ของ NR เป็นค่าที่ผ่านการ Masticate และผสมกับสารเติมแต่งแล้ว ส่วนข้อมูลค่า Mooney Viscosity (MV) ของยางผสม NR/SBR ที่ 1:1 ที่เติมผงซิลิกา 40 phr ที่มีค่าสูงมากนั้น อาจมีข้อผิดพลาดจากการทดลอง ดังนั้น นักวิจัยขอแจ้งผลการทดลอง Mooney Viscosity เท่ากับ 94 ออก โปรดพิจารณาในหน้าที่ 65, 82 และ 84 ของรายงานฉบับสมบูรณ์
1.8	หน้าที่ 81 ตารางที่ 4.6 “รูปแบบยางเนื้อตัน” หมายความว่าอย่างไร และควรตรวจสอบค่า Mooney Viscosity (MV) ที่ ซิลิกา 40 phr ซึ่งรายงานไว้เท่ากับ 94 รวมทั้ง ค่าความแข็ง (Shore A) เท่ากับ 57 และค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุในทุกๆ การเติมซิลิกาเกรดการค้า	ยางเนื้อตันในงานวิจัยนี้ นักวิจัยสื่อความหมายไปถึงยางที่ไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง ซึ่งคณะวิจัยฯ ทำการขยายความและระบุเพิ่มเติมในหน้าที่ 45, 62, 81-83 และ 85 ของรายงานฉบับสมบูรณ์ ส่วนค่าความแข็ง (Shore A) เท่ากับ 57 ข้อมูลถูกต้องแล้ว และค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุของยางที่เติมซิลิกาเกรดการค้า คณะวิจัยฯ แก้ไขให้ถูกต้องแล้ว



ลำดับที่	ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
1.9	หน้าที่ 95 รูปที่ 4.32 นั้น ผงเขม่าดำ 40phr เป็นสารเติมแต่งให้หรือไม่	ในรูปที่ 4.32 มีการใช้สารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด คือ ผงถั่วลันเตา ผงชิลิกา และผงเขม่าดำที่ 40phr โดยระบุเพิ่มเติมรายละเอียดในรูปแล้วในหน้าที่ 95 ของรายงานฉบับสมบูรณ์
1.10	หน้าที่ 82 ค่าความแข็งแรงของพองยาง ไม่น่าจะเป็น Shore A เพราะวิธีทดสอบมีต่างหาก	คณะวิจัยฯ ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงโดย Shore A เป็นวิธีที่เหมาะสมแล้วเนื่องจากชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปไม่ได้มีความอ่อนมาก อีกทั้งที่ผิวของชิ้นงานมีลักษณะที่เรียบเชลล์ปัดมีการเกิดเป็นร่องเฉพาะภายในชิ้นงานเท่านั้น
1.11	หน้าที่ 106 ตารางที่ 4.15 ต้องระบุว่า การเปลี่ยนแปลง AfterAging (%) นั้นเป็นค่า Max. หรือ Min. ด้วย ไม่งั้นนั้น จะไม่สื่อความหมายแต่อย่างใดและต้องตรวจสอบหน่วยของการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนการกระดอน การเร่งกลับ การอัดตัวที่จุดขาด เปอร์เซนต์การยืดตัว	คณะวิจัยฯ ได้ทำการเพิ่มความหมายของเครื่องหมายในหมายเหตุด้านล่างตาราง โดยที่เครื่องหมาย (+) หมายถึง สมบัติของยางที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งสภาวะ และเครื่องหมาย (-) หมายถึง สมบัติของยางที่ลดลงหลังการบ่มเร่งสภาวะ
1.12	หน้าที่ 108 บรรทัดที่ 7 “พบว่ายางพองน้ำมีสมบัติการคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัด...” น่าจะเข้าใจความหมายผิด เพราะในตารางแสดงค่าสูงซึ่งเท่ากับ 1 ไม่ได้	โปรดพิจารณาในหน้าที่ 81-83 และ 107 ของรายงานฉบับสมบูรณ์ คณะวิจัยฯ หมายถึง ยางพองน้ำที่เติมสารเติมแต่งแต่ละชนิด พบว่ายางผสมเมื่อเติมสารเติมแต่งถั่วลันเตามีค่าสมบัติการคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางผสมที่เติมผงชิลิกาและผงเขม่าดำ
1.13	หน้าที่ 114 ตารางที่ 5.2 นั้นหมายความว่าผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการทดสอบทางกายภาพ ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยางมีเพียงรายการเดียว คือการทดสอบการกระดอน	โปรดพิจารณาในตารางที่ 4.5 หน้าที่ 106 และหน้าที่ 108 ของรายงานฉบับสมบูรณ์ ในตารางที่ 5.2 มีรายการที่ทดสอบจากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยางมีเพียงรายการเดียว คือการทดสอบการกระดอน



ลำดับที่	ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ
1.14	การทดสอบสมบัติบางส่วนจากห้องปฏิบัติการภายนอกควรเอาใจใส่ผลการทดสอบที่ได้ และวิเคราะห์ว่าสมเหตุสมผลหรือไม่ก่อนดำเนินการต่อ และควรตรวจสอบในส่วนที่ดำเนินการเองว่า เตรียมตัวอย่างทดสอบเหมาะสมหรือถูกต้องหรือไม่ เช่น ค่า Mooney Viscosity (MV)STR20 ต่ำมาก และ Mooney Viscosity ยางผสมซิลิกา จาก 30 ไปเป็น 40phr แต่ Mooney Viscosity สูงขึ้นมาจาก 39 ไปเป็น 94 (หน้าที่ 42 ตารางที่ 4.3)	คณะวิจัยฯ รับผิดชอบไปพิจารณา
1.15	รายงานวิจัยควรเขียนให้เข้าใจง่ายเพราะงานทดลองครั้งนี้ไม่มีอะไรซับซ้อนผสมสารตัวเดิมกับสารเกิดฟองแล้วทดสอบสมบัติถ้ามีภาพโครงสร้างของยางฟองก็จะทำให้เข้าใจง่ายขึ้น หนึ่งผลงานนี้เป็นเพียงผลการทดลองสูตรผสมที่ไม่มีประเด็นวิจัยใหม่ๆ	จากการสืบค้นงานวิจัยที่มีในฐานข้อมูลของการศึกษาอย่างฟองน้ำที่เดิมสารเติมแต่งโดยเฉพาะยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่เดิมสารเติมแต่งฟองแล้ว ยังไม่มีปรากฏ
1.16	หน้าบทคัดย่อหายไป	คณะวิจัยฯ ทำการเพิ่มเติมหน้าบทคัดย่อแล้ว โปรดพิจารณาในหน้าที่ ๗-๗ ของรายงานฉบับสมบูรณ์
1.17	เอกสารอ้างอิงที่ระบุควรกำกับด้วยหน้าที่อ้างอิงด้วยทุกรายการมิฉะนั้นจะยากต่อการค้นคว้าต่อ เพราะหนังสือที่อ้างอิงบางเล่มที่จำนวนหน้ามาก	คณะวิจัยฯ ทำการเพิ่มเติมหน้าที่เอกสารอ้างอิงแล้ว โปรดพิจารณาในหน้าที่ 121-126 ของรายงานฉบับสมบูรณ์