



บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองทั้งหมดในภาพรวม และลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1

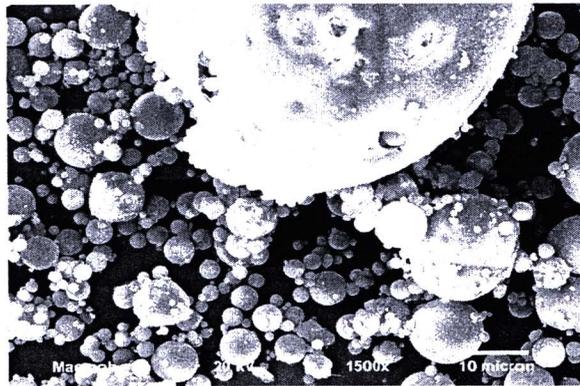


รูปที่ 4.1 ลำดับในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

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 แต่เถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่มากมีความพรุนตัวสูง ซึ่งแต่ละอนุภาคของเถ้าลอยประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน [3-4]

4.1.2 การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

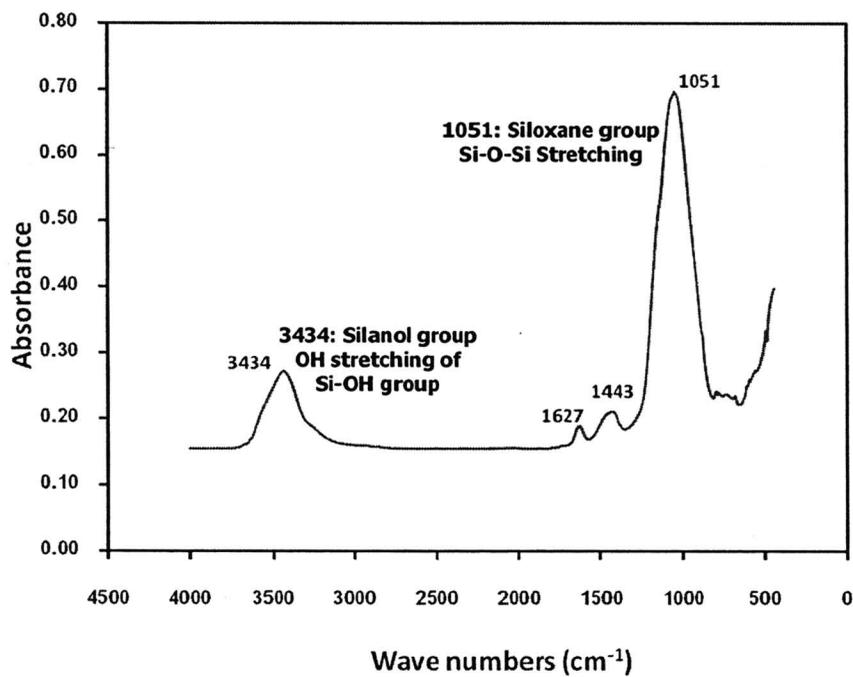
การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer พบว่า เถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก และมีส่วนประกอบของกลุ่มโลหะออกไซด์ ที่ปริมาณต่างๆ ในเถ้าลอย ดังแสดงตารางที่ 4.1



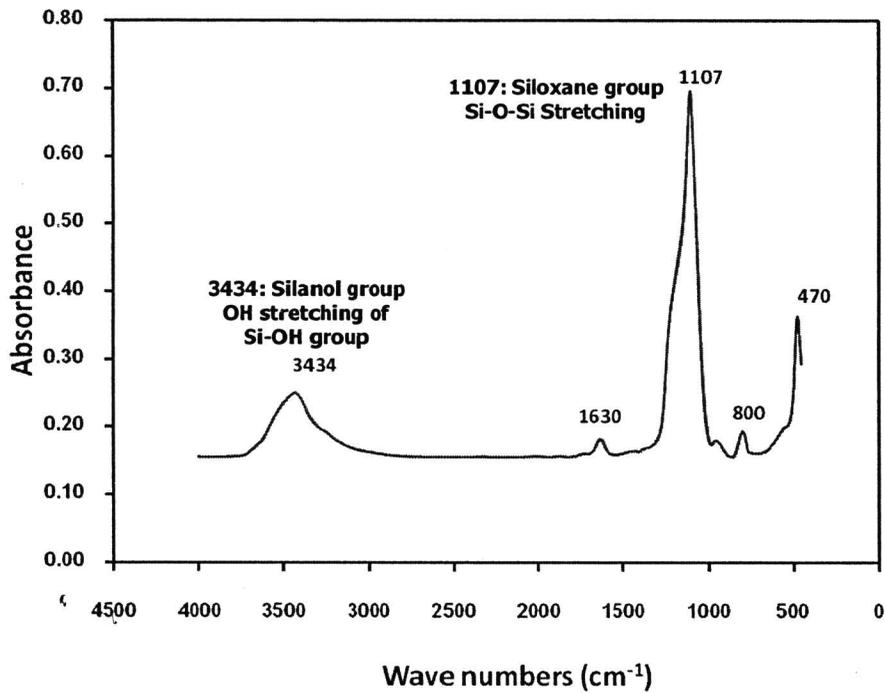
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของถ้ำล่อยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

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 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของถ้ำล่อยและซิลิกาเกรดการค้า

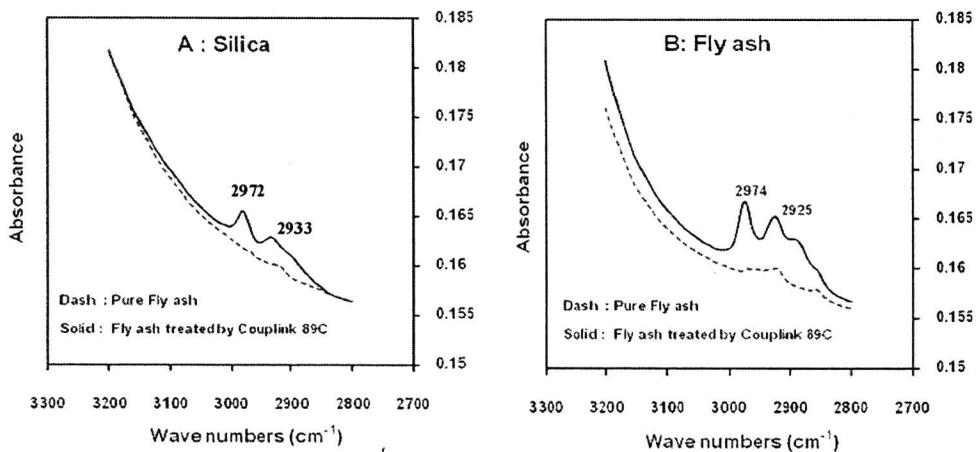


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของถ้ำล่อย



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า

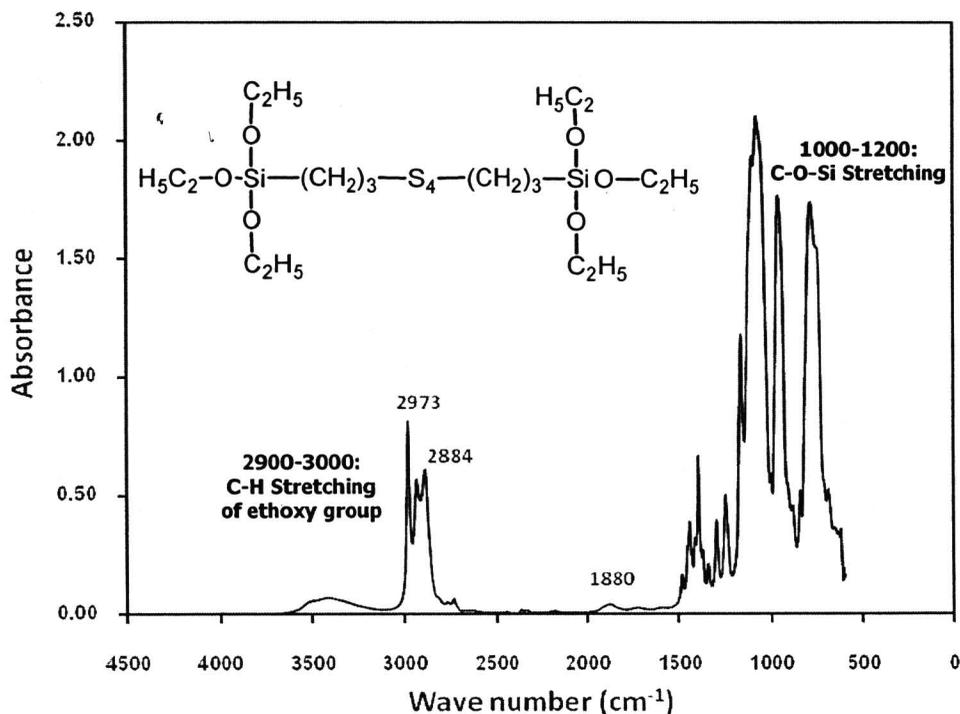
รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า ตามลำดับ โดยสังเกตได้ว่าเถ้าลอยมีตำแหน่งเลขคลื่นที่ตรงกับหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของซิลิกาเกรดการค้า ที่ประมาณ 3400-3500 และ 1000-1100 cm⁻¹ ที่แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและไซลอกเซน ตามลำดับ [40] นั้นหมายความว่า เถ้าลอยมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกับซิลิกาเกรดการค้าจริง



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 cm^{-1} มีตำแหน่งของเลขคลื่นที่ประมาณ 2900 – 3000 ของตัวอย่างที่ทำการปรับปรุงผิวทั้งซิลิกาเกรดการค้า และผงเถ้าลอย แต่ไม่มีตำแหน่งของเลขคลื่นนี้ในตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว ซึ่งตำแหน่งเลขคลื่นนี้เป็นตำแหน่งของพันธะ C-H จากหมู่เอทอกซีของสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C แสดงถึงสารคู่ควบนี้สามารถจับที่ผิวของผงซิลิกาและเถ้าลอยได้ ซึ่งกราฟแสดงหมู่ฟังก์ชันของสารคู่ควบไซเลนนี้แสดง ในรูปที่ 4.6

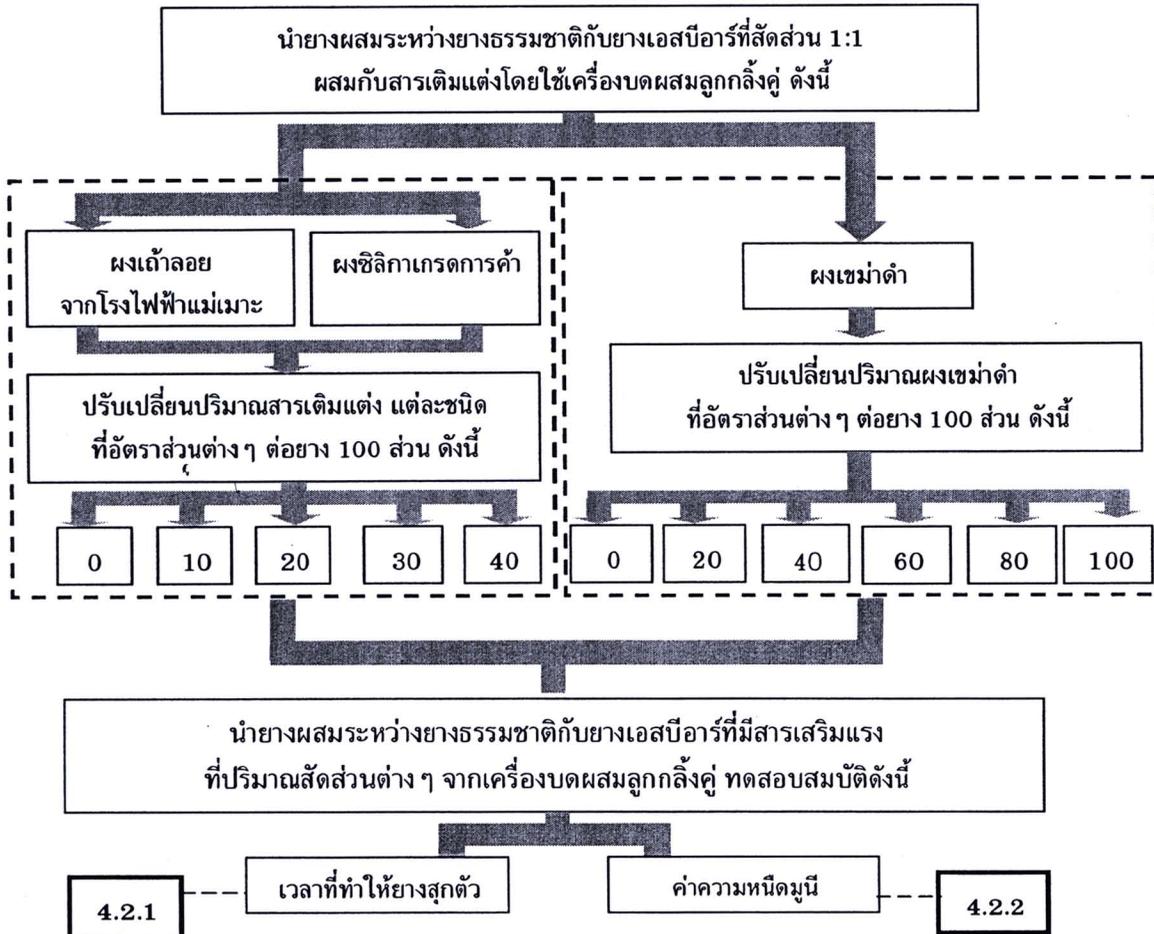


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C

ผลการทดลองนี้ได้สเปกตรัมของการปรับปรุงผิวของซิลิกาสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Marrone และคณะ [41] ที่ทำการศึกษาการปรับปรุงผิวของซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิดเดียวกันนี้โดยใช้เทคนิค FTIR โดยพบตำแหน่งสเปกตรัมการยึดของพันธะ C-H ที่เลขคลื่น 2800 – 3000 cm^{-1} จากหมู่เอทอกซีของสารคู่ควบไซเลน ซึ่งมาจากการดูดซับของสารคู่ควบไซเลนที่ผิวซิลิกาเช่นเดียวกัน และลักษณะของสเปกตรัมหลังการปรับปรุงผิวคล้ายกันกับสเปกตรัมงานวิจัยนี้



4.2 การตรวจสอบสมบัติการไหลและการสุกตัวของยางผสม NR/SBR



รูปที่ 4.7 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติการไหลและการสุกตัว

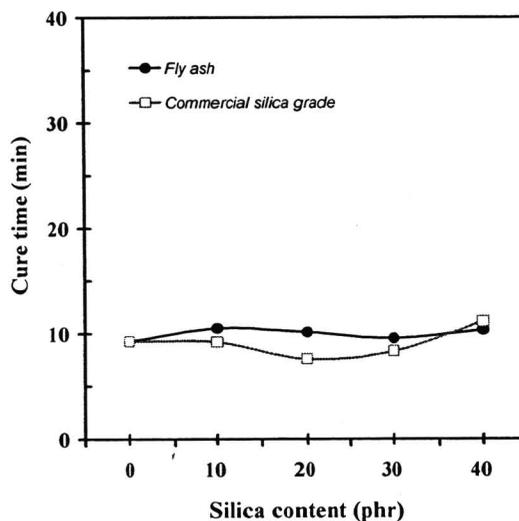
ทำการเตรียมยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งต่างๆ ในรูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง) โดยใช้สูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ส่วนประกอบของยางผสมที่ใช้ขึ้นรูป

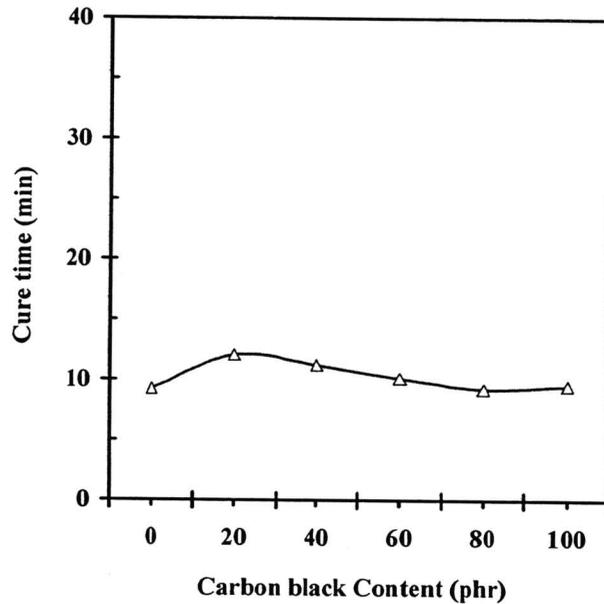
สารเคมี	ปริมาณ (phr)
1. ยางธรรมชาติ STR20 และ ยางเอสบีอาร์ SBR1712 (1:1)	100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.0
3. กรดสเตียริก	3.0
4. Butylated hydroxytoluene (BHT)	1.0
5. สารเติมแต่ง	
- ผงถั่วลอ่ย	0, 10, 20, 30, 40
- ผงซิลิกาเกรดการค้า	0, 10, 20, 30, 40
- ผงเขม่าดำ	0, 20, 40, 60, 80, 100
6. พอลิเอทิลีน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

4.2.1 การตรวจสอบหาเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR

การตรวจสอบเวลาในการสุกตัวของของยางผสมที่มีผงถั่วลอ่ย และผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ 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 ที่เติมถั่วลอ่ยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณซิลิกาต่างๆ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการสุกตัวของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเติมสารเติมแต่งในยางผสม ทำให้เวลาในการสุกตัวของยางไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งโดยปกติการเติมซิลิกาเกรดการค้ำในยาง 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) ที่เป็นส่วนหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นและเร่งให้เกิดปฏิกิริยาคัลคาไนซ์ในยางได้เร็วขึ้น [43] ส่วนการเติมผงเขม่าดำในยางผสมเวลาในการสุกตัวของยางไม่เพิ่มขึ้น

4.2.2 การตรวจสอบค่าความหนืดมูนิ ของยางผสม NR/SBR

การตรวจสอบสมบัติการไหล โดยวิธีหาค่าความหนืดมูนิ (Mooney viscosity) ของยางผสมที่มีผงเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำ ในงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบยางธรรมชาติที่มีค่าความหนืดมูนิ (ML 1+4 100°C) เท่ากับ 72 และยางเอสปีอาร์ที่มีค่าความหนืดมูนิ (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 ก่อนเริ่มหมุนงานโลหะ และทำการอ่านค่าความหนืดเมื่องานโลหะหมุนไป 4 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1646-00 ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.3

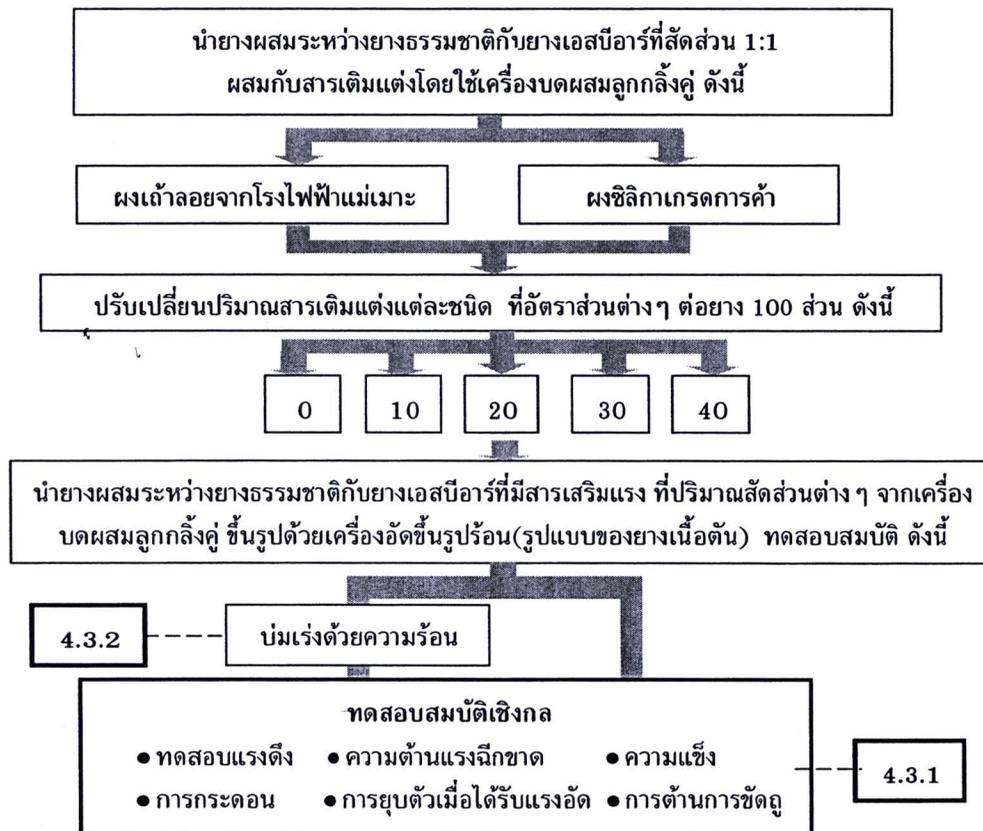
ตารางที่ 4.3 ความหนืดของ NR, SBR และยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดและปริมาณสารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง	ความหนืดมูนิ [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

การตรวจสอบความหนืดมูนิ ของ NR, SBR และยางผสม NR/SBR ที่ทำการ Masticate กับสารเติมแต่ง พบว่าความหนืดมูนิของยาง NR และ SBR มีความหนืดไม่สูงมาก และไม่ใช่อุปสรรคต่อกระบวนการผสมหรือการนำไปขึ้นรูป ความหนืดของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งต่ำกว่ายางเอสปีอาร์ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง และยางผสม NR/SBR ที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่งความหนืดอยู่ระหว่างความหนืดของยางทั้งสองชนิด เมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ และผงเขม่าดำในยางผสม ความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารเติมแต่งเข้าไปขัดขวางการไหลตัวของยางผสม ความหนืดมูนิของยางผสมที่เติมผงถ่านลอย ต่ำกว่าซิลิกาเกรดการค้ำ ทั้งนี้เนื่องจาก ในการผสมยางผงถ่านลอยมีการแตกย่อยของอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง [43] และผงถ่านลอยมีลักษณะที่กลม อีกทั้งส่วนที่แตกออกมาไม่ได้ถูกปรับปรุงผิวทำให้การยึดเกาะกับเฟสของยางผสมได้ไม่ดี ส่งผลต่อการไหลตัวของยางผสมง่ายกว่าซิลิกาเกรดการค้ำ ส่วนความหนืดมูนิของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณต่างๆ พบว่าความหนืดมูนิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณผงเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเฟสของยางมีการดูดซับที่ผิวของผงเขม่าดำได้ในปริมาณที่มาก จึงทำให้ไปต้านการไหลของยางผสม ส่งผลให้ยางผสมไหลตัวได้ยากขึ้น



4.3 การเติมสารเติมแต่งเถ้าลอยและผงซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม และการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน



รูปที่ 4.10 แผนการดำเนินงานในส่วนการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง

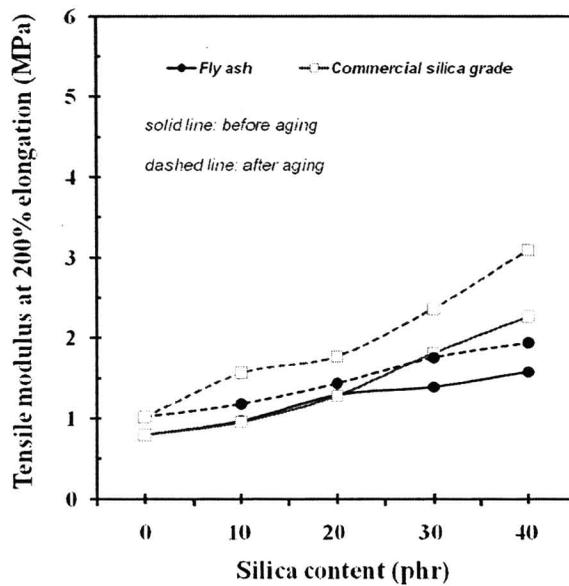
4.3.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเกรดการค้า และการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน (งานหมายเลข 4.3.1 และ 4.3.2)

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



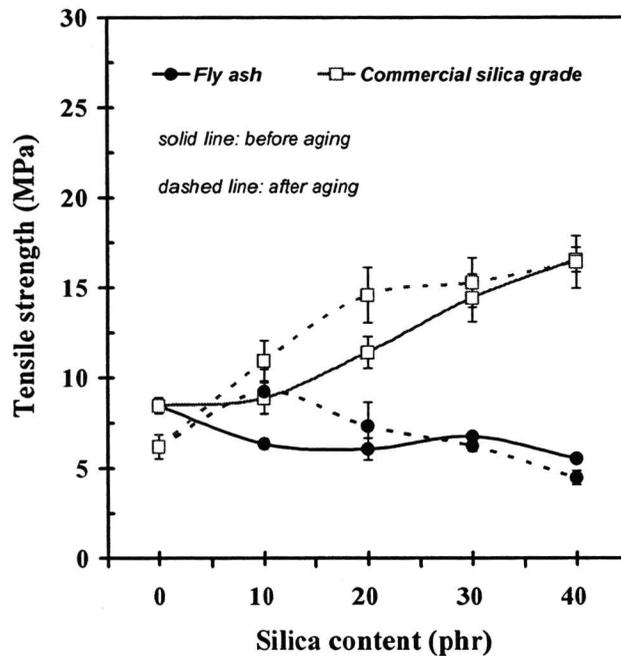
ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของผงเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงแรงสูง (Rigidity) และยังพบว่าเมื่อเติมปริมาณผงซิลิกาในยางผสมมากกว่า 20 phr มอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีค่าสูงกว่าการเติมผงเถ้าลอย

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะยางผสมที่การเติมผงซิลิกา เนื่องจาก Curative ที่เหลืออยู่จากการอบสุกของยางที่ 90% (tc90) ทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางผสมเพิ่มขึ้นหลังจากการที่อบสุกมากกว่า 90% ตามที่วัดได้จากเครื่อง ODR



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่า การเติมผงเถ้าลอยในยางผสม NR/SBR มีค่าความต้านแรงดึงที่ต่ำกว่าผงซิลิกาเกรดการค้าและเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นความต้านทานแรงดึงของยางผสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่การเพิ่มปริมาณของผงซิลิกาความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมถั่วลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

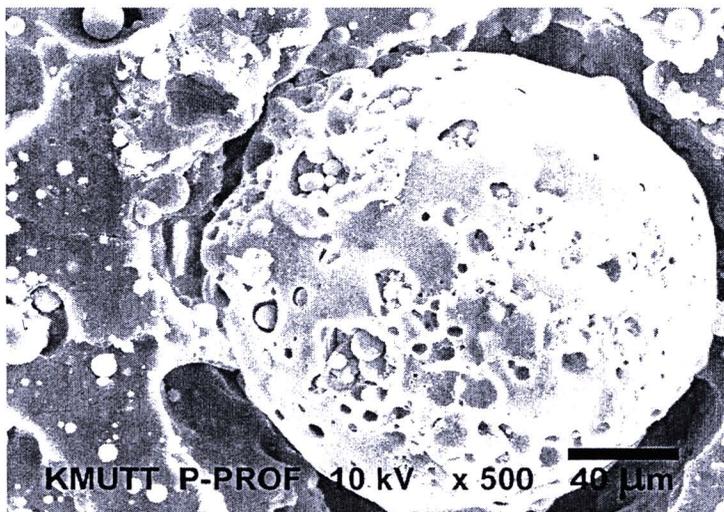
ทั้งนี้พิจารณาได้จากประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ผงถั่วลอยมีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมได้น้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า เนื่องจาก ที่ผิวผงถั่วลอยมีหมู่ Hydroxy(-OH) ที่น้อยกว่า ผงถั่วลอยจึงมีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมแบบ rubber filler interaction ที่น้อยกว่าผงซิลิกา [44-45]
2. อนุภาคถั่วลอยที่มีขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบ Couplink 89C แล้ว ในขณะที่การบดผสมอาจเกิดการแตกย่อยของอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายใน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งอนุภาคของถั่วลอยขนาดเล็กที่แตกย่อยออกมานี้ เป็นส่วนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน จึงทำให้มีการยึดเกาะแบบ Rubber filler interaction ที่ลดลง [44]
3. ถั่วลอยมีองค์ประกอบอื่นๆ ที่นอกเหนือจากสารประกอบซิลิกา เช่น กลุ่มของโลหะออกไซด์ ที่อาจส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมขวางของยางผสม

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนยางผสม ความต้านแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อพันธะเชื่อมขวางในยางได้ 2 กรณี คือ

1. ยางผสมเกิดการเชื่อม โยงพันธะเชื่อมขวางมากขึ้นจากปริมาณของกำมะถันในยางที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง

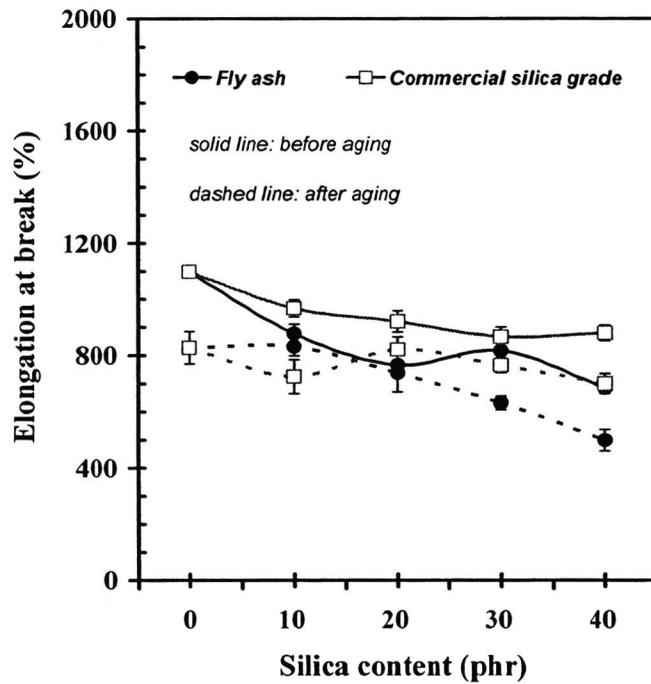
2. โดยปกติยางผสมในสูตร Conventional Vulcanization มีพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิก (Poly sulfidic crosslinks) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นแบบ โมโนซัลฟิดิก หรือ ไดซัลฟิดิกที่สั้นลง หลากๆ พันธะ [18] ทำให้โมเลกุลของยางชิดกันมากขึ้นเนื่องจากถูกยึดด้วยพันธะที่สั้นลง ส่งผลให้ยางผสมมีความแข็ง และความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น



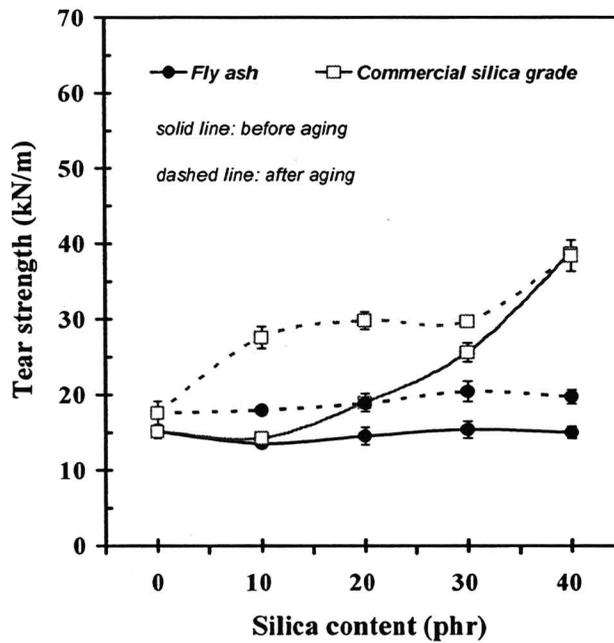
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายอนุภาคผงเถ้าลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคนาขนาดเล็กลอยอยู่ใน โดยใช้เทคนิค SEM (กำลังขยาย 500 เท่า)

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

ส่วนหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม การยึดตัวที่จุดขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางผสมเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มขึ้นหลังการสุก ทำให้มีพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ยางผสมมีการยึดลดลง



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ค่าการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ



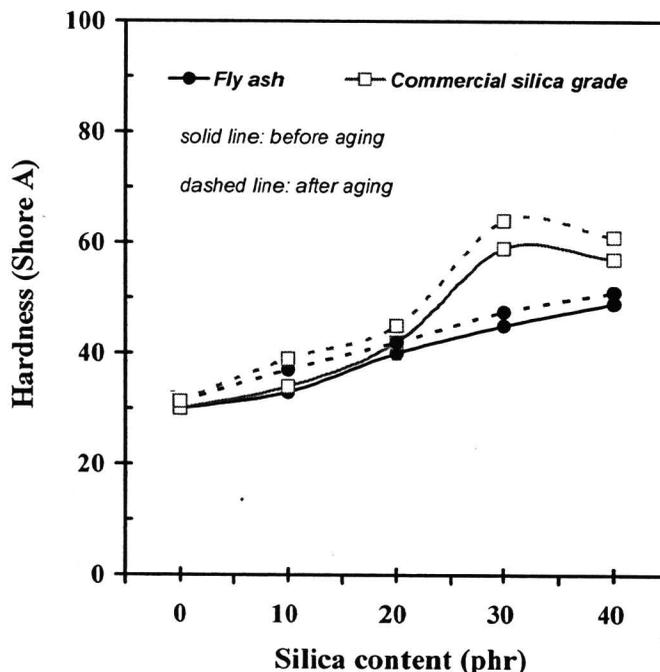
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมถั่วลอ่ยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ เห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม ที่ปริมาณมากกว่า 10 phr ความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องเช่นเดียวกับความต้านแรงดึงของยางผสมดังที่กล่าวมาแล้วในรูปที่ 4.12 ในขณะที่ปริมาณของผงถั่วลอ่ยในยางผสมไม่ส่งผลต่อความต้านแรงฉีกขาดของยางผสม

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้เกิดปริมาณพันธะเชื่อมขวางในยางผสมเพิ่มขึ้นหลังการอบสุก

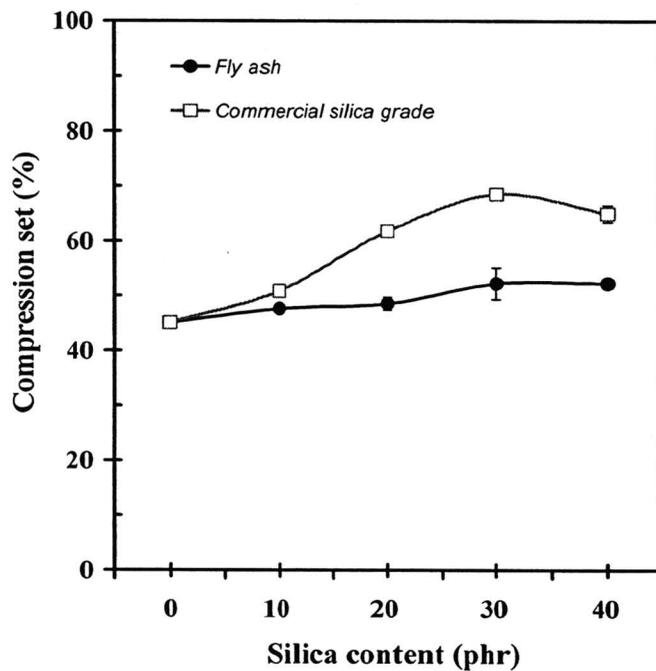
ความสัมพันธ์ของความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมถั่วลอ่ยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.16 เห็นได้ว่า ความแข็งของยางผสมโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคของผงซิลิกา และผงถั่วลอ่ย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่งสูง (Rigidity) ส่งผลให้ยางผสมมีความแข็งโดยรวมที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ของยางผสมที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



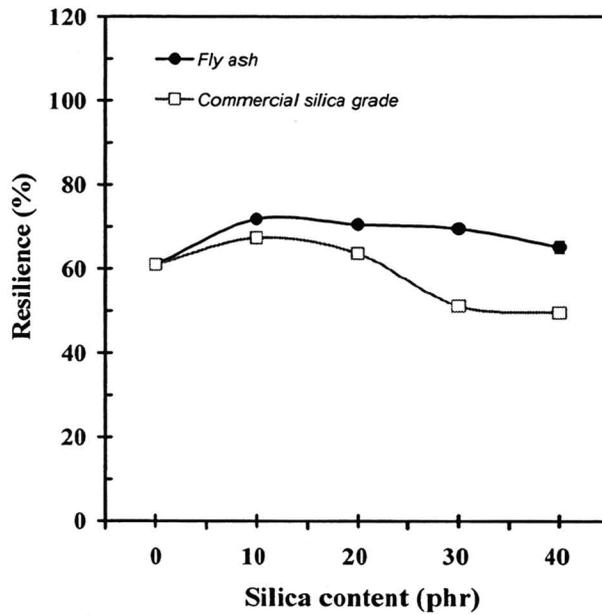
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมถั่วลอ่ยและซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดและการกระดอนของยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมถั่วลอย และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนซิลิกาต่างๆ เมื่อเติมถั่วลอยในยางผสม พบว่า เปอร์เซ็นต์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดลดลง (มีค่าการกลับคืนตัวมากขึ้น) และเปอร์เซ็นต์การกระดอนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นอีลาสติคที่มากกว่า เมื่อเทียบกับการเติมซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม เนื่องจากถั่วลอยมีอนุภาคเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าผงซิลิกา การส่งถ่ายแรงจากเฟสยางเกิดได้น้อยกว่าผงซิลิกาที่มีขนาดเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวที่รับแรงได้โดยรวมมากกว่า และเมื่อปริมาณถั่วลอยเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเปอร์เซ็นต์การกระดอนลดลงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณเนื้อยางที่เป็น matrix ลดลง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่เติมถั่วลอย และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนซิลิกาต่างๆ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่เติมถั่วลอซ และซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณสัดส่วนของซิลิกาต่างๆ

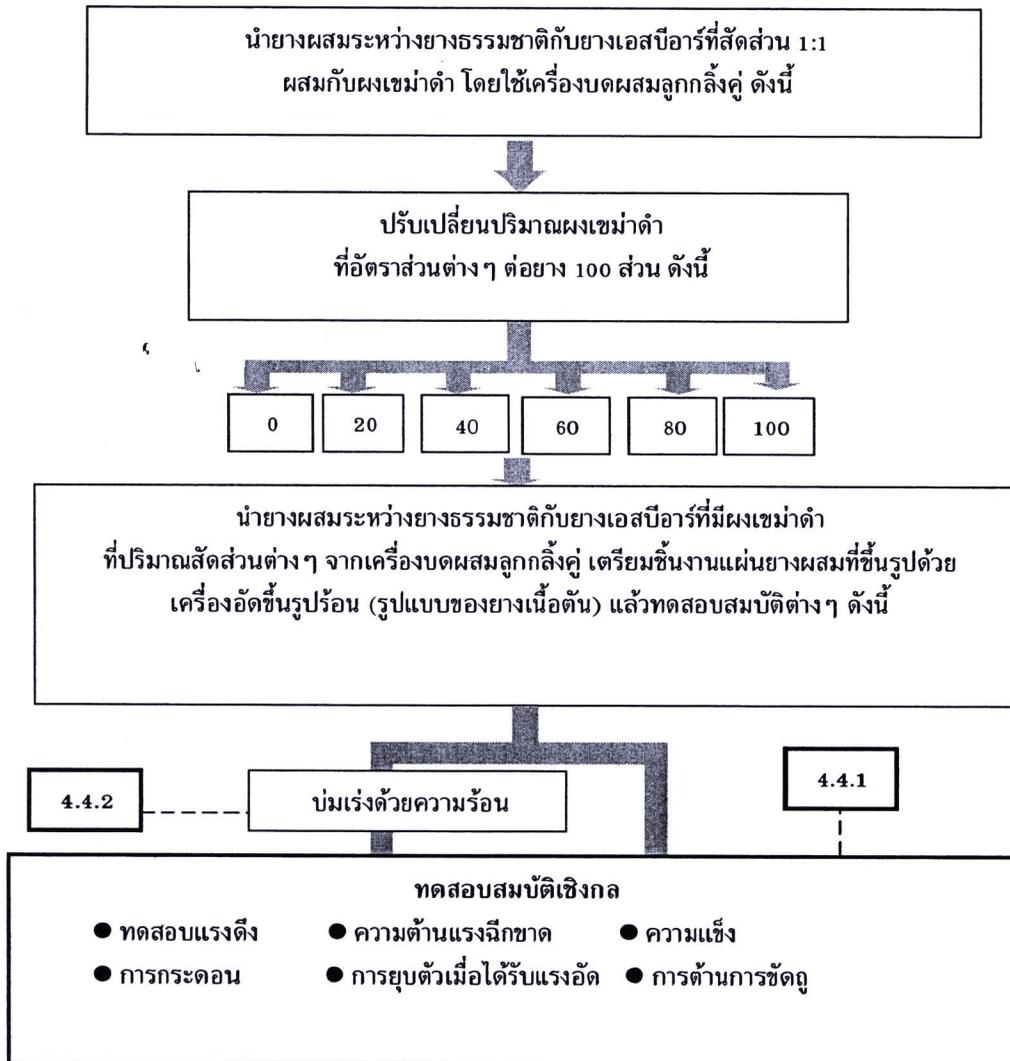
ส่วนการขจัดของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลอซ ซิลิกาเกรดการค้าดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลอซ ผงซิลิกา ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ยางผสม NR/SBR ที่ไม่เติมสารเติมแต่ง มีค่าการสูญเสียเนื้อวัสดุที่มาก แต่เมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งผงถั่วลอซ และผงซิลิกา การสูญเสียเนื้อวัสดุโดยรวมมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากการยึดเกาะกับเฟสยางได้ดี และยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นจากเฟสของสารเติมแต่งจึงช่วยด้านการขจัด

ตารางที่ 4.4 การสูญเสียของเนื้อวัสดุของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลอซและผงซิลิกาเกรดการค้าปริมาณต่างๆ

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



4.4 การเติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR และการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน

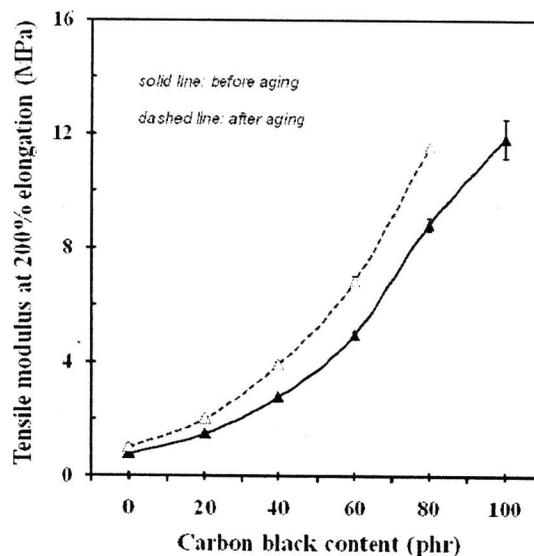


รูปที่ 4.19 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง

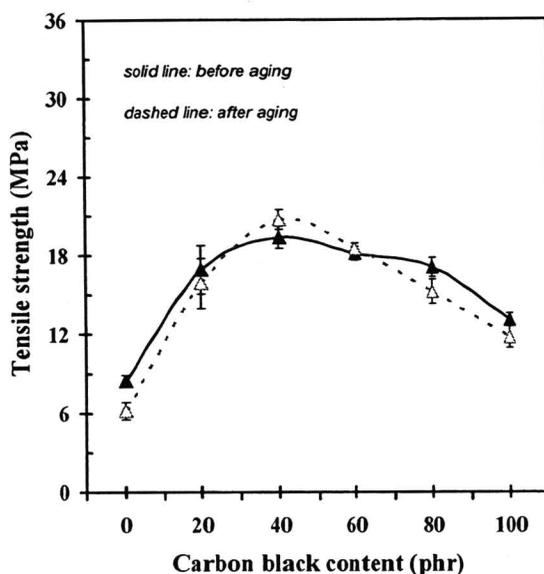


4.4.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำ และการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน (งานหมายเลข 4.4.1 และ 4.4.2)

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

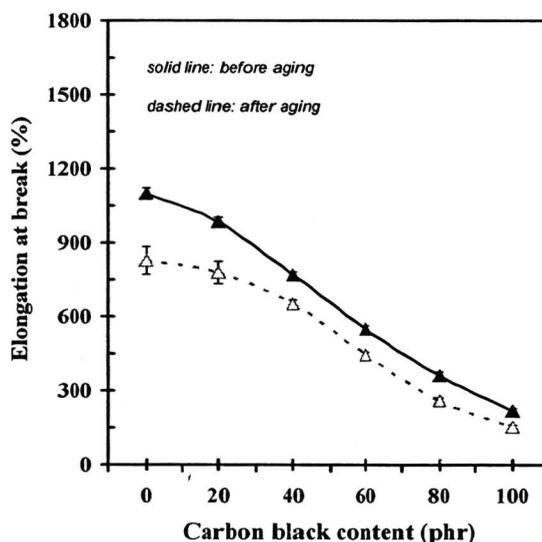


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงดึงก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

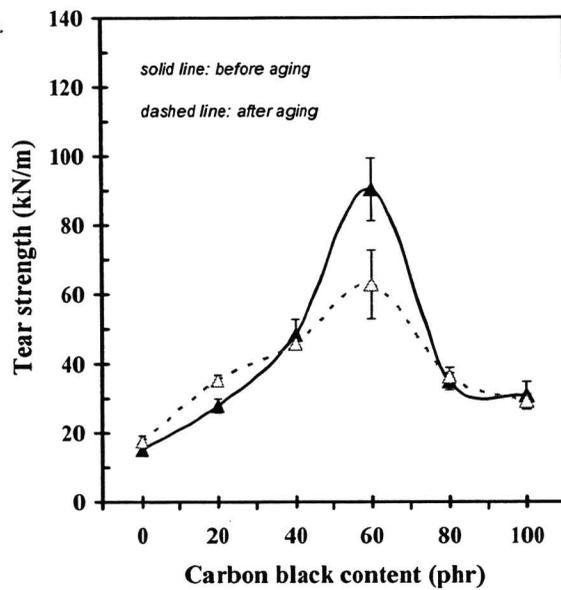
ความสัมพันธ์ของการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.22 จากรูปเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณผงเขม่าดำเพิ่มขึ้น ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเนื้อยางผสมที่เป็นเมทริกซ์เฟสลดลง จึงส่งผลทำให้ยางผสมมีการยืดตัวลดลง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



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของการยืดตัวที่จุดขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

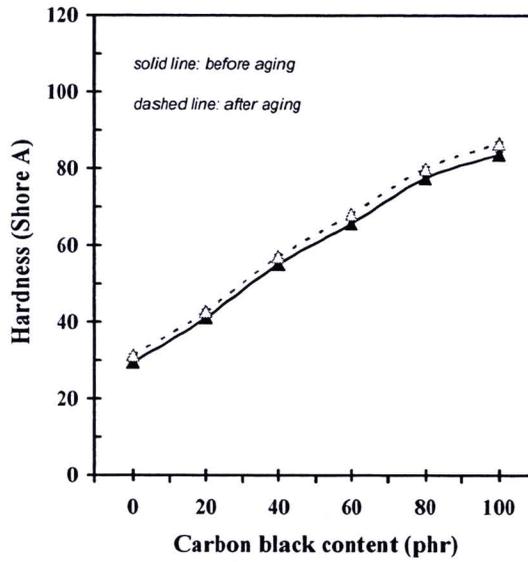


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ พบว่า เมื่อเติมปริมาณผงเขม่าดำในยางผสม ที่ปริมาณตั้งแต่ 10-60 phr ความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผงเขม่าดำ ที่มีการยึดเกาะกับเฟสของยางผสมได้ดีคล้ายกับผลของความต้านแรงดึง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



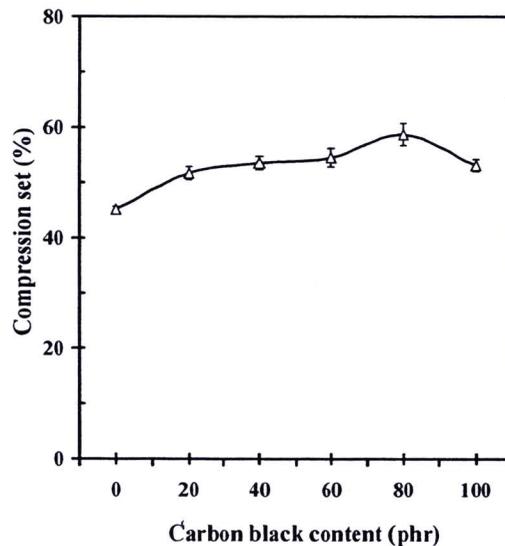
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความต้านแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

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

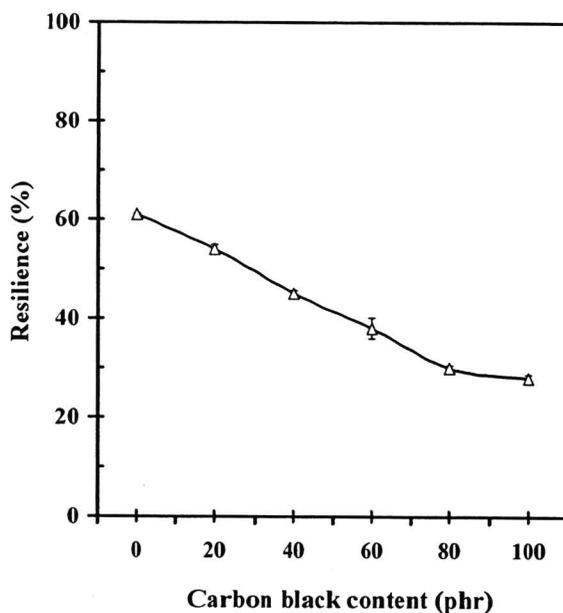


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงเขม่าดำที่ปริมาณสัดส่วนต่างๆ

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 ส่งผลทำให้ยางมีการต้านการขูดถูได้ดีขึ้นมีการสูญเสียเนื้อวัสดุลดลง

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
ที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับสารเติมที่ปริมาณต่างๆ

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

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

โดยเลือกยางผสมที่เติมสารเติมแต่งชนิดและปริมาณดังกล่าว นำไปศึกษาสมบัติในรูปแบบยางฟองน้ำ
ต่อไป



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

สมบัติของยางผสม	ปริมาณผงถั่วลย (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) ที่เติมสารเติมแต่งผงซิลิกาเกรดการค้าปริมาณต่างๆ

สมบัติของยางผสม	ปริมาณซิลิกาเกรดการค้า (phr)				
	0	10	20	30	40
เวลาในการสุกตัว ที่อุณหภูมิ 160 °C (min : sec)	9 : 3	9 : 2	7 : 6	8 : 3	11 : 2
ความหนืดมูนิ [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
เวลาในการสุกตัว ที่อุณหภูมิ 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						
มอดูลัสที่การยืดตัว 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
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งสถานะด้วยความร้อน (%)						
มอดูลัสที่การยืดตัว 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%

(+) : ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มเร่งสถานะ

(-) : ค่าที่ลดลงหลังการบ่มเร่งสถานะ



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

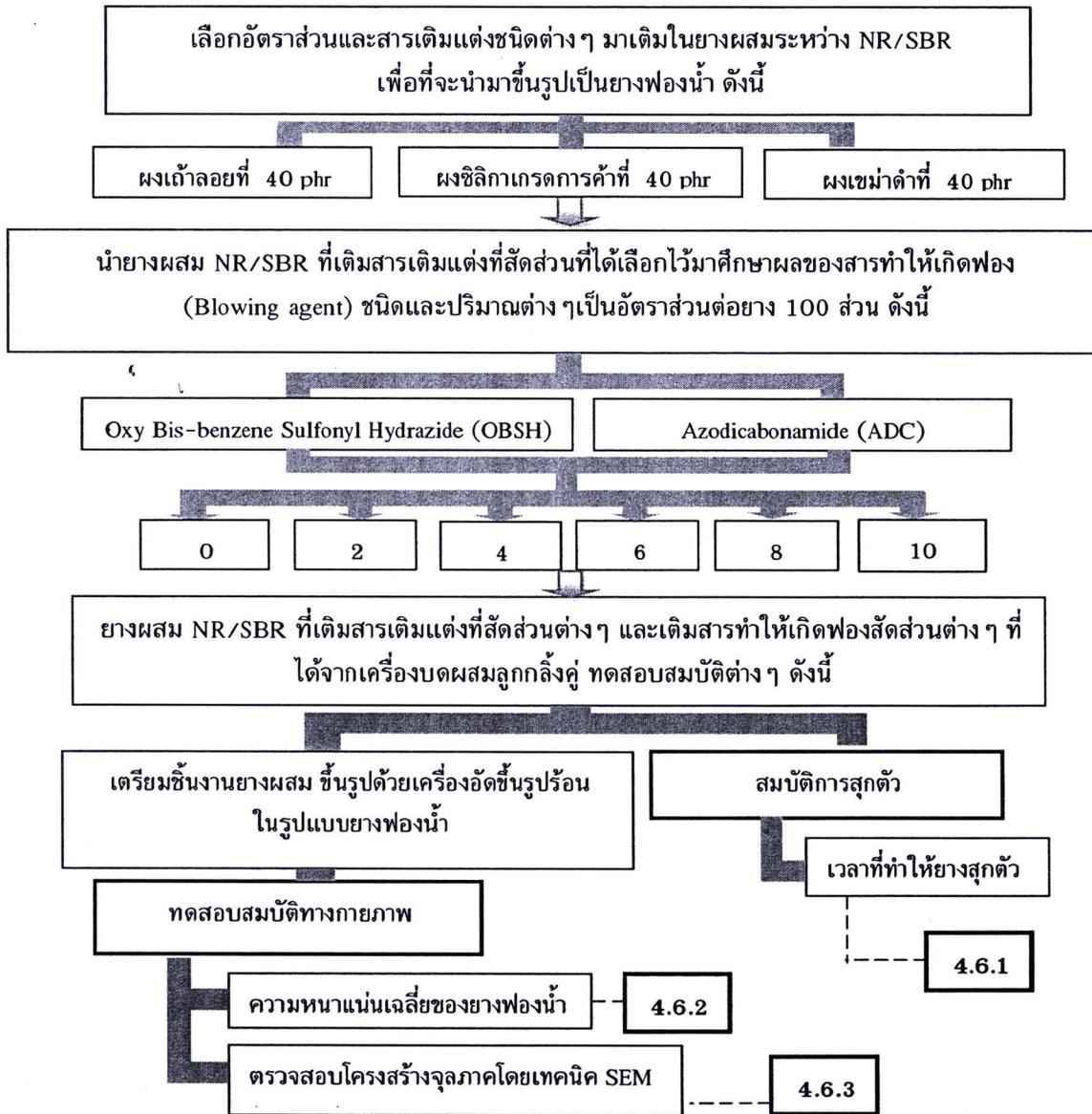
สมบัติของยางผสม	ชนิดสารเติมแต่งและปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสม (phr)		
	ผงถ่านลอย	ผงซิลิกา	ผงเขม่าดำ
สมบัติการไหลและการสุกตัว			
ความหนืดมูนิ [ML(1+4)100°C]	29	-	27
เวลาในการสุกตัวที่อุณหภูมิ 160°C (min)	10	11	11
สมบัติเชิงกล			
มอดูลัสที่การยืดตัว 200% (MPa)	1.6	2.3	2.8
ความต้านแรงดึง (MPa)	6	17	19
การยืดตัวที่จุดขาด (%)	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

4.5.2 บทสรุปงานวิจัยส่วนของยางผสม NR/SBR ในรูปแบบยางเนื้อตัน (ที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง)

1. การเติมผงถ่านลอยในยางผสม NR/SBR ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนิ และทำให้ค่าความหนืดมูนิต่ำกว่ายางผสมที่มีผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ
2. การเติมผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาในการสุกตัวของยาง
3. สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางผสม NR/SBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำ ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงถ่านลอย โดยละเอียด ดังนี้
 - 3.1 การเติมผงถ่านลอยในปริมาณ 30-40 phr ในยางผสม NR/SBR ให้สมบัติด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ความขยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด การกระดอน และความแข็งแรงที่เหมาะสมเมื่อเทียบกับการเติมผงถ่านลอยที่ปริมาณอื่นๆ และได้ทำการเลือกปริมาณของผงถ่านลอยที่ 40 phr เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของยางฟองน้ำต่อไป
 - 3.2 การเติมซิลิกาเกรดการค้าในปริมาณ 30-40 phr ในยางผสม NR/SBR ให้สมบัติด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ความต้านแรงดึง และความแข็งแรงที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับการเติมซิลิกาเกรดการค้าที่ปริมาณอื่นๆ และได้ทำการเลือกปริมาณของซิลิกาเกรดการค้า 40 phr เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของยางฟองน้ำต่อไป
 - 3.3 การเติมผงเขม่าดำในปริมาณ 40-60 phr ในยางผสม NR/SBR ให้สมบัติด้านมอดูลัสที่การยืดตัว 200% ความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด ความแข็งแรง และการต้านต่อการขาดที่เหมาะสม เมื่อเทียบกับการเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณอื่นๆ และได้ทำการเลือกปริมาณของผงเขม่าดำ 40 phr เพื่อนำมาศึกษาสมบัติของยางฟองน้ำต่อไป
4. ยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอยมีการคืนกลับตัวตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดีกว่า และค่าการกระดอนที่มากกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำ
5. การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม NR/SBR ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

4.6 การตรวจสอบสมบัติการสุกตัวและสมบัติทางกายภาพ ของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC



รูปที่ 4.27 แผนการดำเนินงานในส่วนการตรวจสอบสมบัติการสุกตัว และสมบัติทางกายภาพของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC

การเตรียมยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลอซ ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ และการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC โดยใช้สูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 4.10
 ตารางที่ 4.10 ส่วนประกอบของยางผสมที่ทดลองขึ้นรูปในรูปแบบยางฟองน้ำ

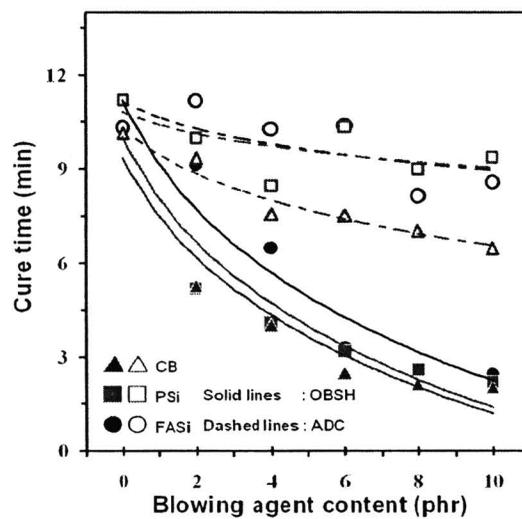
สารเคมี	ปริมาณ (phr)
1. ยางธรรมชาติ STR 20 และ ยางเอสปีอาร์ SBR 1712	100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	5.0
3. กรดสเตียริก	3.0
4. Butylated hydroxytoluene (BHT)	1.0
5. สารเติมแต่ง - ผงถั่วลอซ หรือ - ผงซิลิกาเกรดการค้า หรือ - ผงเขม่าดำ	40
6. พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)	5% ของน้ำหนักซิลิกา
7. Mercaptobenzothiazole (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 ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลอซ (FA-Si) ผงซิลิกาเกรดการค้า (Commercial Silica, P-Si) และผงเขม่าดำ (Carbon black, CB) แสดงในรูปที่ 4.28 ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ลงในยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลอซ ผงซิลิกา ผงเขม่าดำ เวลาในการสุกตัวของยางผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น โดยที่การเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ทำให้อย่างผสมมีเวลาสุกตัวที่ต่ำกว่า เนื่องจาก การสลายตัวของสารทำให้เกิดฟอง ส่งผลทำให้เกิดฟองก๊าซในเนื้อยางซึ่งการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดเป็นแบบการคายความร้อน (Exothermic) [16, 47] ความร้อนในฟองนั้นความร้อนนี้ทำให้ช่วยเร่งให้ยางสุกเร็วขึ้น นอกจากนี้ในกลไกของการสลายตัวของ ADC สามารถใช้ Zinc oxide เป็น

ตัวกระตุ้นให้เกิดการสลายตัว [13] ซึ่งสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC อาจใช้ Zinc oxide ของระบบที่ทำหน้าที่หลักเป็นตัวกระตุ้นในกระบวนการวัลคาไนเซชันมากกว่ากระตุ้นการทำให้สลายตัว ทำให้เวลาในสูกของยางใช้เวลาานานกว่า OBSH

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



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อเวลาในการสูกตัวของยางผสม NR/SBR ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกาเกรดการค้ำ 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 และให้ก๊าซซึ่งแทรกตัวอยู่ในยางทำให้ยางมีการขยายตัวใหญ่ขึ้นขณะที่น้ำหนักของยางยังเท่าเดิมส่งผลให้ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของยางผสมมีค่าลดลง ความ



หนาแน่นสัมพัทธ์เฉลี่ยของยางผสมในระบบที่เติม OBSH มีค่าน้อยกว่าระบบที่เติมชนิด 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 ที่มีสารเติมแต่งผงถั่วลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ (ชิ้นงานทดสอบหนา 2 mm)

ปริมาณสาร ทำให้เกิดฟอง (phr)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์					
	OBSH			ADC		
	ผงถั่วลอย	ผงซิลิกา	ผงเขม่าดำ	ผงถั่วลอย	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 เห็นได้ว่ายางผสมที่เติมผงถั่วลอยมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์มากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคผงถั่วลอยมี bulk density มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างสารเติมแต่งทั้งสามชนิด [50] และมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีความหนาแน่นสูง จึงทำให้ยางผสมมีความหนาแน่นสัมพัทธ์มาก 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

voltage โดยเลือกชิ้นงานตรวจสอบอย่างผสมที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลอ่ย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ปริมาณสัดส่วน 40 phr ที่มี OBSH ตั้งแต่ 0 ถึง 10 phr ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.29 – 4.32

4.6.3.1 การตรวจสอบจากหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบแรงดึงของยางผสม (ความหนาชิ้นงาน 2 mm)

รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลอ่ย ที่ปริมาณ 40phr และเติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH หรือ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ที่ปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่มากขึ้น ทำให้มีฟองก๊าซที่มากขึ้น และพื้นผิวยางไม่เรียบ เนื่องจากอนุภาคผงถั่วลอ่ยส่วนมากมีขนาดที่ใหญ่ทำให้เกิดผิวหน้าตัดที่ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคถั่วลอ่ยที่มีขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Couplink 89C แล้ว ในขณะที่การบดผสมอาจเกิดการแตกย่อยของอนุภาคถั่วลอ่ยเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กๆ ลงอีก ซึ่งอนุภาคของถั่วลอ่ยขนาดเล็กที่แตกย่อยออกมาเป็นส่วนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน จึงทำให้มีการยึดเกาะแบบ Rubber filler interaction ที่ลดลง [44] นอกจากนี้อาจเกิด Coalescence ของฟองก๊าซรอบๆ ผิวอนุภาคของถั่วลอ่ยที่มีขนาดใหญ่จนเกิดเป็นช่องว่างรอบๆ อนุภาคผงถั่วลอ่ยได้ชัดเจน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อเติมปริมาณ สารทำให้เกิดฟองตั้งแต่ที่ปริมาณ 6 - 10 phr เนื่องจาก การสลายตัวของฟองก๊าซในเนื้อยางผสมเกิดการรวมกันที่บริเวณผิวรอบๆผิวถั่วลอ่ย เพื่อรักษาเสถียรภาพของฟองก๊าซ ซึ่งเกิดกับยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิด

ส่วน รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง ผงซิลิกา ที่ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสมที่เติมซิลิกาเป็นสารเติมแต่งนั้น มีลักษณะพื้นผิวที่สม่ำเสมอการกระจายปริมาณของฟองมีความสม่ำเสมอ 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 ซึ่งก๊าซไนโตรเจนมีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่า และรูปที่ 4.31 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเขม่าดำ ที่ปริมาณ 40 phr ที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณต่างๆ พบว่า เมื่อเติมสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสมที่เติมผงเขม่าดำ มีลักษณะพื้นผิวยางผสมที่สม่ำเสมอ และมีการกระจายปริมาณของฟองมีความสม่ำเสมอ ฟองก๊าซมีลักษณะกลม และมีปริมาณฟองก๊าซมากขึ้น เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของฟองก๊าซนั้นเป็นเซลล์

ปิด ส่วนลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดจาก ADC มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจากการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟองและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซเช่นเดียวกัน

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

รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ NR/SBR/ผงถั่วลอซ 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 ภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคของยางฟองน้ำ 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 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางพองน้ำ 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 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของยางพองน้ำ NR/SBR ที่เติม และไม่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC ที่ปริมาณ 6 phr ที่มีสารเติมแต่งผงถ่านลอยผงซิลิกา และ ผงเขม่าดำ ที่ ปริมาณ 40phr โดยชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบผิวหน้าตัดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 mm และหนา 12.5 mm พบว่าในยางผสมที่เติม OBSH ลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดในชิ้นงานที่มีความหนามากขึ้นขนาดของฟองก๊าซจะสามารถขยายได้มากขึ้นจนเกิดการชนกันของผนังฟองก๊าซ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ชิ้นงานมีความหนาที่มากขึ้นในการขึ้นรูปโดยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Compression moulding) ความร้อนที่ถ่ายเทให้ทั้งชิ้นงานที่จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink) ต้องใช้เวลาที่มากกว่าทำให้ฟองก๊าซมีเวลาที่จะขยายตัวได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความบางซึ่งมีการเกิดพันธะเชื่อมขวางได้ทั่วถึงเร็วกว่า และ OBSH สามารถกระจายในเนื้อยางได้ดี [13] แต่ในยางผสมที่เติม ADC ความหนาของชิ้นงานไม่ส่งผลต่อลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้น

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

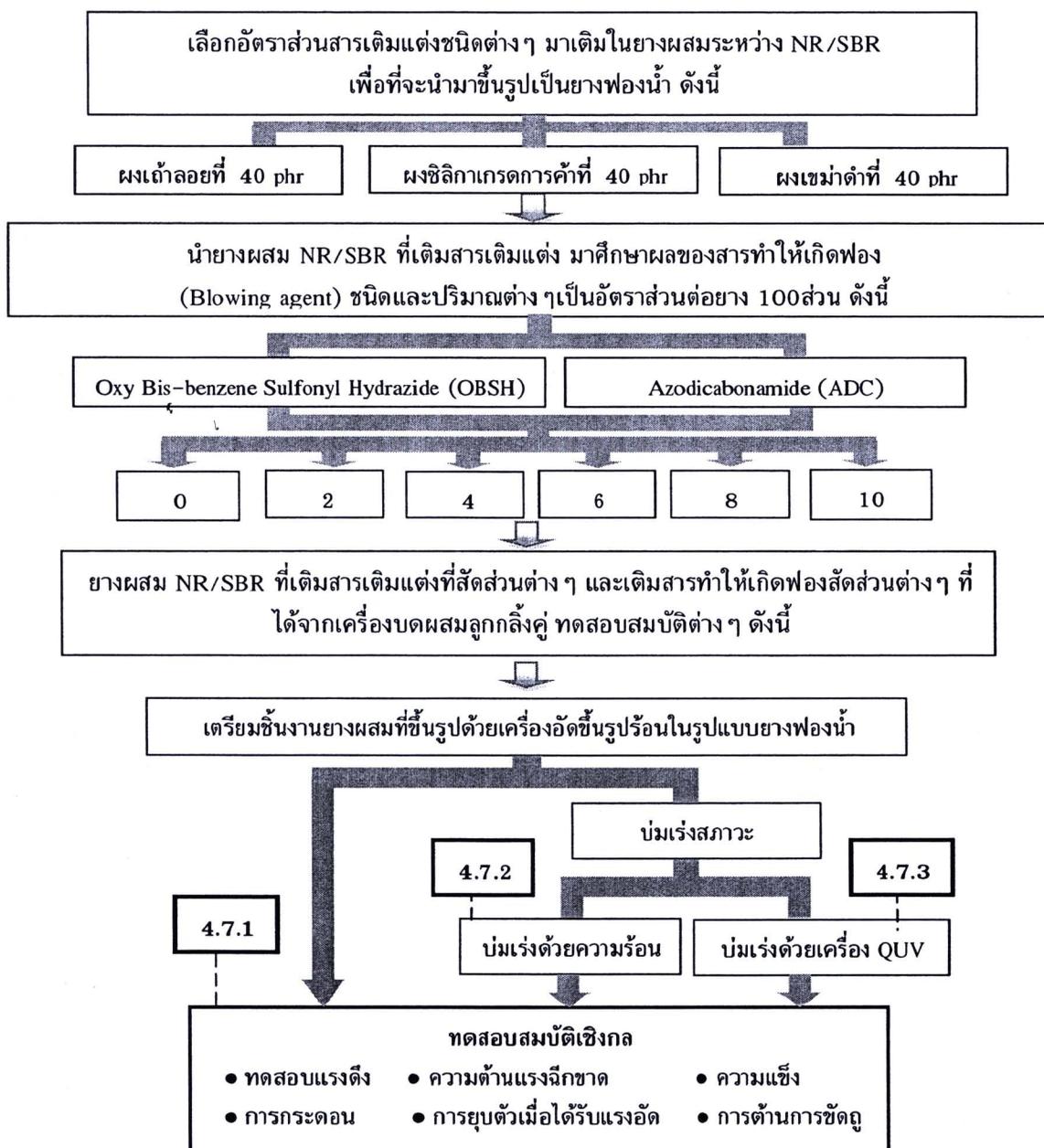
1. การเกิด Coalescence ของยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกิดขึ้นมากกว่า เนื่องจากผงซิลิกาเกิด Agglomeration
2. การเกิด Rubber-filler interaction ของผงซิลิกากับยางผสมเกิดได้น้อยกว่าผงเขม่าดำ ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้มากกว่า

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

รูปที่ 4.32 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของยางพองน้ำ 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

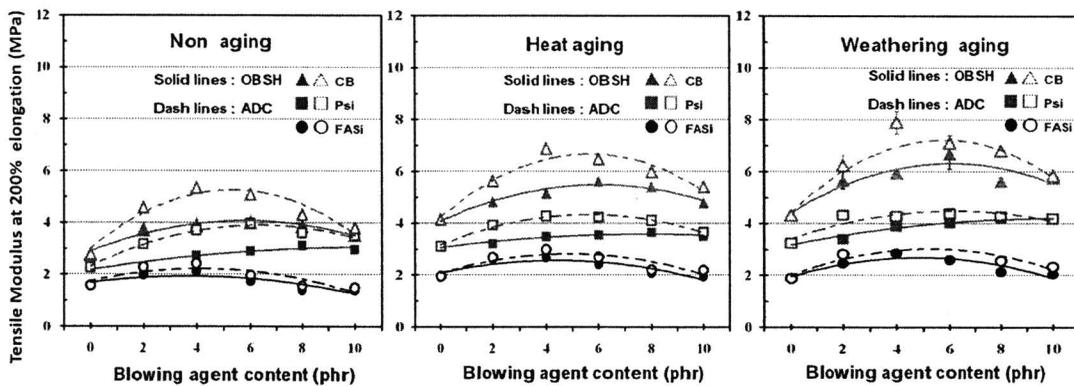


รูปที่ 4.33 แผนการดำเนินงานในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลและการบ่มเร่งของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC



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 ที่เติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอย 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 ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงาน 2 mm)

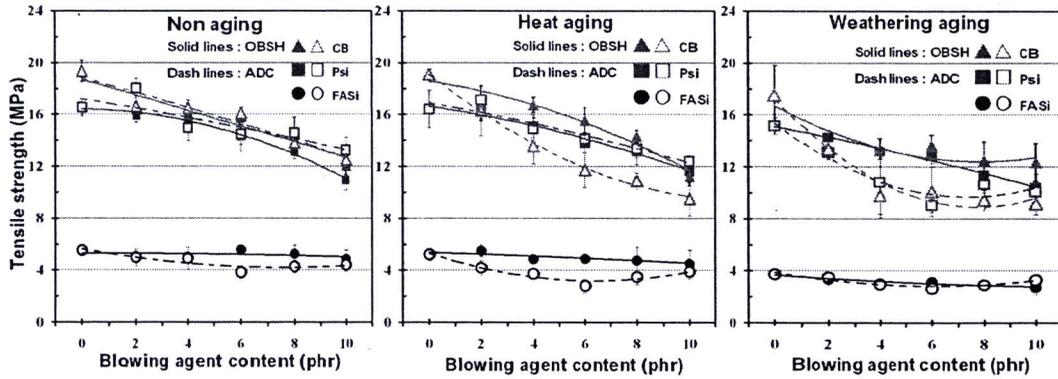
และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารทำให้เกิดฟอง OBSH และ ADC พบว่าสาร ADC ให้ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% ที่สูงกว่าการเติม OBSH ในทุกอัตราส่วน ทั้งนี้เนื่องจาก การเกิดฟองก๊าซในยางผสมที่มีขนาดเล็กกว่าจึงมีเนื้อยางที่รับแรงได้มากกว่า สารเติมแต่งที่ให้ค่ามอดูลัสสูงที่สุด คือผงเขม่าดำ เนื่องจากความแข็ง (Rigidity)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



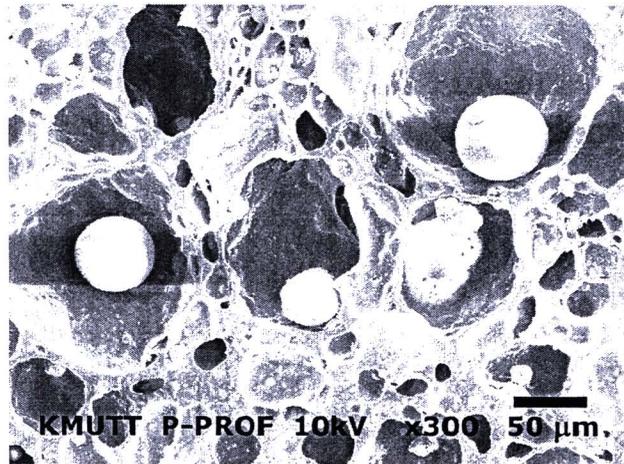
ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางผสมเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะเพิ่มขึ้นหลังการอบสุกที่ t_{c90} และการบ่มเร่งสภาวะของยางผสมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 200% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่ายางผสมที่บ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เนื่องมาจากการบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมนั้นมีการฉายรังสียูวี พร้อมทั้งให้ความร้อนเป็นการเร่งทำให้ยางผสมมีการเชื่อมสภาพที่เร็วขึ้น โดยการเชื่อมสภาพส่งผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่แล้วเกิดการเชื่อมต่อเป็นพันธะเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเกิดได้กับยางเอสบีอาร์ก็มีการเชื่อมสภาพแบบเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิก [18] เกิดเป็นพันธะที่สั้นลงส่งผลทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

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

ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนยางผสมที่เติมผงถั่วลันเตา ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ค่าความต้านแรงดึงโดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นหลังการอบสุก แต่ยางผสมที่เติมสาร ADC กลับมีค่าความต้านแรงดึงลดลง เนื่องมาจากการสลายตัวของ ADC เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดอนุมูลอิสระขึ้นในระบบ ซึ่งอาจไปเร่งให้เกิดการเชื่อมสภาพเพิ่มมากขึ้น และเมื่อผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV ค่าความต้านแรงดึงของยางผสมทุกสูตรมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดการเชื่อมสภาพของยางผสมที่สภาวะที่รุนแรงกว่า โดยยางผสมที่เติมสาร ADC มีการลดลงที่มากกว่าสูตรที่เติมสารชนิด OBSH ในลักษณะเหมือนกับการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน



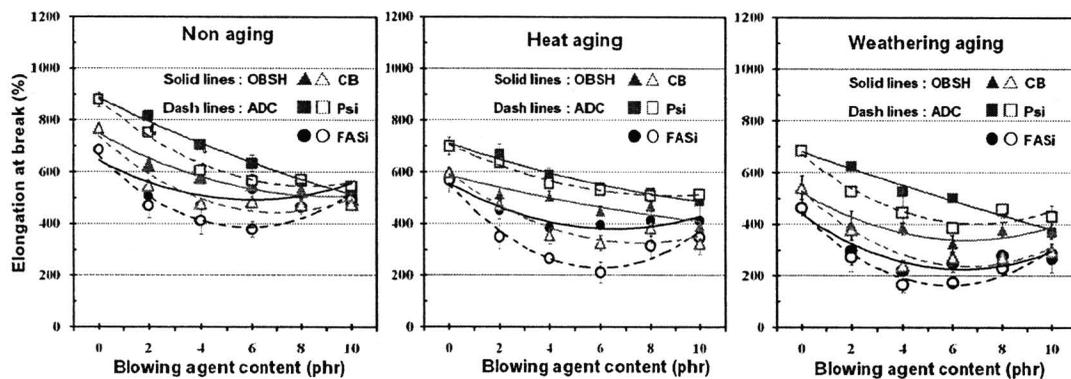
รูปที่ 4.35 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความต้านแรงดึงของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอย ฟงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะอย่างผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)



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

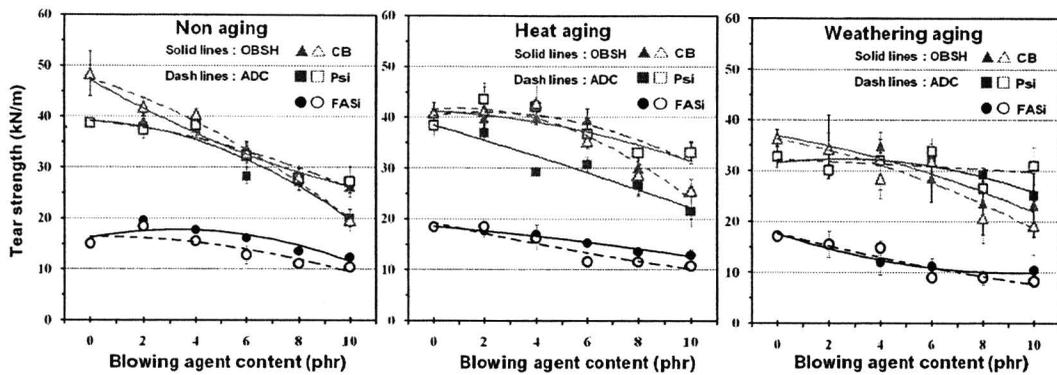
อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อการยึดตัวที่จุดขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ฟงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะอย่างผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV แสดงใน รูปที่ 4.37 เห็นได้ว่าเมื่อเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟองลงในยางผสม ค่าการยึดตัวที่จุดขาดจะมีค่าลดลง เนื่องจากการเกิดฟองเป็นการทำให้พื้นที่ในการรับ

แรงลดลงทำให้การดึงยึดมีค่าลดลง ทั้งนี้ยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด ADC การยึดตัวที่จุดขาดมีค่าต่ำกว่ายางผสมที่เติมสาร OBSH เนื่องจากยางสูตรที่เติมสาร ADC เกิดฟองก๊าซที่มีขนาดเล็กทำให้มีเฟสของเนื้อยางมากกว่าทำให้การดึงยึดลดลง ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสม ค่าการยึดตัวที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงของพันธะเชื่อมขวางมากขึ้น (เพราะได้ทำให้ยางสุกที่ 90% ก่อนทดสอบ) และเป็นพันธะที่สั้นลงดังที่กล่าวมาแล้ว การบ่มเร่งสภาวะแวดล้อมด้วยเครื่องเร่งสภาวะ QUV มีค่าการยึดตัวที่จุดขาดน้อยกว่าการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน เนื่องจากยางมีความแข็งเปราะมากขึ้นเนื่องจากการเกิดการเชื่อมสภาพของยางผสมสอดคล้องกับความต้านแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยรังสียูวีที่ลดลง



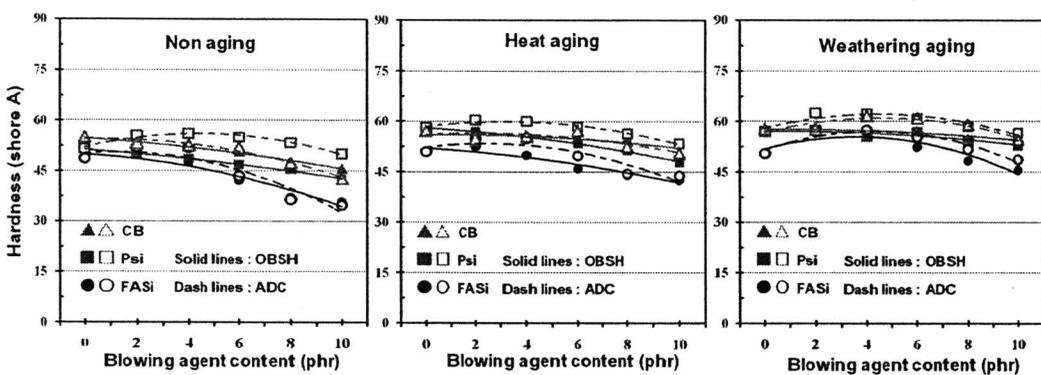
รูปที่ 4.37 อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อการยึดตัวที่จุดขาดของยางผสม NR/SBR ที่เติมผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาวะ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)

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 ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาพด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาพ QUV (ความหนาชิ้นงานทดสอบ 2 mm)

อิทธิพลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ที่มีต่อความแข็งของยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงถ่านลอย ผงซิลิกา หรือผงเขม่าดำ ที่ผ่านการบ่มเร่งสภาพยางผสมด้วยความร้อน และเครื่องเร่งสภาพ QUV ที่แสดงในรูปที่ 4.39 พบว่า การเติมปริมาณสารทำให้เกิดฟอง ลงในยางผสม NR/SBR ที่สารเติมแต่งแต่ละชนิด เมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้น ความแข็งของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มเฟสของฟองก๊าซซึ่งเป็นเฟสที่ทำให้ยางอ่อนลง ซึ่งยางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟอง ADC มีค่าความแข็งมากกว่ายางผสมที่เติมสารทำให้เกิดฟอง OBSH เนื่องจากมีเฟสของเนื้อยางมากกว่า ส่วนหลังการบ่มเร่งสภาพด้วยความร้อนและการบ่มเร่งสภาพแวดล้อมด้วยเครื่องเร่งสภาพ QUV ของยางผสม ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับสอดคล้องกับค่ามอดุลัสที่การยืดตัว 200% แสดงในรูปที่ 4.34



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



ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางผสม NR/SBR ที่มีผงถ่านลอย 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 ที่เติมผงถ่านลอย สามารถขึ้นรูปที่ปริมาณการเติม ADC สูงสุดที่สัดส่วน 6 phr โดยการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่มีค่าน้อยแสดงถึงค่าการคืนตัวของยางผสมที่มีความเป็นอีลาสติกที่ดี โดยยางผสมที่เติมผงถ่านลอยให้ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดน้อยที่สุด และยางผสมที่เติมซิลิกาเกรดการค้าให้การยุบตัวมากที่สุด และการเติมสารทำให้เกิดฟองทั้งสองชนิดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดเพิ่มขึ้น นั่นคือความสามารถในการคืนตัวของยางผสมลดลง โดยค่าการคืนตัวกลับที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากการแตกออกหรือฉีกขาดของผนังเซลล์ ดังแสดงจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ในรูปที่ 4.40 การฉีกขาดของผนังเซลล์นี้ทำให้ก๊าซที่อยู่ในเซลล์มีการซึมออกในขณะที่ทำการทดสอบทำให้การคืนตัวกลับมีค่าลดลง

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

ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง	สารเติมแต่ง	การยุบตัวของยางผสม (%)					
		ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	ผงถ่านลอย	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	ผงถ่านลอย	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 การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด	หลังการทดสอบ การยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด
ผงเขม่าดำ		
ผงซิลิกา		
ผงถั่วลอย		

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

ผลของการเติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH และ ADC ต่อการกระดอนของยางผสม NR/SBR ที่มี ผงถั่วลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง แสดงในตารางที่ 4.13 ซึ่งพบว่าค่าการ กระดอนมีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งต่างจากค่าการกระดอนของยางผสมที่ไม่ได้เติมสารทำให้เกิดฟอง โดย ที่ผงถั่วลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ให้ค่าการกระดอนสูงสุดและรองลงมาตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดฟองก๊าซเป็นยางพองน้ำในลักษณะของเซลล์ปิดดั่งที่กล่าวมาแล้วมีการ



กระดอนมากกว่าทำให้ยางผสมในรูปแบบยางฟองน้ำที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ มีค่าการกระดอนที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับยางผสมที่เติมถั่วลอ

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

ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง	สารเติมแต่ง	การกระดอน (%)					
		ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	ผงถั่วลอ	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	ผงถั่วลอ	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 ที่มีผงถั่วลอ ซิลิกาเกรดการการค้า และ ผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าค่าการสูญเสียเนื้อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อปริมาณสารทำให้เกิดฟองมากขึ้นจะทำให้ผนังของเซลล์บางลงจนเซลล์ทะลุถึงกันได้ ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลงทำให้การสูญเสียเนื้อเนื่องจากการขัดถูมีเพิ่มขึ้น และยางผสมที่เติมถั่วลอมีค่าการสูญเสียเนื้อสูงสุด รองมาคือผงเขม่าดำและซิลิกา ตามลำดับเนื่องจากผงถั่วลอมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ และยังเกิดการแตกตัวออกได้ในขณะผสมแต่ส่วนที่แตกออกนี้ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิวทำให้การยึดเกาะของยางกับผงถั่วลอเกิดได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังเกิด Coalescent ของฟองก๊าซรอบๆผิวถั่วลอชัดเจนกว่าสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ จึงเป็นปัจจัยให้ยางผสมที่เติมถั่วลอมีการสูญเสียเนื้อวัสดุมากที่สุด



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

ชนิดของสารทำให้เกิดฟอง	สารเติมแต่ง	การสูญเสียเนื้อ (mm ³)					
		ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)					
		0	2	4	6	8	10
OBSH	ผงถั่วลอ่ย	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	ผงถั่วลอ่ย	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 ที่เติมสารเติมแต่งผงถั่วลอ่ย ซิลิกาเกรดการค้า หรือผงเขม่าดำ ที่สัดส่วน 40 phr เปรียบเทียบระหว่างยางเนื้อตันกับยางฟองน้ำที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ซึ่งเป็นสูตรที่ได้จากการวิจัยที่สามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางปะเก็น หรือยางรองกันกระแทกได้ ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยแสดงสมบัติของยางผสม NR/SBR ที่เติมชนิดของสารเติมแต่ง ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่างยางเนือตันที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับยางฟองน้ำสูตรที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ที่เติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 40 phr

สมบัติของยางผสม	ผลิตภัณฑ์ ยางปะกันตาม ASTM	ชนิดของสารเติมแต่ง/ประเภทของยางกึ่งรูป					
		ผงถั่วลันเตา		ผงซีกาเกรดการก้า		ผงขมดำ	
		ยางเนือตัน	ยางฟองน้ำ	ยางเนือตัน	ยางฟองน้ำ	ยางเนือตัน	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
ความต้านแรงทึงกขาด (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)

สมบัติของผสม	เกณฑ์ผลิตภัณฑ์ ยางปะเก็น	ชนิดของสารเติมแต่ง/ประเภทของยางคกรูป					
		ผงเตาลอย		ผงซิลิกาเกรดการค้า		ผงเขม่าดำ	
		ยางเนื้อตัน	ยางฟองน้ำ	ยางเนื้อตัน	ยางฟองน้ำ	ยางเนื้อตัน	ยางฟองน้ำ
การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มแรงสภาวะด้วยความร้อน (%)							
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 (+) : ค่าที่เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรงสภาวะ

(-) : ค่าที่ลดลงหลังการบ่มแรงสภาวะ