บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

6.1 สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ โดยใช้ผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง ผลการวิจัยสามารถสรุปเป็น 2 ส่วน คือ (1) ยางผสมในรูปแบบยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่มีสารทำให้เกิดฟอง) และ (2) ยางผสมในรูปแบบยางฟองน้ำ ดังนี้

6.1.1 สรุปผลการทดลองยางผสมในรูปแบบของยางเนื้อตัน (ยางที่ไม่มีสารทำให้เกิดฟอง)

1. ความหนืดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ
2. การเติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR ไม่ส่งผลต่อเวลาในการสุกตัวของยางผสม
3. การเติมผงเถ้าลอย และผงซิลิกาเกรดการค้าในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 30-40 phr ให้สมบัติเด่นด้านมอดุลัสที่การยืดตัว 200% การยืดตัวที่จุดขาดและความแข็งที่ดี และผงเถ้าลอยให้สมบัติการต้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนที่ดีกว่าผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ
4. การเติมผงเขม่าดำในยางผสม NR/SBR ที่ปริมาณ 40-60 phr ให้สมบัติเด่นด้านความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และการต้านต่อการขัดถูที่ดี
5. การบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนของยางผสมที่เติมสารเติมแต่งทั้ง 3 ชนิด ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้นการยืดตัวที่จุดขาดลดลง

6.1.2 สรุปผลการทดลองยางผสมในรูปแบบของยางฟองน้ำ

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

4. ยางฟองน้ำจากยางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำมีความหนาแน่นจำเพาะต่ำกว่าการเติมผงเถ้าลอย
5. ยางฟองน้ำจากยางผสมที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ก่อนและหลังการเร่งสภาวะด้วยความร้อน สมบัติความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดไม่แตกต่างกัน สมบัติมอดุลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนหลังการบ่มเร่งพบว่าสมบัติการยืดตัวที่จุดขาดลดลง
6. การบ่มเร่งสภาวะด้วยรังสียูวีของยางฟองน้ำจากยางผสม ทำให้ความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง ส่วนมอดุลัสที่การยืดตัว 200% และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น และยางผสมมีการยืดตัวลดลง
7. สมบัติการคืนกลับของยางผสมเมื่อได้รับแรงอัด มีการคืนกลับลดลงตามปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เพิ่มขึ้น และยางผสมที่เติมผงเถ้าลอยมีการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัด ดีกว่ายางผสมที่เติมผงซิลิกาเกรดการค้าหรือผงเขม่าดำ
8. การนำสูตรยางผสม NR/SBR ที่สัดส่วนเท่ากัน ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ปริมาณ 40 phr ที่มีสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ปริมาณ 4 phr ขึ้นรูปที่โรงงานความหนา 2 และ 10 มิลลิเมตร พบว่า สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ปะเก็นยางฟองน้ำแผ่นเรียบในระดับโรงงานได้ โดยที่ยางปะเก็นฟองน้ำที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ได้จากการวิจัย พบว่า **สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าปะเก็นยางฟองน้ำ/ยางกันกระแทกเกรดการค้า** ที่ความหนาชิ้นงานเท่ากัน
9. ยางปะเก็นฟองน้ำจากยางผสมที่เติมผงเถ้าลอย มีสมบัติการคืนกลับเมื่อได้รับแรงอัด และการกระดอนที่ดี ซึ่งแสดงสมบัติความอีลาสติกที่ดีของยางปะเก็นฟองน้ำ

6.2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

คณะวิจัยฯ นำสูตรยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่มีสมบัติที่เหมาะกับการไปใช้งาน ดังนี้ ยาง NR/SBR ที่สัดส่วนของเท่ากัน (1:1) ที่เติมสารทำให้เกิดฟองชนิด OBSH ที่ปริมาณสัดส่วน 4 phr ที่มีสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ที่ปริมาณสัดส่วน 40 phr ได้นำมาเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเพื่อวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง ดังแสดงใน**ตารางที่ 6.1** จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ ในยางฟองน้ำของยางผสม NR/SBR มีต้นทุนในการผลิต (ไม่รวมค่าแรงงานและเครื่องจักร) ตามลำดับของสารเติมแต่ง ดังนี้ ราคา 53.95 บาท 71.36 บาท และ 64.58 บาทต่อกิโลกรัม และมีข้อแนะนำเพิ่เติมในการเลือกใช้ให้เหมาะกับต้นทุนและสมบัติและการนำไปใช้งาน แสดงใน**ตารางที่ 6.1** (ท้ายตาราง)

ตารางที่ 6.1 การเปรียบเทียบต้นทุนวัสดุของยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่เติมผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ โดยคิดราคาต่อน้ำหนัก

ต้นทุนการผลิตยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ ที่มีสารเติมแต่ง		
ผงเถ้าลอย	**ผงซิลิกาเกรดการค้า**	**ผงเขม่าดำ**
ราคาวัตถุดิบ (เนื่องจากสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้เหมือนกันจึงไม่นำมาคำนวณในที่นี้ด้วย)		
■ ยางธรรมชาติ ประมาณ 53 บาทต่อกิโลกรัม ■ ยางเอสบีอาร์ ประมาณ 90 บาทต่อกิโลกรัม ■ เถ้าลอย ประมาณ 2 บาทต่อกิโลกรัม	■ ยางธรรมชาติ ประมาณ 53 บาทต่อกิโลกรัม ■ ยางเอสบีอาร์ ประมาณ 90 บาทต่อกิโลกรัม ■ ซิลิกาเกรดการค้า 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 ■ ซิลิกาเกรดการค้า 200 กิโลกรัม ■ สารคู่ควบไซเลน 17 กิโลกรัม	■ ยางธรรมชาติ 500 กิโลกรัม ■ ยางเอสบีอาร์ 500 กิโลกรัม ■ ผงเขม่าดำ 200 กิโลกรัม *(ไม่ต้องทำการปรับปรุงผิว)*
ต้นทุนการผลิตผลิตภัณฑ์ 1 ล๊อต (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 ■ ซิลิกาเกรดการค้า 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**
ข้อแนะนำในการเลือกสมบัติของยางฟองน้ำจากยางผสม NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง		
การพองตัวน้อย/ยางมีสีน้ำตาล/น้ำหนักมาก/ต้นทุนลดลง	การพองตัวมาก/ยางมีสีขาว เติมสีได้ตามความต้องการ/น้ำหนักมาก	การพองตัวน้อย/ยางมีสีดำ

6.3 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำ จากยางผสมNR/SBR ที่เติมสารเติมแต่งผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ

การวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียขั้นตอนการผลิตของผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ ที่มีผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง ดังแสดงในตารางที่ 6.2 เพื่อเป็นปัจจัยหนึ่งสำหรับการเลือกไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตปะเก็นยางหรือยางกันกระแทก

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบข้อดี / ข้อเสีย ของขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่มีผงเถ้าลอย ผงซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ เป็นสารเติมแต่ง

ขั้นตอนการผลิต		ข้อดีและข้อเสียของขั้นตอนการผลิตยางฟองน้ำจากยางผสมระหว่าง NR/SBR ที่เติมสารเติมแต่ง		
		ผงเถ้าลอย	ผงซิลิกาเกรดการค้า	ผงเขม่าดำ
การเตรียมวัตถุดิบ		ต้องทำการปรับปรุงผิวก่อนนำไปใช้งาน		ไม่ต้องทำการปรับปรุงผิว
กระบวนการผสม		เถ้าลอยสามารถผสมเข้าเนื้อยางได้ง่าย จึงนับว่าเป็นการช่วยทางด้านการประหยัดพลังงาน	ซิลิกาเกรดการค้าฟุ้งกระจายและผสมให้เข้าในเนื้อยางยาก ต้องใช้ทั้งเวลาและแรงในการบดผสมสูง	ผงเขม่าดำสามารถผสมเข้าเนื้อยางได้ง่าย
ลักษณะเครื่องมือ/อุปกรณ์/สถานที่หลังการผลิต		ทำความสะอาดง่าย ทำให้ประหยัดเวลา	ทำความสะอาดค่อนข้างยากเนื่องจากซิลิกาฟุ้งกระจาย	ทำความสะอาดยากต้องใช้เวลานานมาก
กระบวนการขึ้นรูป	การไหลตัวของยาง	ไหลตัวง่าย ซึ่งช่วยลดพลังงานแรงอัดจากเครื่องจักรได้เป็นอย่างดี	ไหลตัวยาก ซึ่งต้องใช้แรงอัดขึ้นรูปสูง	ไหลตัวง่าย
	เวลาในการขึ้นรูป	เวลาในการคงรูปยางนาน	เวลาในการคงรูปสั้น	
ลักษณะชิ้นงาน/สี		ผิวหยาบ/พองตัวน้อย/สีน้ำตาล	ผิวเรียบ/พองตัวมาก/สีขาวขุ่นสามารถเติมสีได้	ผิวเรียบมัน/พองตัวน้อย/สีดำ

6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 ควรทดลองนำไปใช้เชิงพาณิชย์กับผลิตภัณฑ์เป้าหมายอื่นๆ อาทิ ซีลแผ่นฉนวนกันความร้อนซึ่งควรมีการตรวจสอบสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพิ่มเติม

6.4.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมทางด้านขยายขอบเขตการใช้งานด้านการทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น เช่น การผสมด้วยยางเอ็นบีอาร์ หรือการผสมด้วยยางอีพีดีเอ็ม เป็นต้น

6.4.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ เช่น ซิลิติน (ที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก) หรือนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า ผงเถ้าลอย และผงเขม่าดำ โดยเปรียบเทียบด้านสมบัติและราคา

6.4.4 ยางฟองน้ำที่ได้จากงานวิจัยนี้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นหรือยางรองกันกระแทกเกรดการค้า โดยสามารถนำไปใช้ทดแทนได้ แต่มีข้อสังเกตประการหนึ่งด้านการกลับคืนตัวของยางเมื่อได้รับแรงอัด จะ มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จึงควรศึกษาเพิ่มเติมในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว ทั้งนี้อาจประยุกต์นำยางฟองน้ำที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลิตภัณฑ์ในรูปอื่นๆ เช่น วัสดุห่อหุ้มกันการกระแทก เบาะรองกันกระแทก เป็นต้น