

การเตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้จาก
ยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง
**Preparation of Biodegradable Sponge Rubber Based on
Natural Rubber and Cassava Starch**

คมสันต์ เต็มหา
Komsun Temna

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Polymer Science and Technology
Prince of Songkla University**

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การเตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมได้จาก
 ยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง
 ผู้เขียน นายคมสันต์ เต็มนา
 สาขาวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ดร.นิธินาถ แซ่ตั้ง)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร.เอกวิภู กาลกรณ์สุรปราณี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ดร.เอกวิทย์ เพ็ชรอนุรักษ์)

.....
 (ดร.อนุวัติ แซ่ตั้ง)

.....กรรมการ
 (ดร.วิสุทธิ์ แก้วสกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และ
 เทคโนโลยีพอลิเมอร์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ดร.นิธินาท แซ่ตั้ง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายคมสันต์ เต็มนา)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายคมสันต์ เต็มนา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง
ผู้เขียน	นายคมสันต์ เต็มนา
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

ศึกษาการเตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์เป็นลำดับแรก พบว่าสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำที่ได้จากการเตรียมทั้ง 2 เทคนิคลดลงตามการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลัง อย่างไรก็ตาม ยางฟองน้ำที่ได้จากเทคนิคแบบเจลาติไนซ์มีค่าสมบัติเชิงกลสูงกว่าเทคนิคแบบไม่เจลาติไนซ์ ดังนั้นจึงเลือกการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคแบบเจลาติไนซ์มาเตรียมยางฟองน้ำ ทำการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr โดยแปรระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่งและกำมะถัน ได้แก่ ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ พบว่าความหนืดมูนนี้ เวลาในการวัลคาไนซ์ และสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยลดลงตามการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลัง อย่างไรก็ตามความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าสูงสุดที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30 phr นอกจากนั้นยางฟองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติแสดงขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยเล็กกว่า มีการกระจายตัวของแป้งดีกว่า และสมบัติเชิงกลสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพตามลำดับ จากนั้นศึกษาสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางฟองน้ำ พบว่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และการผิดรูปหลังการกดอัดลดลง ส่วนการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังดินของยางฟองน้ำเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางฟองน้ำที่ไม่ใส่แป้งลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ยวกันยางฟองน้ำที่ใส่แป้งลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนั้นสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

Thesis Title	Preparation of biodegradable sponge rubber based on natural rubber and cassava starch
Author	Mr.Komsun Temna
Major Program	Polymer science and technology
Academic Year	2013

ABSTRACT

Preparation of biodegradable sponge rubber based on natural rubber and cassava starch was studied. Two different techniques to prepare cassava starch masterbatch with non-gelatinized (NST) and gelatinized cassava starch (GST) were first investigated. It was found that the mechanical properties *i.e.*, tensile strength, elongation at break and tear strength of NR sponge based on both techniques decreased with increasing of cassava starch content. Among both techniques, the sponge based on gelatinized technique gave better mechanical properties than that of non-gelatinized cassava starch. Therefore, the GST technique was chosen to prepare rubber sponge. The content of cassava starch at 0, 10, 30, 50 and 70 phr were the studied with different vulcanization system *i.e.*, conventional (CV), semi-efficiency (semi-EV) and efficiency vulcanization (EV). It was found that mooney viscosity, cure time and mechanical properties increased but average cell size decreased with increasing of cassava starch content. However, the highest tensile strength was observed at 30 phr. In addition, the NR sponge with CV cured system showed smaller average cell size, better starch dispersion and higher mechanical properties than those of semi-EV and EV system, respectively. Heat ageing properties of the NR sponge were also studied. It was found that the higher modulus at 100, 300 and 500% and tear strength were observed after ageing. On the other hand, the tensile strength, elongation at break and compression set were lower. Biodegradable test was performed under soil burial for 4 months. It was found that the tensile strength, elongation at break and tear strength of NR sponge without starch slightly decreased, at the same time the sponge NR with starch was significantly decreased. In addition, the mechanical properties of sponge NR with CV system gave higher than that of the semi-EV and EV system, respectively.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการรูป	(14)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(19)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิเมอร์ชีวภาพ	5
2.2 ยางธรรมชาติ	6
2.2.1 ยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ	10
2.3 แป้ง	12
2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	12
2.3.2 การเกิดเจลลาตินไนซ์	15
2.4 การย่อยสลายของพอลิเมอร์	16
2.5 การตรวจสอบเอกสาร	18
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	
3.1 สารเคมี	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	28
3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ ที่มีผลต่อสมบัติยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง	32
3.3.1.1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบไม่เจลาตีไนซ์	32
3.3.1.2 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบเจลาตีไนซ์ - ขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์พองน้ำ	33
3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อสมบัติยางพองน้ำจาก ยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง	35
3.3.3 การทดสอบสมบัติความเหนียวของยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่อง Mooney viscometer	36
3.3.4 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่อง MDR	36
3.3.5 การเตรียมชิ้นทดสอบโดยใช้กระบวนการอัด	37
3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล	37
3.3.6.1 การทดสอบความหนาแน่น	37
3.3.6.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึง	37
3.3.6.3 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด	38
3.3.6.4 การทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด	39
3.3.7 การทดสอบการบ่มเร่งของยางด้วยความร้อน	40
3.3.8 การตรวจลักษณะทางสัญญาณทางวิทยาด้วยเครื่อง SEM	41
3.3.9 การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่มีผลต่อ สมบัติของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์	43
4.1.2 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	46
4.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	49
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำ จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง	51
4.2.1 ความหนืดมูนี้ของยางพองน้ำคอมพาวนด์	52
4.2.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์	53
4.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	58
4.2.4 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	65
4.2.5 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	75
4.2.6 สมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดินของยางพองน้ำ วัลคาไนซ์	84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 ผลการศึกษาเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่มีผลต่อ สมบัติของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง	98
5.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์	98
5.1.2 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	98
5.1.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	98
5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำ จากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง	99
5.2.1 ความหนืดมูนี้ของยางพองน้ำคอมพาวนด์	99
5.2.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์	99
5.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	99
5.2.4 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์	100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.5 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน	100
5.2.6 สมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดินของยางพองน้ำ วัลคาไนซ์	101
บรรณานุกรม	102
ภาคผนวก	106
ก ความชื้นในดิน และอุณหภูมิของหลุมทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	107
ข เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน	108
ประวัติผู้เขียน	123

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน	8
3.1 สูตรยางคอมพาวนด์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	34
3.2 ลำดับขั้นตอนในการผสมยางคอมพาวนด์ของยางฟองน้ำ	34
3.3 สูตรยางคอมพาวนด์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	35
4.1 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	44
4.2 สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	46
4.3 ความเหนียวของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์ต่าง ๆ	52
4.4 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	54
4.5 ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยและจำนวนเซลล์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	63
4.6 สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	66
4.7 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	76
4.8 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการคืนรูปหลังการกด หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	82
4.9 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	85

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 สมบัติเชิงกลหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	88
ก.1 ความชื้นในดิน และอุณหภูมิของหลุมทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพจาก วันที่ 24 พฤศจิกายน 2556 ถึง 24 มีนาคม 2557	107

รายการรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน	6
2.2 โครงสร้างของทรานส์-1,4-พอลิไอโซพรีน	7
2.3 พันธะการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติกับกำมะถัน	9
2.4 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	14
2.5 ระยะเวลาการเกิดเจลลิตีในซ์ของเม็ดแป้ง	16
2.6 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	18
3.1 โครงสร้างทางเคมีของ super cell	27
3.2 โครงสร้างทางเคมีของไดโนโทรโซเพนทะเมทีลลีนเทตระมีน	28
3.3 ตู้อบบ่มแรงชนิด Gear Aging	29
3.4 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง	30
3.5 เครื่องอัดเบ้า (compression molding)	30
3.6 ลักษณะเบ้าที่ใช้ความหนา 0.2 cm (ซ้าย) และ 0.9 cm (ขวา)	31
3.7 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง	31
3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	32
3.9 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบรูปดัมเบลแบบ die C	38
3.10 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบแบบมุม	39
3.11 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด	40
3.12 หลุมทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังดิน	42
4.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลลิตีในซ์	44
4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการเตรียมแบบเจลลิตีในซ์	45
4.3 มอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	47
4.4 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	47

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	48
เปอร์เซ็นต์ยี่ด ๓ จุดขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	
4.6	48
ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน	
4.7	50
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่าง ๆ โดยที่กำลังขยาย 350 เท่า	
4.8	53
ความหนืดมูนี้ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	
4.9	55
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	
4.10	55
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	
4.11	56
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	
4.12	56
เวลาเริ่มการวัลคาไนซ์ เวลาในการวัลคาไนซ์ และดัชนีการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	
4.13	59
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติกำลังขยาย 35 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)	
4.14	60
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพกำลังขยาย 35 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)	
4.15	61
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพกำลังขยาย 35 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)	
4.16	64
ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 จำนวนเซลล์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	64
4.18 ความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	67
4.19 มอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	68
4.20 มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	69
4.21 มอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	69
4.22 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	70
4.23 เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	72
4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	73
4.25 ความสามารถในการคืนรูปหลังการกดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	74
4.26 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์หลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	78
4.27 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	78
4.28 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์หลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	79

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29	79
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อแรงดึงหลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	
4.30	80
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาดหลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	
4.31	80
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	
4.32	83
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการคืนรูปหลังการกดหลังการปมเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ	
4.33	86
น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	
4.34	86
น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	
4.35	87
น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	
4.36	90
มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	
4.37	90
มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	
4.38	91
มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	
4.39	91
ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแอม้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.40 ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	92
4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	92
4.42 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	93
4.43 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	93
4.44 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	94
4.45 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำ วัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	94
4.46 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำ วัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	95
4.47 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำ วัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	95

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ตัวย่อ

ตัวย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
ASTM	American Society for Testing and Materials	มาตรฐานการทดสอบของสมาคมอเมริกา
ADC	azodicarbonamide	เอโซไดคาร์โบนาไมด์
cm	centimeter	เซนติเมตร
cm ²	square centimeter	ตารางเซนติเมตร
cm ³	cubic centimeter	ลูกบาศก์เซนติเมตร
CV	conventional vulcanization system	ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ
CRI	cure rate index	ดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์
°C	degree Celsius	องศาเซลเซียส
DPT	dinitrosopenta-methylene tetramine	ไดไนโตรโซเพนทาเมทิลีนเตตระมีน
EV	efficient vulcanization system	ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ
g	gram	กรัม
h	hour	ชั่วโมง
L	observed distance between bench marks on the intended specimen	ระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยึดตัวได้จนขาด
L _o	original distance between bench marks length of origins	ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ
ml	milliliter	มิลลิลิตร
mm	millimeter	มิลลิเมตร

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

ตัวย่อ

ตัวย่อ	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย
min	minute	นาที
MMA	methyl methacrylate	เมทิลเมทาคริเลท
MPa	mega pascal	เมกะเพาสคาล
\overline{M}_w	molecular weight	น้ำหนักโมเลกุลเชิงน้ำหนัก
\overline{M}_n	molecular weight	น้ำหนักโมเลกุลเชิงจำนวน
MH	maximum torque	แรงบิดสูงสุด
ML	minimum torque	แรงบิดต่ำสุด
N	Newton	นิวตัน
NR	natural rubber	ยางธรรมชาติ
N/mm ²	newton per millimetersquare	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
phr	part per hundred rubber	ส่วนในร้อยส่วนของยาง
SEM	scanning electron microscopy	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด
Semi-EV	semi-efficient vulcanization system	ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่ง ประสิทธิภาพ
tan δ	loss tangent	ค่าแทนเจนต์สูญเสีย
T _g	glass transition temperature	อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน
t _{s2}	scorch time	เวลาเริ่มวัลคาไนซ์
t _{c90}	cure time	เวลาในการวัลคาไนซ์
wt%	weight percent	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
μm	micrometer	ไมโครเมตร (10 ⁻⁶ m)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ยางธรรมชาติหรือยางพารา (natural rubber, NR) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราทั่วประเทศ และประเทศไทยเป็นทั้งผู้ผลิตและผู้ส่งออกยางพาราในปี 2555 ส่งออก 3,647,000,000 ตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 336,287,000,000 บาท [1] ยางพาราที่ไทยส่งออกแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ ยางแห้ง ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางแท่ง ยางเครพ เป็นต้น และ น้ำยาง ได้แก่ น้ำยางข้น เป็นต้น ปัจจุบันมีการใช้งานผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางในรถจักรยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นอย่างยิ่งจะมีการเติมสารเคมีสำหรับยาง [2] เช่น สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารตัวเติม และที่สำคัญที่สุดคือ สารวัลคาไนซ์ เช่น กำมะถัน เนื่องจากยางดิบตามลำพังมีขีดจำกัดในการใช้งาน สมบัติความแข็งแรงต่ำ ยางที่ผ่านกระบวนการผสมสารเคมีจะเรียกว่า ยางคอมพาวนด์ (rubber compound) และจะถูกนำไปขึ้นรูปโดยการให้ความร้อน ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเชื่อมโยงพันธะ (crosslink) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลในรูปแบบโครงร่าง 3 มิติ ทำให้ผลิตภัณฑ์คงรูปมีลักษณะรูปร่างตามต้องการและมีความแข็งแรงสูงขึ้น ถึงแม้ยางธรรมชาติจะเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพก็ตาม แต่เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแบบร่างแห ทำให้เกิดเป็นปัญหาการย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ และต้องใช้ระยะเวลาหลาย ๆ ปี ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขการย่อยสลายได้ยากในยางธรรมชาติ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเตรียมยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมแป้ง เพราะแป้งเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีหน่วยซ้ำคือ กลูโคสซึ่งเป็นแหล่งอาหารของจุลชีพ ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและแป้งจึงสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ นอกจากนี้แป้งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากพืชทำให้สามารถปลูกพืชใหม่และนำมาผลิตทดแทนได้ อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

หนึ่งในแป้งที่น่าสนใจคือ แป้งมันสำปะหลังเนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่ได้จากการแปรรูปมันสำปะหลังซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของประเทศ โดยมีการส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก [3] แต่การส่งออกมันสำปะหลังประสบปัญหาในเรื่องของผลผลิตตกต่ำ ดังนั้นการเพิ่มมูลค่าของแป้งมันสำปะหลังจึงมีความจำเป็นเพื่อเพิ่มรูปแบบใหม่ ๆ ในการใช้งานมันสำปะหลังมากขึ้น เช่น การนำไปผลิตเอทานอล [4] และการผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ [5]

ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดใหม่จากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังมาผลิตเป็นวัสดุที่มีจุดเด่นของพอลิเมอร์ทั้งสองเข้าไว้ด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามแป้งเป็นสารอินทรีย์ที่มีความชอบน้ำ (hydrophilicity) และยางธรรมชาติเป็นสารอินทรีย์ที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) เมื่อผสมเข้าด้วยกันทำให้ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ เกิดการสูญเสียสมบัติทางกายและสมบัติเชิงกล ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้ แต่สามารถแก้ไขข้อด้อยนี้ได้ คือ การดัดแปรยางธรรมชาติให้มีขั้วเพิ่มขึ้นทำให้สามารถละลายในน้ำได้ดี โดยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เช่น การกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยมาลิกแอต [6] การกราฟต์ยางธรรมชาติด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต [7] หรือการปรับปรุงโครงสร้างยางธรรมชาติผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน [8] สำหรับแป้งสามารถดัดแปรโครงสร้างทางเคมีผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) [9] และการกราฟต์ด้วยพอลิบีทิลอะคริเลต [10] รวมทั้งยังมีรายงานถึงการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) เช่น การใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) การใช้ไกลซีดีลเมทาคริเลต [11] และการใช้ยางธรรมชาติมาลิกแอต [6] นอกจากนี้ยังมีอีกหนทางเลือกที่นิยมกันคือ การนำแป้งมาผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ (gelatinization) และทำการผสมในน้ำยางและทำการจับตัว [12, 13] ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัดพลังงานในการผสมและสามารถช่วยให้อนุภาคของแป้งลดลง การกระจายตัวของอนุภาคแป้งในเนื้อยางได้ดีขึ้นปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างผิว (interfacial) ระหว่างแป้งและยางให้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการรายงานถึงการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับแป้ง เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ [14] และการดัดแปรโครงสร้างแป้งเพื่อเป็นสารตัวเติมในยาง [15] ส่วนการเตรียมยางฟองน้ำจากพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและแป้งนั้น แป้งจะทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์ โดยมียางธรรมชาติบางส่วนเพื่อเป็นเพียงตัวประสานลักษณะการแปรรูปโฟมดังกล่าวจะอาศัยการอบ เพื่อให้แป้งผสมมีโครงสร้างเป็นฟองเกิดขึ้นโดยไม่มีสารเคมีเพื่อให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนซ์ และเป็นการพุดตัวซึ่งเรียกว่าฟองน้ำดังกล่าว Baked starch foam [16, 17]

อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยในส่วนของการเตรียมยางฟองน้ำ (sponge rubber) จากยางธรรมชาติกับแป้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจะทำการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติกับแป้ง โดยนำแป้งมาผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ และทำการผสมในน้ำยางแล้ว

ทำการจับตัว นำแป้งมาสเตอร์แบทช์ที่ได้มาบดผสมกับสารเคมีสำหรับยางและสารฟู (blowing agent) ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นโพรงในพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ บนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ซึ่งทำให้ได้ยางฟองน้ำที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและแป้งมีสมบัติความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา สมบัติเชิงกลดี รับแรงกระแทกได้ดี และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง
2. เพื่อศึกษาระบบวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันที่ใช้เตรียมยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ลักษณะสัณฐานวิทยา และความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของยางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง
4. เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติกับแป้งซึ่งอาจจะนำไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมยางฟองน้ำต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ โดยวิธีการเจลลาตีไนซ์แป้งแล้วทำการกวนผสมกับ น้ำยางธรรมชาติแล้วจับตัวน้ำยางด้วย 10% โดยน้ำหนักของแคลเซียมคลอไรด์
2. เตรียมคอมพาวนด์ยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง
3. ใช้สารฟูชนิดอินทรีย์กลุ่มของ azo-dicarbonamide ชื่อทางการค้า super cell และ dinitrosopenta-methylene tetramine (DPT) โดยใช้ที่ปริมาณ 5 phr
4. ใช้สารตัวเร่งกลุ่มซัลฟิโนไซด์ ได้แก่ TBBS
5. ศึกษาผลของปริมาณแป้งมาสเตอร์แบทช์ที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเชิงกล สมบัติความเสถียรภาพทางความร้อน ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ

6. ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวเร่งแบบต่าง ๆ ดังนี้
 - ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ (conventional vulcanization system; CV)
 - ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization system; Semi-EV)
 - ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization system; EV)
7. ทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์ ได้แก่
 - ความหนืดมูนี (Mooney viscosity)
 - ลักษณะการวัลคาไนซ์ (cure characteristic)
8. ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเชิงกลของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติทั้งก่อนบ่ม เร่งและหลังบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนดังนี้คือ
 - ความหนาแน่น (density)
 - สมบัติการทนต่อแรงดึง (tensile strength)
 - สมบัติการต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength)
 - ความสามารถในการคืนรูปหลังการกด (compression set)
9. ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย (average cell size) และจำนวนเซลล์ (cell count)
10. ศึกษาสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดินของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาการเตรียมยางพองน้ำที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
2. เป็นแนวทางในการลดปัญหาขยะที่ย่อยสลายได้ยากจากผลิตภัณฑ์ยาง
3. เป็นทางเลือกในการนำพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยมาใช้ประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าทางการเกษตร

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

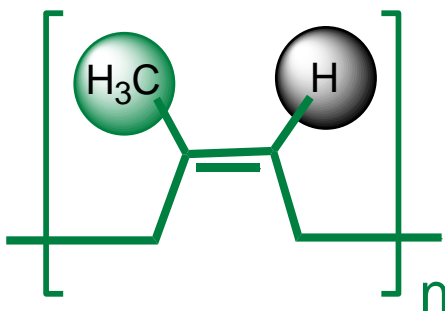
2.1 พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) [18]

พอลิเมอร์ชีวภาพ หมายถึง พอลิเมอร์ที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตซึ่งเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติทางชีวภาพที่ไม่สูญเสียสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ ไม่ว่าพอลิเมอร์จะมาจากการสกัด การสังเคราะห์หรือการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี การสร้างขึ้นจากแหล่งธรรมชาติถือว่าเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งสิ้น พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถจำแนกได้ตามแหล่งที่มาได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. พอลิเมอร์ที่สกัดจากแหล่งมีชีวิตพอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ที่สกัดมาจากพืชหรือสิ่งมีชีวิตวัสดุเหล่านี้ตามธรรมชาติจะมีสมบัติไม่ทนน้ำ บางชนิดอาจก่อให้เกิดผลึกซึ่งเป็นปัญหาเกี่ยวกับกระบวนการผลิต แต่วัสดุจำพวกนี้มีข้อดีคือ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ตัวอย่างเช่น พอลิแซคคาไรด์ โปรตีน เป็นต้น
2. พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์หมอนอเมอร์ธรรมชาติด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) โดยกรดแลคติกเป็นหมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิดซึ่งสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักคาร์โบไฮเดรตจากข้าวโพดจากข้าวสาลีหรืออาจใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมเป็นต้น พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเอสเทอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารได้มากมายเนื่องจากสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในทำให้เลือกกระบวนการผลิตได้หลากหลาย โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุล
3. พอลิเมอร์ที่ถูกผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxy alkanate, PHA) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากการต่อกันเป็นหน่วยซ้ำ ของกรดไฮดรอกซี (hydroxy acid) โดยมีแบคทีเรียชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและพลังงาน พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นวัสดุพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ (bio-degradable thermoplastic material)

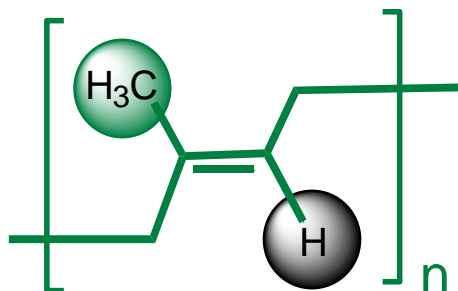
2.2 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) [19]

ยางธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่ได้มาจากน้ำยางของต้นยางพารา ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีชื่อทางเคมีคือ ซิส 1,4-พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) ในยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยซ้ำของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง มีค่า \bar{M}_n อยู่ในช่วง 0.25×10^6 ถึง 2.71×10^6 และมีค่า \bar{M}_w อยู่ในช่วง 3.40×10^6 ถึง 10.17×10^6 ลักษณะเด่นของยางธรรมชาติคือ การมีโครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างสม่ำเสมอ จึงสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมาก มีความแข็งแรงของยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ (*green strength*) สูงและมีความเหนียวติดกันดี สำหรับยางธรรมชาติดิบเมื่อถูกดึงให้ยืด โมเลกุลยางจะมีการไหลหรือเกิดการเคลื่อนตัวตามแรงที่มากระทำ เมื่อปล่อยแรงกระทำนั้นออกยางธรรมชาติอาจจะมีการคืนรูปบางส่วน ดังนั้นยางธรรมชาติดิบจะไม่สามารถที่จะรักษารูปทรงได้อย่างสมบูรณ์ ยางธรรมชาติมีโมเลกุลขนาดใหญ่ขดตัวไปมาและสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถเคลื่อนไหวได้ ทำให้มีสมบัติความยืดหยุ่นสูง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน

นอกจากนี้ยางธรรมชาติดิบมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกอีกด้วย กล่าวคือสามารถเกิดการไหลได้เมื่อได้รับความร้อน การที่ยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างทำให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน แต่จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศและโอโซนได้ง่ายเช่นกัน ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อม แต่มียางธรรมชาติบางชนิดที่มีหน่วยซ้ำ ๆ กันแบบ ทรานส์-1,4-พอลิไอโซพรีน (*trans*-1,4-polyisoprene) ของยางสายพันธุ์ *Gutta-percha* ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบทรานส์จะมีความเป็นระเบียบมากกว่า จึงเอื้อให้เกิดผลึกได้ง่ายกว่าและสามารถเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ยาง *Gutta-percha* อยู่ในสถานะคล้ายยาง (*rubber-like*) ก็ต่อเมื่อให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิหลอมผลึกซึ่งอยู่ที่ประมาณ $65^{\circ}C$



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของทรานส์-1,4-พอลิไอโซพรีน

สมบัติเด่นของยางธรรมชาติมีหลากหลายประการ [2] ได้แก่

- ความยืดหยุ่น (elasticity) กล่าวคือ สามารถยืดออกไปตามแนวแรงที่มากระทำแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิม เมื่อเอาแรงกระทำนั้นออก การกลับสู่สภาพเดิมได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับสมบัติของยางนั้น
- ความเหนียวติด (tack) ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติด ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันเช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น
- ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงด้วยเหตุผลนี้เองทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยึด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง โดยค่าความต้านทานต่อการดึงของยางธรรมชาติที่ไม่เติมสารตัวเติมเสริมแรงจะอยู่ที่ประมาณ 20 MPa
- ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกดึงยึด เพราะฉะนั้นยางธรรมชาติจึงมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง
- ความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion resistance) เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) แล้วความต้านทานต่อการขัดถูของยางธรรมชาติจะต่ำกว่าเล็กน้อย
- การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties) ยางธรรมชาติสามารถเกิดการเสื่อมสภาพได้เมื่อได้รับความร้อน โอโซนและแสงแดด เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้องไวต่อการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือเรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีการเร่งปฏิกิริยาโดยแสงแดดหรือความร้อน ทำให้ยางธรรมชาติถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ดังนั้นในการใช้งานจำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidants) เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

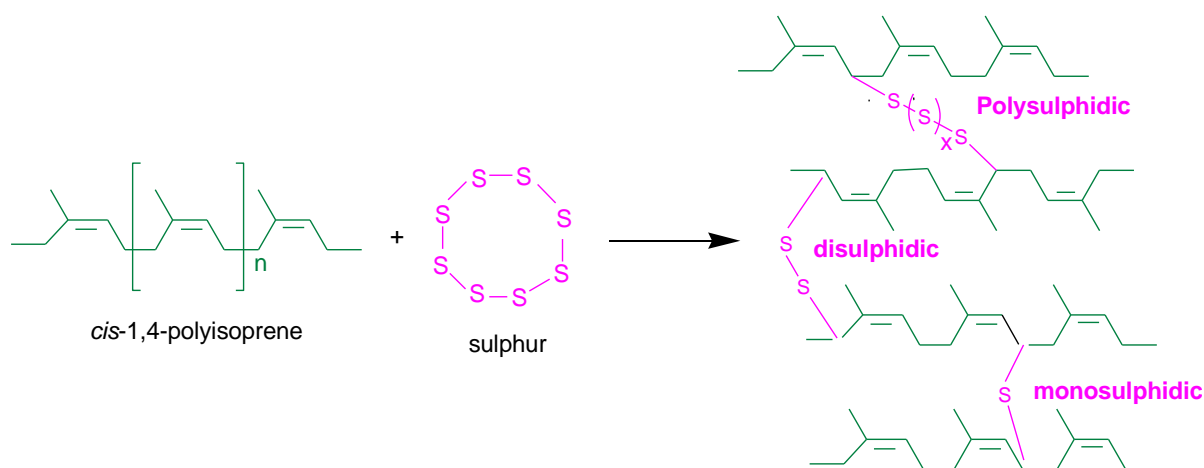
- ความสามารถในการคืนรูปหลังการกด (compression set) ของยางธรรมชาติมีค่าการคืนตัวหลังการกดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง โดยค่าการคืนตัวหลังการกดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้น เนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการคืนตัวหลังการกดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงเช่นกัน เนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อนยางจึงเสื่อมสภาพ ทำให้ค่าการคืนตัวหลังการกดด้อยลง

อย่างไรก็ตามยางดิบมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อได้รับความร้อนและจะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารตัวเติมและสารวัลคาไนซ์ เป็นต้น โดยกระบวนการคงรูปยางจะเกิดขึ้นเมื่อนำยางผสมสารเคมีและสารวัลคาไนซ์มาให้ความร้อนซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าการวัลคาไนซ์ (vulcanization) สารวัลคาไนซ์หรือสารทำให้ยางคงรูปที่นิยมใช้กันคือ กำมะถัน โดยกำมะถันจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางตรงจุดที่วงเว้าต่อปฏิกิริยา การใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียวในระบบการวัลคาไนซ์จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลจะเกิดได้ช้ามาก ต้องใช้กำมะถันในปริมาณที่สูงและต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมาก ๆ จึงสามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีและเร็วขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาในระบบ ทำให้ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะทางเคมีระหว่างสายโซ่โมเลกุลเกิดได้เร็วขึ้น โดยทั่วไประบบวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งในยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบคือการวัลคาไนซ์ระบบปกติ (conventional vulcanization system; CV) การวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization system; Semi-EV) และ การวัลคาไนซ์ระบบมีประสิทธิภาพ (efficient vulcanization system; EV) โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งระบบการวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งในยางธรรมชาตินั้นจะแบ่งตามสัดส่วนการใช้กำมะถันกับสารเร่ง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน [20]

ระบบการวัลคาไนซ์	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารตัวเร่ง (phr)
ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ	1.5-2.5	0.5-1.0
ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ	0.5-1.2	1.5-2.5
ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ	0.0-0.2	2.5-3.5

พันธะการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติจะแตกต่างกันตามปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งที่ใช้ กล่าวคือ การวัลคาไนซ์ระบบปกติจะให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (polysulphidic crosslinking) ส่วนการวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพส่วนใหญ่จะเกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบไดซัลฟิดิก (disulphidic crosslinking) และการวัลคาไนซ์ระบบประสิทธิภาพส่วนใหญ่จะเกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบโมโนซัลฟิดิก (monosulphidic crosslinking) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พันธะการเชื่อมโยงระหว่างยางธรรมชาติกับกำมะถัน

การที่พันธะการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางแตกต่างกัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางหลังการวัลคาไนซ์แตกต่างกันด้วย โดยการวัลคาไนซ์ระบบปกติจะมีพันธะการเชื่อมโยงของกำมะถันอยู่หลายอะตอมส่งผลให้สมบัติทางเชิงกล เช่น ความต้านทานต่อแรงดึงดี ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานการล้าดีและมีสมบัติในการต้านทานการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก ซึ่งดีกว่าการวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพ และการวัลคาไนซ์ระบบมีประสิทธิภาพ ตามลำดับ แต่สมบัติการทนทานต่อความร้อน (heat ageing) สมบัติหลังจากได้รับความร้อน (reversion) และสมบัติการคืนตัวหลังการกดของยางจะด้อยกว่าอีกสองระบบ โดยการวัลคาไนซ์ระบบประสิทธิภาพ จะใช้กำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งในปริมาณมาก ทำให้การใช้กำมะถันเกิดการเชื่อมโยงแต่ละพันธะมีประสิทธิภาพมาก แต่แต่ละพันธะการเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งหรือสองอะตอมเท่านั้น จะทำให้ยางมีสมบัติหลังได้รับความร้อนดี

2.2.1 ยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ (Natural rubber foam)

ยางฟองน้ำคือ ยางที่ภายในประกอบไปด้วยโพรงเล็ก ๆ จำนวนมาก มีรูหรือโพรงอากาศขนาดเล็กภายในเนื้อยางอาจจะติดต่อกันทั้งหมด หรือติดต่อกันบางส่วน และอาจจะมีส่วนที่ไม่ติดต่อกัน ส่วนผิวหน้าที่เรียบของฟองน้ำเกิดจากการสัมผัสกันของผิวหน้าฟองน้ำกับผิวหน้าของเบ้า ยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. ยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex foam)

ยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติเป็นกระบวนการผลิตยางที่มีฟองก๊าซกระจายตัวอยู่ในน้ำยาง แล้วทำให้เสียความเสถียร ดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกัน 3 ขั้นตอนได้แก่ การทำให้เกิดฟองก๊าซในน้ำยางคอมพาวนด์ โดยการตี ปั่น ฟน หรือเติมสารที่ทำให้ก๊าซออกมา การทำให้ฟองยางอยู่ตัว (gel) และการทำให้ยางฟองน้ำเกิดการคงรูป กระบวนการผลิตยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก ๆ ดังนี้

1.1 การผลิตยางฟองน้ำโดยกระบวนการดันลอป (Dunlop process)

วิธีนี้ได้รับความนิยมและใช้ผลิตยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ สามารถทำได้โดยการนำน้ำยางผสมสารเคมี ตีให้เกิดเป็นฟองแทรกในเนื้อยางโดยใช้เครื่องกลบ่นอากาศเข้าไปแล้วเติมสารที่ทำให้ฟองยางเกิดการเจล โดยสารที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้คือ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (sodium silicofluoride) หลังจากนั้นทำให้ฟองยางจับตัวแล้วคงรูปโดยการใช้ความร้อนจากไอน้ำ

1.2 การผลิตยางฟองน้ำโดยกระบวนการทาลาเลย์ (Talalay process)

เป็นกระบวนการผลิตยางฟองน้ำที่ได้รับการคิดค้นจาก Joseph Talalay และมีอีกชื่อหนึ่งว่า Freez Process แต่จะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าวิธีดันลอป โดยจะทำให้เกิดฟองเชิงกลโดยการตีฟองและทำการลดความดัน ทำให้ฟองยางในเบ้าขยายตัวเต็มเบ้าแล้วทำการลดอุณหภูมิของเบ้าอย่างรวดเร็ว ทำให้ฟองยางแข็งตัว การเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้ฟองอากาศมาเชื่อมต่อกันเป็นเซลล์เปิดแล้วมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในฟองยางเยือกแข็ง เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดจึงทำให้ฟองยางเกิดการเจลได้ หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิของเบ้าเพื่อให้ยางฟองน้ำเกิดการคงรูป

จะเห็นว่ากระบวนการผลิตโดยวิธีทาลาเลย์จะมีการทำให้ฟองยางเกิดการเจลด้วยความเย็นร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แทนการใช้สารช่วยให้เกิดการเจลตามที่ใช้ในกระบวนการดันลอป นอกจากนี้แล้วยังมีข้อดีคือ ทำให้สามารถควบคุมความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ได้อย่างแม่นยำ เพราะควบคุมที่น้ำหนักของฟองน้ำยางที่เทใส่เบ้าแทนปริมาตรที่ได้จากการตีด้วยเครื่องตีฟองในกระบวนการดัน ลอป แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการทาลาเลย์ จะมีขั้นตอนและลักษณะเบ้าที่ซับซ้อนมากกว่ากระบวนการดันลอป

2. ยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติแห้ง (Sponge natural rubber)

สามารถเตรียมได้จากการบดยางดิบร่วมกับสารเคมีและสารฟู่ โดยทั่วไปสารฟู่เมื่อได้รับความร้อนจะให้ก๊าซไนโตรเจน หรือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ออกมาโดยในขั้นตอนแรกความร้อนในกระบวนการวัลคาไนซ์จะทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดลดลงจนกระทั่งยางคอมพาวนด์เริ่มวัลคาไนซ์ความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหากสารฟู่สลายตัวก่อนความหนืดต่ำสุดจะมีผลทำให้ยางฟองน้ำมีลักษณะเป็นเซลล์เปิด เนื่องจากการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและผนังเซลล์เกิดการแตกก่อนเกิดการเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามในกรณียางฟองน้ำมีเซลล์ลักษณะแบบปิด เกิดจากการที่สารฟู่สลายตัวขณะที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น ดังนั้นผนังเซลล์เกิดการคงรูปพอดี และจะไม่เกิดการแตกเมื่อฟองขยายตัวอย่างสมบูรณ์ เซลล์แบบปิดมีโครงสร้างเป็นเซลล์ที่ไม่เชื่อมต่อกัน โดยภายในเซลล์กักก๊าซไว้ในเนื้อยางวัลคาไนซ์ ยางฟองน้ำมีรูปแบบที่ใช้โดยทั่วไปทั้งวัสดุที่มีเซลล์แบบเปิดและแบบปิด สารฟู่ที่จะใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดดังนี้

1. สารฟู่ชนิดอินทรีย์ (organic blowing agents)

สารฟู่ชนิดนี้สามารถผสมเข้าในเนื้อยางได้ดีทำให้เกิดการกระจายตัวของฟองอากาศเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และเซลล์ที่ได้จะมีขนาดเล็กที่ใกล้เคียงกัน สารฟู่ชนิดอินทรีย์ยังสามารถแบ่งชนิดได้ตามโครงสร้างที่แตกต่างกันดังนี้

1.1. *กลุ่มสารประกอบอะโซ (azo compounds)* ซึ่งสารฟู่ชนิดนี้จะมีหมู่อะโซ ($-N=N-$) ประกอบอยู่ด้วย ได้แก่เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (azodicarbonamide, ADC) ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 215°C แต่จะเริ่มก๊าซไนโตรเจนออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 140°C และจะปล่อยก๊าซออกมาอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิการคงรูป (160°C หรือสูงกว่านั้น) ADC จะไม่เปลี่ยนสียางและไม่ทำให้ยางมีกลิ่นอีกด้วย นอกจากนี้ เมื่อใช้ ADC กับ ไกลคอล (glycols) ก็จะช่วยให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงประมาณ $20-30^{\circ}\text{C}$

1.2. *กลุ่มสารประกอบไนโตรโซ (nitroso compounds)* สารฟู่ชนิดนี้จะมีหมู่นิโตรโซ ($N-N=O$) ประกอบอยู่ด้วย ได้แก่ ไดไนโตรโซเพนทาเมทิลลีนเตตระมีน (N,N' -dinitrosopenta-methylene tetramine, DNPT) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยางและพลาสติก ซึ่งจะเริ่มสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิประมาณ $120-125^{\circ}\text{C}$

1.3. *กลุ่มของอนุพันธ์ของไฮดราซีน (hydrazine derivatives)* เช่นเบนซีนซัลโฟไฮดราไซด์ (benzenesulfohydrazide, BSH) ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวในยางที่ประมาณ $80-90^{\circ}\text{C}$ ไม่เปลี่ยนสียางและไม่ทำให้ยางมีกลิ่นอีกด้วยสารที่นิยมใช้อีกชนิดหนึ่งคือเบนซีนไดซัลโฟไฮดราไซด์ (benzene-1,3-disulfohydrazide) ซึ่งจะเริ่มสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิประมาณ 115°C (สูงกว่า BSH) ดังนั้นจึงนิยมใช้ในยางคอมพาวนด์ที่ผ่านกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูง เช่น ยางที่มีปริมาณสารตัวเติมสูง เป็นต้น

2. สารฟุ้งชนิดอนินทรีย์ (inorganic blowing agents)

เป็นสารฟุ้งที่มีประสิทธิภาพต่ำ ต้องใช้ในปริมาณมากถึง 10 phr การกระจายตัวไม่ดี ราคาค่อนข้างถูก สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ คือ แอมโมเนียมคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต โซเดียมไบคาร์บอเนต สารเคมีเหล่านี้จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.1. แอมโมเนียมคาร์บอเนต (*ammonium carbonate, (NH₄)₂CO₃*) ซึ่งจะแตกตัวด้วยความร้อนอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิ 30°C และแตกตัวเร็วที่อุณหภูมิ 55-60°C จะได้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียมคาร์บอเนตจะกระจายในยางได้ไม่ดี ทำให้ยางที่ได้มีรูพรุนไม่สม่ำเสมอ

2.2. แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (*ammonium bicarbonate, NH₄HCO₃*) แตกตัวให้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 60°C

2.3. โซเดียมไบคาร์บอเนต (*sodium bicarbonate, NaHCO₃*) เป็นสารที่ไม่เป็นพิษใช้ในปริมาณ 5 ถึง 10 phr โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารที่สลายตัวอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ 100°C และสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 140°C

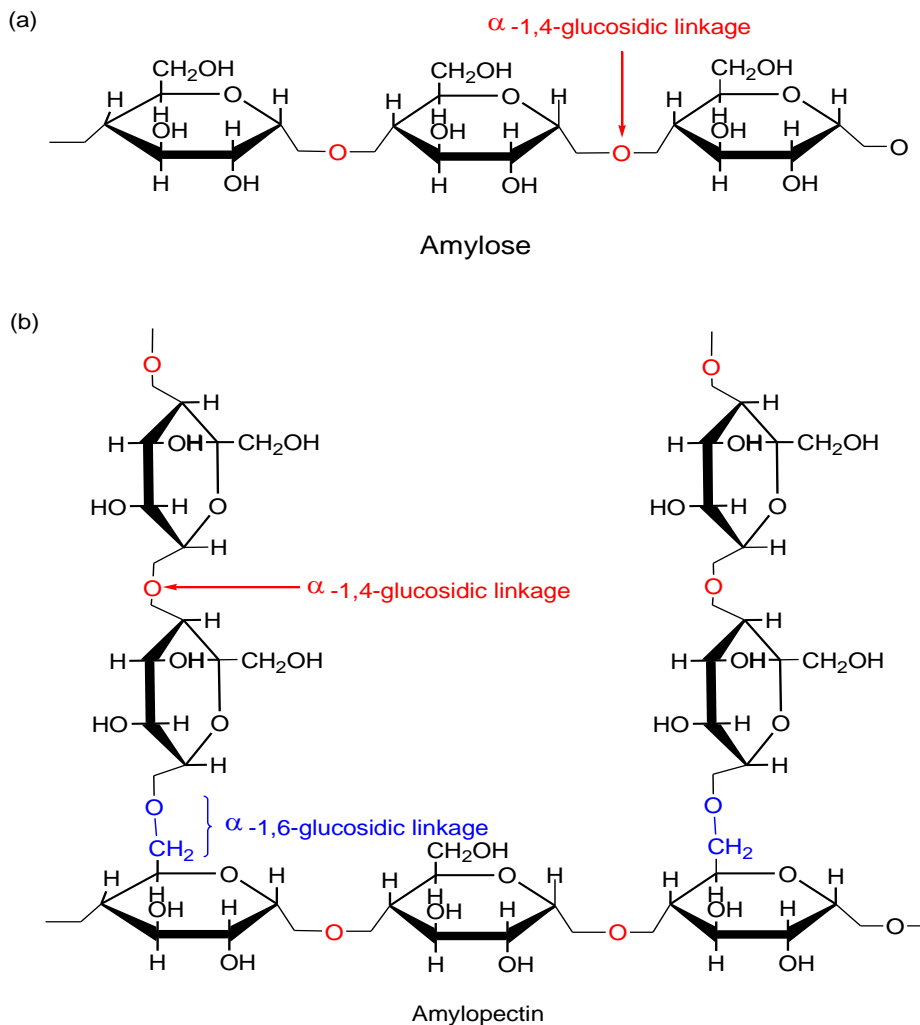
2.3 แป้ง (starch) [21]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในใบและในส่วนของพืชใช้เป็นแหล่งอาหาร เช่น เมล็ดและหัว แป้งในกระบวนการผลิตหมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ และมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งจากการผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นอยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวาร์ (flour) แต่เมื่อสิ่งเจือปนที่หมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่ และอื่นๆ ถูกสกัดออกไป แป้งที่เหลือจึงเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงจะเรียกว่า สตาร์ช (starch) เนื่องจากแป้งสตาร์ชมีความบริสุทธิ์สูง และแป้งสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านกระบวนการแปรรูป หรือดัดแปรจะเรียกว่า แป้งดิบ (native starch) แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อแป้งที่มีการดัดแปรแล้วเรียกว่า แป้งดัดแปร (modified starch)

2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง (Chemical structures of starch)

แป้งที่มีแหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ สูตรทั่วไปคือ (C₆H₁₀O₅)_n มีโครงสร้างเป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นโมเลกุลของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-D-glucose ที่ตำแหน่ง 1-4 linkage โดยต้องเชื่อมกันมากกว่า 10 โมเลกุลขึ้นไป โมเลกุลดังกล่าวมีโครงสร้างสองรูปแบบได้แก่ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 อะไมโลเพคตินเป็นสายโซ่ที่สั้นและมีจำนวนมาก

มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -D-glucose ที่ตำแหน่ง 1-6 linkage ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาออกมา (branch) สำหรับอะไมโลส จะมีเพียงแค่อะไมโลสสายโซ่ในแต่ละอนุภาคของแป้ง แต่เป็นสายโซ่ที่ตรง (linear) หรือมีกิ่งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น มีขนาดโมเลกุลยาวกว่าอะไมโลเพคติน ปริมาณอะไมโลสในแป้งส่วนมากจะอยู่ในช่วง 20-30% อนุภาคของแป้งที่มีสัดส่วนของอะไมโลสสูงจะมีรูปร่างของอนุภาคแป้งบิดเบี้ยวน้อย และเป็นรูปทรงกว่าเมื่อเทียบกับแป้งชนิดที่มีสัดส่วนของอะไมโลสต่ำ ถึงแม้ว่าอนุภาคแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสจะเป็นองค์ประกอบรองจากอะไมโลเพคติน เมื่อเทียบตามปริมาณแล้ว แต่อะไมโลสกลับมีอิทธิพลสูงมากต่อสมบัติของแป้งชนิดนั้นๆ เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ยาวและเป็นสายโซ่ตรงหรืออาจมีกิ่งเพียงเล็กน้อย และบางสายโซ่อาจสั้นกว่าที่ควรจะเป็น มักเกิดจากที่อะไมโลเพคตินถูกไฮโดรไลซิสที่ตำแหน่ง α -d-1,6 กลายเป็นอะไมโลสที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวเช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง มีอะไมโลส ประมาณ 20% แป้งข้าวเหนียวไม่มีอะไมโลส แป้งข้าวโพดมีอะไมโลสสูงถึง 80%



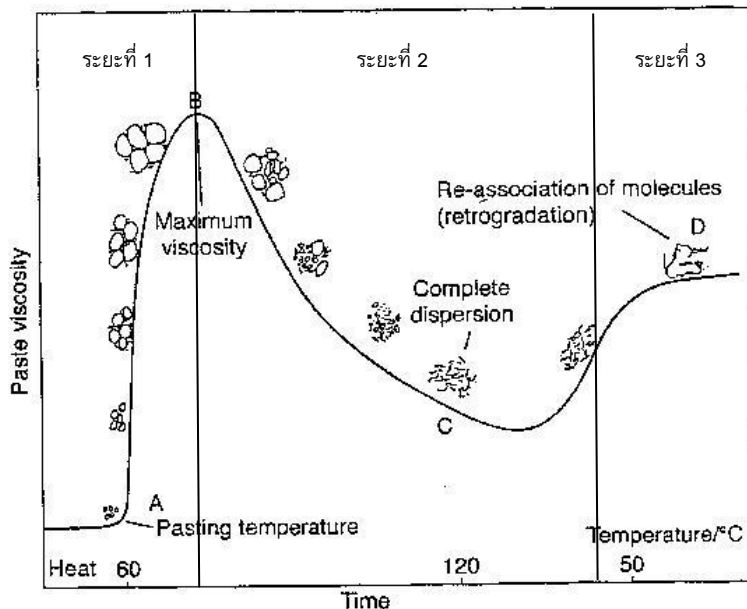
รูปที่ 2.4 (a) โครงสร้างของอะไมโลส และ (b) อะไมโลเพคติน [21]

องค์ประกอบของแป้งที่ต่างกันทำให้แป้งแต่ละชนิดต่างกัน มีสมบัติแตกต่างกันด้วย เช่น ความหนืดขณะเปียก (hot paste viscosity) เนื้อแป้ง (texture) ความใส (clarity) และความเสถียร (stability) โดยแป้งที่ดีในการผลิตแต่ละครั้งควรมี สมบัติ ๆ ที่คงที่ด้วย โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง จะให้เจลที่มีลักษณะแข็งและทึบ ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น มีโปรตีนและไขมันต่ำซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1% และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณที่น้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ๆ อีกทั้งยังเป็นพืชประเภทหัวใต้ดิน ซึ่งแป้งที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง กระบวนการผลิตง่ายกว่า ผลผลิตที่ได้ออกมาเป็นสีขาว โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการฟอก ลักษณะของเม็ดแป้งกลม และอาจจะมีรอยบวมที่ปลายด้านหนึ่ง เม็ดแป้งโดยทั่วไปจะมีขนาดปานกลาง อยู่ในช่วง 5-40 ไมครอน แป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสประมาณ 18-25%

2.3.2 การเกิดเจลาตินไนซ์ (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติที่ชอบน้ำเมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัว หรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนของผลึกมีการจับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรง จึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบได้บ้าง ทำให้มีการเริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและสมบัติดั้งเดิม แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งหรืออุณหภูมิเจลาตินไนซ์ (gelatinization temperature) พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ ทำให้โครงสร้างผลึกถูกทำลาย โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจากอนุภาคแป้งที่มีการบวมตัวและทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งมีการเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า เจลาตินไนซ์

การเกิดเจลาตินไนซ์ของเม็ดแป้งแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เมื่อใส่สารเคมีหรือให้อุณหภูมิน้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ชั้น ก็เริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินในส่วนของผลึกและมีการจับตัวกันอย่างหนาแน่นถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดน้ำเข้ามาก ความหนืดของสารละลายแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ และเมื่อให้อุณหภูมิต่อไปอีก ก็จะเข้าสู่ระยะที่ 3 เม็ดแป้งจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน การละลายของแป้งเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.5 ระยะการเกิดเจลาคีไนซ์ของเม็ดแป้ง [21]

2.4 การย่อยสลายของพอลิเมอร์ (Polymer degradation) [18]

กลไกการย่อยสลายของพอลิเมอร์ แบ่งเป็น 4 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

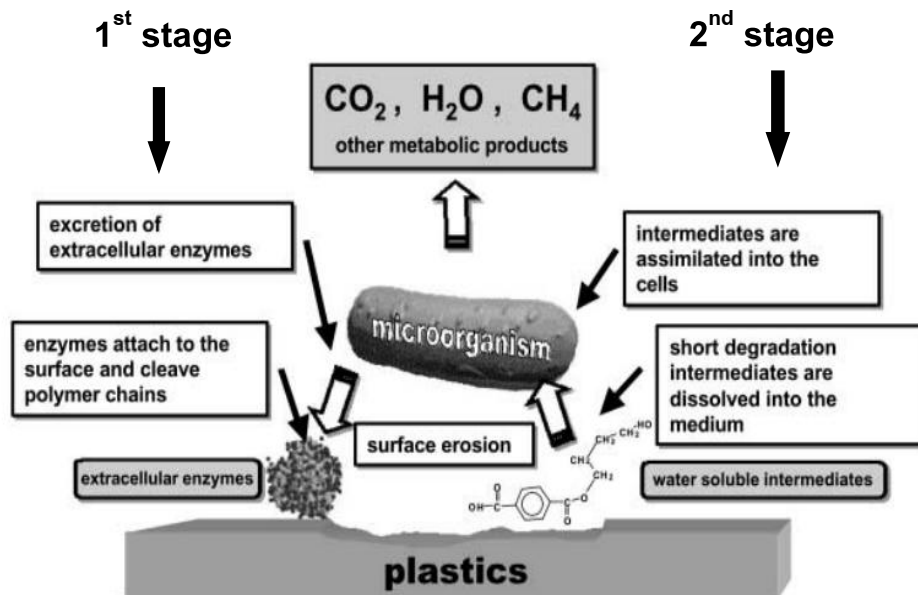
1. การย่อยสลายได้โดยแสง (photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกหักของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่มีความเสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองหมัก หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด

2. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์ เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ $RO\cdot$ และ $\cdot OH$ ที่ไม่เสถียรและเข้า

ทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation) เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากภายนอกโมเลกุล (external catalytic degradation) ของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย และแบบที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เอง (internal catalytic degradation) การเร่งให้เกิดการย่อยสลายโดยสารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากภายนอกมี 2 ชนิดคือ สารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เป็นเอนไซม์ (enzyme) ต่างๆ เช่น depolymerase, lipase, esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และสารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) ต่าง (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิลของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่อยู่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบที่ใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดซึ่งอยู่ที่ปลายด้านนอกสุดของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ได้ ทำให้เกิดการย่อยสลายต่อไป ในขั้นที่สองได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุๆ และมวลชีวภาพ (biomass) ซึ่งกลไกการย่อยสลายโดยเอนไซม์ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [22]

2.5 การตรวจสอบเอกสาร: งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและคล้ายคลึงกับงานที่ทำ

ผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำจากยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีความนิยมใช้กันเป็นอย่างมากได้แก่ ห่อยางพองน้ำ ยางพองน้ำกันกระแทก รองเท้าแตะ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีลักษณะภายในเป็นโพรง มีรูพรุนจำนวนมาก เกิดจากการสลายตัวของสารฟูและปล่อยก๊าซออกมาโดยสารฟูนิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมยางพองน้ำคือสารฟูที่เป็นสารประกอบไนโตรโซ ซึ่งจะสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจน โดย Guriya และ Tripathy (1996) [23] ได้เตรียมยางพองน้ำเอทิลีนโพลีไธนไดอีน (EPDM) แบบเซลล์ปิด โดยใช้ไดไนโตรโซเพนทามะทิลีนเตตระมีน (dinitrosopentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารฟู พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟูและปริมาณเขม่าดำต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาและสมบัติทางกายภาพของยางพองน้ำ EPDM โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 160°C ผลการศึกษาพบว่าลักษณะเซลล์ที่ได้เป็นเซลล์ปิด โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารฟูในยางพองน้ำที่มีการใส่เขม่าดำ จะให้ขนาดเซลล์และความหนาแน่นของเซลล์ลดลง แต่สมบัติมอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลงและความแข็งลดลง ในปีต่อมาคณะวิจัยกลุ่มเดียวกัน [24] ได้ศึกษาปริมาณของสารฟูชนิดเดียวกันและปริมาณเขม่าดำต่อกระบวนการขึ้นรูปโดยเครื่องเอ็กซ์ทรูด ผลการศึกษาพบว่าลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางพองน้ำ EPDM ที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดออกมาจะมีลักษณะเซลล์ไม่เป็นทรงกลม และจำนวนเซลล์ในยางพองน้ำ EPDM

เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราแรงเฉือน (shear rate) และปริมาณสารฟลู ส่วนสมบัติการไหล พบว่าค่าความเค้นเฉือน (shear stress) เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของอัตราแรงเฉือน และเห็นได้ชัดเจนว่าทั้งในยางฟองน้ำ EPDM ที่ไม่เติมเขม่าดำและที่เติมเขม่าดำ จะมีค่าอัตราแรงเฉือนลดลง เมื่อปริมาณของสารฟลูเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Kim และคณะ (2006) [25] ได้ศึกษาปริมาณเขม่าดำและความดันที่ใช้ในการอัดเบ้าในการขึ้นรูปยางฟองน้ำ EPDM ซึ่งใช้ DNPT เป็นสารฟลู ร่วมกับการใช้ Cellex-A เป็นสารกระตุ้นสารฟลู (blowing activator) ผลการศึกษาพบว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์มีอัตราการวัลคาไนซ์ที่เร็วขึ้นเมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้น ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ EPDM ที่จากการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าประสิทธิภาพของการเกิดเซลล์จะลดลงเมื่อปริมาณของเขม่าดำและความดันเบ้าเพิ่มสูงขึ้น จะให้ผนังเซลล์ที่หนา ทำให้จำนวนเซลล์ลดลงความหนาแน่นของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น ในปีต่อมา Lee และ Choi (2007) [26] ได้เตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ โดยใช้ DNPT เป็นสารฟลูร่วมกับการใช้ Cellex-A เป็นสารกระตุ้นสารฟลู เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของเขม่าดำและอุณหภูมิในการขึ้นรูปยางฟองน้ำด้วยเทคนิคการอัดเบ้าที่อุณหภูมิตั้งแต่ 145-165°C ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของเขม่าดำและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะให้อัตราการวัลคาไนซ์ ของฟองน้ำยางธรรมชาติเร็วขึ้น และอุณหภูมิ 165°C จะให้ประสิทธิภาพของการเกิดเซลล์จะเพิ่มขึ้น กล่าวคือจะมีขนาดเซลล์ลดลงและความหนาแน่นยางฟองน้ำลดลง ตรงข้ามกับสมบัติทางเชิงกลที่มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณเขม่าดำจะช่วยให้สมบัติทางเชิงกลเพิ่มขึ้นได้ และนอกจากการใช้สารฟลูกลุ่มสารประกอบไนโตรโซแล้วยังมีรายงานวิจัยใช้สารฟลูชนิดอินทรีย์กลุ่มสารประกอบอะไซ จะสลายตัวให้ก๊าซไนโตรเจนมีข้อดีคือ ไม่เปลี่ยนสียาง และไม่มีกลิ่นเหม็น Mahapatra และคณะ (2008) [27] ได้เตรียมยางฟองน้ำ EPDM โดยใช้เอไซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC-21) เป็นสารฟลู เพื่อศึกษาสมบัติเชิงพลวัต โดยทำการแปรปริมาณของสารฟลูและปริมาณเขม่าดำที่ใช้ ผลการศึกษาการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของยางฟองน้ำ EPDM พบว่าปริมาณของสารฟลูที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะจากของแข็งคล้ายแก้วเป็นของแข็งคล้ายยาง (glass transition temperature; Tg) อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้มของกราฟแทนเดลต้า ($\tan\delta$) ลดลง (มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้น) ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของปริมาณสารฟลูแสดงค่า $\tan\delta$ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (มอดูลัสสะสมลดลง) ต่อมา Wimolmala และคณะ (2009) [28] เตรียมยางฟองน้ำเบลนดร์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) ในอัตราส่วน 1:1 และศึกษาชนิดและปริมาณของสารฟลู 2 ชนิดคือ ออกซีบิสเบนซีนซัลโฟนิลไฮดราไซด์ (OBSH) และ อะไซไดคาร์บอนาไมด์ (ADC) ร่วมกับการศึกษาชนิดของสารตัวเติม 3 ชนิดคือ ซิลิกา ซิลิกาจากถ้ำลอย และเขม่าดำ โดยใช้ที่ปริมาณคงที่ที่ 40 phr ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของสารฟลูเพิ่มขึ้นทั้งชนิด OBSH และ ADC ส่งผลให้อัตราการ

วัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำเร็วขึ้นทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการสลายตัวของสารฟู่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งจะไปช่วยเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างสารฟู่ชนิด OBSH และชนิด ADC พบว่าสารฟู่ชนิด OBSH จะให้อัตราการวัลคาไนซ์ที่เร็วกว่าการใช้สารฟู่ชนิด ADC ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่ได้จะมีลักษณะเซลล์เป็นเซลล์ปิด และเมื่อปริมาณของสารฟู่แต่ละชนิดเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของยางฟองน้ำจะลดลง โดยสารฟู่ชนิด OBSH จะให้ความหนาแน่นที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีขนาดเซลล์ที่ใหญ่กว่าและมีการกระจายของเซลล์ที่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า OBSH มีอัตราการสลายตัวของก๊าซที่เร็วกว่าสารฟู่ชนิด ADC แต่การเพิ่มปริมาณของสารฟู่แต่ละชนิดจะให้สมบัติทางเชิงกลต่ำลง โดยยางฟองที่ใช้สารฟู่ชนิด OBSH จะให้สมบัติทางเชิงกลต่ำกว่ายางฟองน้ำที่ใช้สารฟู่ชนิด ADC และเมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างชนิดของสารตัวเติมพบว่าการใส่เซมาต้าจะให้ขนาดเซลล์ที่เล็กกว่า มีการกระจายตัวของเซลล์ที่ดีกว่าและให้สมบัติทางเชิงกลสูงกว่าการใส่ซิลิกาและซิลิกาจากถ้ำลอยตามลำดับ แต่สมบัติเชิงกลหลังจากการบ่มเร่ง (Ageing) ด้วยความร้อนพบว่าค่ามอดูลัสแรงดึงและความแข็งเพิ่มขึ้นในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงเล็กน้อย ในปีต่อมา Zhang และคณะ (2010) [29] ได้เตรียมยางฟองน้ำคลอริเนตทโพลีเอทิลีน (CPE) และใช้ ADC เป็นสารฟู่และมีการใส่ซิงค์สเตียเรตเพื่อลดอุณหภูมิในการสลายตัวของ ADC จาก 223 °C เหลือ 173 °C โดยศึกษาอิทธิพลของปริมาณเซมาต้าของยางฟองน้ำที่ได้จากการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 170 °C ผลการศึกษาพบว่าอัตราการวัลคาไนซ์จะเพิ่มขึ้น ลักษณะเมื่อปริมาณเซมาต้าเพิ่มขึ้น ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ CPE มีลักษณะเซลล์เป็นเซลล์ปิด โดยขนาดเซลล์จะลดลง แต่ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลสมบัติทางเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซมาต้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังมีการรายงานการใช้สารฟู่ชนิดอนินทรีย์เป็นสารฟู่ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ต่ำ ราคาไม่แพงและเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งเป็นสารฟู่อีกตัวเลือกหนึ่งในอุตสาหกรรมยางฟองน้ำ โดย Ariff และคณะ (2008) [30] ได้รายงานการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกไซด์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25) ยางธรรมชาติ (SMR-L) และยางธรรมชาติ (SMR-10) และใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารฟู่ โดยการขึ้นรูปยางด้วยการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำมาให้ความร้อนต่อโดยการอบในตู้อบโดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิหลังการอัดเบ้าที่ระดับ 140, 150 และ 160 °C ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการวัลคาไนซ์จะเร็วขึ้นทุกชนิดของยางธรรมชาติ แต่ลักษณะเซลล์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นทรงกลม สม่ำเสมอลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับกันระหว่างชนิดของยางธรรมชาติที่ใช้ในเตรียมยางฟองน้ำพบว่ายาง ENR-25 มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink density) สูงกว่า ทำให้การเกิดขยายตัวของเซลล์เกิดขึ้นได้ยาก ส่งผลให้ผนังเซลล์หนากว่า และมีขนาดเซลล์ที่เล็กกว่า ยางฟองน้ำที่ได้จากยาง SMR-10 และ SMR-L ตามลำดับ และยังคงส่งผลให้ทางเชิงกลที่ดีกว่า โดยยาง ENR-25 มีสมบัติความต้านทานต่อการกัดที่

ระยะกด 50% ที่ดีกว่าตามลำดับ ในปีเดียวกันคณะวิจัยกลุ่มนี้ [31] ยังได้ศึกษาทางธรรมชาติ เบลนด์ระหว่าง ENR-25 กับ SMR-L ที่อัตราส่วน 100:0, 80:20 และ 60:40 ตามลำดับ และศึกษาอัตราส่วนของสารตัวเร่งระหว่างเตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) กับไซโคลเฮกซิลเบนโทอะซิลซัลฟิनाไมด์ (CBS) ที่ 2.5:1.0, 2.0:1.5, 1.5:2.0 และ 1.0:2.5 ตามลำดับ และใช้ไซโตียมไบคาร์บอเนตเป็นสารฟู โดยการขึ้นรูปร่างด้วยการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำมาให้ความร้อนต่อโดยการอบในตู้อบที่ อุณหภูมิ 150°C พบว่ายางพองน้ำ เบลนด์ระหว่าง ENR-25 กับ SMR-L ที่อัตราส่วน 60:40 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ยางน้ำรักษารูปร่างได้ดีที่สุด โดยไม่เกิดการยุบตัว และเมื่อปริมาณของสารฟูเพิ่มขึ้นทำให้ขนาดของเซลล์เพิ่มขึ้นและผนังระหว่างเซลล์เล็กลงส่งผลให้ค่าแรงกดอัด (compression stress) และค่าการคืนตัวหลังการกดลดลง ส่วนผลอัตราของสารตัวเร่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนของ CBS เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการวัลคาไนซ์ลดลงเนื่องจากสารตัวเร่ง CBS เป็นสารตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่า ในการให้กำมะถันเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเร่ง TMTD และเมื่อปริมาณของสารตัวเร่ง CBS สูงขึ้น ทำให้ขนาดเฉลี่ยของเซลล์ใหญ่ขึ้น ผนังเซลล์หนาเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการขยายตัวต่ำลง ยางพองน้ำมีความหนาแน่นสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการคืนตัวหลังการกดเพิ่มขึ้นด้วย และในปีถัดมา คณะวิจัยกลุ่มเดิม [32] ได้ศึกษาอิทธิพลของสารฟูชนิดไซโตียมไบคาร์บอเนตที่มีผลต่อลักษณะ สัณฐานวิทยาและสมบัติความทนต่อแรงกระแทกของยางพองน้ำธรรมชาติ โดยยางที่ใช้เป็น SMR-L พบว่าเมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้นจาก 4-12 phr ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ด้วยทำให้ขนาดเซลล์เฉลี่ยเล็กลงและจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของยางพองน้ำลดลงและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะลดลงเล็กน้อย ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานการกระแทกลดลงด้วยเช่นกัน

โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำเหล่านี้มีอายุการใช้งานไม่นานมากนัก เมื่อหมดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์เหล่านี้ก็จะกลายเป็นขยะ ไม่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยให้ความสนใจเกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นพลาสติกหรือยางธรรมชาติ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเมอร์จำพวกนี้มีความสามารถในการย่อยสลายในธรรมชาติได้ยาก เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้ จึงมีรายงานเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้กับพอลิเมอร์จำพวกนี้โดย การผสมกับแป้งซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่สนใจในอุตสาหกรรมพลาสติก และรวมไปถึงอุตสาหกรรมยาง โดยทั่วไปการผสมยางธรรมชาติกับแป้งให้เข้ากันมีหลายวิธี วิธีแรกคือการตัดแปรรูปโครงสร้างยางธรรมชาติด้วยการกราฟต์โคพอลิเมอร์ ในปี 2001 Nakason และคณะ [6] ได้รายงานการนำแป้งมันสำมะหลังมาผสมในยางธรรมชาติ โดยใช้ยางธรรมชาติ มาลีเอต (maleated natural rubber; MNR) ที่ได้จากการกราฟต์มาลีเอตแอนไฮดริดรายบนยางธรรมชาติ เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมรีโอโลยีและลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง

ธรรมชาติผสมแป้ง ผลการศึกษาพบว่าสมบัติรีโอโลยีของยางธรรมชาติมาลีเอตมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏ (apparent shear stress) และ ค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติมาลีเอตที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง และผลของสมบัติการไหลของยางมาลีเอตเบลนด์ด้วยยางธรรมชาติ เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้ง และเมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติมาลีเอตต่อยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมบัติรีโอโลยีมีค่าความเค้นเฉือนปรากฏเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนผลของลักษณะการวัลคาไนซ์พบว่า ยางธรรมชาติมาลีเอตแสดงเวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น ซึ่งเป็นผลการศึกษาที่สอดคล้องกับ Ichazo และคณะ (2011) [14] โดยศึกษาปริมาณสัดส่วนของ ยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติมาลีเอต/แป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติมาลีเอตผสมกับยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้เวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น และที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 20 phr ไม่ได้เปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมากนักจึงเป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด ต่อมา Nakason และคณะ (2003) [7] ได้ศึกษายางธรรมชาติกราฟด้วยพอลิเมทิลเมทา ครีเลต (NR-g-PMMA) โดยศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มีผลต่อพฤติกรรมรีโอโลยีและลักษณะการวัลคาไนซ์ของ (NR-g-PMMA) โดยใช้สัดส่วนของน้ำยางธรรมชาติต่อเมทิลเมทาครีเลต 70:30 โมลเปอร์เซ็นต์ แล้วจับตัวน้ำยาง แล้วนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลัง โดยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลัง ผลการศึกษาพบว่าค่าความหนืด (Mooney viscosity), ค่าความเค้นเฉือน (shear stress), ค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) และค่าแรงบิด (torque) เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาทางเคมี (chemical interactions) ระหว่างหมู่ที่มีขั้วของ NR-g-PMMA กับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งการดัดแปรโครงสร้างยางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชันนอลที่มีขั้วก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการเตรียมยางธรรมชาติผสมกับแป้ง เช่น การเตรียมยางธรรมชาติอีพอกไซซ์ (epoxidized natural rubber) ผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน Nakason และคณะ (2004) [33] ได้ศึกษาพฤติกรรมรีโอโลยีของยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลัง เตรียมผสมโดยการนำแป้งมันสำปะหลังมาผ่านกระบวนการเจลลาติไนซ์ที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกวนผสมกับยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์เป็นเวลา 30 นาที ทำการจับตัวน้ำยางผสมที่อุณหภูมิ 100°C ได้เป็นก้อนยาง รีดก้อนยางให้เป็นแผ่นบางๆ ล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง ขึ้นรูปโดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ได้เป็นแผ่นฟิล์ม ผลการศึกษาพบว่าค่าความเค้นเฉือน (shear stress) และ ค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) เพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่อีพอกไซด์ในยางอีพอกไซซ์กับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้ความสามารถในการเข้ากันได้ดี ซึ่งการดัดแปรโครงสร้างยางธรรมชาติแล้วนำมาผสมกับแป้งเป็นวิธีที่ดีสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและแป้งได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติทางเชิงกลดีขึ้นด้วย แต่เป็นวิธีที่ยุ้งยากใช้ต้นทุนในการวิจัยสูง วิธีที่สองเป็นวิธีที่ง่าย ต้นทุนต่ำ คือการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ Khalaf และ Sadek (2012) [11] ได้เตรียมและศึกษาความเข้ากันได้ของยางธรรมชาติกับ

แป้งข้าวโพด โดยเตรียมยางธรรมชาติผสมกับแป้งข้าวโพดที่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้คือ มาลิกอิกแอซิดแอนไฮไดรด์ (maleic acid anhydride; MAH) กับกลีซิดิลเมทาครีเลต (glycidyl methacrylate; GMA) เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติผสมกับแป้งข้าวโพดที่ไม่เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ผลการศึกษาพบว่าในยางธรรมชาติผสมกับแป้งข้าวโพดที่ไม่ได้เติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ มีอัตราการวัลคาไนซ์ที่นานขึ้น และมีสมบัติเชิงกลต่ำลงเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างแป้งกับยางต่ำ ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติม GMA ที่ 1 phr แสดงการกระจายตัวได้ดีของแป้ง ส่งผลให้ปรับปรุงสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับ MAH พบว่า GMA ที่ 1 phr แสดงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดที่สูงกว่า เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติ/GMA/แป้ง วิธีที่สามเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในการเตรียมยางธรรมชาติผสมกับแป้งคือ การนำแป้งมาผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ (gelatinization) แล้วทำการผสมในน้ำยางและทำการจับตัวซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย กระบวนการเตรียมไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ Tantatherdtam และ Sriroth (2007) [34] ได้เตรียมและศึกษาวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังและเคลย์ โดยการทำการเจลาติไนซ์แป้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 25 นาที จากนั้นเติมเคลย์และน้ำยางธรรมชาติลงไปจนเป็นเวลา 30 นาที แล้วเทน้ำยางผสมลงในแผ่นกระจก อบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ผลการศึกษาพบว่าการตรวจสอบสัณฐานวิทยาพบว่าแป้งมีการกระจายตัวในวัสดุเชิงประกอบในลักษณะเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ โดยไม่เหลือสภาพที่เป็นเม็ดแป้งอยู่ในขณะที่เคลย์นั้นมีการกระจายตัวในลักษณะที่มีการแยกออกเป็นชั้นผลึกเดี่ยว ๆ อยู่ในโมเลกุลของยาง ส่งผลให้มีพื้นผิวสัมผัสกับโมเลกุลแป้งและยางเพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นมีสมบัติเชิงกลหลายประการที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เช่น มีความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โมดูลัสเพิ่มขึ้น มีความแข็ง และต้านทานต่อการฉีกขาดมากขึ้นในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดลดลง ต่อมา Wu และคณะ (2009) [13] ได้ทำการเตรียมมาสเตอร์แบทช์แป้งข้าวโพดในยาง SBR โดยการทำการเจลาติไนซ์แป้งแบบเดียวกับ Tantatherdtam และ Sriroth จากนั้นนำน้ำยาง SBR มาผสมลงไปและทำการจับตัวเป็นมาสเตอร์แบทช์ หลังจากนั้นจึงนำมาผสมกับเขม่าดำและสารเคมีสำหรับยางด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง โดยเปรียบเทียบผลระหว่างเทคนิคการบดผสมแป้งข้าวโพดในสภาวะแห้งลงบนยาง SBR ร่วมกับเขม่าดำและสารเคมีบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ผลการศึกษาพบว่าการผสมแป้งข้าวโพดในสภาวะยางแห้งให้สมบัติทางเชิงกลที่ต่ำกว่าผสมแป้งข้าวโพดเจลาติไนซ์ในสภาวะน้ำยางเนื่องจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างยางกับแป้งต่ำ ดังแสดงจากลักษณะสัณฐานวิทยาที่เกิดหลุมของอนุภาคแป้งแสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างยางกับแป้ง ในขณะที่การเตรียมยางผสมแป้งเจลาติไนซ์ในสภาวะน้ำยางมีการกระจายตัวของแป้งในเนื้อยางที่ดีกว่าทำให้สมบัติทางเชิงกลที่ได้สูงกว่าด้วย ต่อมาวิธีที่สุดท้าย เป็นการการตัดแปรรโครงสร้างของแป้งแล้วนำมาผสมกับยางธรรมชาติ Wang และคณะ (2009) [9] ได้นำแป้งเจลาตินินน้ำมาทำการตัดแปรรแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ผสมกับน้ำยาง

แล้วจับตัวน้ำยาง จากนั้นนำมาผสมกับสารเคมีสำหรับยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง โดยศึกษาปริมาณของแป้งตัดแปร ผลพบว่าโครงสร้างความเป็นผลึกของแป้งหายไปหลังจากตัดแปรแป้ง และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งประมาณ 200 นาโนเมตร กระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับเนื้อยาง ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งตัดแปร และพบว่าที่ระดับ 20 phr ของแป้งตัดแปรแสดงสมบัติที่ดีที่สุด เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างแป้งและยางได้ดี

จากรายงานการวิจัยที่กล่าวข้างต้นนี้ไม่ว่าจะเป็น การตัดแปรโครงสร้างยางธรรมชาติให้มีหมู่ฟังก์ชันนอล การตัดแปรโครงสร้างแป้งด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน หรือการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและยางธรรมชาติให้ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางเชิงกลของยางคอมพาวนด์ดีขึ้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานตามความต้องการได้ และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่ยังมีรายงานวิจัยที่ศึกษาผลของการผสมสารตัวเติมชีวภาพกับยางธรรมชาติและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดย Izmar และคณะ (2012) [35] ได้รายงานถึงการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของน้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ที่มีการผสมแป้งสาคุ มีการเตรียมด้วยกัน 2 วิธี คือการผสมแป้งสาคุลงในน้ำยางธรรมชาติคอมพาวนด์และทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวิธีที่สองทำการบ่มน้ำยางธรรมชาติคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C และการผสมแป้งสาคุลงในน้ำยางธรรมชาติคอมพาวนด์กวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำน้ำยางคอมพาวนด์ผสมแป้งสาคุทั้งสองวิธีมาทำการขึ้นรูปโดยเทคนิคการจุ่มแบบใช้สารช่วยจับตัว (coagulant) และนำแผ่นฟิล์มมาทดสอบการย่อยสลายได้ โดยเทคนิคการฝังดินในถุงเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ และรดน้ำปริมาณ 500 ml เพื่อรักษาความชุ่มชื้นในดิน โดยนำตัวอย่างฟิล์มขึ้นมากทุก ๆ 1 สัปดาห์ แล้วล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น ตั้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้องแล้วนำมาทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง ผลการศึกษาพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมขึ้นทั้ง 2 วิธี ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงหลังจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 10 สัปดาห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ต่อมา นุชจรี (2554) [36] ได้เตรียมและศึกษาผลของปริมาณผงกระดองปลาหมึก ไคติน และไคโตซาน และศึกษาชนิดของยางธรรมชาติ ที่มีต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบ การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยเทคนิคการฝังดิน โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างขนาด 150×150×1 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร ซึ่งชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และเตรียมชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบล ใส่กล่องที่มีดิน จากนั้นนำกล่องที่มีชิ้นตัวอย่างไปฝังดินลึก 9 นิ้ว ระยะเวลาในการทดสอบเป็นเวลา 1-6 เดือน แล้วนำชิ้นทดสอบขึ้นมาทุก ๆ เดือน นำชิ้นตัวอย่างมาล้างน้ำให้สะอาดแล้วอบแห้ง หลังจากนั้นนำมาหาค่าน้ำหนักของชิ้น สำหรับชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลนำไปทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเวลาการฝังดินที่เพิ่มขึ้น ผลของการใช้ยางธรรมชาติที่ผสมกับผงกระดองปลาหมึก ไคติน และไคโตซาน ที่ปริมาณ 30 phr มีสมบัติทางกายภาพสูงกว่าการใช้ยาง ENR-25 และยาง ENR-50 ส่วนการย่อยสลายได้ทางชีวภาพหลังฝังดินของวัสดุเชิงประกอบพบว่ายาง

ธรรมชาติที่ผสมกับผงกระดองปลาหมึก ไคติน และไคโตซาน มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักมากกว่ากรณียาง ENR ต่อมา Bras และคณะ (2010) [37] ได้ศึกษาวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติกับนาโนเซลลูโลส (nanocellulose) ที่เตรียมขึ้นโดยการกวนผสมน้ำยางธรรมชาติกับเซลลูโลสวิสเกอร์ (cellulose whiskers) โดยศึกษาปริมาณเซลลูโลสวิสเกอร์ที่ 0, 2.5, 7.5 และ 12.5 % โดยน้ำหนัก ต่อสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้ นำตัวอย่างไปอบแห้งที่ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนฝังดิน จากนั้นนำดินใส่ในกล่องพลาสติก 100 กรัม มีความหนา 3 cm แล้วนำตัวอย่างฝังดินในกล่องพลาสติกที่เตรียมไว้ความลึกจากผิวดินด้านบน 1 ซม. ทำการรดน้ำทุกวันเพื่อรักษาความชื้น มีระยะเวลาในการทดสอบ 4 สัปดาห์ นำตัวอย่างขึ้นมาทุก ๆ สัปดาห์ตัวอย่างที่นำขึ้นมาจากดินนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนัก ผลการศึกษาเมื่อปริมาณของเซลลูโลสวิสเกอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสและค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนการย่อยสลายได้ทางชีวภาพหลังจากการฝังดินพบว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมเซลลูโลสวิสเกอร์ที่ระยะเวลาฝังดิน 4 สัปดาห์ น้ำหนักหายไป 19 % ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติมเซลลูโลสวิสเกอร์ที่ 7.5 และ 12.5 % โดยน้ำหนัก น้ำหนักหายไป 62 และ 71 % ตามลำดับ เนื่องจากเซลลูโลสวิสเกอร์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เร็วกว่ายางธรรมชาติโดยเกิดจากการบริโภคของจุลินทรีย์ในดิน ในปีต่อมา Abraham และคณะ (2012) [38] ได้ศึกษาการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติกับนาโนเซลลูโลสที่เตรียมขึ้นโดยผสมกับน้ำยางธรรมชาติกับนาโนเซลลูโลสที่ผ่านกระบวนการผสมแบบโซนิเคท (sonication) โดยศึกษาปริมาณนาโนเซลลูโลสที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 % โดยน้ำหนัก และเปรียบเทียบผลระหว่างวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการวัลคาไนซ์และไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ ต่อสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้ ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง และแช่ในถังหมักของเสียทางการเกษตรที่มีปริมาณน้ำประมาณ 70 % และคลุมถังด้วยถุงกระสอบ เมื่อเวลาผ่านไปนำตัวอย่างขึ้นมาล้างน้ำหลายครั้ง ตั้งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนัก และทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ผลการศึกษากการย่อยสลายได้ทางชีวภาพพบว่าวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์แสดงการย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ และเมื่อปริมาณของนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นพบว่าทั้งวัสดุเชิงประกอบของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ และยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติมนาโนเซลลูโลส

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 3

มีลักษณะเป็นแผ่นยางแห้ง มีสีคล้ำ มีฟองอากาศเล็ก ๆ มีเศษผงสิ่งสกปรก หรือเศษเปลือกต้นยางที่กรีดปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยได้แต่ต้องไม่มีรอยพุพอง ไม่มีเม็ดทรายหรือสิ่งสกปรกขณะห้อยยางก้อน บนแผ่นยางที่ใช้ห่อหรือภายในยางแผ่นอาจมีราสนิมหรือราแดงและราแห้งขึ้นเล็กน้อยได้ แต่ต้องมีปริมาณไม่มากกว่า 10% ของตัวอย่างที่แสดงไว้ ไม่มีจุดรมควันไม่แห้งหรือจุดเหนียวบนยางแผ่น ยางอาจมีสีคล้ำบ้างแต่ต้องมีสีไม่ที่บจนดำ ใช้ทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์ตั้งต้นหลักในการเตรียมยางฟองน้ำ ผลิตโดย สหกรณ์ดอนขี้เหล็ก ประเทศไทย

3.1.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex, NRL)

มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีขาว ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Natural Rubber Latex, HA Latex) มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC) ประมาณ 60% ของปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC) ประมาณ 61-62% เก็บรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 0.7% ใช้ทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์ตั้งต้นหลักในการเตรียมยางฟองน้ำ ผลิตโดยบริษัทจะนะน้ำยางชั้น จำกัด ประเทศไทย

3.1.3 กรดสเตียริก (Stearic acid)

มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำ มีสูตรโมเลกุล $C_{17}H_{35}COOH$ น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 284.48 กรัม/โมล มีความหนาแน่น เท่ากับ 0.847 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ $70^{\circ}C$ จุดหลอมเหลว เท่ากับ $69.6^{\circ}C$ จุดเดือด เท่ากับ $383^{\circ}C$ ใช้ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น จัดจำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด ประเทศไทย

3.1.4 กำมะถัน (Sulphur, S)

มีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลืองที่เป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 32.065 กรัม/โมล มีความหนาแน่น เท่ากับ 2.08 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว เท่ากับ $115.21^{\circ}C$ จุดเดือดเท่ากับ $444.6^{\circ}C$ ใช้ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัท สยามเคมี จำกัด ประเทศไทย

3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)

มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 81.408 กรัม/โมล มีความหนาแน่น เท่ากับ 5.606 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว เท่ากับ 1975°C (สลายตัว) จุดเดือด เท่ากับ 1975°C (สลายตัว) ใช้ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ผลิตโดยบริษัท Univenture Public Co.,Ltd. ประเทศไทย

3.1.6 บิวทิลเบนโซไทอะโซลฟีนิลไมด์ (N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfenamide, TBBS)

มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาวเทา มีสูตรโมเลกุล $C_{11}H_{14}N_2S_2$ น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 238.37 กรัม/โมล ความหนาแน่น เท่ากับ 1.26-1.32 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว เท่ากับ 344.1°C ที่ 760 มิลลิเมตรปรอท จุดเดือด เท่ากับ 105°C ใช้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง ผลิตโดยบริษัท Univenture Public Co.,Ltd. ประเทศไทย

3.1.7 แป้งมันสำปะหลัง

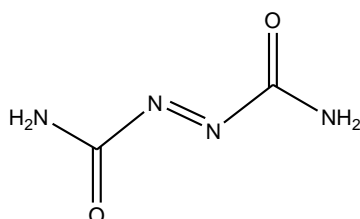
เป็นแป้งมีลักษณะสีขาว เนื้อเนียน สีนเป็นมัน ความหนาแน่น เท่ากับ 1.45-1.64 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ความยาวของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 5-35 ไมครอน แป้งพร้อมที่จะตกตะกอนหลังจากแขวนลอยอยู่แต่เมื่ออุณหภูมิของสารแขวนลอยสูงขึ้นประมาณ 60-70°C (ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) ใช้ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม ผลิตโดยบริษัท General starch.,Ltd. ประเทศไทย

3.1.8 ไอโซโพรพิลฟีนิลฟีนิลิลไดอะมีน (N-isopropyl-N-phenyl-p-phenylenediamine, IPPD)

มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาล มีสูตรโมเลกุล $C_{15}H_{18}N_2$ น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 226.31 กรัม/โมล ความหนาแน่น เท่ากับ 1.04 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว เท่ากับ 72-76°C จุดเดือด เท่ากับ 161°C ที่ 1 มิลลิเมตรปรอท ใช้ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อม ผลิตโดยบริษัท Univenture Public Co.,Ltd. ประเทศไทย

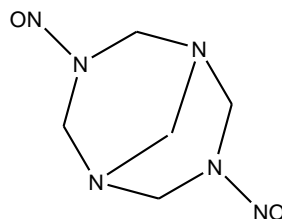
3.1.9 สารฟู

- เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (azo-dicarbonamide, ADC) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีชื่อทางการค้าว่า Supercell SC อุณหภูมิในการสลายตัว เท่ากับ 130-165°C ใช้ทำหน้าที่เป็นสารฟู ผลิตโดยบริษัท Afg A.F. Goodrich chemucalsco.,Ltd. ประเทศไทย



รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของ super cell

- ไดไนโตรโซเพนทาเมทิลีนเตตระมีน (N,N'-dinitrosopenta-methylene tetramine, DPT) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ใช้ทำหน้าที่เป็นสารฟู



รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของไดไนโตรโซเพนทาเมทิลีนเตตระมีน

3.1.10 แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl₂)

มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 110.98 กรัม/โมล มีความหนาแน่น เท่ากับ 2.15 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว เท่ากับ 772°C จุดเดือด เท่ากับ 1935°C ใช้ทำหน้าที่เป็นสารจับตัวน้ำยาง

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ยี่ห้อ Thermo scientific 3000 ผลิตโดยบริษัทไซแอนทิฟิค จำกัด ประเทศไทย

3.2.2 เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง รุ่น GF-3000 ผลิตโดย บริษัท A&D จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.3 เครื่องวัดความหนาเวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier caliper) ความละเอียด 0.01 mm ผลิตโดย Teclock[®] Co., Ltd. รุ่น SM-112 ประเทศญี่ปุ่น

3.2.4 เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น AB 204 ผลิตโดย บริษัท Mettler Toledo จำกัด ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2.5 ชุดตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์แบบ Die C ใช้สำหรับตัดชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 เพื่อทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) มอดูลัส (Modulus) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

3.2.6 ชุดตัดชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุม (Angle) ตามมาตรฐาน ASTM D624 เพื่อทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

3.2.7 ตู้อบมีขนาดความจุ 53 ลิตร มีพัดลมระบายอากาศด้านในเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่สำหรับใช้อบชิ้นตัวอย่างเพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 110°C ผลิตโดยบริษัท memmert ประเทศเยอรมัน

3.2.8 เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) รุ่น YFM 160 B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดผสมยางและสารเคมีต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ลูกกลิ้งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว ความยาว 15 นิ้ว จำนวน 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (friction ratio) เท่ากับ 1:1.2 ผลิตโดย บริษัท Yong Fong Machinery Co., Ltd. ประเทศจีน

3.2.9 ตู้อบบ่มแรง ชนิด Gear aging รุ่น GPHH-100 สามารถควบคุมอุณหภูมิ ได้ในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 300°C ดังรูปที่ 3.3 สำหรับใช้ในการบ่มแรงยางเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล ผลิตโดย บริษัท Tabai Espec Corp. ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.3 ตู้อบบ่มแรงชนิด Gear Aging

3.2.10 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (Moving die rheometer, MDR 2000) รุ่น 36AIG 2953 ใช้สำหรับหาเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time) และเวลาการสุกของยางก่อนกำหนด (scorch time) ดังรูปที่ 3.4 ผลิตโดย บริษัท Alpha Technologies Services Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

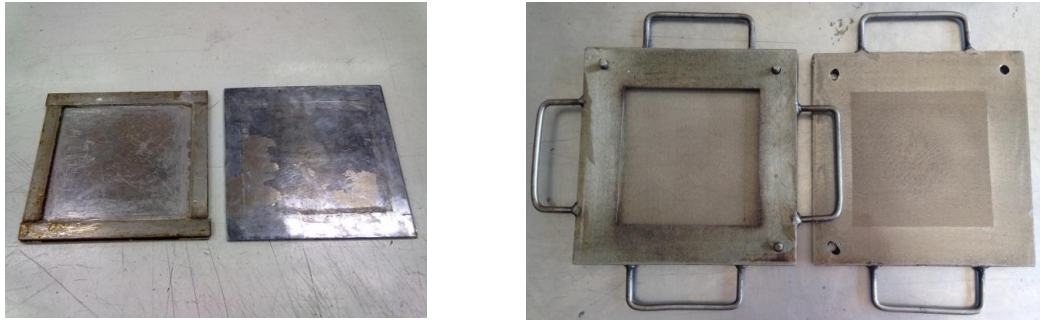


รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง

3.2.11 เครื่องอัดเบ้า (compression molding) รุ่น LCC 140 เป็นเครื่องมือสำหรับอัดยางเข้าเบ้าพิมพ์ โดยใช้ระบบไฮดรอลิก ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ความดันสูงสุด 200 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรที่ยัดเบ้าพิมพ์ขนาด $45 \times 45 \text{ cm}^2$ ผลิตโดยบริษัท TANG-MASTER Co., Ltd. ประเทศไทย ใต้หวัน ดังรูปที่ 3.5 และลักษณะเบ้าที่ใช้ทำมาจากแผ่นเหล็กหนาจำนวน 3 แผ่นประกบ รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $13 \times 13 \text{ cm}^2$ ความหนา 0.2 cm และขนาด $13 \times 13 \text{ cm}^2$ ความหนา 0.9 cm ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดเบ้า (compression molding)



รูปที่ 3.6 ลักษณะเบ้าที่ใช้ความหนา 0.2 cm (ซ้าย) และ 0.9 cm (ขวา)

3.2.12 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensometer) instron รุ่น 3365 ดังรูปที่ 3.7 สำหรับใช้ทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength), มอดูลัส (Modulus), เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ของตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ ผลิตโดยบริษัท อินสตรอน จำกัด ประเทศไทย



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง

3.2.13 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscopy, SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) ดังรูปที่ 3.8 การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ มีกำลังขยายถึง 200,000 เท่า ใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ



รูปที่ 3.8 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.3.1 ศึกษาอิทธิพลของเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่มีผลต่อสมบัติยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง

การเตรียมยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังทำได้โดยการเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ โดยได้ทำการศึกษาเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ออกเป็น 2 เทคนิคคือ เทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบไม่เจลาติไนซ์ (non-gelatinized cassava starch technique, NST) และเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบเจลาติไนซ์ (gelatinized cassava starch technique, GST) มีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบไม่เจลาติไนซ์ [39]

นำผงแป้งมันสำปะหลังผสมลงในน้ำยางธรรมชาติตามสูตรในตารางที่ 3.1 พร้อมกวนด้วยใบพัดกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการจับตัวน้ำยางธรรมชาติด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10 wt% แล้วรีดยางเป็นแผ่นล้างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ออกด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง และนำแผ่นยางมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้เป็นยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ในปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 70 phr และได้ทำการชั่งน้ำหนักยางผสมแป้งมาสเตอร์แบทช์หลังอบแห้งคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (% yield) ที่ได้คือ 94.23% โดยมีการคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตดังสมการที่ 3.1

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลผลิต} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (3.1)$$

ผลผลิตจริง คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

ผลผลิตตามทฤษฎี คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณตามสมการ

3.3.1.2 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบเจลลิตีไนซ์ [13]

เตรียมน้ำแป้งให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยเข้มข้น 5 wt% โดยชั่งน้ำกลั่น 1330 กรัม เทใส่ในหม้ออลูมิเนียมขนาด 5 ลิตร ชั่งแป้งมันสำปะหลัง 70 กรัม (คิดเป็น 70 phr) เทใส่ในหม้ออลูมิเนียมจากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ พร้อมกวนด้วยใบพัดกวนที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ตั้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จะได้แป้งเจลลิตีไนซ์ หรือเรียกว่า สตาร์ชเพสต์ (starch paste) แล้วชั่งน้ำยางธรรมชาติ 167 กรัม (คิดเป็น 100 phr) ตามสูตรในตารางที่ 3.1 เกล่งในแป้งเจลลิตีไนซ์พร้อมกวนด้วยใบพัดกวนที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังเจลลิตีไนซ์ มาทำการจับตัวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 10 wt% แล้วรีดยางเป็นแผ่น ล้างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ออกด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง และนำแผ่นยางมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้เป็นยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ในปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 70 phr และได้ทำการชั่งน้ำหนักยางผสมแป้งมาสเตอร์แบทช์หลังอบแห้งคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (% yield) ที่ได้คือ 97.09%

ขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ

นำยางผสมแป้งมาสเตอร์แบทช์ที่ได้จากแต่ละเทคนิคตามหัวข้อที่ 3.3.1.1 หรือ 3.3.1.2 มาบดพร้อมกันกับยางแผ่นรมควันชั้น 3 บนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งจากนั้นเติมสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 3.1 โดยมีเวลาและลำดับการผสมดังแสดงในตารางที่ 3.2 ยางคอมพาวนด์ที่ได้ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปหาสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่อุณหภูมิ 150°C ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) โดยจะวัดค่าเวลาเริ่มต้นการวัลคาไนซ์ (scorch time, T_{s2}) จะได้ค่าเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time, T_{90}) ตามวิธีการทดสอบที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.4 หลังจากนั้นนำยางคอมพาวนด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 150°C ตามวิธีการทดสอบที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.3.5 โดยใช้เบ้าขนาด 13×13×0.2 cm³ เพื่อใช้สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบในการวัดสมบัติเชิงกล ได้แก่ มอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด และตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำด้วยเครื่อง SEM

ตารางที่ 3.1 สูตรยางคอมพาวนด์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

1st step NRL/cassava starch master batch					
Chemicals	Dry (phr)		Wet (g)		
60% NR latex	100		167		
cassava starch NR/masterbatch ^{1,2}	70		1400		
2nd step Chemical compounding					
Ingredients	Weight (g)				
	NR/MB	NR/MB	NR/MB	NR/MB	NR/MB
	0	10	30	50	70
RSS-3	100	86	57	29	0
starch/NR masterbatch ^{1,2}	0	24	73	121	170

Ingredients: ZnO 5, Stearic acid 1, TBBS 1, IPPD 1, Super cell 5 and Sulphur 2.5 g

¹ non-gelatinized cassava starch/NR masterbatch

² gelatinized cassava starch/NR masterbatch

ตารางที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนในการผสมยางคอมพาวนด์ของยางฟองน้ำ

ขั้นตอนการผสม	เวลา (นาที)
บดแผ่นแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ร่วมกับยางแผ่นรมควันชั้น 3	0
ใส่ Zinc oxide	2
ใส่ stearic acid	3
ตัด ¼ ด้านข้างสลับไปมา 5-6 ครั้ง	5
ใส่ TBBS	7
ใส่ Antioxidant	9
ตัด ¼ ด้านข้างสลับไปมา 5-6 ครั้ง	11
ใส่ Blowing agent	13
ใส่ Sulphur	15
ม้วนตัด ผ่านลูกกลิ้ง 6 ครั้ง	17

3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.1 พบว่าการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบเจลาคีไนซ์ให้ลักษณะการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังในยางธรรมชาติดีกว่าการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบไม่เจลาคีไนซ์ ดังนั้นจึงเลือกใช้เทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบเจลาคีไนซ์ในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วย สารตัวเร่ง/กัมมะถัน โดยแต่ละระบบใช้อัตราส่วน สารตัวเร่ง/กัมมะถัน ดังนี้ ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติใช้อัตราส่วน 1.0/2.5 ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพใช้อัตราส่วน 1.5/1.5 และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพใช้อัตราส่วน 2.5/1.0 โดยแต่ละระบบการวัลคาไนซ์ได้ทำการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ในการเตรียมยางคอมพาวนด์พองน้ำ ทำตามขั้นตอนที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 ในการขึ้นรูปชิ้นทดสอบจะใช้แบบพิมพ์ที่มีความหนา 0.9 cm เพื่อทำการทดสอบตามมาตรฐานยางพองน้ำ ASTM D-1056 ได้แก่ ความหนาแน่น มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความสามารถในการคืนรูปหลังการกด ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน และทดสอบสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการฝังดินดังอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3.6-3.3.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 สูตรยางคอมพาวนด์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

Ingredients	Dry weight (g)				
	CV-MB 0	CV-MB 10	CV-MB 30	CV-MB 50	CV-MB 70
RSS 3	100	86	57	29	0
Cassava starch	0	24	73	121	170
masterbatch					

Ingredients: ZnO 5, Stearic acid 1, TBBS¹ 1, IPPD 1, DPT 5 and Sulphur² 2.5 g

หมายเหตุ ^{1,2}Semi-EV (SE-MB 0-70 phr) used TBBS and Sulphur = 1.5, 1.5 g

EV (EV-MB 0-70 phr) used TBBS and Sulphur = 2.5, 1.0 g

3.3.3 การทดสอบสมบัติความหนืดของยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่อง Mooney

viscometer

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Mooney viscometer ตามมาตรฐาน ASTM D 1646 มีวิธีการตัดยางคอมพาวนด์ 100 กรัม มาผ่านลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง 10 ครั้ง แต่ละครั้งให้ม้วนยางเป็นก้อนแล้วใส่กลับเข้าไปใหม่ แต่ในครั้งที่ 10 ให้ปล่อยยางออกมาเป็นแผ่น และนำไปตัดเป็นตัวอย่างทดสอบ 2 ชิ้น เป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1.75 นิ้ว มีน้ำหนัก 12-12.5 กรัม ชิ้นตัวอย่างชิ้นหนึ่งเจาะรูตรงกลาง ตั้งยางดังกล่าวไว้ 30 นาที ก่อนนำมาทดสอบหาความหนืดของยาง จากนั้นเปิดเครื่องให้ทำงานแล้วตั้งค่าต่าง ๆ ตามที่ต้องการ นำโรเตอร์ซึ่งผ่านการตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ เป็นเวลา 15 นาที มาสอดแกนของโรเตอร์ในชิ้นตัวอย่างที่เจาะรูตรงกลางและนำชิ้นตัวอย่างอีกชิ้นหนึ่งมาวางบนโรเตอร์ในลักษณะประกบกัน จากนั้นนำโรเตอร์ไปใส่ในตัวเครื่อง เครื่องจะบันทึกผลออกมาอยู่ในรูปค่าความหนืดตามนี้

$$\text{ความหนืดมูนนี่} = \text{ML} (1+4) 100^{\circ}\text{C} \quad (3.2)$$

M คือ Mooney viscosity ของยาง

L คือ จานหมุนขนาดใหญ่ (ถ้าใช้จานหมุนขนาดเล็กให้ใช้สัญลักษณ์ S)

1 คือ เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการอุ่นยางก่อนเดินเครื่อง

4 คือ เวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการเดินเครื่องหลังอุ่นยาง

100 คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.4 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ด้วยเครื่อง MDR

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง MDR 2000 ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-95 มีวิธีการนำยางคอมพาวนด์มาตัดเป็นรูปวงกลมมีน้ำหนัก 4-4.5 กรัม เป็นชิ้นตัวอย่าง จากนั้นเปิดเครื่องให้ทำงานแล้วตั้งค่าต่าง ๆ ตามที่ต้องการ นำชิ้นตัวอย่างมาวางบนโรเตอร์ซึ่งผ่านการตั้งค่าที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 15 นาที เครื่องจะบันทึกผลออกมาโดยจะวัดค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ค่าเวลาเริ่มต้นการวัลคาไนซ์ (scorch time, t_{s2}) เวลาการวัลคาไนซ์ (cure time, t_{90}) และดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI)

การคำนวณ

$$\text{ดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์} = 100/(t_{90}-t_{s2}) \quad (3.3)$$

t_{90} คือ เวลาในการวัลคาไนซ์

t_{s2} คือ เวลาเริ่มการวัลคาไนซ์

3.3.5 การเตรียมชิ้นทดสอบโดยใช้กระบวนการอัด (compression molding)

สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้เบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.2 \text{ cm}^3$ จะใช้ยางคอมพาวนด์แต่ละสูตรเท่ากัน โดยนำยางคอมพาวนด์แต่ละสูตรมาชั่งประมาณ 27 กรัม แต่สำหรับชิ้นทดสอบที่ใช้เบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ จะใช้ยางคอมพาวนด์แต่ละสูตรไม่เท่ากัน เช่นยางคอมพาวนด์ของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0, 10, 30, 50 และ 70 phr มาชั่งที่ (57, 57, 57), (54, 51, 50), (73, 64, 60), (80, 74, 66) และ (86, 78, 76) กรัม ตามลำดับ แล้วรีดด้วยลูกกลิ้งบดยางจำนวน 6 รอบ แล้วใส่ลงในเบ้าที่ทำการอุ่นเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการขึ้นรูปโดยใช้กระบวนการอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดที่อุณหภูมิ 150°C ตามเวลาการวัลคาไนซ์ (cure time, T_{90}) ที่ได้จากเครื่อง MDR

3.3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.6.1 การทดสอบความหนาแน่น

เตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด $2 \times 2 \times 0.9 \text{ cm}^3$ ใช้จำนวนชิ้นตัวอย่างของแต่ละสูตร 3 ชิ้น มาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักของชิ้นทดสอบของแต่ละสูตร และนำมาคำนวณค่าความหนาแน่นตามสมการที่ 3.4

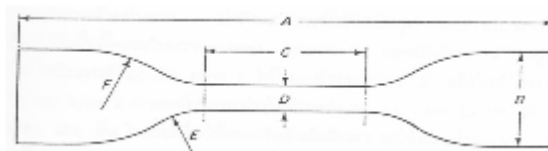
การคำนวณ

$$\text{Density} = M/V \quad (3.4)$$

Density คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)
 M คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบ (g)
 V คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบ (cm^3)

3.3.6.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึง

เตรียมชิ้นตัวอย่าง สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปจากเบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.2 \text{ cm}^3$ และขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ มาตัดเป็นรูปดัมเบลแบบ die C ดังรูปที่ 3.9 ใช้จำนวนชิ้นตัวอย่างของแต่ละสูตร 5 ชิ้น แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง ด้วยอัตราเร็วในการดึง 300 มิลลิเมตร/นาที และรายงานผลเป็นค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ตามสมการที่ 3.5-3.7



รูปที่ 3.9 ลักษณะตัวอย่างขึ้นทดสอบรูปดัมเบลแบบ die C

การคำนวณ

$$\text{Modulus at 100, 300, 500\%} = F/A \quad (3.5)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ขึ้นทดสอบยืด 100, 300 และ 500% (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขึ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

$$\text{Tensile strength} = F/A \quad (3.6)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ขึ้นทดสอบขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขึ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

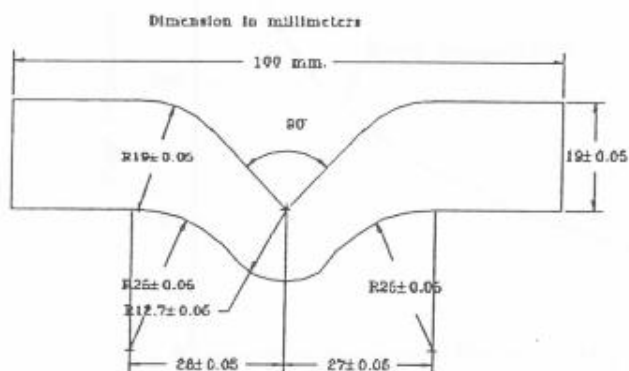
$$\% \text{ Elongation at break} = 100 \times (L - L_0 / L_0) \quad (3.7)$$

L คือ ระยะยืดหลังดึง (cm)

L_0 คือ ระยะยืดก่อนดึง (cm)

3.3.6.3 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปจากเบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.2 \text{ cm}^3$ และขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ มาตัดเป็นตัดขึ้นตัวอย่างแบบมุม (angle) ที่ไม่มีรอยบากตรงมุม ดังรูปที่ 3.10 ใช้จำนวนชิ้นตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อสูตร นำชิ้นตัวอย่าง ไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงที่อัตราเร็วในการดึง 300 มิลลิเมตร/นาที บันทึกค่าแรงดึงที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างฉีกขาด เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดตามสมการที่ 3.8



รูปที่ 3.10 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบแบบมุม

การคำนวณ

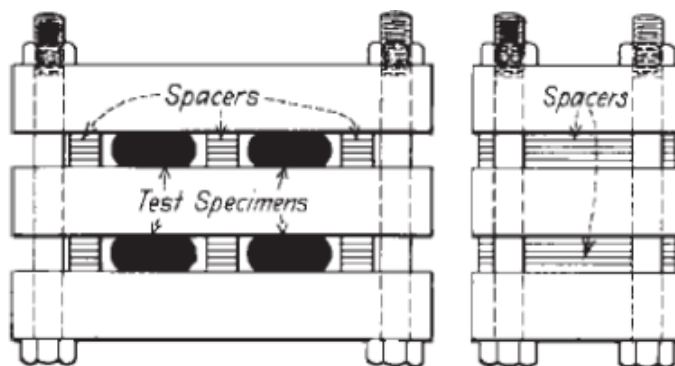
$$\text{Tear strength} = F/D \quad (3.8)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

D คือ ความหนาของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm)

3.3.6.4 การทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด

เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกดตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปจากแป้งขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ มาตัดเป็นตัดชิ้นทดสอบขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ใช้จำนวนชิ้นทดสอบของแต่ละสูตร 3 ชิ้น นำชิ้นทดสอบใส่ในชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกดดังรูปที่ 3.11 จากนั้นนำชุดอุปกรณ์ทดสอบใส่ในเตาอบควบคุมอุณหภูมิที่ 70°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาตามกำหนดแล้วนำชุดอุปกรณ์ทดสอบออกจากเตาอบนำชิ้นทดสอบออกจากชุดอุปกรณ์ทดสอบแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดความหนาของชิ้นทดสอบบันทึกค่าความหนาของชิ้นทดสอบทั้งก่อนทดสอบ และหลังทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหา ค่าความสามารถในการคืนรูปหลังการกดตามสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.11 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด

การคำนวณ

$$\% \text{ Compression set} = (t_0 - t_1) / (t_0 - t_n) \times 100 \quad (3.9)$$

t_0 คือ ความหนาก่อนทดสอบ (mm)

t_1 คือ ความหนาหลังการทดสอบ (mm)

t_n คือ ความหนาของแท่งคั่น (6.30 mm)

3.3.7 การทดสอบการบ่มเร่งของยางด้วยอากาศร้อน

การทดสอบการบ่มเร่งของยางตามมาตรฐาน ASTM D 573 โดยใช้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 รูปดัมเบลล์ ขนาด Die C และตามมาตรฐาน ASTM D 624 ชิ้นตัวอย่างแบบมุมที่ไม่มีรอยบากตรงมุม ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมงในตู้อบเร่ง (Gear oven) เมื่อครบกำหนดนำชิ้นทดสอบทำการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ด้วยอัตราการเร็ว 300 มิลลิเมตร/นาที และทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าสมบัติก่อนการบ่มเร่ง คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงตามสมการด้านล่างนี้

การคำนวณ

$$P = [(A-O) / O] \times 100 \quad (3.10)$$

P คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

A คือ สมบัติของยางหลังการบ่มเร่ง

O คือ สมบัติของยางก่อนการบ่มเร่ง

3.3.8 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำด้วยเครื่อง SEM

นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงมาตัดด้วยใบมีดที่มีความคมพิเศษให้มีขนาด 0.5 เซนติเมตร แล้วทำการติดตัวอย่างลงบนแท่งทองเหลือง (stub) ก่อนนำมาติดลงบนแท่งทองเหลืองจะต้องติดเทปกาวใสลงบนแท่งทองเหลืองหลังจากนั้นป้ายด้วยน้ำยาทาเล็บเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติด แล้วนำชิ้นตัวอย่างที่หักแล้วมาติด โดยนำผิวด้านที่หักขึ้นด้านบน หลังจากนั้นรอประมาณ 5 นาที จนน้ำยาทาเล็บแห้ง แล้วนำแท่งทองเหลือง (stub) ที่ติดชิ้นตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปฉาบผิว ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้พื้นผิวมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า นำมาฉาบผิวด้วยทอง (Au) เครื่องมือที่ใช้ในการฉาบผิวเรียกว่า Sputter coater โดยตัวอย่างจะวางไว้ที่ขั้ว anode และโลหะที่ใช้ฉาบ (Targer) อยู่ที่ขั้ว cathode ในการฉาบจะดูดอากาศออกให้อยู่ในสภาวะสุญญากาศระดับ 0.1 Torr แล้วให้กระแสไฟฟ้าและปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าไปใน chamber โดยก๊าซอาร์กอนจะเคลื่อนไปที่ขั้ว cathode และชนแผ่นทองทำให้แตกตัวเป็นโมเลกุล กระจายไปทั่ว chamber แล้วค่อย ๆ เคลือบลงบนตัวอย่าง ความหนาของผิวฉาบควรอยู่ระหว่าง 10-20 nm การฉาบบางเกินไป จะทำให้เกิดการ Charge up ซึ่งภาพที่ได้จะเห็นเป็นแสงสว่างจ้าเป็นจุด ๆ แต่ถ้าฉาบหนาเกินไปจะทำให้สูญเสียรายละเอียด โดยทำการเคลือบทองเป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นนำไปตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM ทำการวัดขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย (average cell size) ซึ่งเป็นการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ด้านใดด้านหนึ่ง และจำนวนเซลล์ (cell count) ซึ่งเป็นจำนวนเซลล์ต่อ 1 cm ของความยาวตัวอย่าง ตามมาตรฐาน BS 4443-Part I:1988

3.3.9 การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน [40, 41]

โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปฝังในหลุมดินขนาด $4 \times 1 \text{ m}^2$ มีความลึกจากผิวดินชั้นบน 20 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ระยะเวลาในการทดสอบเป็นเวลา 1-4 เดือน ทำการรดน้ำทุก ๆ 2 วัน และวัดความชื้นในดิน และอุณหภูมิของหลุมทดสอบทุก ๆ สัปดาห์ แล้วนำชิ้นทดสอบขึ้นทุก ๆ เดือนนำชิ้นตัวอย่างมาล้างน้ำและทำความสะอาดด้วยแปรงขนนุ่มแล้วอบแห้งในเตาอบที่ 50°C จนกว่าชิ้นทดสอบมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หายไปตามสมการที่ 3.11 และนำมาทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด

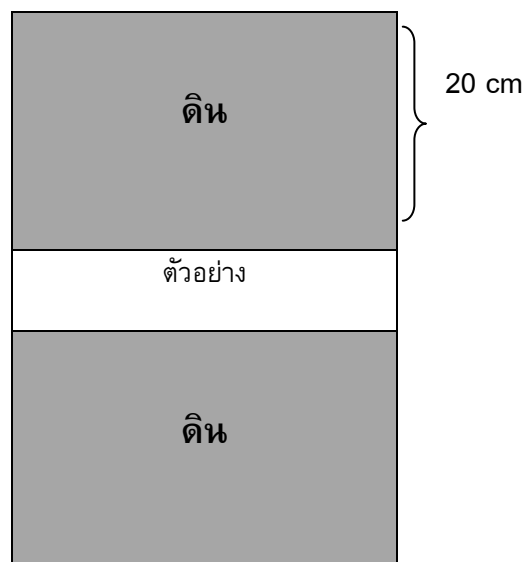
การคำนวณ

$$Q = \frac{A (g) - B (g)}{B (g)} \times 100 \quad (3.11)$$

Q คือ น้ำหนักที่หายไป (%)

A คือ น้ำหนักก่อนทดสอบ (g)

B คือ น้ำหนักหลังทดสอบ (g)



รูปที่ 3.12 หลุมทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังดิน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่มีผลต่อสมบัติของยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง

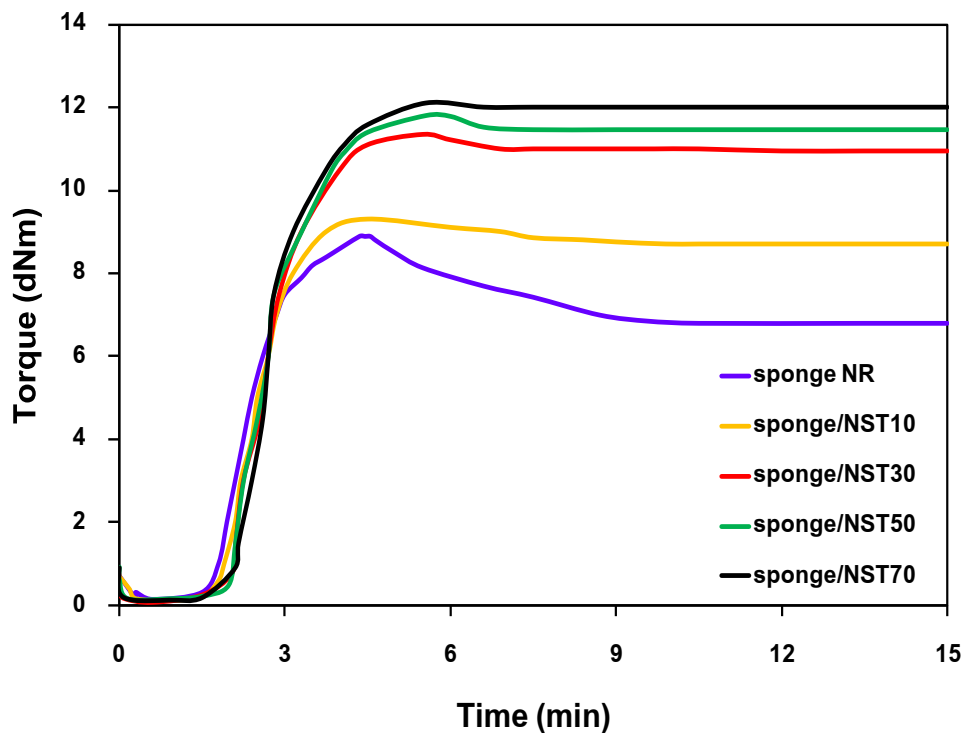
แป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์แบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังแบบเจลาติไนซ์ลงในน้ำยางธรรมชาติ ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้คือ 94.23% และ 97.09% ตามลำดับ เตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่ได้จากแต่ละเทคนิค โดยใช้ supper cell ซึ่งเป็นสารฟูกุ่มเอโซไดคาร์โบนาไมด์ ที่ปริมาณ 5 phr และแปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.1.1 และ 3.3.1.2 จากนั้นทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

4.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์

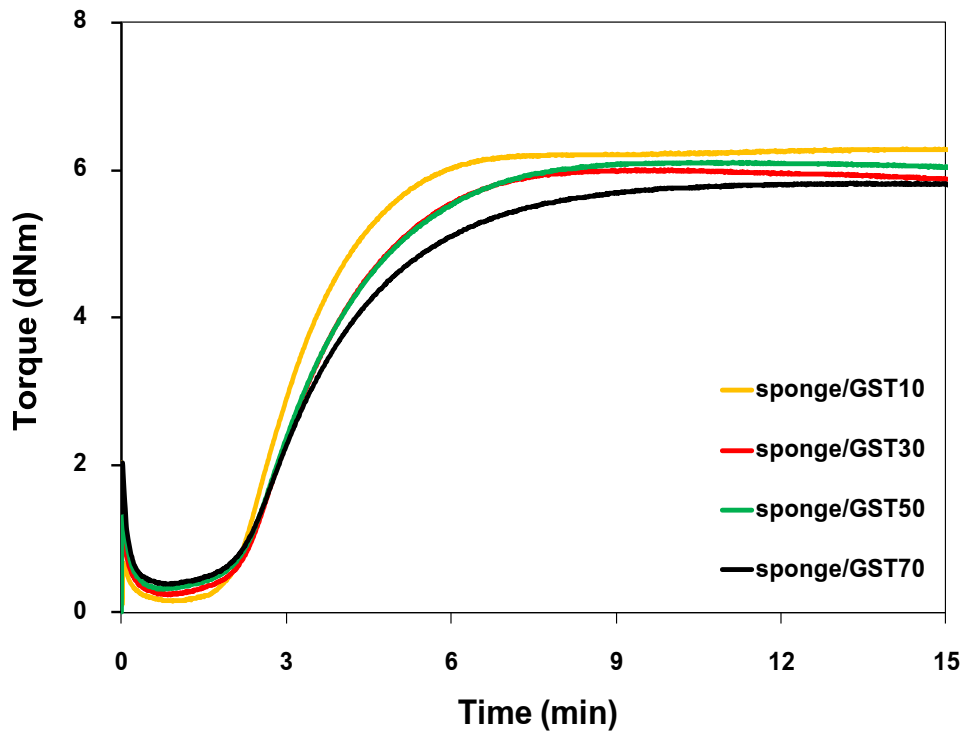
ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิ 150°C ตามวิธีการทดลองที่ 3.3.4 ผลการทดลองที่ได้แสดงตามตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 สมบัติการวัดคาบไชน์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

Formulas	T_{s2} (min)	T_{c90} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	CRI (min^{-1})
Sponge/NR	1.57	3.08	0.13	8.50	8.37	66.23
Sponge/NST 10	2.03	3.21	0.12	9.30	9.18	84.75
Sponge/NST 30	2.15	3.48	0.06	11.35	11.29	75.19
Sponge/NST 50	2.15	3.53	0.15	11.80	11.65	72.46
Sponge/NST 70	2.10	3.56	0.12	12.10	11.98	68.49
Sponge/GST 10	2.42	5.07	0.15	6.29	6.14	37.74
Sponge/GST 30	2.57	5.42	0.23	6.01	5.78	35.09
Sponge/GST 50	2.58	6.00	0.32	6.10	5.78	29.24
Sponge/GST 70	3.04	6.29	0.39	5.82	5.43	30.74



รูปที่ 4.1 ลักษณะการวัดคาบไชน์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาตีไนซ์



รูปที่ 4.2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคการเตรียมแบบเจลลิตีไนซ์

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1-4.2 แสดงพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลลิตีไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลลิตีไนซ์ให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ ค่าเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และค่าเวลาในการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลกรุป (-OH) ที่พื้นผิวของอนุภาคแป้งมีการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Khalaf และ Sadek (2012) [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ที่เตรียมจากผงแป้งข้าวโพดบดผสมในยางธรรมชาติ และ Wu และคณะ (2009) [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดมาสเตอร์แบทช์แบบเจลลิตีไนซ์ในยางสไตรีนบิวตะไดอีน

เมื่อเปรียบเทียบเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากแต่ละเทคนิค พบว่าการเตรียมแบบเจลลิตีไนซ์มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการเจลลิตีไนซ์โครงสร้างของแป้งจะถูกแยกออกโดยอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และแรงเฉือนในช่วงเริ่มต้น ระหว่างการให้ความร้อนของเม็ดแป้ง [35] ทำให้พันธะไฮโดรเจนในเม็ดแป้งถูกทำลายรวมถึงการมีน้ำไปล้อมรอบเม็ดแป้งทำให้เกิดการบวมพองเป็นผลให้โครงสร้างแยก

ออกจากรันได้เป็น amylose และ amylopectin ออกมาทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีการดูดซับสารตัวเร่งเพิ่มขึ้น

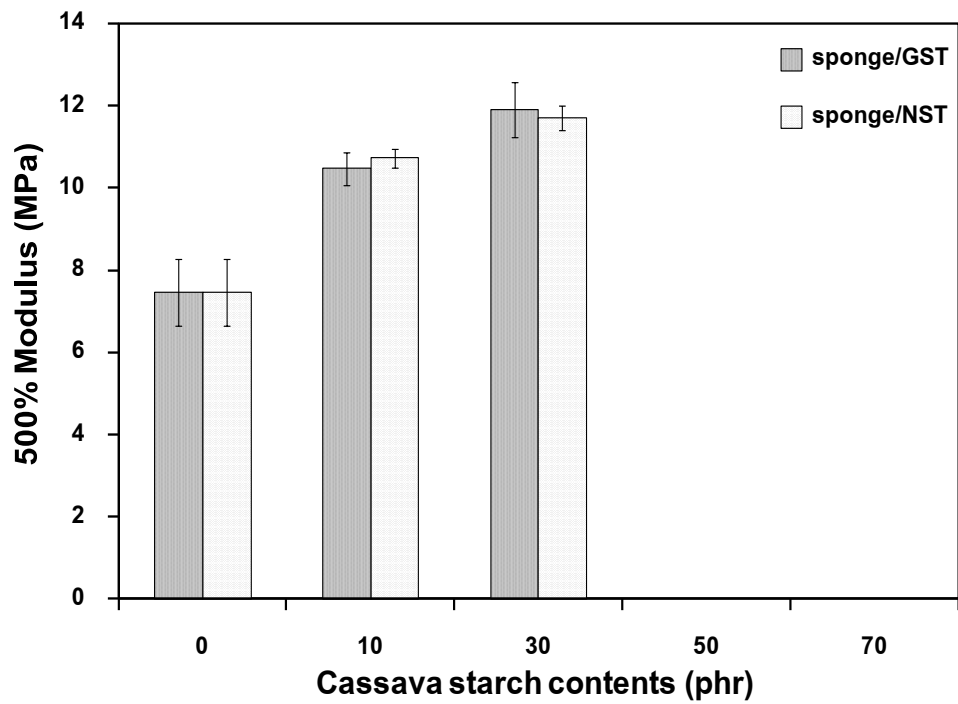
4.1.2 สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์

โดยทำการทดสอบสมบัติมอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3-4.6

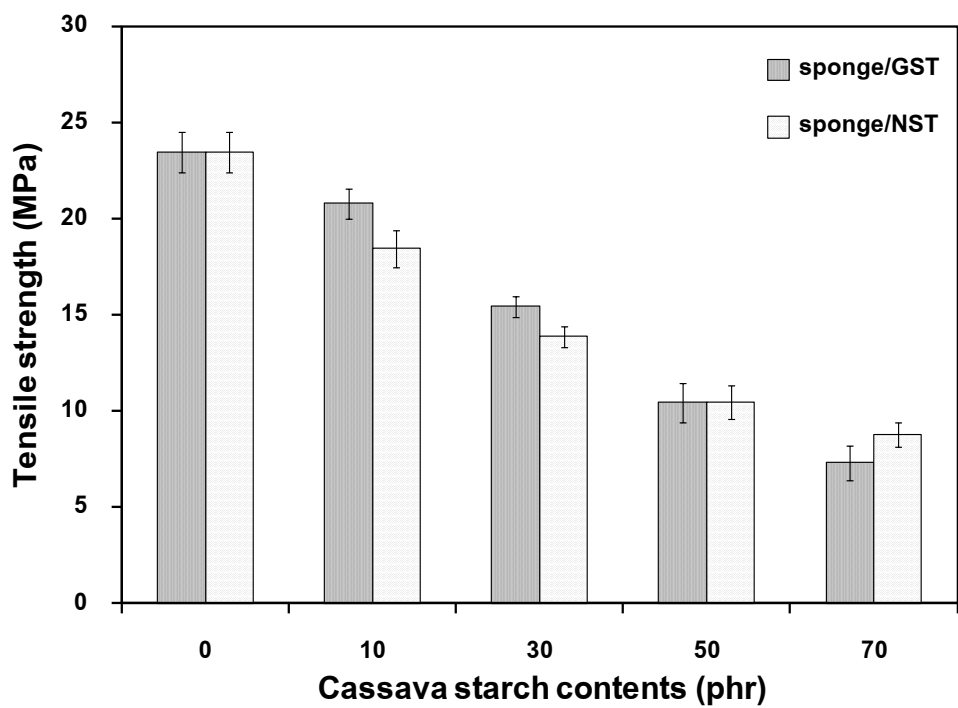
ตารางที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

Formulas	500% Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)
Sponge/NR	7.46±0.82	23.47±1.04	675±28.87	27.83±1.28
Sponge/NST 10	10.73±0.22	18.44±0.98	550±25.00	25.47±1.01
Sponge/NST 30	11.71±0.31	13.88±0.53	525±28.87	19.65±0.66
Sponge/NST 50	-	10.45±0.87	366±38.19	17.13±0.44
Sponge/NST 70	-	8.77±0.62	241±28.87	14.76±0.94
Sponge/GST 10	10.47±0.40	20.80±0.76	625±28.87	27.66±0.48
Sponge/GST 30	11.92±0.67	15.43±0.53	550±00.00	23.01±0.41
Sponge/GST 50	-	10.42±1.02	465±13.69	20.89±0.26
Sponge/GST 70	-	7.29±0.89	330±27.39	18.19±0.73

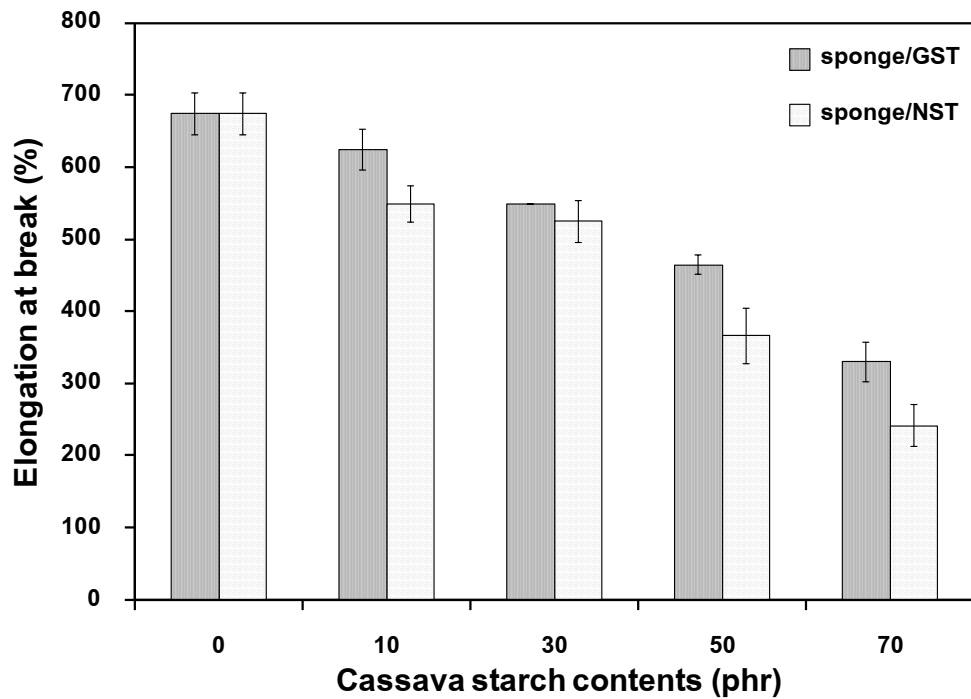
หมายเหตุ เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่สามารถหาค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ ได้



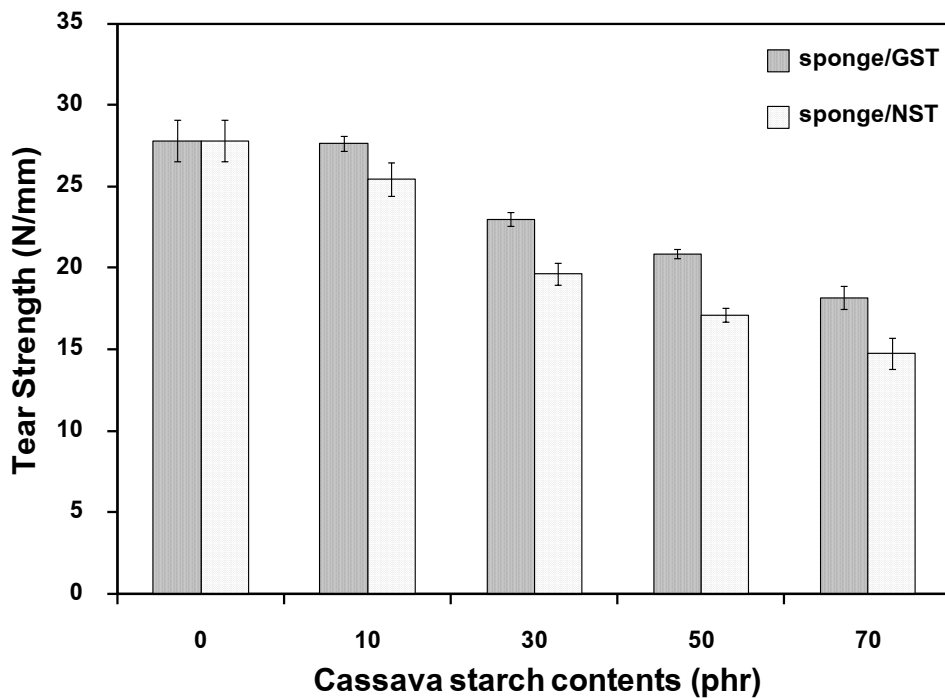
รูปที่ 4.3 มอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.4 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

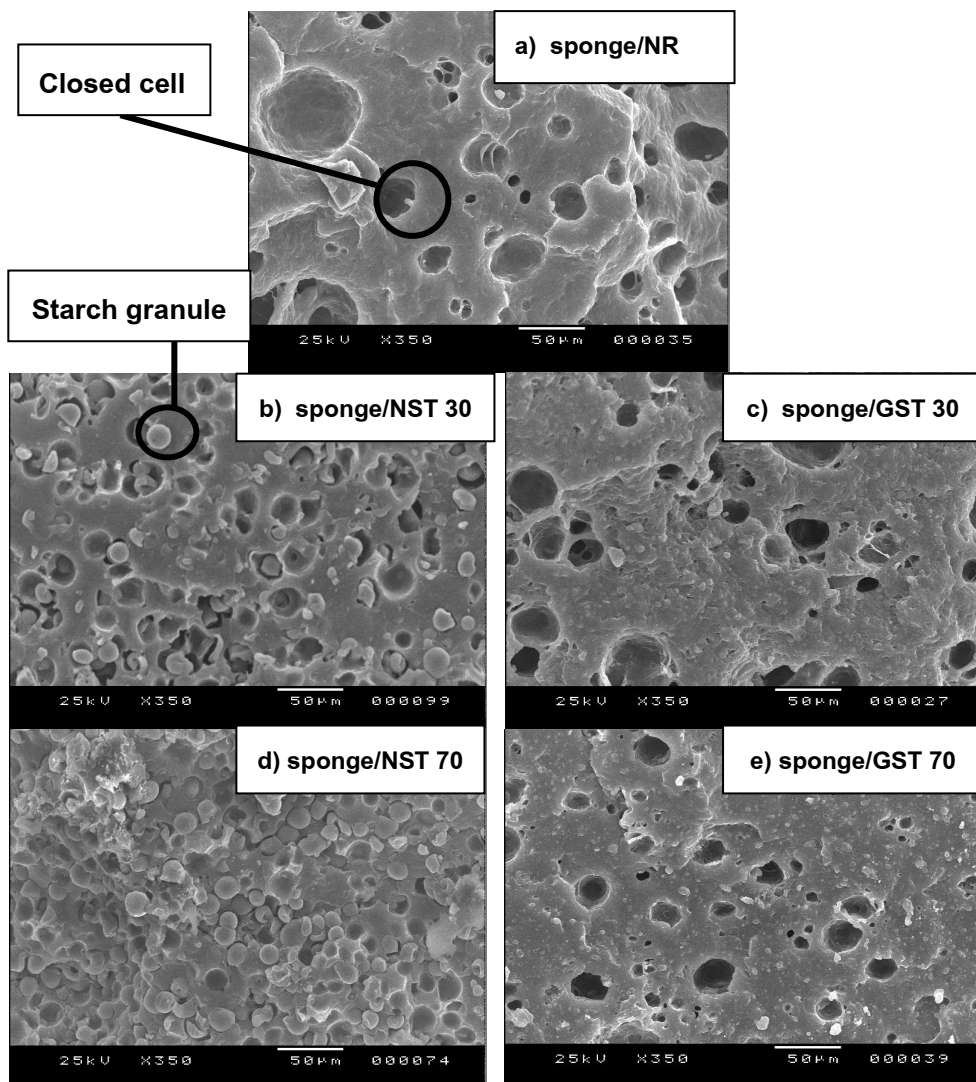
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 และรูป 4.3 พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะการยืด 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแป้งมันสำปะหลังที่มีลักษณะแข็งที่ใส่เข้าไปในยางธรรมชาติ เมื่อใส่เข้าไปในยางจะช่วยเพิ่มความแข็งตึง (stiffness) ของยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยางพองน้ำวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4-4.6 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากผลของความไม่เข้ากันระหว่างแป้งและโมเลกุลยางธรรมชาติ เนื่องจากลักษณะความเป็นขั้วที่แตกต่างกันค่อนข้างมากระหว่างแป้งที่มีสมบัติความชอบน้ำ หรือเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูง แต่ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือมีความเป็นขั้วต่ำ ส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของแป้งกับโมเลกุลยางธรรมชาติไม่แข็งแรง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Khalaf และ Sadek (2012) [11] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดในยางธรรมชาติ และ Riyapan และ Riyajan (2012) [42] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่เพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังในยางธรรมชาติเกรดต่ำ ทำให้มีจุดอ่อนแอในเนื้อของยางพองน้ำวัลคาไนซ์มากขึ้น ความแข็งแรงของยางพองน้ำวัลคาไนซ์จึงลดลง และยิ่งลดลงมากขึ้นเมื่อมีจุดอ่อนแอในเนื้อยางพองน้ำวัลคาไนซ์มากขึ้นซึ่งก็คือปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่มากขึ้นนั่นเอง ด้วยสาเหตุที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดทำให้สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์พบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด สูงกว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของแป้งในยางธรรมชาติได้ดีกว่า ส่งผลให้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์สามารถยืนยันได้โดยลักษณะสัญญาณวิทยาดังแสดงรูปที่ 4.7

4.1.3 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

โดยทำการศึกษาสัญญาณวิทยาของผิวรอยตัดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 0, 30 และ 70 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแอมันสำหรับหลังต่าง ๆ โดยที่กำลังขยาย 350 เท่า

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 พบว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้แอมันสำหรับหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาตีไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาตีไนซ์ให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ มีโครงสร้างของเซลล์แบบปิด (Closed cell) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟูแล้วปล่อยเป็นก๊าซออกมา ทำให้เห็นเป็นลักษณะหลุมโพรง และจะเห็นว่าขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นจากสารฟูจะมีขนาดลดลงตามปริมาณแอมันสำหรับหลังมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดและการขยายตัวของเซลล์ยากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Kim และคณะ (2006) [25] ได้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่เพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางฟองน้ำธรรมชาติ Lee และ Choi (2007) [26] ได้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่เพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางฟองน้ำธรรมชาติ และ Zhang และคณะ (2010) [29] ได้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาที่

เพิ่มปริมาณเขม่าดำในยางฟองน้ำคลอรีนเตทโพลีเอทีซีน และจะเห็นว่าแป้งที่ผสมเข้าไปในเนื้อยางยังคงเป็นเม็ดอนุภาคของแป้ง (granule) และมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในเนื้อยาง มีการรวมตัวเป็นกลุ่ม(agglomerate) อาจจะเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างแป้งและโมเลกุลยางธรรมชาติ เนื่องจากลักษณะความเป็นขั้วที่แตกต่างกันค่อนข้างมากระหว่างแป้งที่มีสมบัติความชอบน้ำ หรือเป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูง แต่ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือมีความเป็นขั้วต่ำ ส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของแป้งกับโมเลกุลยางธรรมชาติไม่แข็งแรง ทำให้มีจุดอ่อนแอในเนื้อของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์มากขึ้น ความแข็งแรงของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์จึงลดลง ด้วยสาเหตุที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดได้สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติทางเชิงกลที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น สมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์ พบว่าเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์ มีการกระจายตัวของแป้งในเนื้อยางธรรมชาติได้ดีกว่า ส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของแป้งกับโมเลกุลยางธรรมชาติมีการยึดเกาะได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด มีค่าสูงกว่าเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์เพื่อการศึกษาผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่ง/กำมะถัน

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง

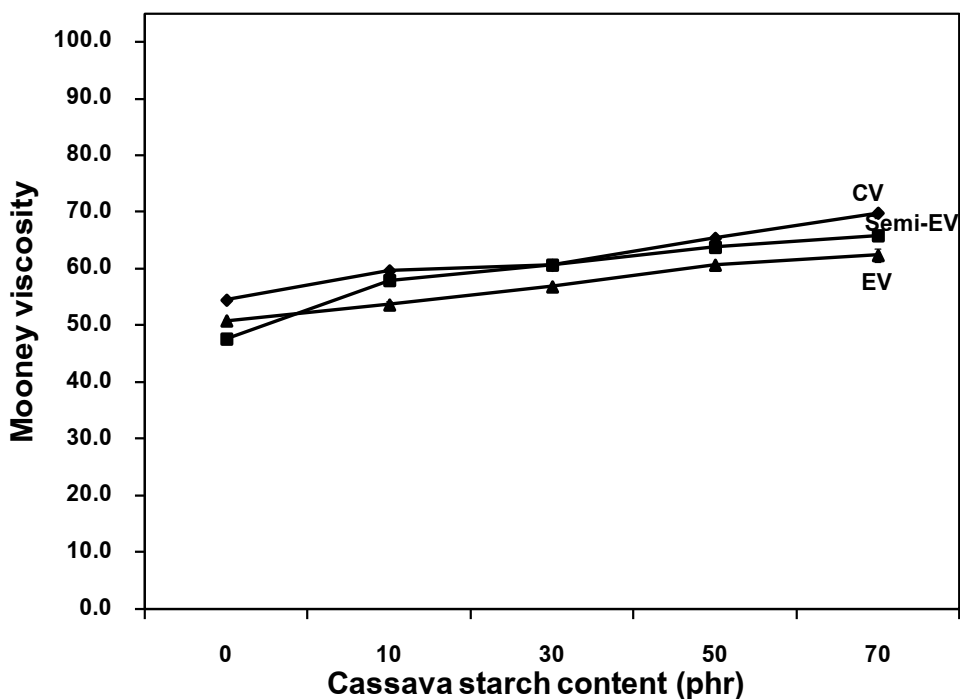
เตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์ลงในน้ำยางธรรมชาติ ได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิต 97.09% โดยใช้ DPT เป็นสารฟูที่ 5 phr ได้ศึกษาระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่ง/กำมะถัน ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามสูตรในตารางที่ 3.3 โดยแต่ละระบบการวัลคาไนซ์ได้ทำการศึกษาปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr จากนั้นทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

4.2.1 ความหนืดมูนี่ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์

ทดสอบสมบัติความหนืดมูนี่ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิ 100°C ตามวิธีการทดลองที่ 3.3.3 ผลการทดลองที่ได้แสดงตามตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 ความหนืดมูนี่ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์ต่าง ๆ

Formulas	Mooney viscosity ML 1+4 (100°C)
CV-MB 0	54.5±0.1
CV-MB 10	59.7±0.2
CV-MB 30	60.7±0.2
CV-MB 50	65.4±0.1
CV-MB 70	69.9±0.4
SE-MB 0	47.6±0.3
SE-MB 10	58.0±0.5
SE-MB 30	60.7±0.2
SE-MB 50	63.8±0.1
SE-MB 70	65.9±0.1
EV-MB 0	50.8±0.1
EV-MB 10	53.7±0.2
EV-MB 30	56.8±0.3
EV-MB 50	60.7±0.2
EV-MB 70	62.4±0.1



รูปที่ 4.8 ความหนืดมูนนี่ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

ความหนืดมูนนี่เป็น สมบัติที่เกี่ยวข้องกับความยากง่ายต่อการแปรรูปยาง จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 พบว่ายางน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ มีค่าความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแป้งมันสำปะหลังที่มีลักษณะแข็งที่ใส่เข้าไปในยางธรรมชาติจะช่วยเพิ่มความแข็งตึงของยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวนด์เพิ่มขึ้น

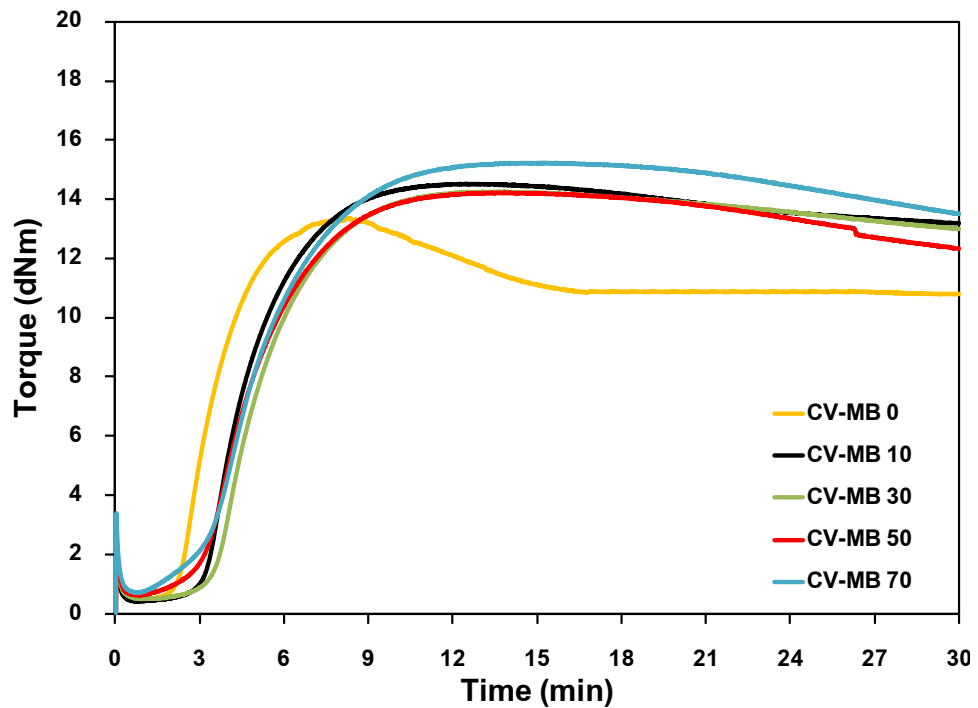
เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนนี่ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์แต่ละระบบ พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ของทั้ง 3 ระบบ มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน ซึ่งกล่าวได้ว่าอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่ง/กัมมะถันทั้ง 3 ระบบ ไม่มีผลต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่ได้

4.2.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์

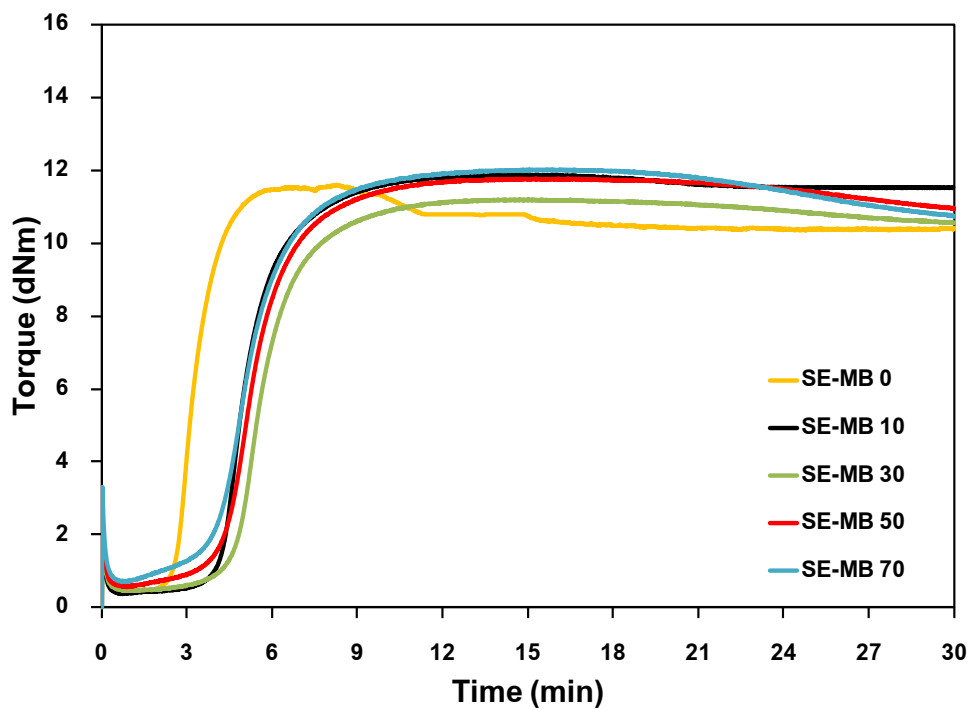
ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิ 150°C ตามวิธีการทดลองที่ 3.3.4 ผลการทดลองที่ได้แสดงตามตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9-4.11

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการวัดคาบไชนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัดคาบไชนซ์แบบต่าง ๆ

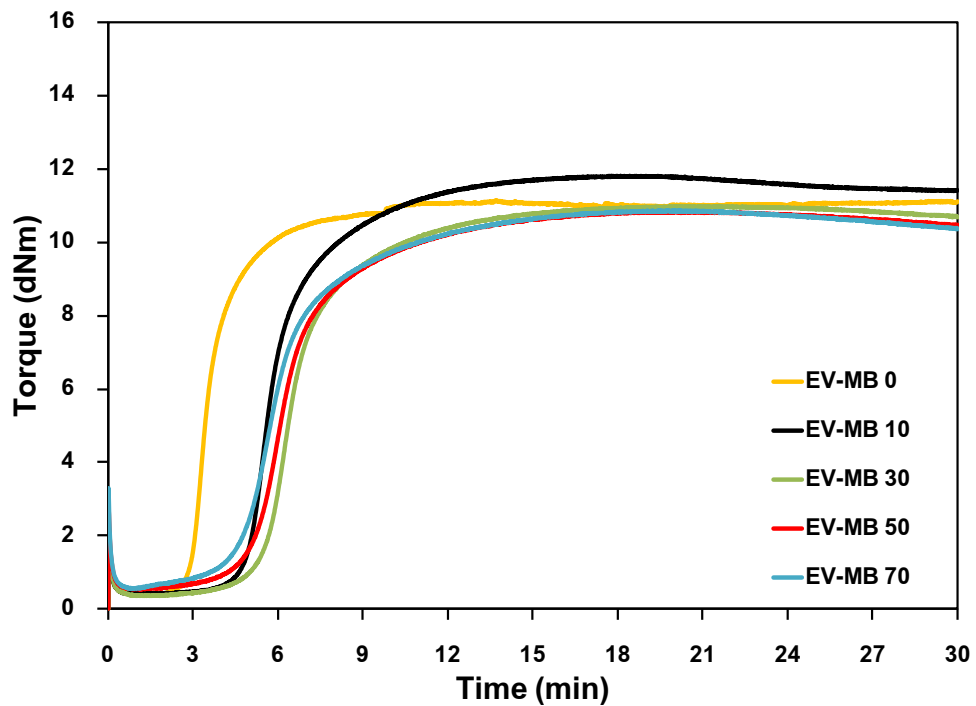
Formulas	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$M_H - M_L$ (dN.m)	CRI (min ⁻¹)
CV-MB 0	2.31	5.25	0.47	13.38	12.91	34.01
CV-MB 10	3.27	7.28	0.38	14.51	14.13	24.94
CV-MB 30	3.49	8.06	0.48	14.25	13.77	21.88
CV-MB 50	3.24	7.59	0.59	14.21	13.62	22.99
CV-MB 70	3.22	8.31	0.69	15.22	14.53	19.65
SE-MB 0	2.48	4.28	0.41	11.60	11.19	55.56
SE-MB 10	4.26	7.23	0.37	11.88	11.51	33.67
SE-MB 30	4.57	7.54	0.46	11.20	10.74	33.67
SE-MB 50	4.31	7.40	0.56	11.79	11.23	32.36
SE-MB 70	4.14	7.34	0.70	12.03	11.33	31.25
EV-MB 0	3.07	5.52	0.39	11.16	10.77	40.82
EV-MB 10	5.10	9.26	0.40	11.82	11.42	24.04
EV-MB 30	5.47	10.16	0.36	11.00	10.64	21.32
EV-MB 50	5.26	10.16	0.53	10.84	10.31	20.41
EV-MB 70	5.01	10.19	0.56	10.88	10.32	19.31



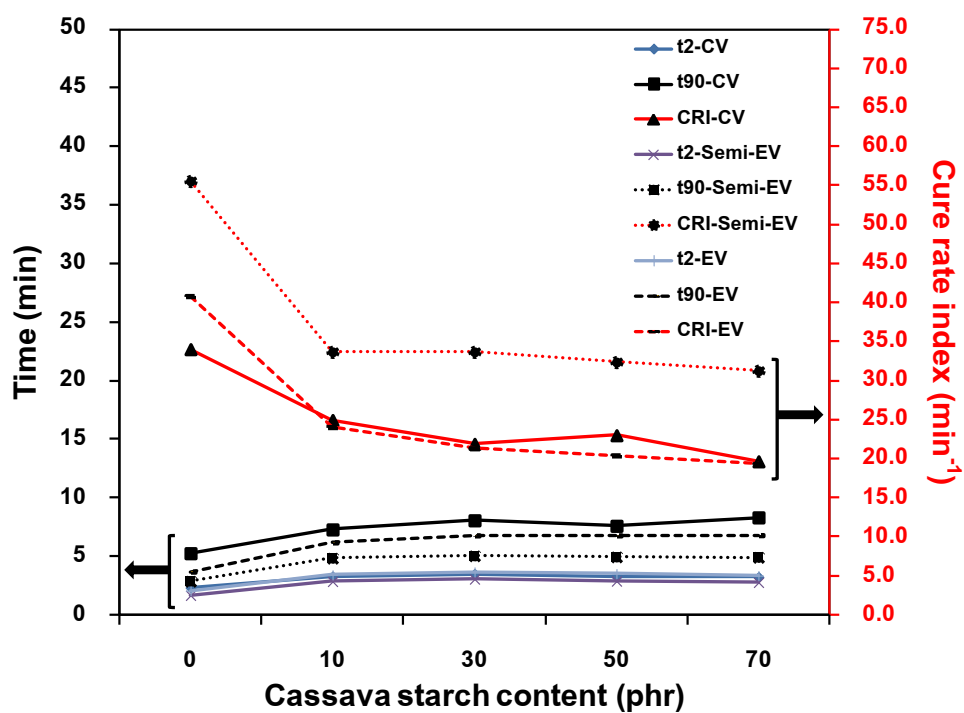
รูปที่ 4.9 ลักษณะการวัดค่าโมเมนต์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัดค่าโมเมนต์แบบปกติ



รูปที่ 4.10 ลักษณะการวัดค่าโมเมนต์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัดค่าโมเมนต์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.11 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.12 เวลาเริ่มการวัลคาไนซ์ เวลาในการวัลคาไนซ์ และดัชนีการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

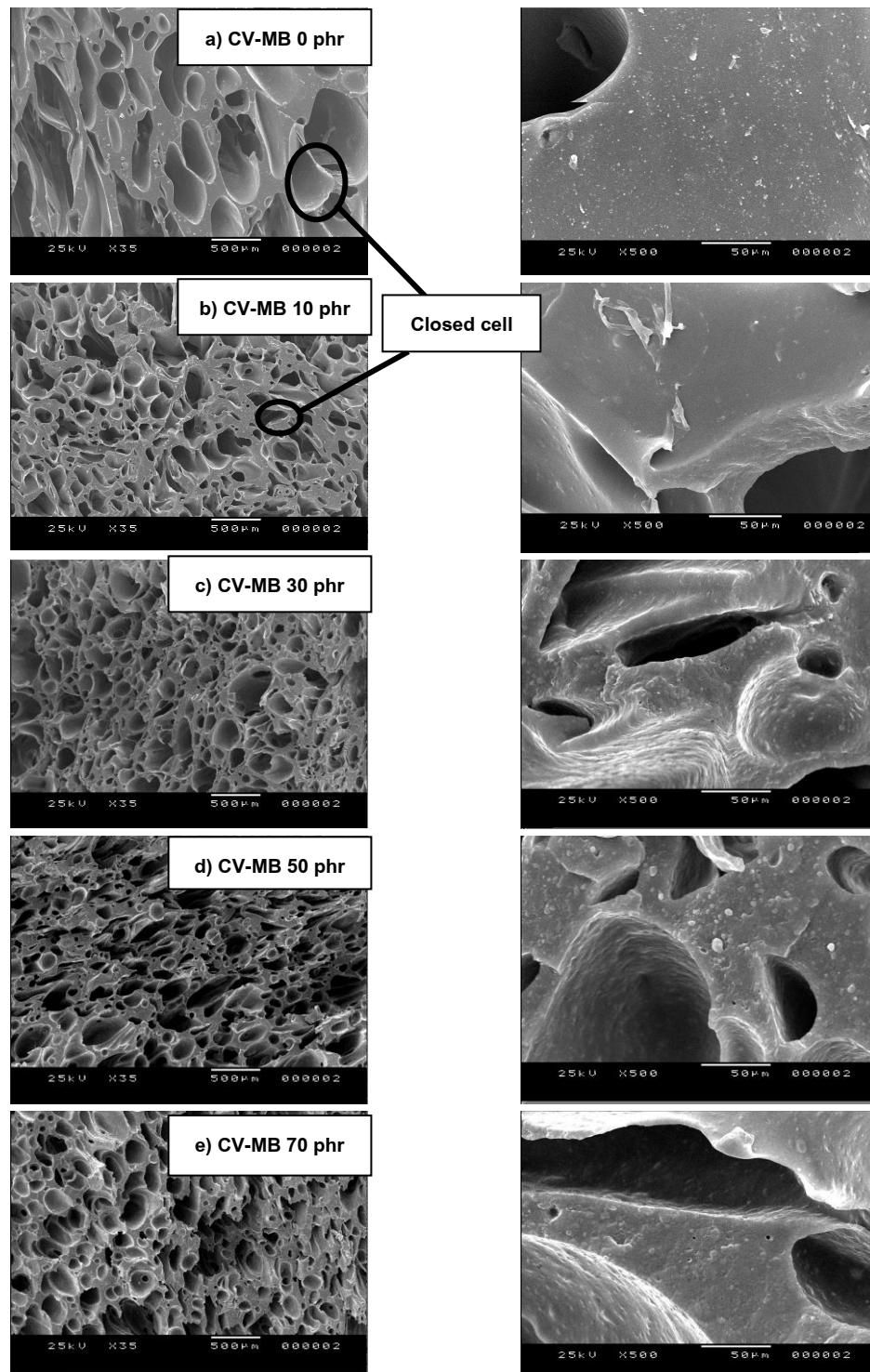
จากรูปที่ 4.9-4.11 พบว่าลักษณะกราฟหลังช่วงเวลาการวัลคาไนซ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพในกรณีที่ไม่ใส่แป้งมันสำปะหลังให้ผลในทำนองเดียวกันคือ จะแสดงพฤติกรรมแบบรีเวอร์ชันอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการหาเวลาวัลคาไนซ์ จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะในโมเลกุลยาง และเกิดการสลายตัวของสารฟลู ซึ่งการสลายตัวของสารฟลูทำให้เกิดเป็นฟองก๊าซในเนื้อยาง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้แรงเค้นระหว่างยางคอมพาวนด์และโรเตอร์ลดลง ส่งผลให้ค่าแรงบิดลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Guriya และ Tripathy (1996) [23] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการวัลคาไนซ์ของเขม่าดำบดผสมในยางพองน้ำเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และในกรณีใส่แป้งเพิ่มขึ้นการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมพาวนด์ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแป้ง ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้ยาก ดังนั้นฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่า ทำให้แรงเค้นระหว่างยางคอมพาวนด์และโรเตอร์ลดลงน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่ใส่แป้ง ส่งผลให้การเกิดรีเวอร์ชันลดลงด้วยเช่นกัน แต่ในทางตรงกันข้าม ช่วงเวลาหลังการวัลคาไนซ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพทั้งในกรณีที่ไม่ใส่แป้งมันสำปะหลังและใส่แป้งมันสำปะหลังจะไม่แสดงพฤติกรรมแบบรีเวอร์ชัน ทั้งนี้อาจเกิดจากระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพโดยส่วนใหญ่มีการเชื่อมโยงพันธะในโมเลกุลยางแบบโมโนซัลฟิดิกซึ่งมีค่าพลังงานพันธะที่สูง ทำให้ยางพองน้ำคอมพาวนด์มีสมบัติทนต่อความร้อนภายใต้สภาวะการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.12 พบว่าเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาในการวัลคาไนซ์ ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลกรุป (-OH) ที่พื้นผิวของอนุภาคแป้งเกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์ ซึ่งจะส่งผลต่อดัชนีการวัลคาไนซ์ที่ลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) ซึ่งบ่งบอกความหนืดของยางคอมพาวนด์ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากแป้งมันสำปะหลังที่ใส่เข้าไปในยางธรรมชาติอาจจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ในระหว่างการทดสอบการหาเวลาการวัลคาไนซ์แรงเค้นที่โรเตอร์กระทำกับยางคอมพาวนด์จะทำให้เกิดแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งของยางคอมพาวนด์ พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะแข็ง (rigidity) เมื่อใส่เข้าไปในยางจึงทำให้ยางพองน้ำคอมพาวนด์แสดงลักษณะความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย

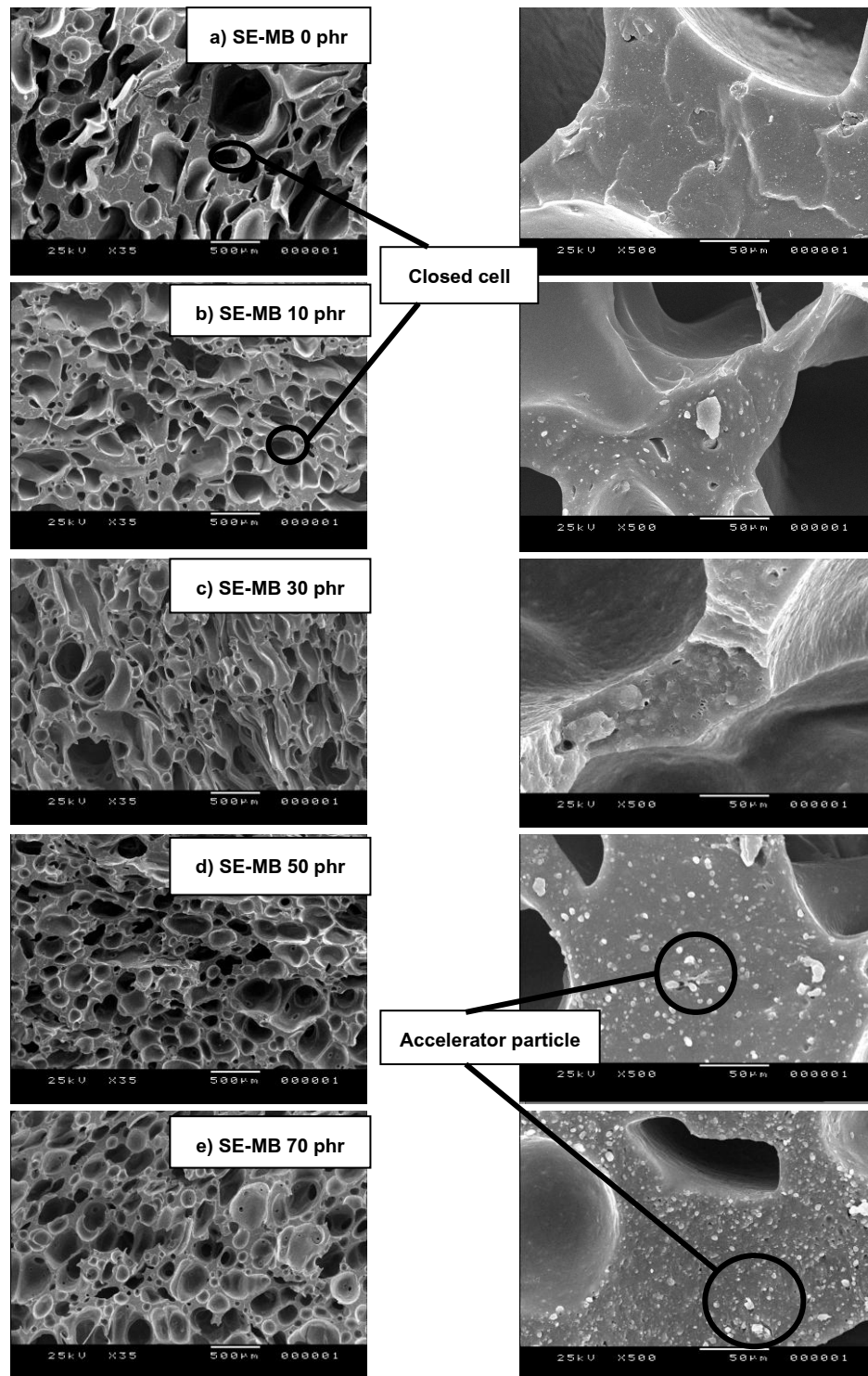
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์แต่ละระบบ พบว่าเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีค่ามากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องจากการทดลองนี้ใช้สารตัวเร่งเป็น TBBS ซึ่งเป็นสารกลุ่มซัลไฟไลต์ไม่มีช่วงระยะเวลาในการแตกตัวเป็น MBT นาน ส่งผลให้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพที่มีการใช้สารตัวเร่งที่ปริมาณมากกว่า จึงทำให้ช่วงเวลาเริ่มวัลคาไนซ์ที่นานกว่า และส่งผลให้เวลาในการวัลคาไนซ์นานกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ และระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ ตามลำดับ

4.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์

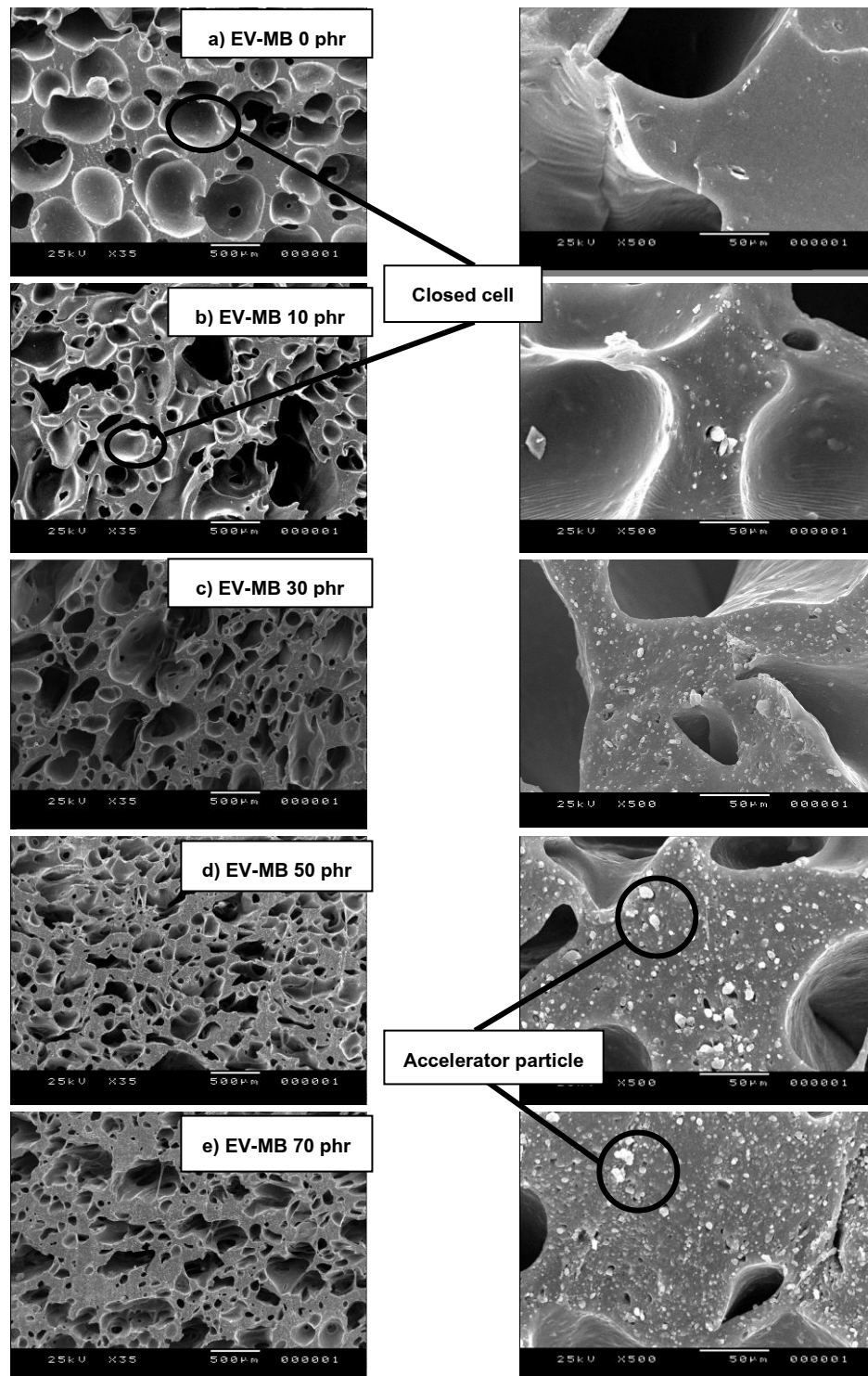
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวรอยตัดรวมถึงขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย และจำนวนเซลล์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13-4.17 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติกำลังขยาย 35 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพกำลังขยาย 35 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)



รูปที่ 4.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพกำลังขยาย 35 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)

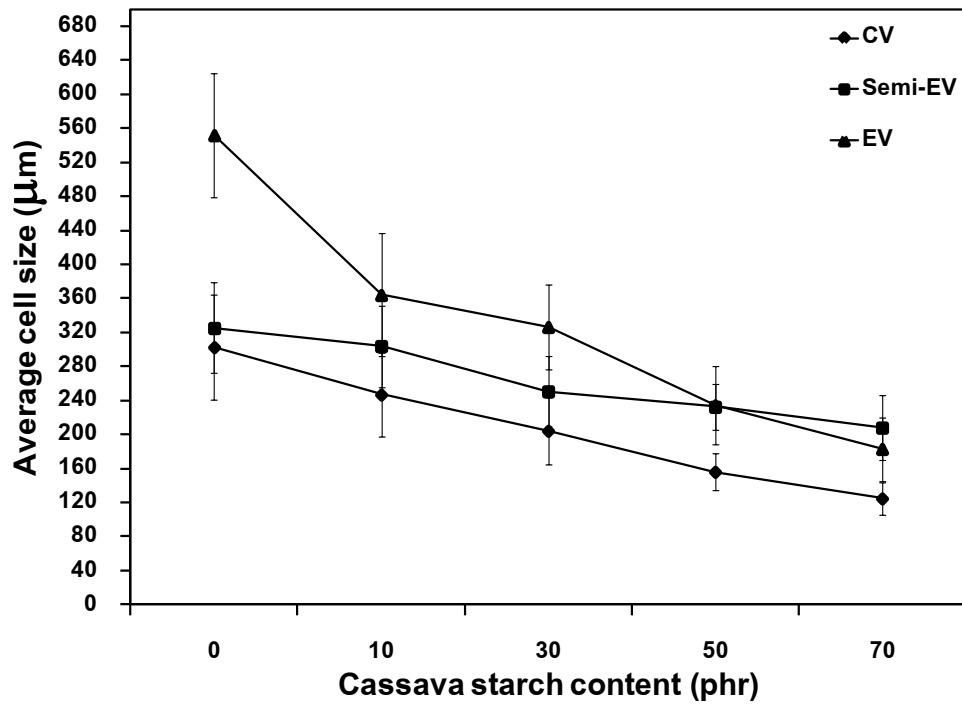
จากรูปที่ 4.13 แสดงลักษณะและรูปร่างของเซลล์ในยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ พบว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีโครงสร้างของเซลล์แบบปิดและที่กำลังขยาย 500 เท่า ในกรณีที่เติมแป้งมันสำปะหลังสามารถเห็นการกระจายตัวของแป้งในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการเจลาติไนซ์โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งจะถูกทำลายโดยอุณหภูมิ และแรงเฉือน สายโซ่โมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินคลายตัวออกจากกัน ส่งผลให้มีการกระจายตัวในเนื้อได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบบไม่เจลาติไนซ์ที่มีลักษณะการกระจายตัวของเม็ดแป้งเป็นกลุ่มก้อนในเนื้ออย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะและรูปร่างของเซลล์ในยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ พบว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีโครงสร้างของเซลล์แบบปิด และที่กำลังขยาย 500 เท่า ในกรณีที่เติมแป้งมันสำปะหลังสามารถเห็นการกระจายตัวของแป้งในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ และสังเกตเห็นอนุภาคของสารเคมี ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นอนุภาคของสารตัวเร่งมีกระจายตัวในเนื้ออย่างเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการลดลงของเปอร์เซ็นต์ยางธรรมชาติ เช่นยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 0 phr มีเนื้ออย่างเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 70 phr มีเนื้ออย่างเท่ากับ 17.65 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้สารตัวเร่งละลายในเนื้ออย่างลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแป้งมันสำปะหลัง

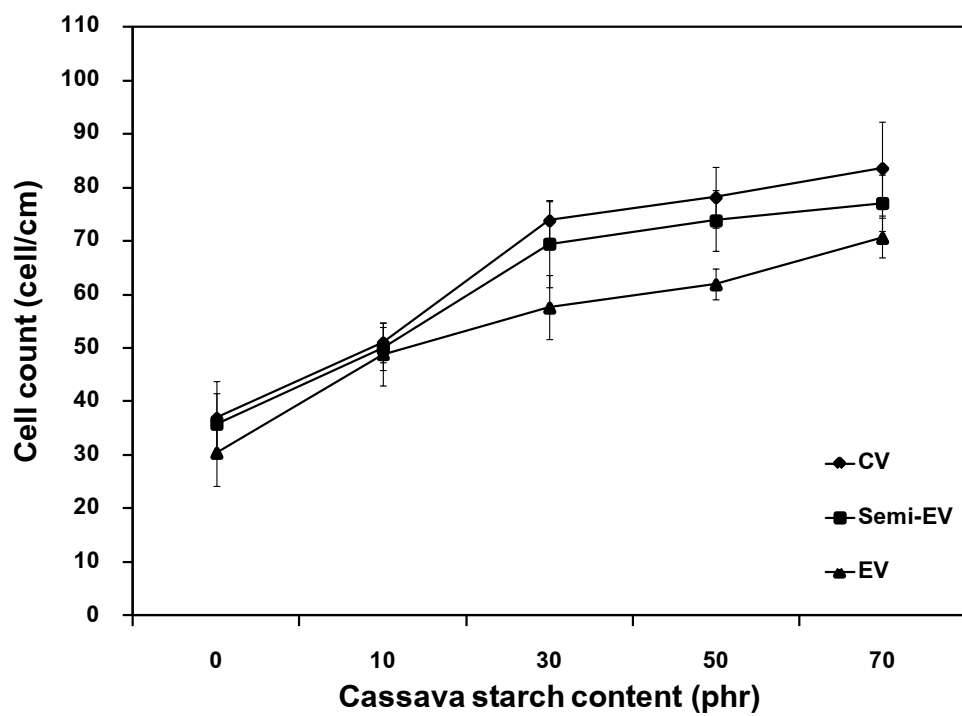
สังเกตเห็นการกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคสารตัวเร่งในยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมากกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ทั้งนี้เนื่องจากระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีการใช้ปริมาณสารตัวเร่งที่มากกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยและจำนวนเซลล์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณ
แป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

Formulas	Average cell size (μm)	Cell count (cell/cm)
CV-MB 0	303±61	37±7
CV-MB 10	247±49	51±4
CV-MB 30	204±39	74±4
CV-MB 50	156±22	78±6
CV-MB 70	125±19	84±9
SE-MB 0	325±53	36±6
SE-MB 10	304±48	50±4
SE-MB 30	251±41	70±8
SE-MB 50	232±27	74±6
SE-MB 70	208±38	77±5
EV-MB 0	552±73	30±6
EV-MB 10	364±72	49±6
EV-MB 30	326±50	58±6
EV-MB 50	234±46	62±3
EV-MB 70	183±37	71±4



รูปที่ 4.16 ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 จำนวนเซลล์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย (average cell size) และจำนวนเซลล์ (cell count) ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันคือ ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยลดลง และจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น เช่นขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย และจำนวนเซลล์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลังเท่ากับ 303, 325, 552 μm และ 37, 36, 30 cell/cm ตามลำดับ ส่วนยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 70 phr เท่ากับ 125, 208, 183 μm และ 84, 77, 71 cell/cm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13-4.15 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนืดของยางตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้ไม่ดี ส่งผลให้ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กลงและมีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยเล็กที่สุด และจำนวนเซลล์มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ และ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการวัลคาไนซ์ระบบแบบปกติ มีการใช้กำมะถันในปริมาณมาก สารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย ทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางที่มากกว่า และเมื่อปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางมาก ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้ยาก สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ariff และคณะ (2008) [30] ได้เตรียมยางพองน้ำจากยางธรรมชาติเกรดต่าง ๆ โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่ง/กำมะถันพบว่ายางพองน้ำที่ได้จากยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีไดซ์ 25 โมลเปอร์เซ็นต์ (ENR-25) มีปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางที่มากกว่ายางพองน้ำที่ได้จากยางธรรมชาติเกรด SMR-10 และ SMR-L ตามลำดับ ส่งผลให้ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยจึงมีขนาดเล็กที่สุด และมีจำนวนเซลล์มากที่สุด

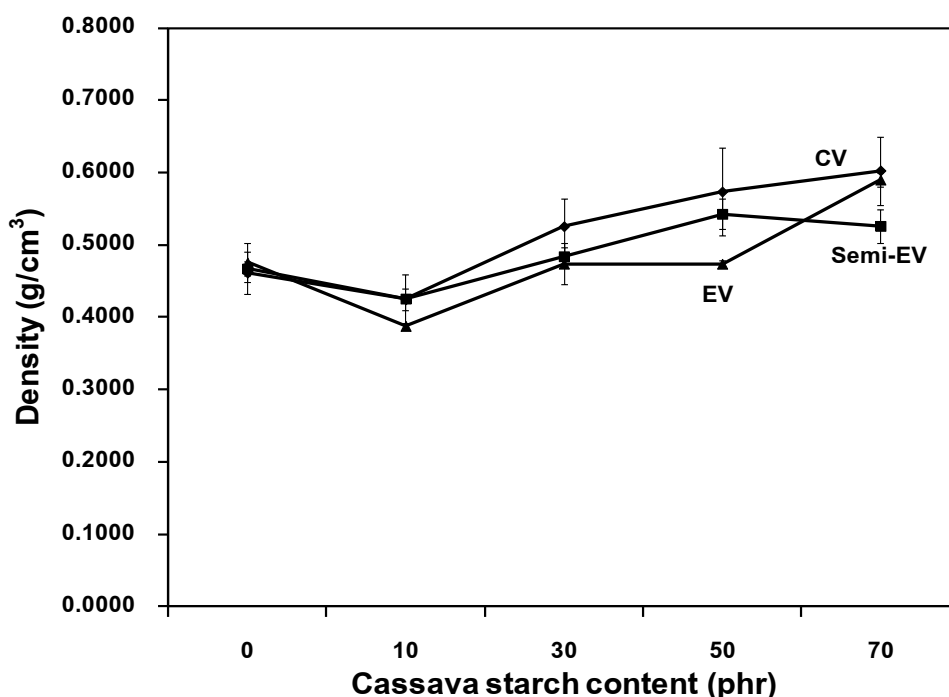
4.2.4 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

โดยทำการทดสอบความหนาแน่น มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความสามารถในการคืนรูปหลังการกดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.18-4.25

ตารางที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

Formulas	Density (g/cm ³)	100 % Modulus (MPa)	300 % Modulus (MPa)	500 % Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)	Compression set (%)
CV-MB 0	0.4615±0.03	0.23±0.05	0.64±0.09	1.62±0.15	2.18±0.27	525±28.87	13.40±1.35	38.57±3.18
CV-MB 10	0.4247±0.02	0.26±0.02	0.70±0.06	1.59±0.13	1.78±0.04	505±11.18	11.22±1.24	50.66±4.15
CV-MB 30	0.5257±0.04	0.41±0.03	1.09±0.04	2.80±0.09	2.90±0.23	505±11.18	13.87±0.04	85.89±3.82
CV-MB 50	0.5737±0.06	0.46±0.04	1.45±0.07	-	2.58±0.10	413±25.00	15.10±0.67	91.85±2.38
CV-MB 70	0.6029±0.05	0.58±0.03	1.81±0.07	-	2.35±0.10	350±0.00	14.26±1.12	93.66±2.38
SE-MB 0	0.4673±0.01	0.21±0.01	0.54±0.06	1.31±0.16	1.80±0.06	570±27.39	10.89±1.06	36.71±1.96
SE-MB 10	0.4257±0.03	0.17±0.02	0.44±0.04	1.09±0.08	1.49±0.07	570±11.18	9.38±0.72	69.69±0.55
SE-MB 30	0.4842±0.01	0.28±0.01	0.78±0.06	1.90±0.19	2.28±0.10	505±11.18	10.52±0.60	84.63±1.22
SE-MB 50	0.5429±0.02	0.42±0.03	1.23±0.08	-	2.23±0.09	415±13.69	12.34±0.36	88.73±0.81
SE-MB 70	0.5262±0.02	0.56±0.02	1.68±0.06	-	1.91±0.21	375±0.00	11.23±0.50	93.53±0.65
EV-MB 0	0.4756±0.03	0.18±0.03	0.43±0.03	0.99±0.15	1.92±0.35	638±25.00	11.67±0.89	34.77±0.96
EV-MB 10	0.3878±0.00	0.17±0.02	0.44±0.04	1.05±0.12	1.39±0.13	555±11.18	9.70±1.11	58.40±5.15
EV-MB 30	0.4739±0.03	0.31±0.02	0.87±0.04	2.26±0.22	2.16±0.30	500±0.00	10.40±0.41	78.70±3.63
EV-MB 50	0.4738±0.00	0.41±0.02	1.24±0.08	-	2.02±0.18	400±0.00	9.48±0.82	82.46±1.99
EV-MB 70	0.5902±0.01	0.52±0.04	1.60±0.09	-	1.85±0.10	350±0.00	10.33±0.40	83.49±4.12

หมายเหตุ เครื่องหมาย (-) หมายถึง ไม่สามารถหาค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ ได้

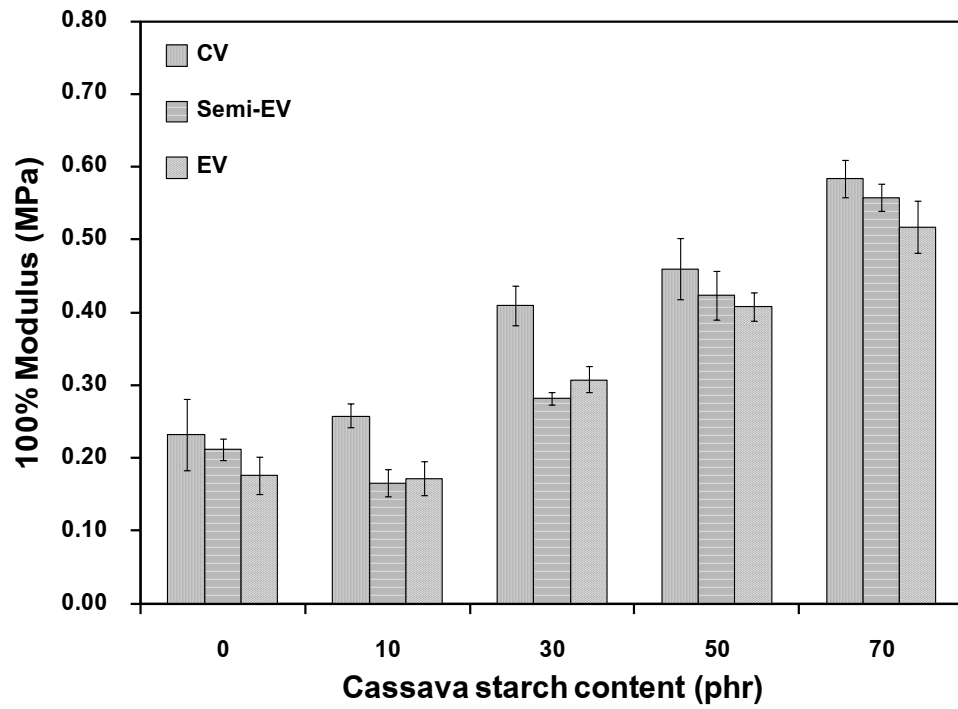


รูปที่ 4.18 ความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนด์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนด์แบบต่าง ๆ

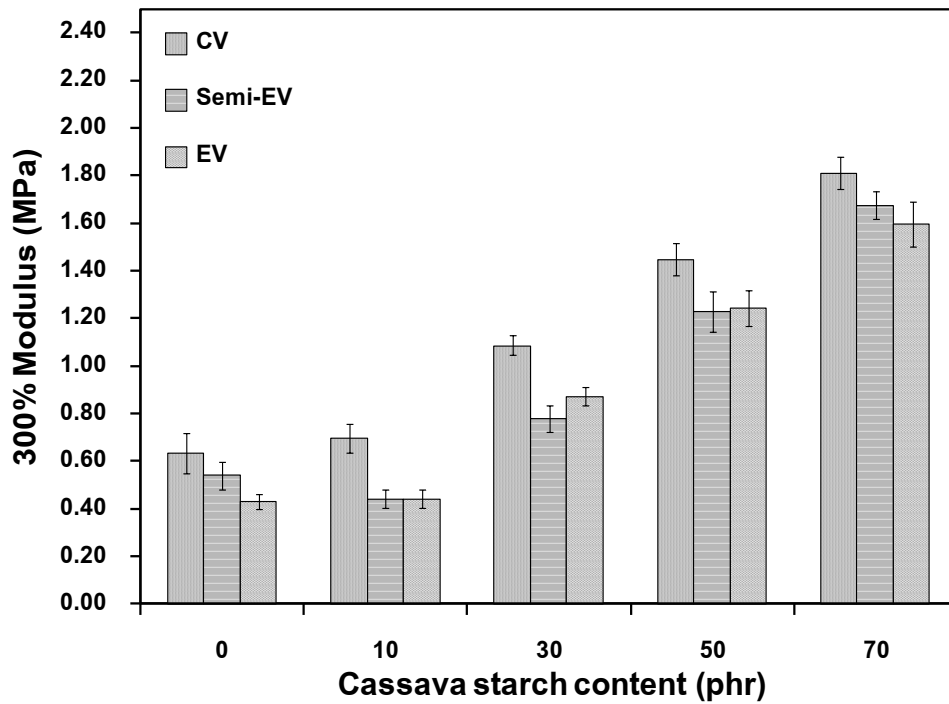
จากผลการทดลองที่แสดงตามตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.18 พบว่าความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนด์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนด์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนด์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งมันสำปะหลังทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวนด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้ยาก และขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยเล็กลง ดังแสดงในลักษณะทางสัญญาณวิทยานี้ในรูปที่ 4.15-4.17 ส่งผลให้ความหนาแน่นของยางพองน้ำเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนด์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดี่ยว พบว่าความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนด์แบบปกติมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนด์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนด์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากระบบการวัลคาไนด์แบบปกติมีการใช้กำมะถันในปริมาณมากสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางที่มากกว่าสามารถยืนยันได้จากค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูง และแรงบิดต่ำสุด (M_H-M_L) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และเมื่อปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางมากทำให้การขยายตัวของ

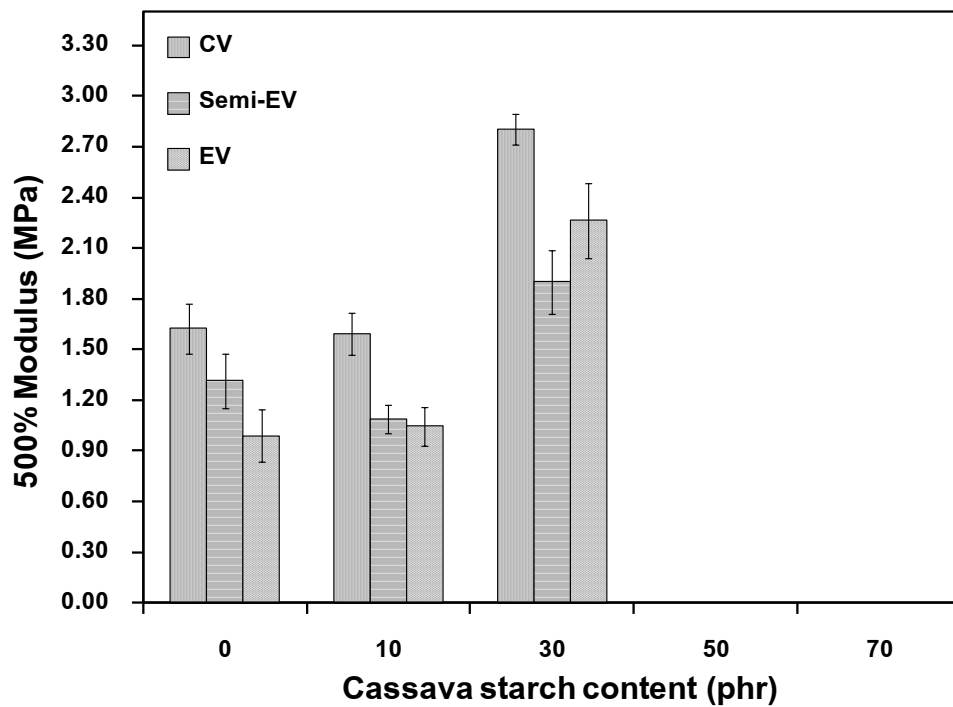
ฟองก๊าซเกิดได้ยาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจึงมีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.19 มอดูลัสที่ระยะยัด 100 เปอร์เซนต์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



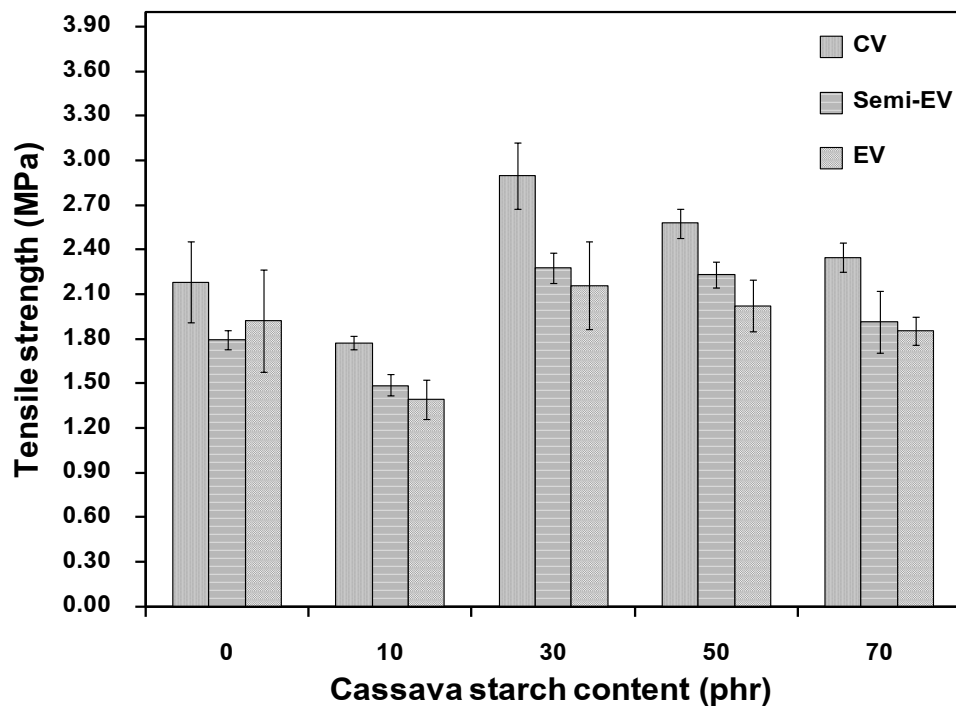
รูปที่ 4.20 มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 มอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.19-4.21 พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอนุภาคที่มีลักษณะแข็งของแป้งมันสำปะหลังที่ใส่เข้าไปในยางธรรมชาติ เมื่อใส่เข้าไปในยางจะช่วยเพิ่มความแข็งตึง (stiffness) ของยางเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยางพองน้ำวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

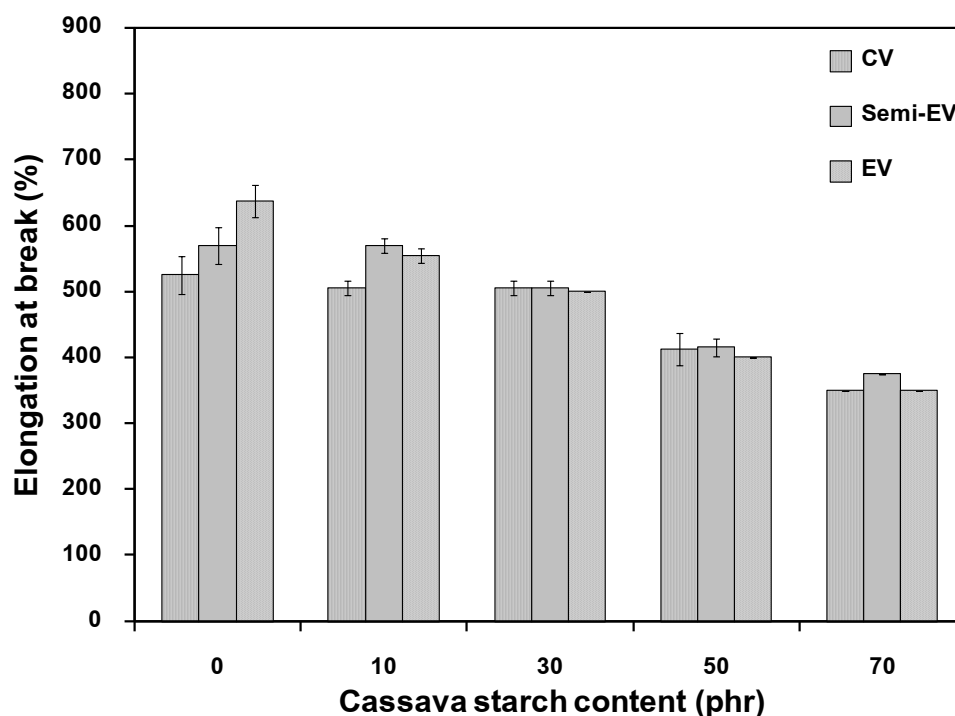
เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง พบว่าค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบปกติ มีการใช้ปริมาณกำมะถันมาก สารตัวเร่งน้อย ทำให้ปริมาณการเกิดการเชื่อมโยงพันธะในยางเกิดขึ้นได้มากกว่า ส่งผลให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงกว่า ค่ามอดูลัสของยางพองน้ำวัลคาไนซ์จึงมีค่าสูงกว่า



รูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.22 พบว่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ระบบแบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพที่ระดับปริมาณแอมงมันสำปะหลังที่ 30 phr มีค่าสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ปริมาณแอมงมันสำปะหลัง 30 phr มีการกระจายตัวของเม็ดแอมงมันสำปะหลังในยางสม่ำเสมอ ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม ยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ระดับปริมาณแอมงมันสำปะหลังที่ 50 และ 70 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะความเป็นขั้วที่แตกต่างกันระหว่างแอมงมันและยางธรรมชาติ ทำให้รอยต่อระหว่างผิวของแอมงมันกับโมเลกุลยางธรรมชาติไม่แข็งแรง และเมื่อปริมาณแอมงมันเพิ่มขึ้นนั้น หมายความว่า มีจุดอ่อนแอในเนื้อของยางพองน้ำวัลคาไนซ์มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงด้วยเช่นกัน

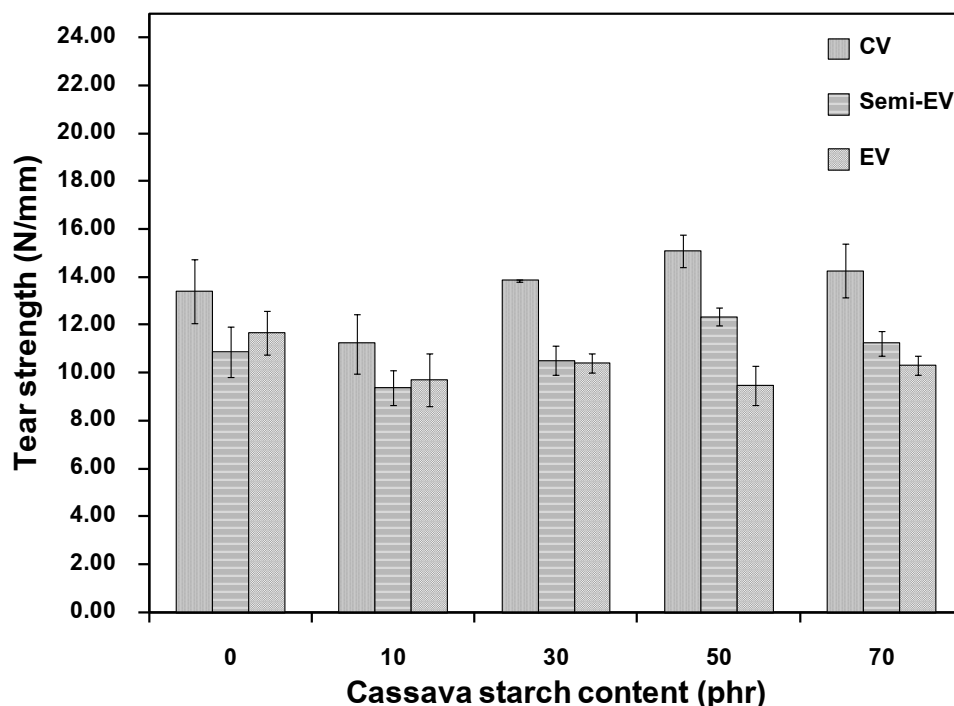
เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแอมงมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีการใช้กำมะถันในปริมาณมากกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลไฟดิก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการเกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลไฟดิกจะให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า เมื่อเทียบกับระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ หรืออีกเหตุผลหนึ่งคือ มีการใช้กำมะถันในปริมาณมากกว่า ส่งผลให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงที่มากกว่า ทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซเกิดได้ไม่ดี ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยเล็กกว่า และมีความหนาแน่นมากกว่า เช่นยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ปกติที่ระดับปริมาณแอมงมันสำปะหลังที่ 30 phr มีค่าขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย และความหนาแน่นเท่ากับ $204 \mu\text{m}$ และ 0.5257 g/cm^3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพเท่ากับ $251 \mu\text{m}$ และ 0.4842 g/cm^3 ตามลำดับ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพเท่ากับ $326 \mu\text{m}$ และ 0.4739 g/cm^3 ตามลำดับ ส่งผลให้มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่า



รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาด ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.23 พบว่าเปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาด ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ มีแนวโน้มลดลงตาม ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดการเพิ่มขึ้นของอนุภาคที่มีลักษณะแข็งของแป้ง มันสำปะหลังที่ใส่เข้าไปในยางธรรมชาติ เมื่อใส่เข้าไปในยางจะช่วยเพิ่มความแข็งตึงของยางเพิ่มขึ้น และเมื่อความแข็งตึงเพิ่มขึ้นทำให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์แสดงสมบัติความยืดหยุ่นลดลง ส่งผลให้ เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาด ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0 phr พบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบ ประสิทธิภาพจะมีค่าเปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบ กึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมโยง ที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์ แบบปกติ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงดังแสดงในตารางที่ 4.4 ทำให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์มีความยืดหยุ่นมากกว่า ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดสูงกว่า

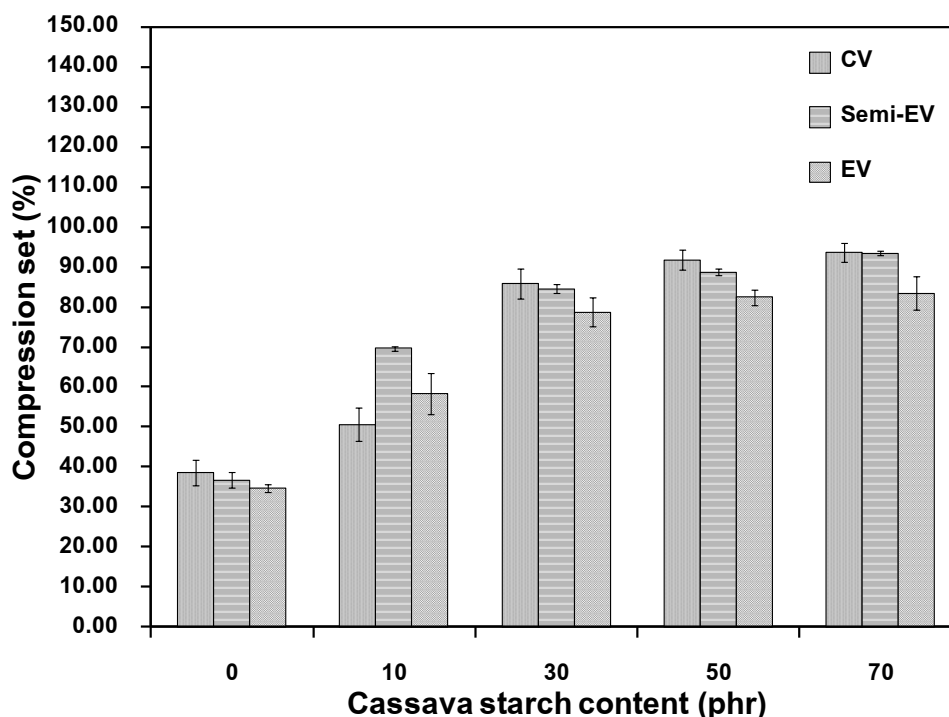


รูปที่ 4.24 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.24 พบว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งกล่าวได้ว่าปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีการใช้กำมะถันในปริมาณมากกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการเกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิกจะให้สมบัติด้านความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่า เมื่อเทียบกับระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ หรืออีกเหตุผลหนึ่งคือ มีการใช้กำมะถันในปริมาณมากกว่า ส่งผลให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงที่มากกว่าทำให้การขยายตัวของพองก๊าซเกิดได้ไม่ดี ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยเล็กกว่า และมีความหนาแน่นมากกว่า เช่นยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 30 phr มีค่าขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย

และความหนาแน่นเท่ากับ $204 \mu\text{m}$ และ 0.5257 g/cm^3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพเท่ากับ $251 \mu\text{m}$ และ 0.4842 g/cm^3 ตามลำดับ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพเท่ากับ $326 \mu\text{m}$ และ 0.4739 g/cm^3 ตามลำดับ ส่งผลให้มีสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงกว่า



รูปที่ 4.25 การผิดรูปหลังการกดของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.25 พบว่าการผิดรูปหลังการกดของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น แสดงว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังมากกว่าจะมีความสามารถในการคืนรูปได้น้อยกว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่มีส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังผสมอยู่น้อยกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสัดส่วนของยางธรรมชาติที่มีความสามารถในการคืนรูปได้ดีหลังถูกกดอัดลดลง และระหว่างการทดสอบการกดอัดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้ผนังเซลล์เกิดการแตก สอดคล้องกับผลการทดลองของ Wimolmala และคณะ (2009) [28] ได้ศึกษาสมบัติการผิดรูปหลังการกดของยางฟองน้ำเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตะไดอีนผสมเขม่าดำ ซิลิกา และซิลิกาจากถ้ำลอย หรือยูปตัวมากขึ้นซึ่งเซลล์ที่เกิดการแตก หรือยูปตัว

ที่มากขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียก๊าซภายในเซลล์โดยการแพร่ผ่านผนังเซลล์ที่ถูกทำลายเกิดขึ้นได้มากขึ้น การคืนสู่รูปร่างเดิมของยางพองน้ำวัลคาไนซ์จึงน้อยลง

เมื่อเปรียบเทียบการผิดรูปหลังการกดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีการผิดรูปหลังการกดต่ำที่สุด นั่นหมายความว่ามีความสามารถในการคืนรูปมากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบประสิทธิภาพมีการใช้ปริมาณกำมะถันน้อย สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะในยางเป็นแบบโมโนซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีค่าพลังงานพันธะที่สูงกว่า การเชื่อมโยงพันธะแบบไดซัลฟิดิก และการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิก ตามลำดับ (พลังงานพันธะของ C-S-C และ C-S_x-C เท่ากับ 276 KJ/mol และ 205 KJ/mol ตามลำดับ) ทำให้ยางมีสมบัติต้านทานต่อความร้อนภายใต้สภาวะการทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้ดีกว่าส่งผลให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีความสามารถในการคืนรูปหลังการกดได้ดีที่สุด

4.2.5 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์หลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน

โดยทำการทดสอบมอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความสามารถในการคืนรูปหลังการกดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์หลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนดังแสดงในตารางที่ 4.7-4.8 และรูปที่ 4.26-4.32

ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

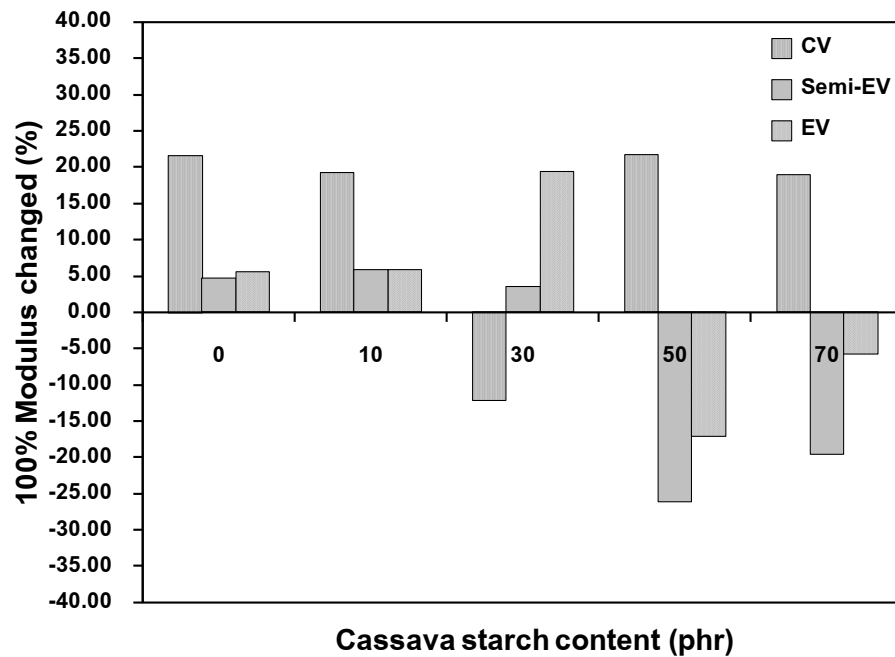
Formulas	100 % Modulus (MPa)			300 % Modulus (MPa)			500 % Modulus (MPa)		
	Before aging	After aging	Changed (%)	Before aging	After aging	Changed (%)	Before aging	After aging	Changed (%)
CV-MB 0	0.23±0.05	0.28±0.04	+21.74	0.64±0.09	0.83±0.12	+30.71	1.62±0.15	1.72±0.33	+5.65
CV-MB 10	0.26±0.02	0.31±0.01	+19.23	0.70±0.06	0.88±0.03	+26.44	1.59±0.13	2.25±0.07	+41.41
CV-MB 30	0.41±0.03	0.36±0.02	-12.20	1.09±0.04	1.02±0.08	-6.26	2.80±0.09	-	-
CV-MB 50	0.46±0.04	0.56±0.01	+21.74	1.45±0.07	1.71±0.04	+18.41	-	-	-
CV-MB 70	0.58±0.03	0.69±0.01	+18.97	1.81±0.07	2.12±0.16	+16.78	-	-	-
SE-MB 0	0.21±0.01	0.22±0.03	+4.76	0.54±0.06	0.56±0.07	+3.70	1.31±0.16	1.42±0.04	+8.07
SE-MB 10	0.17±0.02	0.18±0.01	+5.88	0.44±0.04	0.48±0.02	+8.14	1.09±0.08	1.20±0.08	+10.68
SE-MB 30	0.28±0.01	0.29±0.02	+3.57	0.78±0.06	0.80±0.03	+2.31	1.90±0.19	1.92±0.02	+1.05
SE-MB 50	0.42±0.03	0.31±0.01	-26.19	1.23±0.08	0.93±0.06	-24.23	-	-	-
SE-MB 70	0.56±0.02	0.45±0.02	-19.64	1.68±0.06	1.43±0.08	-14.80	-	-	-
EV-MB 0	0.18±0.03	0.19±0.02	+5.56	0.43±0.03	0.50±0.07	+16.74	0.99±0.15	1.27±0.10	+28.28
EV-MB 10	0.17±0.02	0.18±0.01	+5.88	0.44±0.04	0.47±0.03	+7.24	1.05±0.12	1.18±0.06	+12.57
EV-MB 30	0.31±0.02	0.37±0.02	+19.35	0.87±0.04	1.07±0.09	+22.48	2.26±0.22	2.60±0.34	+14.77
EV-MB 50	0.41±0.02	0.34±0.01	-17.07	1.24±0.08	1.05±0.03	-15.14	-	-	-
EV-MB 70	0.52±0.04	0.49±0.02	-5.77	1.60±0.09	1.52±0.07	-4.64	-	-	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย (-) หมายถึง ไม่สามารถหาค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์ได้

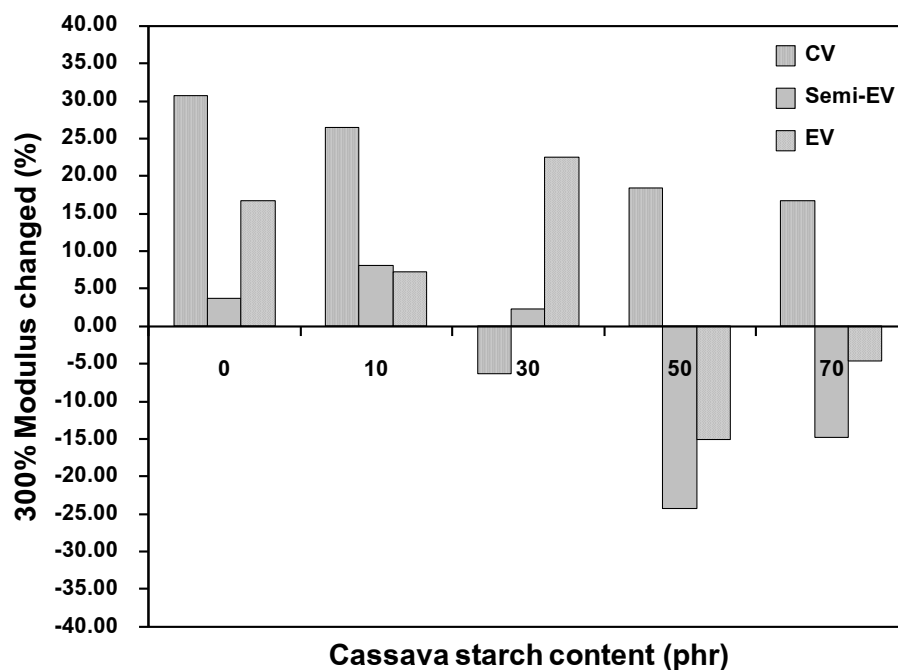
ตารางที่ 4.7 (ต่อ) สมบัติเชิงกลหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนของยางพองหน้าวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

Formulas	tensile strength (MPa)			elongation at break (%)			tear strength (N/mm)		
	Before aging	After aging	Changed (%)	Before aging	After aging	Changed (%)	Before aging	After aging	Changed (%)
CV-MB 0	2.18±0.27	1.26±0.15	-42.31	525±28.87	420±75.83	-20.00	13.40±1.35	14.96±0.47	+11.64
CV-MB 10	1.78±0.04	2.37±0.17	+33.75	505±11.18	515±13.69	+1.98	11.22±1.24	11.39±0.78	-4.37
CV-MB 30	2.90±0.23	2.18±0.19	-24.64	505±11.18	475±17.68	-5.94	15.10±0.67	17.72±0.07	+17.35
CV-MB 50	2.58±0.10	2.84±0.24	+10.16	413±25.00	415±13.69	+0.61	13.87±0.04	15.15±0.97	+0.35
CV-MB 70	2.35±0.10	2.26±0.18	-3.91	350±0.00	320±27.39	-8.57	13.81±0.82	15.34±0.74	+7.54
SE-MB 0	1.80±0.06	1.99±0.07	+10.86	570±27.39	575±25.00	+0.88	10.89±1.06	10.97±1.89	+0.74
SE-MB 10	1.49±0.07	1.47±0.06	-1.55	570±11.18	555±11.18	-2.63	9.38±0.72	10.12±0.65	+7.90
SE-MB 30	2.28±0.10	1.92±0.02	+0.14	505±11.18	490±13.69	-2.97	12.34±0.36	12.98±0.46	+5.19
SE-MB 50	2.23±0.09	1.66±0.06	-25.85	415±13.69	415±13.69	+0.00	10.09±0.18	13.47±0.33	+9.14
SE-MB 70	1.91±0.21	1.58±0.15	-29.23	375±0.00	315±22.36	-16.00	10.87±0.14	10.89±0.68	-4.93
EV-MB 0	1.92±0.35	1.59±0.29	-17.53	638±25.00	535±22.36	-16.08	11.35±0.76	11.76±1.11	-2.89
EV-MB 10	1.39±0.13	1.33±0.10	-4.74	555±11.18	540±22.36	-2.70	9.70±1.11	9.96±0.38	+2.70
EV-MB 30	2.16±0.30	2.23±0.21	+3.24	490±22.36	480±27.39	-2.04	10.40±0.41	13.10±1.68	+25.96
EV-MB 50	2.02±0.18	1.57±0.08	-22.31	400±0.00	380±44.72	-5.00	9.48±0.82	9.67±1.23	+1.94
EV-MB 70	1.85±0.10	1.72±0.18	-7.26	350±0.00	320±27.39	-8.57	10.09±0.32	11.77±0.64	+13.92

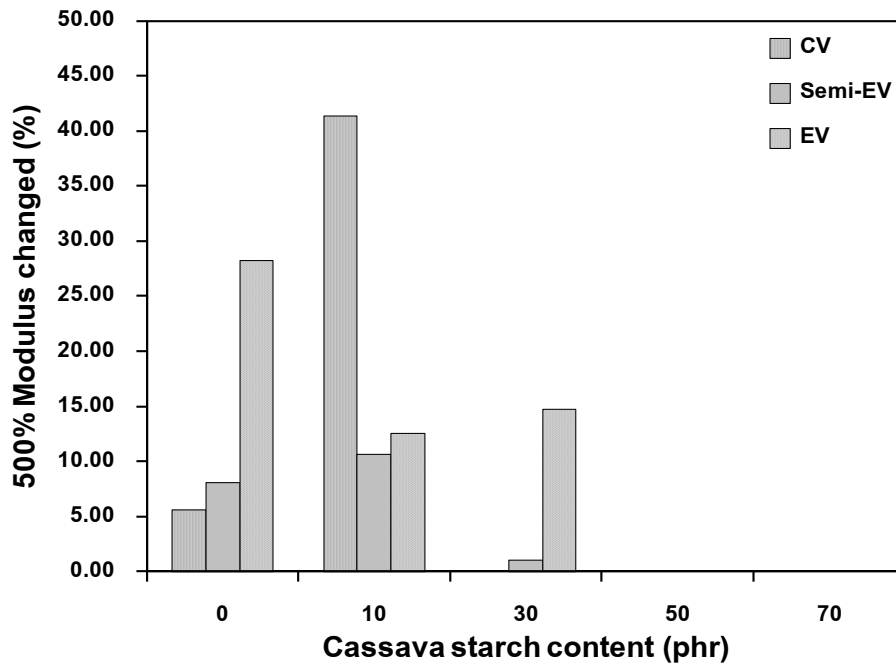
หมายเหตุ เครื่องหมาย (+) และ (-) หมายถึงค่าที่เพิ่มขึ้น และค่าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนบ่มแรงด้วยอากาศร้อน ตามลำดับ



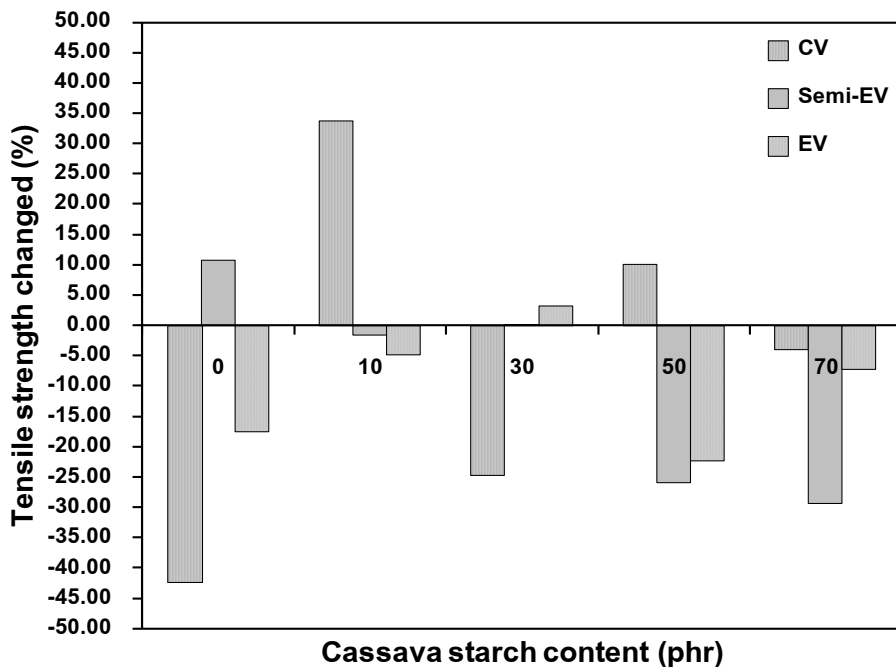
รูปที่ 4.26 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสที่ระยะยืด 100 เปอร์เซนต์หลังการปมเร่งด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



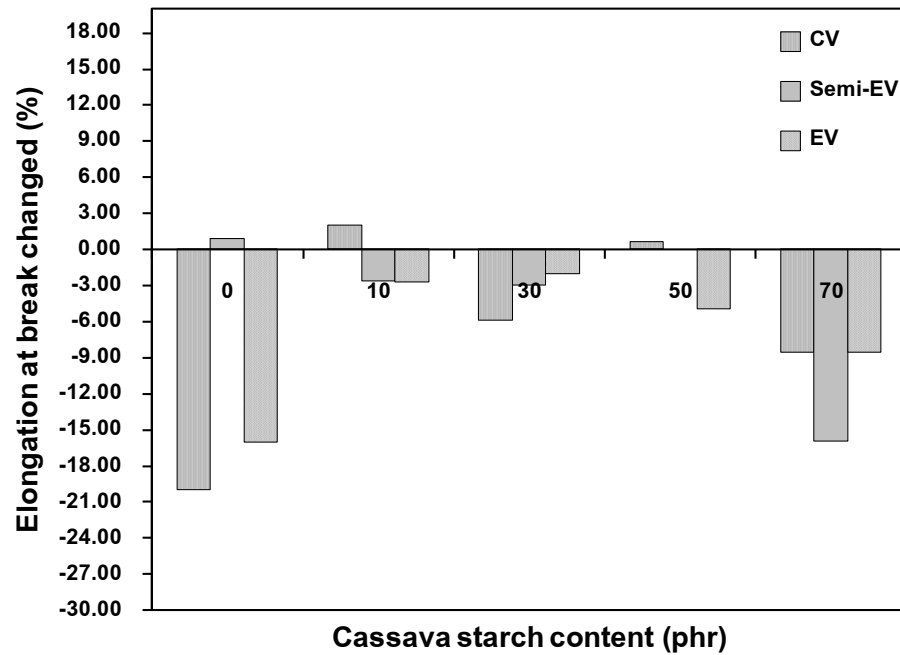
รูปที่ 4.27 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซนต์หลังการปมเร่งด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



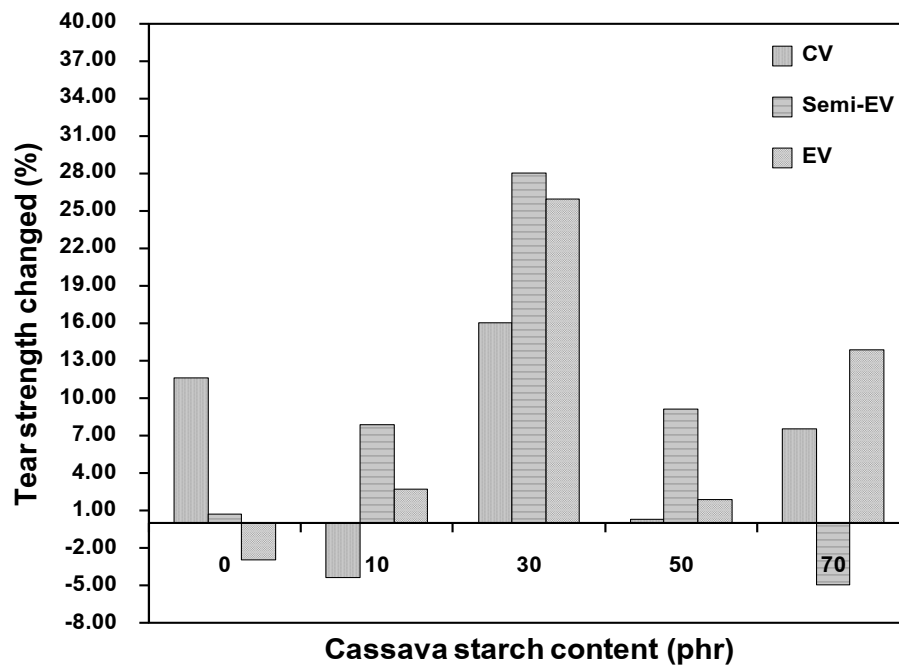
รูปที่ 4.28 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซนต์หลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.29 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.31 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่อการฉีกขาด หลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.26-4.31 พบว่ามอดูลัสที่ระยะยึด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ หลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับสมบัติก่อนการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องจากความร้อนทำให้ผิวยางเกิดการออกซิเดชัน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระซึ่งสามารถเกิดการเชื่อมโยงในยางได้อีก ส่งผลให้มอดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลงอาจเนื่องมาจากลักษณะผิวยางแข็งขึ้น ทำให้เป็นจุดอ่อนจึงขาดได้ง่ายก่อนจะขยายไปยังเนื้อของชั้นทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง ส่วนค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากผิวยางที่แข็งขึ้นของชั้นทดสอบหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนเป็นตัวขวางแรงของการขยายตัวของรอยแตกทำให้แรงที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Wimolmala และคณะ (2009) [28] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางฟองน้ำเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวทีไดอีนผสมเขม่าดำ ซิลิกา และซิลิกาจากถ้ำลอย

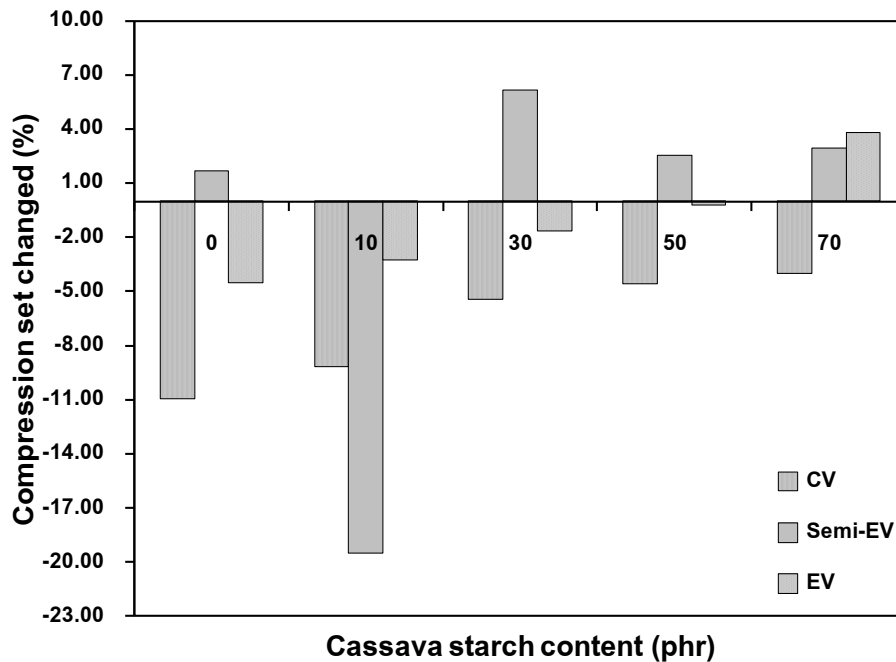
เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงมอดูลัสที่ระยะยึด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเป็นบวกสูงกว่า เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางฟองน้ำที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบแบบปกติมีปริมาณการใช้กำมะถันมากกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ซึ่งอาจมีกำมะถันที่เหลืออยู่และยังไม่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะในยางในปริมาณที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ เมื่อได้รับความร้อนจากการบ่มเร่งทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงพันธะในยางเพิ่มขึ้น ปริมาณการเชื่อมโยงพันธะในยางเพิ่มขึ้นด้วย ยางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีความแข็งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ยางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีค่ามอดูลัสสูงเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด หลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน ซึ่งในทางทฤษฎียางฟองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพจะมีสมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางธรรมชาติที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบประสิทธิภาพมีการใช้ปริมาณกำมะถันน้อย สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะในยางเป็นแบบโมโนซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีค่าพลังงานพันธะที่สูงกว่าการเชื่อมโยงพันธะแบบไดซัลฟิดิก และการเชื่อมโยงพันธะแบบ

พอลิซิลฟิดิก ตามลำดับ ทำให้ยางมีสมบัติต้านทานต่อความร้อนได้ดี แต่ผลการทดลองครั้งนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์หลังบ่มแรงด้วยอากาศร้อนระบบใดที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการผิดรูปหลังการกด หลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

Formulas	compression set (%)		
	Before aging	After aging	Changed (%)
CV-MB 0	38.57±3.18	34.35±0.91	-10.94
CV-MB 10	50.66±4.15	46.01±1.85	-9.18
CV-MB 30	85.89±3.82	81.22±0.74	-5.44
CV-MB 50	91.85±2.38	87.65±0.53	-4.57
CV-MB 70	93.66±2.38	89.91±1.31	-4.00
SE-MB 0	36.71±1.96	37.33±0.25	1.69
SE-MB 10	69.69±0.55	56.06±3.64	-19.56
SE-MB 30	84.63±1.22	89.88±1.13	6.20
SE-MB 50	88.73±0.81	91.01±1.47	2.57
SE-MB 70	93.53±0.65	96.27±0.14	2.93
EV-MB 0	34.77±0.96	33.19±1.40	-4.54
EV-MB 10	58.40±5.15	56.49±1.87	-3.27
EV-MB 30	78.70±3.63	77.39±5.55	-1.66
EV-MB 50	82.46±1.99	82.30±0.97	-0.19
EV-MB 70	83.49±4.12	86.67±0.91	3.81



รูปที่ 4.32 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงการผิดรูปหลังการกด หลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.32 แสดงผลเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงการผิดรูปหลังการกด หลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ พบว่ามีการผิดรูปหลังการกดลดลง นั่นหมายความว่ามีความสามารถในการคืนรูปหลังการกดได้มากกว่าเมื่อเทียบกับสมบัติก่อนการบ่มแรงด้วยอากาศร้อน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนเปรียบเสมือนการ post cure ทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางเพิ่มขึ้น ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงขึ้น และระหว่างการกดอัดโครงสร้างเซลล์เกิดการแตก หรือผิดรูปน้อยกว่า ทำให้การสูญเสียก๊าซภายในเซลล์ที่ถูกทำลายเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ความสามารถในการคืนรูปหลังการกดของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการคืนรูปหลังการกดหลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีความสามารถในการคืนรูปหลังการกดหลังการบ่มแรงด้วยอากาศร้อนน้อยกว่า เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ และระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบประสิทธิภาพมีการใช้ปริมาณกำมะถันน้อย สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากกว่า ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะในยางเป็นแบบโมโนซัลฟิดิกเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีค่าพลังงานพันธะที่สูงกว่า การเชื่อมโยงพันธะแบบไดซัลฟิดิก และการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิก

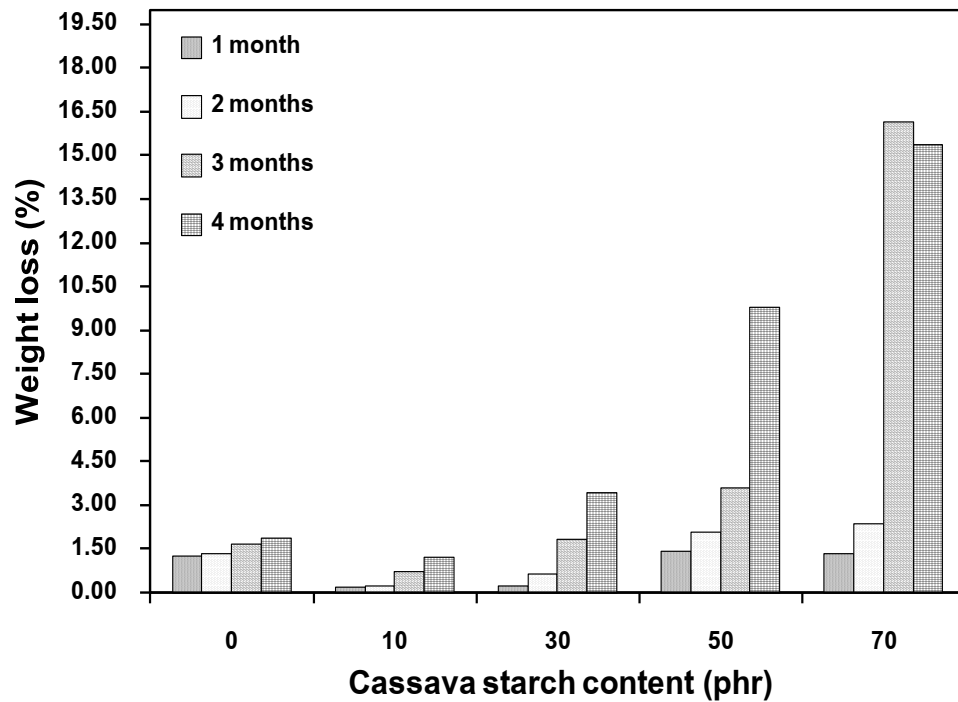
ตามลำดับ ทำให้ยางมีสมบัติต้านทานต่อความร้อนภายใต้สภาวะการทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้ดีกว่าส่งผลให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีความสามารถในการคืนรูปหลังการกดได้ดีที่สุด

4.2.6 สมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดินของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

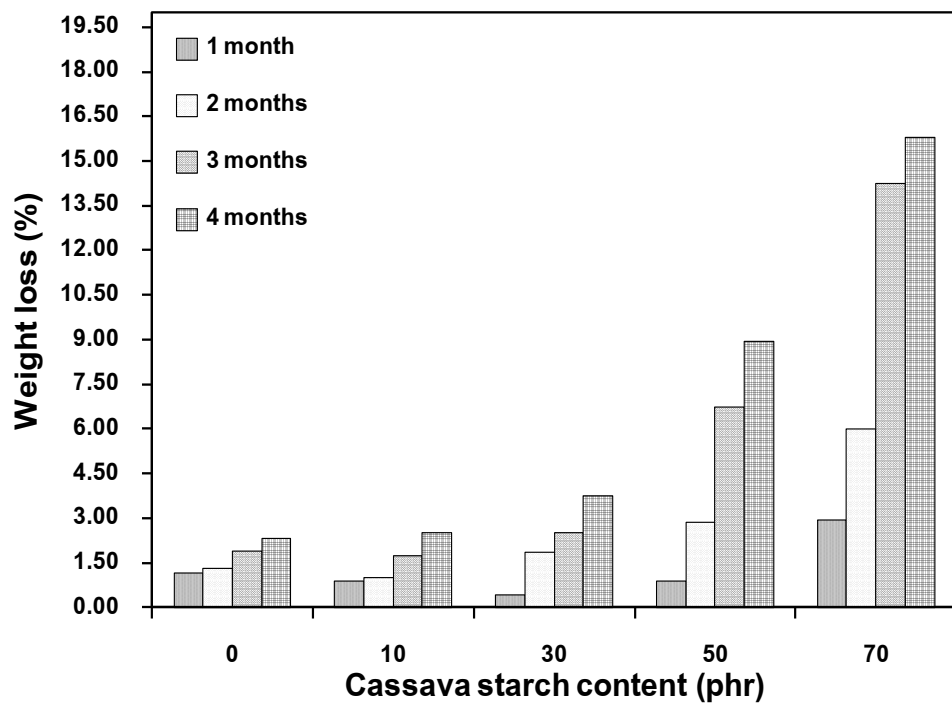
นำชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มาฝังในดิน เพื่อให้แบคทีเรียและเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติย่อยสลายชิ้นทดสอบเป็นเวลา 1-4 เดือน (ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2556 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2557) จากนั้นนำตัวอย่างยางพองน้ำวัลคาไนซ์ไปหาน้ำหนักที่หายไป และนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด ดังแสดงในตารางที่ 4.9-4.10 และรูปที่ 4.33-4.44

ตารางที่ 4.9 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

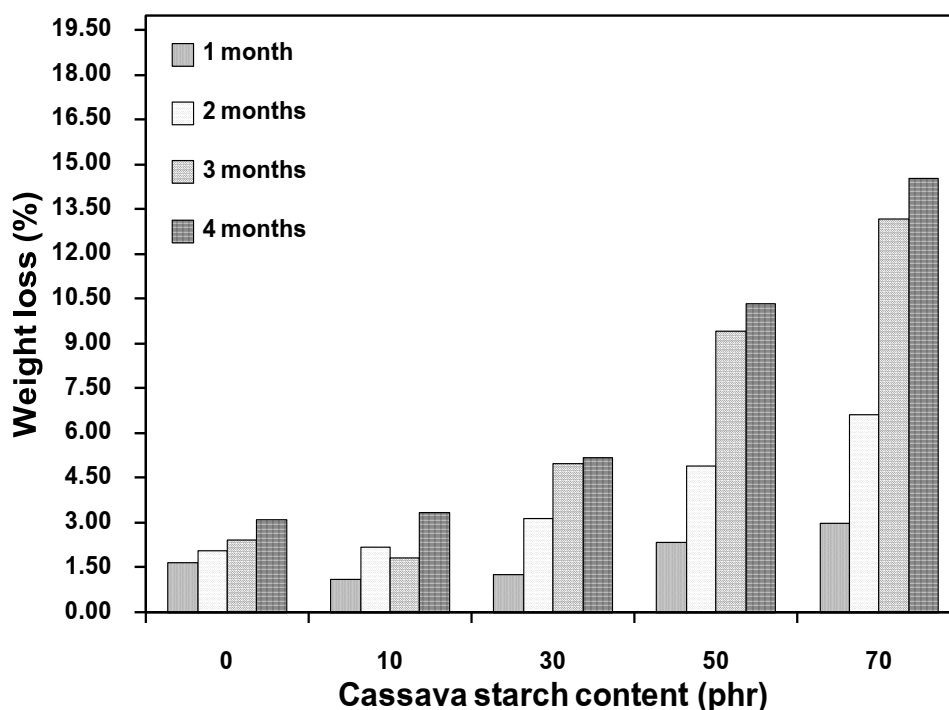
Formulas	Weigth loss (%)			
	1 month	2 months	3 months	4 months
CV-MB 0	1.25	1.35	1.66	1.87
CV-MB 10	0.18	0.23	0.71	1.21
CV-MB 30	0.24	0.63	1.85	3.45
CV-MB 50	1.44	2.10	3.60	9.79
CV-MB 70	1.33	2.36	16.16	15.37
SE-MB 0	1.14	1.32	1.88	2.32
SE-MB 10	0.88	1.01	1.75	2.52
SE-MB 30	0.42	1.84	2.52	3.76
SE-MB 50	0.89	2.86	6.75	8.94
SE-MB 70	2.95	6.01	14.24	15.81
EV-MB 0	1.69	2.08	2.42	3.11
EV-MB 10	1.12	2.20	1.83	3.36
EV-MB 30	1.29	3.17	4.99	5.20
EV-MB 50	2.34	4.90	9.44	10.35
EV-MB 70	2.99	6.62	13.17	14.55



รูปที่ 4.33 น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



รูปที่ 4.34 น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.35 น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ

จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.33-4.35 แสดงผลน้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของยางพองน้ำวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระยะเวลาการฝังดินที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าแป้งมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของสารประกอบทางชีวภาพ อาจจะเป็นแหล่งอาหารและพลังงานของเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดที่อาศัยอยู่ในดิน หลังจากที่เชื้อจุลินทรีย์ย่อยสารประกอบดังกล่าวที่เป็นองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในยางพองน้ำวัลคาไนซ์แล้ว ผลผลิตบางส่วนอาจจะอยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Brass และคณะ (2010)[37] ได้ศึกษาสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดินของยางธรรมชาติผสมเซลลูลูโลสสวิสเกอร์ ที่สามารถเกิดการแพร่ผ่านเนื้อของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ออกมาด้านนอกได้ ทำให้น้ำหนักของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าระบบการวัลคาไนซ์ทั้ง 3 ระบบ ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

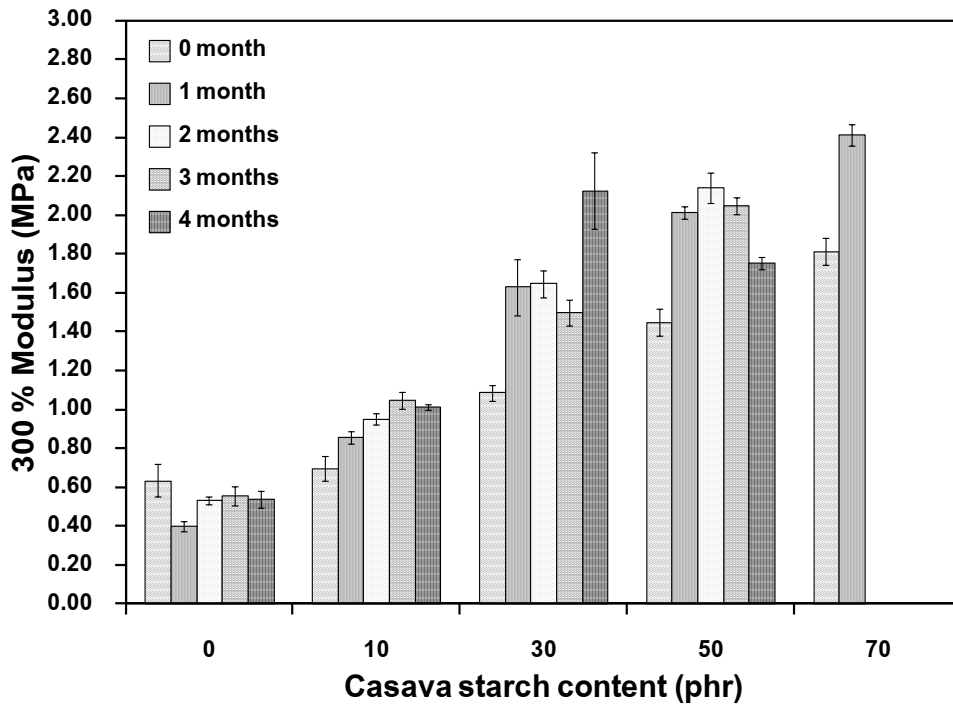
ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

Formulas	300 % Modulus (MPa)					Tensile strength (MPa)				
	0 month	1 month	2 months	3 months	4 months	0 month	1 month	2 months	3 months	4 months
CV-MB 0	0.64±0.09	0.40±0.03	0.53±0.02	0.55±0.05	0.54±0.04	2.18±0.27	1.73±0.24	1.84±0.23	1.84±0.29	1.73±0.22
CV-MB 10	0.70±0.06	0.86±0.03	0.95±0.03	1.05±0.04	1.01±0.02	1.78±0.04	1.63±0.09	1.85±0.21	1.88±0.20	1.46±0.23
CV-MB 30	1.09±0.04	1.63±0.14	1.65±0.07	1.50±0.07	2.12±0.20	2.90±0.23	2.22±0.24	1.92±0.18	2.14±0.17	2.08±0.42
CV-MB 50	1.45±0.07	2.01±0.03	2.14±0.08	2.05±0.04	1.75±0.03	2.58±0.10	2.17±0.19	2.21±0.14	2.29±0.17	1.71±0.09
CV-MB 70	1.81±0.07	2.41±0.06	-	-	-	2.35±0.10	2.38±0.08	2.51±0.08	2.29±0.32	1.62±0.05
SE-MB 0	0.54±0.06	0.40±0.04	0.49±0.08	0.41±0.05	0.43±0.04	1.80±0.06	1.44±0.15	1.77±0.35	1.76±0.39	1.94±0.12
SE-MB 10	0.44±0.04	0.72±0.04	0.96±0.07	0.83±0.02	0.79±0.01	1.49±0.07	1.96±0.21	1.94±0.04	1.84±0.16	1.53±0.20
SE-MB 30	0.78±0.06	1.38±0.09	1.48±0.08	1.00±0.04	-	2.28±0.10	1.54±0.17	1.59±0.26	1.48±0.14	1.39±0.22
SE-MB 50	1.23±0.08	1.65±0.02	2.15±0.14	1.53±0.24	-	2.23±0.09	1.99±0.29	1.59±0.12	1.57±0.18	1.40±0.25
SE-MB 70	1.68±0.06	2.14±0.08	2.26±0.13	1.58±0.06	-	1.91±0.21	2.25±0.33	2.01±0.20	1.75±0.37	1.47±0.21
EV-MB 0	0.43±0.03	0.41±0.05	0.36±0.03	0.34±0.05	0.35±0.04	1.92±0.35	1.59±0.36	1.27±0.17	1.56±0.31	1.69±0.22
EV-MB 10	0.44±0.04	0.61±0.04	0.64±0.01	0.69±0.06	0.62±0.03	1.39±0.13	1.77±0.17	1.56±0.10	1.64±0.16	1.27±0.07
EV-MB 30	0.87±0.04	1.37±0.08	1.35±0.02	1.60±0.08	1.60±0.07	2.16±0.30	1.97±0.38	1.64±0.22	1.94±0.08	1.81±0.18
EV-MB 50	1.24±0.08	-	-	-	-	2.02±0.18	1.52±0.13	1.86±0.15	1.46±0.24	0.81±0.12
EV-MB 70	1.60±0.09	-	-	-	-	1.85±0.10	1.54±0.07	1.80±0.24	1.61±0.20	1.05±0.03

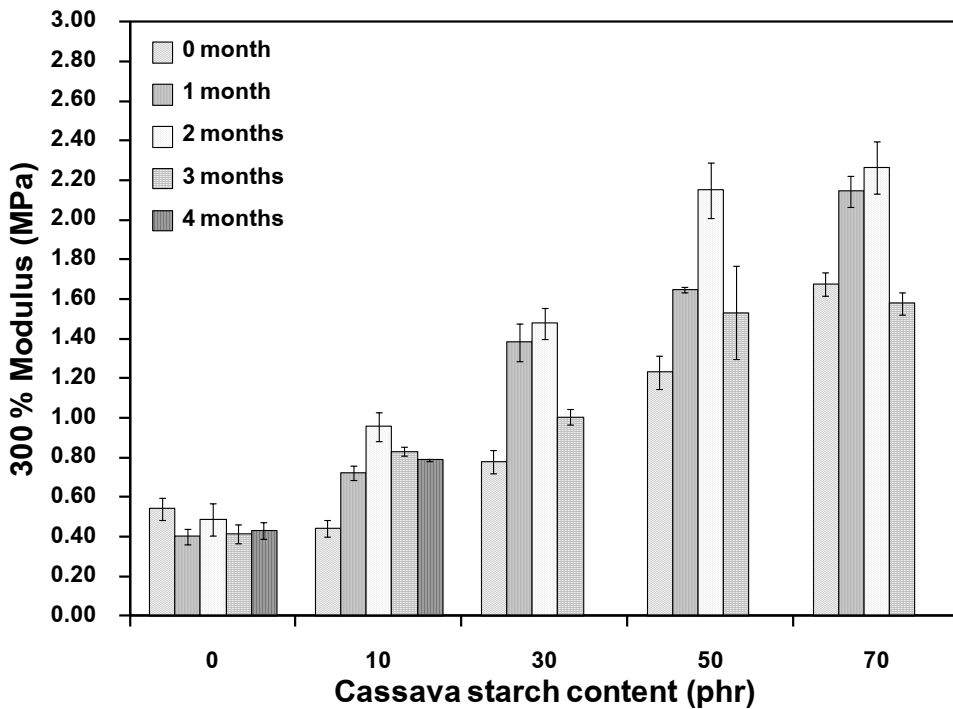
หมายเหตุ เครื่องหมาย (-) หมายถึง ไม่สามารถหาค่ามอดูลัสที่ระยะยัด 300 เปอร์เซ็นต์ได้

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) สมบัติเชิงกลหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ

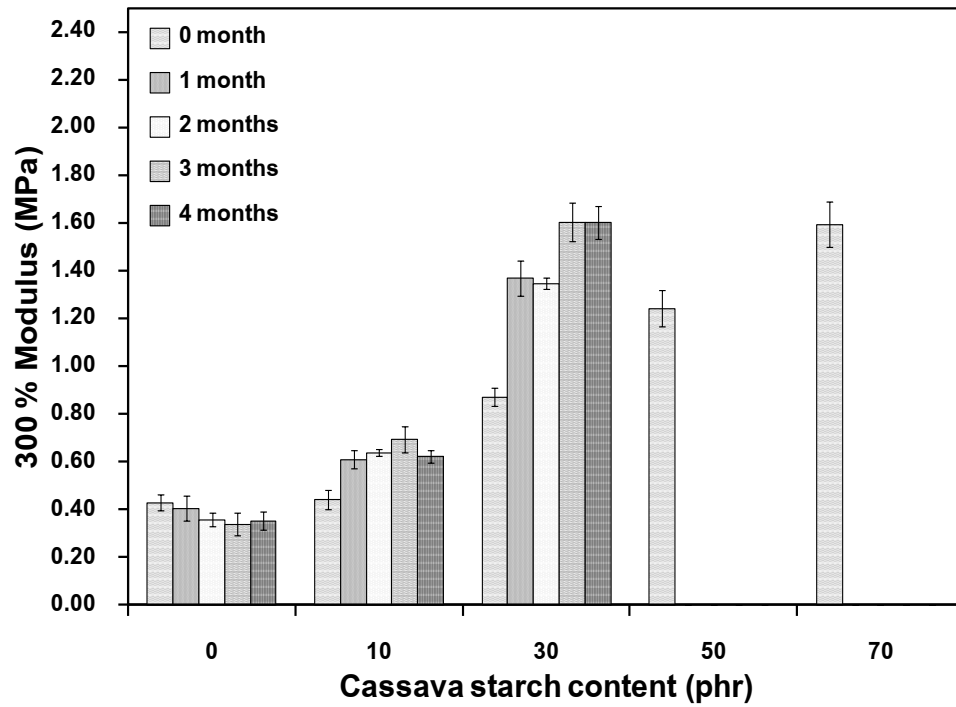
Formulas	Elongation at break (%)					Tear strength (N/mm)				
	0 month	1 month	2 months	3 months	4 months	0 month	1 month	2 months	3 months	4 months
CV-MB 0	525±28.87	580±27.39	565±22.36	600±61.24	575±30.62	13.40±1.35	14.03±0.90	12.92±1.70	14.51±1.06	12.40±1.65
CV-MB 10	505±11.18	430±20.92	445±11.18	450±50.00	390±41.83	11.22±1.24	12.13±1.46	10.49±1.06	10.03±0.70	9.18±1.14
CV-MB 30	505±11.18	345±27.39	330±11.18	320±20.92	315±48.73	13.87±0.04	12.40±0.17	12.18±1.19	8.17±0.84	9.62±0.76
CV-MB 50	413±25.00	325±20.41	306±12.50	306±12.50	300±0.00	15.10±0.67	10.78±1.15	12.91±1.26	11.51±0.41	6.63±0.55
CV-MB 70	350±0.00	292±14.43	250±0.00	242±14.43	200±0.00	14.26±1.12	14.71±0.56	15.84±1.48	12.90±1.29	11.97±1.30
SE-MB 0	570±27.39	595±27.39	600±17.68	625±25.00	610±13.69	10.89±1.06	12.12±0.11	11.24±1.79	11.16±1.76	11.80±0.87
SE-MB 10	570±11.18	530±20.92	580±27.39	505±11.18	440±13.69	9.38±0.72	10.92±0.41	12.34±1.26	9.02±0.61	8.87±1.13
SE-MB 30	505±11.18	340±22.36	325±30.62	330±27.39	255±11.18	10.52±0.60	9.43±0.87	10.22±0.93	7.08±0.62	8.07±0.43
SE-MB 50	415±13.69	295±27.39	285±37.91	285±22.36	255±11.18	12.34±0.36	11.17±1.20	12.50±0.58	10.35±0.50	8.84±1.02
SE-MB 70	375±0.00	290±22.36	280±44.72	280±27.39	220±27.39	11.23±0.50	12.68±1.13	13.52±0.97	13.02±1.42	10.73±0.60
EV-MB 0	638±25.00	600±17.68	570±27.39	610±13.69	615±13.69	11.67±0.89	11.46±0.74	10.33±1.22	10.92±1.52	9.71±1.04
EV-MB 10	555±11.18	520±11.18	500±0.00	500±0.00	445±27.39	9.70±1.11	12.79±0.66	8.09±0.55	9.85±0.49	7.89±0.48
EV-MB 30	490±22.36	385±37.91	355±27.39	350±0.00	350±35.36	10.40±0.41	10.20±0.71	10.50±0.82	10.15±1.50	6.49±0.53
EV-MB 50	400±0.00	260±22.36	265±22.36	233±14.43	213±14.43	9.48±0.82	11.04±0.62	11.54±1.45	10.21±0.87	5.27±0.19
EV-MB 70	350±0.00	245±11.18	235±22.36	240±22.36	170±27.39	10.33±0.40	12.76±0.78	13.03±0.98	11.20±1.43	10.39±0.37



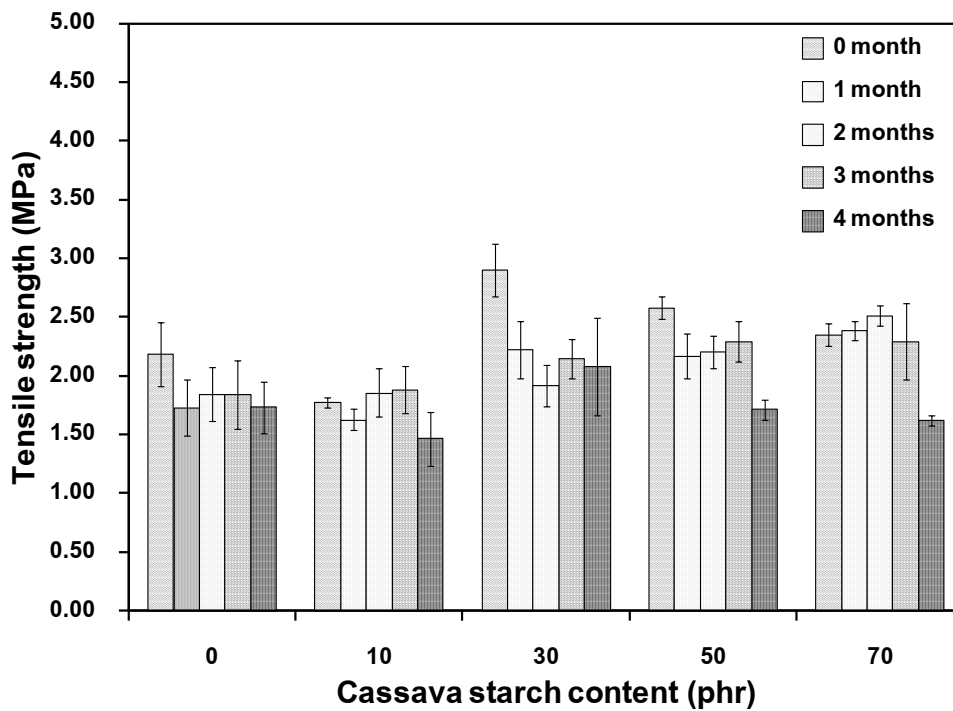
รูปที่ 4.36 มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



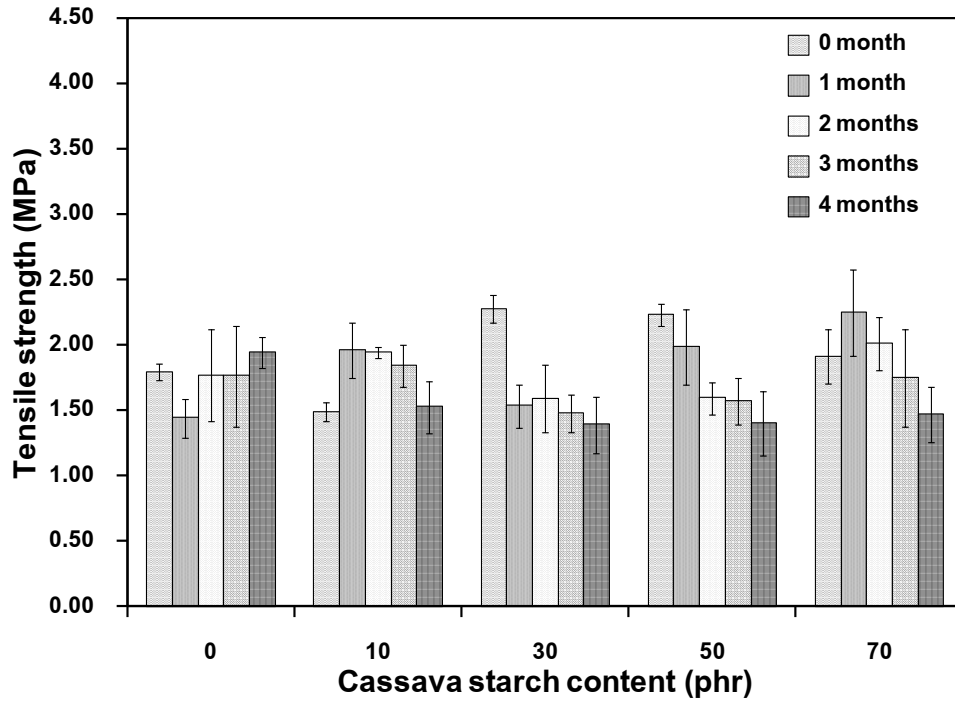
รูปที่ 4.37 มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



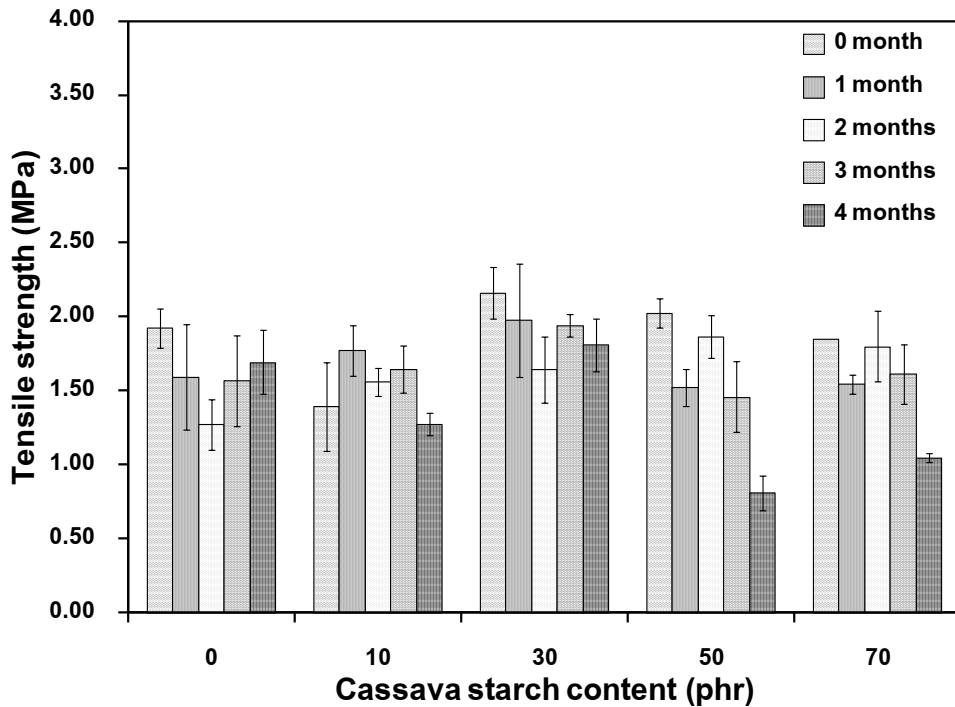
รูปที่ 4.38 มอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ



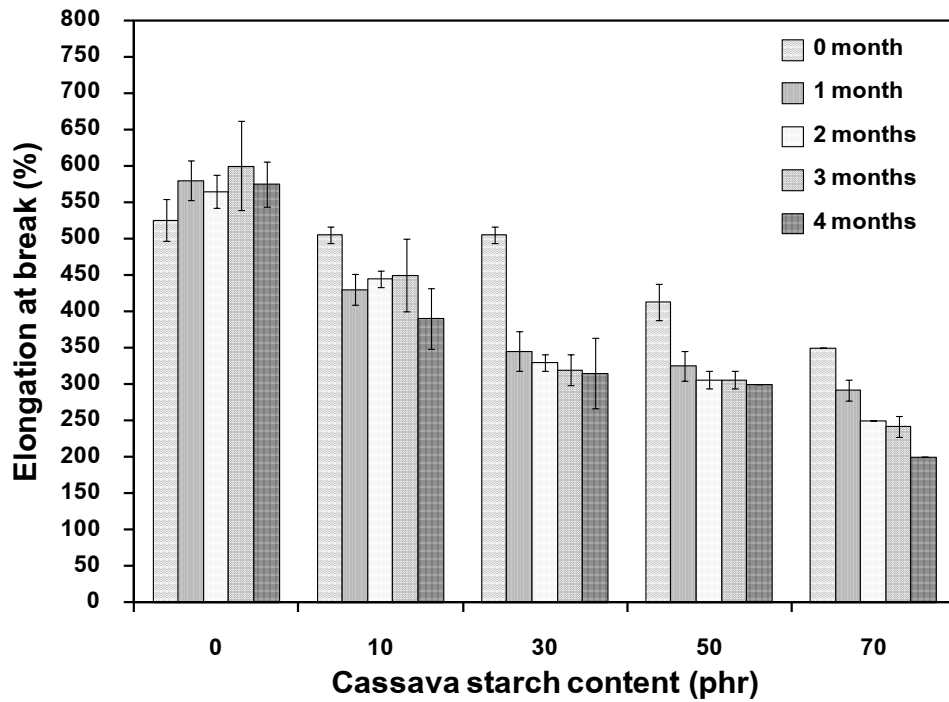
รูปที่ 4.39 ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



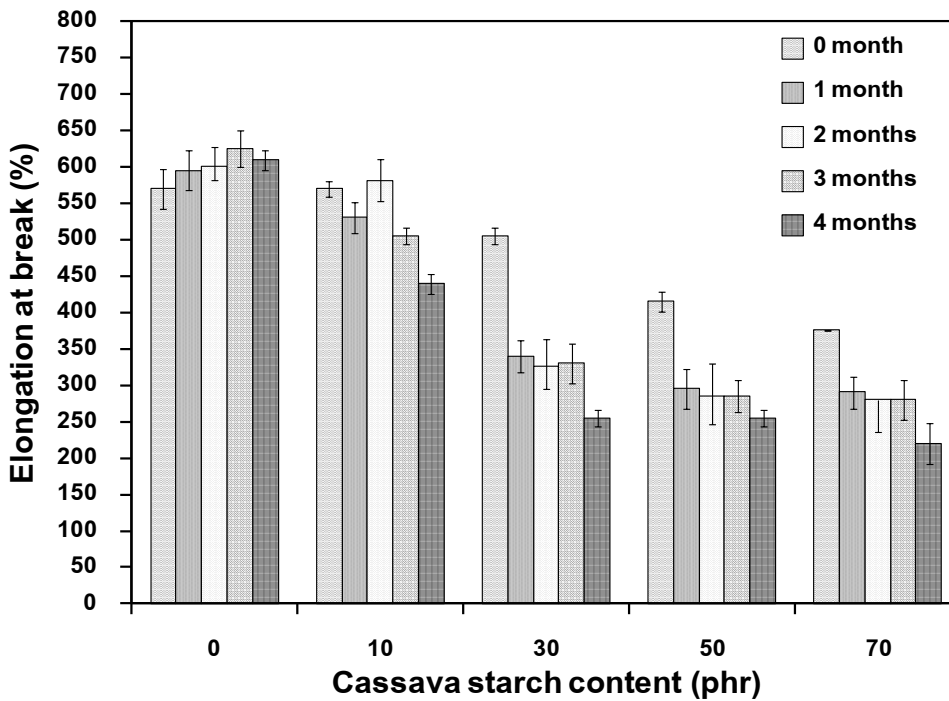
รูปที่ 4.40 ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



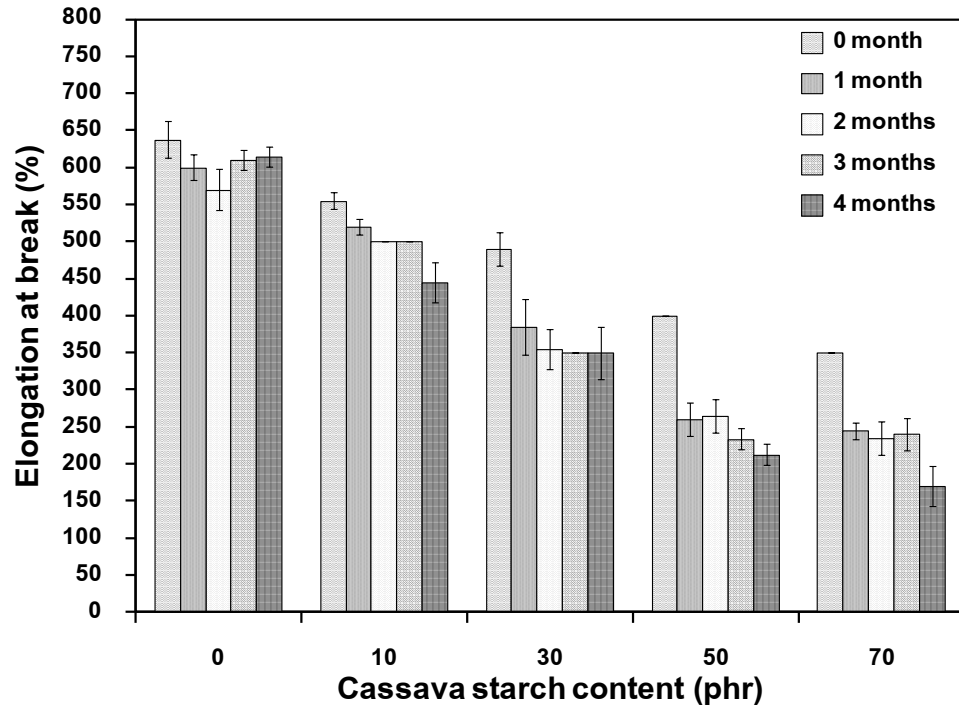
รูปที่ 4.41 ความต้านทานต่อแรงดึงหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ



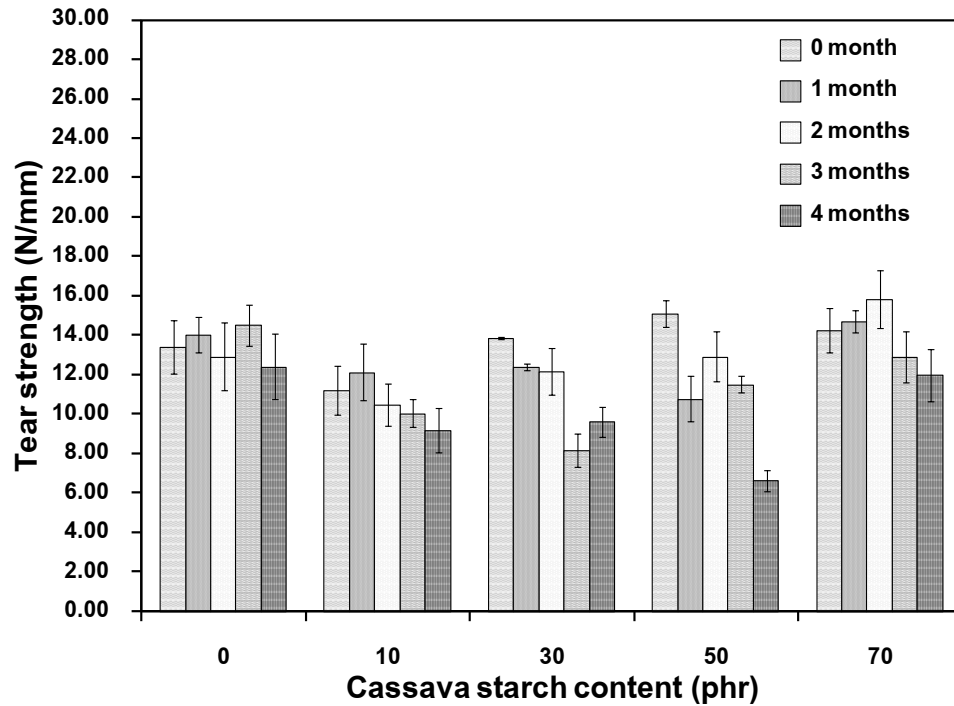
รูปที่ 4.42 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



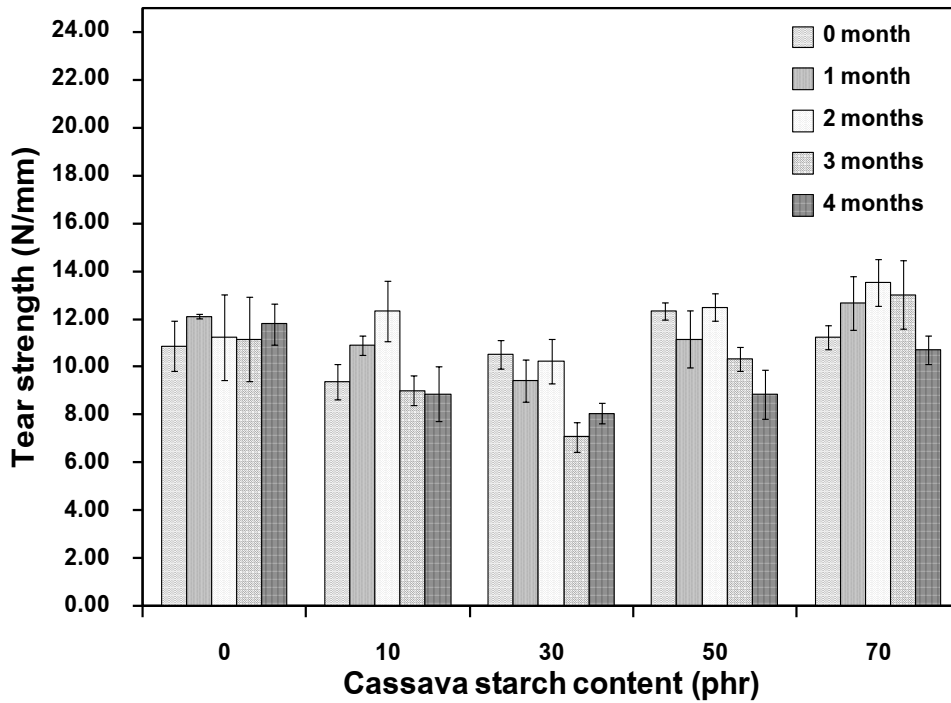
รูปที่ 4.43 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



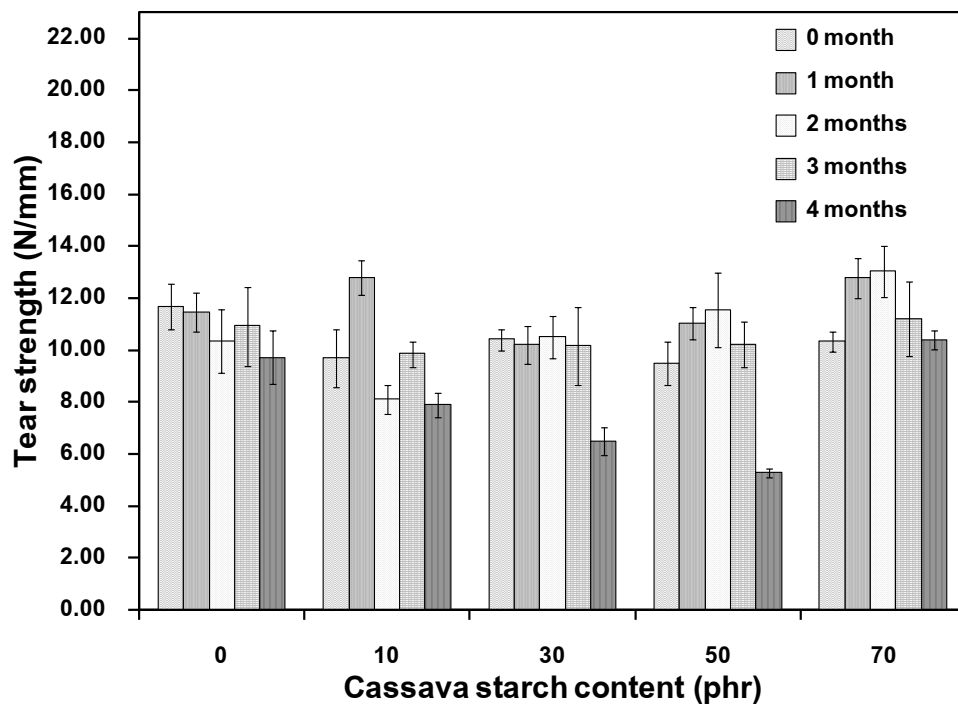
รูปที่ 4.44 เปอร์เซนต์ยืด ณ จุดขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.45 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



รูปที่ 4.46 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.47 ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณแป้งมันสำปะหลังของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.36-4.38 แสดงมอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ หลังการฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพให้ผลในทำนองเดียวกันกล่าวคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากหลังการอบแห้งของชั้นทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C จนกว่าน้ำหนักของชั้นทดสอบคงที่ ทำให้ผิวยางแข็งขึ้น ซึ่งผิวยางที่แข็งขึ้นของชั้นทดสอบจะเป็นตัวขวางแรงของการขยายตัวของรอยแตกทำให้แรงที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.39-4.47 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังฝังดินที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ระบบแบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ พบว่ากรณีที่ใส่แป้งมันสำปะหลังมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังฝังดินที่ระยะเวลา 1-4 เดือน มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีที่ใส่แป้งดิน กรณีที่ใส่แป้งมันสำปะหลัง พบว่าที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 10, 30, 50 และ 70 phr หลังจากฝังดินเป็นเวลา 1, 2 และ 3 เดือน ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงเล็กน้อย แต่หลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน สมบัติเชิงกลดังกล่าวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อเทียบกับก่อนฝังดิน แสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นดินที่ใช้ทดสอบดังกล่าวมีเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายแป้งได้แต่ยังต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายแป้ง ซึ่งหลังจากที่เชื้อจุลินทรีย์ย่อยแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในยางพองน้ำวัลคาไนซ์แล้วอาจทำให้เกิดรูพรุน ช่องว่าง สอดคล้องกับผลการทดลองของ วิมล (2554) [40] ได้ศึกษาสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยวิธีฝังดินของยางธรรมชาติ ผสมผงไคติน และผงกระดองปลาหมึก ซึ่งส่วนของผิวสัมผัสของชั้นตัวอย่างกับดิน จะเกิดเป็นจุดอ่อนแอขึ้นในเนื้อยางพองน้ำวัลคาไนซ์ส่งผลทำให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลงด้วย

ในขณะที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 30 phr จะมีสมบัติเชิงกลลดลงต่ำกว่าก่อนฝังดินและมากกว่าที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพื้นดินที่ใช้ทดสอบมีเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยแป้งที่พอเหมาะับปริมาณแป้งซึ่งเป็นแหล่งอาหาร และจะเห็นผลได้จากที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 70 phr ในช่วงระยะเวลาฝังดิน 1-3 เดือนแรกสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดไม่ได้เปลี่ยนแปลงจากก่อนฝังดินมากนัก แต่หลังจากฝังดินผ่านไป 4 เดือน สมบัติดังกล่าวลดลงจากก่อนฝังดินอย่างชัดเจน

เมื่อเปรียบเทียบยางพองน้ำวัลคาไนซ์แต่ละระบบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกันหลังจากการฝังดินผ่านไป 4 เดือน พบว่าสมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ

มีการใช้กำมะถันในปริมาณมากสารตัวเร่งปฏิกิริยาน้อย ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการเกิดการเชื่อมโยงพันธะแบบพอลิซัลฟิดิกจะให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่า เมื่อเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 ผลการศึกษาเทคนิคการเตรียมแป้งมันสำปะหลังมาสเตอร์แบทช์ที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง

5.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์

เวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น

เวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย

5.1.2 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์ ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 500 เปอร์เซ็นต์

สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์ มีค่าสูงกว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์

5.1.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

ยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาติไนซ์ และเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์มีโครงสร้างเซลล์เป็นแบบปิด มีการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังในยางพองน้ำไม่สม่ำเสมอและมีการรวมตัวเป็นกลุ่มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น

ยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่เตรียมแป้งมาสเตอร์แบทช์จากเทคนิคการเตรียมแบบเจลาติไนซ์มีการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลังเดียวกัน

5.2 ผลการศึกษาอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง

5.2.1 สมบัติความหนืดมูนี้ของยางพองน้ำคอมพาวนด์

ความหนืดมูนี้ของยางพองน้ำคอมพาวนด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น

ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยสารตัวเร่ง/กำมะถัน ไม่มีผลต่อความหนืดมูนี้

5.2.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์

เวลาเริ่มวัลคาไนซ์ เวลาในการวัลคาไนซ์ ค่าแรงบิดต่ำสุด และแรงบิดสูงสุด เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเกิด reversion ลดลงตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น

เวลาเริ่มวัลคาไนซ์ และเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีค่าสูงที่สุด

ค่าแรงบิดต่ำสุด และแรงบิดสูงสุดของยางพองน้ำคอมพาวนด์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

5.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำวัลคาไนซ์มีโครงสร้างเซลล์เป็นแบบปิด และมีขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยลดลง และจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้น มีการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ ทั้งในยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ

ขนาดเซลล์โดยเฉลี่ยของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบปกติ มีขนาดเล็กกว่า มีจำนวนเซลล์มากกว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพ ระบบแบบประสิทธิภาพตามลำดับ

5.2.4 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

ความหนาแน่น มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ และความสามารถในการคืนรูปหลังการกดเพิ่มขึ้นตามปริมาณแอมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงที่ระดับปริมาณแอมันสำปะหลัง 30 phr มีค่าสูงสุด แต่ที่ระดับปริมาณแอมันสำปะหลังที่ 50 และ 70 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงตามปริมาณแอมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น และเมื่อระดับปริมาณแอมันเพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาด ทั้งในยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ

สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ แต่การผิดรูปหลังการกดและเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีค่าต่ำกว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้การวัลคาไนซ์ระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบแบบปกติ ตามลำดับ

5.2.5 สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และการผิดรูปหลังการกดมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับก่อนการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน ทั้งในยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ

สมบัติเชิงกลหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน ได้แก่ มอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ของยางพองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนทั้งในยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพยังไม่สามารถสรุปได้ว่าระบบใดที่ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า ส่วนการผิดรูปหลังการกดหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนของยางพองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีค่าต่ำกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

5.2.6 ผลของระยะเวลาการฝังดินที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำวัลคาไนซ์

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปหลังการฝังดินเพิ่มขึ้นตามปริมาณแ่งมันสำปะหลัง และระยะเวลาในการฝังที่เพิ่มขึ้น

สมบัติเชิงกลหลังฝังดิน ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ๓ จุดขาดและความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์กรณีที่ไม่ใส่แ่งมันสำปะหลัง ลดลงเล็กน้อย เมื่อระยะเวลาผ่านไป 1-4 เดือน ส่วนกรณีที่ไม่ใส่แ่งมันสำปะหลังที่ระดับ 10, 30, 50 และ 70 phr หลังจากฝังดินเป็นเวลา 1-3 เดือนแรก ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ยืด ๓ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลงเล็กน้อย แต่หลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน สมบัติเชิงกลดังกล่าวจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ยกเว้นมอดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นตามปริมาณแ่งมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้น

ระบบการวัลคาไนซ์ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

สมบัติเชิงกลหลังฝังดินของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

บรรณานุกรม

1. สมาคมยางพาราไทย สถิติยางไทย: ปริมาณและมูลค่าการส่งออกยางธรรมชาติ ปี 2555 <http://www.thainr.com/th/index.php?detail=stat-thai#> (accessed 10 ก.ค. 2556).
2. พงษ์ธร แซ่ฮุย, ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน.; ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), **2548**; หน้า 11-12.
3. Thai Tapioca Starch Association. Quantity and value of export tapioca starch statistics in 2013 <http://www.thaitapiocastarch.org/export.asp> (accessed 10 Junly 2013).
4. Amutha, R.; Gunasekaran, P., Production of ethanol from liquefied cassava starch using co-immobilized cells of *Zymomonas mobilis* and *Saccharomyces diastaticus*. *J. Biosci. Bioeng.*, **2001**, 92 (6), 560-564.
5. Weng, Y.-X.; Jin, Y.-J.; Meng, Q.-Y.; Wang, L.; Zhang, M.; Wang, Y.-Z., Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. *Polym. Test.*, **2013**, 32 (5), 918-926.
6. Nakason, C.; Kaesman, A.; Homsin, S.; Kiatkamjornwong, S., Rheological and curing behavior of reactive blending. I. Maleated natural rubber–cassava starch. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2001**, 81 (11), 2803-2813.
7. Nakason, C.; Kaesaman, A.; Rungvichaniwat, A.; Eardrod, K.; Kiatkamjornwong, S., Rheological and curing behavior of reactive blending. II. Natural rubber-g-poly(methyl methacrylate)–cassava starch. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2003**, 89 (6), 1453-1463.
8. วัชรินทร์ สายน้ำใส. การศึกษรีเอกทีฟเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติอีพอกไซด์กับแป้งมันสำปะหลัง. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, **2545**.
9. Wang, Z.-F.; Peng, Z.; Li, S.-D.; Lin, H.; Zhang, K.-X.; She, X.-D.; Fu, X., The impact of esterification on the properties of starch/natural rubber composite. *Compos. Sci. Technol.*, **2009**, 69 (11–12), 1797-1803.
10. Liu, C.; Shao, Y.; Jia, D., Chemically modified starch reinforced natural rubber composites. *Polymer*, **2008**, 49 (8), 2176-2181.
11. Khalaf, A. I.; Sadek, E. M., Compatibility study in natural rubber and maize starch blends. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2012**, 125 (2), 959-967.

12. Wu, Y.-P.; Qi, Q.; Liang, G.-H.; Zhang, L.-Q., A strategy to prepare high performance starch/rubber composites: In situ modification during latex compounding process. *Carbohydr. Polym.*, **2006**, 65 (1), 109-113.
13. Wu, Y.-P.; Liang, G.-H.; Zhang, L.-Q., Influence of starch on the properties of carbon-black-filled styrene-butadiene rubber composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2009**, 114 (4), 2254-2260.
14. Ichazo, M. N.; Albano, C.; Hernández, M.; González, J.; Peña, J., characterization of natural rubber/cassava starch/maleated natural rubber formulation. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, **2011**, 31 (1), 71-84.
15. Senna, M. M.; Mohamed, R. M.; Shehab-Eldin, A. N.; El-Hamouly, S., Characterization of electron beam irradiated natural rubber/modified starch composites. *J.Ind.Eng.Chem.*, **2012**, 18 (5), 1654-1661.
16. Shey, J.; Imam, S. H.; Glenn, G. M.; Orts, W. J., Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Ind. Crop. Prod.*, **2006**, 24 (1), 34-40.
17. Shogren, R. L.; Lawton, J. W.; Tiefenbacher, K. F., Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties. *Ind. Crop. Prod.*, **2002**, 16 (1), 69-79.
18. ธนาวดี ลีจากภัย, พลาสติกย่อยสลายได้ บริษัท ไทยสตูดิโอ จำกัด, กรุงเทพฯ. , พิมพ์ครั้งที่ 1, **2549**; หน้า 1-20.
19. จิตต์ลัดดา สักดาภิพานิชย์, เทคโนโลยียางธรรมชาติ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล: **2553**; หน้า 7-16.
20. พงษ์ธร แซ่ฮุย, สารเคมียาง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) **2548**; หน้า 9-20.
21. กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, เทคโนโลยีของแป้ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, **2546**; หน้า 1-55.
22. Shah, A. A.; Hasan, F.; Hameed, A.; Ahmed, S., Biological degradation of plastic: A comprehensive review. *Biotechnol. Adv.*, **2008**, 26, 246-265.
23. Guriya, K. C.; Tripathy, D. K., Morphology and physical properties of closed-cell microcellular ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM) rubber vulcanizates: Effect of blowing agent and carbon black loading. *J. Appl. Polym. Sci.*, **1996**, 62 (1), 117-127.

24. Guriya, K. C.; Bhattachariya, A. K.; Tripathy, D. K., Rheological properties of ethylene propylene diene rubber (EPDM) compound — effect of blowing agent, curing agent and carbon black filler. *Polymer*, **1998**, 39 (1), 109-115.
25. Kim, J.-H.; Choi, K.-C.; Yoon, J.-M., The Foaming Characteristics and Physical Properties of Natural Rubber Foams: Effects of Carbon Black Content and Foaming Pressure *J. Ind. Eng. Chem.*, **2006**, 12 (5), 795-801.
26. Lee, E.-K.; Choi, S.-Y., Preparation and characterization of natural rubber foams: Effects of foaming temperature and carbon black content. *Korean J. Chem. Eng.*, **2007**, 24 (6), 1070-1075
27. Mahapatra, S. P.; Sridhar, V.; Tripathy, D. K.; Kim, J. K.; Kwak, H., Dynamic mechanical and dielectric relaxation characteristics of microcellular rubber composites. *Polym. Adv. Technol.*, **2008**, 19 (9), 1311-1322.
28. Wimolmala, E.; Khongnual, K.; Sombatsompop, N., Mechanical and morphological properties of cellular NR/SBR vulcanizates under thermal and weathering ageing. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2009**, 114 (5), 2816-2827.
29. Zhang, B. S.; Lv, X. F.; Zhang, Z. X.; Liu, Y.; Kim, J. K.; Xin, Z. X., Effect of carbon black content on microcellular structure and physical properties of chlorinated polyethylene rubber foams. *Materials & Design*, **2010**, 31 (6), 3106-3110.
30. Ariff, Z. M.; Zakaria, Z.; Tay, L. H.; Lee, S. Y., Effect of foaming temperature and rubber grades on properties of natural rubber foams. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2008**, 107 (4), 2531-2538.
31. Ariff, Z. M.; Rahim, N. A. A.; Low, L. C. In *Effect of compound formulation on the production and properties of epoxidised natural rubber (ENR-25) foam*, Proceedings of the polymer processing society 24th annual meeting, salerno (Italy), 15-19; salerno (Italy), 2008.
32. Najib, N. N.; Ariff, Z. M.; Manan, N. A.; Bakar, A. A.; Sipaut, C. S., Effect of Blowing Agent Concentration on Cell Morphology and Impact Properties of Natural Rubber Foam. *Journal of Physical Science*, **2009**, 20 (1), 13–25.
33. Nakason, C.; Kaesaman, A.; Sainamsai, W.; Kiatkamjonwong, S., Rheological behavior of reactive blending of epoxidized natural rubber with cassava starch and epoxidized natural rubber with natural rubber and cassava starch. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2004**, 91 (3), 1752-1762.

34. Tantatherdtam, R.; Sriroth, K., Morphologies of natural rubber/gelatinized starch and mineral clay composite. *Kasetsart J. Nat. Sci.*, **2007**, *41*, 279 - 285
35. Izmar, M. H.; Afiq, M. M.; Azura, A. R., Effects of different additions of sago starch filler on physical and biodegradation properties of pre-vulcanized NR latex composites. *Composites Part B: Engineering.*, **2012**, *43* (7), 2746-2750.
36. นุชจรี สุขใส. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากคอมโพสิตของไคโตซานและยางธรรมชาติ. วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, **2554**.
37. Bras, J.; Hassan, M. L.; Bruzesse, C.; Hassan, E. A.; El-Wakil, N. A.; Dufresne, A., Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites. *Ind. Crop. Prod.*, **2010**, *32* (3), 627-633.
38. Abraham, E.; Elbi, P. A.; Deepa, B.; Jyotishkumar, P.; Pothen, L. A.; Narine, S. S.; Thomas, S., X-ray diffraction and biodegradation analysis of green composites of natural rubber/nanocellulose. *Polym. Degrad. Stab.*, **2012**, *97* (11), 2378-2387.
39. วิลาสินี ศุภกรพิพัฒน์. การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารตัวเติมในยางพองน้ำ. โครงการทางวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, **2555**.
40. วิมล อินทคง. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากคอมโพสิตของไคโตซานและยางธรรมชาติ.; MRG5180267; สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย; กันยายน **2554**.
41. Kiatkamjornwong, S.; Sonsuk, M.; Wittayapichet, S.; Prasassarakich, P.; Vejjanukroh, P.-C., Degradation of styrene-g-cassava starch filled polystyrene plastics. *Polym. Degrad. Stab.*, **1999**, *66* (3), 323-335.
42. Riyapan, D.; Riyajan, S.-A. In *Preparation and properties of low grade natural rubber and cassava starch blend* 38th Congress on Science and Technology of Thailand, Chiangmai (Thailand), 17-19; Chiangmai (Thailand), 2012.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความชื้นในดิน และอุณหภูมิของหลุมทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ ก.1 ความชื้นในดิน และอุณหภูมิของหลุมทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากวันที่ 24 พฤศจิกายน 2556 ถึง 24 มีนาคม 2557

สัปดาห์	ความชื้นเฉลี่ย (wt%)	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
1	27.54	25
2	27.54	25
3	22.15	26
4	20.53	26
5	20.73	26
6	21.32	26
7	22.48	26
8	21.65	26
9	23.51	26
10	22.18	26
11	21.37	25
12	22.34	25
13	22.58	25
14	23.42	25
15	23.56	25
16	23.43	25

ภาคผนวก ข

เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Preparation and properties of sponge rubber based on natural rubber and cassava starch

Komsun Temna^a, Nitinart Saetung^{a*}, Anuwat Saetung^{b*}

^a Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

^b Department of Rubber Technology and Polymer Science, Faculty of Science and
Technology, Prince of Songkla University, Pattani campus, Pattani 94000, Thailand

* Corresponding authors: snitinarth@hotmail.com (N. Saetung^a)

Tel. +66 (0)74 288374, Fax. +66 (0)74 288395

and sanuwat@hotmail.com (A. Saetung^a)

Tel. +66 (0)73 333963, Fax. +66 (0)73 312213

Keywords: natural rubber; sponge; cassava starch

Abstract

In this work, the sponge rubbers based on cassava starch masterbatch in latex phase with the difference technique (non-gelatinized and gelatinized cassava starch) were preformed. The cassava starch contents from 0 to 70 phr were also studied. The cure characteristic, mechanical and morphological properties were investigated. It was found that the scorch time and cure time were increased with an increasing of cassava starch contents in both techniques. The mechanical properties *i.e.*, tensile strength, elongation at break and tear strength were decreased with an increasing of cassava starch contents, except 500% modulus. However, the sponge

based on gelatinized technique gave the better mechanical properties than that of non-gelatinized cassava starch. The SEM micrographs of sponge NR from gelatinized technique were also able to confirm a good interfacial interaction between hydrophilic cassava starch and hydrophobic NR.

Introduction

Natural rubber (NR) is the most important in Thailand. Nowadays, they are produced rubber around 3.6 thousand tons in 2012 [1]. With the great mechanical properties through vulcanization, natural rubbers have been used in many products in many fields such as gloves, condoms, tires, rubber part and sponge. Though the natural rubber is a natural polymer, it does not easily to naturally degrade due to crosslink structure *via* vulcanization process. Cassava starch is an interesting natural polymer with an abundant, renewable source, bio-degradable, non-toxic and environmental friendly. It was used in the important starting material to produce bioplastics or to compound in other polymer for producing biopolymers. Many researchers also reported the blending of natural rubber and cassava starch with various techniques due to the problem of a different polarity of polymer. The modification of natural rubber was preformed to increase the polarity such as maleated NR [2], NR-g-MMA [3], *via* epoxidation [4]. The adding compatibilizer of NR and cassava starch blends were investigated i.e., maleic anhydride and glycidyl methacrylate [5] as well as maleated NR [2]. The other techniques to achieve uniform dispersion of cassava starch in latex matrix is directly compounding rubber latex with cassava starch and then co-coagulating the matrix has been developed [6]. The resulting cassava starch/rubber composites exhibited better mechanical properties compared with equivalent materials prepared by direct blending. But the mechanical properties were still low due to poor adhesion between two phases. However, the improvement of adhesion in both phases were able to modify cassava starch by gelatinization technique [6]. This technique is popular technique due to easier

and more saving. In addition, the modifier is designed to interact with cassava starch and rubber to prevent hydrogen bonding and crystallization of cassava starch and to improve compatibility between cassava starch and rubber [5].

In sponge rubber application, it has been even reported that the NR and cassava starch blends were used for preparation of baked cassava starch foams [7, 8], but it has been never reported in sponge rubber form of the blends. In this study, we are interesting to prepare cassava starch/NR masterbatch in latex phase with the difference technique (non-gelatinized and gelatinized cassava starch) and starch contents from 0 to 70 phr were preformed. The properties of sponge rubber also were investigated.

Experimental

Materials

Natural rubber (NR): ribbed smoked sheets (RSS-3) and high ammonia concentrated latex (HA latex) were obtained from Chana Latex Limited, Thailand. Cassava starch was purchased from General Cassava starch Limited, Thailand. Super cell using as a blowing agent was manufactured by A.F. Goodrich Chemical Limited, Thailand. The other chemicals in recipes were purchased from Behn Meyer Chemical (T) Limited, Thailand.

Preparation of cassava starch/NR masterbatch

The cassava starch/NR masterbatch in form of 70 phr were prepared into 2 strategies. The first method is non-gelatinized cassava starch/NR masterbatch. Natural cassava starch powder (NST) was added directly in HA latex were mixed and stirred vigorously for 0.5 h and coagulated then with 2 wt% calcium chloride aqueous (CaCl_2).

The other method is the gelatinized cassava starch (GST)/NR masterbatch [6]. Briefly, a 5% cassava starch aqueous suspension was stirred at 90 °C in a water bath for 1 h until the solution became transparent. When the solution was cooled to ambient temperature, a cassava starch paste was obtained. Cassava starch

paste and the HA latex with stirring vigorously at the same condition, and then, about a 2 wt% CaCl_2 was added to coagulate.

The both coagulum were then washed several times with water and dried in an oven at 80 °C for 18 h. The NST/NR masterbatch and GST/NR masterbatch were obtained, respectively.

Preparation of sponge NR compounding

The cassava starch/NR masterbatch (various cassava starch contents from 0 to 70 phr) and other chemicals in Table 1 were mixed with a two-roll mill at 50–60 °C by a standard procedure. The sponge/NST compounds and sponge/GST compounds were vulcanized in a hydraulic press at 150 °C for the optimum cure time.

Table 1. Rubber compounds recipes

Ingredients	Weight (g)				
	RSS-3	100	86	57	29
Cassava starch/NR masterbatch ^{1,2}	0	24	73	121	170
Cure behaviors					
Scorch time (min)	1.57	2.03 ¹ , 2.42 ²	2.15 ¹ , 2.57 ²	2.15 ¹ , 2.58 ²	2.12 ¹ , 3.04 ²
Cure time (min)	3.08	3.21 ¹ , 5.47 ²	3.48 ¹ , 5.57 ²	3.53 ¹ , 6.00 ²	3.56 ¹ , 6.29 ²

Ingredients: ZnO 5, Stearic acid 1, TBBS 1, IPPD 1, Super cell 5 and Sulphur 2.5 g

¹ NST/NR masterbatch

² GST/NR masterbatch

Results and discussions

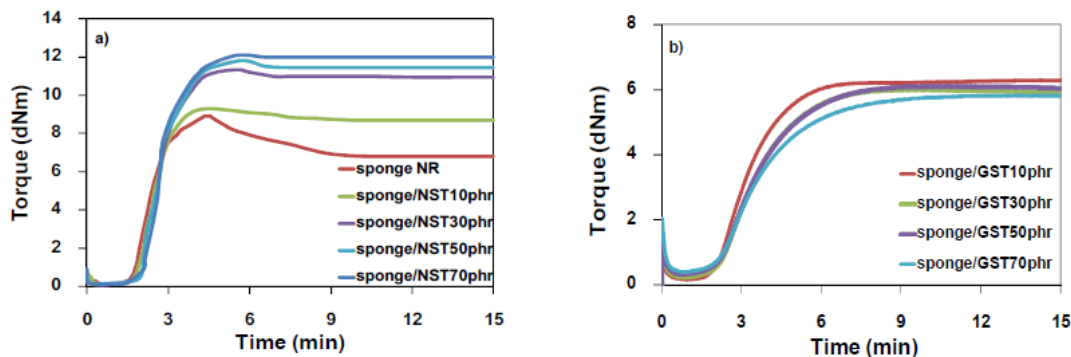


Figure 1. Cure curve of sponge NR compounds with various cassava starch contents, a) sponge/ NST compounds and b) sponge/GST compounds.

The effect of cassava starch contents on the cure characteristics of sponge NR compounds shows in Table 1 and Figure 1. They show cure characteristic of sponge NR compounds based on both of NST/NR and GST/NR masterbatches. The scorch time and cure time of sponge NR compounds was increased with an increasing of cassava starch contents. It may be due to the smaller cassava starch particles had more hydroxyl groups exposed with the cassava starch/NR masterbatch and absorbed curing agents[9].

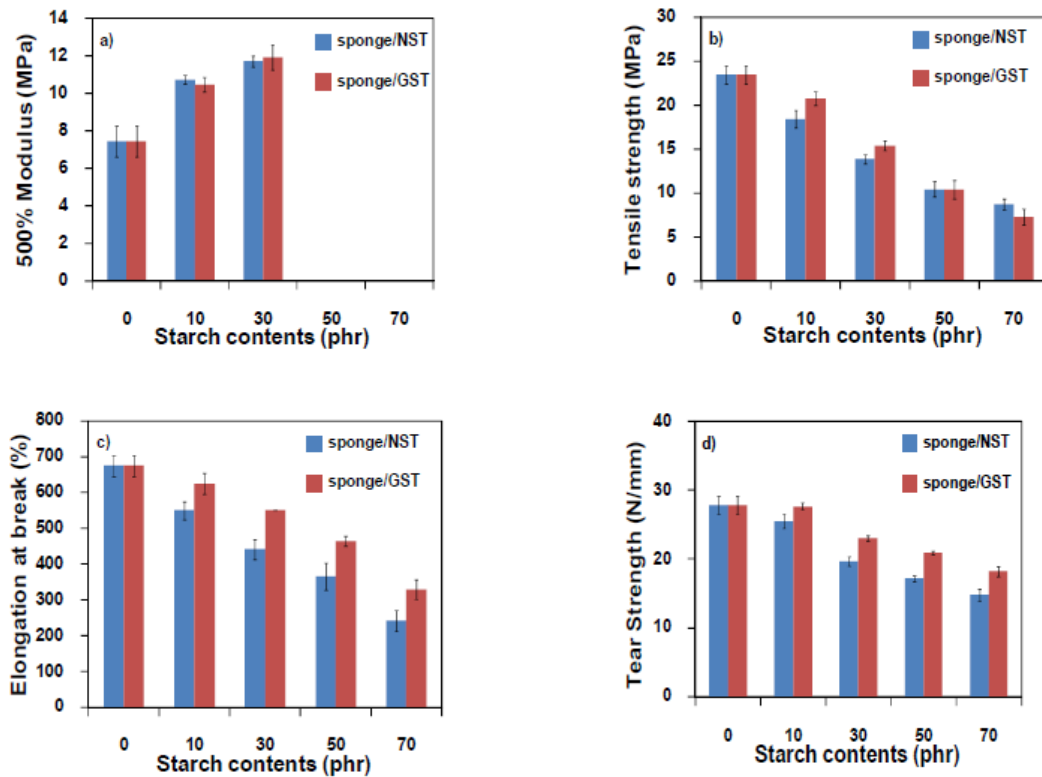


Figure 2. Mechanical properties of sponge NR vulcanizates with various cassava starch contents, a) 500% modulus, b) tensile strength, c) elongation at break and d) tear strength.

The effect of cassava starch contents (i.e., 0, 10, 30, 50, 70 phr) on the mechanical properties of sponge NR vulcanizates were studied. Figures 2 (a-d) represented, the modulus at 500%, tensile strength, elongation at break and tear strength, respectively. It was found that the modulus at 500% of sponge NR was highest at starch contents 30 phr due to an increasing of rigid particle filler in NR matrix. However, the tensile strength, elongation at break and tear strength of the sponge NR were decreased with an increasing of cassava starch contents. It is due to an agglomerate of cassava starch particle in to NR attributed to the low interfacial interaction between the cassava starch and rubber matrix led to mechanical rupture at the blend interface[5]. However, sponge/GST gave the tensile strength, elongation at

break and tear strength a higher than that of sponge/NST. It was due to a better dispersion of cassava starch in NR matrix as well as better interfacial interaction between hydrophilic cassava starch and hydrophobic NR could be expected, which would allow an improvement of mechanical properties of the sponge NR. In addition, the morphologies of sponge NR with SEM technique in Figure 3 (c and e) were also able to confirm this phenominal.

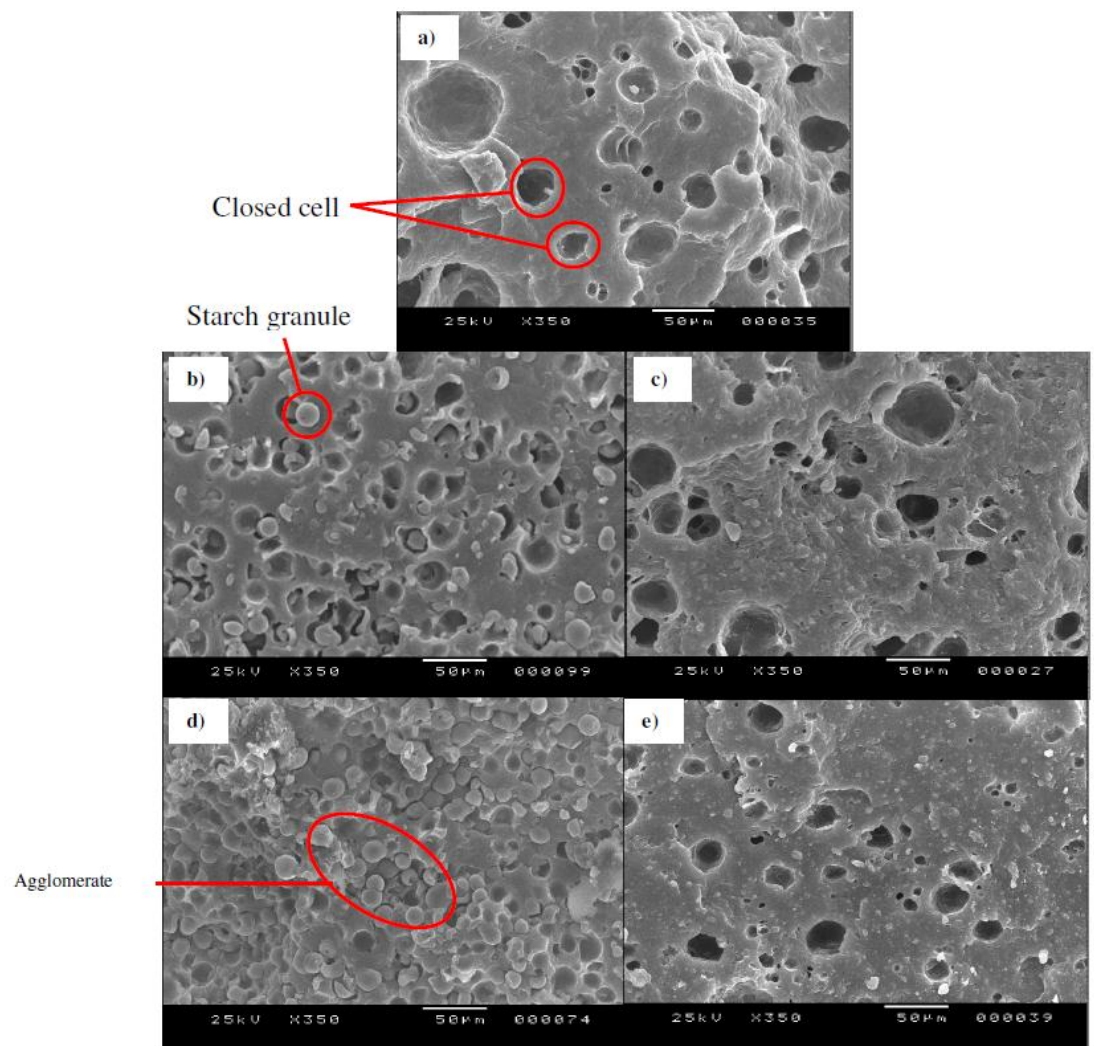


Figure 3. SEM micrographs of sponge NR a) 0 phr, b) sponge/NST 30 phr, c) sponge/GST 30 phr, d) sponge/NST 70 phr and e) sponge/GST 70 phr.

SEM micrographs of the freeze fractured surface of sponge NR were presented in Figure 3 (a-e). It was found that the dispersion of cassava starch in the sponge NR was not uniform with the increasing of cassava starch contents. It is due to differences in polarity of cassava starch and NR matrix. The closed cell structures from nitrogen gas by decomposition of the blowing agent were observed in Figure 3 (a-e). The cell size was decreased with an increasing of cassava starch contents [10-13] due to the increasing of melt viscosity of compound with incorporation of cassava starch.

Figure 3(b) and Figure 3(d) show the morphological sponge NR based on NST/NR masterbatch at 30 and 70 phr, respectively. It was seen that the dispersion of cassava starch granule in the NR matrix was agglomerates in both cases. It was indicated that the interfacial interaction between cassava starch and NR matrix was poor.

Figure 3(c) and Figure 3(e) show the morphological sponge NR based on GST/NR masterbatch at 30 and 70 phr, respectively. It was observed that the both cases had better cassava starch dispersion than NST/NR at the same level of cassava starch. It was mention that the better interfacial interaction between cassava starch and NR matrix was obtained and allowed the improvement of mechanical properties of the sponge NR.

Conclusions

The cure time of sponge NR with NST/NR masterbatch or GST/NR masterbatch increased but the mechanical properties decreased with increasing of cassava starch contents, except 500% modulus. While the mechanical properties of sponge NR of GST/NR masterbatch a higher than that of NST/NR masterbatch.

Acknowledgement: We are extremely grateful to the Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand for providing financial support through the contact no. SCI570078S-1.

References

- [1] Information on <http://www.thainr.com/en/detail-stat.php?statID=212>
- [2] C. Nakason, A. Kaesman, S. Homsin, S. Kiatkamjornwong, Rheological and curing behavior of reactive blending. I. Maleated natural rubber–cassava starch, *J. Appl. Polym. Sci.*, 81 (2001) 2803-2813.
- [3] C. Nakason, A. Kaesaman, A. Rungvichaniwat, K. Eardrod, S. Kiatkamjornwong, Rheological and curing behavior of reactive blending. II. Natural rubber-g-poly(methyl methacrylate)–cassava starch, *J. Appl. Polym. Sci.*, 89 (2003) 1453-1463.
- [4] W. Saainumsai, Reactive Blending of Epoxidized natural rubber and cassava starch (master's thesis), in, Prince of Songkla University. Thailand., 2002.
- [5] A.I. Khalaf, E.M. Sadek, Compatibility study in natural rubber and maize starch blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, 125 (2012) 959-967.
- [6] Y.P. Wu, M. Ji, Q. Qi, Y.Q. Wang, L.Q. Zang, Preparation, Structure, and Properties of Starch/Rubber Composites Prepared by Co-Coagulating Rubber Latex and Starch Paste, *Macromol Rapid Commun*, 25 (2004) 565-570.
- [7] J. Shey, S.H. Imam, G.M. Glenn, W.J. Orts, Properties of baked starch foam with natural rubber latex, *Industrial Crops and Products*, 24 (2006) 34-40.
- [8] R.L. Shogren, J.W. Lawton, K.F. Tiefenbacher, Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties, *Industrial Crops and Products*, 16 (2002) 69-79.
- [9] Y.-P. Wu, G.-H. Liang, L.-Q. Zhang, Influence of starch on the properties of carbon-black-filled styrene–butadiene rubber composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 114 (2009) 2254-2260.
- [10] B.S. Zhang, X.F. Lv, Z.X. Zhang, Y. Liu, J.K. Kim, Z.X. Xin, Effect of carbon black content on microcellular structure and physical properties of chlorinated polyethylene rubber foams, *Materials & Design*, 31 (2010) 3106-3110.
- [11] M.S. Hassan, K.F. El-Nemr, Dye sorption characters of gamma irradiated foamed ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber/clay composites, *J. Ind. Eng. Chem.*, 19 (2013) 1371-1376.

- [12] J.-H. Kim, K.-C. Choi, J.-M. Yoon, The foaming characteristics and physical properties of natural rubber foams: Effects of carbon black content and foaming pressure J. Ind. Eng. Chem., 12 (2006) 795-801.
- [13] E.-K. Lee, S.-Y. Choi, Preparation and characterization of natural rubber foams: Effects of foaming temperature and carbon black content, Korean J. Chem. Eng., 24 (2007) 1070-1075.

Preparation and properties of sponge rubber based on natural rubber and cassava starch

Komsun Temna^a, Nitinart Saetung^{a*}, Anuwat Saetung^{b*}

^a Department of Materials Science and Technology, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand

^b Department of Rubber Technology and Polymer Science, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani campus, Pattani 94000, Thailand

* Corresponding authors: snitnart@hotmail.com (N. Saetung^a)

Tel. +66 (0)74 288374, Fax. +66 (0)74 288395

and sanuwat@hotmail.com (A. Saetung^b)

Tel. +66 (0)73 333963, Fax. +66 (0)73 312213

Keywords: natural rubber; sponge; cassava starch

Abstract

In this work, the sponge rubbers based on cassava starch masterbatch in latex phase with the difference technique (non-gelatinized and gelatinized cassava starch) were performed. The cassava starch contents from 0 to 70 phr were also studied. The cure characteristic, mechanical and morphological properties were investigated. It was found that the scorch time and cure time were increased with an increasing of cassava starch contents in both techniques. The mechanical properties *i.e.*, tensile strength, elongation at break and tear strength were decreased with an increasing of cassava starch contents, except 500% modulus. However, the sponge based on gelatinized technique gave the better mechanical properties than that of non-gelatinized cassava starch. The SEM micrographs of sponge NR from gelatinized technique were also able to confirm a good interfacial interaction between hydrophilic cassava starch and hydrophobic NR.

Introduction

Natural rubber (NR) is the most important in Thailand. Nowadays, they are produced rubber around 3.6 thousand tons in 2012 [1]. With the great mechanical properties through vulcanization, natural rubbers have been used in many products in many fields such as gloves, condoms, tires, rubber part and sponge. Though the natural rubber is a natural polymer, it does not easily to naturally degrade due to crosslink structure *via* vulcanization process. Cassava starch is an interesting natural polymer with an abundant, renewable source, bio-degradable, non-toxic and environmental friendly. It was used in the important starting material to produce bioplastics or to compound in other polymer for producing biopolymers. Many researchers also reported the blending of natural rubber and cassava starch with various techniques due to the problem of a different polarity of polymer. The modification of natural rubber was performed to increase the polarity such as maleated NR [2], NR-g-MMA [3], *via* epoxidation [4]. The adding compatibilizer of NR and cassava starch blends were investigated *i.e.*, maleic anhydride and glycidyl methacrylate [5] as well as maleated NR [2]. The other techniques to achieve uniform dispersion of cassava starch in latex matrix is directly compounding rubber latex with cassava starch and then co-coagulating the matrix has been developed [6]. The resulting cassava starch/rubber composites exhibited better mechanical properties compared with equivalent materials prepared by direct blending. But the mechanical properties were still low due to poor adhesion between two phases. However, the improvement of adhesion in both phases were able to modify cassava starch by gelatinization technique [6]. This technique is popular technique due to easier and more saving. In addition, the modifier is designed to interact with cassava starch and rubber to prevent hydrogen

bonding and crystallization of cassava starch and to improve compatibility between cassava starch and rubber [5].

In sponge rubber application, it has been even reported that the NR and cassava starch blends were used for preparation of baked cassava starch foams [7, 8], but it has been never reported in sponge rubber form of the blends. In this study, we are interesting to prepare cassava starch/NR masterbatch in latex phase with the difference technique (non-gelatinized and gelatinized cassava starch) and starch contents from 0 to 70 phr were preformed. The properties of sponge rubber also were investigated.

Experimental

Materials

Natural rubber (NR): ribbed smoked sheets (RSS-3) and high ammonia concentrated latex (HA latex) were obtained from Chana Latex Limited, Thailand. Cassava starch was purchased from General Cassava starch Limited, Thailand. Super cell using as a blowing agent was manufactured by A.F. Goodrich Chemical Limited, Thailand. The other chemicals in recipes were purchased from Behn Meyer Chemical (T) Limited, Thailand.

Preparation of cassava starch/NR masterbatch

The cassava starch/NR masterbatch in form of 70 phr were prepared into 2 strategies. The first method is non-gelatinized cassava starch/NR masterbatch. Natural cassava starch powder (NST) was added directly in HA latex were mixed and stirred vigorously for 0.5 h and coagulated then with 2 wt% calcium chloride aqueous (CaCl₂).

The other method is the gelatinized cassava starch (GST)/NR masterbatch[6]. Briefly, a 5% cassava starch aqueous suspension was stirred at 90 °C in a water bath for 1 h until the solution became transparent. When the solution was cooled to ambient temperature, a cassava starch paste was obtained. Cassava starch paste and the HA latex with stirring vigorously at the same condition, and then, about a 2 wt% CaCl₂ was added to coagulate.

The both coagulum were then washed several times with water and dried in an oven at 80 °C for 18 h. The NST/NR masterbatch and GST/NR masterbatch were obtained, respectively.

Preparation of sponge NR compounding

The cassava starch/NR masterbatch (various cassava starch contents from 0 to 70 phr) and other chemicals in Table 1 were mixed with a two-roll mill at 50–60 °C by a standard procedure. The sponge/NST compounds and sponge/GST compounds were vulcanized in a hydraulic press at 150 °C for the optimum cure time.

Table 1. Rubber compounds recipes

Ingredients	Weight (g)				
RSS-3	100	86	57	29	0
Cassava starch/NR masterbatch ^{1,2}	0	24	73	121	170
Cure behaviors					
Scorch time (min)	1.57	2.03 ¹ ,2.42 ²	2.15 ¹ ,2.57 ²	2.15 ¹ ,2.58 ²	2.12 ¹ ,3.04 ²
Cure time (min)	3.08	3.21 ¹ ,5.47 ²	3.48 ¹ ,5.57 ²	3.53 ¹ ,6.00 ²	3.56 ¹ ,6.29 ²

Ingredients: ZnO 5, Stearic acid 1, TBBS 1, IPPD 1, Super cell 5 and Sulphur 2.5 g

¹NST/NR masterbatch

²GST/NR masterbatch

Results and discussions

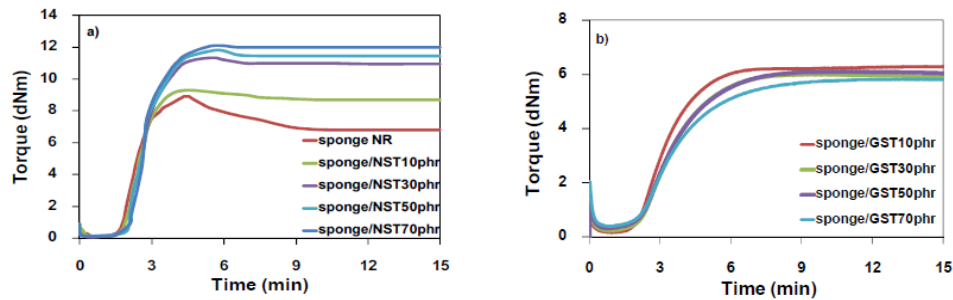


Figure 1. Cure curve of sponge NR compounds with various cassava starch contents, a) sponge/NST compounds and b) sponge/GST compounds.

The effect of cassava starch contents on the cure characteristics of sponge NR compounds shows in Table 1 and Figure 1. They show cure characteristic of sponge NR compounds based on both of NST/NR and GST/NR masterbatches. The scorch time and cure time of sponge NR compounds was increased with an increasing of cassava starch contents. It may be due to the smaller cassava starch particles had more hydroxyl groups exposed with the cassava starch/NR masterbatch and absorbed curing agents[9].

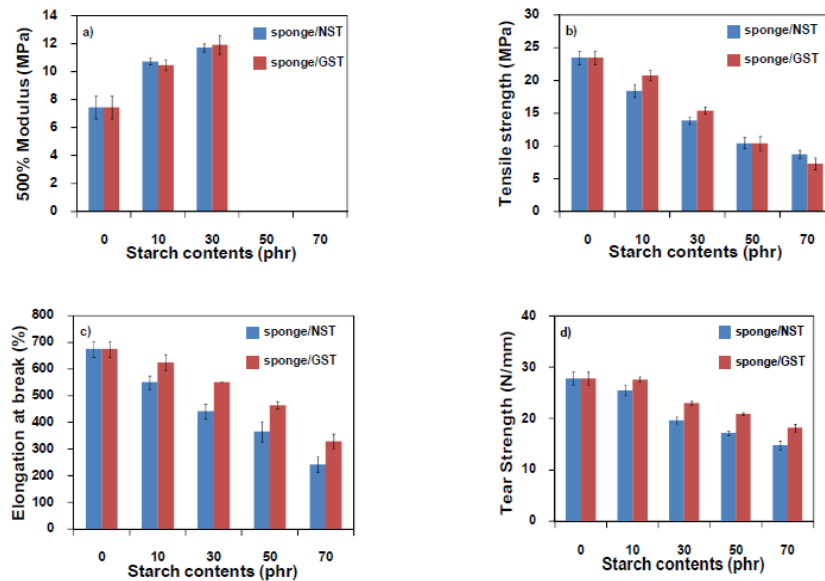


Figure 2. Mechanical properties of sponge NR vulcanizates with various cassava starch contents, a) 500% modulus, b) tensile strength, c) elongation at break and d) tear strength.

The effect of cassava starch contents (i.e., 0, 10, 30, 50, 70 phr) on the mechanical properties of sponge NR vulcanizates were studied. Figures 2 (a-d) represented, the modulus at 500%, tensile strength, elongation at break and tear strength, respectively. It was found that the modulus at 500%

of sponge NR was highest at starch contents 30 phr due to an increasing of rigid particle filler in NR matrix. However, the tensile strength, elongation at break and tear strength of the sponge NR were decreased with an increasing of cassava starch contents. It is due to an agglomerate of cassava starch particle in to NR attributed to the low interfacial interaction between the cassava starch and rubber matrix led to mechanical rupture at the blend interface[5]. However, sponge/GST gave the tensile strength, elongation at break and tear strength a higher than that of sponge/NST. It was due to a better dispersion of cassava starch in NR matrix as well as better interfacial interaction between hydrophilic cassava starch and hydrophobic NR could be expected, which would allow an improvement of mechanical properties of the sponge NR. In addition, the morphologies of sponge NR with SEM technique in Figure 3 (c and e) were also able to confirm this phenomenal.

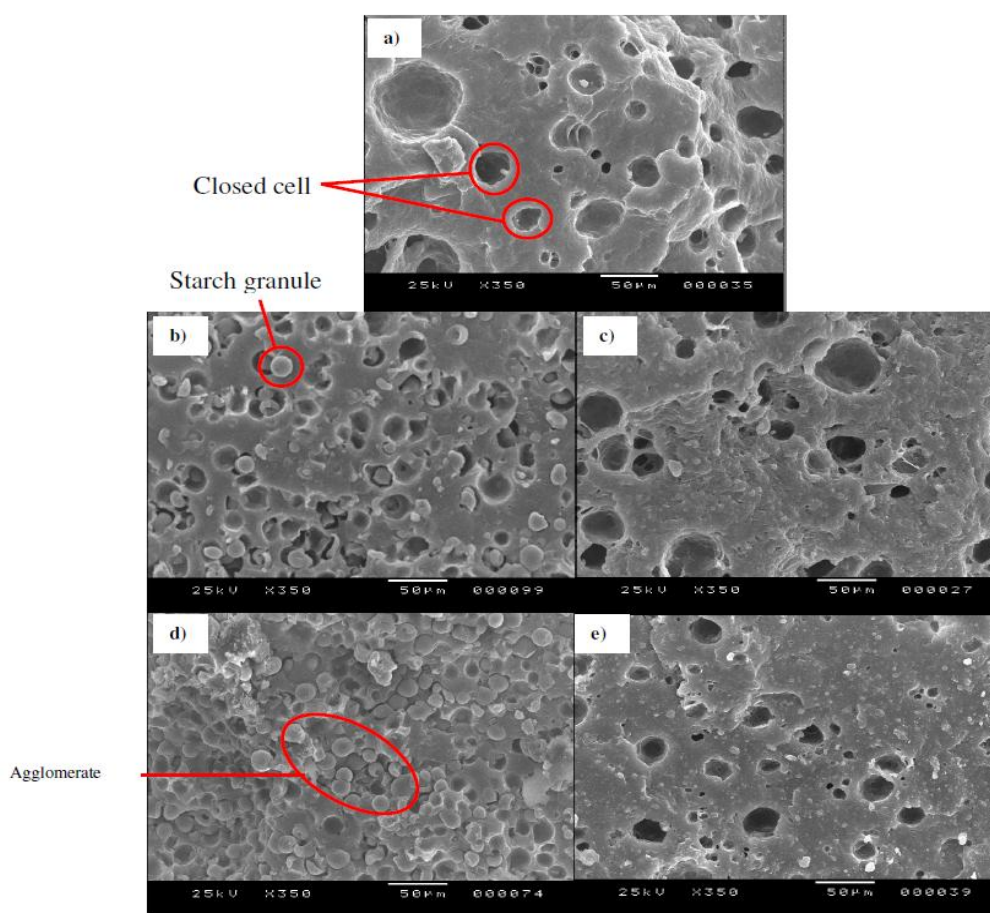


Figure 3. SEM micrographs of sponge NR a) 0 phr, b) sponge/NST 30 phr, c) sponge/GST 30 phr, d) sponge/NST 70 phr and e) sponge/GST 70 phr.

SEM micrographs of the freeze fractured surface of sponge NR were presented in Figure 3 (a-e). It was found that the dispersion of cassava starch in the sponge NR was not uniform with the increasing of cassava starch contents. It is due to differences in polarity of cassava starch and NR matrix. The closed cell structures from nitrogen gas by decomposition of the blowing agent were observed in Figure 3 (a-e). The cell size was decreased with an increasing of cassava starch contents [10-13] due to the increasing of melt viscosity of compound with incorporation of cassava starch.

Figure 3(b) and Figure 3(d) show the morphological sponge NR based on NST/NR masterbatch at 30 and 70 phr, respectively. It was seen that the dispersion of cassava starch granule in the NR matrix was agglomerates in both cases. It was indicated that the interfacial interaction between cassava starch and NR matrix was poor.

Figure 3(c) and Figure 3(e) show the morphological sponge NR based on GST/NR masterbatch at 30 and 70 phr, respectively. It was observed that the both cases had better cassava starch dispersion than NST/NR at the same level of cassava starch. It was mention that the better interfacial interaction between cassava starch and NR matrix was obtained and allowed the improvement of mechanical properties of the sponge NR.

Conclusions

The cure time of sponge NR with NST/NR masterbatch or GST/NR masterbatch increased but the mechanical properties decreased with increasing of cassava starch contents, except 500% modulus. While the mechanical properties of sponge NR of GST/NR masterbatch a higher than that of NST/NR masterbatch.

Acknowledgement: We are extremely grateful to the Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112, Thailand for providing financial support through the contact no. SCIS70078S-1.

References

- [1] Information on <http://www.thainr.com/en/detail-stat.php?statID=212>
- [2] C. Nakason, A. Kaesman, S. Homsin, S. Kiatkamjornwong, Rheological and curing behavior of reactive blending. I. Maleated natural rubber–cassava starch, *J. Appl. Polym. Sci.*, 81 (2001) 2803-2813.
- [3] C. Nakason, A. Kaesaman, A. Rungvichaniwat, K. Eardrod, S. Kiatkamjornwong, Rheological and curing behavior of reactive blending. II. Natural rubber-g-poly(methyl methacrylate)–cassava starch, *J. Appl. Polym. Sci.*, 89 (2003) 1453-1463.
- [4] W. Saainumsai, Reactive Blending of Epoxidized natural rubber and cassava starch (master's thesis), in, Prince of Songkla University. Thailand., 2002.
- [5] A.I. Khalaf, E.M. Sadek, Compatibility study in natural rubber and maize starch blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, 125 (2012) 959-967.
- [6] Y.P. Wu, M. Ji, Q. Qi, Y.Q. Wang, L.Q. Zang, Preparation, Structure, and Properties of Starch/Rubber Composites Prepared by Co-Coagulating Rubber Latex and Starch Paste, *Macromol Rapid Commun*, 25 (2004) 565-570.
- [7] J. Shey, S.H. Imam, G.M. Glenn, W.J. Orts, Properties of baked starch foam with natural rubber latex, *Industrial Crops and Products*, 24 (2006) 34-40.
- [8] R.L. Shogren, J.W. Lawton, K.F. Tiefenbacher, Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties, *Industrial Crops and Products*, 16 (2002) 69-79.
- [9] Y.-P. Wu, G.-H. Liang, L.-Q. Zhang, Influence of starch on the properties of carbon-black-filled styrene–butadiene rubber composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, 114 (2009) 2254-2260.
- [10] B.S. Zhang, X.F. Lv, Z.X. Zhang, Y. Liu, J.K. Kim, Z.X. Xin, Effect of carbon black content on microcellular structure and physical properties of chlorinated polyethylene rubber foams, *Materials & Design*, 31 (2010) 3106-3110.
- [11] M.S. Hassan, K.F. El-Nemr, Dye sorption characters of gamma irradiated foamed ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber/clay composites, *J. Ind. Eng. Chem.*, 19 (2013) 1371-1376.
- [12] J.-H. Kim, K.-C. Choi, J.-M. Yoon, The foaming characteristics and physical properties of natural rubber foams: Effects of carbon black content and foaming pressure *J. Ind. Eng. Chem.*, 12 (2006) 795-801.
- [13] E.-K. Lee, S.-Y. Choi, Preparation and characterization of natural rubber foams: Effects of foaming temperature and carbon black content, *Korean J. Chem. Eng.*, 24 (2007) 1070-1075.