

รายงานฉบับสมบูรณ์

การเตรียมและสมบัติของยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยางธรรมชาติและแป้ง
Preparation and properties of biodegradable sponge rubber based on natural rubber and starch

คณะนักวิจัย

ดร. นิธินาถ แซ่ตั้ง หัวหน้าโครงการ

ดร. อนุวัติ แซ่ตั้ง ผู้ร่วมโครงการ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินงบประมาณแผ่นดิน (งบบุทธศาสตร์)

ประจำปีงบประมาณ 2557 รหัสโครงการ SCI570078S-1

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...การเตรียมและสมบัติของยางฟองน้ำย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากยาง
ธรรมชาติและแป้ง

(ภาษาอังกฤษ)...Preparation and properties of biodegradable sponge rubber based on natural
rubber and starch

คณะผู้วิจัย

ดร. นิธินาถ แซ่ตั้ง หัวหน้าโครงการ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร. อนุวัติ แซ่ตั้ง ผู้ร่วมโครงการ

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของคุณวันดี โกยเต็ม ผู้ผลิตรองเท้า Chic shoe ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตัดพื้นรองเท้าฟองน้ำและสายยางคิบบรองเท้าสำหรับพื้นยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งชนิดต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่มอบความรู้ และทักษะด้านต่าง ๆ รวมถึงบิดามารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกคน ที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยแก่ผู้วิจัยเสมอมา

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำศึกษาการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งร่วมกับสารฟูเพื่อให้เกิดโครงสร้างเป็นโพรงในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้ยางฟองน้ำที่มีสมบัติความยืดหยุ่นที่ดี มีน้ำหนักเบา รับแรงกระแทกได้ดี และสามารถย่อยสลายได้จากธรรมชาติด้วยวิธีการฝังดิน จากการศึกษาพบว่า ปริมาณสารฟูที่ระดับ 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเตรียมยางฟองน้ำ และได้ทำการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr โดยจะทำการเตรียมแป้งมันสำปะหลังให้อยู่ในรูปมาสเตอร์แบทช์ 70 phr โดยนำแป้งมาผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ จากการศึกษาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ายางฟองน้ำที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเซลล์แบบปิด และการเพิ่มปริมาณแป้งมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้น สมบัติเชิงกลลดลง แต่การใส่แป้งมันสำปะหลังจะช่วยให้เกิดอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยางฟองจากการฝังดินได้เร็วขึ้น โดยจะวัดจากน้ำหนักที่หายไปหลังจากฝังดิน และ ลักษณะเซลล์มีขนาดใหญ่ขึ้น มีบางส่วนเกิดเป็นเซลล์เปิด และมีขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งหลุดออกมาจากบริเวณผิวยางลักษณะและระยะเวลาการฝังดินนานเป็นเวลา 6 เดือน จะมีอัตราการเสื่อมสภาพได้ดีกว่าการฝังดินเป็นเวลา 2 และ 4 เดือนตามลำดับ พร้อมกันนี้ได้ทำการศึกษาระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันกับสารเร่งแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ พบว่ายางฟองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะให้สมบัติทางเชิงกลดีที่สุด แต่สมบัติหลังการบ่มเร่ง และอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยางฟองน้ำจากการฝังดินต่ำที่สุด นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบชนิดของแป้งที่ใช้ระหว่างแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า ที่ปริมาณ 30 phr เมื่อใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ พบว่ายางฟองน้ำที่ผสมแป้งข้าวโพดจะให้สมบัติทางเชิงกลที่ดีกว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ แต่อัตราเร็วในการเสื่อมสภาพจากการฝังดินจะต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามแป้งจากธรรมชาติทั้งสามชนิดนี้สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นรองเท้าฟองน้ำ เหมาะจะเป็นวัตถุดิบในการนำไปใช้ในการผลิตรองเท้าฟองน้ำที่มีตรงกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

In this research, sponge based on natural rubber and starch including blowing agent was prepared. The targets of sponge were well cell distribution, good flexible, light weight, good impact resistance and biodegradable by soil burial method. It was found that the suitable content of blowing agent was 5 phr. In addition, the amounts of cassava starch were studied at various 0, 10, 30, 50, and 70 phr. The cassava masterbatch 70 phr was prepared by gelatinized technique. Scanning electron microscopy (SEM) images show the morphological properties of sponge. It was showed that all sponge had close cell. With increasing of cassava starch content, their density was increased, but their mechanical properties were decreased. However, the sponge based on cassava starch gave a higher degradation rate by soil burial test. The SEM image of sponge after soil burial test for 6 months was observed. It was seen that the some cells was opened and starch particle was out from sponge surface. The degradation rate of sponge at 6 months was better than that at 2 and 4 months, respectively. Moreover, the vulcanization systems of sponge (conventional, semi-efficient and efficient sulphur vulcanization) were also studied. It was found that the sponge used conventional system gave the best mechanical properties, but aging properties and degradation rate by soil burial test were the worst. Beside, the three types of starch (cassava, corn and rice starch) at 30 phr and used conventional system were studied. It was found that the core starch based sponge gave better mechanical properties than rice and cassava based. But the degradation rate by soil burial test of corn starch was the lowest rate. However, all three starches compound were able to well form to be eco-friendly sandal.

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| สารบัญ | ก |
| สารบัญรูป | ค |
| สารบัญตาราง | ฉ |
| กิตติกรรมประกาศ | ช |
| บทคัดย่อ | ซ |
| Abstract | ฅ |
| 1. บทนำ | 1 |
| 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 3 |
| 3. การตรวจเอกสาร | 3 |
| 3.1 แป้ง | 3 |
| 3.2 ยางธรรมชาติ | 6 |
| 3.3 ยางพองน้ำ | 9 |
| 4. วิธีดำเนินการวิจัย | 13 |
| 4.1 ศึกษาปริมาณยางที่ใช้ในการอัดเข้ายางพองน้ำ | 13 |
| 4.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟู่ต่อการเตรียมยางพองน้ำ | 13 |
| 4.3 ศึกษาเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง | 15 |
| 4.3.1 เทคนิคการผสมแป้งมันสำปะหลังไม่เจลาติไนซ์ในยางธรรมชาติ | 15 |
| 4.3.2 เทคนิคการผสมแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ลงในน้ำยางธรรมชาติ | 15 |
| 4.4 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน | 16 |
| 4.5 ศึกษาอิทธิพลของชนิดแป้งในการเตรียมยางพองน้ำ | 17 |
| 4.6 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกล | 17 |
| 4.6.1 การทดสอบความหนาแน่น | 17 |
| 4.6.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึง | 17 |
| 4.6.3 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด | 18 |
| 4.6.4 การทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด | 19 |
| 4.6.5 การทดสอบการบ่มแรงของยางด้วยอากาศร้อน | 20 |
| 4.6.6 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำด้วยเครื่อง SEM | 21 |
| 4.6.7 การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน | 21 |

สารบัญ(ต่อ)

| เรื่อง | หน้า |
|---|------|
| 5. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง | 22 |
| 5.1 ผลของปริมาตรยางที่ใช้ในการอัดเบ้ายางพองน้ำ | 22 |
| 5.2 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อการเตรียมยางพองน้ำ | 23 |
| 5.3 ผลของเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง | 35 |
| 5.4 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน | 40 |
| 5.5 ผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน | 56 |
| 5.6 ผลของชนิดของแป้งในการเตรียมยางพองน้ำ | 65 |
| 5.7 ลักษณะของพื้นรองเท้าที่เตรียมได้ | 77 |
| 6. สรุปผลการทดลอง | 78 |
| เอกสารอ้างอิง | 80 |
| ภาคผนวก | 83 |

Conference Proceeding : The 5th KKU International Engineering Conference, October 27-29
2014

Manuscript for conference proceeding : The 3rd International Congress on Advanced
Materials (AM 2016), 27-30 Nov 2016

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 3.1 | แบบจำลองโครงสร้างกรานูลของแป้ง | 5 |
| 3.2 | แบบจำลองโครงสร้างของอะมิโลเพกติน | 5 |
| 3.3 | สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะมิโลส | 5 |
| 3.4 | สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะมิโลเพกติน | 5 |
| 3.5 | พันธะเคมีการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลอย่างด้วยก้ำมะถัน | 9 |
| 4.1 | การเตรียมยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ | 14 |
| 4.2 | ลักษณะตัวอย่างขึ้นทดสอบรูปคัมเบลแบบ die C | 18 |
| 4.3 | ลักษณะตัวอย่างขึ้นทดสอบแบบมูม | 19 |
| 4.4 | ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด | 20 |
| 4.5 | อุปกรณ์ทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังดิน | 22 |
| 5.1 | ลักษณะยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ปริมาณสารฟู่ 1 phr ที่ใช้ปริมาตรยางระดับต่าง ๆ ในการอัด เบ้า | 23 |
| 5.2 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อเวลาที่ยางเริ่มสุก เวลาในการวัลคาไนซ์และดัชนีการวัลคาไนซ์ ของยางฟองน้ำ | 26 |
| 5.3 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าแรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุดของยางฟองน้ำ | 26 |
| 5.4 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำ | 29 |
| 5.5 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำ | 30 |
| 5.6 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์และระยะยืดจนขาดสัมพัทธ์ของ ยางฟองน้ำ | 31 |
| 5.7 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำ | 32 |
| 5.8 | ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าการเสีรูปหลังการกดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำที่ | 33 |
| 5.9 | (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังที่ปริมาณสารฟู่ระดับ ต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณสารฟู่ต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์ฟองน้ำ ที่ใช้ระบบ การวัลคาไนซ์แบบปกติ | 34 |
| 5.10 | ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ ก) ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง ไม่เจลาติไนซ์ ข) ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ | 36 |
| 5.11 | ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำ ก) 500% โมดูลัส ข) ความต้านทานต่อแรงดึง ค) ระยะยืด ณ จุดขาด ง) ความต้านทานต่อการฉีกขาด | 38 |
| 5.12 | ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลัง | 39 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.13 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาบไซ้ต่อค่าความหนาแน่นของยางพองน้ำ | 47 |
| 5.14 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อ ค่าโมดูลัสสัมผัสของยางพองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง (ก) ระบบการวัดคาบไซ้แบบปกติ (ข) ระบบการวัดคาบไซ้แบบกึ่งประสิทธิภาพ | 47 |
| 5.14 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อ ค่าโมดูลัสสัมผัสของยางพองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง (ต่อ) (ค) ระบบการวัดคาบไซ้แบบประสิทธิภาพ | 48 |
| 5.15 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาบไซ้ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมผัส และระยะยืดจนขาดสัมผัสของยางพองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง | 48 |
| 5.16 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาบไซ้ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมผัสของยางพองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง | 49 |
| 5.17 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาบไซ้ต่อค่าการเสวยรูปหลังการกดสัมผัสของยางพองน้ำ | 49 |
| 5.18 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์พองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัดคาบไซ้แบบปกติ | 53 |
| 5.19 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์พองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัดคาบไซ้แบบกึ่งประสิทธิภาพ | 54 |
| 5.20 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์พองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัดคาบไซ้แบบประสิทธิภาพ | 55 |
| 5.21 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อน้ำหนักที่หายไปหลังฝังดิน(ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัดคาบไซ้แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน | 60 |
| 5.22 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อค่า 100% โมดูลัสสัมผัส (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัดคาบไซ้แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน | 60 |
| 5.23 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อค่า 300% โมดูลัสสัมผัส (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัดคาบไซ้แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน | 60 |
| 5.24 ผลของปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมผัส (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัดคาบไซ้แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน | 61 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.25 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความต้านทานต่อการนิกซาดสัมพัทธ์ (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัดคาไนซ์แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน | 61 |
| 5.26 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ ที่ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (ก) ลักษณะก่อนฝังดิน (ข) ลักษณะหลังฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน | 63 |
| 5.27 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความหนาแน่นของยางพองน้ำ | 67 |
| 5.28 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ (ก) ผลทดสอบก่อนบ่มเร่ง และ (ข) ผลทดสอบหลังบ่มเร่ง ของยางพองน้ำ | 67 |
| 5.29 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มเร่ง ของยางพองน้ำ | 68 |
| 5.30 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มเร่งของยางพองน้ำ | 68 |
| 5.31 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านต่อการนิกซาดสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มเร่งของยางพองน้ำ | 69 |
| 5.32 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำ | 69 |
| 5.33 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อน้ำหนักที่หายไปหลังฝังดินที่เวลาต่าง ๆ | 73 |
| 5.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ใช้แป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 30 phr (ก) ลักษณะก่อนฝังดิน (ข) ลักษณะหลังฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน | 74 |
| 5.35 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน | 75 |
| 5.36 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน | 75 |
| 5.37 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพัทธ์ก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน | 76 |
| 5.38 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านทานต่อการนิกซาดสัมพัทธ์ก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน | 76 |
| 5.39 ตัวอย่างลักษณะพื้นรองเท้าพองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง 30 phr | 77 |
| 5.40 ลักษณะรองเท้าพองน้ำที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมแป้งข้าวโพด | 78 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 3.1 | การจำแนกระบบการวัดคาไนซ์ด้วยกำมะถัน | 8 |
| 4.1 | สูตรยางคอมพาวนด์ยางฟองน้ำที่ใช้ศึกษาปริมาณสารฟู | 14 |
| 4.2 | สูตรยางฟองน้ำที่ใช้ยางมาสเตอร์แบทช์แป้งปริมาณ 70 phr | 16 |
| 5.1 | ผลของปริมาณสารฟูต่อความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวด์ | 24 |
| 5.2 | ผลของปริมาณสารฟูต่อสมบัติการวัดคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ | 25 |
| 5.3 | อิทธิพลของปริมาณสารฟูและระบบการวัดคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวต่อสมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำ | 28 |
| 5.4 | อิทธิพลของเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติการวัดคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ | 36 |
| 5.5 | อิทธิพลของเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำ | 37 |
| 5.6 | ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาไนซ์ด้วยกำมะถันต่อค่าความหนืดมูนี้ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ | 41 |
| 5.7 | ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาไนซ์ด้วยกำมะถันต่อสมบัติการวัดคาไนซ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์ | 42 |
| 5.8 | สมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำวัดคาไนซ์ระบบปกติที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง | 44 |
| 5.9 | สมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำวัดคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง | 45 |
| 5.10 | สมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำวัดคาไนซ์ระบบประสิทธิภาพที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง | 46 |
| 5.11 | สมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน 2 เดือน | 57 |
| 5.12 | สมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน 4 เดือน | 58 |
| 5.13 | สมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน 6 เดือน | 59 |
| 5.14 | ผลของชนิดของแป้งต่อความหนืดมูนี้และลักษณะการวัดคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ | 65 |
| 5.15 | สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 30 phr | 66 |
| 5.16 | สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 30 phr หลังฝังดิน | 72 |

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ปัญหาสภาวะโลกร้อนเป็นที่ตระหนักและสนใจของสังคมมากขึ้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวส่วนหนึ่งมาจากการสังเคราะห์วัสดุพอลิเมอร์โดยใช้ปิโตรเคมีเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ถูกสังเคราะห์โดยใช้ปิโตรเคมีจึงเกิดปัญหาต่อสภาวะแวดล้อมเป็นอย่างมากเพราะพอลิเมอร์ดังกล่าวไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาพอลิเมอร์ชนิดใหม่คือพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติขึ้นทดแทนพอลิเมอร์ดังกล่าว

ยางธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งและเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดแรกที่ใช้ในพื้นฐานทั่วไปของอุตสาหกรรมยาง และยังคงเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานจนถึงปัจจุบัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญยิ่งของภูมิภาคอาเซียน โดยประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลกมาตั้งแต่ปี 2534 จนถึงปัจจุบัน และที่ผ่านมามีประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารา 16.89 ล้านไร่ ก่อให้เกิดกิจกรรมต่อเนื่องทั้งภาคการผลิต ภาคอุตสาหกรรม และภาคการตลาดเกี่ยวข้องกับทุกภาคส่วน ทั้งเกษตรกร ผู้ประกอบการ และภาครัฐ กระจายอยู่ทั่วประเทศไทย มีมูลค่าการส่งออกยางดิบ ผลิตภัณฑ์ยาง รวมทั้งอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราทำรายได้ให้ประเทศถึง 402,563 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2553) แม้ว่าประเทศไทยจะส่งออกยางธรรมชาติมากที่สุดของโลก แต่เป็นการส่งออกในรูปของวัตถุดิบถึงร้อยละ 86.15 ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ทั้งหมด ทำให้ไม่เกิดมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้ายาง ต้องพึ่งพาดตลาดต่างประเทศที่ส่งออก ทำให้ราคายางไม่มีเสถียรภาพ และมีความผันผวนไปตามตลาดต่างประเทศ ดังนั้นการวิจัยการจึงมีแนวคิดที่จะเตรียมผลิตภัณฑ์ชีวภาพจากยางธรรมชาติเพื่อเพิ่มการใช้งานรูปแบบใหม่ ๆ เพื่อส่งเสริมการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติอย่างยั่งยืนเป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นฐานทั่วไปของอุตสาหกรรมยางที่มีการใช้กำมะถันเป็นสารวัลคานาไนซ์เพื่อให้ยางเกิดการเชื่อมโยงแบบโครงสร้างร่างแห (Crosslink) ถึงแม้ยางธรรมชาติจะเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพก็ตามแต่เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแบบร่างแหทำให้เกิดเป็นปัญหาการย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ

ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาการย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติของยางธรรมชาติ ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการเตรียมยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมแป็ง เพราะแป็งเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีหน่วยซ้ำคือ กลูโคส ซึ่งเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและแป็งจึงสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ นอกจากนี้แป็งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากพืช ทำให้สามารถปลูกพืชใหม่และนำมาผลิตทดแทนได้ อีกทั้งไม่เป็นพิษต่อมนุษย์และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

หนึ่งในแป็งที่น่าสนใจคือ แป็งมันสำปะหลังเนื่องจากเป็นแป็งมันสำปะหลังได้จากการแปรรูปมันสำปะหลังซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของประเทศไทย จากการสำรวจของสมาคมที่เกี่ยวข้องกับการปลูกมันสำปะหลังประจำปี 2548/2549 ประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกทั้งสิ้น 6,469,530 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ 2,921 ตัน ผลผลิตรวม 18,897,080 ตัน ซึ่งเปรียบเทียบกับการผลิตในปี 2547/2548 จะเห็นว่า ทั้งพื้นที่ปลูก ผลผลิตต่อไร่ ผลผลิตรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.99 , 6.26 และ 11.56 ตามลำดับ (<http://www.mb.mahidol.ac.th/cassava/modules/AMS/index.php?storytopic=0&start=15> ค้นเมื่อวันที่ 2

กรกฎาคม พ.ศ. 2555) และในปัจจุบันนี้ประเทศไทยผลิตหัวมันสดเป็นอันดับ 3 ของโลก และมีการส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก แต่การส่งออกมันสำปะหลังยังคงประสบปัญหาในเรื่องของราคาผลผลิตตกต่ำ ดังนั้นการเพิ่มมูลค่าของมันสำปะหลังจึงมีความจำเป็นเพื่อเพิ่มรูปแบบใหม่ ๆ ในใช้งานมันสำปะหลังมากขึ้น เช่นการนำไปผลิตเอทานอลและการผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ

ดังกล่าวมาข้างต้น ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและสมบัติเชิงกลที่ดีและแปรงเป็นวัสดุย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดใหม่จากยางธรรมชาติและแป้งมาผลิตเป็นพอลิเมอร์ที่มีจุดเด่นของวัสดุทั้งสองเข้าไว้ด้วยกัน แต่อย่างไรก็ดี ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถผสมเข้ากับแป้งได้ เนื่องจากธรรมชาติทางเคมีที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) แต่แป้งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilicity) ทำให้เมื่อผสมพอลิเมอร์ทั้งสองเข้าด้วยกัน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยดังกล่าวสามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติให้มีขั้วเพิ่มขึ้นทำให้สามารถละลายน้ำได้ดีโดยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่มีขั้วในโมเลกุลของยางธรรมชาติ เช่น การปรับปรุงโดยปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน (Epoxidation) (วัชรินทร์, 2545) ปฏิกิริยาอื่น (Ene reaction) ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Nakason, *et al.*, 2001) กราฟต์ด้วยมอนอเมอร์ที่มีขั้วกลุ่มอะคริเลต (Rouilly, *et al.*, 2004, Nakason, *et al.*, 2005) หรือการพอลิเมอร์ไรซ์เซชันร่วมกับตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Tanrattanakul and Chumeka, 2010) เป็นต้น สำหรับแป้งนั้นสามารถดัดแปรโครงสร้างบางส่วนให้ชอบน้ำลดลงโดยผ่านกระบวนการทางเคมี ฟิสิกส์ หรือชีววิทยา (Liu, *et al.*, 2008, Kaur, *et al.*, 2012) นอกจากนี้อีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือการใส่สารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) ได้แก่ กลีเซอรอล ไชเลน เรซอลซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น (Kramárová, *et al.*, 2007, Carvalho, *et al.*, 2003, Tang, *et al.*, 2006) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกกว่าการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติ หรือของแป้ง และมีต้นทุนที่น้อยกว่า

ปัจจุบันมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของยางธรรมชาติกับแป้งในแง่ของการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติให้กลายเป็นยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (วัชรินทร์, 2545, Nakason, *et al.*, 2004) ยางธรรมชาติกราฟต์มอนอเมอร์กลุ่มอะคริเลต (Rouilly *et al.*, 2004; Nakason *et al.*, 2005) และยางธรรมชาติมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Nakason *et al.*, 2001) เพื่อศึกษารีเอกตีฟเบลนด์ของยางธรรมชาติดังกล่าวกับแป้ง หรือศึกษาการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ในการผสมยางธรรมชาติ หรือยางเอสปีอาร์กับแป้ง (Tang, *et al.*, 2006, Wu, *et al.*, 2004) ส่วนการเตรียมฟองน้ำจากพอลิเมอร์ผสมจากยางธรรมชาติและแป้งนั้น แป้งจะทำหน้าที่เป็นเมตริกซ์โดยมียางธรรมชาติบางส่วนเพื่อเป็นเพียงตัวประสาน ลักษณะการแปรรูปโม่ดังกล่าวจะอาศัยการอบ เพื่อให้แป้งผสมมีโครงสร้างเป็นฟองเกิดขึ้น โดยไม่มีสารเคมีเพื่อให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนซ์ และเป็นการฟุ้งซึ่งเรียกฟองน้ำดังกล่าวว่า Baked starch foam (Tanrattanakul and

Chumeka, 2010, Shey, *et al.*, 2006) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานวิจัยในส่วนของการเตรียมยางฟองน้ำ (Sponge rubber) จากยางธรรมชาติกับแป้ง

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยจะเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติกับแป้งโดยผ่านกระบวนการผสมร่วมกับสารฟูทำให้เกิดโครงสร้างเป็นโพรงในพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้ยางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติกับแป้งมีสมบัติความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา สมบัติเชิงกลดี รับแรงกระแทกได้ดี และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นพื้นรองเท้าฟองน้ำที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาสภาวะการเตรียม (ในน้ำยางธรรมชาติ และในยางแผ่นดิบ) และปัจจัยของสารเคมี (สารฟูในกลุ่ม Azo-dicarbonamide (ADC) ที่มีผลต่อการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติกับแป้ง
- 2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล โครงสร้าง และการย่อยสลายทางธรรมชาติของยางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติกับแป้ง
- 2.3 เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติกับแป้งซึ่งอาจที่จะนำไปประยุกต์เป็นในอุตสาหกรรมยางฟองน้ำต่อไป

3. การตรวจเอกสาร

คณะผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงปัญหาของการย่อยสลายได้ยากในยางฟองน้ำธรรมชาติโดยจุลชีพที่มีอยู่ในธรรมชาติ ดังนั้นทำให้ผู้วิจัยมีกรอบแนวคิดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการเตรียมยางฟองน้ำระหว่างยางธรรมชาติและแป้ง ซึ่งแป้งเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ของอะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพกติน (Amylopectin) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยจุลชีพ มาเป็นตัวผสมโดยเตรียมผ่านกระบวนการผสมร่วมกับสารฟูทำให้เกิดโครงสร้างเป็นโพรงในพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้ยางฟองน้ำที่เตรียมจากยางธรรมชาติกับแป้งมีสมบัติความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา สมบัติเชิงกลดี รับแรงกระแทกได้ดี และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นวัสดุกันกระแทก ผลิตภัณฑ์บรรจุหีบห่อ หรือพื้นรองเท้าฟองน้ำที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในที่นี้บททวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องคือ แป้ง ยางธรรมชาติ และยางฟองน้ำซึ่งเป็นส่วนสำคัญหลักของงานวิจัยนี้

3.1 แป้ง

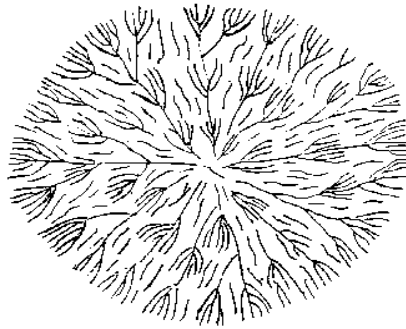
แป้งคือสารประกอบของอะมิโลส (Amylose) และอะมิโลเพกติน (Amylopectin) มีโครงสร้างของเม็ดแป้ง (Starch granule) แสดงดังในรูปที่ 3.1 ส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้งเป็นอะมิโล

เพกติน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเกลียวคู่ (Double helices) รวมกันเป็นเกลียวขนาดใหญ่ (Superhelical structure) ที่มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ผลึก (Crystalline polymer) โครงสร้างที่มีระเบียบที่สามารถบรรจุพอลิเมอร์สายโซ่สั้นกว่าไว้ภายในได้ การจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งของแป้งประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline regions) และในส่วนที่เป็นโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous regions) ของสายโซ่บริเวณที่พับกัน หรือมีกิ่งสาขาซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นบริเวณที่โมเลกุลขนาดเล็กเช่น น้ำสามารถเข้าไปละลายได้ โครงสร้างของอะมิโลสทั่วไปเป็นชนิดสายโซ่ตรงของน้ำตาลกลูโคส 1,000-6,000 หน่วย เกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะ α -1,4 ที่อาจมีกิ่งสาขาสั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 อะมิโลสในแป้งจะมีขนาดขึ้นกับชนิดแป้งเช่น อะมิโลสในแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโดยเฉลี่ย 2,600 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส โครงสร้างสามารถเป็นเกลียวที่มักจะมีโมเลกุลของไขมันเกาะอยู่ด้วยอยู่ในกรานูล รวมทั้งโครงสร้างเป็นอะมิโลสอิสระที่เกิดจากการคลายเกลียวออก ซึ่งขึ้นกับอายุของแป้ง ทำให้มีการจัดเรียงตัวที่แน่นขึ้นเป็นผลให้การละลายในน้ำเกิดได้ไม่ดี ในขณะที่โครงสร้างของอะมิโลเพกตินเป็นกิ่งก้านของน้ำตาลกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วยเกาะเกี่ยวกันด้วยพันธะ α -1,4 และ α -1,6 ดังแสดงในรูปที่ 3.4

องค์ประกอบของแป้งที่แตกต่างกันทำให้แป้งแต่ละชนิดต่างกัน ส่งผลต่อสมบัติของแป้งเช่น ความหนืดขณะแป้งเปียก (Hot paste viscosity) เนื้อแป้ง (Texture) ความใส (Clarity) และความคงตัว (Stability) สำหรับแป้งมันสำปะหลังจะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ประโยชน์ในแง่การบวมตัวหรือการละลายน้ำ เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลเพกตินในอัตราส่วนที่สูงกว่าแป้งชนิดอื่น ๆ

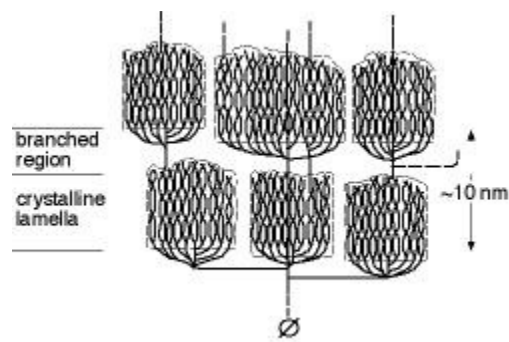
ลักษณะจำเพาะที่สำคัญของแป้งได้แก่การเกิดเจลาติไนซ์ (Gelatinization) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแป้ง (Native starch) ไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดเจลาของแป้งนั้นๆ สาเหตุที่แป้งไม่สามารถละลายในน้ำเย็นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากที่มีอยู่ภายในกรานูล การเปลี่ยนแปลงของกรานูลในน้ำเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อให้ความร้อนกรานูลจะเริ่มบวมอย่างไม่ผันกลับ (Irreversible swelling) เกิดขึ้นได้ในส่วนของอสัณฐาน (Amorphous regions) และบวมขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกและโมเลกุลของน้ำแทรกตัวได้ (Hydration) และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โครงสร้างที่เป็นระเบียบถูกรบกวน ณ จุดนี้เองที่กรานูล

เกิดการเสียโพลาไรเซชัน หรือมีการสูญเสียสมบัติบริฟรินเจนซ์ (Birefringence) เมื่อผ่านลำแสงโพลาไรซ์ และความเป็นผลึก (Crystallinity) ลดลง เพราะเกลียวการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพกตินคลายตัวออก การละลายจึงเกิดได้ดีแป้งจะเหนียวขึ้น ซึ่งคำว่า Gelatinization จะใช้กับปรากฏการณ์เช่นนี้ ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดดังกล่าว กรานูลจะเกิดการแตกออก เมื่อให้ความร้อนต่อไป โมเลกุลอะมิโลสอิสระจะหลุดออกมาได้ ทำให้ความหนืดของสารละลายสูงขึ้น และเนื่องจากกรานูลของแป้งมีขนาดไม่เท่ากัน กรานูลที่เล็กกว่าจะเริ่มเกิดเจลาที่อุณหภูมิสูงกว่า ดังนั้นการเกิดเจลาของแป้งจึงไม่สามารถบอกอุณหภูมิที่แน่นอนได้ บอกได้เพียงช่วงของอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมินี้ขึ้นกับชนิดของแป้ง ขนาดกรานูลและปริมาณอะมิโลเพกติน (วัชรินทร์, 2545)



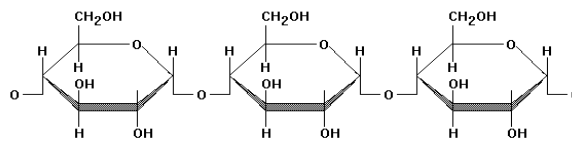
รูปที่ 3.1 แบบจำลองโครงสร้างกรานูลของแป้ง

(<http://members.home.nl/ajansma/zetmeel/infoe/chapter2.htm>, accessed 2 July 2012)



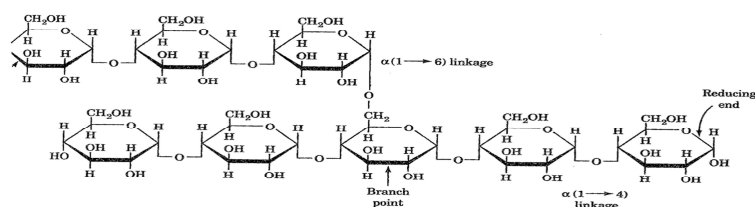
รูปที่ 3.2 แบบจำลองโครงสร้างของอะมิโลเพกติน

(http://www.bbmb.iastate.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=6, accessed 2 July 2012)



รูปที่ 3.3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะมิโลส

(<http://www.mansfield.ohio-state.edu/~sabedon/biol1025.htm> , accessed 2 July 2012)



รูปที่ 3.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของอะมิโลเพกติน

(http://www.science.smith.edu/departments/Biochem/Biochem_353/amyase.html, accessed 2 July 2012)

3.2 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส 1,4 - พอลิไอโซพรีน (*cis*-1,4 polyisoprene) กล่าวคือ ในโมเลกุล ยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว โดยทั่วไปยางธรรมชาติ จะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1,000,000 ถึง 3,000,000 g/mol และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72°C

สมบัติทั่วไปเด่น ๆ ของยางธรรมชาติ (พงษ์ธร, 2547) ได้แก่ ความยืดหยุ่น (Elasticity) สมบัติด้านความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกกระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม

ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติ มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง ทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อแรงดึงสูงมากถึงแม้จะไม่ได้ผสมสารตัวเติมชนิดเสริมแรงเข้าไป

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ในขณะถูกดึงให้ยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปจะช่วยทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้นอีกด้วย

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue resistance) ที่สูงมากด้วย

ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการสึกหรอสูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น ๆ

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้าเกิดการคงรูปจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็น โครงร่างตาข่ายสามมิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเกิดแค่การบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น แต่ยางจะสามารถทนทานต่อ

ของเหลวที่มีขี้ เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์นอกจากนี้ก็ยังสามารถทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่จะไม่ทนต่อกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะที่ไม่อิ่มตัว (พันธะคู่) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนเป็นเวลานาน ๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ

การเซตตัวหลังการอัด (Compression set) ยางธรรมชาติมีค่าการเซตตัวหลังการอัดหรือการยุบตัวค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางธรรมชาติจะมีค่าการยุบตัวที่สูงขึ้น เนื่องจากอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงยางธรรมชาติจะไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการยุบตัวจึงสูงขึ้น

การกระเด็ง (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเด็งกระดอนสูงและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิการใช้งาน (Service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 ถึง 70 °C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนาน ๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่ถ้าอุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ก็จะด้อยลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในการออกสูตรยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมยางธรรมชาติอาจสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 หรือ 100 °C

อย่างไรก็ตาม ยางดิบยังคงมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อได้รับความร้อน และจะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารวัลคาไนซ์ และสารตัวเติมต่าง ๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสมยางและสารเคมีจนเข้ากัน จะเรียกยางที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วว่ายางคอมพาวนด์ (Rubber compound) และจะนำยางคอมพาวนด์ที่ได้ไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ จะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย

ระบบ การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถัน

การวัลคาไนซ์ คือ กระบวนการเปลี่ยนยางที่อยู่ในสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปร่างได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยใช้สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติโดยทั่วไปจะนิยมใช้กำมะถัน (Sulphur) และเปอร์ออกไซด์ โดยระบบการวัลคาไนซ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับยางธรรมชาติคือระบบกำมะถัน เมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อโดนความร้อนไม่เหลว และเมื่อได้รับเย็นก็จะไม่แข็ง ไม่มีกลิ่นและไม่เหนียว เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะ กำมะถันทำให้โมเลกุลเกิดการเชื่อมต่อกัน

ระบบการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถันจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของกำมะถันและสารตัวเร่ง โดยมีการจำแนกดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การจำแนกระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (พรพรรณ, 2528)

| Vulcanization system | Sulphur (phr) | Accelerator (phr) | Accelerator/ Sulphur Ratio |
|----------------------|---------------|-------------------|----------------------------|
| CV | 2.0-3.5 | 1.0-0.4 | 0.1-0.6 |
| Semi-EV | 1.0-1.7 | 2.4-1.2 | 0.7-2.5 |
| EV | 0.4-0.8 | 5.0-2.0 | 2.5-12 |

- การวัลคาไนซ์ระบบปกติ (Conventional vulcanization system, CV)

การวัลคาไนซ์ในระบบปกติ เป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุดในระบบทั้งหมด โดยปกติจะใช้กำมะถัน 2.5 ส่วน สารตัวเร่ง 0.5 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของกำมะถันมากกว่าหนึ่งอะตอมต่อหนึ่งพันธะ (Polysulphidic linkage) พบว่าในหนึ่งการเชื่อมโยงจะใช้กำมะถัน 1-6 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยส่วนใหญ่ทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการล้าดี นอกจากนั้นยังมีสมบัติการต้านการตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่ไม่ต้านทานต่อการ Reversion ทำให้ สมบัติของยางลดลงเมื่ออบยางสุกเกินไป หรือเสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์

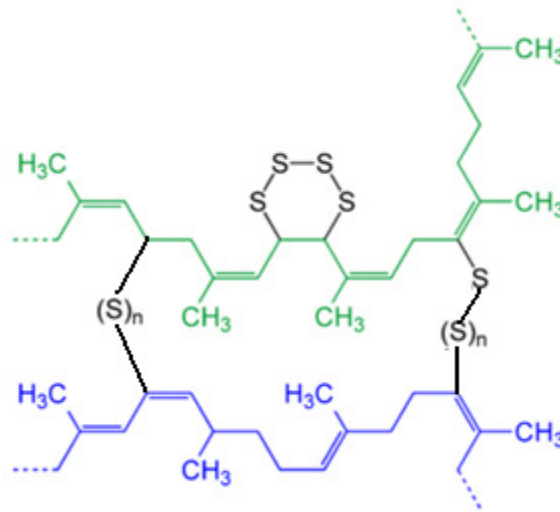
- การวัลคาไนซ์ระบบแบบมีประสิทธิภาพ (Efficiently vulcanization system, EV)

การวัลคาไนซ์ในระบบแบบมีประสิทธิภาพเป็นการปรับปรุงระบบการวัลคาไนซ์ให้มีการใช้กำมะถันอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ให้เป็นแบบการใช้กำมะถันหนึ่งอะตอมต่อหนึ่งพันธะเชื่อมโยง (Monosulfidic crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยการเพิ่มสัดส่วนของสารตัวเร่งในกลุ่มไซยูเรมไดซัลไฟด์ กับซัลฟิโนไมด์ ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่มีสมบัติเป็นสารให้กำมะถัน (Sulphur donor) ต่อกำมะถันให้

สูงขึ้น ซึ่งผลของการปรับปรุงนี้ทำให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 90 เป็น Monosulfidic linkage การวัลคาไนซ์ระบบแบบมีประสิทธิภาพนั้นจะให้สมบัติการต้านทานต่อการ Reversion ดี สมบัติในการทนทานต่อความร้อนดี สมบัติการด้านการเสื่อมเนื่องจากการถูกออกซิไดซ์ และมีสมบัติการจัดตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ดีแต่สมบัติทางกลด้อยกว่าการวัลคาไนซ์ระบบ

- การวัลคาไนซ์ระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficiently vulcanization system , Semi-EV)

การวัลคาไนซ์ในระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพเป็นระบบที่มีการใช้ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งอยู่กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ระบบปกติและการวัลคาไนซ์ระบบแบบมีประสิทธิภาพ ทำให้ได้ยางที่มีสมบัติทางกลและความต้านทานการเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้



รูปที่ 3.5 พันธะเคมีการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน

3.3 ยางฟองน้ำ

การผลิตโฟมพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือการทำให้เกิดฟองก๊าซ (Bubbles) กระจายตัวในพอลิเมอร์แล้วเพิ่มขนาดของฟองก๊าซ ก่อนทำให้ระบบเสถียรซึ่งจะได้โครงสร้างโฟมพอลิเมอร์ กระบวนการผลิตโฟมแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ตามชนิดของพอลิเมอร์ดังนี้ (Daniel and Vahid, 1991)

1. โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) พอลิเมอร์จะถูกหลอมเป็นของไหล ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นถูกทำให้คงรูปหรือเสถียรด้วยความเย็น จนกระทั่งพอลิเมอร์โฟมคงรูป เช่น โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิเอทิลีน เป็นต้น

2. โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset foam) การเกิดฟองก๊าซจะเกิดขึ้นในขณะที่พอลิเมอร์ยังสามารถไหลได้อยู่ และฟองก๊าซจะขยายตัวไปพร้อม ๆ กับการเกิดพันธะเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ทำให้คงรูปได้ เช่น โฟมยาง โฟมพอลิยูรีเทน เป็นต้น

3. น้ำยาง (Latex) เกิดฟองก๊าซจากการผสมร่วมกับสบู่แล้วทำให้ฟองก๊าซคงรูปโดยทำการลดค่าความเป็นกรดต่ำลงหรือลดอุณหภูมิจนกระทั่งถึงจุดเยือกแข็ง และตามด้วยกระบวนการวัลคาไนซ์เพื่อให้พอลิเมอร์คงรูป

ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการทำให้เกิดโครงสร้างเป็นโพรงในพอลิเมอร์อาจได้มาจากอากาศที่ผ่านกระบวนการตีปั่นของเหลวหรือได้จากสารละลายจุดเดือดต่ำเช่น เพนเทน ไดคลอโรมีเทน เป็นต้น โดยละลายในพอลิเมอร์แล้วทำให้เป็นก๊าซโดยเพิ่มความร้อนหรือลดความดันหรืออาจจะเกิดจากปฏิกิริยาภายในระบบเช่น ปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับไดไอโซไซยานเนตหรือเกิดจากการสลายตัวของสารฟูซิดอะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide) ฟองก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้นช่วงเริ่มต้น จะขยายใหญ่ขึ้นโดยการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าสู่ฟองก๊าซโดยใช้ความร้อนหรือการลดความดันหรือเกิดการรวมตัวกันของฟองก๊าซเข้าด้วยกัน (Coalescence) ถ้าผนังเซลล์ (Cell membrane) รอบ ๆ ฟองก๊าซยังคงรูปอยู่ได้ลักษณะเซลล์ที่ได้จะเป็นเซลล์ปิด (Close cell) แต่ถ้าหากผนังเซลล์แตกออกบางส่วนหรือทั้งหมดจะได้เป็นเซลล์เปิด (Open cell) อย่างไรก็ตามการแตกของผนังเซลล์ก่อนเวลาที่พอลิเมอร์จะค้าโครงสร้างไว้ได้ก็จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยุบตัวของโฟมได้

ยางฟองน้ำ เตรียมได้จากยางคอมพาวนด์ที่มีสารฟูและสารวัลคาไนซ์ โดยทั่วไปสารฟูจะให้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในขั้นตอนแรกความร้อนในกระบวนการวัลคาไนซ์จะทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดลดลงจนกระทั่งยางคอมพาวนด์เริ่มวัลคาไนซ์ ความหนืดจะสูงเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากสารฟูสลายตัวก่อนความหนืดต่ำสุดจะมีผลให้ยางฟองน้ำที่มีลักษณะเป็นเซลล์แบบเปิด เนื่องจากการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และผนังเซลล์เกิดการแตกก่อนเกิดการเชื่อมโยงอย่างสมบูรณ์ ทำให้ผนังเซลล์เชื่อมต่อกันและอากาศ ของเหลว สามารถไหลผ่านระหว่างเซลล์ได้ ในทางตรงกันข้ามในกรณียางฟองน้ำที่มีเซลล์ลักษณะแบบปิด เกิดจากการที่สารฟูสลายตัวขณะที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น ดังนั้นผนังเซลล์เกิดการคงรูปพอดี และจะไม่เกิดการแตกเมื่อฟองขยายตัวอย่างสมบูรณ์ เซลล์แบบปิดมีโครงสร้างเป็นเซลล์ที่ไม่เชื่อมต่อกันโดยที่ภายในเซลล์กักก๊าซไว้ในเนื้อยางวัลคาไนซ์

ยางฟองน้ำ มีรูปแบบที่ใช้โดยทั่วไปทั้งวัสดุที่มีเซลล์แบบเปิดและแบบปิด โดยใช้สารฟูเป็นสารให้ก๊าซ สารฟูที่สำคัญนิยมใช้ในการผลิตยางฟองน้ำได้แก่

1. Azodicarbonamide (ADC)
2. P, P'-Oxybis Benzene Sulfonyl Hydrazide (OBSH)
3. Dinitroso Pentamethylene Tetramine (DNPT)

การผลิตยางฟองน้ำเชิงการค้าเกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1856 ในประเทศอังกฤษ (Rowland, 1993) และมีการผลิตยางฟองน้ำขึ้นเป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1902 โดยบริษัท B.F. Goodrich Co., Ltd. ผลิตโฟมแบบเซลล์เปิดขนาดใหญ่โดยใช้แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) และเมื่อมีการนำสารตัวเร่งและสารแอนติออกซิแดนท์มาใช้ในยางในปี ค.ศ. 1920 ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตยางฟองน้ำขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์โดยใช้ไอน้ำ ในระยะหลังการผลิตยางฟองน้ำสามารถใช้เทคนิคง่าย ๆ เช่น การอัดแบบพิมพ์ การเอกซ์ทรูด เป็นต้น สำหรับสารฟูที่ใช้สำหรับการผลิตยางฟองน้ำแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้

1. สารฟูทางเคมี คือสารฟูประเภทที่ให้ก๊าซจากการสลายตัวของสารฟูเมื่อได้รับความร้อนได้แก่ สารฟูชนิดอินทรีย์ ตัวอย่างในกลุ่มนี้คือ สารฟูชนิด Azo compound ให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นหลัก สารฟูชนิดอนินทรีย์ ตัวอย่างในกลุ่มนี้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก

2. สารฟูทางกายภาพ คือสารฟูที่เป็นของเหลวมีจุดเดือดต่ำเช่นกลุ่มอะลิฟาติก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน ฮาโลจีเนต เป็นต้น ก๊าซที่ได้รับคือชื่อของเหลวที่ระเหยตัวขึ้นเมื่อได้รับความร้อนหรือลดความดันลง

3. การใช้ก๊าซโดยตรง ทำโดยละลายก๊าซให้อิ่มตัวในสารละลายหรือพอลิเมอร์เหลว ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง จากนั้นก๊าซจะขยายตัวในพอลิเมอร์ด้วยการลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิ โดยเซลล์จะเกิดขึ้นและขยายตัวต่อไป จนกระทั่งพอลิเมอร์แข็งตัวหรือเกิดการวัลคาไนซ์ กลุ่มก๊าซที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ก๊าซไนโตรเจนเพราะไม่เป็นพิษและเฉื่อย ไม่ติดไฟ เป็นต้น

Shey *et al.* (2006) ศึกษาสมบัติของโฟมที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอบ (Baked) โดยใช้น้ำยางธรรมชาติและแป้งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลี และแป้งข้าวโพดเป็นสารตั้งต้น พบว่าการใช้น้ำยางร่วมในการเตรียมโฟมนั้นมีผลให้สมบัติการหักงอที่ดีขึ้น ความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นในแป้งทุกชนิด ตัวอย่างเช่น ในกรณีของแป้งมันฝรั่งระยะยืดที่เพิ่มขึ้นจาก 1.74% ไปเป็น 2.78% เมื่อผสมน้ำยางไป 0 ถึง 27% ตามลำดับ และทำให้การดูดความชื้นลดลงอีกด้วย

Kramárová *et al.* (2007) ศึกษาสมบัติของยางเอส บี อาร์ (SBR) วัลคาไนซ์ซึ่งใช้แป้งเป็นสารตัวเติม พบว่าการผสมยางเอส บี อาร์ กับแป้งร่วมกับพลาสติกไซเซออร์จะให้สมบัติเชิงกลดีกว่าไม่ใส่สารพลาสติกไซเซออร์ นอกจากนี้การใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์จะให้ผลดีกว่าการใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล และให้สมบัติเชิงกลสูงกว่ากรณีไม่ใช้พลาสติกไซเซออร์ประมาณ 2 เท่า

Nakason *et al.* (2005) ศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางคอมพาวด์ที่ได้จากยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาครีเลต (NR-g-PMMA) และแป้งมันสำปะหลัง พบว่าเวลาสุกที่อุณหภูมิสูงและเวลาสุกของยางลดลง ค่าทอร์คสูงสุด ค่าทอร์คต่ำสุด ความแข็งมีค่าเพิ่มเมื่อเพิ่มปริมาณของแป้งมันสำปะหลัง แต่อย่างไรก็ตามสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้ม และระยะยืดขาดลดลง

Liu *et al.* (2008) คัดแปรโมเลกุลแป้ง (Modified starch paste, MST) โดยผ่านกระบวนการฟอสโฟลิเมอร์ไรเซชันด้วยบิวทิลอะคริเลต มอนอเมอร์ (Butylacrylate monomer) เพื่อนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยผสมเป็นมาสเตอร์แบทในสถานะน้ำยาง จับตัวและอบแห้งก่อนนำไปผสมกับสารเคมีอื่น ๆ พบว่า การใช้ MST เป็นสารตัวเติมสามารถเสริมแรงของยางวัลคาไนซ์โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกลที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีแป้งที่ไม่ผ่านการคัดแปร และยังพบว่าการกระจายตัวของ MST ในยางคอมพาวด์ดีกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการคัดแปร ด้วยเครื่อง SEM และ XRD

Rodriguez-Perez *et al.* (2012) ศึกษาการเตรียมโพลียเอทิลีนอะซิเตต (Ethyl vinyl acetate copolymer, EVA ที่ปริมาณเอทิลีน 28%) กับผงแป้งข้าวโพดร่วมกับสารฟู ในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 80 C พบว่า ความต้านทานต่อแรงกด ความแข็ง ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแป้งที่เพิ่มขึ้น แต่ขนาดของเซลล์ สมบัติการคืนรูปลดลง ในขณะที่ปริมาณแป้ง 70% สามารถย่อยสลายได้มากถึง 60% ในเวลา 100 วัน

Tang *et al.* (2006); Wu *et al.* (2006) และ Wu *et al.* (2004) ศึกษาผลของการเสริมแรงของแป้งในยางเอส บี อาร์ โดยเตรียมมาสเตอร์แบท ของยางเอส บี อาร์ กับแป้งข้าวโพดเจลาตินไนซ์ ในสถานะน้ำยาง และจับตัวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ล้างและอบแห้ง ก่อนนำยางมาสเตอร์แบทไปผสมสารเคมีต่างๆ โดยศึกษาผลสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้แก่ ไซเลน เรโซลซินอล-ฟอร์มมาดีไฮด์ เปรียบเทียบกับสูตรควบคุมซึ่งไม่ใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่า การผสมใช้เป็นสารตัวเติมร่วมกับสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้งสองชนิดให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าสูตรควบคุม

Khalaf and Sadek (2012) เตรียมคอมพาวด์ของยางธรรมชาติร่วมกับผงแป้งข้าวโพดบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ศึกษาการแปรปริมาณของแป้ง และอิทธิพลของสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าสมบัติเชิงกลลดลง อัตราการวัลคาไนซ์ช้าลง ค่าทอร์คสูงสุดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพด อย่างไรก็ตามการใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้เช่น Maleic anhydride (MAH) หรือ Glycidyl methacrylate (GMA) 1 phr ของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้อัตราส่วนระหว่างยางกับที่ 90/10 ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล และการใช้ MAH จะให้ค่าโมดูลัสและความแข็งที่มากกว่าการใช้ GMA

Tanrattanakul and Chumeka (2010) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของโพลีเอทิลีนอะซิเตตจากแป้งที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังกับยางธรรมชาติ โดยมียางธรรมชาติกราฟต์ด้วยแป้งมันสำปะหลังเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าการผสมยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยแป้งมันสำปะหลังเข้าไป ทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น แต่ไม่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อการหักงอ ในส่วนสมบัติการย่อยสลายภายในดินของโพลีเอทิลีนอะซิเตต พบว่าโพลีเอทิลีนอะซิเตตที่มียางธรรมชาติอยู่ธรรมชาติอยู่ 15 phr จะสลายหมดภายใน 18 สัปดาห์

Pawlikowski (2003) ร่วมกับบริษัทบริดจสโตน ยื่นจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการเตรียมยางคอมพาวด์สูตรที่นำไปผลิตดอกยางรถยนต์และผสมร่วมกับมาสเตอร์แบทของยางเอส บี อาร์ชนิดอิมัลชัน ผสมกับแป้งในสัดส่วน 50/50 ปริมาณ 15 phr เพื่อใช้ทดแทนซิลิกา และสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 2.9 phr เปรียบเทียบ

สูตรที่นำไปผลิตดอกยางรถยนต์ทั่วไปของบริษัทบริดจิสโตนที่มีการใช้ซิลิกาพร้อมกับเขม่าดำ พบว่าให้สมบัติที่ดีเหมาะที่จะนำไปผลเป็นสูตรผลิตดอกยางรถยนต์

Materne and Corvasce (2001) ร่วมกับบริษัทกู๊ดเยียร์ ยื่นจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการเตรียมยางคอมพาวด์สูตรที่นำไปผลิตดอกยางรถยนต์ และผสมร่วมกับมาสเตอร์แบทของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมกับแป้งในสัดส่วน 60/40 ในปริมาณเพียง 5 phr และมีการใช้สารออร์กาโนไซเลนสองชนิดไดซัลไฟด์ (Disulfide) และชนิดพอลิซัลไฟด์

Corvasce and Fourgon (2005) ร่วมกับบริษัทกู๊ดเยียร์ ยื่นจดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการเตรียมยางคอมพาวด์สูตรที่นำไปผลิตดอกยางรถยนต์ และผสมร่วมกับ เขม่าดำ ซิลิกา และมาสเตอร์แบทของพอลิเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์ ผสมกับแป้งในสัดส่วน 60/40 ในปริมาณเพียง 8 phr และมีการใช้สารออร์กาโนไซเลนชนิดพอลิซัลไฟด์

4. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยในโครงการนี้จะศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในการเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ ผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ต่าง ดังนี้

4.1 ศึกษาปริมาณยางที่ใช้ในการอัดเบ้ายางฟองน้ำ

ทำการศึกษาปริมาณของยางที่ใช้สำหรับการอัดเบ้าที่ระดับ 40, 45 และ 50% ของเบ้าที่อุณหภูมิ 150 °C เพื่อหาปริมาณยางที่เหมาะสมให้ยางฟองน้ำไหลฟูเต็มเบ้า ในวิจัยนี้ได้เลือกสารฟูกุ่ม Azo-dicarbonamide โดยแปรปริมาณของสารฟูที่ปริมาณ 1, 3, 5 และ 7 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันแบบปกติ โดยเตรียมยางคอมพาวด์สำหรับการอัดเบ้า ทำการผสมยางและสารเคมีตามสูตรในตารางที่ 4.1 มีขั้นตอนการบดผสมดังแสดงในรูปที่ 4.1

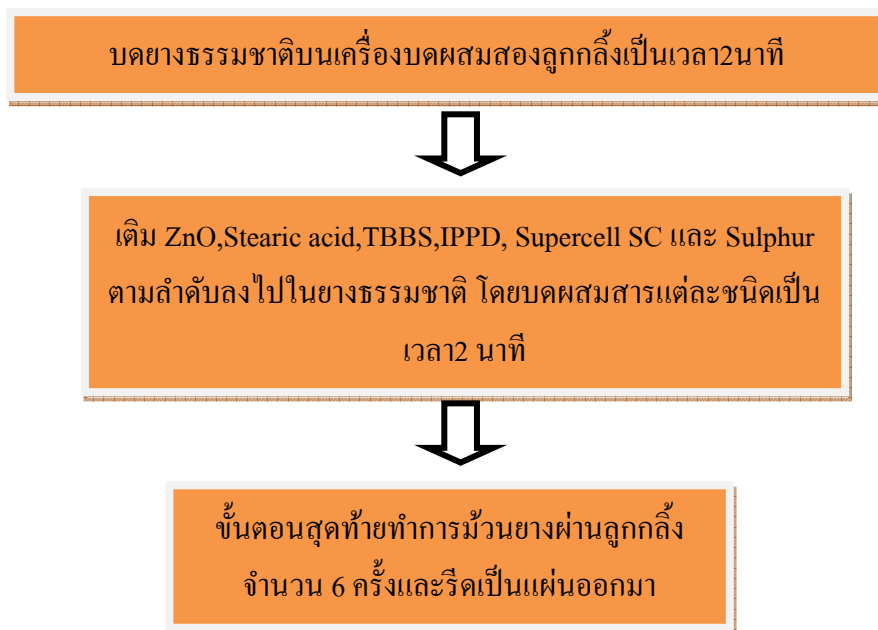
4.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟูต่อการเตรียมยางฟองน้ำ

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟูเป็น 0, 1, 3, 5 และ 7 phr และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติแบบกึ่งเสริมประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ โดยเลือกใช้สารตัวเร่งในกลุ่มซัลไฟด์นาไมด์ได้แก่ TBBS ตามสูตรในตารางที่ 4.1 มีขั้นตอนการบดผสมดังแสดงในรูปที่ 4.1 นำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบ ความหนืดมูนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 °C และนำไปอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้สำหรับเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น 100% , 300% , 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด การเสีรูปร่างหลังการกด (compression set) และตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ (ลักษณะเซลล์ ขนาดของเซลล์เฉลี่ย จำนวนเซลล์) ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

จากการทดลองในหัวข้อนี้ จะทำการเลือกปริมาณสารฟู ที่สามารถเตรียมขึ้นรูปได้ง่ายและให้สมบัติเชิงกลในระดับดี ให้ยางฟองน้ำที่ได้มีลักษณะเซลล์ และขนาดเซลล์ที่สม่ำเสมอ เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำผสมแป้ง ในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.1 สูตรยางคอมพาวนด์ยางฟองน้ำที่ใช้ศึกษาปริมาณสารฟู

| Ingredient | CV-SC | Semi-EV-SC | EV-SC |
|--------------|-----------|------------|-----------|
| RSS 3 | 100 | 100 | 100 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 1 | 1 | 1 |
| TBBS | 1 | 1.5 | 2.5 |
| IPPD | 1 | 1 | 1 |
| Supercell SC | 0,1,3,5,7 | 0,1,3,5,7 | 0,1,3,5,7 |
| Sulphur | 2.5 | 1.5 | 1 |



รูปที่ 4.1 การเตรียมยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ

4.3 ศึกษาเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง

ทำการเตรียมมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง 70 phr โดยทำการผสมแป้งมันสำปะหลังในน้ำยางธรรมชาติ โดยจะเปรียบเทียบระหว่างแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ กับแป้งมันสำปะหลังที่ทำเจลาติไนซ์ โดยแต่ละเทคนิคมีวิธีการเตรียมดังนี้

4.3.1 เทคนิคการผสมแป้งมันสำปะหลังไม่เจลาติไนซ์ในยางธรรมชาติ

ทำการเติมแป้งมันสำปะหลัง (Natural cassava starch powder, NST) ปริมาณ 70 phr ลงในน้ำยางชั้นปริมาณ 100 phr ทำการกวนด้วยความเร็ว 300-320 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจับตัวน้ำยางด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 wt% จะได้เป็นก้อนยาง (coagulum) ริดก้อนยางให้เป็นแผ่นบาง ๆ แล้วล้างกรดออกด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง และนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้เป็นยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังในรูปของมาสเตอร์แบทช์ 70 phr ได้ทำการชั่งน้ำหนักยางผสมแป้งมาสเตอร์แบทช์ที่ได้ เพื่อคือน้ำหนักทั้งหมดที่ได้ (% yield)

4.3.2 เทคนิคการผสมแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ลงในน้ำยางธรรมชาติ

ในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ (gelatinized cassava starch, GST) มีรายละเอียดดังนี้ คือนำแป้งมันสำปะหลังมาเตรียมให้อยู่ในรูปสารแขวนลอยแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 5 wt% จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C พร้อมกวนด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ได้เป็นแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ ตั้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง แล้วเติมน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง แล้วทำการกวนด้วยความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงทำการจับตัวน้ำยางผสมแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก แล้วรีดยางเป็นแผ่น ล้างสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ออกด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง และนำแผ่นยางมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้เป็นยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลังในรูปของมาสเตอร์แบทช์ 70 phr ได้ทำการชั่งน้ำหนักยางผสมแป้งมาสเตอร์แบทช์ที่ได้เพื่อคือน้ำหนักทั้งหมดที่ได้ (% yield)

นำมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง 70 phr ที่เตรียมได้มาทำการตัดแบ่งและผสมสำหรับเตรียมยางคอมพาวนด์ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ปริมาณสารฟูล 5 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ตามสูตรในตารางที่ 4.2 ก่อนทำการบดผสมยางและสารเคมี จะทำการปรับความหนืดและลดความแปรปรวนของยางธรรมชาติก่อนนำไปคอมพาวนด์ โดยการนำยางแผ่นรมควันชั้น 3 ที่จะใช้ในแต่ละสูตรมาบดบนเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จัดให้มีระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip) ประมาณ 2 มิลลิเมตร บดเป็นเวลา 5 นาทีและเพื่อลดความแปรปรวนของยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ จึงทำการบดก่อนใช้งานเช่นเดียวกัน โดยใช้สภาวะเดียวกันกับการบดยางธรรมชาติ ในการบดผสมยางและสารเคมีจะทำการบดผสมยางธรรมชาติและยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังเข้าด้วยกันเป็นเวลา 2 นาที ส่วนลำดับการใส่สารเคมีและเวลาการผสม ทำเช่นเดียวกับที่แสดงในรูปที่ 4.1 นำยางคอมพาวนด์ไปทดสอบความหนืดนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์ ที่

อุณหภูมิ 150 °C และนำไปอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้สำหรับเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น 100% , 300% , 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกด และตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ (ลักษณะเซลล์ ขนาดของเซลล์เฉลี่ย จำนวนเซลล์) ด้วยเครื่อง SEM

จากการทดลองในหัวข้อนี้ จะทำการเลือกเทคนิคในการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แบ่งปริมาณ 70 phr ที่มีการกระจายตัวของแป้งสม่ำเสมอ และให้สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำในระดับดี เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำผสมแป้ง ในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.2 สูตรยางฟองน้ำที่ใช้ยางมาสเตอร์แบทช์แบ่งปริมาณ 70 phr

| Ingredients | Weight (g) | | | | |
|--|------------|-----|-----|-----|-----|
| RSS-3 | 100 | 86 | 57 | 29 | 0 |
| Cassava starch/NR masterbatch ^{1,2} | 0 | 24 | 73 | 121 | 170 |
| ZnO | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Stearic acid | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| TBBS | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| IPPD | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Supercell SC | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Sulphur | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |

หมายเหตุ ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ ใช้ TBBS = 2 phr และ Sulphur = 1.5 phr

ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ใช้ TBBS = 4.0 phr และ Sulphur = 0.5 phr

4.4 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

นำยางมาสเตอร์แบทช์ผสมแป้งมันสำปะหลัง 70 phr ที่เตรียมจากเทคนิคการผสมแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ลงในน้ำยางธรรมชาติ มาทำการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ปริมาณสารฟู่ 5 phr พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวเร่งแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ นำยางคอมพาวนด์ไปทดสอบความหนืดมูนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 °C และนำไปอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้สำหรับเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น 100% , 300% , 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกด ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน และการเสื่อมสภาพด้วยการฝังดินไว้เป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน และ

ตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ (ลักษณะเซลล์ ขนาดของเซลล์เฉลี่ย จำนวนเซลล์) ด้วยเครื่อง SEM

จากการทดลองในหัวข้อนี้ จะทำการเลือกกระบวนการวัลคาไนซ์และปริมาณแป้งที่ให้สมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำดีที่สุด และยางฟองน้ำที่ได้มีลักษณะเซลล์ และขนาดเซลล์ที่สม่ำเสมอ เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำผสมแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพด ในหัวข้อถัดไป

4.5 ศึกษาอิทธิพลของชนิดของแป้งในการเตรียมยางฟองน้ำ

ทำการศึกษาชนิดของแป้ง 3 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด ที่ปริมาณ 30 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ นำยางคอมพาวนด์ไปทดสอบความหนืดมูนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 150 °C และนำไปอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้สำหรับเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น 100% , 300% , 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกด ก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน และการเสื่อมสภาพด้วยการฝังดินไว้เป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน และตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำ (ลักษณะเซลล์ ขนาดของเซลล์เฉลี่ย จำนวนเซลล์) ด้วยเครื่อง SEM

4.6 วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกล

4.6.1 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 4.1

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = M/V \quad (4.1)$$

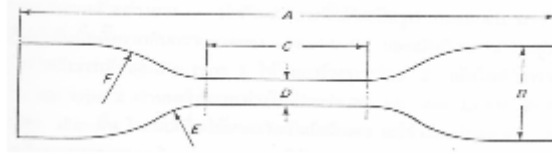
M คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบ (g)

V คือ ปริมาตรชิ้นทดสอบ (cm^3)

4.6.2 การทดสอบความทนต่อแรงดึง

เตรียมชิ้นตัวอย่าง สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปจากเบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.2 \text{ cm}^3$ และขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ มาตัดเป็นรูปคัมเบลแบบ die C ดังรูปที่ 4.2 ใช้จำนวนชิ้นตัวอย่างของแต่ละสูตร 5 ชิ้น แล้วนำชิ้นตัวอย่างไป

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง ด้วยอัตราเร็วในการดึง 300 มิลลิเมตร/นาที และรายงานผลเป็นค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100, 300 และ 500 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ตามสมการที่ 4.2 – 4.4



รูปที่ 4.2 ลักษณะตัวอย่างชิ้นทดสอบรูปคัมเบลแบบ die C

การคำนวณ

$$\text{Modulus at 100, 300, 500\%} = F/A \quad (4.2)$$

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

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm²)

$$\text{Tensile strength} = F/A \quad (4.3)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm²)

$$\% \text{ Elongation at break} = 100 \times (L - L_0 / L_0) \quad (4.4)$$

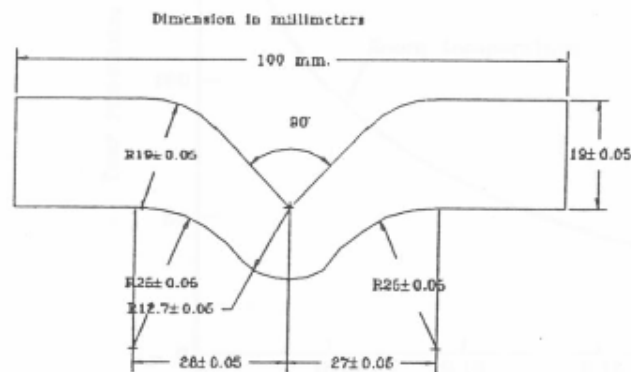
L คือ ระยะยืดหลังดึง (cm)

L₀ คือ ระยะยืดก่อนดึง (cm)

4.6.3 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปจากเบ้าขนาด 13×13×0.2 cm³ และขนาด 13×13×0.9 cm³ มาตัดเป็นตัดชิ้นตัวอย่างแบบมุม (angle) ที่ไม่มีรอยบากตรงมุม ดังรูปที่ 4.3 ใช้จำนวนชิ้นตัวอย่าง 5 ชิ้นต่อสูตร นำชิ้นตัวอย่าง ไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงที่อัตราเร็วในการดึง 300

มิลลิเมตร/นาทึ บันทึค่าแรงดึงที่ทำให้ฉีกตัวอย่างลักษณะ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดตามสมการที่ 4.5



รูปที่ 4.3 ลักษณะตัวอย่างฉีกทดสอบแบบมุม

การคำนวณ

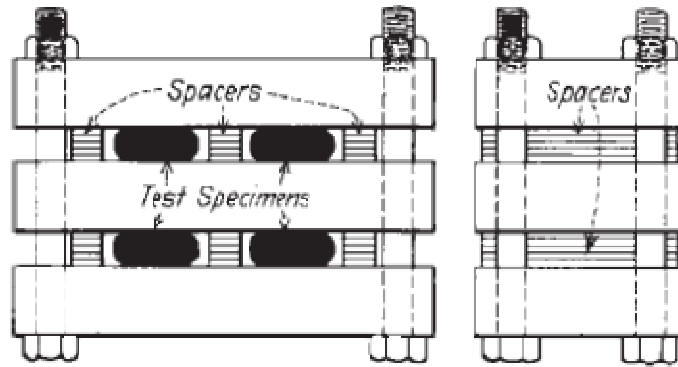
$$\text{Tear strength} = F/D \quad (4.5)$$

F คือ แรงดึงที่ทำให้ฉีกทดสอบขาด (N)

D คือ ความหนาของฉีกทดสอบขณะยังไม่ฉีก (mm)

4.6.4 การทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด

เตรียมชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกดตามมาตรฐาน ASTM D-1056 Type 2 class A โดยนำแผ่นยางที่ผ่านการขึ้นรูปจากเบ้าขนาด $13 \times 13 \times 0.9 \text{ cm}^3$ มาตัดเป็นตัดชิ้นทดสอบขนาด $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ใช้จำนวนชิ้นทดสอบของแต่ละสูตร 3 ชิ้น นำชิ้นทดสอบใส่ในชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกดดังรูปที่ 4.4 จากนั้นนำชุดอุปกรณ์ทดสอบใส่ในเตาอบควบคุมอุณหภูมิที่ 70°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาตามกำหนดแล้วนำชุดอุปกรณ์ทดสอบออกจากเตาอบนำชิ้นทดสอบออกจากชุดอุปกรณ์ทดสอบแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้ววัดความหนาของชิ้นทดสอบ บันทึกค่าความหนาของชิ้นทดสอบทั้งก่อนทดสอบ และหลังทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการคืนรูปหลังการกดตามสมการที่ 4.6



รูปที่ 4.4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด

การคำนวณ

$$\% \text{ Compression set} = (t_0 - t_1) / (t_0 - t_n) \times 100 \quad (4.6)$$

t_0 คือ ความหนา ก่อนทดสอบ (mm)

t_1 คือ ความหนา หลังการทดสอบ (mm)

t_n คือ ความหนา ของแท่งคั่น (6.30 mm)

4.6.5 การทดสอบการบ่มแรงของยางด้วยอากาศร้อน

การทดสอบการบ่มแรงของยางตามมาตรฐาน ASTM D 573 โดยใช้ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412 รูปคัมเบล ขนาด Die C และตามมาตรฐาน ASTM D 624 ชิ้นตัวอย่างแบบมุ่มที่ไม่มีรอยบากตรงมุ่ม ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ในตู้บ่มแรง (Gear oven) เมื่อครบกำหนดนำชิ้นทดสอบทำการทดสอบความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ด้วยอัตราการเร็ว 300 มิลลิเมตร/นาที และทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังการกด นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าสมบัติก่อนการบ่มแรง คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 4.7

การคำนวณ

$$P = [(A-O) / O] \times 100 \quad (4.7)$$

P คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง

A คือ สมบัติของยางหลังการบ่มแรง

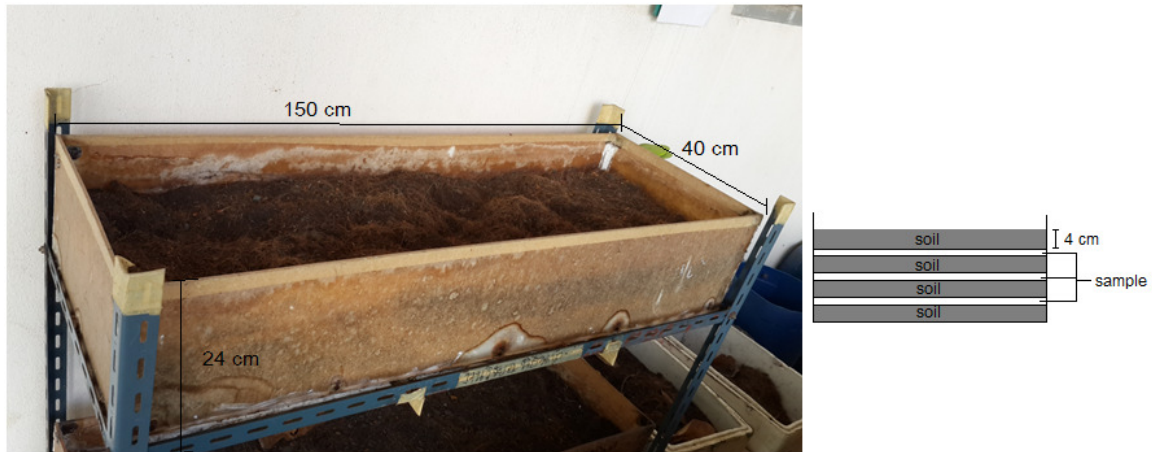
O คือ สมบัติของยางก่อนการบ่มแรง

4.6.6 การตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำด้วยเครื่อง SEM

นำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงมาตัดด้วยใบมีดที่มีความคมพิเศษให้มีขนาด 0.5 เซนติเมตร แล้วทำการติดตัวอย่างลงบนแท่งทองเหลือง (stub) ก่อนนำมาติดลงบนแท่งทองเหลืองจะต้องติดเทปกาวใสลงบนแท่งทองเหลืองหลังจากนั้นป้ายด้วยน้ำยาทาเล็บเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติด แล้วนำชิ้นตัวอย่างที่หักแล้วมาติด โดยนำผิวด้านที่หักขึ้นด้านบน หลังจากนั้นรอประมาณ 5 นาที จนน้ำยาทาเล็บแห้ง แล้วนำแท่งทองเหลือง (stub) ที่ติดชิ้นตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปฉายผิว ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมตัวอย่างเพื่อให้พื้นผิวมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า นำมาฉายผิวด้วยทอง (Au) เครื่องมือที่ใช้ในการฉายผิวเรียกว่า Sputter coater โดยตัวอย่างจะวางไว้ที่ขั้ว anode และโลหะที่ใช้ฉาย (Targer) อยู่ที่ขั้ว cathode ในการฉายจะดูดอากาศออกให้อยู่ในสถานะสุญญากาศระดับ 0.1 Torr แล้วให้กระแสไฟฟ้าและปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าไปใน chamber โดยก๊าซอาร์กอนจะเคลื่อนไปที่ขั้ว cathode และชนแผ่นทองทำให้แตกตัวเป็นโมเลกุล กระจายไปทั่ว chamber แล้วค่อย ๆ เคลือบลงบนตัวอย่าง ความหนาของผิวฉายควรอยู่ระหว่าง 10-20 nm การฉายบางเกินไป จะทำให้เกิดการ Charge up ซึ่งภาพที่ได้จะเห็นเป็นแสงสว่างจ้าเป็นจุด ๆ แต่ถ้าฉายหนาเกินไปจะทำให้สูญเสียรายละเอียด โดยทำการเคลือบทองเป็นเวลา 120 วินาที หลังจากนั้นนำไปตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM ทำการวัดขนาดเซลล์โดยเฉลี่ย (average cell size) ซึ่งเป็นการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเซลล์ด้านใดด้านหนึ่งโดยใช้โปรแกรม ImageJ version 1.48 ในการตรวจวัด และวัดจำนวนเซลล์ (cell count) ซึ่งเป็นจำนวนเซลล์ต่อ 1 cm ของความยาวตัวอย่าง ตามมาตรฐาน BS 4443-Part I:1988

4.6.7 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน

โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาด จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปฝังกล่องพลาสติกทึบขนาด $40 \times 150 \times 24$ cm โดยมีการเจาะรูขนาดเล็กไว้บริเวณฐาน และรอบกล่อง เพื่อสำหรับการระบายน้ำออก เติมน้ำขึ้นล่างให้มีความสูงประมาณ 4 cm แล้วทำการวางชิ้นทดสอบ แล้วเติมน้ำขึ้นที่สองให้มีความสูง 4 cm แล้วทำการวางชิ้นทดสอบในชั้นถัดไป ทำเช่นนี้จนฝังชิ้นตัวอย่างครบสี่ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำการรดน้ำทุก ๆ 2 วัน และวัดความชื้นในดิน และอุณหภูมิของหลุมทดสอบทุก ๆ สัปดาห์ เมื่อครบกำหนด 2, 4 และ 6 เดือน นำชิ้นตัวอย่างมาตัดดินออก แล้วนำไปทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด หลังจากทดสอบแล้วเสร็จจึงนำชิ้นตัวอย่างมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าชิ้นทดสอบมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หายไปตามสมการที่ 4.8



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังดิน

การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักที่หายไป (\%)} = \frac{[A \text{ (g)} - B \text{ (g)}] \times 100}{B \text{ (g)}} \quad (4.7)$$

A คือ น้ำหนักก่อนทดสอบ (g)

B คือ น้ำหนักหลังทดสอบ (g)

5. ผลและวิจารณ์ผลทดลอง

5.1 ผลของปริมาณที่ใช้ในการอัดเบ้ายางพองน้ำ

โดยทั่วไปการขึ้นรูปยางด้วยเทคนิคการอัดเบ้า จะมีการคำนวณปริมาณยางให้มีมากกว่าปริมาณของเบ้าเป็น 105-110 % ของเบ้า เพื่อให้แน่ใจว่ายางคอมพาวนด์ไหลได้เต็มเบ้าขณะทำการขึ้นรูป แต่การขึ้นรูปยางพองน้ำนั้น ในสูตรยางจะมีการใส่สารฟูเข้าไปด้วย โดยสารฟูจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซออกมาขณะให้ความร้อนและดันเนื้อยางให้ขยายตัวออกได้มากกว่าสูตรยางทั่วไป ทำให้เกิดเป็นเซลล์หรือรูพรุนในยาง หลังจากปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์สิ้นสุดลง ดังนั้นปริมาณยางที่ใช้ในการอัดเบ้าจึงควรจะใช้น้อยกว่าการขึ้นรูปยางสูตรทั่วไป

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณยางที่ใช้อัดเบ้า 40% ของเบ้า จากสูตรที่ใช้ปริมาณสารฟู 1 phr ให้ยางพองน้ำวัลคาไนซ์ มีลักษณะไม่สมบูรณ์ จะขาดบริเวณขอบของแผ่นยาง ดังแสดงในรูปที่ 5.1 แสดงว่าปริมาณยางที่ใช้มีน้อย ไม่พอที่จะให้ยางคอมพาวนด์ไหลและฟูได้เต็มเบ้า จึงเพิ่มปริมาณยางมาเป็น 45% ของเบ้า พบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ได้มีความสมบูรณ์เต็มเบ้า อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณยาง

เป็น 50% ของเบ้า พบว่ายางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีขนาดใหญ่กว่าเบ้า รวมทั้งมีฟองอากาศขนาดใหญ่อยู่ภายในยาง แสดงว่าปริมาณยางที่ใช้มากเกินไป ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณยางที่ 45% ของเบ้า



รูปที่ 5.1 ลักษณะยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ปริมาณสารฟูล 1 phr ที่ใช้ปริมาณยางระดับต่าง ๆ ในการอัดเบ้า

สำหรับการขึ้นรูปยางคอมพาวนด์ที่ปริมาณสารฟูล 3, 5, 7 phr จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณสารฟูล 3 และ 5 phr ได้ยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่มีลักษณะไม่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อทำการเปิดเบ้าขึ้นตัวอย่างมีการขยายตัวเพียงเล็กน้อยในช่วง 5-7% แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ยางจะเกิดการหดตัวมีขนาดเท่ากับเบ้าพอดี อย่างไรก็ตามที่ปริมาณสารฟูล 7 phr พบว่ายางคอมพาวนด์ไหลได้ไม่เต็มเบ้า อาจจะเนื่องมาจากที่ปริมาณสารฟูล 7 phr สลายตัวให้ปริมาณก๊าซออกมาก่อนข้างมากกว่าที่ปริมาณสารฟูลระดับอื่น และในสถานะที่เป็นระบบปิดของเบ้าจะเกิดความดันขึ้นอย่างมากทำให้เกิดการดันการไหลของยาง ทำให้ยางคอมพาวนด์ไหลได้ไม่เป็นเต็มเบ้า เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการเลื่อนชั้นล่าง (lower plate) ของเครื่องอัดเบ้าลง ก่อนครบกำหนดเวลาวัลคาไนซ์ 2 นาที โดยเลื่อนลงจำนวน 2 ครั้งเมื่อครบกำหนด 1 นาที เพื่อทำการปลดปล่อยก๊าซที่เกิดขึ้นและลดความดันภายในเบ้าเพื่อให้ยางสามารถไหลได้เต็มเบ้า และลักษณะยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ได้มีลักษณะสมบูรณ์ไหลได้เต็มเบ้า

5.2 ผลของปริมาณสารฟูลต่อการเตรียมยางฟองน้ำ

ในการเตรียมยางฟองน้ำได้ทำการศึกษาปริมาณของสารฟูลที่ระดับ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr ตามลำดับที่ผสมสารฟูลชนิด Supercell และได้ศึกษาผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกัมมะถันแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพโดยการนำยางคอมพาวนด์มาทดสอบหาความหนืดมูนิ และสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C ด้วยเครื่อง MDR ดังแสดงในตารางที่ 5.1 – 5.2 และรูปที่ 5.2 – 5.3 และสมบัติทางเชิงกลหลังการวัลคาไนซ์ ได้แก่ ความหนาแน่น 100%, 300% และ 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นตร้อยยะยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ค่าการเสียรูปหลังการกด ดังแสดงในตารางที่ 5.2

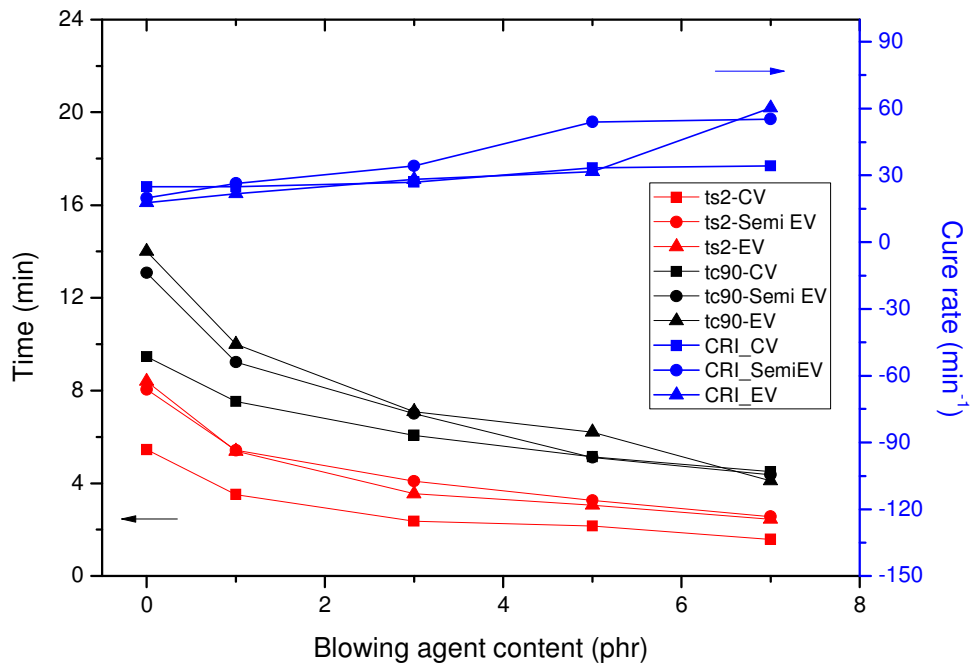
ตารางที่ 5.1 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อความหนืดมูนีของยางคอมพาวด์

| Blowing agent content (phr) | Mooney Viscosity (ML 1+4) 100 °C | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|------|-----------|------|-------|------|
| | CV-SC | S.D | SemiEV-SC | S.D | EV-SC | S.D |
| 0 | 26.60 | 0.35 | 26.66 | 0.21 | 25.31 | 0.12 |
| 1 | 27.74 | 0.08 | 27.27 | 0.16 | 29.73 | 0.30 |
| 3 | 29.10 | 0.16 | 26.63 | 0.04 | 27.05 | 0.48 |
| 5 | 25.01 | 0.15 | 26.60 | 0.14 | 30.28 | 0.88 |
| 7 | 25.12 | 0.21 | 26.30 | 0.26 | 30.76 | 0.00 |

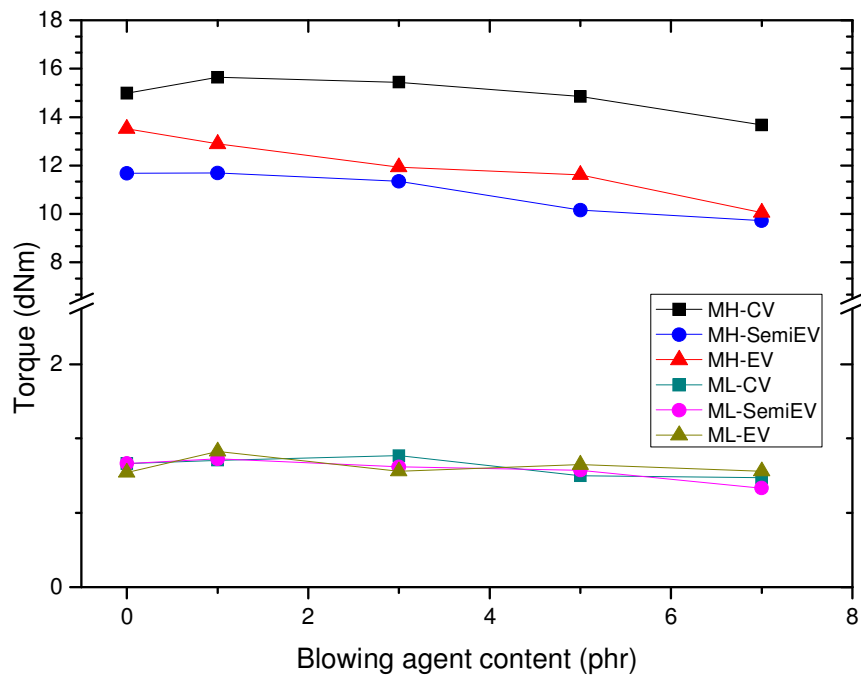
ในการบดผสมยางและสารเคมี แต่ละสูตรได้มีการควบคุมสถานะการบดผสมและเวลาในการบดผสมให้เหมือนกันทุกสูตร พบว่า ที่ปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr ทั้งระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ มีค่าความหนืดมูนีในช่วง 25-30 หน่วยมูนี ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าความหนืดมูนีไม่ขึ้นกับปัจจัยดังกล่าว

ตารางที่ 5.2 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ

| Curing system | Blowing agent content (phr) | Scorch time (t_{s2}) (min) | Cure time (t_{c90}) (min) | CRI (min^{-1}) | Torque (dNm) | |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------|-------|
| | | | | | Min. | Max |
| CV-SC | 0 | 5.45 | 9.46 | 24.94 | 1.11 | 14.99 |
| | 1 | 3.52 | 7.53 | 24.94 | 1.14 | 15.65 |
| | 3 | 2.37 | 6.07 | 27.03 | 1.18 | 15.44 |
| | 5 | 2.16 | 5.15 | 33.45 | 1.00 | 14.85 |
| | 7 | 1.58 | 4.50 | 34.25 | 0.98 | 13.68 |
| Semi-EV-SC | 0 | 8.05 | 13.08 | 19.88 | 1.11 | 11.67 |
| | 1 | 5.43 | 9.22 | 26.39 | 1.15 | 11.69 |
| | 3 | 4.09 | 7.01 | 34.25 | 1.08 | 11.34 |
| | 5 | 3.27 | 5.12 | 54.05 | 1.05 | 10.15 |
| | 7 | 2.57 | 4.38 | 55.25 | 0.89 | 9.72 |
| EV-SC | 0 | 8.40 | 14.00 | 17.86 | 1.03 | 13.53 |
| | 1 | 5.39 | 10.00 | 21.69 | 1.22 | 12.89 |
| | 3 | 3.54 | 7.10 | 28.09 | 1.04 | 11.93 |
| | 5 | 3.05 | 6.21 | 31.64 | 1.10 | 11.62 |
| | 7 | 2.45 | 4.11 | 60.24 | 1.04 | 10.06 |



รูปที่ 5.2 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อเวลาที่ยางเริ่มสุก เวลาในการวัลคาไนซ์และดัชนีการวัลคาไนซ์ ของยางฟองน้ำ



รูปที่ 5.3 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าแรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุดของยางฟองน้ำ

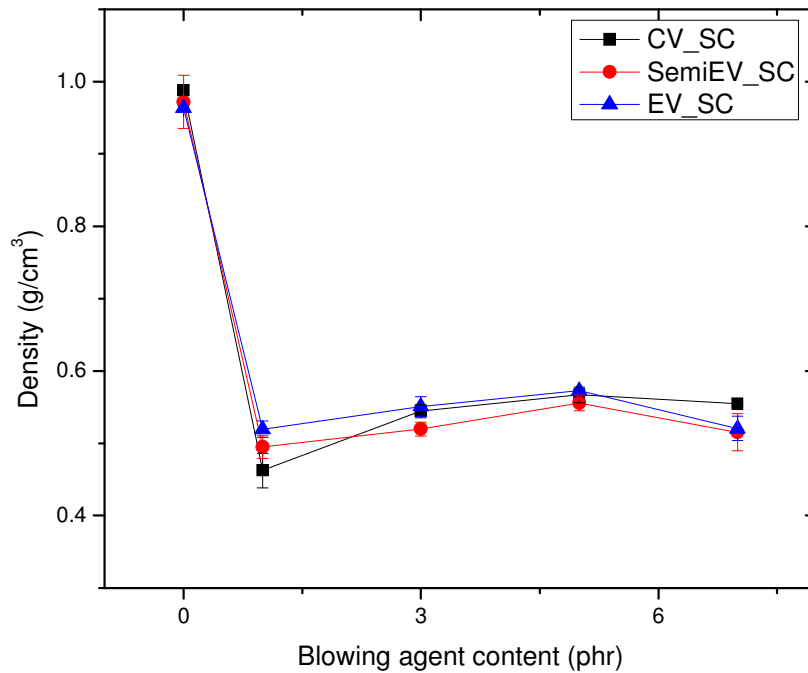
จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2 – 5.3 พบว่ายางคอมพาวนด์ในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ให้ผลทำนองเดียวกันคือ เมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้น เวลาที่ยางเริ่มสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์จะมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการสลายตัวให้ก๊าซออกมาสารฟลูนั้นจะมีการคายความร้อนออกมา ซึ่งจะช่วยให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาเริ่มสุก เวลาในการวัลคาไนซ์สั้นลง และดัชนีการวัลคาไนซ์สูงขึ้น นอกจากนี้ก๊าซดังกล่าวยังทำให้ยางมีความเป็นรูพรุนเกิดขึ้นหรือเรียกว่าการเกิดเซลล์ขนาดเล็ก (microbubbles) โดยความเป็นรูพรุนในเนื้อยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารฟลูที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้แรงต้านการเลื่อนระหว่างยางกับคามีค่าลดลง ทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุด และค่าแรงบิดสูงสุดลดต่ำลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guriya และ Tripathy (1996) ที่มีการศึกษาปริมาณสารฟลูชนิด Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT) ที่ระดับ 2, 4 และ 6 phr ในยาง EPDM ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์

เมื่อเปรียบเทียบระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ที่ปริมาณสารฟลูต่างๆ พบว่ายางคอมพาวนด์ฟองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ จะมีค่าระยะเวลาที่ยางเริ่มสุกใกล้เคียงกัน และใช้เวลาสั้นกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพมีปริมาณสารตัวเร่งที่มากกว่าแบบปกติ โดยสารตัวเร่งที่ใช้ในการทดลองนี้คือ TBBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่มซัลฟิโนไมด์ที่มีช่วงระยะเวลาเริ่มสุกค่อนข้างนาน ส่งผลให้เวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น อย่างไรก็ตามที่ปริมาณสารฟลู 5 และ 7 phr ของระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพให้เวลาวัลคาไนซ์ลดลงใกล้เคียงกับระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ และที่ปริมาณสารฟลู 7 phr ของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ให้เวลาวัลคาไนซ์ลดลงต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ โดยปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นมีผลมาจากปริมาณสารตัวเร่งของแต่ละระบบการวัลคาไนซ์ และความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาคายความร้อนขณะการสลายตัวให้ก๊าซออกมาของสารฟลู ทำให้อัตราการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น สอดคล้องกับค่าดัชนีการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นที่ปริมาณสารฟลู และระบบการวัลคาไนซ์ดังกล่าว

นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะให้ค่าแรงบิดสูงสุด สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการช่วงแรกของระยะเวลาการเริ่มสุกของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีระยะเวลาวัลคาไนซ์ที่สั้นกว่าทำให้เซลล์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีพันธะการเชื่อมโยงที่มากกว่าระบบอื่นทำให้ขณะการขยายตัวของก๊าซเกิดขึ้นได้ยากกว่า จึงให้ค่าแรงบิดสูงสุดสูงกว่า ส่วนค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าใกล้เคียงกันทุกระบบการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 5.3 อิทธิพลของปริมาณสารฟลูและระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวต่อสมบัติทางเชิงกลของยางฟองน้ำ

| Compound | 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-SC0 | 0.9882±0.0067 | 0.61±0.06 | 1.71±0.13 | 4.15±0.31 | 10.33±1.25 | 620±27 | 27.17±6.82 | 12.11±0.82 |
| CV-SC1 | 0.4624±0.0236 | 0.18±0.02 | 0.57±0.06 | 1.45±0.13 | 3.26±0.50 | 637±25 | 18.56±1.49 | 73.76±3.09 |
| CV-SC3 | 0.5443±0.0092 | 0.23±0.02 | 0.52±0.04 | 1.26±0.17 | 4.15±0.38 | 675±28 | 23.54±1.32 | 71.80±0.39 |
| CV-SC5 | 0.5669±0.0105 | 0.22±0.03 | 0.54±0.03 | 1.39±0.28 | 4.37±0.37 | 670±57 | 22.43±1.48 | 81.54±0.16 |
| CV-SC7 | 0.5548±0.0010 | 0.21±0.02 | 0.63±0.05 | 1.43±0.05 | 3.88±0.78 | 637.5±47 | 19.57±0.52 | 79.11±1.39 |
| SemiEV-SC0 | 0.9720±0.0367 | 0.40±0.06 | 1.07±0.03 | 2.21±0.36 | 5.45±0.94 | 665±22 | 22.48±0.95 | 13.96±0.17 |
| SemiEV-SC1 | 0.4950±0.0157 | 0.16±0.01 | 0.46±0.02 | 1.03±0.11 | 3.42±0.43 | 700±0 | 20.31±0.82 | 66.56±2.52 |
| SemiEV-SC3 | 0.5197±0.0094 | 0.16±0.01 | 0.42±0.03 | 0.93±0.12 | 3.53±0.35 | 733±29 | 16.80±0.80 | 59.68±2.03 |
| SemiEV-SC5 | 0.5556±0.0109 | 0.16±0.01 | 0.45±0.01 | 1.11±0.05 | 3.90±0.60 | 700±0 | 13.38±0.77 | 70.08±1.74 |
| SemiEV-SC7 | 0.5152±0.0257 | 0.16±0.03 | 0.48±0.09 | 0.94±0.09 | 3.80±0.66 | 740±42 | 14.96±0.45 | 69.04±2.87 |
| EV-SC0 | 0.9636±0.0022 | 0.56±0.03 | 1.36±0.07 | 3.17±0.13 | 6.13±2.45 | 625±29 | 23.93±1.68 | 8.18±0.89 |
| EV-SC1 | 0.5195±0.0115 | 0.26±0.03 | 0.55±0.03 | 1.18±0.12 | 3.47±0.65 | 637±25 | 18.16±0.53 | 63.87±2.64 |
| EV-SC3 | 0.5508±0.0137 | 0.24±0.02 | 0.59±0.04 | 1.21±0.15 | 3.09±0.52 | 65060± | 16.93±0.43 | 52.72±2.96 |
| EV-SC5 | 0.5727±0.0027 | 0.24±0.06 | 0.63±0.01 | 1.54±0.13 | 3.77±1.38 | 616±29 | 18.59±0.75 | 61.13±1.95 |
| EV-SC7 | 0.5205±0.0169 | 0.20±0.04 | 0.58±0.07 | 1.32±0.25 | 3.89±0.73 | 683±25 | 17.72±0.66 | 65.06±0.86 |



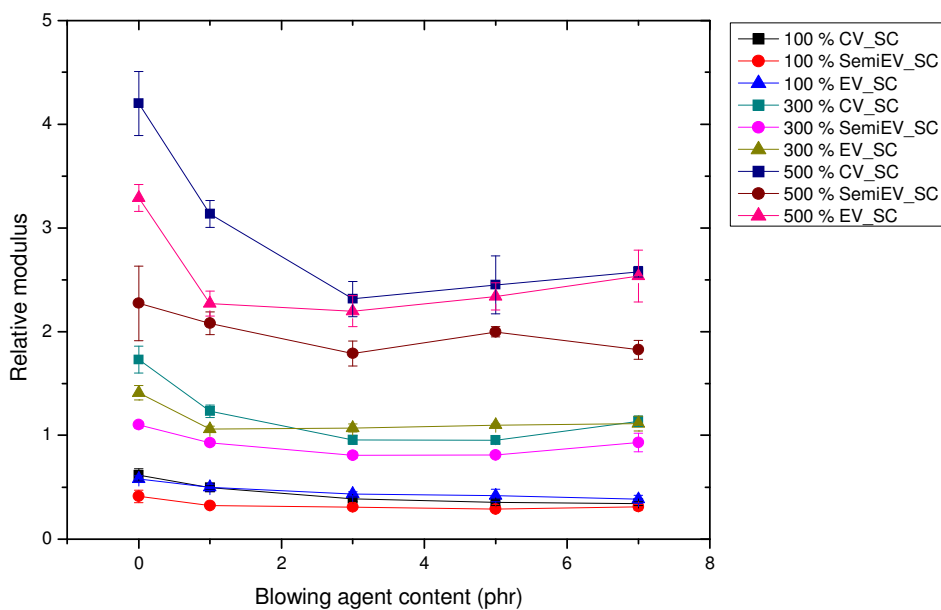
รูปที่ 5.4 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อความหนาแน่นของยางพองน้ำ

จากตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ระหว่างสูตรที่ใส่สารฟู่และไม่ใส่สารฟู่ในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติพบว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใส่สารฟู่จะมีความหนาแน่นลดต่ำกว่ายางพองน้ำที่ไม่ได้ใส่สารฟู่อย่างชัดเจนทั้งนี้เป็นเพราะว่าในเนื้อยางวัลคาไนซ์ที่มีการใส่สารฟู่จะมีความเป็นรูพรุนในเนื้อยาง ทำให้ที่ปริมาตรของชิ้นทดสอบที่เท่ากันมีน้ำหนักที่น้อย ส่งผลให้มีความหนาแน่นลดลง อย่างไรก็ตามในทางทฤษฎี เมื่อปริมาณสารฟู่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ควรลดลง แต่จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณสารฟู่เพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 7 phr ความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.4349-0.5669 g/cm^3 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการอัดเบ้าที่มีการใช้ปริมาตรยาง 45% ของเบ้า ทุกระดับปริมาณสารฟู่ โดยที่ปริมาณสารฟู่ 1 phr ยางคอมพาวนด์มีการฟู่และขยายตัวได้เต็มเบ้า มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.4349 g/cm^3 ส่วนที่ปริมาณสารฟู่ 3 และ 5 phr ยางพองน้ำวัลคาไนซ์มีการขยายตัวมากกว่าเบ้า และเกิดการหดตัวภายหลังมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.5443 และ 0.5669 g/cm^3 ตามลำดับ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นที่วัดได้ค่อนข้างสูงกว่าที่ปริมาณสารฟู่ 1 phr และที่ปริมาณสารฟู่ 7 phr มีการปล่อยก๊าซออกในระหว่างกระบวนการอัดเบ้า เพื่อลดความดันที่เกิดขึ้นภายในเบ้า ส่งผลให้ความหนาแน่นที่ได้ลดลงกว่าที่ปริมาณ 3 และ 5 phr เล็กน้อย ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.5548 g/cm^3

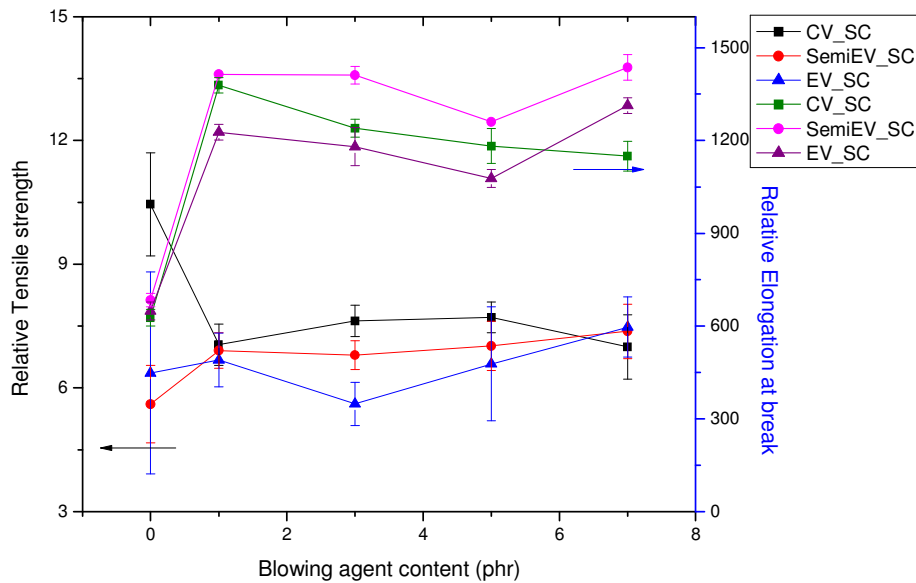
เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ระหว่างสูตรที่ใส่สารฟู่และไม่ใส่สารฟู่ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ พบว่า ค่าความหนาแน่นให้ผล

ทำนองเดียวกันกับระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ กล่าวคือ ยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ใส่สารฟู่จะมีความหนาแน่นลดลงกว่ายางฟองน้ำที่ไม่ได้ใส่สารฟู่อย่างชัดเจน และที่ปริมาณสารฟู่ 1 phr ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.4950 และ 0.5195 g/cm³ ตามลำดับ ส่วนที่ปริมาณสารฟู่ 3 และ 5phr ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.5197, 0.5556 และ 0.5508, 0.5727 g/cm³ตามลำดับ ส่วนที่ปริมาณสารฟู่ 7 phr ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ มีค่าความหนาแน่นลดลงกว่าที่ปริมาณ 3 และ 5 phr เล็กน้อย ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.5152 และ 0.5205 g/cm³ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ระบบปกติแบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ ทุกที่ระดับปริมาณสารฟู่พบว่าระบบการวัลคาไนซ์ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ได้



รูปที่ 5.5 ผลของปริมาณสารฟู่ต่อค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำ



รูปที่ 5.6 ผลของปริมาณสารฟลูต่อความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์และระยะยืดจนขาดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำ

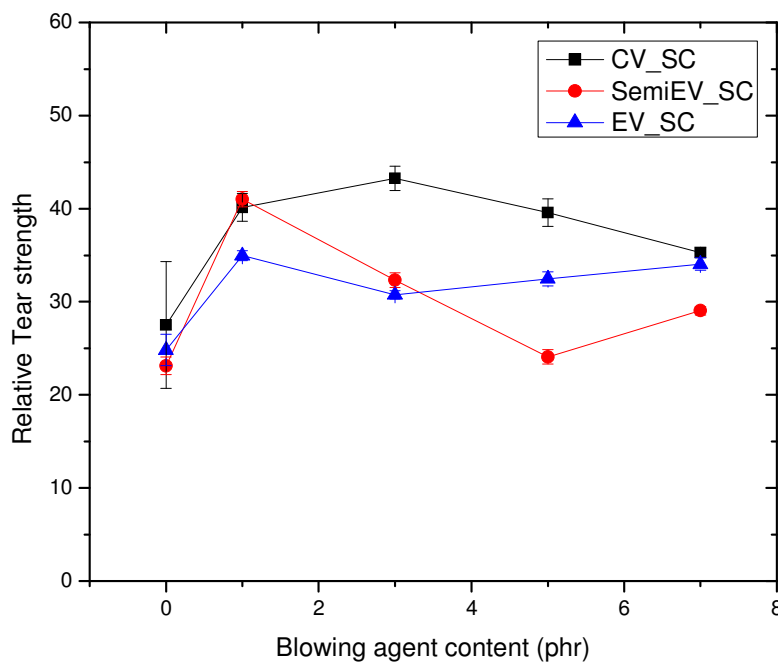
จากรูปที่ 5.5 แสดงค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ต่อปริมาณสารฟลู ซึ่งค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ได้มาจากค่าโมดูลัสต่อความหนาแน่นของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารฟลูมีค่า 100%, 300% และ 500% โมดูลัสสัมพัทธ์ สูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ใส่สารฟลูในทุกระบบการวัลคาไนซ์ ดังเหตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้น พบว่าที่ระยะยืด 100% 300% และ 500% ให้ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะยืด 100% และ 300% โมดูลัสสัมพัทธ์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ พบว่าค่า 100% และ 300% โมดูลัสสัมพัทธ์ ที่ปริมาณสารฟลูระดับเดียวกันของแต่ละระบบการวัลคาไนซ์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ระยะยืด 500% อิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์จะเห็นผลอย่างชัดเจน กล่าวคือ ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะให้ค่า 500% โมดูลัสสัมพัทธ์ สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ และแบบกึ่งประสิทธิภาพ ทั้งนี้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีการใช้กำมะถันที่มากกว่า ทำให้มีพันธะการเชื่อมโยงที่สูงกว่าและให้พันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่า

จากรูปที่ 5.6 แสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ต่อปริมาณสารฟลู พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารฟลูมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ สูงกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ใส่สารฟลูในทุกระบบการวัลคาไนซ์ และเมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ที่ปริมาณสารฟลูระดับเดียวกัน

ระหว่างระบบการวัดคาไนซ์ พบว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติ จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพันธ์ สูงกว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในกรณีของโมดูลัสสัมพันธ์

ส่วนระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์ต่อปริมาณสารฟลูพพบว่ายางวัดคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารฟลูมีค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์ต่ำกว่ายางวัดคาไนซ์ที่ใส่สารฟลูในทุกระบบการวัดคาไนซ์ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพค่อนข้างแข็งกว่ายางวัดคาไนซ์ที่ใส่สารฟลู สังเกตได้จากค่าโมดูลัสสัมพันธ์และความต้านทานต่อแรงดึงสัมพันธ์ จะมีค่าสูงกว่ายางวัดคาไนซ์ที่ใส่สารฟลู เมื่อปริมาณสารฟลูเพิ่มขึ้นค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์ มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์ของยางฟองน้ำวัดคาไนซ์ที่ปริมาณสารฟลูระดับเดียวกัน ระหว่างระบบการวัดคาไนซ์ พบว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติ จะให้ค่าค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์ ต่ำกว่าระบบการวัดคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ และแบบกึ่งประสิทธิภาพ ตามลำดับ โดยค่าที่ได้แปรผกผันกับค่าโมดูลัสสัมพันธ์ และค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพันธ์ โดยระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติ มีพันธะการเชื่อมโยงที่สูงกว่าและให้พันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก ส่งผลให้ระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์ ต่ำกว่า

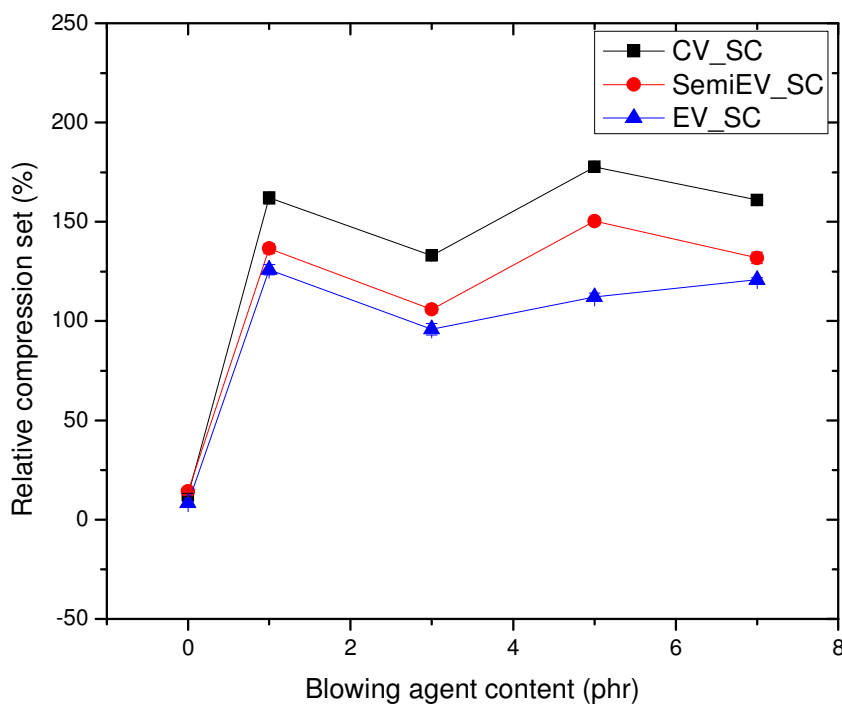


รูปที่ 5.7 ผลของปริมาณสารฟลูต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ของยางฟองน้ำ

จากรูปที่ 5.7 แสดงค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ต่อปริมาณสารฟลู พบว่ายางวัดคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารฟลูมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ต่ำกว่ายางวัดคาไนซ์ที่ใส่สารฟลูในทุกระบบการวัดคาไนซ์ อาจเนื่องมาจากยางฟองน้ำมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิดซึ่งจะช่วยในการกระจายแรงที่ใช้ในการฉีกขาด ส่งผลให้ต้องใช้แรงเพิ่มขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่งคือ ขนาดของชั้นทดสอบยางฟองน้ำที่มีความหนา

ประมาณ 9 มม. ซึ่งหนามากกว่าชั้นทดสอบที่ไม่ใส่สารฟูประมาณ 5 เท่า จึงทำให้ต้องใช้แรงในการฉีกขาดสูงกว่าและเมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้น ในระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ และแบบประสิทธิภาพ ให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ในระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารฟูที่เพิ่มขึ้น

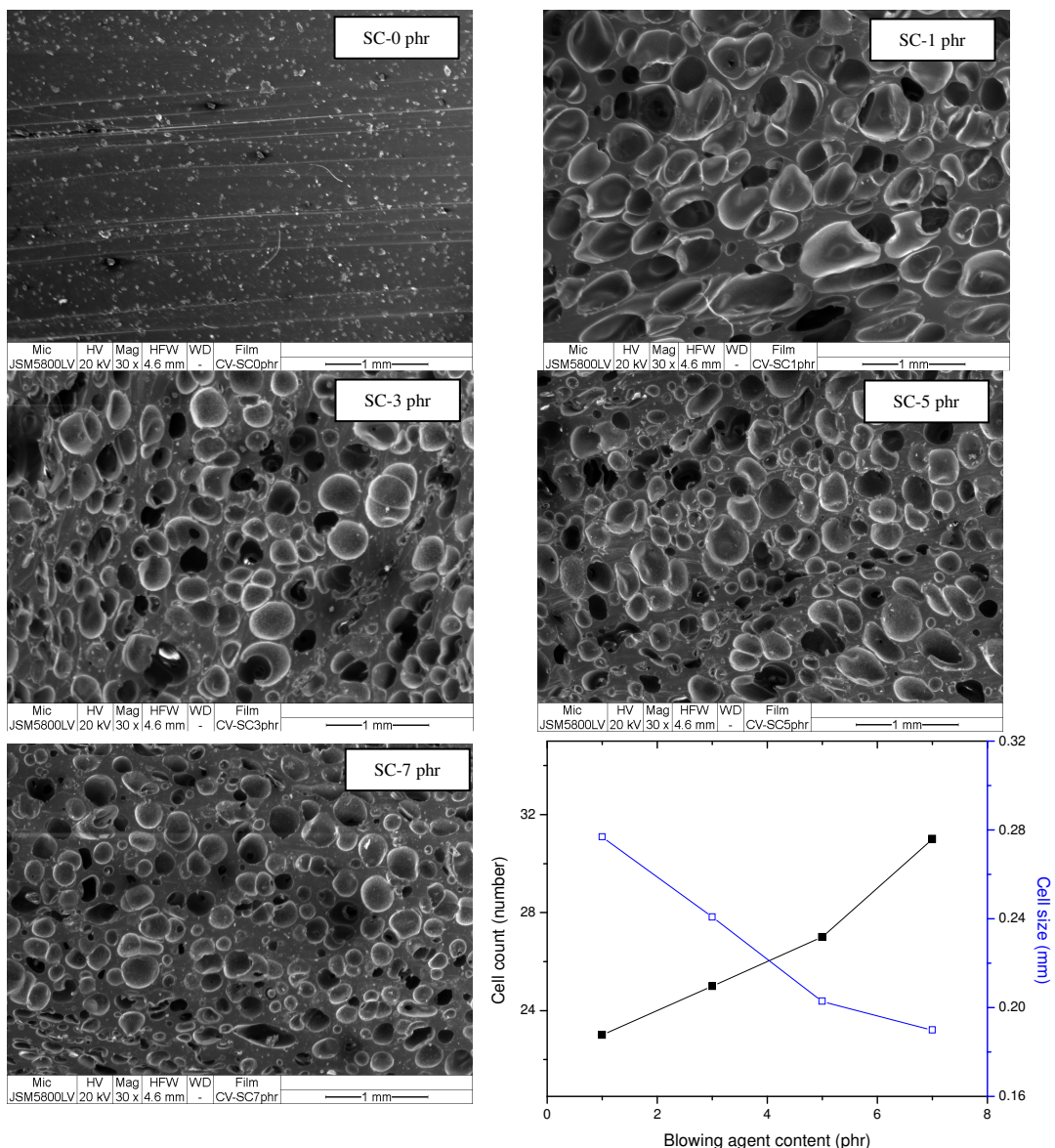
อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ที่ปริมาณสารฟูระดับเดียวกัน ระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในกรณีของโมดูลัสสัมพัทธ์



รูปที่ 5.8 ผลของปริมาณสารฟูต่อค่าการเสีรูปลังการกดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำที่

จากรูปที่ 5.8 เมื่อเปรียบเทียบค่าการเสีรูปลังการกดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ระหว่างสูตรที่ใส่สารฟูและไม่ใส่สารฟู พบว่ายางวัลคาไนซ์ที่ไม่ใส่สารฟูมีค่าการเสีรูปลังการกดสัมพัทธ์ต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ที่ใส่สารฟูในทุกะบบการวัลคาไนซ์ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ด้วยโครงสร้างของยางฟองน้ำเป็นโครงสร้างเซลล์แบบปิด เมื่ออยู่สภาวะผิดปกติขณะการกดอัดประมาณ 30 % ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้โครงสร้างเซลล์เกิดความเสียหาย (แตก) จนไม่สามารถคืนตัวกลับได้หลังการกดอัดและเมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้น พบว่าค่าการเสีรูปลังการกดสัมพัทธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากที่ปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้น การเกิดเซลล์จะเกิดขึ้นได้มากกว่า ทำให้ความสามารถในการคืนรูปน้อยกว่า ค่าการเสีรูปลังการกดสัมพัทธ์จึงเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารฟูที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ

ระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณสารฟูลเฟอรัสระดับเดียวกัน พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ให้ค่าการเสีรูปลหลังการกดสัมผัสต่ำที่สุดต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบปกติ ตามลำดับ เพราะว่าพันธะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ส่วนใหญ่เป็นแบบโมนอสัลฟิดิก (monosulfidic) มีพลังงานพันธะสูงกว่าแบบไดซัลฟิดิก (disulfidic) และแบบพอลิซัลฟิดิก (polysulfidic) (พลังงานพันธะของ C-S และ S-S มีค่าประมาณ 279 และ 206kJ/mol ตามลำดับ) จึงทำลายพันธะด้วยความร้อนได้ยากกว่า ส่งผลให้การเสีรูปลหลังการกดสัมผัสของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบปกติ ตามลำดับ



รูปที่ 5.9 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังที่ปริมาณสารฟูลเฟอรัสต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณสารฟูลเฟอรัสต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์ฟองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ

จากรูปที่ 5.9(ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากเครื่อง SEM ของเซลล์ฟองน้ำ จะพบว่าเมื่อไม่ใช้ปริมาณสารฟู (0 phr) จะไม่มีลักษณะเซลล์เกิดขึ้น พื้นผิวของยางเรียบ แต่เมื่อใช้ปริมาณสารฟูที่ระดับ 1-7 phr จะเห็นว่าเกิดเป็นรูพรุนเกิดขึ้นในเนื้อของยาง ลักษณะเซลล์ที่ได้เป็นเซลล์ปิด เกิดขึ้นจากการปล่อยก๊าซออกมาของสารฟูขณะทำการขึ้นรูปและเมื่อใช้ปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้นจะเห็นว่ามีความหนาแน่นของเซลล์เพิ่มขึ้น และขนาดของเซลล์มีแนวโน้มเล็กลงผลมาจากปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวและเกิดเป็นรูพรุนในเนื้อยางเพิ่มขึ้นและการขยายตัวของเซลล์ยากขึ้น

ดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ข) ผลการทดลองนี้สัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำ ที่เมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้นจะให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากในขนาดปริมาตรเดียวกัน เมื่อใช้สารฟูเพิ่มขึ้น ขนาดเซลล์จะเพิ่มขึ้น และมีขนาดเซลล์ลดลง ให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน

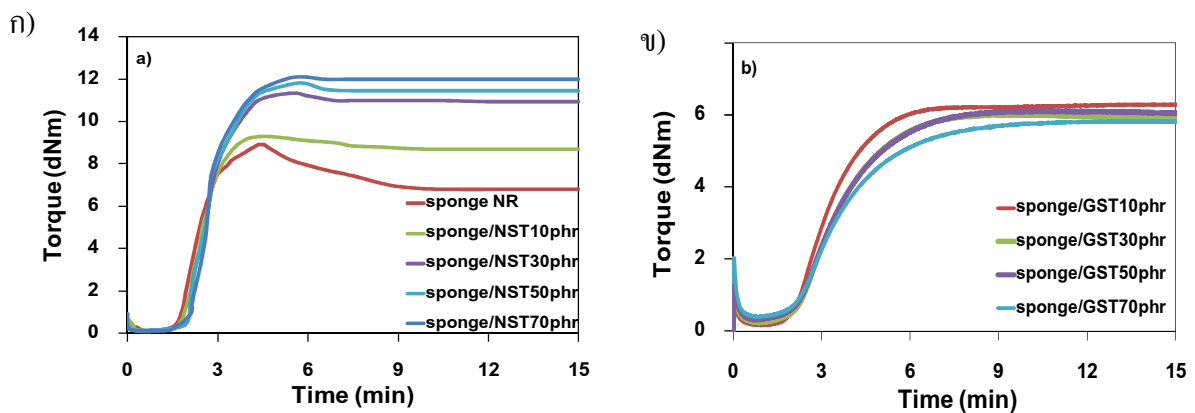
5.3 ผลของเทคนิคการเตรียมยางมาตรฐานแบบที่เป็งมันสำปะหลัง

ผลการเตรียมมาตรฐานแบบที่เป็งมันสำปะหลัง 70 phr ระหว่างเป็งที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ กับเป็งที่ทำเจลาติไนซ์ก่อนทำการผสมลงในน้ำยางชั้น หลังจากจับตัวเป็นแผ่นและอบแห้ง น้ำหนักยางมาตรฐานแบบที่เป็งมันสำปะหลัง 70phr ที่ได้จากทั้งสองเทคนิค คิดเป็น 98% ของน้ำหนักทั้งหมด

โดยทั้งสองเทคนิคได้ทำการศึกษาปริมาณเป็งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ปริมาณสารฟู 5 phr โดยใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบปกติโดยยางคอมพาวนด์ที่นำไปหาสมบัติการวัดคาไนซ์ของยางที่อุณหภูมิ 150 °C ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และสมบัติทางเชิงกลหลังการวัดคาไนซ์ ได้แก่ 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ระยะยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.10 – 5.11 และตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.4 อิทธิพลของเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ

| Technique | Casava starch content (phr) | Scorch time (t_{s2}) (min) | Cure time (t_{c90}) (min) | CRI (min^{-1}) | Torque (dNm) | |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------|-------|
| | | | | | Min. | Max |
| Sponge NR | 0 | 1.57 | 3.08 | 66.22 | 0.13 | 8.50 |
| Sponge/NST 10 phr | 10 | 2.03 | 3.21 | 84.74 | 0.12 | 9.30 |
| Sponge/NST 30 phr | 30 | 2.15 | 3.48 | 75.18 | 0.06 | 11.35 |
| Sponge/NST 50 phr | 50 | 2.15 | 3.53 | 72.46 | 0.15 | 11.80 |
| Sponge/NST 70 phr | 70 | 2.10 | 3.56 | 68.49 | 0.12 | 12.10 |
| Sponge/GST 10 phr | 10 | 2.42 | 5.07 | 37.73 | 0.15 | 6.29 |
| Sponge/GST 30 phr | 30 | 2.57 | 5.42 | 35.08 | 0.23 | 6.01 |
| Sponge/GST 50 phr | 50 | 2.58 | 6.00 | 29.24 | 0.32 | 6.10 |
| Sponge/GST 70 phr | 70 | 3.04 | 6.29 | 30.76 | 0.39 | 5.82 |



รูปที่ 5.10 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวนด์ฟองน้ำ ก) ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังไม่เจลาติไนซ์ ข) ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์

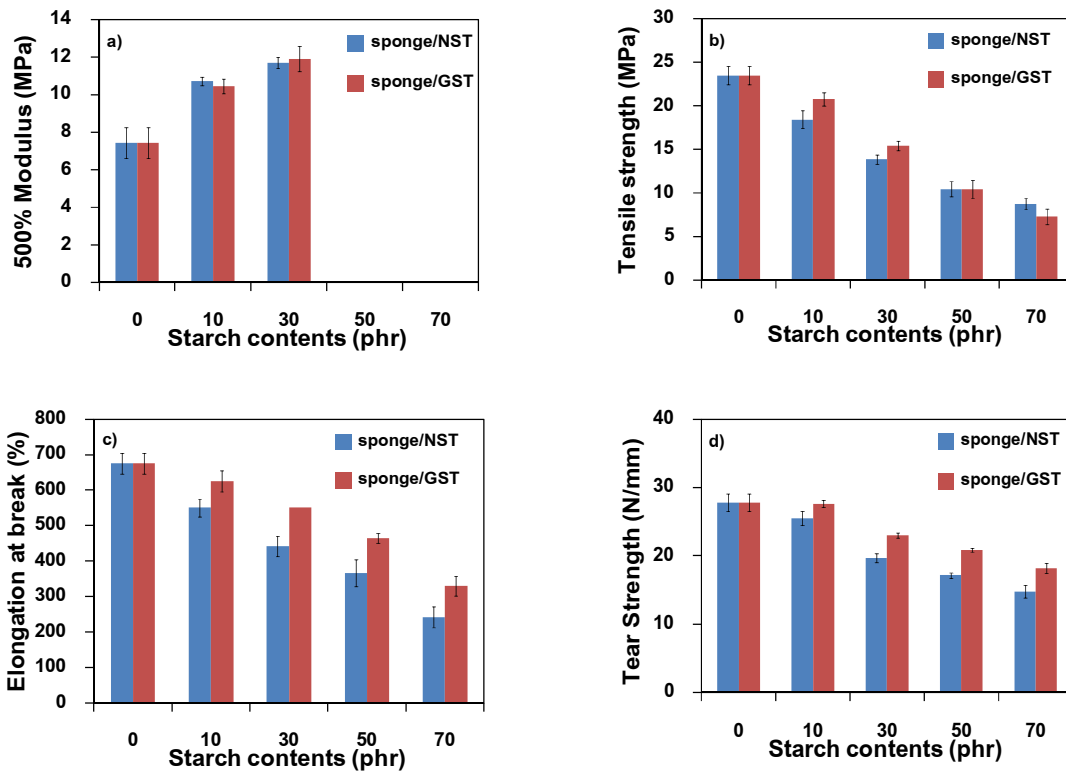
จากผลการทดลองในตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.10 พบว่าทั้งในยางคอมพาวนด์ที่ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ กับแป้งที่ทำเจลาติไนซ์ให้ผลทำนองเดียวกันคือ เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น เวลาที่ยางเริ่มสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการหมู่ฟังก์ชัน ไฮดรอกซิลกรุป (-OH-) ของอนุภาคแป้งเกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางคอมพาวนด์ที่เตรียมมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังจากทั้งสองเทคนิคพบว่ามาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจลาติไนซ์ ให้เวลาที่ยางเริ่มสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์นานกว่าทั้งนี้อาจเนื่องจากการทำการเจลาติไนซ์แป้งมันสำปะหลังเป็นการทำลายผลึกของแป้ง ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการดูดซับสารตัวเร่งเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 5.5 อิทธิพลของเทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำ

| | 500% Modulus (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) | Tear strength (N/mm) |
|---------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Sponge/NR | 7.46±0.82 | 23.47±1.04 | 675.00±28.87 | 27.83±1.28 |
| Sponge/NST 10 | 10.73±0.22 | 18.44±0.98 | 550.00±25.00 | 25.47±1.01 |
| Sponge/NST 30 | 11.71±0.31 | 13.88±0.53 | 441.67±28.87 | 19.65±0.66 |
| Sponge/NST 50 | - | 10.45±0.87 | 366.67±38.19 | 17.13±0.44 |
| Sponge/NST 70 | - | 8.77±0.62 | 241.67±28.87 | 14.76±0.94 |
| Sponge/GST 10 | 10.47±0.40 | 20.80±0.76 | 625.00±28.87 | 27.66±0.48 |
| Sponge/GST 30 | 11.92±0.67 | 15.43±0.53 | 550.00±00.00 | 23.01±0.41 |
| Sponge/GST 50 | - | 10.42±1.02 | 465.00±13.69 | 20.89±0.26 |
| Sponge/GST 70 | - | 7.29±0.89 | 330.00±27.39 | 18.19±0.73 |

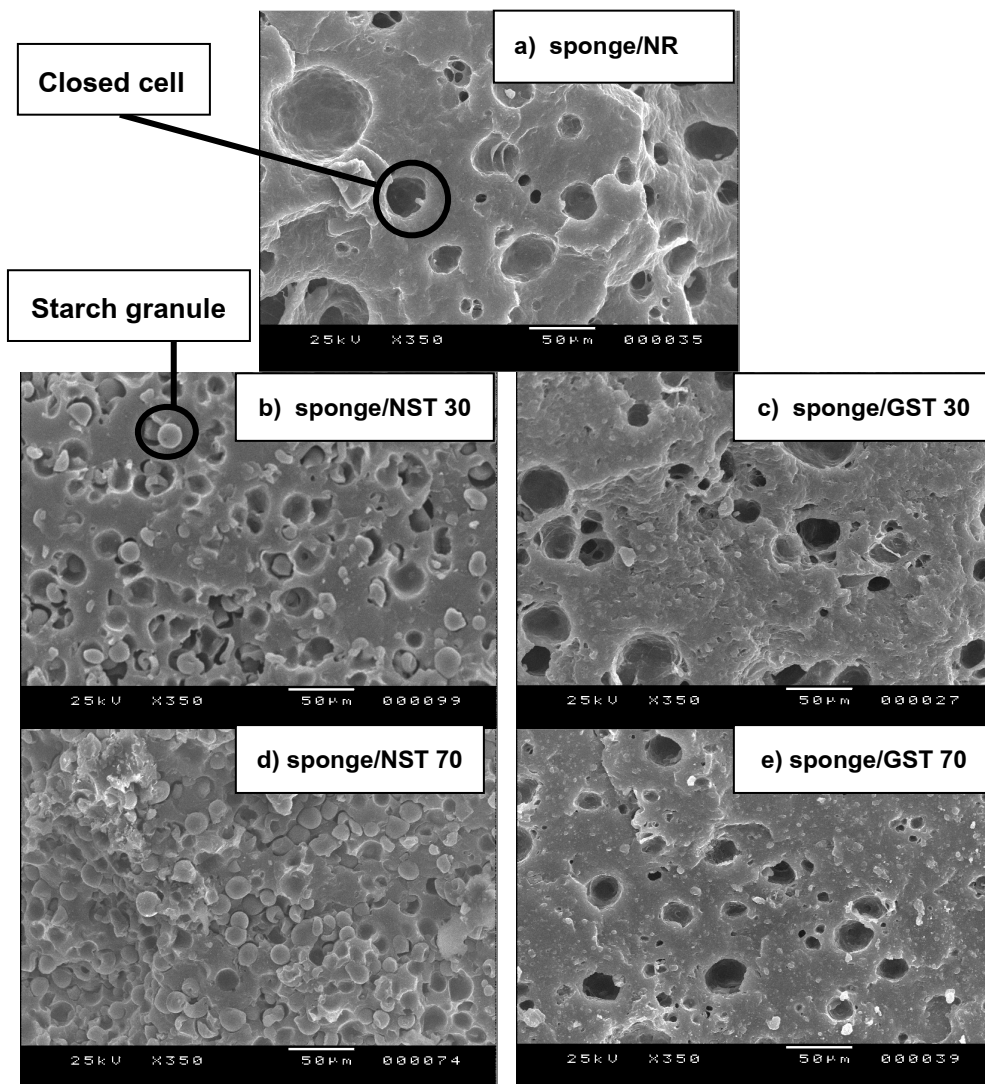
หมายเหตุ เครื่องหมาย - หมายถึง ไม่สามารถหาค่า 500% มอดูลัสได้



รูปที่ 5.11 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำ ก) 500% โมดูลัส ข) ความต้านทานต่อแรงดึง ค) ระยะยืด ณ จุดขาด ง) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.11 พบว่าทั้งในยางคอมพาวนด์ที่ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ กับแป้งที่ทำเจลาติไนซ์ให้ผลทำนองเดียวกันคือ เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแป้งมีลักษณะแข็งเมื่อใส่เข้าไปในยางธรรมชาติจึงทำให้ยางฟองน้ำวัลคาไนซ์แสดงลักษณะแข็งตึง (stiffness) ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลของความไม่เข้ากันระหว่างแป้งและโมเลกุลยางธรรมชาติ เนื่องจากแป้งที่เป็นสารที่มีความเป็นขั้วสูงแต่ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วต่ำ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันจึงเกิดได้น้อย ส่งผลให้รอยต่อระหว่างผิวของแป้งกับโมเลกุลยางธรรมชาติไม่แข็งแรงทำให้มีจุดอ่อนแอในเนื้อของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์มากขึ้นความแข็งแรงของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์จึงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางคอมพาวนด์ที่เตรียมมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังจากทั้งสองเทคนิคพบว่ามาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ทำเจลาติไนซ์ให้ค่าโมดูลัสใกล้เคียงกัน แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด มีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากทำการเจลาติไนซ์แป้งมันสำปะหลังเป็นการทำลายผลึกของแป้งให้ มีการกระจายตัวของอนุภาคแป้งในยางธรรมชาติได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มสูงกว่า สามารถยืนยันได้โดยลักษณะสัญญาณวิทยาดังแสดงรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลัง ก) ปริมาณแป้ง 0 phr ข) ปริมาณแป้ง 30 phr จากมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ ค) ปริมาณแป้ง 30 phr จากมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจลาติไนซ์ ง) ปริมาณแป้ง 70 phr จากมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ จ) ปริมาณแป้ง 70 phr จากมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจลาติไนซ์

จากรูปที่ 5.12 (ก) จะเห็นว่ายางพองน้ำวัลคาไนซ์มีโครงสร้างของเซลล์แบบปิด (Closed cell) ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารฟูแล้วปล่อยเป็นก๊าซออกมา ทำให้เห็นเป็นลักษณะหลุมโพรงและเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ทั้งในยางคอมพาวนด์ที่ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ กับแป้งที่ทำเจลาติไนซ์ให้ผลทำนองเดียวกันจะเห็นว่าขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นจากสารฟูจะมีขนาดลดลง เนื่องจากยางคอมพาวนด์มีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดและการขยายตัวของเซลล์ยากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางคอมพาวนด์ที่เตรียมมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังจากทั้งสองเทคนิคพบว่าการใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ไม่ทำการเจลาติไนซ์ยังคงเป็นเม็ดอนุภาคของแป้ง (granule) และมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในเนื้อยาง มีลักษณะการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) แต่ในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้มาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจลาติไนซ์ จะไม่พบลักษณะดังกล่าว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้เทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจลาติไนซ์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณแป้งและระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวเร่ง ต่อไป

5.4 ผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน

การเตรียมมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง 70 phr หลังจากจับตัวเป็นแผ่นและอบแห้ง น้ำหนักยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง 70 phr ที่ได้คิดเป็น 96% ของน้ำหนักทั้งหมด

นำยางมาสเตอร์แบทช์แป้งมันสำปะหลัง 70 phr มาใช้เพื่อทำการศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ระดับ 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ปริมาณสารฟู 5 phr พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารตัวเร่งแบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพและนำยางคอมพาวนด์ที่นำไปหาค่าความหนืดมูนี้ของยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิ 100 °C สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่อุณหภูมิ 150 °C ดังแสดงในตารางที่ 5.6 -5.7 และสมบัติทางเชิงกลหลังการวัลคาไนซ์ ได้แก่ ความหนาแน่น 100%, 300% และ 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์ระยะยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ค่าการเสียรูปหลังการกด ดังแสดงในตารางที่ 5.8 – 5.10 และรูปที่ 5.13

ตารางที่ 5.6 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันต่อค่าความหนืดมูนิ์ของยางฟองน้ำคอมพาวนด์

| Cassava starch (phr) | Mooney Viscosity (ML 1+4) 100 °C | | | | | |
|-------------------------|----------------------------------|------|---------|------|-------|------|
| | CV | S.D | Semi-EV | S.D. | EV | S.D |
| 0 | 25.01 | 0.15 | 35.52 | 2.03 | 20.91 | 0.03 |
| 10 | 38.34 | 0.83 | 36.41 | 0.23 | 20.47 | 1.7 |
| 30 | 46.49 | 0.08 | 44.48 | 0.03 | 22.91 | 0.17 |
| 50 | 50.82 | 0.09 | 49.96 | 5.83 | 21.04 | 0.23 |
| 70 | 53.88 | 1.12 | 62.36 | 0.54 | 27.72 | 0.41 |

จากตารางที่ 5.6 พบว่า เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ยางฟองน้ำคอมพาวนด์มีความหนืดมูนิ์เพิ่มมากขึ้นทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งมันสำปะหลังมีลักษณะที่แข็งเมื่อใส่เพิ่มเข้าไปในยาง ส่งผลให้ยางมีความแข็งตัวของยางคอมพาวนด์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์พบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ และแบบกึ่งประสิทธิภาพ มีค่าใกล้เคียงและสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มีการใช้สัดส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งเป็น 0.125 (0.5/4) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบปกติ มีค่า 0.75 (1.5/2) และ 2.5 (2.5/1) ตามลำดับ ซึ่งการมีสัดส่วนดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าระดับการเชื่อมโยงพันธะน้อยกว่า ทำให้ยางคอมพาวนด์มีแรงต้านต่อการบิดของโรเตอร์ในการทดสอบได้น้อยกว่าส่งผลให้ความหนืดมูนิ์ต่ำกว่า

ตารางที่ 5.7 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางพองน้ำคอมพาวนด์

| Curing system | Starch MB (phr) | Scorch time (t_{s2}) (min) | Cure time (t_{90}) (min) | CRI (min^{-1}) | Torque (dNm) | |
|---------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------|-------|
| | | | | | M_L | M_H |
| CV | 0 | 3.09 | 7.36 | 23.42 | 1.34 | 16.33 |
| | 10 | 4.12 | 8.19 | 24.57 | 0.59 | 13.20 |
| | 30 | 4.28 | 8.33 | 24.69 | 0.66 | 13.22 |
| | 50 | 4.31 | 9.01 | 21.27 | 0.73 | 13.78 |
| | 70 | 4.53 | 9.23 | 21.27 | 0.79 | 14.07 |
| Semi-EV | 0 | 3.07 | 7.37 | 23.26 | 0.69 | 13.63 |
| | 10 | 5.16 | 10.20 | 19.84 | 0.61 | 13.99 |
| | 30 | 5.04 | 10.08 | 19.84 | 0.76 | 13.19 |
| | 50 | 5.25 | 10.23 | 20.08 | 0.89 | 14.9 |
| | 70 | 5.55 | 10.39 | 20.66 | 1.21 | 14.85 |
| EV | 0 | 4.15 | 10.16 | 16.64 | 0.64 | 10.5 |
| | 10 | 8.21 | 17.55 | 10.71 | 0.64 | 11.21 |
| | 30 | 8.59 | 19.44 | 9.22 | 0.66 | 10.45 |
| | 50 | 7.42 | 22.02 | 6.85 | 0.54 | 9.44 |
| | 70 | 7.57 | 22.45 | 6.72 | 0.78 | 10.43 |

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.7 พบว่า เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นทุกระบบการวัลคาไนซ์ ให้เวลาที่ยางเริ่มสุกและเวลาในการวัลคาไนซ์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลกรุป(-OH-) ของอนุภาคแป้งเกิดการดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบการวัลคาไนซ์

เมื่อเปรียบเทียบระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับต่างๆ พบว่ายางคอมพาวนด์พองน้ำที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะมีค่าระยะเวลาที่ยางเริ่มสุกสั้นกว่า และใช้เวลาน้อยกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมากระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพมีการใช้สัดส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งเป็น 0.125 (0.5/4) ซึ่งมีการใช้ปริมาณสารตัวเร่งมากที่สุด โดยสารตัวเร่งที่ใช้ในการทดลองนี้คือ TBBS ซึ่งเป็นสารตัวเร่งในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ โดยในช่วงต้นของปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เมื่อ TBBS ได้รับความร้อน จะมีการแตกตัวให้เป็นMBT ออกมา การแตกตัวนี้ส่งผลให้เวลาเริ่มสุกจะ

นาน ส่งผลให้เวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น นานกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบปกติ ตามลำดับ อีกทั้งค่าดัชนีการวัลคาไนซ์มีค่าแนวโน้มต่ำกว่าด้วยเช่นกัน ซึ่งอัตราการวัลคาไนซ์นั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณสารตัวเร่งและกำมะถัน ที่ใช้เช่นกัน กล่าวคือ ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มีปริมาณสารตัวเร่งสูง แต่ปริมาณกำมะถันน้อยมาก จึงส่งผลให้อัตราการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้ช้า สอดคล้องกับส่วนต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด ($M_H - M_L$) มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับที่ปริมาณแปร่งเท่ากัน โดยค่าส่วนต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับค่าแรงบิดต่ำสุด นี้สามารถใช้ในการประมาณการเกิดปริมาณการเชื่อมขวางในยางวัลคาไนซ์ หากมีค่าสูงแสดงว่ามีปริมาณการเชื่อมขวางที่สูง

ตารางที่ 5.8 สมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ระบบปกติที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง

| Cassava starch (phr) | 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(%) | |
|----------------------|------------------------------|--------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|------------------------|------|-------------------------|-------|----------------------|------|--------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| Before ageing | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CV-0 | 0.4587 | 0.0105 | 0.22 | 0.03 | 0.54 | 0.03 | 2.8 | 0.28 | 4.37 | 0.37 | 670 | 57.01 | 13.43 | 1.48 | 32.60 | 0.71 |
| CV-10 | 0.4751 | 0.0283 | 0.19 | 0.02 | 0.67 | 0.09 | 2.1 | 0.19 | 2.35 | 0.17 | 535 | 22.36 | 13.38 | 0.52 | 45.66 | 3.02 |
| CV-30 | 0.4959 | 0.0060 | 0.17 | 0.02 | 0.59 | 0.03 | 1.66 | 0.10 | 1.72 | 0.08 | 530 | 27.39 | 13.08 | 0.34 | 61.06 | 2.11 |
| CV-50 | 0.5668 | 0.0053 | 0.22 | 0.02 | 0.96 | 0.12 | - | - | 1.9 | 0.07 | 375 | 17.68 | 13.83 | 0.75 | 78.09 | 1.42 |
| CV-70 | 0.5968 | 0.0178 | 0.33 | 0.03 | 1.26 | 0.14 | - | - | 1.9 | 0.1 | 325 | 17.68 | 13.06 | 0.69 | 84.53 | 0.16 |
| After ageing | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CV-0A | 0.4587 | 0.0105 | 0.30 | 0.02 | 1.07 | 0.05 | - | - | 3.16 | 0.47 | 470 | 25 | 11.7 | 1.13 | * | * |
| CV-10A | 0.4751 | 0.0283 | 0.2 | 0.02 | 0.67 | 0.12 | 1.59 | 0.01 | 1.55 | 0.17 | 500 | 25 | 10.89 | 1.43 | * | * |
| CV-30A | 0.4959 | 0.0060 | 0.18 | 0.02 | 0.61 | 0.05 | 1.51 | 0.08 | 1.51 | 0.08 | 500 | 17.68 | 10.8 | 1.22 | * | * |
| CV-50A | 0.5668 | 0.0053 | 0.25 | 0.05 | 1.03 | 0.16 | - | - | 1.45 | 0.23 | 400 | 0 | 11.39 | 0.83 | * | * |
| CV-70A | 0.5968 | 0.0178 | 0.31 | 0.01 | 1.15 | 0.08 | - | - | 1.37 | 0.6 | 316.67 | 28.87 | 9.39 | 0.6 | * | * |

หมายเหตุ - ไม่สามารถอ่านค่าการทดสอบได้ และ * ไม่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 5.9 สมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ระบบกึ่งประสิทธิภาพที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง

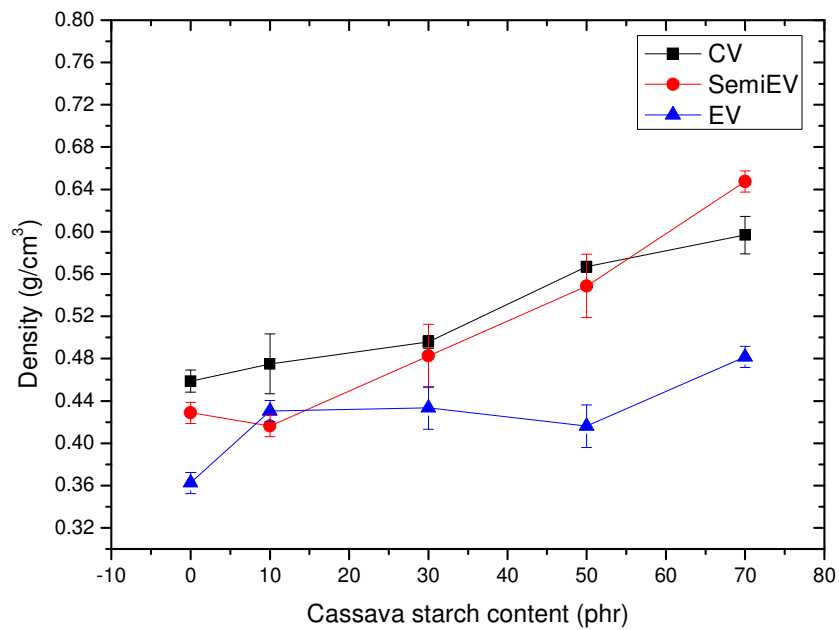
| Cassava starch (phr) | Density (g/cm ³) | | 100% modulus (MPa) | | 300% modulus (MPa) | | 500% modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | | Tear strength (N/mm) | | Compression set(%) | |
|-------------------------|---------------------------------|--------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|---------------------------|------|----------------------------|-------|-------------------------|------|-----------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| Before ageing | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Semi-EV-0 | 0.4288 | 0.0090 | 0.17 | 0.02 | 0.51 | 0.06 | 2 | 0.07 | 2.7 | 0.12 | 625 | 0 | 11.76 | 1.34 | 36.07 | 0.38 |
| Semi-EV-10 | 0.4162 | 0.0101 | 0.17 | 0.29 | 0.66 | 0.07 | 1.78 | 0.1 | 1.91 | 0.31 | 510 | 22.36 | 11.94 | 1.02 | 39.55 | 3.05 |
| Semi-EV-30 | 0.4826 | 0.0323 | 0.18 | 0.02 | 0.82 | 0.08 | - | - | 1.53 | 0.08 | 435 | 13.69 | 11.17 | 1.83 | 60.09 | 1.86 |
| Semi-EV-50 | 0.5487 | 0.0263 | 0.28 | 0.02 | 1.26 | 0.01 | - | - | 1.7 | 0.98 | 391.67 | 14.43 | 11.57 | 1.48 | 77.46 | 1.53 |
| Semi-EV-70 | 0.6474 | 0.0129 | 0.53 | 0.04 | 1.85 | 0.08 | - | - | 1.9 | 0.17 | 345 | 20.92 | 11.2 | 1.07 | 79.41 | 3.53 |
| After ageing | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| Semi-EV-0A | 0.4288 | 0.0090 | 0.19 | 0.04 | 0.59 | 0.09 | 1.9 | 0.04 | 2.11 | 0.34 | 550 | 17.68 | 10.95 | 0.79 | * | * |
| Semi-EV-10A | 0.4162 | 0.0101 | 0.16 | 0.02 | 0.66 | 0.03 | 1.49 | 0.19 | 1.49 | 0.21 | 500 | 13.69 | 11.45 | 1.23 | * | * |
| Semi-EV-30A | 0.4826 | 0.0323 | 0.19 | 0.01 | 0.82 | 0.06 | - | - | 1.46 | 0.03 | 410 | 22.36 | 10.39 | 0.58 | * | * |
| Semi-EV-50A | 0.5487 | 0.0263 | 0.31 | 0.03 | 1.3 | 0.03 | - | - | 1.61 | 0.14 | 391.67 | 14.43 | 11.22 | 0.98 | * | * |
| Semi-EV-70A | 0.6474 | 0.0129 | 0.41 | 0.06 | 1.6 | 0.09 | - | - | 1.70 | 0.09 | 315 | 13.69 | 11.28 | 0.75 | * | * |

หมายเหตุ - ไม่สามารถอ่านค่าการทดสอบได้ และ * ไม่ทำการทดสอบ

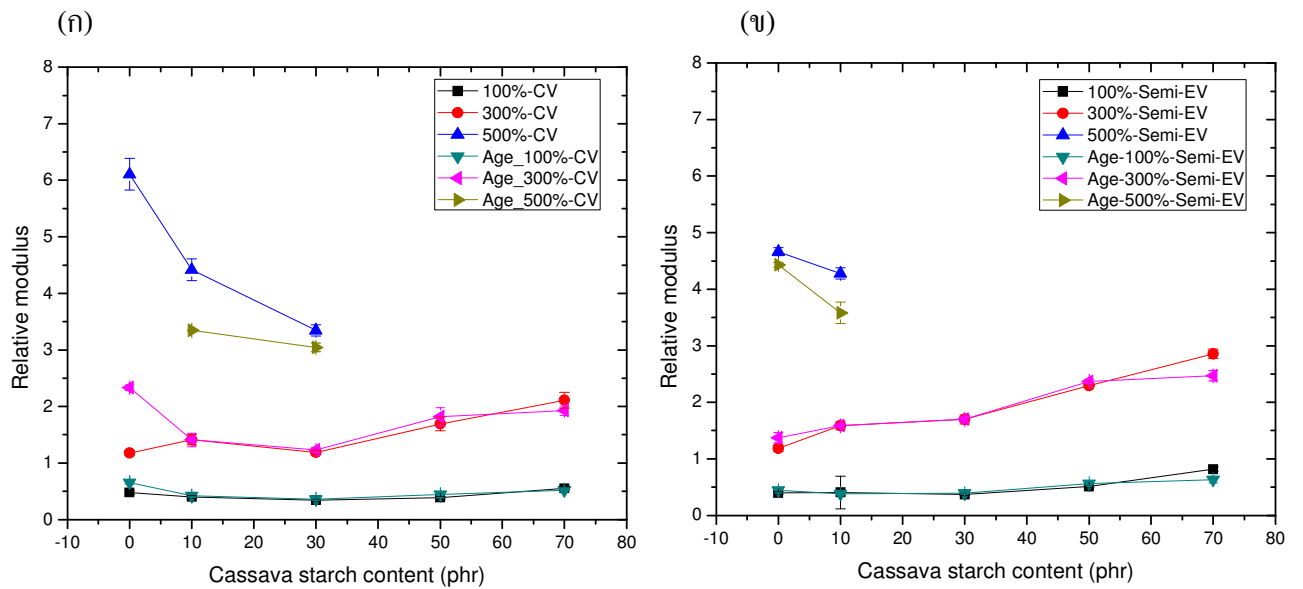
ตารางที่ 5.10 สมบัติทางเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ระบบประสิทธิภาพที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง

| Cassava starch (phr) | 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(%) | |
|-------------------------|---------------------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|---------------------------|------|----------------------------|-------|-------------------------|------|-----------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| Before ageing | | | | | | | | | | | | | | | | |
| EV-0 | 0.3626 | 0.01 | 0.09 | 0.01 | 0.25 | 0.01 | 0.6 | 0.07 | 1.23 | 0.08 | 650 | 0 | 7.96 | 0.1 | 56.61 | 2.78 |
| EV-10 | 0.4305 | 0.01 | 0.14 | 0.37 | 0.42 | 0.1 | 1.26 | 0.34 | 1.61 | 0.38 | 575 | 0 | 9.48 | 1.29 | 39.01 | 5.02 |
| EV-30 | 0.4333 | 0.02 | 0.16 | 0.03 | 0.57 | 0.09 | 1.24 | 0.25 | 1.29 | 0.24 | 520 | 32.60 | 9.90 | 1.55 | 63.94 | 5.05 |
| EV-50 | 0.4162 | 0.02 | 0.18 | 0.02 | 0.6 | 0.06 | - | - | 1.14 | 0.04 | 465 | 13.69 | 6.81 | 0.72 | 68.92 | 0.41 |
| EV-70 | 0.4817 | 0.01 | 0.28 | 0.03 | 1.03 | 0.06 | - | - | 1.23 | 0.09 | 390 | 13.69 | 8.28 | 0.6 | 83.44 | 2.24 |
| After ageing | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| EV-0A | 0.3626 | 0.01 | 0.13 | 0.01 | 0.35 | 0.04 | 0.9 | 0.08 | 1.49 | 0.14 | 595 | 41.08 | 8.80 | 0.64 | * | * |
| EV-10A | 0.4305 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 0.54 | 0.02 | 1.62 | 0.08 | 1.71 | 0.06 | 500 | 30.62 | 13.47 | 0.79 | * | * |
| EV-30A | 0.4333 | 0.02 | 0.19 | 0.03 | 0.62 | 0.08 | 1.25 | 0 | 1.76 | 0.11 | 485 | 37.91 | 12.04 | 1.73 | * | * |
| EV-50A | 0.4162 | 0.02 | 0.19 | 0.02 | 0.65 | 0.07 | - | - | 1.04 | 0.08 | 400 | 25 | 10.13 | 0.88 | * | * |
| EV-70A | 0.4817 | 0.01 | 0.32 | 0.04 | 1.1 | 0.13 | - | - | 1.26 | 0.12 | 335 | 28.50 | 10.88 | 0.68 | * | * |

หมายเหตุ - *ไม่สามารถอ่านค่าการทดสอบได้ และ * ไม่ทำการทดสอบ

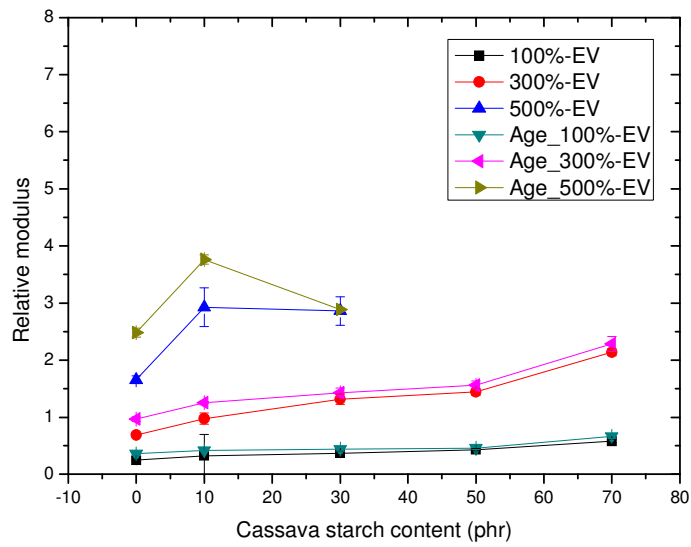


รูปที่ 5.13 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัดคาบอินซ์ต่อค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำ

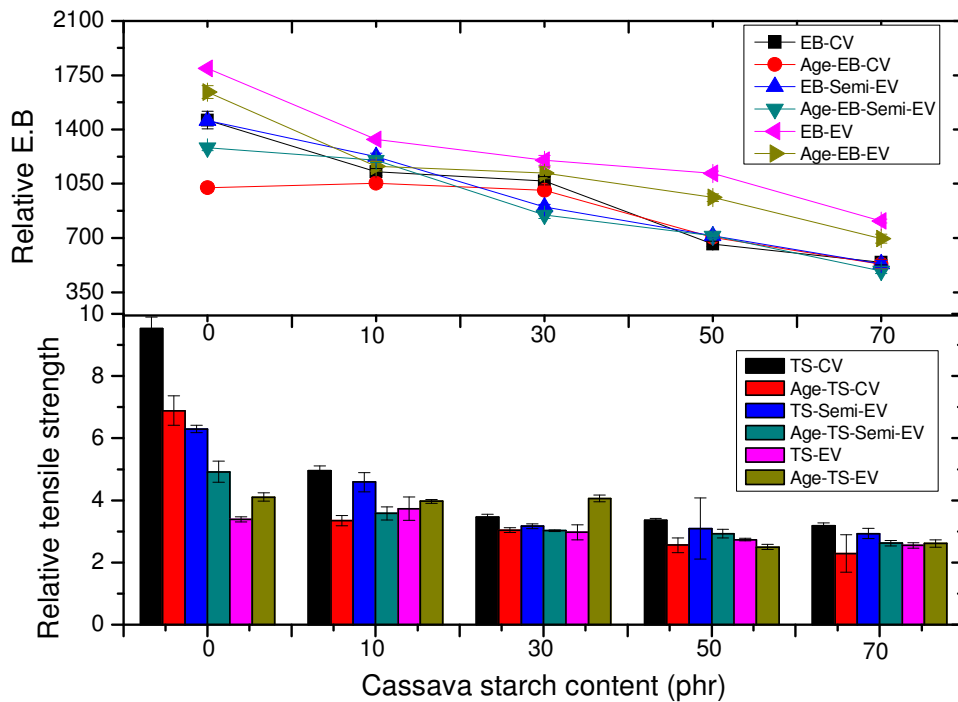


รูปที่ 5.14 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อ ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง (ก) ระบบการวัดคาบอินซ์แบบปกติ (ข) ระบบการวัดคาบอินซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ

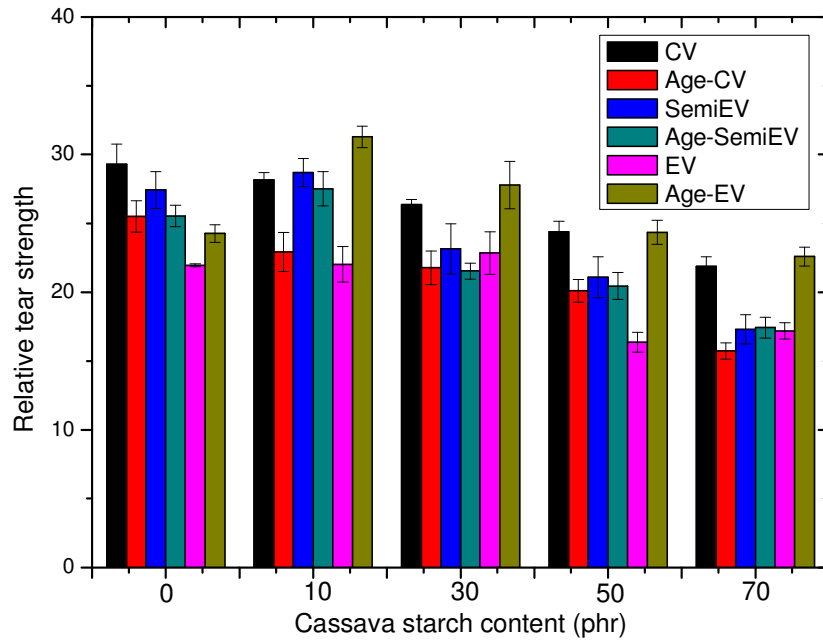
(ค)



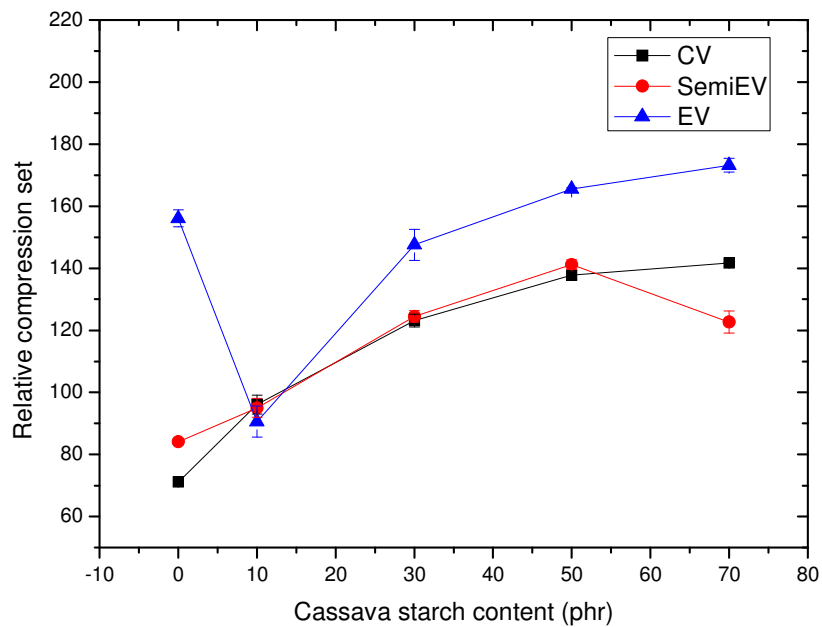
รูปที่ 5.14 (ต่อ) ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อ ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ของยางพองน้ำก่อนและหลังบ่ม
เร่ง (ค) ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.15 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง
สัมพัทธ์ และระยะยืดจนขาดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง



รูปที่ 5.16 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำก่อนและหลังบ่มเร่ง



รูปที่ 5.17 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังและระบบการวัลคาไนซ์ต่อค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.8 – 5.10 และรูปที่ 5.13 พบว่าเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นทุกระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งทำให้ความถ่วงจำเพาะของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพเล็กน้อย และสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการวัลคาไนซ์เพื่อการขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้าระบบการวัลคาไนซ์มีค่าดัชนีการวัลคาไนซ์เร็วกว่าแบบปกติ และเกิดปริมาณการเชื่อมขวางที่เร็วกว่า และมีปริมาณการเชื่อมขวางที่มากกว่า ทำให้รักษาขนาดของเซลล์ที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของก๊าซที่ปล่อยออกมาจากสารฟูกมากกว่าได้ดีกว่า ส่งผลให้มีขนาดเซลล์ที่เล็กกว่า และจำนวนเซลล์ที่มากกว่า จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบแบบปกติมีค่าต่ำกว่ายางฟองน้ำที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบแบบกึ่งประสิทธิภาพ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของยางฟองน้ำที่ได้ตรวจวัดด้วยเครื่อง SEM ดังแสดงในรูปที่ 5.18

จากรูปที่ 5.14 ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ซึ่งค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ได้มาจากค่าโมดูลัสต่อความหนาแน่นของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่า 100%, 300% และ 500% โมดูลัสสัมพัทธ์ เพิ่มสูงขึ้นทั้งก่อนและหลังบ่มแรง ทุกระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งเป็นเม็ดอนุภาคที่แข็ง เมื่อใส่เข้าไปในยางจะช่วยเพิ่มความแข็งตึง(stiffness) ของยางเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มแรง พบว่าสมบัติของยางฟองน้ำหลังบ่มแรงมีค่าใกล้เคียงกันกับก่อนบ่มแรง แสดงให้เห็นว่ายางฟองน้ำทนต่อสภาวะอุณหภูมิดังกล่าวได้ดี

เมื่อเปรียบเทียบโมดูลัสสัมพัทธ์ระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ พบว่า ที่ระยะยืดต่ำ ๆ 100% และ 300% โมดูลัสสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำทั้งระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติและระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกัน และสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ แต่ที่ระยะยืด 500% โมดูลัสสัมพัทธ์ ของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพเล็กน้อย และสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.15 ค่าต่อความต้านทานแรงดึงสัมพัทธ์และระยะยืดจนขาดสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำวัลคาไนซ์ พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์และระยะยืดจนขาดสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงทั้งก่อนและหลังบ่มแรง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งทำให้ความแข็งตึงของยางเพิ่มขึ้น ทำให้ยืดได้น้อย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ก่อนบ่มแรงพบว่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางฟองน้ำทั้งระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ มีการใช้กำมะถันที่มากกว่า ทำให้มีพันธะการเชื่อมโยงที่สูงกว่าและให้พันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟดิก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่า

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างก่อนและหลังบ่มเร่งพบว่า ยางพองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติหลังบ่มเร่ง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนบ่มเร่งสูงที่สุด สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ เช่นที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 10 phr ยางพองน้ำหลังบ่มเร่งของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ มีค่าการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนบ่มเป็น -34%, -22% และ +6% ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบโมโนซัลฟิดิก และไดซัลฟิดิก (-C-S-) มีพลังงานพันธะ 279kJ/mol สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติที่ให้พันธะการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก (-S-S-) มีพลังงานพันธะ 206 kJ/mol ส่งผลให้มีความต้านทานการเสื่อมด้วยความร้อนได้ดีกว่า

จากรูปที่ 5.16 ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำวัลคาไนซ์ พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงทั้งก่อนและหลังบ่มเร่ง ดังเหตุผลเดียวที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ก่อนบ่มเร่งพบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างก่อนและหลังบ่มเร่งพบว่า ยางพองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติหลังบ่มเร่ง มีอัตราการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนบ่มเร่งสูงที่สุด สูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ดังเหตุผลเดียวกันที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

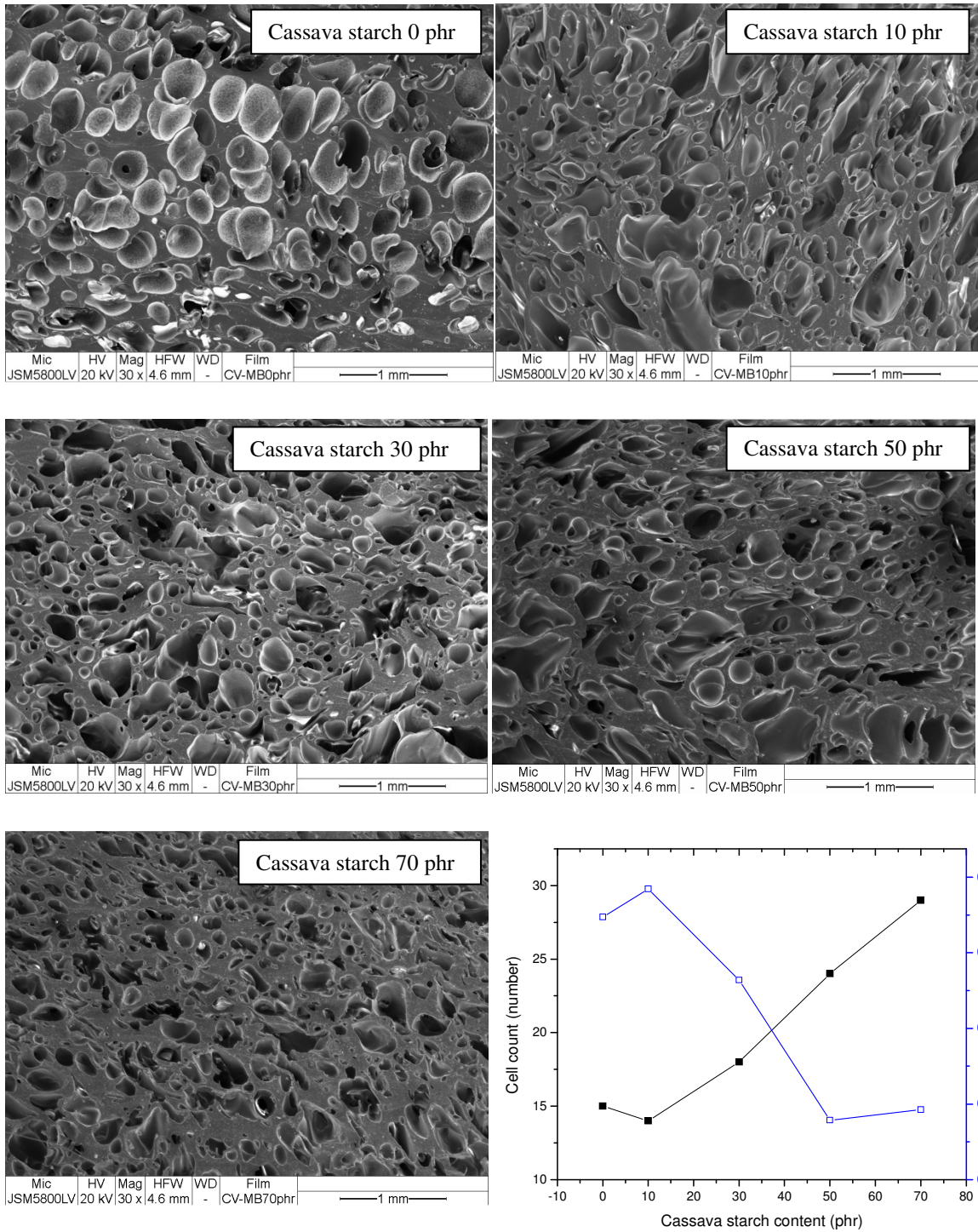
จากรูปที่ 5.17 ค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำ พบว่าเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้นจะให้ค่าการเสียรูปหลังการกดของยางพองน้ำวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าด้วยโครงสร้างของยางพองน้ำมีลักษณะโครงสร้างเซลล์แบบปิด เมื่ออยู่สภาวะผิดปกติลักษณะการกดอัดประมาณ 30 % ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้โครงสร้างเซลล์เกิดความเสียหาย (แตก) จนไม่สามารถคืนตัวกลับได้หลังการกดอัดและเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นทำให้ความยืดหยุ่นของยางพองน้ำลดลง ทำให้ค่าการเสียรูปหลังการกดเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์พบว่าค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับเดียวกันของระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติมีค่าใกล้เคียงกับระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะเซลล์ของยางพองน้ำของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มีขนาดใหญ่กว่าส่งผลแรงต้านการกด หรือรับแรงกดได้น้อยกว่า ทำให้ยางพองน้ำเกิดการเสียรูปหลังการกดสูงกว่า

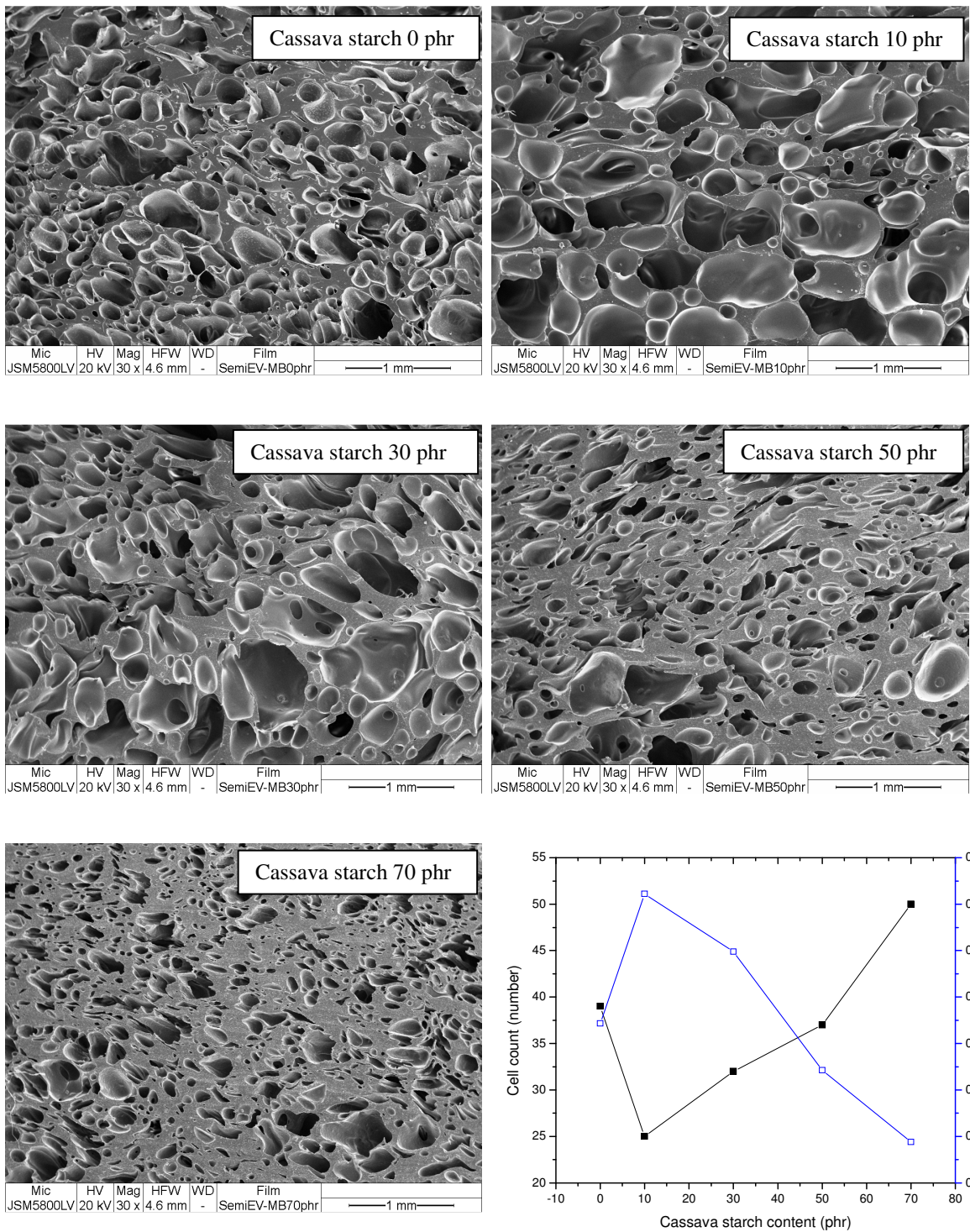
จากรูปที่ 5.18 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ จะพบว่าลักษณะเซลล์ที่ได้เป็นเซลล์ปิด และเมื่อใช้ปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นจะเห็นว่ามีความหนาแน่นให้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น และขนาดของเซลล์มีแนวโน้มเล็กลงผลมาจากปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น ทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงมีแรงต้านในการขยายตัว

หรือการรวมตัวของก๊าซที่เกิดขึ้นได้ดีกว่า ทำให้ขนาดเซลล์ที่ได้มีขนาดเล็กลง จำนวนเซลล์ที่ได้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.18 (ข) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าความหนืดมูนิและค่าความหนาแน่นของยาง ฟองน้ำ ที่เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้นจะให้ความหนืดมูนิเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของยางฟองน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ได้ยางฟองน้ำที่มีจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น และมีขนาดเซลล์ลดลง แต่ถึงแม้ว่าจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น และขนาดเซลล์ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณแป้ง แต่ยางฟองน้ำที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างแข็ง และหนัก ทำให้สูญเสียสมบัติเด่นของยางฟองน้ำ ที่ต้องมีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่นและรับแรงกดทับหรือแรงกระแทกได้ดี

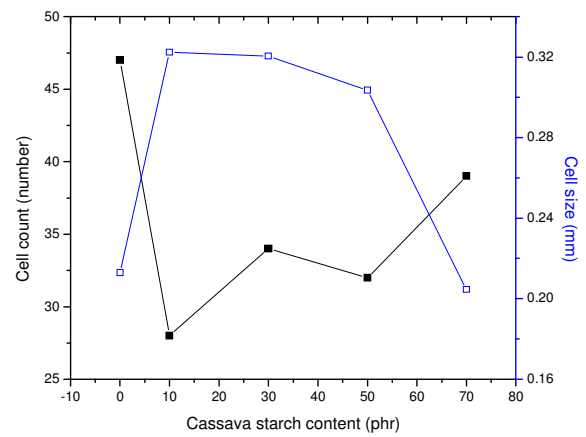
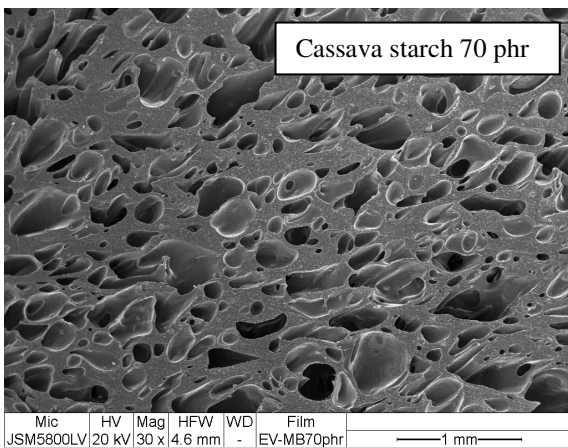
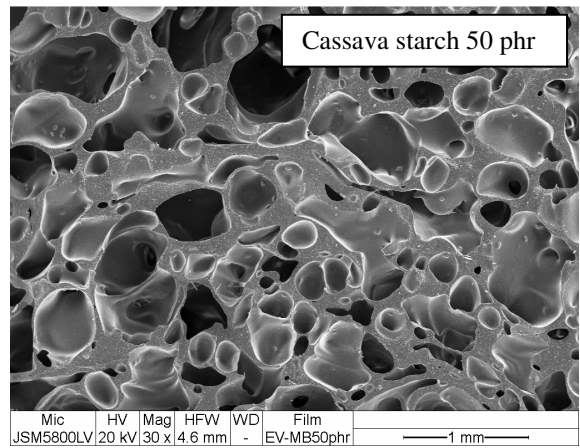
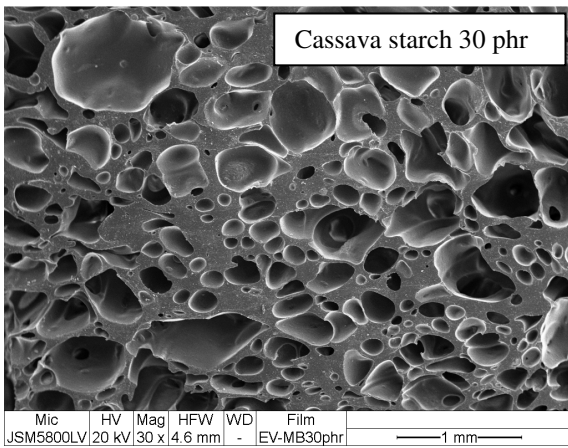
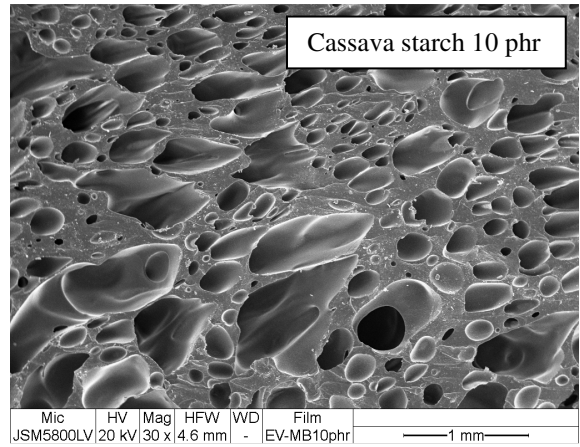
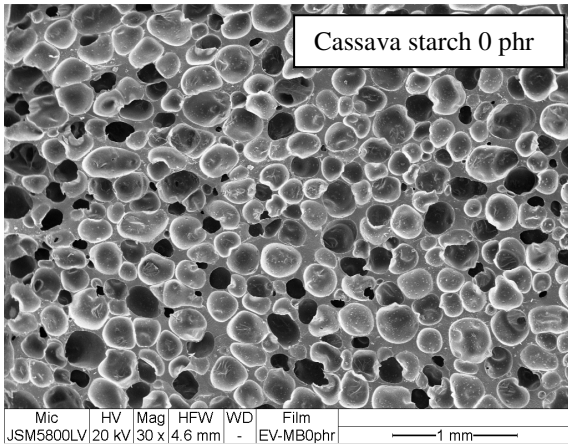
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำระหว่างระบบการวัลคาไนซ์ ในสูตรที่ไม่ใส่แป้งพบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มีลักษณะเซลล์เล็ก มีขนาดสม่ำเสมอ กว่าสูตรที่วัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดมูนิที่ต่ำของยางฟองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ ทำให้การขยายตัวของก๊าซที่ปล่อยออกมาจากสารฟูเกิดเป็นเซลล์ได้ง่าย ให้จำนวนเซลล์ที่สม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเข้าสู่สูตรยางทั้งสามระบบการวัลคาไนซ์พบว่าจำนวนเซลล์มีแนวโน้มลดลง แต่ความสม่ำเสมอของขนาดเซลล์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวของแป้งในเนื้อยาง อาจเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ มีการเกาะกลุ่มก้อนทำให้ขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ โดยขนาดเซลล์และจำนวนเซลล์ของยางฟองน้ำผสมแป้งทั้งสามระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.18 – 5.20



รูปที่ 5.18 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์พองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ



รูปที่ 5.19 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์ฟองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.20 (ก) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ และ (ข) ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อจำนวนเซลล์และขนาดเซลล์พองน้ำ ที่ใช้ระบบการวัดคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ

5.5 ผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังดิน

นำยางพองน้ำที่เตรียมได้ที่ระดับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0, 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ มาทำการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน หลังจากฝังดินครบตามเวลาที่กำหนด นำมาทดสอบ 100%, 300% และ 500% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด ดังแสดงในตารางที่ 5.12 – 5.14 และรูปที่ 5.23 นำหนักที่หายไปยางพองน้ำ และนำมาตรวจวัดลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ (ลักษณะเซลล์ ขนาดของเซลล์เฉลี่ย จำนวนเซลล์) ด้วยเครื่อง SEM

ตารางที่ 5.11 สมบัติทางเชิงกลของยางพองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน 2 เดือน

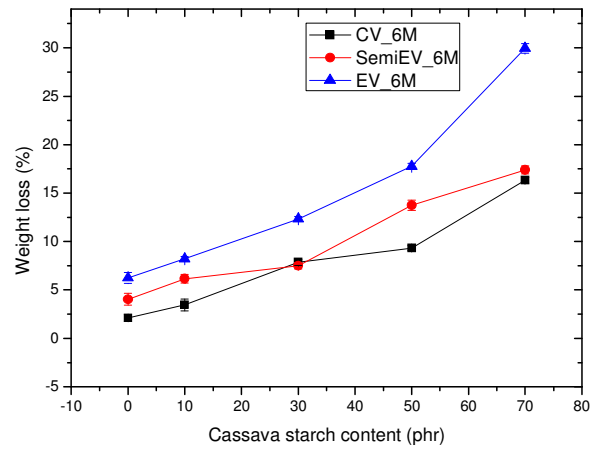
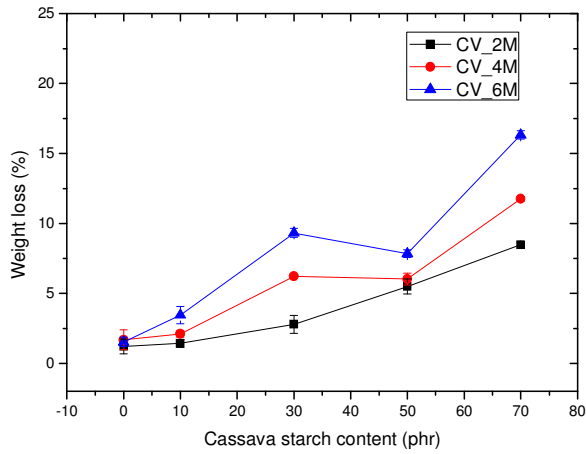
| Cassava starch content (phr) | Weight loss (%) | | 100% modulus (MPa) | | 300% modulus (MPa) | | 500% modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | | Tear strength (N/mm) | |
|------------------------------|-----------------|------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|------------------------|------|-------------------------|-------|----------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| CV-0-2M | 1.2062 | 0.52 | 0.20 | 0.05 | 0.63 | 0.07 | 1.55 | 0.24 | 1.62 | 0.38 | 512.5 | 25.00 | 12.32 | 0.35 |
| CV-10-2M | 1.4354 | 0.28 | 0.21 | 0.03 | 0.67 | 0.03 | - | - | 1.38 | 0.30 | 437.5 | 32.27 | 11.87 | 0.84 |
| CV-30-2M | 2.7912 | 0.64 | 0.12 | 0.01 | 0.39 | 0.01 | - | - | 0.86 | 0.20 | 450 | 50.00 | 6.47 | 0.84 |
| CV-50-2M | 5.4925 | 0.53 | 0.13 | 0.01 | 0.37 | 0.01 | - | - | 0.74 | 0.09 | 418.75 | 12.5 | 6.12 | 0.64 |
| CV-70-2M | 8.4853 | 0.18 | 0.07 | 0.01 | 0.22 | 0.01 | 0.54 | 0.04 | 0.81 | 0.09 | 575 | 20.41 | 3.22 | 0.28 |
| SemiEV-0-2M | 1.4525 | 0.12 | 0.22 | 0 | 0.51 | 0.02 | 1.35 | 0.01 | 2.35 | 0.19 | 583.33 | 14.43 | 10.53 | 0.89 |
| SemiEV-10-2M | 1.4718 | 0.22 | 0.20 | 0.02 | 0.49 | 0.01 | 1.27 | 0 | 1.26 | 0.27 | 500 | 43.30 | 8.45 | 0.15 |
| SemiEV-30-2M | 3.6172 | 0.44 | 0.16 | 0.01 | 0.38 | 0.01 | - | - | 0.92 | 0.09 | 458.33 | 14.43 | 6.78 | 0.80 |
| SemiEV-50-2M | 5.6673 | 0.51 | 0.11 | 0.01 | 0.32 | 0.02 | - | - | 0.53 | 0.10 | 383.33 | 14.43 | 4.05 | 0.74 |
| SemiEV-70-2M | 11.6992 | 0.68 | 0.10 | 0 | 0.28 | 0.01 | 0.72 | 0.06 | 0.74 | 0.05 | 500 | 0 | 4.76 | 0.22 |
| EV-0-2M | 1.5415 | 0.44 | 0.11 | 0.01 | 0.27 | 0.05 | 0.74 | 0.10 | 1.66 | 0.11 | 625 | 43.30 | 7.50 | 0.25 |
| EV-10-2M | 1.8443 | 0.31 | 0.10 | 0.02 | 0.29 | 0.03 | 0.92 | 0.13 | 1.31 | 0.10 | 558.33 | 14.43 | 6.31 | 0.63 |
| EV-30-2M | 4.9121 | 0.25 | 0.08 | 0.01 | 0.26 | 0.02 | - | - | 0.55 | 0.06 | 408.33 | 14.43 | 4.77 | 1.14 |
| EV-50-2M | 6.8346 | 0.78 | 0.06 | 0 | 0.24 | 0.01 | - | - | 0.54 | 0.10 | 425 | 25 | 4.28 | 0.97 |
| EV-70-2M | 14.8462 | 0.66 | 0.07 | 0 | 0.17 | 0.01 | - | - | 0.73 | 0.04 | 587.5 | 53.03 | 4.01 | 0.23 |

ตารางที่ 5.12 สมบัติทางเชิงกลของยางพองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน 4 เดือน

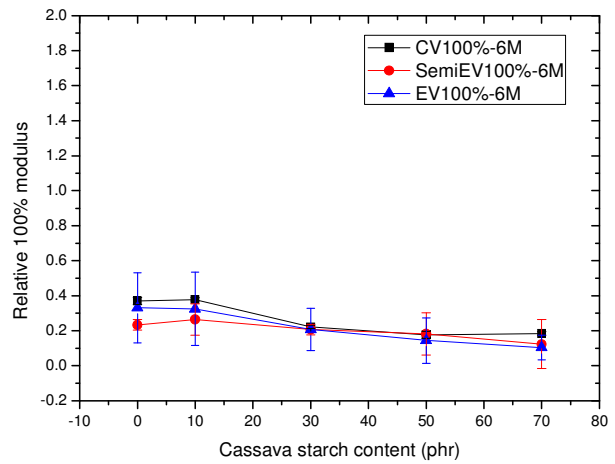
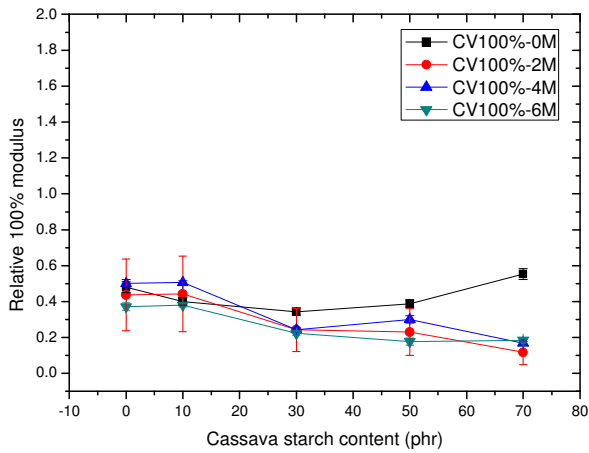
| Cassava starch content (phr) | Weight loss (%) | | 100% modulus (MPa) | | 300% modulus (MPa) | | 500% modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | | Tear strength (N/mm) | |
|------------------------------|-----------------|------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|------------------------|------|-------------------------|-------|----------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| CV-0-4M | 1.68789 | 0.71 | 0.23 | 0.02 | 0.59 | 0.01 | 1.54 | 0.03 | 1.86 | 0.08 | 537.50 | 17.68 | 12.06 | 0.54 |
| CV-10-4M | 2.10962 | 0.24 | 0.24 | 0.01 | 0.66 | 0.02 | - | - | 1.46 | 0.02 | 433.33 | 28.87 | 9.21 | 0.01 |
| CV-30-4M | 6.22567 | 0.11 | 0.12 | 0.01 | 0.35 | 0.03 | - | - | 0.79 | 0.08 | 441.67 | 14.43 | 5.57 | 0.04 |
| CV-50-4M | 6.01892 | 0.42 | 0.17 | 0.02 | 0.44 | 0.04 | - | - | 0.73 | 0.05 | 408.33 | 14.43 | 6.56 | 0.07 |
| CV-70-4M | 11.7582 | 0.16 | 0.1 | 0.01 | 0.27 | 0.01 | 0.59 | 0.01 | 0.76 | 0.02 | 550.00 | 0.00 | 5.40 | 0.74 |
| SemiEV-0-4M | 1.5918 | 0.41 | 0.26 | 0.03 | 0.64 | 0.05 | 1.74 | 0.16 | 2.41 | 0.17 | 537.50 | 17.68 | 11.27 | 0.87 |
| SemiEV-10-4M | 1.7324 | 0.21 | 0.19 | 0.02 | 0.49 | 0.02 | - | - | 1.64 | 0.09 | 466.67 | 14.43 | 7.99 | 0.61 |
| SemiEV-30-4M | 8.4155 | 0.35 | 0.15 | 0.01 | 0.43 | 0.06 | - | - | 0.86 | 0.06 | 450.00 | 0.00 | 4.53 | 0.55 |
| SemiEV-50-4M | 8.3236 | 0.43 | 0.12 | 0.02 | 0.32 | 0.01 | - | - | 0.77 | 0.09 | 466.67 | 14.43 | 3.71 | 0.10 |
| SemiEV-70-4M | 13.0910 | 0.33 | 0.13 | 0.01 | 0.34 | 0.01 | - | - | 0.83 | 0.03 | 475.00 | 0.00 | 4.94 | 0.38 |
| EV-0-4M | 2.2034 | 0.43 | 0.17 | 0.01 | 0.39 | 0.01 | 0.94 | 0.08 | 1.40 | 0.06 | 616.67 | 28.87 | 7.44 | 0.88 |
| EV-10-4M | 3.1609 | 0.52 | 0.19 | 0.00 | 0.44 | 0.01 | 1.22 | 0.00 | 1.14 | 0.32 | 500.00 | 35.36 | 6.03 | 0.47 |
| EV-30-4M | 10.5884 | 0.64 | 0.14 | 0.01 | 0.36 | 0.04 | - | - | 0.63 | 0.04 | 375.00 | 0.00 | 4.58 | 0.59 |
| EV-50-4M | 14.5572 | 0.72 | 0.11 | 0.00 | 0.27 | 0.00 | - | - | 0.58 | 0.09 | 450.00 | 35.36 | 3.67 | 0.06 |
| EV-70-4M | 16.9958 | 0.22 | 0.11 | 0.01 | 0.26 | 0.01 | 0.62 | 0.02 | 0.64 | 0.01 | 500.00 | 0.00 | 4.54 | 0.01 |

ตารางที่ 5.13 สมบัติทางเชิงกลของยางพองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน 6 เดือน

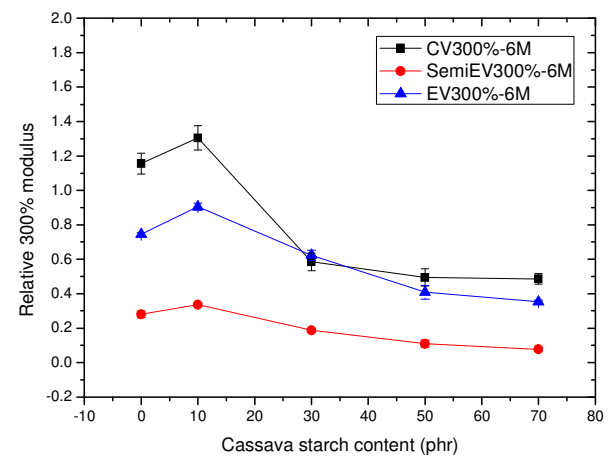
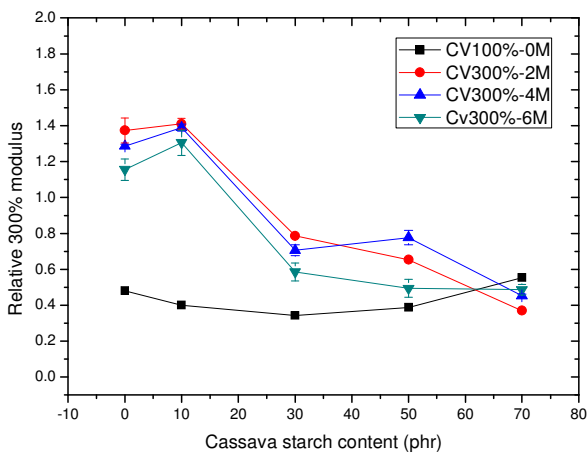
| Cassava starch content (phr) | Weight loss (%) | | 100% modulus (MPa) | | 300% modulus (MPa) | | 500% modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | | Tear strength (N/mm) | |
|------------------------------|-----------------|------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|------------------------|------|-------------------------|-------|----------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| CV-0-6M | 2.1153 | 0.34 | 0.17 | 0.02 | 0.53 | 0.06 | 1.27 | 0.19 | 1.91 | 0.22 | 550.00 | 20.41 | 10.85 | 0.48 |
| CV-10-6M | 3.4548 | 0.61 | 0.18 | 0.01 | 0.62 | 0.07 | - | - | 0.91 | 0.16 | 405.00 | 32.60 | 6.26 | 0.55 |
| CV-30-6M | 7.8458 | 0.32 | 0.11 | 0.01 | 0.29 | 0.01 | - | - | 0.45 | 0.08 | 412.50 | 52.04 | 3.61 | 0.10 |
| CV-50-6M | 9.3284 | 0.26 | 0.1 | 0.02 | 0.28 | 0.05 | 0.44 | 0.03 | 0.44 | 0.05 | 460.00 | 62.75 | 3.58 | 0.33 |
| CV-70-6M | 16.3254 | 0.29 | 0.11 | 0.01 | 0.29 | 0.03 | 0.58 | 0.05 | 0.63 | 0.05 | 510.00 | 28.50 | 4.22 | 0.16 |
| SemiEV-0-6M | 4.0356 | 0.62 | 0.1 | 0.01 | 0.38 | 0.02 | 1.00 | 0.06 | 1.74 | 0.12 | 550.00 | 17.68 | 8.44 | 0.14 |
| SemiEV-10-6M | 6.1478 | 0.45 | 0.11 | 0.02 | 0.38 | 0.03 | 0.97 | 0.00 | 0.84 | 0.01 | 462.50 | 14.43 | 6.86 | 0.16 |
| SemiEV-30-6M | 7.4971 | 0.33 | 0.10 | 0.02 | 0.37 | 0.03 | - | - | 0.71 | 0.10 | 450.00 | 25.00 | 4.47 | 0.49 |
| SemiEV-50-6M | 13.7354 | 0.53 | 0.10 | 0.03 | 0.30 | 0.04 | 0.65 | 0.00 | 0.87 | 0.03 | 458.00 | 14.43 | 5.11 | 0.41 |
| SemiEV-70-6M | 17.3891 | 0.41 | 0.08 | 0.02 | 0.26 | 0.04 | 0.74 | 0.10 | 0.77 | 0.11 | 530.00 | 44.72 | 4.27 | 0.59 |
| EV-0-6M | 6.2475 | 0.56 | 0.12 | 0.02 | 0.27 | 0.04 | 0.60 | 0.08 | 1.52 | 0.08 | 635.00 | 41.83 | 6.75 | 0.86 |
| EV-10-6M | 8.2144 | 0.22 | 0.14 | 0.01 | 0.39 | 0.04 | 0.97 | 0.11 | 1.01 | 0.12 | 485.00 | 28.50 | 6.78 | 1.02 |
| EV-30-6M | 12.3456 | 0.24 | 0.09 | 0.01 | 0.27 | 0.03 | - | - | 0.55 | 0.08 | 420.00 | 20.92 | 3.31 | 0.23 |
| EV-50-6M | 17.7647 | 0.33 | 0.06 | 0.01 | 0.17 | 0.01 | 0.42 | 0.05 | 0.52 | 0.06 | 530.00 | 32.60 | 2.71 | 0.29 |
| EV-70-6M | 29.9456 | 0.51 | 0.05 | 0.01 | 0.17 | 0.01 | 0.43 | 0.04 | 0.78 | 0.08 | 625.00 | 43.30 | 3.20 | 0.58 |



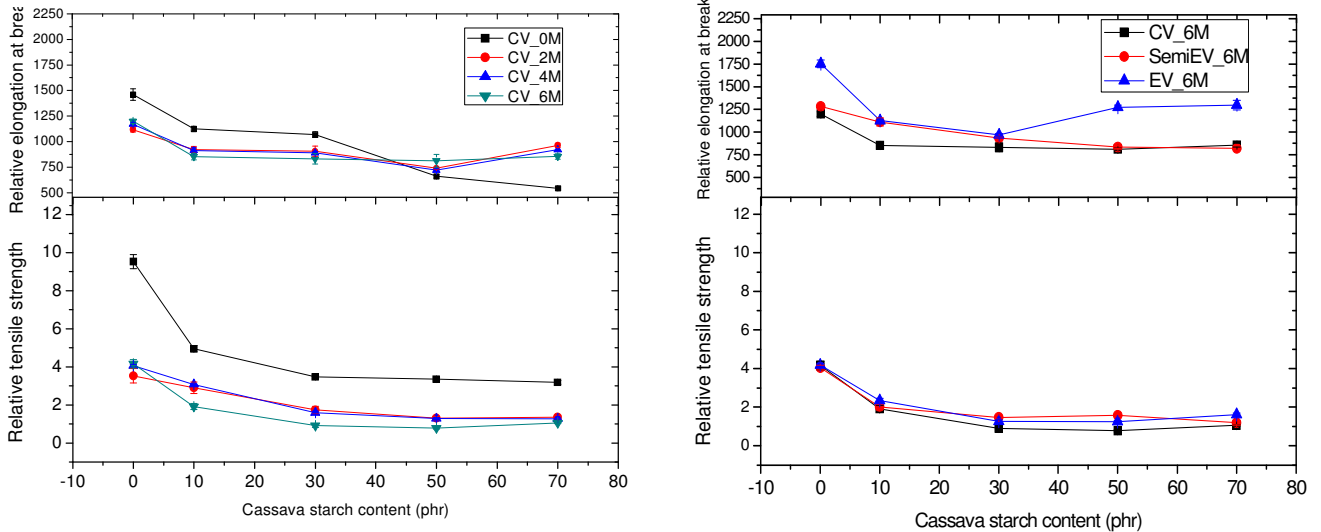
รูปที่ 5.21 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำหนักที่หายไปหลังฝังดิน (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน



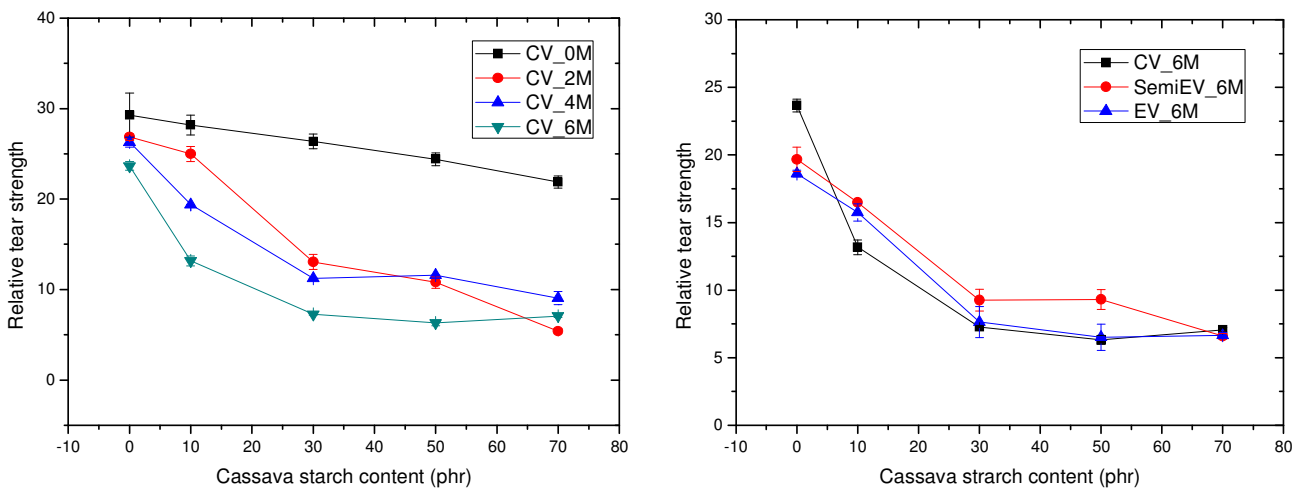
รูปที่ 5.22 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่า 100% โมดูลัสสัมพัทธ์ (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน



รูปที่ 5.23 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่า 300% โมดูลัสสัมพัทธ์ (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน



รูปที่ 5.24 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน



รูปที่ 5.25 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ (ก) ที่ระยะฝังดินเวลาต่าง ๆ (ข) ที่ระบบการวัลคาไนซ์แบบต่าง ๆ เป็นเวลา 6 เดือน

จากตารางที่ 5.11 – 5.13 และรูปที่ 5.21 แสดงผลให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการใส่แป้งมันสำปะหลังในสูตรยางพองน้ำ ส่งผลเกิดการเสื่อมสภาพด้วยการฝังดินของยางพองน้ำ จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปหลังจากฝังดินไปเป็นเวลา 2 , 4 และ 6 เดือน มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นแป้งมีส่วนทำให้เกิดอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยางเร็วได้เร็วขึ้น จากการเสื่อมด้วยการฝังดิน และเวลาในการทดสอบ 6 เดือน จะมีอัตราการเสื่อมสภาพของยางพองน้ำสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์พบว่ายางพองน้ำในสูตรที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ จะมีอัตราเร็วในการ

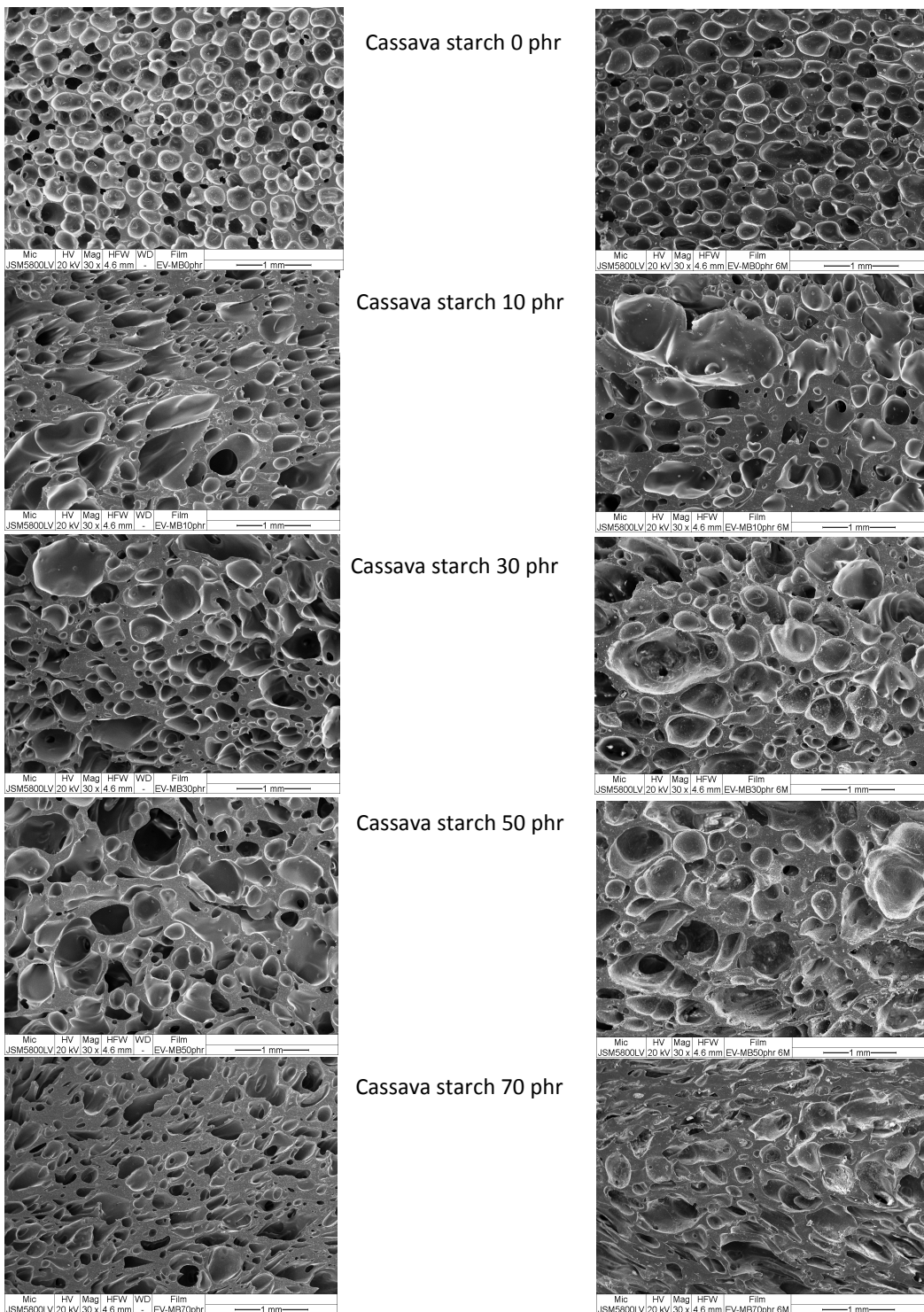
เสื่อมสภาพสูงกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบปกติ ตามลำดับ ทั้งนี้จะเป็นเพราะว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ มีการใช้กำมะถันน้อยกว่าระบบอื่น ๆ ลักษณะการเกิดการเชื่อมขวางของกำมะถันส่วนใหญ่เป็นแบบมอดูลีฟิเคชัน และเกิดพันธะการเชื่อมโยงที่น้อยกว่า ส่งผลให้ยางพองน้ำมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่า จะเห็นได้จากสมบัติทางเชิงกลก่อนการฝังดินของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพจะต่ำที่สุด ดังนั้นจึงทำให้ง่ายต่อเสื่อมสภาพด้วยการฝังดิน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า น้ำหนักที่หายไปหลังฝังดินของระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพจะสูงที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ คณิศร และคณะ (2011) ที่ได้ทำการศึกษาระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ แบบประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในยางธรรมชาติที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย พบว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ที่ใส่สารยับยั้งแบคทีเรีย Biocleanact™ และ IRGAGUARD B 5000 สามารถยับยั้งเชื้อ *Escherichia coli* ได้ดีกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะให้พันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟด์ เป็นแบบสายโซ่ยาว ทำให้โมเลกุลของยางมีปริมาตรช่องว่าง (free volume) มาก ทำให้สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียออกมายับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ง่ายกว่า

จากรูปที่ 5.22 -5.25 สมบัติทางเชิงกลสัมพัทธ์ได้แก่ 100%, 300% โมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด มีแนวโน้มลดต่ำลง เมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาการฝังดินเพิ่มขึ้น สมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะลดต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบการวัลคาไนซ์จะเห็นได้ว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพจะมีสมบัติทางเชิงกลสัมพัทธ์ต่ำสุด ต่ำกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบปกติ ตามลำดับ ดังเหตุผลเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ด้านบนแล้ว

ในการทดลองนี้ได้มีการนำยางพองน้ำหลังฝังดินไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ เพื่อคุณลักษณะเซลล์ที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างลักษณะเซลล์ของพองน้ำดังแสดงในรูปที่ 5.26

(ก) ก่อนฝังดิน

(ข) หลังฝังดิน 6 เดือน



รูปที่ 5.26 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ปริมาณแป้งมันสำปะหลังระดับต่าง ๆ ที่ใช้ระบบการวัดคานซ์แบบประสิทธิภาพ (ก) ลักษณะก่อนฝังดิน (ข) ลักษณะหลังฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน

จากรูปที่ 5.26 (ข) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ หลังฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน เปรียบเทียบกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำระบบการวัลคาไนซ์ เดียวกันก่อนฝังดิน จะพบว่าในสูตรยางฟองน้ำที่ไม่ใส่แป้งมันสำปะหลัง ลักษณะเซลล์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ในสูตรยางฟองน้ำที่ใส่แป้งมันสำปะหลังหลังฝังดิน ลักษณะเซลล์จะเปลี่ยนแปลงไปสังเกต ได้ชัดเจนในสูตรที่ใช้ปริมาณแป้ง 70 phr ลักษณะเซลล์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีบางส่วนเกิดเป็นเซลล์เปิด และมองเห็นขนาดอนุภาคของแป้งหลุดออกมาที่บริเวณผิวยาง จากผลการทดลองนี้ยืนยันให้เห็นว่าการใส่แป้ง ในสูตรยางฟองน้ำ จะมีผลช่วยให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นจากการฝังดิน

จากผลการทดลองในการใส่แป้งมันสำปะหลังในสูตรยางฟองน้ำ ซึ่งให้เห็นว่า การใส่แป้งเพิ่มมากขึ้น จะให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางเชิงกลสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลงเมื่อ ปริมาณแป้งเพิ่มมากขึ้น ลักษณะเซลล์ที่ได้เป็นเซลล์ปิด จำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้นและมีขนาดเซลล์ลดลงตาม ปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ปริมาณแป้ง 50 และ 70 phr จะให้ยางฟองน้ำที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างแข็ง และหนัก ทำให้สูญเสียสมบัติเด่นของยางฟองน้ำ ที่ต้องมีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่นและรับแรงกดทับหรือแรง กระแทกได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างระบบการวัลคาไนซ์จะพบว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะสามารถทำการขึ้นรูปยางฟองน้ำได้ง่ายกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่น ๆ รวมถึงให้สมบัติทางเชิงกล สัมพัทธ์ดีที่สุด และสมบัติหลังฝังดินจะพบว่าการใส่แป้งจะช่วยเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพด้วยการฝังดิน ได้ ดีกว่าการไม่ใส่แป้ง และที่ปริมาณแป้งปริมาณ 30 phr จะให้สมบัติทางเชิงกลสัมพัทธ์หลังฝังดิน ลดลงอย่าง ชัดเจนจากสูตรที่ไม่ใส่แป้ง ส่วนที่ปริมาณแป้ง 50 และ 70 phr มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากที่ปริมาณแป้ง 30 phr ถึงแม้ว่ายางฟองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะมีอัตราการเสื่อมสภาพจากฝังดิน (คิดจาก เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป) ได้น้อยกว่าระบบอื่น ๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกันที่ปริมาณแป้ง 30 phr จะเห็นว่า เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ไม่ได้แตกต่างจากระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่น ๆ มากนัก จากผลดังกล่าวนี้ คณะผู้วิจัย จึงเลือกใช้ปริมาณแป้ง 30 phr ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ในการเปรียบเทียบชนิดของแป้งใน หัวข้อถัดไป

5.6 ผลของชนิดของแป้งในการเตรียมยางพองน้ำ

ผลการศึกษานิดของแป้ง 3 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด ที่ ปริมาณ 30 phr โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ ต่อค่าความหนืดมูนี่ ลักษณะการวัลคาไนซ์ ที่ อุณหภูมิ 150 °C ดังแสดงในตารางที่ 5.14 และนำไปอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ใช้สำหรับเตรียมชิ้น ตัวอย่างสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนาแน่น 100% , 300% , 500% โมดูลัส ความ ต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกด ก่อนและ หลังบ่มเร่งด้วยความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.27 – 5.35 สมบัติของยางหลังจากฝังดิน ไว้เป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 5.16 และตรวจลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ (ลักษณะเซลล์ ขนาดของเซลล์เฉลี่ย จำนวนเซลล์) ด้วยเครื่อง SEM

ตารางที่ 5.14 ผลของชนิดของแป้งต่อค่าความหนืดมูนี่และลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์

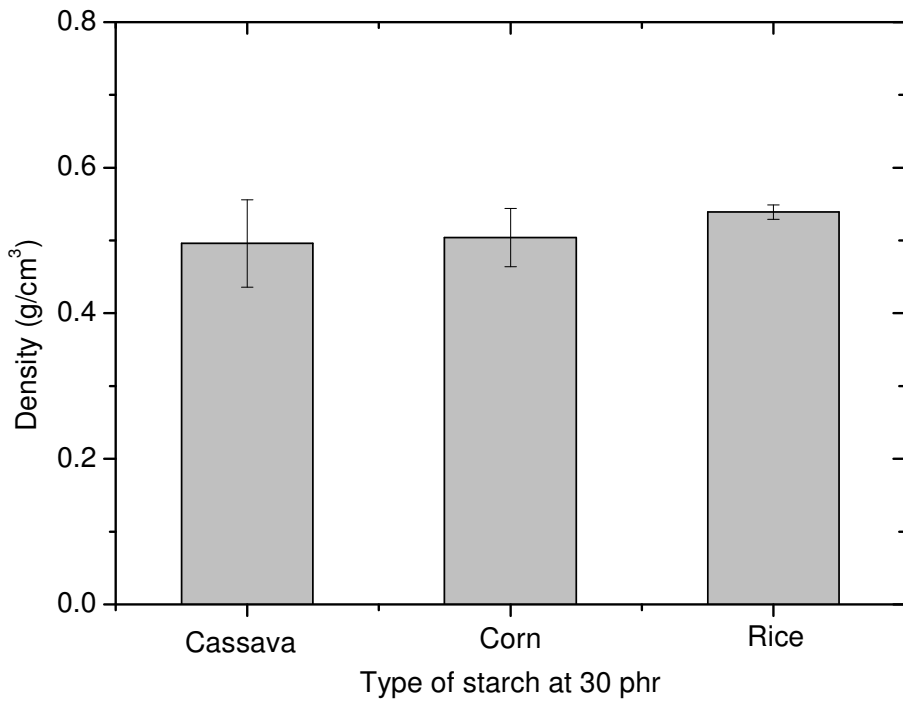
| Type of starch at 30 phr | Mooney Viscosity (ML 1+4) 100 °C | Scorch time (t_{s2}) (min) | Cure time (t_{c90}) (min) | CRI (min^{-1}) | Torque (dNm) | |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------------|-------|
| | | | | | Min. | Max |
| Cassava starch | 46.49 | 4.28 | 8.33 | 24.69 | 0.66 | 13.22 |
| Corn starch | 48.00 | 4.20 | 8.05 | 25.97 | 1.26 | 18.89 |
| Rice starch | 49.98 | 4.16 | 9.05 | 20.45 | 1.06 | 17.36 |

จากตารางที่ 5.14 พบว่าชนิดของแป้งที่ปริมาณ 30 phr ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดแตกต่างอย่างมี นัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะการวัลคาไนซ์ พบว่าระยะเวลาเริ่มต้นการสุกสั้นที่สุด เวลาการวัล คาไนซ์ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของแป้งไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนี่ และลักษณะการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 5.15 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางพองน้ำผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 30 phr

| Type of starch at 30 phr | 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 (%) | |
|-----------------------------|---------------------------------|------|-----------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|------------------------------|------|----------------------------|-------|-------------------------|------|------------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| Before ageing | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cassava starch | 0.4959 | 0.06 | 0.17 | 0.20 | 0.59 | 0.30 | 1.66 | 0.10 | 1.72 | 0.08 | 530 | 27.39 | 13.08 | 0.34 | 61.06 | 2.11 |
| Corn starch | 0.5044 | 0.04 | 0.33 | 0.30 | 0.96 | 0.16 | 2.28 | 0.09 | 2.37 | 0.06 | 508 | 14.43 | 11.76 | 0.48 | 64.48 | 1.32 |
| Rice starch | 0.5393 | 0.01 | 0.29 | 0.30 | 1.02 | 0.26 | 2.33 | 0.33 | 2.39 | 0.12 | 505 | 27.39 | 15.01 | 0.85 | 57.14 | 2.21 |
| After ageing | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cassava starch | 0.4959 | 0.06 | 0.18 | 0.02 | 0.61 | 0.05 | 1.51 | 0.08 | 1.51 | 0.08 | 500 | 17.68 | 10.8 | 1.22 | * | * |
| Corn starch | 0.504 | 0.04 | 0.36 | 0.03 | 0.97 | 0.05 | 2.55 | 0.10 | 2.56 | 0.37 | 491.67 | 28.87 | 12.99 | 0.69 | * | * |
| Rice starch | 0.539 | 0.01 | 0.32 | 0.03 | 1.02 | 0.07 | - | - | 1.88 | 0.20 | 465 | 22.36 | 14.49 | 1.39 | * | * |

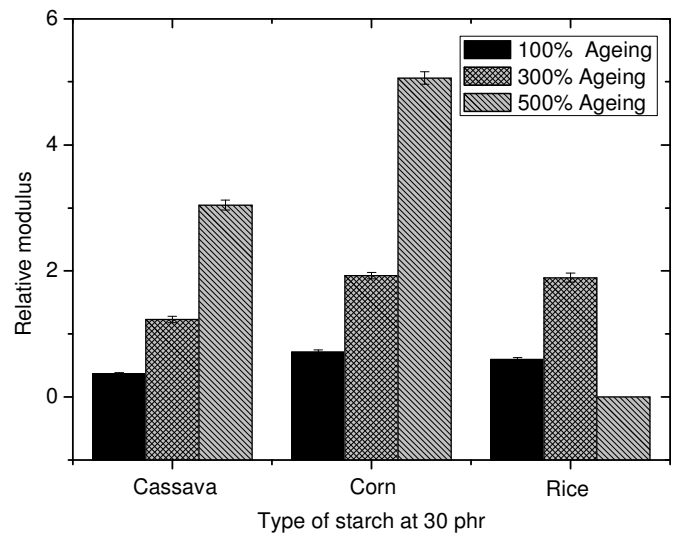
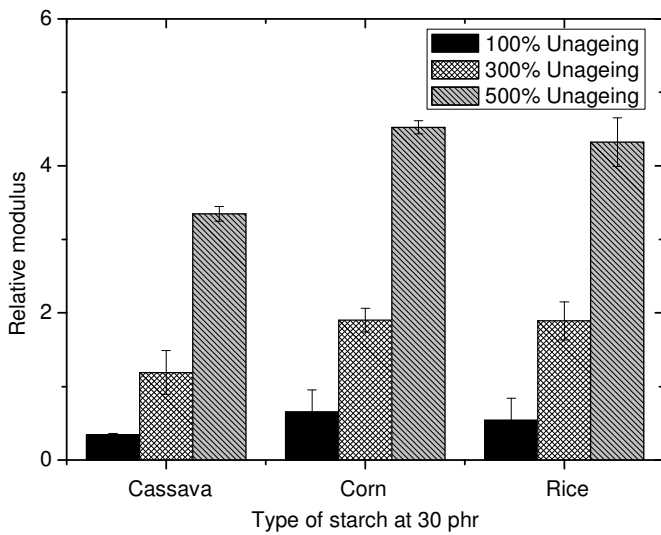
หมายเหตุ - "ไม่สามารถอ่านค่าการทดสอบ"ได้ และ * "ไม่ทำการทดสอบ"



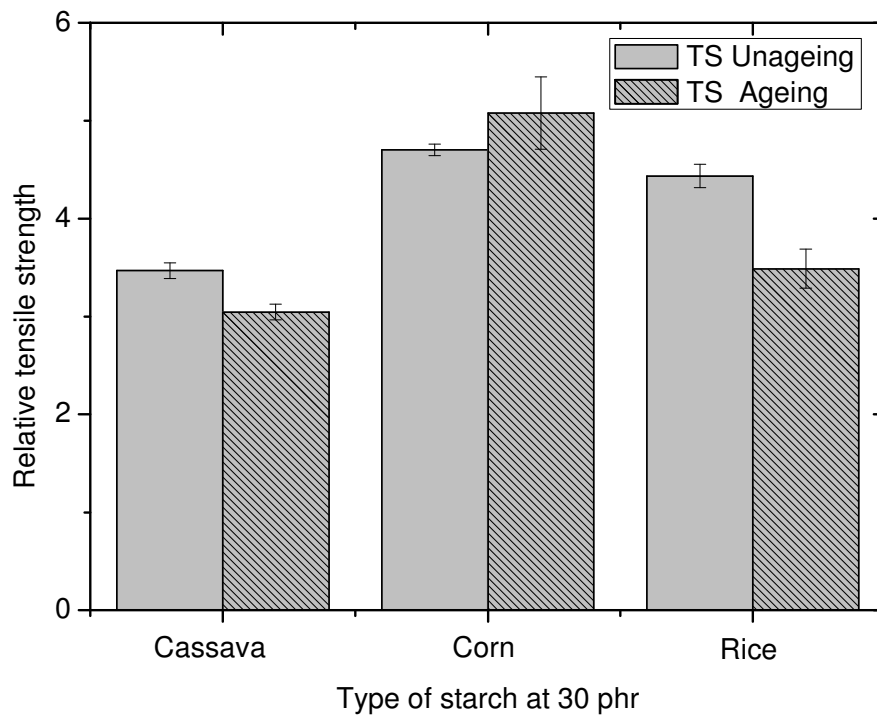
รูปที่ 5.27 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความหนาแน่นของยางพองน้ำ

(ก)

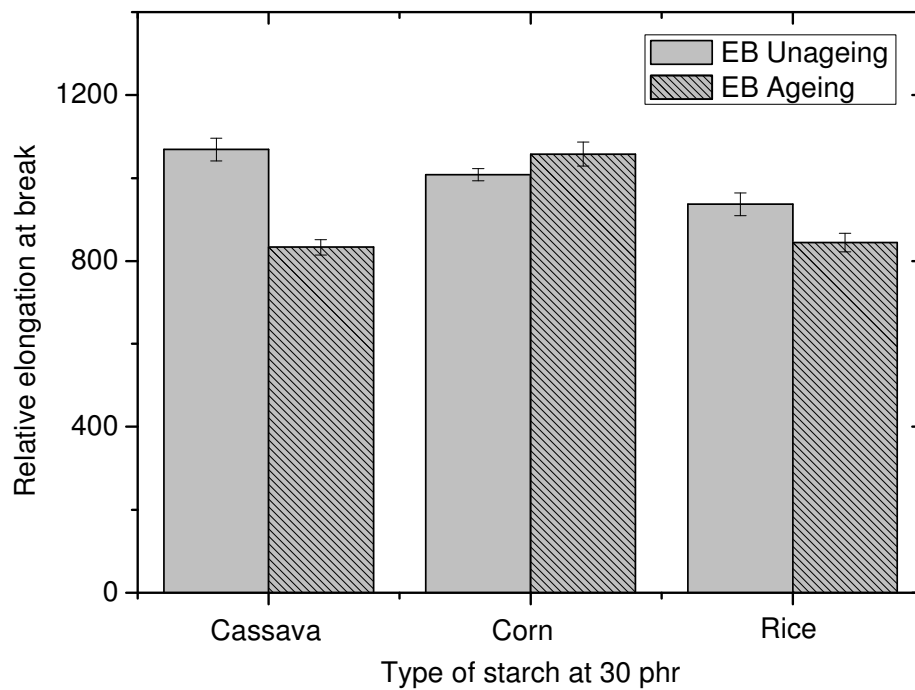
(ข)



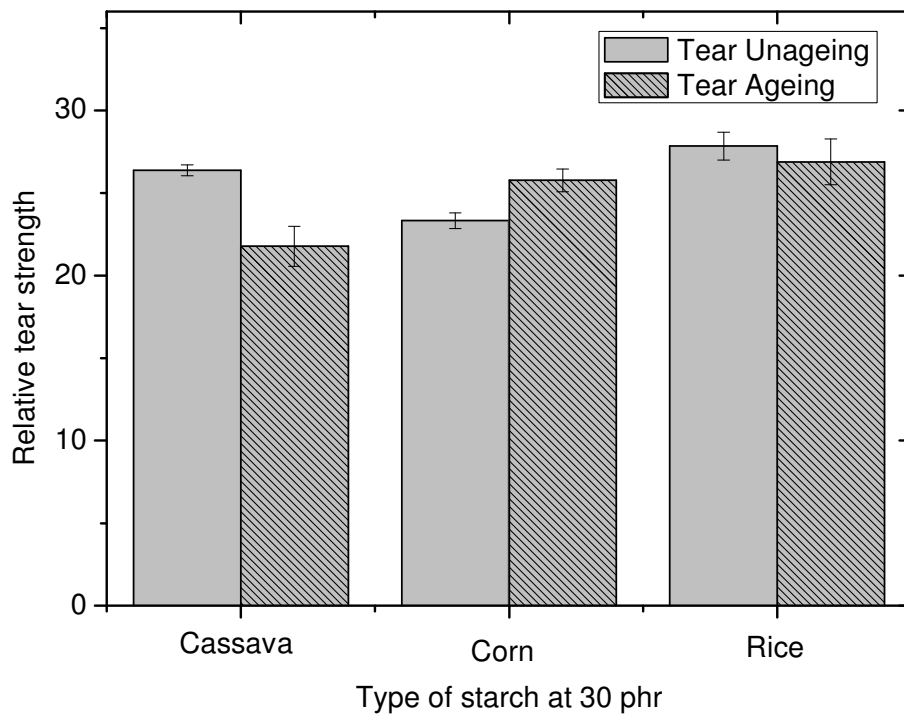
รูปที่ 5.28 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ (ก) ผลทดสอบก่อนบ่มแรง และ (ข) ผลทดสอบหลังบ่มแรง ของยางพองน้ำ



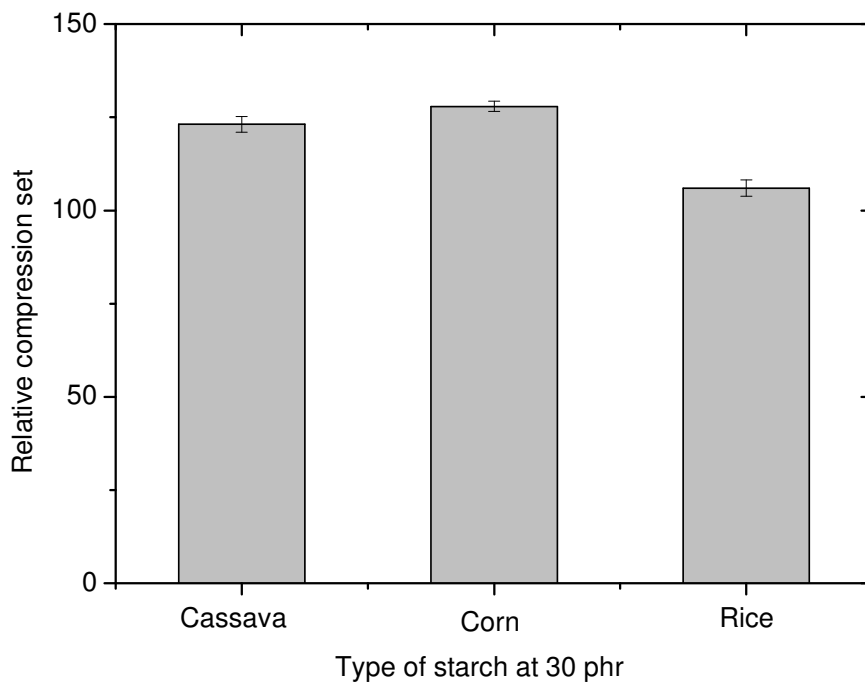
รูปที่ 5.29 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของยางพองน้ำ



รูปที่ 5.30 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของยางพองน้ำ



รูปที่ 5.31 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มเร่งของยางพองน้ำ



รูปที่ 5.32 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพัทธ์ของยางพองน้ำ

จากตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.27 เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณแป้งเท่ากันที่ระดับ 30 phr พบว่าสูตรที่ใช้แป้งข้าวเจ้าจะให้ยางพองน้ำที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.5393 g/cm³ มีค่าสูงสุด สูงกว่าแป้งข้าวโพด (0.5044 g/cm³) และแป้งมันสำปะหลัง (0.4959 g/cm³) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวเจ้ามีขนาดเม็ดแป้งเฉลี่ย 35 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดเล็กกว่า ขนาดเม็ดเฉลี่ยของแป้งข้าวโพด (525 ไมครอน) และขนาดเม็ดเฉลี่ยของแป้งมันสำปะหลัง (535 ไมครอน) ตามลำดับ (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546) การที่ขนาดเม็ดแป้งมีขนาดเล็กจะมีการกระจายในชั้นของยางได้สม่ำเสมอ เม็ดแป้งดังกล่าวจะเกิดการขัดขวางการขยายตัวของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากสารฟู ส่งผลให้ขนาดเซลล์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก และความหนาแน่นของยางพองน้ำที่ใช้มีค่าสูงสุด

จากตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.28 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของยางพองน้ำที่ใช้แป้งต่างชนิดกัน จากผลการทดลองพบว่ายางพองน้ำที่ใช้แป้งข้าวโพดจะให้ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์สูงสุดสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างแบบกิ่งผลึกของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน โดยในขั้นตอนการเกิดเจลไดไนท์ (ขั้นตอนการเตรียมแป้งก่อนผสมในยาง) เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง รวมถึงมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในแตกออกเมื่อปล่อยให้เย็นตัวเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสที่หลุดออกจากเม็ดแป้งด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดโครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้ง ทำให้โครงสร้างใหม่นี้มีความแข็งแรง ขึ้น ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ อัตราส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลแพกติน ขนาด รูปร่างและชนิดของแป้ง เป็นต้น แป้งข้าวโพดมีสัดส่วนของอะมิโลสประมาณ 28% สูงกว่าแป้งข้าวเจ้า (อะมิโลส 17%) และแป้งมันสำปะหลัง (อะมิโลส 20%) ตามลำดับ และแป้งจากธัญพืช (แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า) จะมีจำนวนพันธะการเกิดโครงสร้างร่างแห ที่สูงกว่าแป้งจากส่วนราก (แป้งมันสำปะหลัง) จึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ของยางพองน้ำผสมแป้งข้าวโพดสูงสุดสูงกว่าสูตรยางพองน้ำผสมแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของแป้งแต่ละชนิด พบว่าสมบัติหลังบ่มแรงมีค่าโมดูลัสสัมพัทธ์สูงกว่าก่อนบ่มแรงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากความร้อนทำให้ผิวยางเกิดการออกซิเดชัน เกิดการเชื่อมโยงจากอนุมูลอิสระทำให้ผิวยางแข็งขึ้นส่งผลให้ที่ค่าโมดูลัสที่ระยะยืดต่ำมีค่าเพิ่มสูงกว่าก่อนบ่มแรง

จากตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.29 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของยางพองน้ำที่ใช้แป้งต่างชนิดกัน จากผลการทดลองพบว่ายางพองน้ำที่ใช้แป้งข้าวโพดจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์สูงสุดสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณอะมิโลสในโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวโพดที่สูงกว่า และปริมาณการเกิดพันธะร่างแหที่สูงกว่า ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นกับค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์

สูงสุด แต่ระยะยืด ณ จุดขาดสัมพันธ์จะลดลง (รูปที่ 5.30) เมื่อความแข็งแรงของยางพองน้ำเพิ่มสูงขึ้น ความสามารถในการยืดจะลดลง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพันธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของแป้งแต่ละชนิด พบว่าสมบัติหลังบ่มแรงให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพันธ์ต่ำกว่าก่อนบ่มแรงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากความร้อนทำให้ผิวยางเกิดการออกซิเดชัน และสายโซ่ภายในโมเลกุลเกิดการตัดขาดส่งผลให้แรงต้านต่อการดึงจนขาดลดลง

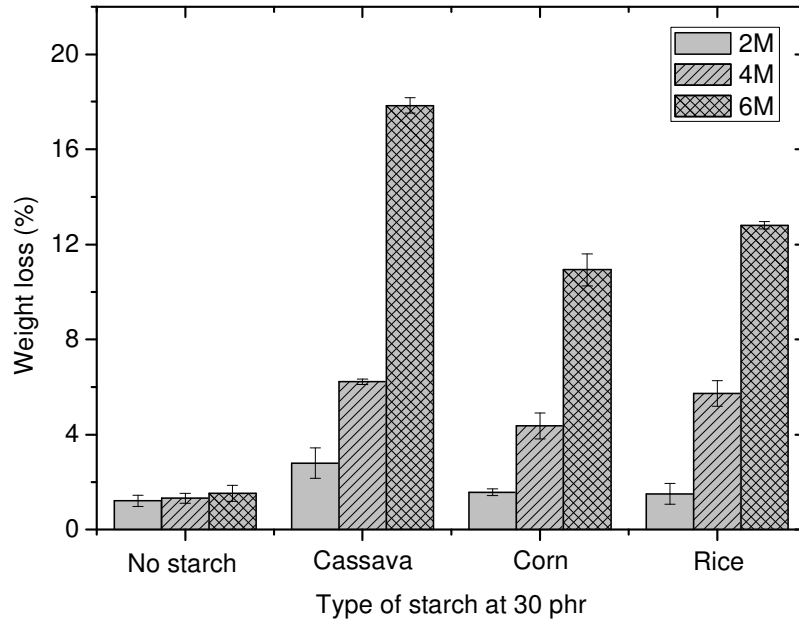
จากตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.31 เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของยางพองน้ำที่ใช้แป้งต่างชนิดกัน จากผลการทดลองพบว่ายางพองน้ำที่ใช้แป้งข้าวเจ้า มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์สูงสุด ทั้งนี้จะเนื่องมาจากขนาดเซลล์ที่เล็ก และจำนวนเซลล์ที่มากกว่า จะช่วยขัดขวางการฉีกขาดที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์สูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของแป้งแต่ละชนิด พบว่าสมบัติหลังบ่มแรงให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ต่ำกว่าก่อนบ่มแรงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากความร้อนทำให้ผิวยางเกิดการออกซิเดชัน สายโซ่ภายในโมเลกุลเกิดการตัดขาดส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพันธ์ลดลง

จากตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.32 เปรียบเทียบค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพันธ์ก่อนและหลังบ่มแรงของยางพองน้ำที่ใช้แป้งต่างชนิดกัน จากผลการทดลองพบว่ายางพองน้ำที่ใช้แป้งข้าวเจ้า มีค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพันธ์ต่ำสุด แสดงให้เห็นว่ายางพองน้ำที่ผสมแป้งข้าวเจ้าสามารถคืนรูปหลังการกดได้ดี ทั้งนี้เป็นเพราะว่าขนาดเซลล์ที่เล็ก และจำนวนเซลล์ที่มากกว่า จะช่วยรับแรงกดเมื่ออยู่สภาวะผิดรูป ลักษณะการกดอัดประมาณ 30 % ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ได้ดีกว่า สามารถคืนรูปหลังการกดได้ดี ส่งผลให้ค่าการเสียรูปหลังการกดสัมพันธ์ต่ำสุด

ตารางที่ 5.16 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมแป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 30 phr หลังฝังดิน

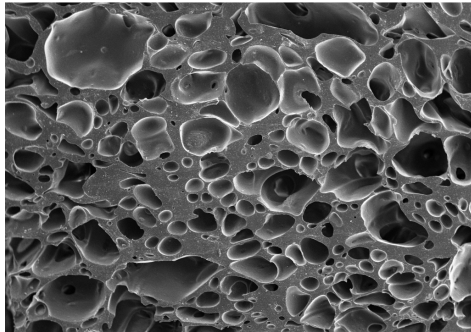
| Type of starch at 30 phr | Weight loss (%) | | 100% modulus (MPa) | | 300% modulus (MPa) | | 500% modulus (MPa) | | Tensile strength (MPa) | | Elongation at break (%) | | Tear strength (N/mm) | |
|-----------------------------|--------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|------------------------------|------|----------------------------|-------|-------------------------|------|
| | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD | Ave | SD |
| Cassava-2M | 2.7912 | 0.64 | 0.12 | 0.01 | 0.39 | 0.01 | - | - | 0.86 | 0.20 | 450 | 50.00 | 6.47 | 0.84 |
| Cassava-4M | 6.22567 | 0.11 | 0.12 | 0.05 | 0.35 | 0.03 | - | - | 0.79 | 0.08 | 441.67 | 14.43 | 5.57 | 0.04 |
| Cassava-6M | 17.8458 | 0.32 | 0.11 | 0.01 | 0.29 | 0.04 | - | - | 0.45 | 0.08 | 412.50 | 52.04 | 3.61 | 0.10 |
| Corn-2M | 1.5643 | 0.14 | 0.17 | 0.01 | 0.43 | 0.01 | 1.39 | 0.02 | 1.54 | 0.05 | 512.50 | 17.68 | 9.52 | 0.31 |
| Corn-4M | 4.3677 | 0.55 | 0.19 | 0.04 | 0.50 | 0.01 | - | - | 1.26 | 0.08 | 475.00 | 0.00 | 9.71 | 0.06 |
| Corn-6M | 10.9311 | 0.67 | 0.14 | 0.04 | 0.37 | 0.03 | 1.00 | 0.09 | 1.19 | 0.09 | 533.33 | 14.43 | 7.55 | 0.65 |
| Rice-2M | 1.5041 | 0.43 | 0.13 | 0.05 | 0.47 | 0.04 | 1.59 | 0.14 | 1.93 | 0.17 | 525 | 0 | 8.93 | 0.57 |
| Rice-4M | 5.7300 | 0.53 | 0.19 | 0.02 | 0.57 | 0.04 | 1.68 | 0.33 | 2.57 | 0.08 | 575.00 | 35.36 | 8.17 | 0.19 |
| Rice-6M | 12.8035 | 0.16 | 0.16 | 0.01 | 0.51 | 0.07 | - | - | 1.10 | 0.08 | 455.00 | 11.18 | 7.25 | 0.86 |



รูปที่ 5.33 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อน้ำหนักที่หายไปหลังฝังดินที่เวลาต่าง ๆ

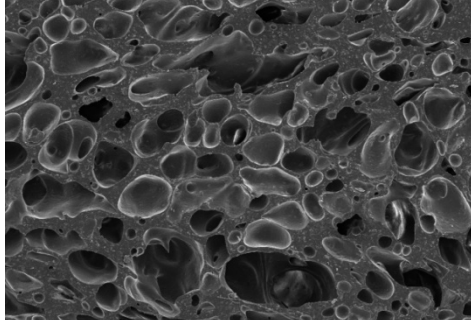
จากตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.33 แสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของยางพองน้ำผสมแป้งชนิดต่าง ๆ เปรียบเทียบกับยางพองน้ำที่ไม่ผสมแป้ง หลังจากฝังดินเป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใส่แป้งทำให้เกิดอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยางเร็วได้เร็วขึ้น จากการเสื่อมด้วยการฝังดิน และเวลาในการทดสอบ 6 เดือน จะมีอัตราการเสื่อมสภาพของยางพองน้ำสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบชนิดของแป้งจะพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการเสื่อมสภาพหลังฝังดินสูงกว่าหรือมีค่าน้ำหนักที่หายไปสูงกว่ายางผสมแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพดตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งมันสำปะหลังมีส่วนของอะมิโลแพกตินสูง ทำให้ความสามารถในการพองตัวสูง และภายในเม็ดแป้งมีโครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นน้อยเนื่องจากเป็นแป้งจากลำต้น อีกทั้งขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ทำให้ง่ายต่อดูดความชื้นทำให้ความแข็งแรงของเม็ดแป้งต่ำทำให้ง่ายต่อการเกิดเสื่อมจากความชื้นในดิน และเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน ส่งผลให้น้ำหนักหลังฝังดินหายไปมากที่สุด สอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำในรูปที่ 5.34 พบว่าลักษณะเซลล์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีบางส่วนเกิดเป็นเซลล์เปิด และมองเห็นขนาดอนุภาคของแป้งหลุดออกมาที่บริเวณผิวยาง จะเห็นได้ชัดเจนในแป้งมันสำปะหลัง จากผลการทดลองนี้ยืนยันให้เห็นว่าการใส่แป้งมันสำปะหลังในสูตรยางพองน้ำ จะมีผลช่วยให้เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นจากการฝังดิน จากแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพดตามลำดับ

(ก) ก่อนฝังดิน



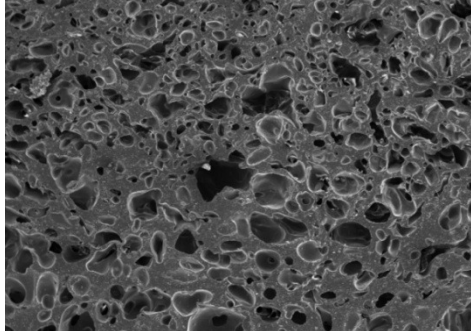
Mic HV Mag HFW WDI Film
JSM5800LV 20 kV 30 x 4.6 mm - EV-MB30phr 1 mm

Cassava starch
at 30 phr



Mic HV Mag Film HFW
JSM5800LV 20 kV 30 x CV-MBC30phr 4.6 mm 1 mm

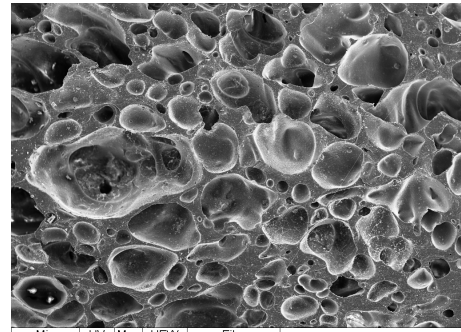
Corn starch
at 30 phr



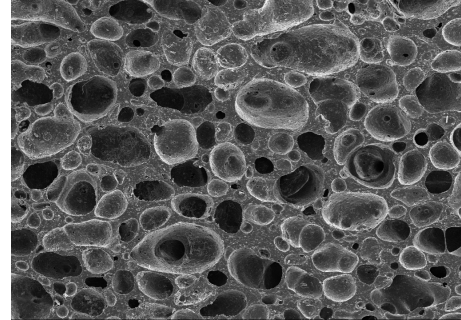
Mic HV Mag HFW WDI Film
JSM5800LV 20 kV 30 x 4.6 mm - CV-MBR30phr 1 mm

Rice starch
at 30 phr

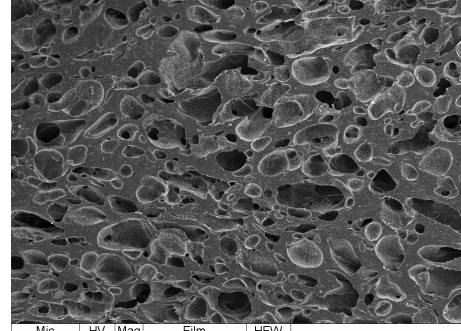
(ข) หลังฝังดิน 6 เดือน



Mic HV Mag HFW Film
JSM5800LV 20 kV 30 x 4.6 mm EV-MB30phr 6M 1 mm

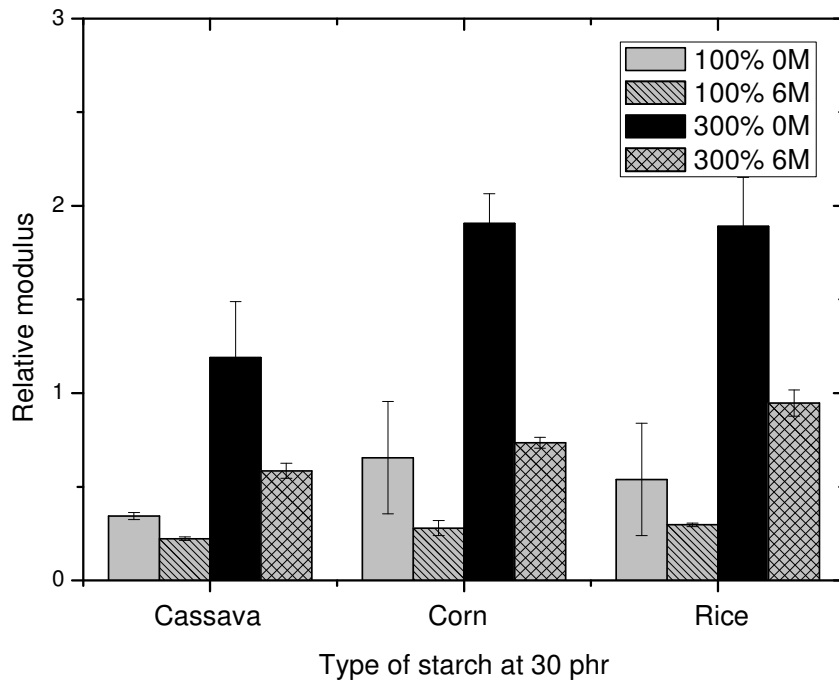


Mic HV Mag Film HFW
JSM5800LV 20 kV 30 x CV-MBC30phr-6M 4.6 mm 1 mm

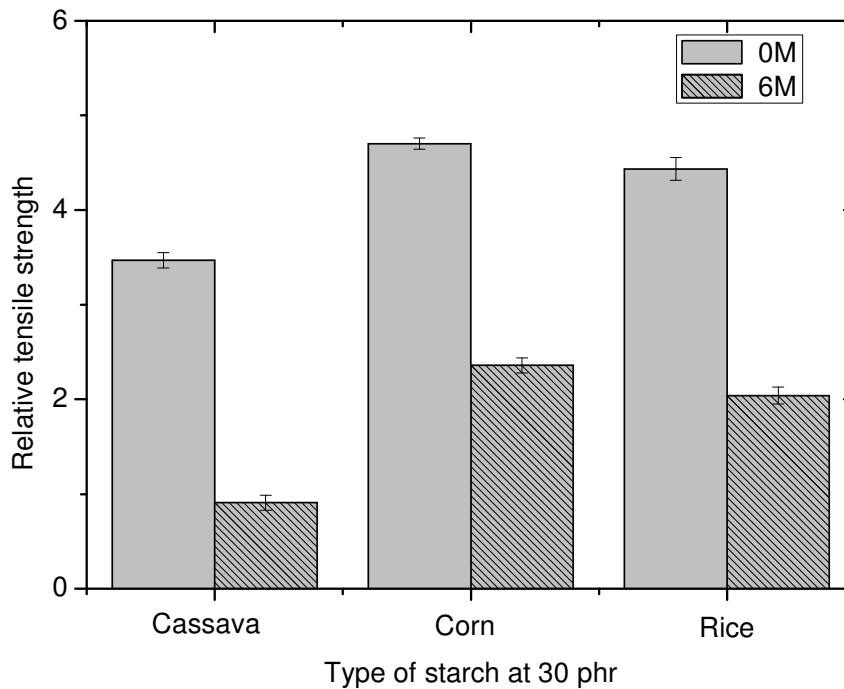


Mic HV Mag Film HFW
JSM5800LV 20 kV 30 x CV-MBR30phr-6M 4.6 mm 1 mm

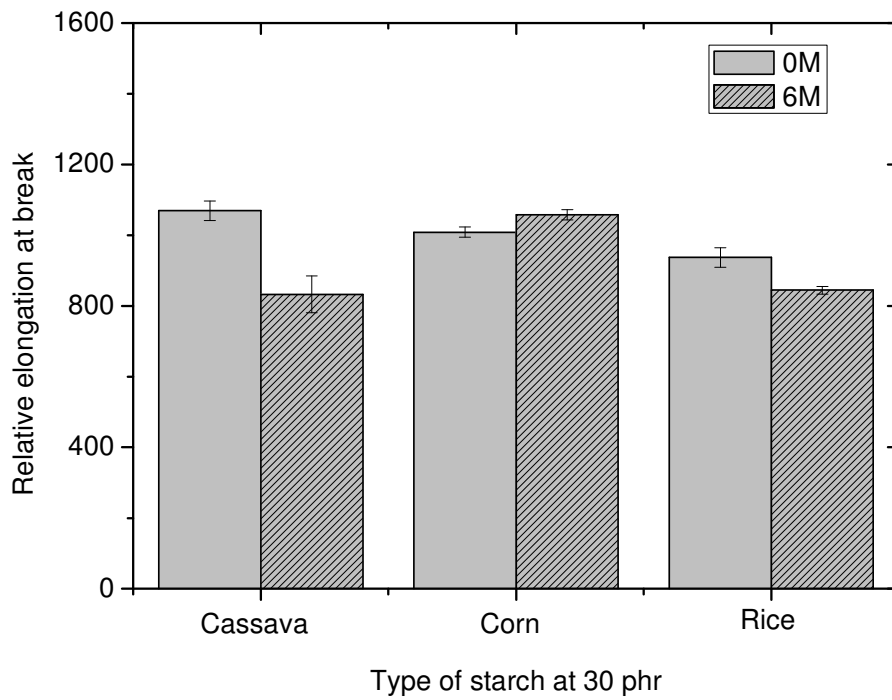
รูปที่ 5.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ใช้แป้งชนิดต่าง ๆ ที่ปริมาณ 30 phr (ก) ลักษณะก่อนฝังดิน (ข) ลักษณะหลังฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน



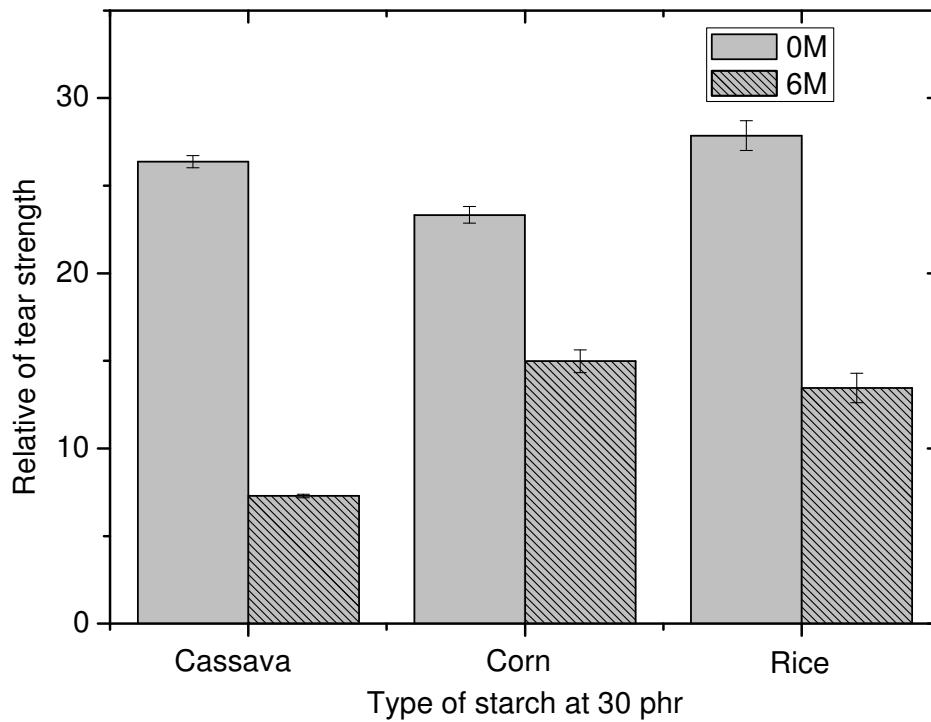
รูปที่ 5.35 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน



รูปที่ 5.36 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน



รูปที่ 5.37 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าระยะยืด ณ จุดขาดสัมผัสก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน



รูปที่ 5.38 ผลของชนิดแป้งที่ปริมาณ 30 phr ต่อค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมผัสก่อนและหลังฝังดิน 6 เดือน

จากตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.35 – 5.38 แสดงสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำที่ผสมแป้งชนิดต่าง ๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 2, 4 และ 6 เดือน เปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำก่อนฝังดิน พบว่าสมบัติเชิงกลของยางฟองน้ำหลังฝังดินมีค่าต่ำกว่ายางฟองน้ำก่อนฝังดิน สมบัติเชิงกลดังกล่าวได้แก่ ค่าโมดูลัสสัมพัทธ์ ความต้านทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ ระยะยืด ณ จุดขาดสัมพัทธ์ และความต้านทานต่อการฉีกขาดสัมพัทธ์ ไม่ว่าจะใช้แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า แสดงให้เห็นว่าการใช้แป้งมีส่วนช่วยเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของยางฟองน้ำ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของแป้งจะพบว่าแป้งมันสำปะหลังจะมีอัตราการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด ตามลำดับ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าน้ำหนักที่หายไปของแป้ง โดยแป้งมันสำปะหลังจะให้น้ำหนักหายไปหลังฝังดินสูงสุด ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นแล้ว

5.7 ลักษณะของพื้นรองเท้าที่เตรียมได้

ได้ทำการขึ้นรูปยางฟองน้ำที่ใช้ปริมาณแป้ง 30 phr แป้งที่ใช้สามารถใช้ได้ทั้งแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า แล้วทำการตัดแผ่นยางฟองน้ำเป็นรูปพื้นรองเท้า ดังแสดงในรูปที่ 5.39 เพื่อทดลองใช้สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน ในห้องทำแผลของโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ ซึ่งผลการใช้อยู่ในระหว่างการเก็บข้อมูล พร้อมกันนี้ได้มีการดำเนินการเขียนคำขอเพื่อขอจดอนุสิทธิบัตรของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว



รูปที่ 5.39 ตัวอย่างลักษณะพื้นรองเท้าฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง 30 phr

นอกจากนี้ยังได้มีการนำแผ่นยางฟองน้ำที่ปริมาณแข็ง 30 phr แข็งที่ใช้สามารถใช้ได้ทั้งแข็งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า มาทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดเบ้า แล้วทำการตัดเป็นรูปพื้นรองเท้าดังแสดงในรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 ลักษณะรองเท้าฟองน้ำที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมแป้งข้าวโพด

6. สรุปผลการทดลอง

6.1 ปริมาณสารฟู่ที่เหมาะสมและง่ายต่อการขึ้นรูป คือที่ปริมาณ 5 phr และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะให้สมบัติทางเชิงกลที่ดีกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพและแบบประสิทธิภาพตามลำดับ

6.2 เทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์แข็งมันสำปะหลัง แบบเจลาตินไนซ์ให้การกระจายตัวของแข็งมันสำปะหลังได้ดีกว่าเทคนิคการเตรียมแบบไม่เจลาตินไนซ์ ในการทดลองจึงเลือกใช้เทคนิคการเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์ของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าแบบเจลาตินไนซ์

6.3 การเพิ่มปริมาณแข็งมันสำปะหลังในยางฟองน้ำทั้งระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติและแบบกึ่งประสิทธิภาพจะให้

- ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น ขนาดเซลล์เล็กลง และจำนวนเซลล์เพิ่มมากขึ้น แต่ยางฟองน้ำที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างแข็ง และหนัก ทำให้สูญเสียสมบัติเด่นของยางฟองน้ำ ที่ต้องมีน้ำหนักเบา ยืดหยุ่นและรับแรงกดทับหรือแรงกระแทกได้ดี

- สมบัติทางเชิงกลลดต่ำลง โดยระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติจะให้สมบัติทางเชิงกลที่ดีกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ แต่สมบัติหลังการบ่มแรงจะเปลี่ยนแปลงมากกว่ายางฟองน้ำระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับสมบัติก่อนการบ่มแรง

6.4. การใส่แป้งมันสำปะหลังในสูตรยางพองน้ำเพิ่มมากขึ้น จะช่วยให้เกิดอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพ ด้วยการฝังดินของยางพองน้ำเพิ่มมากขึ้น และเวลาในการทดสอบ 6 เดือน จะมีอัตราการเสื่อมสภาพของยางพองน้ำสูงที่สุด โดยยางพองน้ำในสูตรที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ จะมีอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพสูงกว่า ระบบการวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ และแบบปกติ ตามลำดับ

6.5 ปริมาณแป้งที่เหมาะสมในการเตรียมยางพองน้ำคือที่ปริมาณ 30 phr ที่ยังคงรักษาสมบัติเด่นของยางน้ำในด้านความยืดหยุ่นและรับแรงกดทับหรือแรงกระแทกได้ดี และสามารถย่อยสลายได้ง่ายจากการฝังดิน และระบบการวัลคาไนซ์แบบปกติ จะสามารถทำการขึ้นรูปยางพองน้ำได้ง่ายกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่น ๆ รวมถึงให้สมบัติทางเชิงกลสัมพัทธ์ดีที่สุด

6.6 เปรียบเทียบชนิดของแป้งที่ปริมาณเท่ากันที่ระดับ 30 phr

- สูตรยางพองน้ำผสมแป้งข้าวเจ้า ให้ค่าความหนาแน่นของยางพองน้ำสูงสุด สูงกว่าสูตรที่ใช้แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ แต่สูตรที่ใช้แป้งข้าวโพด จะให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด สูงกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลังตามลำดับ

- สูตรยางพองน้ำผสมแป้งมันสำปะหลัง ที่เวลาในการทดสอบ 6 เดือน จะมีอัตราการเสื่อมสภาพได้เร็วกว่าแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด ตามลำดับ

6.7 การเตรียมพื้นรองเท้าพองน้ำ และรองเท้าพองน้ำ สามารถเตรียมได้จากแป้งทั้งสามชนิด ที่ปริมาณ 30 phr

เอกสารอ้างอิง

1. กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
2. คณิศร ใจเอื้อ, ขวัญเนตร สมบัติสมภพ, อภิสิทธิ์ โนมิตชัยยงค์, เอกชัย วิมลมาลา, ชีรศักดิ์ หมากริณ, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. ผลกระทบของระบบการคงรูปร่างที่มีต่อประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของยางธรรมชาติที่ผสมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49: สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์, วันที่ 1-4 กุมภาพันธ์ 2544 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, หน้า 81-88.
3. ประภาส ช่างเหล็ก และคณะ, การปลูกและการเพิ่มผลผลิตมันสำปะหลังรองรับอุตสาหกรรมเอทานอล. สถานีวิจัยเพชรบูรณ์, สถาบันค้นคว้าและพัฒนากระบวนการชีวเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, <http://www.mb.mahidol.ac.th/cassava/modules/AMS/index.php?storytopic=0&start=15> (ค้นเจอ 2 กรกฎาคม 2555).
4. สถาบันวิจัยยาง, ข้อมูลวิชาการยางพารา. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด: กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2553.
5. วัชรินทร์ สายน้ำใส, 2545. การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการระหว่างยางธรรมชาติที่ออกไซด์กับแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
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, 2803-2813.
7. Rouilly, A.; Rigal, L.; Gilbert, R. G., Synthesis and properties of composites of starch and chemically modified natural rubber. *Polymer* 2004, 45, 7813-7820.
8. Nakason, C.; Kaesaman, A.; Eardrod, K., Cure and mechanical properties of natural rubber-g-poly(methyl methacrylate)–cassava starch compounds. *Mater. Lett.* 2005, 59, 4020-4025.
9. Tanrattanakul, V.; Chumeka, W., Effect of potassium persulfate on graft copolymerization and mechanical properties of cassava starch/natural rubber foams. *J. Appl. Polym. Sci.* 2010, 116, 93-105.
10. Liu, C.; Shao, Y.; Jia, D., Chemically modified starch reinforced natural rubber composites. *Polymer* 2008, 49, 2176-2181.
11. Kaur, B.; Ariffin, F.; Bhat, R.; Karim, A. A., Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids* 2012, 26, 398-404.

12. Kramárová, Z.; Alexy, P.; Chodák, I.; Špirk, E.; Hudec, I.; Košíková, B.; Gregorová, A.; Šúri, P.; Feranc, J.; Bugaj, P.; Ďuračka, M., Biopolymers as fillers for rubber blends. *Polym. Adv. Technol.* 2007, 18, 135-140.
13. Carvalho, A. J. F.; Job, A. E.; Alves, N.; Curvelo, A. A. S.; Gandini, A., Thermoplastic starch/natural rubber blends. *Carbohydr. Polym.* 2003, 53, 95-99.
14. Tang, H.; Qi, Q.; Wu, Y.; Liang, G.; Zhang, L.; Ma, J., Reinforcement of Elastomer by Starch. *Macromolecular Materials and Engineering* 2006, 291, 629-637.
15. 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, 1752-1762.
16. Wu, Y.-P.; Ji, M.-Q.; Qi, Q.; Wang, Y.-Q.; Zhang, L.-Q., Preparation, Structure, and Properties of Starch/Rubber Composites Prepared by Co-Coagulating Rubber Latex and Starch Paste. *Macromol. Rapid Commun.* 2004, 25, 565-570.
17. Shey, J.; Imam, S. H.; Glenn, G. M.; Orts, W. J., Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial Crops and Products* 2006, 24, 34-40.
18. Composition and characteristics of starch. <http://members.home.nl/ajansma/zetmeel/infoe/chapter2.htm> (accessed 2 July 2012).
19. Architectural structure of amylopectin. http://www.bbmb.iastate.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=6 (accessed 2 July 2012).
20. Illustration, glucose (both anomeric forms). <http://www.mansfield.ohio-state.edu/~sabedon/biol1025.htm> (accessed 2 July 2012).
21. http://www.science.smith.edu/departments/Biochem/Biochem_353/amyase.html (accessed 2 July 2012).
22. พงษ์ธร แซ่ฮ้อย, 2547. ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). หน้า 1-10.
23. พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
24. Daniel, K.; Vahid, S., Eds., *Polymeric Foams And Foam Technology*, J. H. Saunders; D. Klemperer, in *Book Chapter 2: Fundamentals of foam formation*, Oxford University Press, 2nd ed., New York, 1991, pp. 5-14.
25. Rowland, D. G., Expanding rubber through the years. *Rubber world* 1993.

26. Rodriguez-Perez, M. A.; Simoes, R. D.; Roman-Lorza, S.; Alvarez-Lainez, M.; Montoya-Mesa, C.; Constantino, C. J. L.; de Saja, J. A., Foaming of EVA/starch blends: Characterization of the structure, physical properties, and biodegradability. *Polymer Engineering & Science* 2012, 52, 62-70.
27. Khalaf, A. I.; Sadek, E. M., Compatibility study in natural rubber and maize starch blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 2012, 125, 959-967.
28. Pawlikowski, J. F. Vulcanizable elastomer containing starch/styrene butadiene rubber copolymer as a reinforcing filler. US 6548578 B2, 2003.
29. Materne, T. F. E.; Corvasce, F. G. Tire with tread of rubber composition prepared with reinforcing filler which includes starch/plasticizer composite" US 6273163, 2001.
30. Corvasce, F. G.; Fourgon, F. A. J. Preparation of starch reinforced rubber and used thereof in tires. US 6878760, 2005.

ภาคผนวก

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^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 | 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

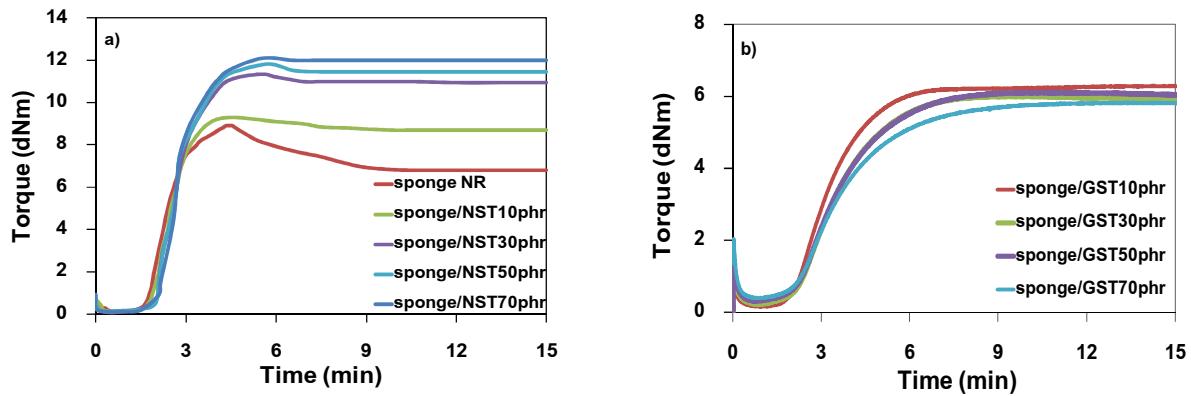


Figure 1. Cure curve of sponge NR compounds with various cassava starch contents, a) sponge/NST compounds and b) sponge/GST compounds.

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].

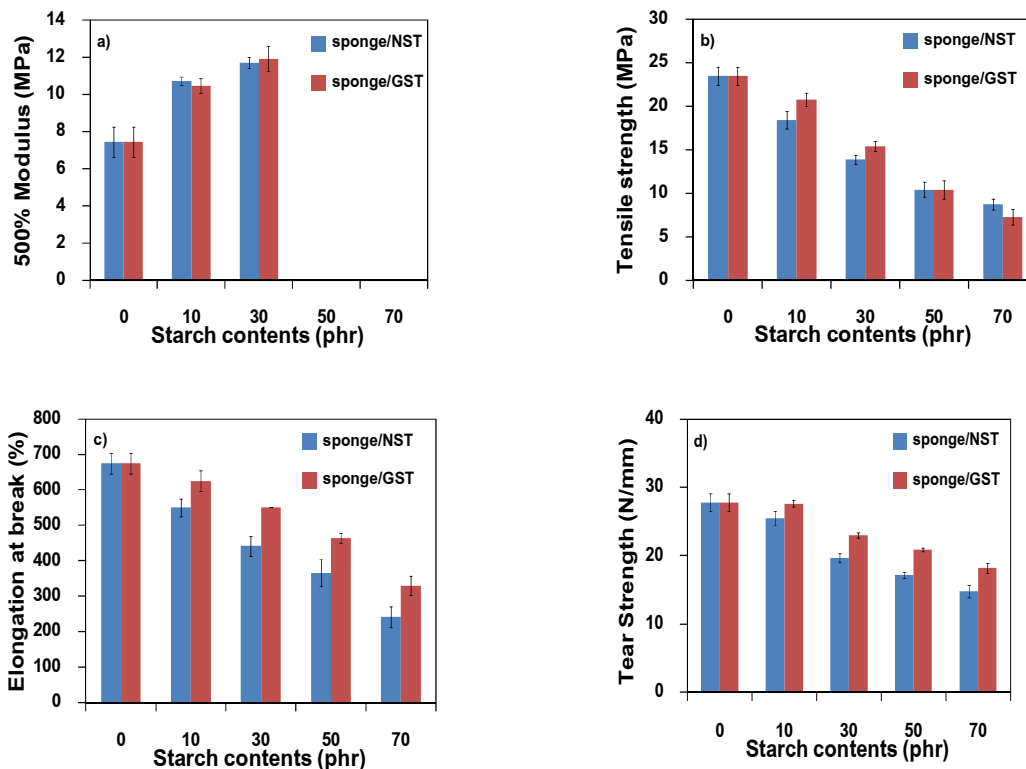


Figure 2. Mechanical properties of sponge NR vulcanizates with various cassava starch contents, a) 500% modulus, b) tensile strength, c) elongation at break and d) tear strength.

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.

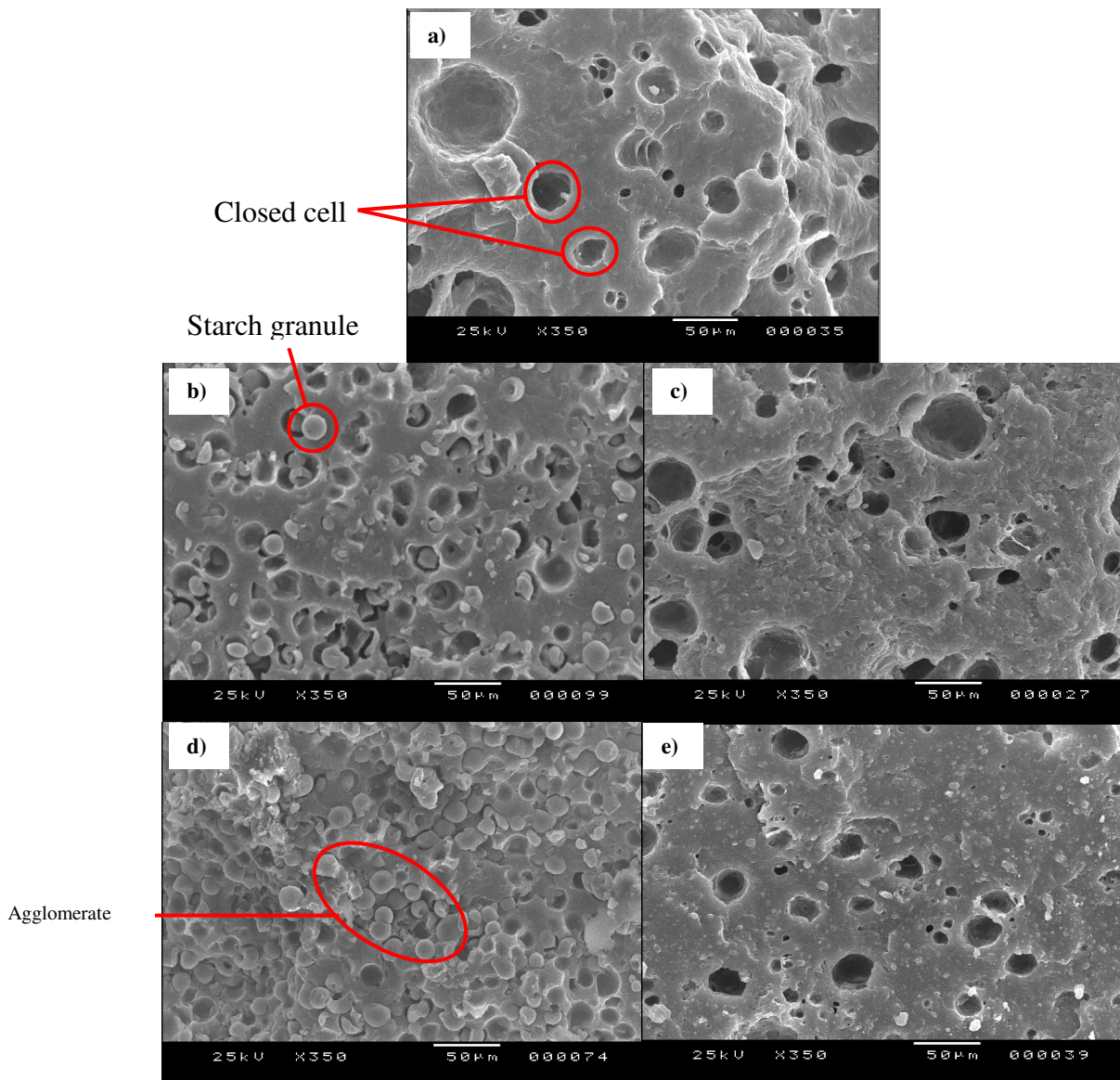


Figure 3. SEM micrographs of sponge NR a) 0 phr, b) sponge/NST 30 phr, c) sponge/GST 30 phr, d) sponge/NST 70 phr and e) sponge/GST 70 phr.

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 mentioned 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.

Manuscript for conference proceeding : The 3rd International Congress on Advanced Materials (AM 2016),
27-30 Nov 2016

Title: Preparation and properties of sponge rubber based on natural rubber and corn starch

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

Nitinart Saetung^a, Chalemchai Suwaluck^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

Abstract

In this work, sponge rubber was firstly prepared by mixing a gelatinized corn starch and natural rubber (NR) in latex phase that called corn starch masterbatch. They were then dried in an oven at 80 °C for 18h. The masterbatch was mixed with all chemicals by two roll mills and Supercell acted as blowing agent. The corn masterbatch was varied from 0 to 70 phr. The compounds were vulcanized by hot hydraulic press at 150 °C. The cure behaviors, mechanical and morphological properties were investigated. It was found that the scorch time and cure time were increased with an increasing of corn starch contents. The tensile strength, elongation at break and tear strength of sponge were decreased with an increasing of corn starch contents, except modulus and compression set. In addition, SEM micrographs of sponge NR and corn starch blends showed a good interfacial interaction between corn starch and NR and gave a regular cell at the lower 30 phr of corn starch content. However, the soil burial test of the sponge shows an increase of weight loss with increasing of corn starch content.