รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับยางคลอโรพรีนในอุตสาหกรรมยางรองพรม

The Applications of Low Viscosity Natural Rubber Latex with Silica Masterbatch in Natural Rubber Latex and Chloroprene Rubber Blends for Rubber Carpet Underlay Industry

จุฑาทิพย์ อาจชมภู Jutatip Artchomphoo
สุวัฒน์ รัตนพันธ์ Suwat Ratanapan
อนุชิต วิเชียรชม Anuchit Wichianchom

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2560

รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับยางคลอโรพรีนในอุตสาหกรรมยางรองพรม

The Applications of Low Viscosity Natural Rubber Latex with Silica Masterbatch in Natural Rubber Latex and Chloroprene Rubber Blends for Rubber Carpet Underlay Industry

จุฑาทิพย์ อาจชมภู Jutatip Artchomphoo
สุวัฒน์ รัตนพันธ์ Suwat Ratanapan
อนุชิต วิเชียรชม Anuchit Wichianchom

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2560

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับยางคลอโรพรีนในอุตสาหกรรมยางรองพรม” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่ และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการยางที่ช่วยเหลือในงานทดลองและเก็บข้อมูลจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

จุฑาทิพย์ อาจชมภู
สุวัฒน์ รัตนพันธ์
อนุชิต วิเชียรชม

การประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับยางคลอโรพรีน ในอุตสาหกรรมยางรองพรม

จุฑาทิพย์ อาจชมภู สุวัฒน์ รัตนพันธ์ และอนุชิต วิเชียรชม

บทคัดย่อ

การเตรียมยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมและผงกากยางรถยนต์ โดยใช้เทคนิคดัลลอป วัตถุประสงค์ของงานนี้เพื่อศึกษาการใช้ผงกากยางรถยนต์เป็นสารตัวเติมในยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของปริมาณและขนาดของผงกากยางรถยนต์ต่อสมบัติของยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ งานวิจัยนี้สนใจศึกษาสมบัติเชิงกล ความหนาแน่น การหดตัว การยุบตัว และการผิดรูปถาวรหลังการกดของยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ โดยทำการเปรียบเทียบสมบัติของยางฟองน้ำระหว่างการใช้ผงกากยางรถยนต์เปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืด ณ จุดขาดของยางฟองน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของผงกากยางรถยนต์มีขนาดเล็กลง และการเพิ่มปริมาณของผงกากยางลดลงมากขึ้นจะส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จากการทดลองชี้ให้เห็นว่าผงกากยางรถยนต์ที่มีขนาดเล็กเมื่อใช้เป็นสารตัวเติมในยางฟองน้ำจะให้ความเป็นอิลาสติกได้ดีกว่าแต่การคืนตัวหรือการคืนรูปของยางฟองน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงกากยางรถยนต์ที่ใช้มีค่ามากขึ้น การใช้สารตัวเติม ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต ร่วมกับผงกากยางรถยนต์ในสูตรยางฟองน้ำจะส่งผลให้สมบัติของยางฟองน้ำลดลง ลักษณะเซลของยางฟองน้ำที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นแบบเซลเปิด

คำสำคัญ มาสเตอร์แบท ซิลิกา ยางคลอโรพรีน ยางธรรมชาติ ยางรองพรม

The Applications of Low Viscosity Natural Rubber Latex with Silica Masterbatch in Natural Rubber Latex and Chloroprene Rubber Blends for Rubber Carpet Underlay Industry

Jutatip Artchomphoo Suwat Ratanapan and Anuchit Wichianchom

ABSTRACT

Waste tire powder (WTP) was incorporated with natural rubber latex (NRL) compound and foamed to make natural rubber latex foam (NRLF) by using a well-known technique called the Dunlop method. The purpose of this study was to use WTP as a filler for NRLF. Different amount and size of WTP were added to NRL compound and was foamed to make NRLF. The mechanical properties, density, shrinkage, depression and compression set of NRLF were studied. The properties was performed on WTP-Filled NRLFs, and they were compared with silica (Si) and calcium carbonate ($CaCO_3$) filler. Decreasing size of WTP increased the tensile strength, elongation at break and shrinkage of NRLF. The tensile strength and density of the NRLF increased with an increase in WTP loading. Smaller WTP size indicated higher elasticity of WTP-filled NRLF, but the recovery of WTP-filled NRLF decreased with increasing WTP loading. Addition Si and $CaCO_3$ into the NRL together with WTP would also decreased the properties of NRLF. The foams observed by optical microscopy revealed to have open cells.

Keywords: masterbatch; silica; chloroprene rubber; natural rubber; rubber carpet underlay

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
บทที่ 1. บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์	1
ขอบเขตการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
การตรวจเอกสาร	2
บทที่ 2. วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	19
วัสดุอุปกรณ์	19
วิธีการวิจัย	21
บทที่ 3. ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	25
บทที่ 4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	75
เอกสารอ้างอิง	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สารเคมี น้ำยาง และหน้าที่ของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟองยางจากน้ำยาง	3
2.1 สูตรการเตรียม 20% Silica Dispersion	21
2.2 ส่วนผสมของสูตรน้ำยางผสมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางรองพรม	22
2.3 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมจากคมปาวด์ยางแห้ง	23
2.4 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมที่ใช้ศึกษาผลของซิลิกา	24
2.5 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมที่ใช้ศึกษาสัดส่วนของสารตัวเติม	24
3.1 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	31
3.2 การหดตัวของของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	32
3.3 การยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	33
3.4 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	34
3.5 ค่ามอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	37
3.6 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	37
3.7 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	38
3.8 ค่าความหนาแน่น การหดตัว และการยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	39
3.9 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	41
3.10 ค่ามอดุลัสแบบกดและความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	44
3.11 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	45
3.12 ค่าความหนาแน่น การหดตัว และการยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	46
3.13 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

3.14 ค่ามอดุลัสแบบกดและความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ 50

3.15 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ 51

3.16 ค่า Mooney viscosity และ Mooney scorch time ของคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนเบลนด์ระหว่าง LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 52

3.17 ค่าทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด ผลต่างทอร์กสูงสุดกับต่ำสุด เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้(T_{s1}) เวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C 54

3.18 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ LNR/CR ที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่ง 56

3.19 ค่า Mooney viscosity และ Mooney scorch time ของคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนเบลนด์ระหว่าง LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 และใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทเท่ากับ 10 20 และ 30 phr 59

3.20 ค่าทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด ผลต่างทอร์กสูงสุดกับต่ำสุด เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (T_{s1}) เวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C และใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทเท่ากับ 10 20 และ 30 phr 61

3.21 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ LNR/CR ที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่ง และใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทเท่ากับ 10 20 และ 30 phr 63

3.22 ค่า Mooney viscosity และ Mooney scorch time ของคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนเบลนด์ระหว่าง LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 และใช้สารตัวเติมผสมเท่ากับ 30 และ 50 phr 66

3.23 ค่าทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด ผลต่างทอร์กสูงสุดกับต่ำสุด เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (T_{s1}) เวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C และใช้สารตัวเติมผสมเท่ากับ 30 และ 50 phr 68

3.24 ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ LNR/CR ที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่ง และใช้สารตัวเติมผสมเท่ากับ 30 และ 50 phr 71

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา	12
1.2 ลักษณะของหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา	12
1.3 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของไซเลน	12
1.4 ผลของเวลาในการบดต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ	17
3.1 ผลของปริมาณ SSF ต่อระยะเวลาการเจลของฟองยาง	25
3.2 ลักษณะของฟองยางที่แปรปริมาณ SSF	26
3.3 ผลของอุณหภูมิการบ่มคอมปาวด์ที่เวลาบ่ม 1 ชั่วโมง ต่อระยะเวลาการเจลของฟองยาง	26
3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางที่เวลาในการบ่ม 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิในการบ่มต่างกัน	27
3.5 ลักษณะของฟองยางที่แปรอุณหภูมิการบ่มคอมปาวด์น้ำยาง	27
3.6 ผลของเวลาการบ่มคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 40°C ต่อเปอร์เซ็นต์การบวมพองของคอมปาวด์	28
3.7 ผลของเวลาการบ่มคอมปาวด์ต่อระยะเวลาการเจลของฟองยาง	28
3.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางบ่มที่ 40°C ที่แปรระยะเวลาในการบ่ม	29
3.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางบ่มที่อุณหภูมิห้องแปรระยะเวลาในการบ่ม	30
3.10 ความหนาแน่นของฟองยางที่บ่มที่อุณหภูมิ 40°C และอุณหภูมิห้อง	30
3.11 ผลของความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	32
3.12 ผลของการหดตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	32
3.13 ผลของการยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	33
3.14 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	35
3.15 ความสามารถในการยืดขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	35
3.16 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	36
3.17 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	36
3.18 มอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	37
3.19 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	38
3.20 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.21 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	40
3.22 การหดตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	40
3.23 การยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	41
3.24 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	42
3.25 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	42
3.26 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	43
3.27 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	43
3.28 มอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	44
3.29 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	45
3.30 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	45
3.31 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	47
3.32 การหดตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	47
3.33 การยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	47
3.34 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	48
3.35 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	49
3.36 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.37 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ 49

3.38 มอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ 50

3.39 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ 51

3.40 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ 51

3.41 ผลของปริมาณซิลิกาต่อความหนืดมูนนี่ของคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนเบลนด์ LNR/CR 53

3.42 ผลของปริมาณซิลิกาต่อ Mooney scorch time ของคอมปาวด์ที่แปรสัดส่วนเบลนด์ LNR/CR 53

3.43 ผลของปริมาณซิลิกาต่อค่าทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด และผลต่างของค่าทอร์กของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 54

3.44 ผลของปริมาณซิลิกาต่อเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (T_{S1}) และเวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 55

3.45 ผลของปริมาณซิลิกาต่อความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 57

3.46 ผลของปริมาณซิลิกาต่อความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 57

3.47 ผลของปริมาณซิลิกาต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 58

3.48 ผลของปริมาณซิลิกาต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 58

3.49 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทช์ต่อความหนืดมูนนี่ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 60

3.50 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทช์ต่อ Mooney scorch time ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 60

3.51 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทช์ต่อทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด และผลต่างของค่าทอร์กของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 62

3.40 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.52 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทซ์ต่อเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (T_{S1}) และเวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 62

3.53 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทซ์ต่อความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 64

3.54 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทซ์ต่อความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 64

3.55 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 65

3.56 ผลของปริมาณซิลิกาจากซิลิกามาสเตอร์แบทซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 65

3.57 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อความหนืดมูนนี่ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 67

3.58 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ Mooney scorch time ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 67

3.59 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ ค่าทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด ผลต่างทอร์กสูงสุดกับต่ำสุด ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 69

3.60 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ ค่าทอร์กต่ำสุด ค่าทอร์กสูงสุด ผลต่างทอร์กสูงสุดกับต่ำสุด ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 50/50การผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 69

3.61 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (T_{S1}) และเวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 70

3.62 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (T_{S1}) และเวลาการวัลคาไนซ์ (T_{90}) ของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 50/50 70

3.40 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.63 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ ความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 72

3.64 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ ความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 73

3.65 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 73

3.66 ผลของชนิดของสารตัวเติมใช้ร่วมกับซิลิกาต่อ การเปลี่ยนแปลงของสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดของยางที่แปรสัดส่วนการผสม LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 74

3.40 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

บทที่ 1 บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ยางรองพรม เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้รองใต้พรมเพื่อรับแรงกระแทกและให้ความรู้สึกสบาย ช่วยยืดอายุการใช้งานของพรมจากการลดแรงเสียดทานระหว่างพรมกับพื้นและป้องกันความเสียหายของพรมจากพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ หยาบ คม ปัจจุบันประเทศไทยมีอุตสาหกรรมพรมมากกว่า 30 โรงงาน ในปี 2553 มีมูลค่าการส่งออก 1,053 ล้านบาท (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2554) อย่างไรก็ตามวัสดุ รองพรมส่วนใหญ่เป็นโฟมพอลิยูรีเทนหรือทำจากเศษโฟมเก่าที่ใช้กาวยูรีเทนเป็นตัวประสานซึ่งมี ความแข็งแรง และพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างพอลิออล และไอโซไซยาเนต ซึ่งเป็นสารที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ มีต้นทุนสูง นอกจากนี้หากตกค้างในกระบวนการผลิต จะมีพิษและเป็นอันตรายต่อทั้งสิ่งแวดล้อมและผู้บริโภค

การทำยางรองพรมจากยางธรรมชาติมีข้อดีที่ยางธรรมชาติสามารถทำให้เกิดฟองได้ง่าย และให้ความแข็งแรงสูง แต่ในอดีตยางธรรมชาติมีราคาสูง ประกอบกับมีข้อจำกัดของสมบัติด้านการเสื่อมสภาพ การทนทานต่อความร้อน และการทนไฟ ทำให้มีการพัฒนาการใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมยางรองพรมน้อย นอกจากนี้พบว่าการใช้สารตัวเติมลดต้นทุนในยางฟองซึ่งส่วนใหญ่เป็น slurry ของแคลเซียมคาร์บอเนต มีผลให้ความหนืดของคอมปาวด์เพิ่มขึ้นและเกิดการตกตะกอนของผงแคลเซียมคาร์บอเนตมาก ทำให้กระบวนการเกิดฟองทำได้ยาก ให้ฟองยางที่ได้มีผิวหน้าไม่เรียบเนียน มีลักษณะเป็นหลุมตื้นๆ ลักษณะฟองยางไม่สม่ำเสมอและมีการยุบตัว (พรทิพย์ และคณะ, 2552; เสาวนีย์และคณะ, 2548) และแม้แต่การใช้สารตัวเติมในฟองยางจากยางแห้งก็มักจะมีปัญหาความสม่ำเสมอของการเกิดฟอง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการยุบตัว และการหดตัวของผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับยางคลอโรพรีน เพื่อลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับการผสมกับยางคลอโรพรีนซึ่งมีขนาดโมเลกุลต่ำกว่า เพื่อให้ได้จุดเด่นของยางคลอโรพรีนในการทนต่อการเสื่อมและความร้อน และการเติมสารตัวเติมในน้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทในสภาวะน้ำยาง ช่วยให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวที่ดีเกิดการยึดติดกับอนุภาคยางได้ดีกว่า (Artchomphoo and Boonsong, 2013) ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาการกระจายตัวของสารตัวเติม นอกจากนี้ซิลิกาช่วยเสริมแรงของยางฟองในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์ช่วยลดต้นทุนการผลิต ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีขึ้นและมีราคาต้นทุนการผลิตถูกลง เพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติของคอมปาวด์ยางรองพรมที่ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับน้ำยางคลอโรพรีน
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติของยางรองพรมจากยางธรรมชาติ ทั้งยางรองพรมจากฟองยางของคอมปาวด์น้ำยางและฟองยางจากคอมปาวด์ยางแห้ง
3. เพื่อศึกษาสมบัติของคอมปาวด์ยางรองพรมจากยางผสมที่ใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาเทคนิคการเตรียมคอมปาวด์น้ำยางจากยางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยางต่อลักษณะการเกิดฟอง สมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพ และการทนไฟของยางฟองที่ได้

2. ศึกษาสมบัติของคอมปาวด์ยางรองพรมที่ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับน้ำยางคลอโรพรีน ที่สัดส่วนการเบลนด์ของ LNRmSi/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 และปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 10, 20 และ 30 phr โดยศึกษาสมบัติของฟองยางเปรียบเทียบกับคอมปาวด์ยางรองพรมที่ใช้ซิลิกาผงเป็นสารตัวเติม

3. ศึกษาการใช้สารตัวเติมร่วมระหว่างซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์ในสูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรม เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้สารตัวเติม ซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์ที่ให้สมบัติของยางรองพรมจากคอมปาวด์น้ำยางและยางแห้งที่สมบัติดีที่สุด

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การพัฒนางานวิจัยต่อยอดงานจากการเตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

2. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ เป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าให้ยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศ โดยสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ทั้งอุตสาหกรรมยางต้นน้ำและปลายน้ำ

3. ด้านวิชาการ องค์ความรู้ใช้พัฒนาการเรียนการสอน การทำโครงงานของนักศึกษา และเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปบทความวิจัยในวารสารวิชาการ ทั้งในประเทศ และต่างประเทศ

การตรวจเอกสาร

1. ฟองยางธรรมชาติ (Natural rubber foam)

ฟองยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน ภายในฟองยางประกอบด้วยเซลล์ของอากาศเป็นรู หรือโพรงเล็กๆ ที่อาจจะติดต่อกันทั้งหมด หรือติดต่อกันบางส่วน หรืออาจจะมีบางส่วนที่ไม่ติดต่อกัน ส่วนผิวหน้าซึ่งสัมผัสกับเบ้าจะค่อนข้างเรียบ ระบายอากาศออกได้สามารถกดหรือบิดได้โดยไม่เสียรูป จึงนิยมนำฟองยางธรรมชาติมาใช้เป็นสิ่งของเครื่องใช้เพื่อการรองรับน้ำหนัก เช่น ใช้ทำเบาะนั่ง เก้าอี้ หมอน ที่นอน สื่อการสอน ยางรองพรม วัสดุดูดซับเสียง และอุปกรณ์กันกระแทกอื่นๆ ฟองยางธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ฟองยางจากน้ำยางและฟองยางจากยางแห้ง

1.1 การเตรียมฟองยางจากน้ำยางธรรมชาติ มีหลักการสำคัญของการผลิตฟองยาง คือ การทำให้เกิดฟองอากาศ หรือฟองแก๊สต่างๆ ในยางคอมปาวด์ แล้วทำให้น้ำยางที่เกิดฟองแล้วเกิดการเจลในเบ้าให้คงรูป ด้วยสารเคมีและความร้อน การวัลคาไนซ์ฟองยางใช้น้ำยางและสารเคมีดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 สารเคมี น้ำยาง และหน้าที่ของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมฟองยางจากน้ำยาง

น้ำยางและสารเคมี	หน้าที่
60% น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (HA latex)	เป็นเนื้อโฟมยาง
20% สบู่โพแทสเซียมโอลิเอต (K-oleate)	สารช่วยให้เกิดฟอง
50% กำมะถัน (sulfur)	สารทำให้ยางคงรูป
50% แซดดีอีซี (ZDEC)	สารตัวเร่งให้ยางวัลคาไนซ์
50% แซดเอ็มบีที (ZMBT)	สารตัวเร่งให้ยางวัลคาไนซ์
50% วิงสเตย์แอล (Wingstay L)	สารกันยางเสื่อม
50% ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	สารกระตุ้นตัวเร่ง
33% ดีพีจี (DPG)	สารตัวเร่งให้ยางวัลคาไนซ์
20% เอสเอสเอฟ (SSF)	สารช่วยให้ฟองจับตัว

วิธีการเตรียมฟองยางจากน้ำยางมี 2 กระบวนการที่สำคัญ คือ

1. การเตรียมยางด้วยกระบวนการแบบดันลอป (Dunlop process)

ก) กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process) การทำฟองยางแบบนี้จะใช้เครื่องตีฟองแบบเดียวกับที่ใช้ทำขนมเค้ก ซึ่งประกอบด้วยหม้อสำหรับใส่คอมปาวด์น้ำยาง และตีฟองด้วยตะกร้อ เตรียมคอมปาวด์น้ำยางโดยการเติมสารช่วยในการเกิดฟอง และสารอื่นๆ ยกเว้นสารซิงค์ออกไซด์ และสารช่วยให้เกิดเจล บ่มน้ำยางไว้ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงนำคอมปาวด์น้ำยางที่ได้มาตีฟองโดยจะตีด้วยความเร็วสูงในช่วงแรกเพื่อให้ได้ฟองยางในปริมาณมาก แล้วลดระดับลง และหลังจากได้ความละเอียดของฟองน้ำยางตามต้องการแล้วจึงใส่ซิงค์ออกไซด์ และสารช่วยในการเจล ตามลำดับ ตีฟองจนสารกระจายตัวอย่างทั่วถึง จึงเทใส่เบ้าพิมพ์ โดยแบบพิมพ์นั้นอาจทาด้วยสารช่วยในการถอด (mold releasing agent) หรืออุ่นเบ้าทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ฟองยางจะเจลภายในเวลาประมาณ 5 นาที ทิ้งฟองยางที่เจลแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้องประมา
นาที ก่อนนำไปอบ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเจลอย่างสมบูรณ์ แล้วนำไปอบด้วยอากาศร้อ 4
หรือน้ำร้อน เพื่อให้ฟองยางเกิดการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นจึงนำไปล้างอบแห้ง และตกแต่ง คว
น้ำยางก่อนที่จะนำมาตีฟองนั้นจะต้องบ่มและกวนอย่างช้าๆ เป็นเวลา 1-3 วัน ที่อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส โดยการบ่มคอมปาวด์น้ำยางก่อนนำมาตีฟองนั้นจะช่วยให้สมบัติการทนต่อแรงดึงจนขาด ระยะยืดจนขาดดีขึ้น ลดการหดตัวของฟองยางระหว่างกระบวนการเจลและวัลคาไนซ์

ข) กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องจะแตกต่างจากแบบไม่ต่อเนื่องในขั้นตอนการตีฟอง โดยการผลิตแบบต่อเนื่องจะใช้เครื่องตีฟองที่สามารถให้ฟองได้แบบต่อเนื่อง เครื่องตีฟองแบบต่อเนื่องที่นิยมทั่วไป คือ Oakes Mixer โดยเครื่องประกอบด้วยห้องตีฟองรูปทรงกระบอก ภายในประกอบด้วยใบพัดที่สามารถปรับความเร็วได้ 100-400 รอบต่อนาที ทำหน้าที่ตีน้ำยางกับอากาศซึ่งมีท่อปล่อยเข้ามายังห้องตีฟอง ท่อน้ำยางและท่ออากาศจะแยกออกจากกันทำให้สามารถปรับความหนาแน่นของฟองยางได้ ซึ่งน้ำยางจะถูกฉีดเข้าทางท่อก่อนเข้าหัวตีฟอง และสารช่วยในการเจล จะถูกฉีดเข้าทางผนังห้องผสมโดยใช้เข็มแบบ hypodermic ซึ่งปลายเข็มจมเข้าไปด้านใน อีกวิธีหนึ่งของการเติมซิงค์ออกไซด์ และสารช่วยในการเกิดเจล คือ การฉีดท่อของสารดังกล่าวตรงไปยังห้องผสม (blender) ซึ่งภายในทรงกระบอกมีใบพัดกวน โดยเป็นห้องที่ต่อมาจากหัวตีฟอง การเติมซิงค์ออกไซด์ และสารช่วยในการ

เกิดเจล โดยวิธีนี้จะมีข้อดีกว่าวิธีแรก คือ ลดความถี่ในการทำความสะอาดของหัวตีฟอง จากเทคนิคแบบต่อเนื่องนี้ทำให้สามารถควบคุมและแปรความหนาแน่นของฟองยางได้ง่ายกว่า ฟองยางมีความสม่ำเสมอกว่า เวลาในการแปรรูปรวดเร็ว มีการสูญเสียน้อย และสามารถลดต้นทุนด้านแรงงานได้มากกว่า

การผลิตโดยทั่วไปของการทำฟองยางแบบต่อเนื่อง เริ่มจากการทำความสะอาดแบบพิมพ์ หลังจากนั้นจึงทาหรือพ่นสารช่วยในการถอดลงบนผิวของแบบพิมพ์ ทำแบบพิมพ์ให้อุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ลำเลียงแบบพิมพ์ไปยังจุดจ่ายฟองยางของเครื่องตีฟองยางที่อยู่กับที่ โดยจะมีท่ออ่อนต่อออกมาจากห้องผสม ฟองยางจะเริ่มเจลภายในเวลา 5 นาที ฝาแบบพิมพ์จะถูกปิดแบบอัตโนมัติ การเจลจะเกิดอย่างต่อเนื่องจนเกิดการเจลอย่างสมบูรณ์ ก่อนฟองยางจะผ่านไปยังขั้นตอนการวัลคาไนซ์ โดยเทคนิคการวัลคาไนซ์โดยทั่วไป คือ การใช้ไอน้ำร้อนที่สภาวะความดันบรรยากาศผ่านท่อลำเลียงที่ต่อกับห้องที่ฟองยางเคลื่อนที่อยู่ ซึ่งจะใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 20-30 นาที หลังจากวัลคาไนซ์แล้วแบบพิมพ์จะถูกทำให้เย็น ฝาแบบพิมพ์จะถูกเปิดอัตโนมัติ แล้วจึงดึงฟองยางออกจากแบบพิมพ์ โดยจะต้องทำอย่างระมัดระวังเพราะความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟองยางขณะร้อนจะต่ำกว่าปกติ ความยากง่ายของการถอดฟองยางออกจากแบบพิมพ์ขึ้นอยู่กับลักษณะการถอดผิวแบบพิมพ์ และประสิทธิภาพของสารช่วยในการถอด หลังจากถอดฟองยางออกจากแบบพิมพ์แล้ว แบบพิมพ์ก็จะถูกทำให้เย็นและทำความสะอาดเพื่อที่จะวนกลับไปยังรอบการผลิตต่อๆ ไป ส่วนฟองยางที่ถอดออกจากแบบพิมพ์แล้วจะผ่านไปยังขั้นตอนการล้างและทำให้แห้ง กระบวนการทั่วไปจะใช้น้ำเย็น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อล้างเอาสบู่ และสารที่ละลายน้ำได้ชนิดอื่นๆ ที่เหลืออยู่ออกไปจากฟองยาง นอกจากนี้การล้างสารเหล่านี้ออกจากฟองยาง ยังช่วยให้ฟองยางมีสมบัติการกระเด้งตัวดีขึ้น ลดการเหนียวติดของผนังเซลล์ของฟองยาง อายุการใช้งานดีขึ้น โดยหลักการล้างทำได้โดยก[illegible]น้ำไหลวนเพื่อให้ล้างฟองยางอย่างทั่วถึง หลังจากนั้นจึงบีบน้ำออกจากยางฟองน้ำ ซึ่งอุปก[illegible]ได้แก่หัวพ่นน้ำ และชุดลูกกลิ้งรีดน้ำออก การอบแห้งทำได้โดยการมีเตาอบแห้งแยกออกไปต[illegible] 5
หรือจะเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างการอบแบบต่อเนื่อง ได้แก่เตาอบแบบ Langl[illegible] ฟองยางจะถูกลำเลียงโดยสายพานแบบเปิดโล่งไปยังช่องซึ่งมีการหมุนเวียนเข้าออกของอากาศ เตย ความร้อนเกิดจากการให้ความร้อนกับขดลวดให้ความร้อนพร้อมกับการกระจายความร้อนให้ทั่วถึงโดยการใช้พัดลมกำลังสูง เวลาในการอบอาจนานถึง 1-1.5 ชั่วโมง

2. การเตรียมฟองยางด้วยกระบวนการแบบทาลาเลย์ (Talalay process) เนื่องจากการช่วยในการเกิดฟองของน้ำยางโดยวิธีทางสารเคมีจะยุ่งยากจึงนิยมใช้วิธีทางกลร่วมกับการลดความดัน คอมปาวด์น้ำยางที่เตรียมด้วยกระบวนการแบบทาลาเลย์ไม่จำเป็นต้องมีการบ่มก่อน โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการตีฟองโดยทั่วไปใช้เครื่องตีฟองแบบ Oakes Mixer โดยตีฟองให้มีความหนาแน่นมากกว่ากระบวนการดันลอปประมาณสองเท่า และขนาดเซลล์ของฟองน้ำยางเล็กกว่าแบบดันลอป หลังจากนั้นจึงปล่อยฟองน้ำยางใส่ลงในแบบพิมพ์ ปิดฝาแบบพิมพ์ ทำให้บรรยากาศภายในแบบพิมพ์เป็นสุญญากาศ เพื่อให้ฟองอากาศในฟองยางขยายตัวใหญ่ขึ้นจนฟองเต็มแบบพิมพ์ หลังจากนั้นจะผ่านของผสมระหว่างไกลคอลกับน้ำไปเลี้ยงแบบพิมพ์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำให้ฟองยางแข็งตัว หลังจากได้ฟองยางที่เต็มเบ้าและแข็งตัวแล้ว ฟองยางจะเจลโดยการผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดเข้าไปในฟองยาง ทำให้ค่า pH ลดลงจนทำให้ฟองยางเกิดการเจลขึ้น หลังจากนั้นจึงทำให้น้ำแข็งละลายแล้วตามด้วยขั้นตอนการวัลคาไนซ์ โดยใช้ของเหลวที่นำความร้อนได้ไหลผ่านช่องของแบบพิมพ์ เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการดันลอป กระบวนการแบบทาลาเลย์จะสามารถปรับสมบัติความสามารถในการรับแรงกดได้ดีกว่า ซึ่งทำได้โดยเพียงแค่การปรับความหนาแน่นของฟองยาง โดยการปล่อยปริมาณฟองยางจากขั้นตอนการตีฟองในปริมาณที่เหมาะสม เช่นเดียวกันกับความหนาแน่นของฟองยางสามารถปรับได้ตามต้องการ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมโฟมยางด้วยกระบวนแบบดันลอป

1. การปรับแอมโมเนียในน้ำยางที่ใช้เตรียมฟองยาง โดยมากจะเป็นน้ำยางธรรมชาติจึงจะต้องมีการปรับปริมาณแอมโมเนียให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตฟองยางที่เลือกใช้ ซึ่งอาจทำโดยการเติมฟอร์มาลดีไฮด์ หรือไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยาง โดยทั่วไปการไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยางทำได้โดยการพ่นอากาศขึ้นไปที่ผิวของน้ำยางพร้อมๆ กับการกวนน้ำยางอย่างช้าๆ เช่น ด้วยความเร็วประมาณ 50 รอบต่อนาที เป็นต้น จนกระทั่งปริมาณแอมโมเนียในน้ำยาง มีค่าประมาณ 0.12-0.22% ในทางปฏิบัติ ถ้าในกรณีที่เลือกใช้กระบวนการตียางฟองน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง จะควบคุมให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางประมาณ 0.22% ส่วนถ้าเลือกใช้กระบวนการตีฟองยางแบบต่อเนื่องจะควบคุมให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางประมาณ 0.12 %

2. การเตรียมสารเคมี เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำจึงต้องเตรียมสารเคมีนั้นอยู่ในรูปของสารแขวนลอย โดยการใช้เทคนิคการบดสารเคมีโดยอาศัยแรงทางกลมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-5 ไมครอน ในขณะเดียวกันจะใช้สารช่วยกระจายตัว (dispersing agent) เพื่อช่วยให้สารเคมีที่บดสามารถแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำได้อย่างเสถียร

3. กระบวนการที่ทำให้เกิดการเจล การเจลมีความสำคัญต่อการเตรียมฟองยางธรรมชาติอย่างมาก จัดเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้น้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้วเกิดการสูญเสียความเสถียรอย่างช้าๆ ระบบนี้จะใช้สารก่อเจล (gelling agent) เป็นตัวให้เกิดการเจลขึ้น ซึ่งสารก่อเจลที่สำคัญจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของฟลูออรีน (fluoro-complex) ตัวที่นิยมใช้มากที่สุด คือ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ โดยจะเตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำ เมื่อใส่โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ลงในน้ำยางแล้ว มีผลทำให้ค่า pH ของน้ำยางลดลง โดยปกติน้ำยางข้นจะมีค่า pH มากกว่า 9 แต่หลังจากที่ใส่สารก่อเจลแล้ว ค่า pH ของน้ำยางจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ เหลือประมาณ ไฮโดรเจนอิออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นสาเหตุให้น้ำยางผสมสารเคมีมีค่า pH ลดลง พร้อมกับ ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ (Silicon hydroxide) ซึ่งจะดูดสารพวกสบู่จากอนุภาคของน้ำยางทำให้เกิดการสูญเสียความเสถียรหรือเจล โดยทั่วไปการเจลโดยสมบูรณ์ภายในเวลา 10-15 นาที การใช้โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์จะช่วยควบคุมเวลาในการเจล ในขณะเดียวกันก็ช่วยในการจัดตัวของฟองยางให้มีการจับตัวแน่นขึ้น และสามารถยึดติดกันได้สมบูรณ์มากขึ้น

4. ผลของการใช้ซิงค์ออกไซด์ การใส่ซิงค์ออกไซด์ลงในน้ำยาง ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำจึงเกิดเป็นซิงค์ไฮดรอกไซด์ (Zinc hydroxide) ซึ่งจะเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นซิงค์อิออน แต่ในน้ำยางมีแอมโมเนียอยู่ด้วย ดังนั้นซิงค์อิออน (Zinc ion) สามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย (NH_3) ได้เป็นสารเชิงซ้อนของซิงค์เอมีน (Zinc ammine complex, $Zn(NH_3)$) ซึ่งซิงค์คาร์บอกซิเลตที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble zinc carboxylate) จะเกิดการตกตะกอนที่ผิวของอนุภาคยาง ส่งผลให้ความเสถียรของ น้ำยางลดลง ZnO โดยปกติทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นตัวเร่งให้ทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเมื่อใส่ในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้โมดูลัสสูงขึ้น โดยทั่วไปมักนิยมใช้ ZnO เป็นสารกระตุ้นในปริมาณตั้งแต่ 3-5 phr ได้ แต่ถ้า ZnO มีขนาดอนุภาคเล็กก็สามารถลดการใช้ให้เหลือประมาณ 1 phr

5. ผลของการใช้กำมะถัน ใส่กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ยาง โดยเมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหนียวเมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เนื่องจากกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล (crosslink) การเชื่อมโยงทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ทำให้ไม่เกิดการหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อนและการแข็งตัวเมื่อเย็น ทำได้ยากขึ้น และสมบัติของยาง เช่น ความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัส และความกระเด้งตัวของยางจะเปลี่ยนไปตามการเชื่อมโยงด้วย

6. ผลของสารเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

ZDEC (Zinc diethyl dithiocarbamate) เป็นสารตัวเร่งประเภทซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต สารเคมีในกลุ่มนี้เหมาะกับการใช้เป็นสารตัวเร่ง ในการบ่ม (โดยใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ) เพราะเป็นตัวเร่งที่ทำให้เกิดการบ่มเร็วขึ้นสามารถคงรูปได้ดีและวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ 115–125 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาสั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้ อาจเกิดการ reversion ขึ้นได้ ดั้งนั้นจึงไม่ควรเกิน 125 องศาเซลเซียส

ZMBT (Zinc salt of 2-mercaptobenzothiazole) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไธอะโซล สารเคมีกลุ่มนี้สามารถบ่มได้ทุกแบบของการวัลคาไนซ์และสามารถกระตุ้นให้เกิดการบ่มเร็วขึ้นได้โดยการใช้ตัวเร่งที่เป็นด่าง หรือสารสารไดไธโอคาร์บาเมตและไธยูแรม แต่การกระตุ้นนี้มีผลให้ scorch time สั้นลงด้วย และใช้ร่วมกับ basic accelerator โดยสัดส่วนจำนวนโมลเท่ากันจะให้ผลสูงสุดและความเร็วในการบ่มเร็วกว่าที่จะใช้เดี่ยว ๆ สารตัวเร่งที่เป็นด่างนิยมใช้เป็นสารกัวนิดีน เช่น DPG เป็นต้น

DPG (Diphenyl guanidine) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มกัวนิดีนเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ (cure) ช้าถ้าเป็นสารตัวเร่งเสริมจะมีการกระตุ้นสูงมากโดยเฉพาะการกระตุ้นพวกไธอะโซล ถ้าใช้สารเคมีในกลุ่มนี้เป็นสารตัวเร่งหลักจะไม่สามารถวัลคาไนซ์โดยใช้อากาศร้อนได้เพราะวัลคาไนซ์ช้าเกินไป การทำงานของกัวนิดีนต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ เป็นตัวกระตุ้นแต่ไม่จำเป็นต้องใช้

7. สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยทั่วไปแล้วจะไม่ใช้สารต้านทาน 7 ออกซิเดชันในงานน้ำยาง ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพน้ำยางมีความต้านทานต่อการเ ได้ดี และพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพน้ำยางที่ยังไม่ได้ผ่านการบด การเฉือนหรือทำให้สัมผัสกับอุณหภูมิสูง ขณะกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตมักจะใช้สารป้องกันการเสื่อมชนิด วิงค์ สเตย์แอล (Wingstay L) เป็นสารที่ใช้ในน้ำยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ

8. สารที่ทำให้น้ำยางเป็นฟอง แอมโมเนียโอลิเอตหรือสบู่โอลิเอต เป็นสารที่ใส่ในน้ำยางเพื่อ ทำให้น้ำยางเกิดฟองในขั้นตอนการปั่นฟอง

1.2 การเตรียมฟองยางจากยางแห้ง ยางฟอง (Rubber sponge) ที่เตรียมจากยางแห้งโดยทั่วๆ ไป ทั้งที่เป็นเซลล์แบบเปิดและเซลล์แบบปิดมักใช้สารฟูเคมี เซลล์แบบปิดมีโครงร่างเป็นเซลล์ที่เชื่อมต่อกันโดยที่ภายในเซลล์กักขังก๊าซไว้ในของผสมเนื้อยาง หรือพลาสติก ส่วนยางฟองที่มีเซลล์แบบเปิดจะมีผนังเซลล์แตกเชื่อมต่อถึงกัน และอากาศสามารถไหลผ่านระหว่างเซลล์ได้ ยางฟองเตรียมได้จากยางแห้งที่มีสารวัลคาไนซ์และสารฟู ซึ่งโดยทั่วไปจะปล่อยก๊าซ N2 และ CO2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนืด และอุณหภูมิของสารฟู มีผลการเกิดเซลล์แบบเปิด หรือเซลล์แบบปิด ขั้นแรกความร้อนทำให้ความหนืดลดลงจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เริ่มวัลคาไนซ์ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นหากสารฟูสลายตัวก่อนความหนืดต่ำสุด จะมีผลทำให้เกิดเซลล์แบบเปิด เนื่องจากการขยายตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และผนังเซลล์เกิดการแตก ยางจะเกิดการคงรูป ก่อนการ cross link อย่างสมบูรณ์ สำหรับเซลล์แบบปิดเกิดจากการที่สารฟูสลายตัวขณะที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น ดังนั้นผนังเซลล์จะเกิดการคงรูป (cure) พอดีและจะไม่เกิดการแตกเมื่อฟองขยายตัวอย่างสมบูรณ์ ยางฟองจะนิ่มหรือยืดหยุ่น (flexible) และแข็ง (rigid) ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่า glass transition temperature (Tg) ของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ ว่าจะสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ส่วนประกอบทางเคมี ปริมาณการเชื่อมโยง เป็นต้น

1.3 ประเภทของยางฟอง (Rubber sponge)

การผลิตยางฟอง (Rubber sponge) สามารถแยกออกได้เป็น 2 แบบ คือ ตามการกระจายฟองและตามลักษณะโครงสร้างฟอง ดังนี้

1. แบ่งตามการกระจายฟอง อาจได้มาจากอากาศโดยการตีปั่นของเหลวหรือการเป่าก๊าซ หรือได้จากการสลายจุดเดือดต่ำ ทำให้สลายในพอลิเมอร์แล้วทำให้กลายเป็นก๊าซโดยการให้ความร้อน หรือโดยการลดความดัน หรือก๊าซอาจได้จากการทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาของ isocyanate กับน้ำ หรือการสลายตัวของสารฟูเคมี ฟองก๊าซจะเริ่มจากการขยายใหญ่ขึ้นโดยการแพร่ของก๊าซจากสารละลายเข้าสู่ bubbles โดยใช้ความร้อนหรือการลดความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

1) Thermoplastic Polymer ขั้นแรกจะอยู่ในรูปของแข็ง (Solid) และต่อมาจะถูกหลอมเหลวเกิดเป็นเฟสของไหล (fluid phase) ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้เสถียรด้วยความหนืด จนกระทั่งยางฟองคงรูป

2) Thermoset foam systems พอลิเมอร์ในระบบเทอร์โมเซตจะเกิดฟองก๊าซ พอลิเมอร์ขณะยังคงเป็นของไหลอยู่ เมื่อเกิดการขยายตัวของฟอง จะตามด้วยการเกิดพันธะเชื่อมขวาง ทำให้ฟองเสถียรขึ้น

3) Latex เกิดฟองก๊าซขึ้นแล้วทำให้เสถียรโดยการเปลี่ยนเฟส ซึ่งทำได้โดยการลด pH หรือการลดอุณหภูมิจนถึงจุดเยือกแข็ง หรือการทำทั้งสองอย่าง และมักจะตามด้วยการวัลคาไนซ์ที่ได้

2. แบ่งตามลักษณะของโครงสร้างฟอง แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ ยางฟองแบบเซลล์เปิดและยางฟองแบบเซลล์ปิด

1) ยางฟองแบบเซลล์เปิด (open-cell sponge rubber) มักใช้สารฟูชนิด Na_2CO_3 หรือใช้ร่วมตัวอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การขยายตัวของฟอง ฟองเกิดขึ้นขณะให้ความร้อนแก่ยางคอมปาวด์ เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์พร้อมกับเกิดการสลายตัวของสารฟู และการวัลคาไนซ์ต้องให้ยางคอมปาวด์ที่ขยายตัวนั้นเกิดการคงรูปได้อย่างรวดเร็วไม่ยุบในคอมปาวด์ที่ผลิตแบบเซลล์เปิดมักมีการเติมพลาสติไซเซอร์ปริมาณมาก เพื่อเอื้อต่อการเกิดเซลล์แบบเปิด สารตัวเติมเพื่อลดต้นทุน หรือปรับปรุงประสิทธิภาพ เช่น เขม่าดำ ส่วนแคลเซียมซิลิเกตจะหน่วงการขยายตัวของฟองยาง ดังนั้นการใช้สารตัวเติม ชนิดเสริมประสิทธิภาพอนุภาคเล็กใช้ปริมาณน้อยกว่าพวกลดต้นทุนอนุภาคใหญ่

2) ยางฟองแบบเซลล์ปิด (closed-cell sponge rubber) จะมีโครงสร้างต่อไม่ถึงกัน การผลิตจะมีวิธีการผลิตหลายๆ วิธี เช่น การอัดเบ้าใช้ความดันต่ำ (Low Pressure Molding) การอัดเบ้าใช้ความดันสูง (High Pressure Molding) การเอ็กทรูดและวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบไม่มีความดัน (Continuous Extrusion at Amobient Pressure) เป็นต้น ทั้งสามวิธีการผลิตคล้ายคลึงกันในเรื่องการใช้สารฟูเคมี ที่ให้ก๊าซออกมา โดยชนิดและปริมาณของก๊าซจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารฟู ส่วนใหญ่มักนิยมใช้สารฟูแบบให้ก๊าซไนโตรเจน เพราะการซึมผ่านต่ำกว่าชนิด คาร์บอนไดออกไซด์ โดยสารฟูที่นิยมใช้และให้ก๊าซไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ Azo, Hydrazide และ Nitroso ซึ่งอุณหภูมิการสลายตัวของกลุ่ม Azo, Hydrazide และ Nitroso จะสูง ส่วนสารฟูกลุ่ม Hydrazide จะว่องไวกว่าแตกตัวได้เร็วกว่า แต่พบว่า สารฟู Hydrazide จะหน่วงการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ จึงมักผสมกับสารฟูตัวอื่นๆ ไม่นิยมใช้เดี่ยวๆ

1.4 ขบวนการเกิดฟอง

ขบวนการเกิดฟองจำเป็นต้องใช้สารฟูช่วยในการเกิดฟองเพื่อให้เกิดเซลล์ช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์นั้น ซึ่งสารฟูที่ใช้สำหรับการเกิดฟอง แบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ

1. สารฟูเคมี (Chemical blowing agents) เป็นสารที่จะก่อให้เกิดก๊าซโดยทำปฏิกิริยาเคมีรวมถึงการสลายตัวโดยความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1.1 สารฟูชนิดอินทรีย์ สารฟูชนิดนี้สามารละลายน้ำได้ดีทำให้การกระจายตัวของสารฟูเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ฟองก๊าซที่อยู่ในยางกระจายทั่วถึงกันตลอด สารอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการ

ทำยางฟองแบ่งออกเป็นสารฟูชนิด Azo compounds ซึ่งสูตรโดยทั่วไปมีหมู่ -N=N- เช่น Diazoaminobenzene (DAB), Azo-diisobutyronitrile หรือ 2, 2-Azo-bis-isobutyr Azo-dicarbonamide หรือ Azo-bis-formamide เป็นต้น สารฟูชนิด Nitroso compo สูตรโดยทั่วไปมีหมู่ไนโตรโซ คือ –N-N= เช่น Dinitroso pentamethylene teramine (DN สารฟูชนิด Sulfonyl hydrazide compounds เช่น Benzenesulfolnyl hydrazide, benzene sulfonyl hydrazide) (OBSH)

1.2 สารฟูชนิดอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ โซเดียมไบโอคาร์บอเนต แอมโมเนียไบคาร์บอเนตและ แอมโมเนียคาร์บอเนต ซึ่งล้วนแล้วแต่ให้ก๊าซคาร์บอนไดซ์ออกไซด์

2. Physical blowing agents เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ (Low boiling liquid) เช่นพวกอลิฟาติก ฮาโรจิเนต และอโรมาติคไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ อีเทอร์ และคีโตน เป็นต้น ก๊าซที่ได้จากคอมปาวด์เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิ การลดความดันในระบบหรือทั้งสองกรณี เพื่อให้เกิดการระเหยของสารฟูชนิดนี้

3. ก๊าซ ใช้ก๊าซละลายยางอิ่มตัวในยางภายใต้ความดันสูงจากนั้นก๊าซจะขยายตัวด้วยการลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิ โดยเซลล์ที่เกิดขึ้นและขยายตัวสามารถทำให้เสถียรได้โดยการวัลคาไนซ์ ก๊าซไนโตรเจนและอากาศเป็นก๊าซที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะไม่มีพิษและเฉื่อย ไม่ติดไฟ และยังมีการแพร่ผ่านยางที่ต่ำ ในการทำฟองเซลล์ปิด มักจะใช้ก๊าซฮีเลี่ยมและอากาศ โดยความหนาแน่นของฟองควบคุมได้ง่าย โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซฮีเลี่ยมกับอากาศ

1.5 ขั้นตอนการเกิดฟอง ขั้นตอนการเกิดฟองก๊าซเป็นเซลล์ช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์เริ่มต้นและวิธีการผลิต อย่างไรก็ตามในระบบขั้นตอนการเกิดฟองก็มีความคล้ายคลึงซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. การก่อตัวของฟองก๊าซ (Bubble Formation) ขั้นตอนแรกการเกิดฟองก๊าซในระบบของเหลว ถ้าฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นนี้เกิดในของเหลวเนื้อเดียว (Homogeneous liquid) กระบวนการนี้จะเรียกว่า self nucleation แต่หากมีเฟสสองเฟสอยู่แล้ว โดยเฉพาะถ้ามีเฟสที่เป็นของแข็งอนุภาคเล็กกระจายอยู่ฟองก๊าซ จะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า ซึ่งจะเป็นระบบ liquid solid interface เรียกว่าเกิดฟองก๊าซแบบนี้ว่า nucleating process ซึ่งอนุภาคของแข็งจะเรียกว่า nucleating agent ในระบบที่ไม่มี nucleating agent ที่เป็นของแข็งในเฟสของเหลวแต่จริงๆ แล้วจะมี micro bubbles จำนวนมากของอากาศและพวก micro bubbles เหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นขยายจนเกิดเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ โดยไม่ต้องเกิดฟองก๊าซขึ้นมาใหม่อีก ในกรณีใช้สารฟูสลายตัวเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นเฉพาะที่จะไปลดแรงตึงผิวของของเหลวที่บริเวณนั้น ทำให้เกิดฟองก๊าซได้

2. การขยายตัวของฟองก๊าซ (Bubble Growth) จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าฟองก๊าซที่ขยายใหญ่ขึ้นโดยการแพร่ก๊าซจากสารละลายเข้าสู่ฟองก๊าซ ระบบจะเสถียรมากขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ขนาดใหญ่และจำนวนน้อย ตรงกันข้ามถ้ามีลักษณะฟองเล็กจำนวนมาก ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า ระบบจะเสถียรน้อยลงด้วยเหตุนี้พบว่าเซลล์มักจะเกิดการร่วมกันหรือเกาะกัน เพื่อให้เกิดความเสถียรมากขึ้นนั้นเอง ซึ่งปัจจัยอื่นๆ ก็มีผลด้วย คือที่จุดสมดุลของความดันก๊าซในฟอง ก๊าซทรงกลมที่ใหญ่ขึ้น จะมีความดันมากกว่าความดันรอบๆ ของของไหลดังสมการ

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r}$$

โดย r คือรัศมีของฟองก๊าซ ซึ่งพบว่าความดันก๊าซในฟองที่เล็กมีค่ามากกว่าฟองก๊าซขนาดใหญ่ และความดันที่ต่างกันจะเป็นไปตามสมการ

$$\Delta p_1^2 = 2\gamma\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

ซึ่ง Δp_1^2 เป็นความแตกต่างของความดันระหว่างฟองก๊าซ สองอันที่มีรัศมี r_1 และ r_2 ดังนั้นก๊าซจะแพร่จากฟองก๊าซที่มีขนาดเล็กกว่าเข้าสู่ฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่กว่า

ในช่วงแรกของการเกิดฟองที่ปริมาณก๊าซมากๆ ฟองก๊าซจะเป็นทรงกลมเมื่อฟองก๊าซมีปริมาณการขยายมากขึ้น เนื่องจากเฟสของของไหลรักษารูปทรงได้ไม่ดี ดังนั้นจึงทำให้เกิดฟองก๊าซจะกลายเป็น Polyhedral shape ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีผิวด้านเรียบมากกว่าหรือเท่ากันอย่างน้อยสี่ด้านซึ่งมักเรียกฟองก๊าซเมื่อเป็นรูปทรงต่างๆ ว่าเซลล์

3. การเกิดความเสถียรของฟองก๊าซ (Bubble Stability) การเกิดฟองขั้นตอนการขยายตัวของฟองเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของระบบ โดยการเกิดฟองก๊าซ ทำให้พลังงานอิสระในระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นฟองจะไม่เสถียร หากจะให้ฟองของของเหลวเสถียรจะต้องมีส่วนประกอบอย่างน้อยสองส่วนประกอบในของเหลวนั้น ตัวนั้นจะเป็นตัวดูดซับที่ดีที่ผิวหน้า และแรงตึงผิวจะถูกควบคุมด้วยชนิดและความเข้มข้นของตัวดูดซับ เมื่อเซลล์ขยายตัวขึ้นความเข้มข้นของตัวดูดซับ เช่นพวก Emulsifiers จะลดลงความเข้มข้นของตัวดูดซับนี้จะถูกทำให้กลับคืนเท่าเดิมด้วยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งดังนี้ การที่ชั้นบนของผิวหน้าสามารถไหลจากบริเวณที่ที่มีแรงตึงผิวน้อยกว่าไปสู่ที่มีแรงตึงผิวมากกว่า (ซึ่งมีความเข้มข้นดูดซับต่ำกว่า) หรือโดยสารลดแรงตึงผิวชั้นในของของเหลวสามารถแพร่ออกสู่ผิวหน้า ในกรณีแรกเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Marangonic effect ซึ่งเชื่อว่าการไหลของชั้นผิวหน้าจะดึงลากเอาชั้นใต้ผิวของของเหลวมาด้วย ดังนั้นจึงสามารถคงความหนาของฟิล์มหรือผนังเซลล์ไว้ได้ และกระบวนการนี้จะให้ผนังเซลล์ที่มีความยืดหยุ่น และมีการคืนพลังงานได้ดีส่วนกระบวนการแพร่นั้นเรียกว่า Gibbs effect จะรักษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว บริเวณผิวหน้าเอาไว้ได้ แต่จะไม่รักษาความหนาของฟิล์มไว้ ดังนั้นจึงไม่เกิดการเติมเติมความหนาของผนังเซลล์ขึ้น อาจกล่าวได้ว่ากลไกลทั้งสองเกิดขึ้นนั้น สารลดแรงตึงผิวจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในกรณี Marangonic effect มากกว่ากรณีเกิดการแพร่ในอัตราสูงหรือเกิด Gibbe effect ซึ่งจะไม่เกิดการเติมความหนาผนังเซลล์

อุณหภูมิของระบบจะมีผลต่อการเกิดความเสถียรของฟอง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดลดลง แรงตึงผิวลดลงด้วยทำให้ผนังเซลล์บางได้ง่ายยิ่งขึ้น เป็นผลให้ผนังเซลล์แตกง่ายขึ้นเพราะต้านความเค้นที่กระทำจากแรงดันภายในเซลล์ได้จำกัด ในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิก็จะเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ฟองเสถียรเร็วขึ้น ซึ่งการเกิดฟองแบบนี้จะเกิดการเสถียรโดยอาศัยการเกิ[illegible]เมอร์ไรเซชันหรือการเกิดพันธะเชื่อมโยง เช่นในการผลิตฟองยางที่มีการวัลคาไนซ์พร้อมๆกันกั[illegible]ขยายตัวด้วยสารฟูทำให้การขยายตัวของฟองยางแข่งขันกับการวัลคาไนซ์

ขั้นตอนแรกในการเกิดฟองของพอลิเมอร์จะเหมือนกับการเกิดฟองของของเหลวที่อ[illegible]มาแล้วเพราะขณะเริ่มเกิดฟองพอลิเมอร์จะอยู่ในรูปของไหล กรณีการเกิดฟองแบบพอลิเมอร์ไรเซชนของพวกเทอร์โมเซ็ต อิทธิพลที่มีผลในการเกิดฟองพอลิเมอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือการเพิ่มความหนืด เนื่องจากพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือการเกิดพันธะเชื่อมโยงในขณะเกิดฟอง

ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตคือการหดตัวและลดปริมาตรหลังการผลิตซึ่งมักจะเกิดยางฟองแบบเซลล์ปิด เมื่ออากาศภายในเซลล์ลดปริมาตรลงทำให้ยางฟองหดตัวหากโครงสร้างเซลล์แข็งแรงพอที่ต่อต้านการหดตัวยางฟองก็จะจะหดตัวน้อย ยางฟองแบบเซลล์ปิดจะไม่มีการหดตัวเพราะไม่มีโครงสร้างแบบกั้นอากาศภายในกับภายนอก อากาศถ่ายเทได้ตลอดจึงไม่มีแรงหดตัวจากความแตกต่างของความดันภายในกับภายนอกเซลล์ เซลล์ปิดจะกลายเป็นเซลล์เปิด โดยผนังเซลล์หนึ่งหรือมากกว่าแตกออก ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการที่บางเกินไป จนไม่สามารถต้านทานความดันภายในเซลล์ขยายตัว จุดวิกฤตที่เซลล์จะกลายเป็นเซลล์เปิดหรือไม่ อยู่ที่ความพอดีของอัตราการเกิดฟองกับ

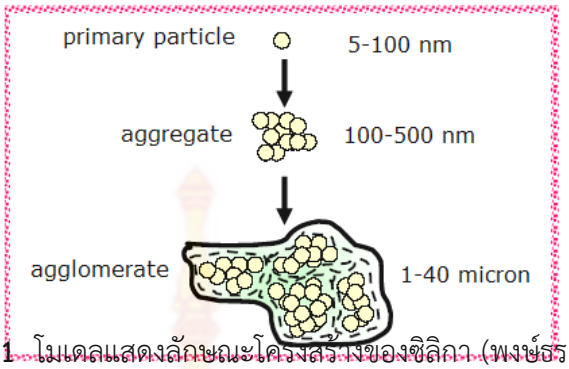
อัตราการทำให้ฟองเสถียรขณะการเกิดฟองมากสูงสุด ผนังเซลล์จะบางมากจนแตกกลายเป็นเซลล์เปิด และส่วน Ribs ยังคงแข็งแรงเพียงพอไม่ถูกทำลาย แต่หาก Ribs ถูกทำลายจะเกิดช่องว่างขณะใหญ่ขึ้นในโครงสร้าง หรือไม่ก็เกิดการยุบตัวของฟอง ในทางตรงกันข้าม เซลล์ปิดที่สมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อผนังเซลล์แข็งแรงพอเพียง และมีความยืดหยุ่นอยู่ ซึ่งจะต้านการแตกเมื่อถึงจุดขยายตัวของฟองสูงสุด โดยโมดูลัสของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วพอที่จะทำให้เซลล์คงรูปอยู่ได้

2. บทบาทของสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง

การใส่สารตัวเติมลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ผลในลักษณะของ “additive effect” ซึ่งเป็นผลรวมจากปัจจัยหลัก 4 ประการ คือ 1) polymer network หรือพันธะเชื่อมโยงภายในยางซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง และความสมบูรณ์ของพันธะที่เกิดขึ้น 2) hydrodynamic effect หรือปริมาณสารตัวเติม การใส่อนุภาคของแข็งลงไปในยางทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยปริมาณและรูปร่างของอนุภาคมีผลให้ยางมีความหนืดแตกต่างกัน; 3) In-rubber structure หรือ rubber-filler interaction ซึ่งเป็นอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยาง และ 4) filler-filler interaction หรืออันตรกิริยาระหว่างผิวของอนุภาคสารตัวเติมเองซึ่งก่อให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมเป็น filler network มีผลให้ยางคอมปาวด์มีค่า elastic modulus สูง โดยอนุภาคซิลิกามีการเกาะกลุ่มกันสูงกว่าเขม่าดำทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดและโมดูลัสสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้การแปรรูปยากกว่า การใส่สารตัวเติมทั้งเขม่าดำและซิลิกาลงในยางมีผลให้เพิ่มค่าโมดูลัสสะสม โมดูลัสสูญเสีย และ hysteresis หรือ Tan delta (LeBlanc, 2002; Frohlich *et al*., 2005) นอกจากนี้ซิลิกากระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับยางได้ยากกว่าเขม่าดำ และในยางธรรมชาติเมื่อให้ปริมาณรวมของสารตัวเติมในยางเท่ากับ 50 phr พบว่าปริมาณซิลิกาที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุดคือการใช้ในปริมาณ 20-30 phr (Rattanasom, *et al*. 2007)

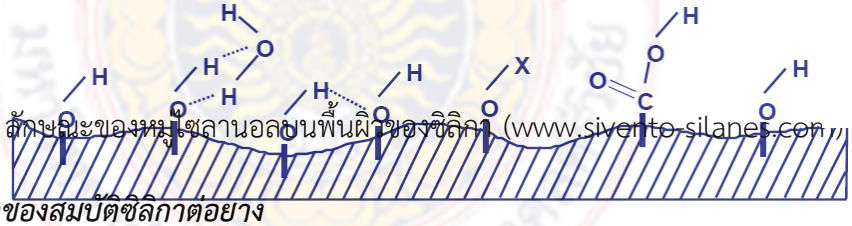
2.1 ซิลิกา เป็นสารตัวเติมอนุภาคเล็กที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่เขม่าดำ มีสูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.46-1.54 แล้วแต่เกรด ซิลิกานิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในยาง โดยซิลิกาที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติ หรือซิลิกาที่เตรียมขึ้นเองที่ได้จากการตกตะกอน (precipitated silica)

โครงสร้างของซิลิกา ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดียวๆในรูปของอนุภาคปฐมภูมิแต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสมนอกจากนี้แอกกรีเกตของซิลิกายังชอบจำกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้นเรียกว่าแอกโกลเมอเรต (agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) ดังภาพที่ 1 ซึ่งหากสภาวะการผสมไม่เหมาะสม ก็อาจจะไม่สามารถทำให้ก้อน agglomerate ของซิลิกาเหล่านั้นเกิดการกระจายตัว (dispers) ในยางได้ดี (Ansarifar, *et al.,* 2006)



ภาพที่ 1.1 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา (พงษ์ธร, 2548)

สมบัติทางเคมีของพื้นผิวซิลิกา ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นปัจจัยที่ควบคุมระดับการเสริมแรงของซิลิกาเพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาระหว่างยางกับ ซิลิกาโดยทั่วไปบนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไซลานอลปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น หมู่ไซลานอล จะทำให้พื้นผิวซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหมู่ไซลานอลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆที่มีอยู่ในยางคอมปาวด์ได้ หมู่ไซลานอลบนพื้นผิวซิลิกาสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ซึ่งความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวซิลิกานี้นอกจากจะทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อยแล้วยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาคงรูปของยางด้วย โดยทั่วไปถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้นเวลาใน scorch time และ cure time ของยางที่วัลคาไนซ์ในระบบที่ใช้กำมะถันจะยาวขึ้นเพราะซิลิกาที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อย่างไรก็ดีความชื้นบางส่วนจะถูกไล่ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมสารเคมีเข้าไปในยาง เพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมสารเคมีจะสูงมากทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไป ด้วยเหตุนี้การผสมยางที่อุณหภูมิแตกต่างกันก็สามารถทำให้เกิดความแปรปรวนของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เช่นกัน



ภาพที่ 1.2 ลักษณะของหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา (www.siventa-silanes.com)

อิทธิพลของสมบัติซิลิกาต่อยาง

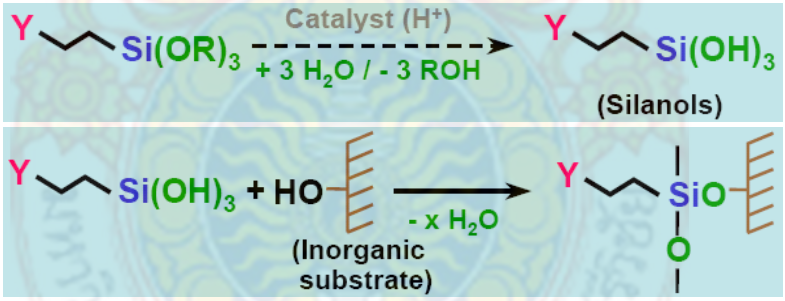
1. อิทธิพลเนื่องจากความเป็นกรด ซิลิกามีผิวเป็นกรดและสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเคมีอื่นได้ นอกจากนี้การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในยางอาจส่งผลให้ปฏิกิริยาการ วัลคาไนซ์ช้าลงเนื่องจากซิลิกาจะดูดสารตัวเร่งไว้ที่ผิวซึ่งอาจแก้โดยการเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่งหรือใส่สารประเภทที่เป็นตัวลดประสิทธิภาพผิว (Deactivator) ลงไปสารเหล่านี้ได้แก่ สารประเภทอะมีนและแอลกอฮอล์สารประเภทอะมีนได้แก่อะมีนที่เป็นของเหลวเช่นไดเอทธาโนลามีน ไดบิวทิลอะมีนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ เฮกซาเมทธีลีนเตตระมันไซโคลเฮกซิลอะมีน (DPG) สารประเภทแอลกอฮอล์ได้แก่ เฮกเซนไทรออล กลีเซอรอลเอทธีลีนไกลคอล โพรไพลินไกลคอล เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยตามลำดับ

2. อิทธิพลเนื่องจากขนาดของซิลิกา ซิลิกามีลักษณะเป็นผงสีขาว เบา ร่วน ทำให้การผสมทำได้ยากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นและการผสมจะใช้เวลานานกว่าปกติ นอกจากนั้นการใช้ซิลิกา

เป็นสารตัวเติมในยางจะทำให้ยางแข็งมากอาจทำให้เกิดความร้อนในการบดผสม ซึ่งส่งผลให้ยางจะสุกก่อนกำหนดได้ง่าย อีกทั้งจะทำให้ขนาดโมเลกุลของยางลดลงมากทำให้สมบัติของยางตกลง ดังนั้นการผสมยางกับซิลิกาเพื่อไม่ให้เสียเวลานานไม่ควรผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้งแต่ควรผสมในเครื่องบดผสมแบบปิด (Internal mixer) แต่ในกรณีไม่มีเครื่องบดผสมแบบปิดและจำเป็นต้องบดผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้งให้ทำด้วยความระมัดระวังอย่าผสมให้นานเกิดไปและขณะผสมให้ใส่ยางกับซิลิกาเท่านั้นห้ามใส่สารเคมีอื่นลงไป เพราะจะทำให้การผสมยากขึ้นเมื่อผสมเสร็จตั้งทิ้งไว้ 1 คืน แล้วจึงใส่สารเคมีตัวอื่นๆลงไป ส่วนการผสมในเครื่องผสมปิดนั้นสามารถผสมในเครื่องผสมแบบปกติได้ เนื่องจากยางที่ผสมซิลิกาแล้วจะแข็งขึ้นและขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูงอาจเป็นเหตุให้ยางสุกก่อนกำหนด ดังนั้นควรลดปริมาณสารในการผสมลงไปด้วย

3. *อิทธิพลเนื่องจากผิวซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์* โดยทั่วไปซิลิกาทุกชนิดที่นิยมใช้ในยางทั้งชนิดตกตะกอนและชนิดเผาไหม้มีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการยืดพอๆกับยางที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติม แต่ความต้านทานต่อการสึกหรอ และโมดูลัสต่ำกว่ายางที่ใช้เขม่าดำ เนื่องจากซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ ทำให้การยึดติดกับยางไม่ดี ส่งผลให้สมบัติบางประการต่ำกว่าการใช้เขม่าดำเช่น ความต้านทานต่อการสึกหรอมีค่าเพียง 60 เปอร์เซ็นต์และโมดูลัสสูงเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับยางที่ใช้เขม่าดำเกรด HAF อาจแก้โดยใส่สารประกอบไซเลนประมาณร้อยละ 0.5-2 โดยน้ำหนักของซิลิกา ซึ่งไซเลนจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมจะช่วยให้การยึดติดกันระหว่างสารตัวเติมกับยางได้ดีทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ดีขึ้นด้วย

ในการใช้งานไซเลน หมู่ Alkoxy จะถูกไฮโดรไลส์เกิดเป็นไซลานอลโดยไซลานอลจะไปเกาะอยู่กับสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์เช่น ผิวของซิลิกา (SiO_2) เคลย์ ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$) และอีกด้านหนึ่งคือ Y สามารถสร้างพันธะกับยางได้ ดังนั้นไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือประสานให้ยางกับสารตัวเติมอนินทรีย์เกาะกันได้ดีขึ้นดังปฏิกิริยาในภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของไซเลน

การใช้ซิลิกาในน้ำยาง ปัจจุบันมีการศึกษาการเติมซิลิกาลงในน้ำยางเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และแก้ปัญหาการกระจายตัวยากของการผสมในรูปผงในยางแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมอนุภาคเล็กที่เข้ากับยางได้ยาก การเติมซิลิกาลงในน้ำยางธรรมชาติพบว่าอนุภาค ซิลิกาที่ได้จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แม้จะเกิดการเกาะกลุ่มก็จะเป็นก้อนเล็กๆ (primary aggregate) ซึ่งจะเกิดเมื่อปริมาณของซิลิกาในน้ำยางมีปริมาณมากขึ้น การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคส่งผลให้เกิดการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพให้ยางมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้นกว่าการใช้งานในรูปยางแห้ง (Peng, *et al.,* 2007; Artchomphoo and Boonsong, 2013)

2.2 ผงกากยางรถยนต์ ผงกากยางรถยนต์หรือผงกากยางรถยนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยาง เช่น ยางล้อเก่า เศษยางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต เป็นต้น ไปผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่างๆ เช่น เครื่องแกรนูเลเตอร์ เครื่องพัลเวอร์ไรเซอร์ม เครื่อง

บดกระแทก เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง โดยสามารถบดได้ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไป การบดที่อุณหภูมิห้องจะเหมาะกับการผลิตผงกากยางรถยนต์ที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ผงกากยางรถยนต์ที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการผงกากยางรถยนต์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงจำเป็นต้องนำขยะยางไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลายๆรอบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่วนการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวปริมาณมาก วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตผงกากยางรถยนต์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น ผงกากยางรถยนต์ที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ผงกากยางรถยนต์มีขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ แม้ว่าจะบดให้ละเอียดมากเพียงใดผงกากยางรถยนต์ก็ยังคงมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตรซึ่งถือว่ามีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกาซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ด้วยเหตุนี้ผงกากยางรถยนต์จึงจัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง การเติมผงกากยางรถยนต์ลงไปในยางจึงมักส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลงซึ่งการด้อยลงของสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของผงกากยางรถยนต์ ปริมาณผงกากยางรถยนต์ และขนาดของอนุภาคผงกากยางรถยนต์ที่เติมลงไป โดยทั่วไปแล้วการนำผงกากยางรถยนต์ไปใช้เป็นสารตัวเติมจะต้องมีความเข้ากันได้กับยางที่นำไปใช้สูง เช่น ถ้ายางมีความเป็นขั้วสูงผงกากยางรถยนต์ที่เลือกใช้ก็ควรเป็นผงกากยางรถยนต์ชนิดที่มีความเป็นขั้วสูง ถ้าจะให้ได้สมบัติที่ดีที่สุดทั้งผงกากยางรถยนต์และยางที่นำผงกากยางรถยนต์ไปผสมควรจะเป็นยางชนิดเดียวกัน ถ้าหากผงกากยางรถยนต์มีระดับความเป็นขั้วมีระดับความเข้ากันได้แตกต่างจากยางที่นำไปผสมมากแรงดึงดูดหรืออันตรกิริยาระหว่างผงกากยางรถยนต์และยางหลักก็จะมีค่าต่ำส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างรวดเร็ว (พงษ์ธร, 2552)

ปัจจุบันได้มีการนำผงกากยางรถยนต์ที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรม นำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติก นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลมและยางเทอร์โมพลาสติก ประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ผงกากยางรถยนต์ได้รับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมทั้งในอุตสาหกรรมยางล้อและในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่นแผ่นยาง และบล็อกยางปูพื้น พรมปูพื้น ยางบังโคลน แผ่นยางรองใต้พรม แผ่นยางชั้นล่างของลู่วิ่ง ลานกรีฑา หรือสนามเทนนิส ท่อยาง แผ่นปูพื้นคอกปศุสัตว์ กระถางต้นไม้ ยางกันกระแทกท่าเรือ พื้นรองเท้า แผ่นฉนวนกันเสียง การประยุกต์ใช้ผงกากยางรถยนต์ดังกล่าวมีจุดประสงค์หลัก 3 ประการ คือ ลดต้นทุนการผลิต ดัดแปรงหรือปรับปรุงสมบัติเฉพาะบางประการของผลิตภัณฑ์ ลดมลพิษโดยการนำเอาขยะยางกลับมาใช้ใหม่ โดยมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำผงกากยางรถยนต์มาใช้ใหม่ เช่น

1. การใช้ยางรีเคลมร่วมกับยางใหม่ (Original) ที่คุณภาพต่ำ คือยางสกิมที่มีสีจาง เพื่อทำบล็อคยางปูพื้นแบบสี การศึกษาโดยแปรสัดส่วนผสมของยางสกิมและยางรีเคลม กำหนดสูตรพื้นฐานของสารเคมีที่จำเป็นคือ ดินขาว (china clay) ซึ่งราคากิโลกรัมละประมาณ 1.50 - 3.00 บาท และได้ทดลองนำแกลบจากการสีข้าว มาใช้เป็นสารตัวเติม จากการศึกษาหาปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสม ทดลองสูตรต่างๆ หาเทคนิคการผสม การขึ้นรูป และทดสอบสมบัติทางกายภาพด้านความแข็ง ความกระดอน (ความหยุ่นตัวของยางบล๊อค) ประเมินราคาต้นทุนการผลิต พบว่าสูตรที่เหมาะสม คือ ใช้ยางสกิม 100, ยางรีเคลม 100, แกลบ (บดให้ละเอียดโดยเครื่องบด kneader ก่อนที่จะนำไปผสมกับยาง) 200, ZnO 3, Stearic acid 1, Montaclere 3, MBTS 0.5, TMTD 0.5, DPG 0.5 และ Sulphur 2, สีตามต้องการ (วราภรณ์ และคณะ, 2538)

2. พัฒนาการนำเอายางมะตอยที่ใช้ลาดผิวถนนทั่วไปมาผสมกับผงยางจากเศษยางรถยนต์เก่า เพื่อใช้เป็นวัสดุลาดผิวสระเก็บน้ำ การศึกษาได้พิจารณายางมะตอยทั้งหมด 4 แบบ โดยศึกษายางมะตอยที่มีส่วนผสมและวิธีการผสมแตกต่างกัน 2 ประเภท ได้แก่ ยางมะตอยผสมร้อน (Hot

mix asphalt) และ ยางมะตอยผสมเย็น (Cold mix asphalt) โดยแต่ละประเภทได้พิจารณาแยกย่อยเป็น 2 แบบคือ แบบไม่ผสมผงยางและแบบผสมผงยาง ในการศึกษาได้ใช้ส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุ โดยคิดตามน้ำหนักประกอบด้วยหินคละ 93.5% และ แอสฟัลต์รวมผงยาง 6.5% โดยในส่วนของแอสฟัลต์ รวมยางแยกออกเป็นแอสฟัลท์ 80% และผงยาง 20% ได้มีการสร้างตัวอย่างของวัสดุยางมะตอยทุกแบบ โดยให้ลาดบนดินบดอัด เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุรวม ได้แก่ วิเคราะห์คุณภาพน้ำจากการปนเปื้อน การทดสอบการรั่วซึมของน้ำผ่านยางมะตอยการทดสอบแรงเฉือน การทดสอบแรงดึง และการทดสอบการแตกร้าวของผิวยางมะตอยเนื่องจากการตากแดดและแช่น้ำใช้เวลาในการทดสอบ 9 เดือน จากการศึกษาผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างยางมะตอยทั้ง 4 แบบ ให้ผลการทดลองทุกคุณสมบัติที่ดีเพียงพอแก่การใช้งานคุณภาพน้ำมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับและไม่มีการแตกร้าวที่ผิว เนื่องจากการตากแดดและแช่น้ำ พบว่าผงยางช่วยทำให้ยางมะตอยมีคุณสมบัติในเรื่องความทนทานและการรับแรงดีขึ้น นอกจากนี้การศึกษาความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์หากงาน พบว่ายางมะตอยทั้ง 4 แบบ มีราคาค่าลงทุนลาด 120 - 151 บาทต่อตารางเมตร มีอาย 16
งาน 8 - 18 ปี เมื่อใช้ลาดกับสระที่มีอยู่แล้ว พบว่าอัตราส่วนระหว่างประโยชน์ต่อค่าลงทุนลา
ประเภทของการใช้น้ำ คือ B/C = 1.57 - 2.81 เมื่อใช้น้ำสำหรับ อุปโภคบริโภค และ B/C = 0.29 - 0.53 เมื่อใช้น้ำสำหรับเพาะปลูกพืช โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากพืช 9 ชนิด ซึ่งให้ผลตอบแทนแตกต่างกัน (สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT), 2545)

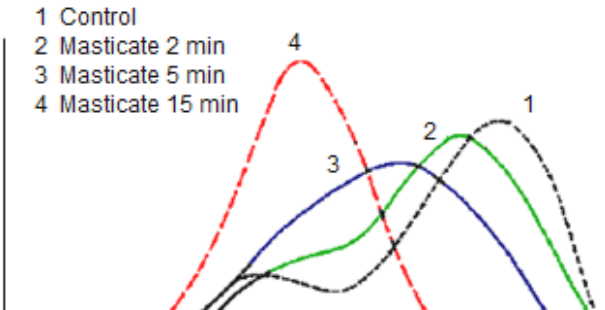
3. ใช้ผงกากยางรถยนต์เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ คณะผู้วิจัยสนใจศึกษาปริมาณของผงกากยางรถยนต์ที่ระดับ 0 – 50 phr จากผลการทดลองพบว่าค่าทอร์กต่ำสุด และค่าความหนืดมูนี่ของยางธรรมชาติผสมกากยางรถยนต์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณผงกากยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า scorch time และ cure time มีแนวโน้มลดลง อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มปริมาณของผงกากยางรถยนต์ในสูตรยางธรรมชาติจะช่วยให้มีสมบัติการกระเด้งกระดอนดีขึ้น การบวมพอง และการยืด ณ จุดขาดลดลง แต่สมบัติการทดต่อแรงดึงสูงสุด 100%โมดูลัส และ 300%โมดูลัส มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Ismail. *et al.*, 2002) นอกจากนี้ Kumnuantip และ Sombatsompop (2003) ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการทนต่อตัวทำละลายของยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ ยาง STRVS60 และSTR20CV โดยใช้ยางรีเคลมเป็นสารตัวเติม พบว่าค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นในการคลอสลิ้งเพิ่มขึ้นด้วย และการทนต่อตัวทำละลายดีขึ้นเมื่อปริมาณสัดส่วนยางรีเคลมสูงขึ้น

4. การนำยางเก่าที่ใช้แล้วมาบดเป็นผงผสมกับคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ในการทำคอนกรีตบล็อกปูผิวทางเท้า โดยคาดว่าความยืดหยุ่นของยางจะสามารถทำให้คอนกรีตบล็อกที่ได้ มีความเหนียวไม่แตกหักง่ายอีกทั้งมีความอ่อนนุ่มที่พื้นผิว สามารถดูดซับพลังงานได้ดี ซึ่งพบว่าการรับแรงของคอนกรีตลดลงเมื่อมีการผสมผงยาง แต่ความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น คอนกรีตผสมยางมีความยืดหยุ่นตัวสูง และจากการทดสอบเชิงกลพบว่า สัดส่วนผสมยางร้อยละ 10-20 ได้ผลลัพธ์น่าจะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนผสม และคอนกรีตผสมผงยางมีความต้องการน้ำมากกว่าคอนกรีตปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมพัทธ์ (เฉลิมพล และคณะ, 2547) และ Mohammed, *et al.* (2012) นำผงกากยางรถยนต์มาใช้ผสมร่วมกับส่วนประกอบหลักอื่นๆของคอนกรีตเพื่อผลิตเป็นคอนกรีตแบบกลวง โดยการทดลองได้เตรียมชิ้นตัวอย่างทั้งหมด 64 ตัวอย่าง ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงกากยางรถยนต์ ที่ระดับ 0%, 10%, 25% และ 50% โดยน้ำหนักมวลรวมของอิฐบล๊อก ขนาด 390 mm X 190 mm X 190 mm ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกด การนำความร้อน สภาพต้านทาน และนำกระแสไฟฟ้า การดูดซับเสียง และการส่งผ่านแรง พบว่าอิฐบล็อกที่ได้มีน้ำหนักเบา และสมบัติอื่นๆ มีสมบัติที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับอิฐบล็อกกลวงที่ไม่ผสมผงกากยางรถยนต์

5. การนำผงกากยางรถยนต์มาใช้เตรียมเป็นแผ่นยางอัด โดยใช้ตัวประสานเป็นพอลิยูรีเทน พบว่า ดัชนีเอ็มดีไอและปริมาณสารขยายสายโซ่เพิ่มขึ้น จะทำให้ตัวประสานพอลิยูรีเทนมีสมบัติทางกายภาพได้แก่ การทนทานต่อการดึง การทนทานต่อการฉีกขาดและความแข็งเพิ่มขึ้น การใช้พอลิออลชนิด Sannix FA-703 จะทำให้ตัวประสานมีความสามารถในการยืดจนขาดมากกว่าการใช้พอลิออลชนิด Lupranol 2025SG เมื่อนำผงกากยางรถยนต์มาผสมกับตัวประสานพอลิยูรีเทนเพื่อเตรียมแผ่นยางอัด จากการศึกษาพบว่าปริมาณตัวประสาน ระยะกดอัด ดัชนีเอ็มดีไอ และปริมาณสารขยายสายโซ่เพิ่มขึ้น จะทำให้แผ่นยางอัดมีสมบัติทางกายภาพได้แก่ การทนทานต่อการดึง การทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง การผิดรูปอย่าง ถาวรเนื่องจากการกด และการทนทานต่อการสึกหรอแบบดีขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลาไนซ์ไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญ การบ่มเร่งในอากาศร้อน 70 $^{\circ}$C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง ไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพ ของแผ่นยางอัดเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ การเตรียมเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ โดยใช้วัสดุหลัก 3 ชนิด คือเศษผงกากยางรถยนต์ (Crumb rubber, CRM) ยางธรรมชาติ (NR) และพลาสติกชนิดพอลิเอทลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ทำการเตรียม CRM/NR/HDPE ที่สัดส่วนตั้งแต่ 50/10/40 ถึง 20/10/70 โดยให้ปริมาณของยางธรรมชาติคงที่ ทำการเบลนด์โดยใช้เครื่องผสมแบบปิดขนาดเล็ก ผสมในสภาวะบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 180 $^{\circ}$C เวลาการผสม 8 นาที Fill factor เท่ากับ 0.8 ความเร็วโรเตอร์เท่ากับ 60 รอบต่อนาที พบว่าเมื่อปริมาณของพลาสติกเพิ่มมากขึ้นสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ก็จะดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาด นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นหลังการรีไซเคิล การเพิ่มปริมาณ Vulcanizing agent ในส่วนของ CRM-NR masterbatch ในปริมาณที่มากกว่าปกติ 10 เท่า ทำให้ masterbatch เกิดการ Cure ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นส่งผลให้สมบัติของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์หลังการรีไซเคิลมีความสม่ำเสมอมากขึ้น โดยการเตรียมที่ สัดส่วน 40/10/50 ให้สมบัติผ่านตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งเป็นมาตรฐานของการทำวัสดุมุงหลังคาจากวัสดุรีไซเคิล (ณัฐพงศ์ และคณะ, 2553)

3. การลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลถึง 1.6 X 10^6 ถึง 2.3 X 10^6 จึงจำเป็นต้องมีการบดยาง (mastication) เพื่อทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลง ประมาณ 400,000 ถึง 500,000 ก่อนการเบลนด์กับยางสังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดน้อยกว่า หรือก่อนการผสมสารเคมีในกระบวนการเตรียมยางคอมปาวด์ ซึ่งในอุตสาหกรรมจะใช้แรงเฉือนจากเครื่องบดผสม (เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง หรือเครื่องผสมแบบปิด) เพื่อลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติก่อนการผสมสารเคมี ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงและใช้เวลาในการคอมปาวด์มากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการลดขนาดโมเลกุลยังขึ้นอยู่กับสภาวะและเทคนิคการบดด้วย พบว่าการลดขนาดโมเลกุลของยางขึ้นอยู่กับสองปัจจัย คือ การฉีกขาดโมเลกุลจากแรงเฉือนระหว่างลูกกลิ้งสองลูกที่มีอัตราเร็วในการหมุนไม่เท่ากัน (friction ratio) หรือเกิดจากแรงเฉือนระหว่างโรเตอร์กับผนังห้องเสื้อของเครื่องผสมแบบปิด และการเกิดออกซิไดซ์โมเลกุลของยางทำให้โมเลกุลของยางขาดจากกัน เมื่อระยะเวลาในการบดยางเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงดังภาพที่ 5 ซึ่งประสิทธิภาพในการตัดขาดโมเลกุลของยางจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการบดยางและแรงเฉือนที่ยางได้รับ กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำประสิทธิภาพการบดจะขึ้นอยู่กับแรงเฉือนทำให้ยางเกิดการฉีกขาดของสายโซ่โมเลกุล แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะไหลได้ง่ายขึ้น ประสิทธิภาพการตัดขาดโมเลกุลจะขึ้นอยู่กับการที่โมเลกุลของยางเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น ทำให้โมเลกุลขาดออกจากกัน



ภาพที่ 1.4 ผลของเวลาในการบดต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ (Subramanium,1980)

Akinlabi, *et al.* (2006) และ อรสา และคณะ (2546) ศึกษาการลดขนาดโมเลกุลและควบคุมความหนืดของน้ำยางสดโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ยางธรรมชาติมีขนาดโมเลกุลและความหนืดที่เหมาะสมก่อนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยาง พบว่าวิธีการลดขนาดโมเลกุลที่ให้ยางมีขนาดโมเลกุล $4x10^5$ ถึง $5x10^5$ และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การใช้สารย่อยยาง Hypropers P50 ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง
2. การใช้ ไนโตรเบนซีน 0.62 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง
3. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.8 phr ร่วมกับโซเดียมไนไตรท์ปริมาณ 0.5 phr
4. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง
5. การใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง
6. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1.4 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง
7. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง
8. การใช้ไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด

บทที่ 2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

1. น้ำยางสด (Fresh Latex) จากจุดรับซื้อน้ำยางในหมู่บ้าน ใช้เตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท

2. ยางแท่ง STR 20 ผลิตภัณฑ์องค์การสวนยาง (นาบอน) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการวิจัย

3. ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) เกรด 1502 ผลิตภัณฑ์บริษัท Kumho petrochemical Co., Ltd.ประเทศ เกาหลีใต้ ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการวิจัย

4. ยางคลอโรพรีน (Chloroprene Rubber, CR) เกรด 232 ผลิตภัณฑ์บริษัท Chonging changshou jieyuan chemical Co., Ltd ประเทศจีน ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการวิจัย

5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide) ผลิตภัณฑ์บริษัท J.T. Baker Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เป็นสารรักษาสภาพน้ำยางสด

6. สารเคมีสำหรับการเตรียมน้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำ ประกอบด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide) ผลิตภัณฑ์บริษัท โซลเวย์ เพอรอกซีเทน จำกัด โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium Persulphat) ผลิตภัณฑ์บริษัท RFCL Co., Ltd. ประเทศเยอรมัน และไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxyl amine hydrochloride) ผลิตภัณฑ์บริษัท J.T.Baker Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา ทุกชนิดเป็นเกรดที่ใช้สำหรับห้องปฏิบัติการ

7. กรดอะซิติก (Acetic acid) เข้มข้น 99.7 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์บริษัท Ried-de Haen ประเทศเยอรมัน เป็นเกรดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ใช้จับตัวยางซิลิกามาสเตอร์แบท

8. ซิลิกา (Silica) ผลิตภัณฑ์บริษัท Evonik Industries เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารตัวเติมในรูปของซิลิกาผง และดิสเพอร์ชั่นเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้เตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท

9. เขม่าดำ N330 ผลิตภัณฑ์บริษัท Baoma Carbon black. Co., Ltd. เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารตัวเติม

10. ไฮสไตรีนเรซิ่น (High Styrene Resin) ผลิตภัณฑ์บริษัท Zeon Corporation Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม

11. ออการ์โนเคลย์ (Organoclay) ผลิตภัณฑ์จากบริษัท สยามซอยล์ จำกัด เป็นเกรดอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารตัวเติม

12. สารเคมีสำหรับการเตรียมดิสเพอร์ชัน ประกอบด้วย เบนโทไนท์ (Bentonite) และวัลทามอล (Vultamon) ผลิตภัณฑ์บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม

13. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์ ประกอบด้วย น้ำมันแนฟทานิก (Naphthanic Oil) ผลิตภัณฑ์บริษัท Psp Specialties Co., Ltd. ซิงออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ผลิตภัณฑ์บริษัทยูนิไทย จำกัด สเตียริก แอซิด (Stearic acid) ผลิตภัณฑ์บริษัท Oleon Co., Ltd. เอ็น-1,3 ไดเมทิลบิวทิล เอ็น-ฟีนิลพาราฟีนิลีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl) N-phenyl-p-phenylene diamine, 6PPD) ผลิตภัณฑ์บริษัท Chemicals Industrial Co., Ltd. 2,2,4 ไตรเมทิล -1,2 ไดไฮโดรควิโอลีน (2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquioline, TMQ) ผลิตภัณฑ์บริษัท Monflex ple. Co., Ltd. ขี้ผึ้งพาราฟิน (Parafin wax) ฟีนอลิก เรซิน (Phenolic resin) เอ็นเทอร์ทบิวทิล-2-เบนโซไทอาโซล ซัลฟีนาไมด์ (N-tert-butyl-2-benzothiazole Sulfenamide, TBBS) ผลิตภัณฑ์บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด เอ็น, เอ็น -ไดฟีนิลกัวนิดีน (N,N-Diphenyl guanidine, DPG) ผลิตภัณฑ์บริษัท Asia Pacific Specialty Co., Ltd. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)

ผลิตภัณฑ์บริษัท KONOSHIMA Chemical Co., Ltd. กำมะถัน (Sulphur, S) อีทียู (Ethylene Thiourea, ETU) ผลิตภัณฑ์บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด เอ็มบีทีเอส (Mercapto Benzothiazole, MBTS) ผลิตภัณฑ์บริษัท Flexyas America LP., AKON Co., Ltd. ไดเอททีลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ผลิตภัณฑ์บริษัท Behn Meyer ประเทศไทย เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ไซเลน (Silane, Si 69) ผลิตภัณฑ์บริษัท Fluka Chemica ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ เป็นเกรดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

14. ตู้อบ (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UE500 ผลิตภัณฑ์บริษัท Memmert GmbH Co.,Ltd.

15. เครื่องกวนเชิงกล (Mechanical stirrer) ผลิตภัณฑ์บริษัท IKA Co., Ltd.

16. เครื่องชั่งละเอียด รุ่น Mono Bloc inside PB 3002-S ผลิตภัณฑ์บริษัท Mettle-Toledo (Thailand) Co., Ltd. และรุ่น METTLER AJ 150 ผลิตภัณฑ์บริษัท Diethelm.Co,Ltd.

17. เครื่องเตรียมดิสเพอร์ชัน ใช้สำหรับเตรียมซิลิกาให้อยู่ในรูป 20% ดิสเพอร์ชัน อุปกรณ์ประกอบด้วยหม้อบด (ball mill) ที่ทำจากเซรามิกมีความจุ 2 ลิตร พร้อมลูกบดที่ติดตั้งบนเครื่องที่หมุนด้วยอัตราเร็วประมาณ 65 รอบต่อนาที

18. เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) เครื่องผสมแบบปิดรุ่น MX500-CTE-D25L750 ขนาดห้องผสมมีปริมาตร 500 ml. ผลิตภัณฑ์บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด

19. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้ง 10 นิ้ว ผลิตภัณฑ์บริษัท ชัยเจริญการช่าง (ประเทศไทย) จำกัด

20. เครื่องวัดความหนืด (Mooney Viscometer) เป็นเครื่องที่ใช้วัดความหนืดของยางดิบหรือยางคอมปาวด์ ยี่ห้อ Montech รุ่น MV2020 ของ บริษัท CG Engineering Ltd., Part

21. เครื่องทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ (Oscillating Disk Rheometer, ODR) ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น rheo TECH OD+ ผลิตภัณฑ์บริษัท Tech-Pro, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา

22. เครื่องอัดเบ้า (Compression moulding) มีชุดควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องเท่ากับ 400องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์บริษัท หงส์ยาวไทย จำกัด

23. เครื่องทดสอบ tensile ยี่ห้อ Testometric AX M350-10 kN ผลิตภัณฑ์บริษัท Testometric Co, Ltd. ประเทศอังกฤษ

24. เครื่องทดสอบความแข็งระบบ Durometer แบบ Shore A วัดความแข็ง 0-100 SI ผลิตภัณฑ์บริษัท Rex Gauge Co, Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา

25. เครื่องทดสอบการสึกหรอ แบบ Akron Abrasion รุ่น QC – 615 A และ แบบ Taber Abrasion รุ่น QC-619T ผลิตภัณฑ์บริษัท Cometech Co, Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

2.2 วิธีการวิจัย

2.2.1 การเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำ และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท

1. เตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำ (LNR) โดยใช้น้ำยางข้น 60% TSC เจือจางให้ได้ความเข้มข้น 50% ปรับลดขนาดโมเลกุลและความหนืดให้ต่ำลดได้ยาง LNR ที่มีความหนืดเหมาะสม โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง (Artchomphoo and Boonsong, 2013) การใช้งานในรูปยางแห้งจับตัวด้วยกรดอะซิติก 5% wt รีดแผ่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C

2. ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท (LNRmSi) โดยใช้น้ำยางความหนืดต่ำจากข้อ 1 มาเติมสารรักษาสภาพน้ำยาง ผสม 20% ซิลิกาดิสเพอร์ชั่น ที่เตรียมตามสูตรในตารางที่ 2.1 ที่ปริมาณซิลิกา 14.3, 20.0, 24.6, 40, 43 และ 60 phr สำหรับใช้ในสูตรยางผสมที่สัดส่วน ยาง NRmSi/CR เท่ากับ 50/50 และ 70/30 ตามลำดับ เพื่อให้มีปริมาณสารตัวเติมซิลิกาในคอมปาวด์ยาง

รองพรมเท่ากับ 10, 20 และ 30 phr โดยกวนส่วนผสมที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เป็น LNRmSi จับตัวและอบแห้งเหมือนข้อ 1 กรณีใช้งานในรูปยางแห้ง

ตารางที่ 2.1 สูตรการเตรียม 20% Silica Dispersion

Ingredient	Quantity (phr)
Silica	20
Bentonite	1
Vultamol	1
น้ำกลั่น	78
ระยะเวลาการบด (ชั่วโมง)	48

2.2.2 การเตรียมคอมปาวด์ยางรองพรม

1. คอมปาวด์จากน้ำยางผสม

สารเคมีที่จะใส่ลงในน้ำยางจะต้องเตรียมให้กระจายอยู่ในรูปของเหลวที่เป็นน้ำ[illegible] สารช่วยให้เกิดการกระจายตัว สารเคมีที่ละลายน้ำได้ให้เตรียมในรูปสารละลาย แต่ถ้าสารเคมี[illegible] ของแข็งละลายน้ำไม่ได้ จะต้องนำมาบดเพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กใกล้เคียงกับอนุภาคยาง สามารถกระจายตัวในน้ำในรูปของ dispersion โดยใช้ เครื่อง Ball Mill ประกอบด้วยหม้อบดรูป ทรงกระบอก วางอยู่ในแนวนอน ภายในบรรจุลูกเซรามิกซ์กลม หรือลูกแก้วขนาดต่างๆ การหมุนจะทำให้ลูกเซรามิกซ์กลม ตกกระแทกกันทำให้สารเคมีที่อยู่ระหว่างหินมีขนาดอนุภาคเล็กลง

สูตรที่ใช้ในการเตรียมฟองยางจากน้ำยางผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำและน้ำยางคลอโรพรีน มีการเตรียมโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนผสมที่ใช้บ่มน้ำยางและส่วนผสมน้ำยางที่ใส่ขณะเตรียมฟองยาง ส่วนผสมที่ใช้เตรียมคอมปาวด์ยางรองพรมดังแสดงในตารางที่ 2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยางผสม โดยบ่มน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง 50°C และ 70°C แปรระยะเวลาในการบ่ม ทดสอบค่า pH ความหนืดน้ำยาง ความตึงผิว และระดับการวัลคาไนซ์ของน้ำยาง คอมปาวด์ โดยวิธี quick swelling test เมื่อคอมปาวด์น้ำยางได้ระดับการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม นำมา ตีฟองเพื่อศึกษาลักษณะผิว ลักษณะการเกิดฟองโดยใช้กล้องสเตอริโอไมโครสโครป สมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อน โดยการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70±2°C เป็นเวลา 166±2 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D573 และการทนไฟของฟองยางที่ได้ ตามมาตรฐาน ASTM D635

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมของสูตรน้ำยางผสมสำหรับผลิตภัณฑ์ยางรองพรม

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)	น้ำหนักเปียก (g)
ขั้นตอนการบ่ม		
50% blend latex*	100	200
20% K-Oleate	1.0	5.0
50% Sulphur	5.0	10.0
50% ZDEC	1.0	2.0
50% ZMBT	1.0	2.0

ขั้นตอนการตีฟอง		
คอมปาวด์จากขั้นตอนการบ่ม		
50% Wingstay L	1.0	2.0
50% ZnO	5.0	10.0
33% DPG	1.0	3.0
20% SSF	1.5	7.5

หมายเหตุ : แปรสัดส่วนของน้ำยางผสมที่ LNR/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50

2. คอมปาวด์จากยางแห้ง

เตรียมคอมปาวด์สูตรยางรองพรมจากยางผสม LNR/CR ในรูปยางแห้ง ตามสูตรในตารางที่ 2.3 ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ ที่อุณหภูมิ 160 $^{\circ}$C ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-07 แล้วขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางฟองและทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ ในทำนองเดียวกับฟองยางที่เตรียมจากคอมปาวด์น้ำยางผสม

ตารางที่ 2.3 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมจากคมปาวด์ยางแห้ง

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
LNR	70, 50
CR	30, 50
Zinc oxide	5.00
Stearic acid	1.50
6PPD	1.00
MBTS	0.80
DPG	0.25
ETU	0.30
MgO	4.00
Sulphur	2.00
Azodicarbonamide (Azo)	10.0

2.2.3 การศึกษาสมบัติของคอมปาวด์ยางรองพรมที่ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับน้ำยางคลอโรพรีน

โดยศึกษาที่สัดส่วนการเบลนด์ของ LNRmSi/CR เท่ากับ 70/30 และ 50/50 และปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 10, 20 และ 30 phr ดังสูตรในตารางที่ 5 สำหรับยางรองพรมจากยางแห้ง ส่วนสูตรยางรองพรมจากน้ำยางคิดเทียบปริมาณสารในทำนองเดียวกัน ศึกษาสมบัติของฟองยางที่ได้เทียบกับคอมปาวด์ยางรองพรมที่ใช้ซิลิกาดิสเพอร์ชันเป็นสารตัวเติมในน้ำยาง และซิลิกาผงเป็นสารตัวเติมในยางรองพรมที่เตรียมจากยางแห้ง ศึกษาสมบัติของคอมปาวด์น้ำยางและผลิตภัณฑ์ ตามวิธีการในข้อ 13.1.2 (1) นอกจากนี้ทดสอบสมบัติการยุบตัว การหดตัว ความแข็ง และการยุบตัวถาวรจากการกด (compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395-85 และความหนาแน่น (Specific gravity) ตามมาตรฐาน ASTM D 792

2.2.4 ศึกษาการใช้สารตัวเติมร่วมระหว่างซิลิกาในมาสเตอร์แบทกับแคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์

ศึกษาสูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมโทนสีขาวและสีดำ ที่ใช้ซิลิกาในมาสเตอร์แบทร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์ โดยศึกษาที่ปริมาณสารตัวเติมรวมเท่ากับ 30 และ 50 phr ดังสูตรในตารางที่ 6 สำหรับยางรองพรมจากยางแห้ง ส่วนสูตรยางรองพรมจากน้ำยางคิดเทียบปริมาณสารในทำนองเดียวกัน เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้สารตัวเติมซิลิกามาสเตอร์แบทร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตและผงกากยางรถยนต์ที่ให้สมบัติของยางรองพรมจากคอมปาวด์น้ำยางและยางแห้งที่สมบัติดีที่สุด จากวิธีการศึกษาสมบัติของฟองยางตามวิธีการในข้อ 13.1.3

ตารางที่ 2.4 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมที่ใช้ศึกษาผลของซิลิกา

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
LNRmSi	70/14.3, 70/24.6, 70/43, 50/20, 50/40, 50/60
CR	30, 50
Silica	LNRmSi
Zinc oxide	5.00
Stearic acid	1.50
6PPD	1.00
MBTS	0.80
DPG	0.25
ETU	0.30
MgO	4.00
Sulphur	2.00
Azodicarbonamide (Azo)	10.0

ตารางที่ 2.5 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางรองพรมที่ใช้ศึกษาสัดส่วนของสารตัวเติม

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)
LNRmSi	70/14.3, 70/24.6, 70/43, 50/20, 50/40, 50/60
CR	30, 50
Silica	LNRmSi
Calcium carbonate or recycle tyre scrap	Depend on silica in LNRmSi
Zinc oxide	5.00
Stearic acid	1.50
6PPD	1.00
MBTS	0.80
DPG	0.25
ETU	0.30
MgO	4.00
Sulphur	2.00
Azodicarbonamide (Azo)	10.0

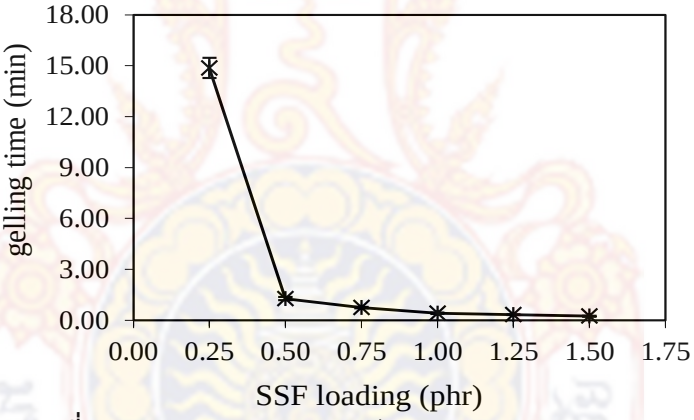
บทที่ 3 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 สมบัติของยางฟองจากน้ำยางธรรมชาติ

3.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยาง

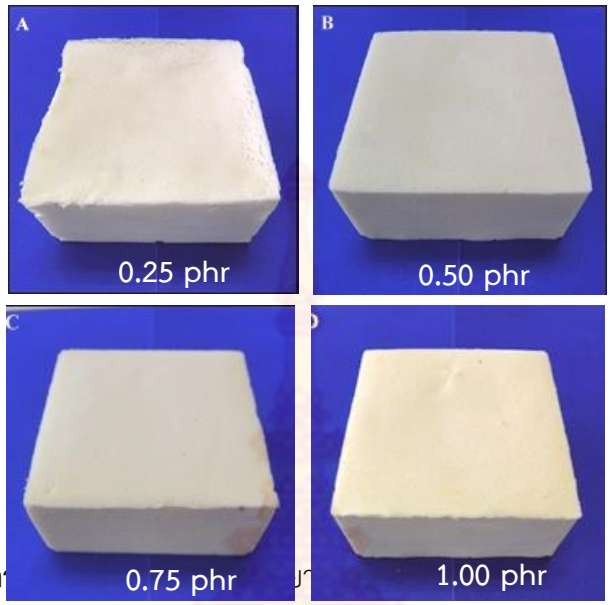
ศึกษาสมบัติยางฟองน้ำจากคอมปาวด์น้ำยาง โดยแปรปริมาณ SSF อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยาง ได้ผลการทดลอง ดังนี้

3.1.1.1 ผลของปริมาณ SSF การเพิ่มปริมาณ SSF มีผลให้ระยะเวลาการเจลของฟองยางลดลง ดังภาพที่ 3.1 พบว่าการใช้ SSF ที่ 0.50 phr ให้ระยะเวลาการเจลประมาณ 2 นาที ซึ่งเหมาะสมสำหรับการทำให้ฟองยางมีการคงรูปก่อนการ วัลคาไนซ์ ที่ปริมาณการใช้ SSF น้อยกว่า 0.50 phr ฟองยางต้องใช้เวลานานก่อนจะเกิดการเจลทำให้ ผิวหน้าฟองยางยุบเนื่องจากฟองยางไม่แข็งแรง เกิดการแตก และที่ปริมาณการใช้ SSF ที่มากกว่า 0.50 phr ฟองยางจะมีระยะเวลาการเจลสั้นมาก ทำให้ฟองยางเกิดการ เจลก่อนการเทลงแบบพิมพ์ หรือเทลงแบบพิมพ์ได้แต่ไม่สามารถปาดผิวหน้าฟองยางให้เรียบได้ ดังภาพที่ 3.2 อย่างไรก็ตามนอกจากปริมาณ SSF ระยะเวลาในการเจลยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ เช่น ปริมาณ DPG ชนิดและปริมาณสารตัวเติม เป็นต้น

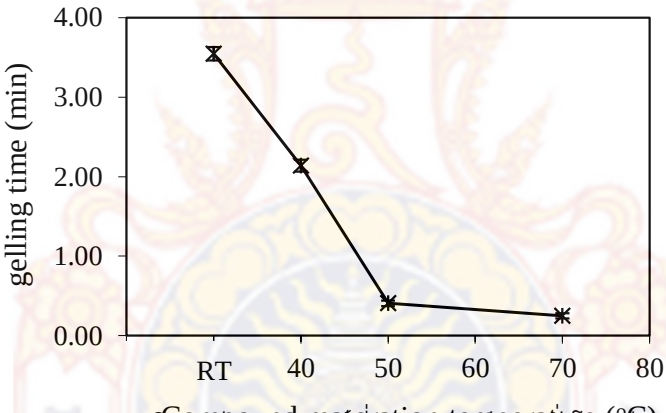


ภาพที่ 3.1 ผลของปริมาณ SSF ต่อระยะเวลาการเจลของฟองยาง

3.1.1.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มคอมปาวด์น้ำยาง อุณหภูมิในการบ่มคอมปาวด์น้ำยางมีผลให้ยางคอมปาวด์มีระดับการเชื่อมโยงในโมเลกุลต่างกัน การบ่มคอมปาวด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การตีฟองยางทำได้ยากขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้น้ำยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปบางส่วน ระยะเวลาในการเจลจึงลดลงและความยืดหยุ่นของคอมปาวด์ยางลดลง ดังภาพที่ 3.3

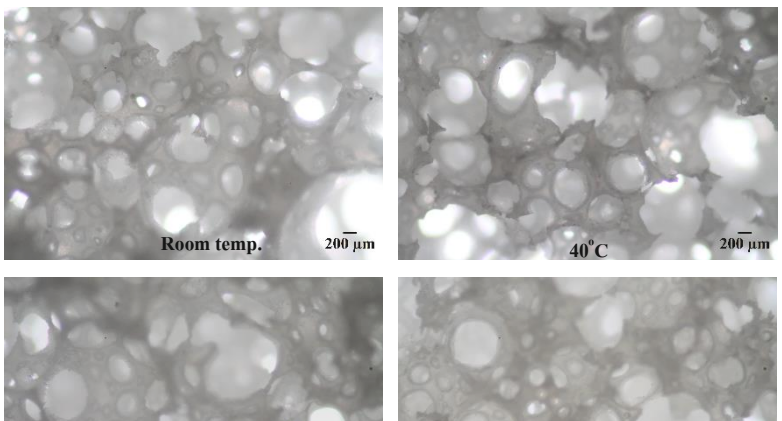


ภา



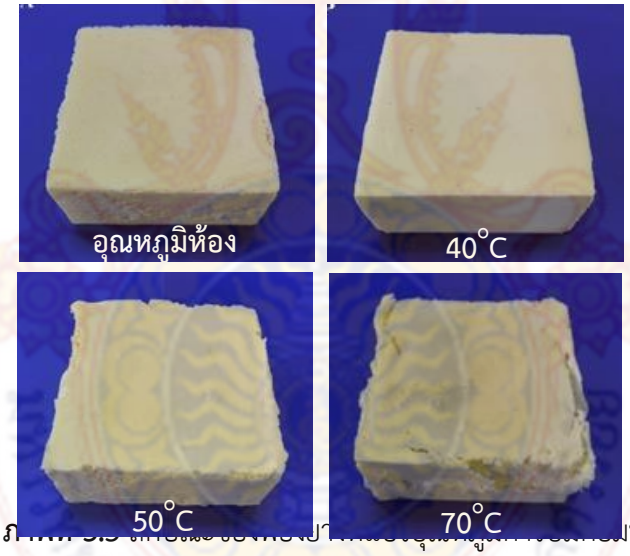
ภาพที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิการบ่มคอมปาวด์ที่ระยะเวลาบ่ม 1 ชั่วโมง ต่อระยะเวลาการเจลของฟองยาง

ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางที่กำลังขยาย 40 เท่า ดังภาพที่ 3.4 พบว่าการบ่มคอมปาวด์ที่อุณหภูมิห้องแม้จะสามารถตีฟองขึ้นรูปเป็นฟองยางที่สมบูรณ์ได้ แต่ฟองยางมีความสม่ำเสมอต่ำ มักเกิดการยุบตัวและให้คุณภาพของฟองยางที่ได้มีความแปรปรวนของสมบัติมาก การเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มที่ 50°C ทำให้ลักษณะการเกิดฟองยางมีขนาดฟองที่ไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่การบ่มที่ 27
ทำให้คอมปาวด์น้ำยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปบางส่วน มีความหนืดมากขึ้นและความยืดหยุ่นของปาวด์ลดลง ทำให้ความสม่ำเสมอของขนาดฟองยางน้อยลงและได้ฟองยางมีขนาดเล็กเนื้อแน่น



ภาพที่ 3.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิในการบ่มต่างกัน

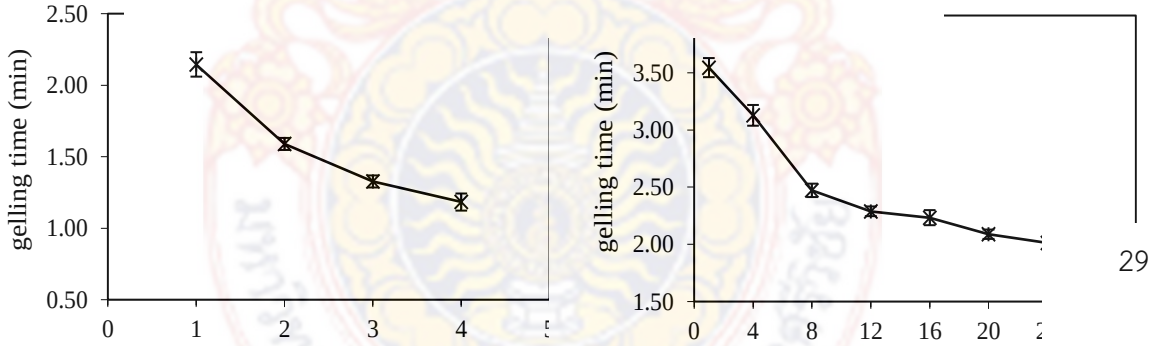
สำหรับคอมปาวด์น้ำยางที่ใช้ SSF ปริมาณ 0.50 phr เฉพาะการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิ 40 °C เท่านั้นที่สามารถตีฟองขึ้นรูปเป็นฟองยางที่สมบูรณ์ได้ ส่วนคอมปาวด์ที่บ่มที่อุณหภูมิสูงลักษณะฟองยางที่ได้จะเป็นเนื้อแป้งไม่มีสมบัติความยืดหยุ่น ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ลักษณะของฟองยางที่อุณหภูมิการบ่มคอมปาวด์น้ำยาง

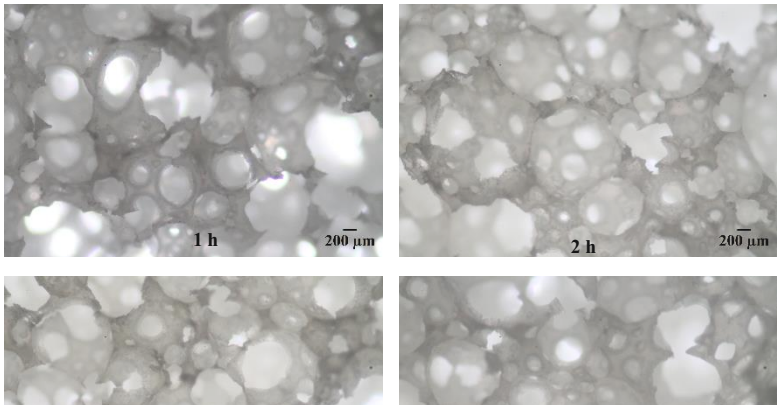
3.1.1.3 ผลของระยะเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยาง การบ่มที่อุณหภูมิห้อง และที่ 40°C ซึ่งสามารถตีฟองให้ลักษณะของฟองยางที่สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิห้องแปรเวลาในการบ่ม 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24 และ 28 ชั่วโมง และที่ 40°C แปรเวลาในการบ่มที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางลดลง ดังภาพที่ 3.6 เนื่องจากยางคอมปาวด์มีพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณพันธะที่เกิดยังอยู่ในระดับที่ไม่ถือว่ายางเกิดการวัลคาไนซ์ทำให้ยังสามารถตีฟองขึ้นรูปเป็นฟองยางได้ ระยะเวลาในการเจลของฟองยางลดลงตามระยะเวลาในการบ่มคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3.7 ทำให้การเทลงแบบพิมพ์และการปาดผิวหน้าฟองยางทำได้ยากขึ้น

ภาพที่ 3.6 ผลของเวลาการบ่มคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 40°C ต่อเปอร์เซ็นต์การบวมพองของคอมปาวด์



ภาพที่ 3.7 ผลของเวลาการบ่มคอมปาวด์ต่อระยะเวลาการเจลของฟองยาง

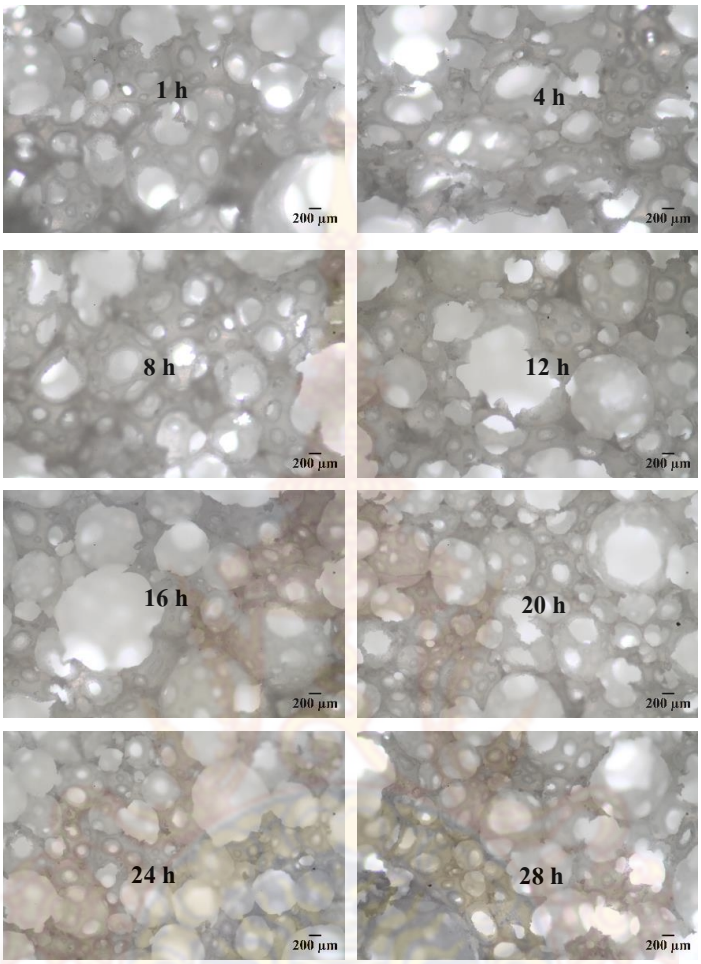
การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้ความเสถียรของคอมปาวด์น้ำยางลดลง การตีฟองขึ้นรูปฟองยางทำได้ยากขึ้น ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางที่กำลังขยาย 40 เท่า พบว่าระยะเวลาในการบ่มคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 40 °C เวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง ให้ฟองยางมีขนาดฟองที่สม่ำเสมอและขนาดฟองไม่เล็กจนทำให้ฟองยางเนื้อแน่นและแข็ง ซึ่งจะพบเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 3 และ 4 ชั่วโมง



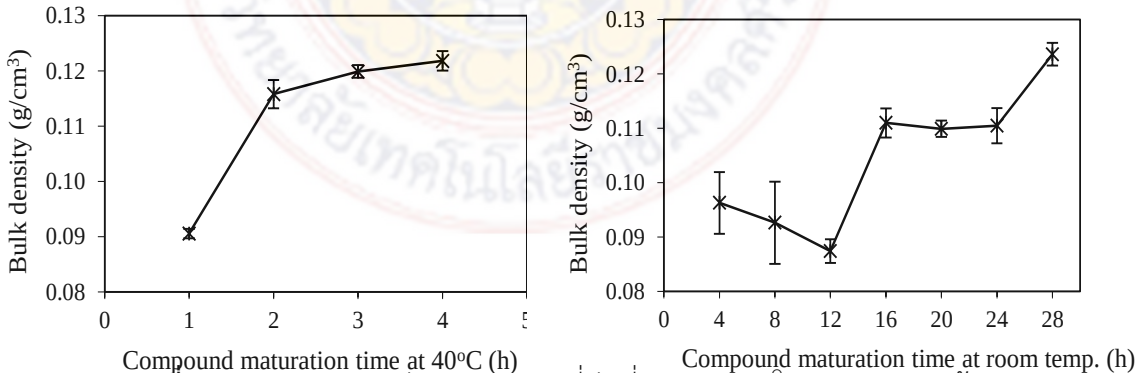
ภาพที่ 3.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางบ่มที่ 40°C ที่แปรระยะเวลาในการบ่ม

การแปรระยะเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยางที่อุณหภูมิห้อง เมื่อระยะเวลาในการบ่มคอมปาวด์เพิ่มขึ้นจะให้ฟองยางมีความสม่ำเสมอมากขึ้น คุณภาพของฟองยางที่ได้มีความแปรปรวนของสมบัติน้อย และการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มเกิน 20 ชั่วโมง จะให้ผลในทำนองเดียวกับที่อุณหภูมิ 40 °C พบว่าน้ำยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความเสถียรของคอมปาวด์น้ำยางลดลงการตีฟองขึ้นรูปฟองยางทำได้ยากขึ้น ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางที่กำลังขยาย 40 เท่า แสดงให้เห็นถึงฟองยางที่มีขนาดเล็กลง ทำให้ได้ฟองยางที่มีเนื้อแน่นและแข็งขึ้น อย่างไรก็ตามการบ่มที่อุณหภูมิห้องให้ฟองยางมีความหนาแน่นต่ำกว่าการบ่มที่อุณหภูมิ 40 °C เนื่องจากอุณหภูมิการบ่มที่ต่ำกว่าทำให้ยางมีพันธะการเชื่อมโยงเกิดขึ้นน้อยกว่า อากาศจึงเข้าไปในเนื้อยางได้ง่ายกว่า

สำหรับคอมปาวด์น้ำยางที่ใช้ SSF ปริมาณ 0.50 phr การบ่มที่อุณหภูมิห้อง เวลาในการบ่ม 12 ถึง 20 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 40 °C เวลาในการบ่ม 1 ถึง 2 ชั่วโมง จะให้ระยะเวลาในการเจลที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปฟองยาง และให้ลักษณะฟองยางที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าการบ่มที่เวลาอื่นๆ



ภาพที่ 3.9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟองยางบ่มที่อุณหภูมิห้องแปรระยะเวลาในการบ่ม



ภาพที่ 3.10 ความหนาแน่นของฟองยางที่บ่มที่อุณหภูมิ 40°C และอุณหภูมิห้อง

3.1.2 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติยางฟองน้ำจากคอมปาวด์น้ำยาง

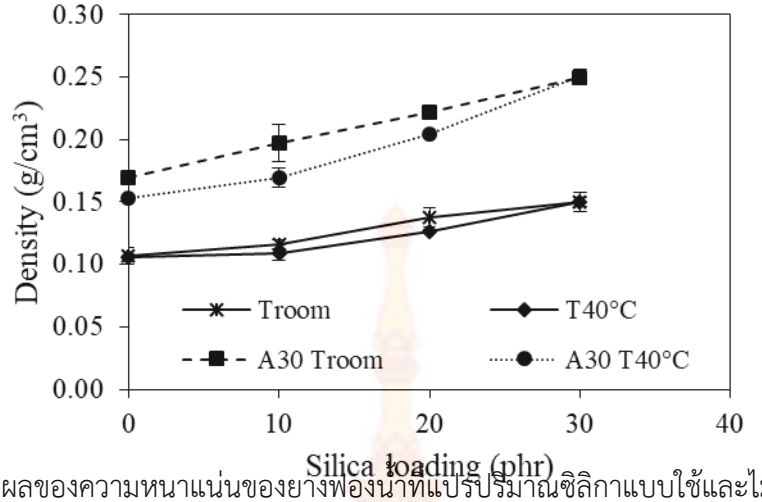
การทดสอบสมบัติยางฟองน้ำจากคอมปาวด์น้ำยางที่บ่มน้ำยางที่อุณหภูมิห้อง เวลาในการบ่ม 16 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 40°C เวลาในการบ่ม 1 ชั่วโมง ของสารตัวเติม 3 ชนิด คือ Silica ยางครัมป์ และ $CaCO_3$ โดยศึกษาปริมาณสารตัวเติมที่ 0, 10, 20 และ 30 phr เปรียบเทียบแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟชนิด Antimony trioxide เท่ากับ 30 phr ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1.2.1 ผลของปริมาณซิลิกาต่อสมบัติยางฟองน้ำจากคอมปาวด์น้ำยาง

ตารางที่ 3.1 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Silica loading (phr)	Density (g/cm^3)			
	Silica		Silica + Antimony 30 phr	
	Troom	T40°C	Troom	T40°C
0	0.1066 ± 0.0069	0.1053 ± 0.0030	0.1689 ± 0.0053	0.1528 ± 0.0017
10	0.1162 ± 0.0031	0.1091 ± 0.0062	0.1972 ± 0.0148	0.1698 ± 0.0077
20	0.1378 ± 0.0076	0.1262 ± 0.0018	0.2223 ± 0.0017	0.2047 ± 0.0016
30	0.1498 ± 0.0035	0.1500 ± 0.0073	0.2498 ± 0.0045	0.2504 ± 0.0055

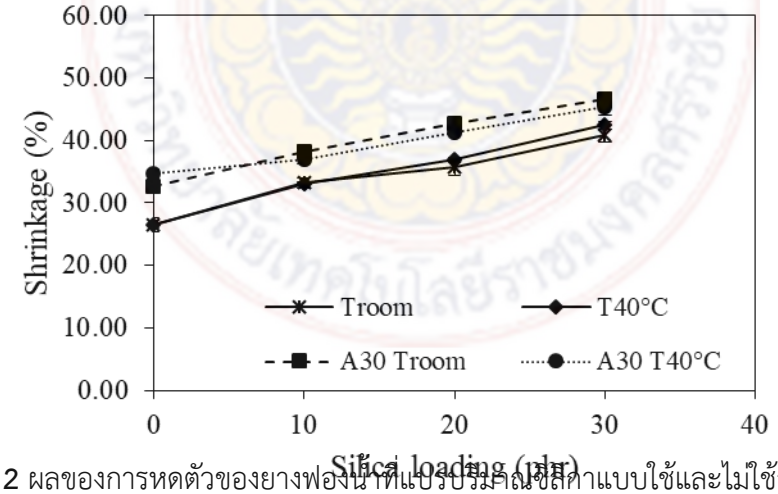
จากการทดลองความหนาแน่นของยางฟองน้ำ ที่ผสมซิลิกาจาก 0 ถึง 30 phr แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟชนิด Antimony trioxide เท่ากับ 30 phr แสดงกราฟเปรียบเทียบดังรูปที่ 1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 0 ถึง 30 phr ทั้งแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ ส่งผลให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มปริมาณซิลิการ่วมกับการใช้ Antimony trioxide จะให้ความหนาแน่นสูงกว่าแบบไม่ใช้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสารตัวเติม และสารทนไฟดังกล่าวเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับชิ้นงาน ส่วนอุณหภูมิและเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยางให้ค่าความหนาแน่นของยางฟองน้ำใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 3.11 ผลของความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 3.2 การหดตัวของของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Silica loading	Shrinkage (%)			
	Silica		Silica + Antimony 30 phr	
	Troom	T40°C	Troom	T40°C
0	26.51 ± 1.10	26.60 ± 0.59	32.74 ± 0.59	34.71 ± 0.64
10	33.22 ± 0.11	33.08 ± 0.82	38.25 ± 1.07	36.93 ± 0.78
20	35.64 ± 1.29	37.02 ± 0.27	42.66 ± 0.42	41.36 ± 0.31
30	40.85 ± 1.02	42.45 ± 0.62	46.58 ± 1.22	45.45 ± 1.44

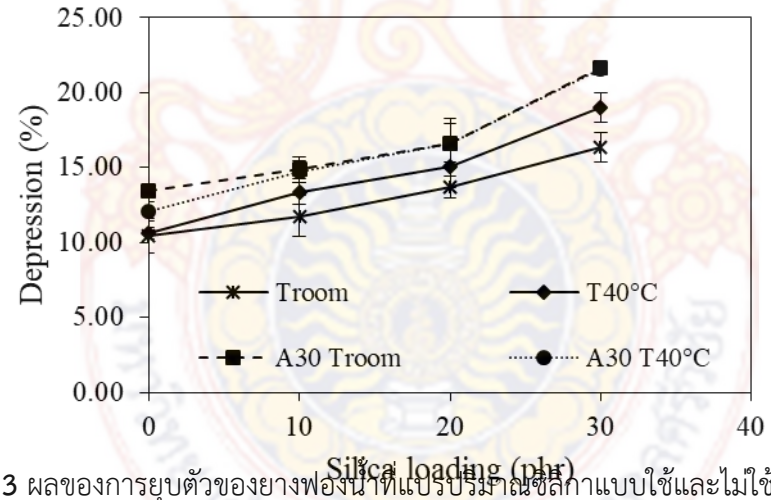


ภาพที่ 3.12 ผลของการหดตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 3.3 การยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Silica loading	Depression (%)			
	Silica		Silica + Antimony 30 phr	
	Troom	T40°C	Troom	T40°C
0	10.44 ± 0.14	10.61 ± 1.13	13.42 ± 0.13	12.07 ± 0.64
10	11.76 ± 0.83	13.38 ± 1.39	14.88 ± 0.86	14.71 ± 0.74
20	13.68 ± 1.42	15.05 ± 0.75	16.64 ± 1.31	16.63 ± 1.67
30	16.38 ± 0.99	18.98 ± 0.98	21.67 ± 0.39	21.54 ± 0.25

ผลการทดลองการหดตัวของยางฟองน้ำที่ผสมซิลิกาจาก 0 ถึง 30 phr แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟชนิด Antimony trioxide เท่ากับ 30 phr แสดงดังตารางที่ 2 ภาพที่ 2 และการยุบตัวแสดงดังตารางที่ 3 ภาพที่ 3 พบว่า ปริมาณปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางฟองน้ำเกิดการหดตัวและยุบตัวสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูง มีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติต่ำทำให้อนุภาคของซิลิกาดึงดูดเข้าหากันง่าย ปริมาณซิลิกายิ่งสูงขึ้น การดึงดูดเข้าหากันของอนุภาคซิลิกาจึงเกิดได้มากขึ้นทำให้ยางฟองน้ำหดตัวและยุบตัวสูงขึ้นตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิ และเวลาในการบ่มคอมปาวด์น้ำยางให้ค่าการหดตัวและยุบตัวของยางฟองน้ำใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 3.13 ผลของการยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

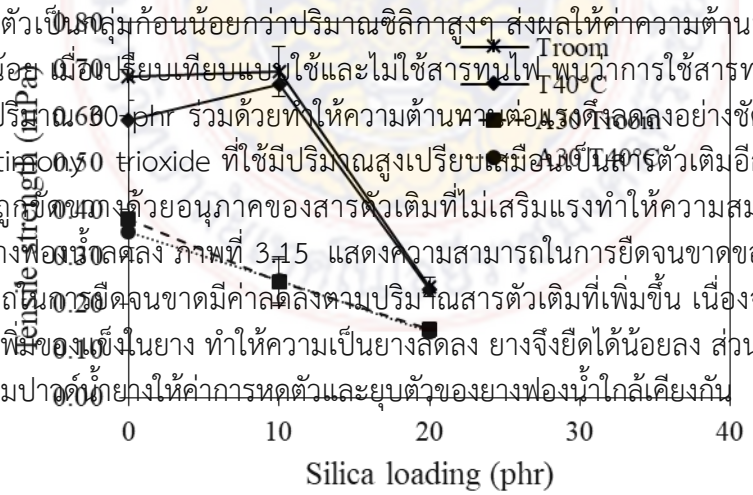
ตารางที่ 3.4 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดจนขาด และการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Properties Silica loading (phr)	Tensile strength (mPa)	Elongation at break (%)	Change in properties (%)

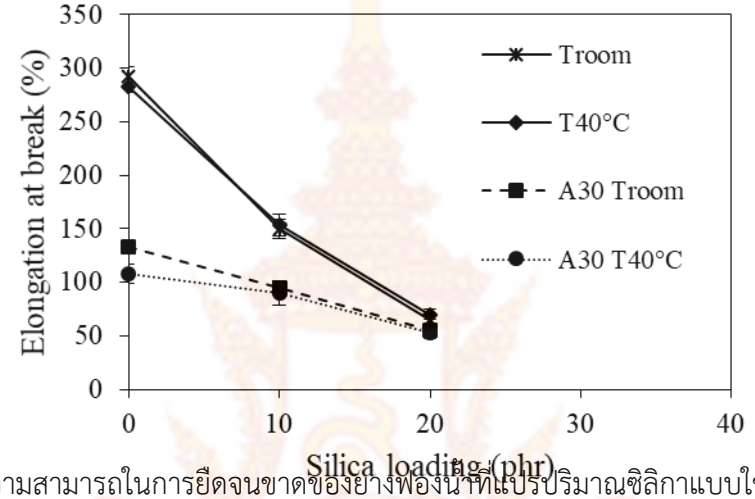
		Unaged	Aged	Unaged	Aged	T.S.	E.B.
Troom	0	0.68 ± 0.05	0.50 ± 0.03	293 ± 9	173 ± 5	-26.66	-40.74
	10	0.70 ± 0.05	0.47 ± 0.01	150 ± 9	137 ± 4	-32.87	-8.89
	20	0.24 ± 0.01	0.23 ± 0.03	65 ± 5	58 ± 12	-1.38	-11.54
T40°C	0	0.59 ± 0.06	0.50 ± 0.00	282 ± 5	177 ± 5	-15.32	-37.46
	10	0.67 ± 0.03	0.43 ± 0.02	153 ± 10	118 ± 6	-35.41	-22.83
	20	0.23 ± 0.01	0.23 ± 0.02	70 ± 5	58 ± 9	-0.65	-17.86
A30 Troom	0	0.38 ± 0.06	0.34 ± 0.03	133 ± 4	115 ± 5	-10.47	-13.21
	10	0.25 ± 0.05	0.24 ± 0.03	95 ± 6	80 ± 11	-1.22	-15.79
	20	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.01	55 ± 5	45 ± 5	-11.76	-18.18
A30 T40°C	0	0.35 ± 0.06	0.33 ± 0.03	107 ± 8	106 ± 4	-6.63	-1.16
	10	0.25 ± 0.05	0.22 ± 0.03	90 ± 11	79 ± 8	-14.07	-
	20	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.01	52 ± 5	30 ± 8	-7.86	-

หมายเหตุ ที่ระดับซิลิกา 30 phr ไม่สามารถเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบได้

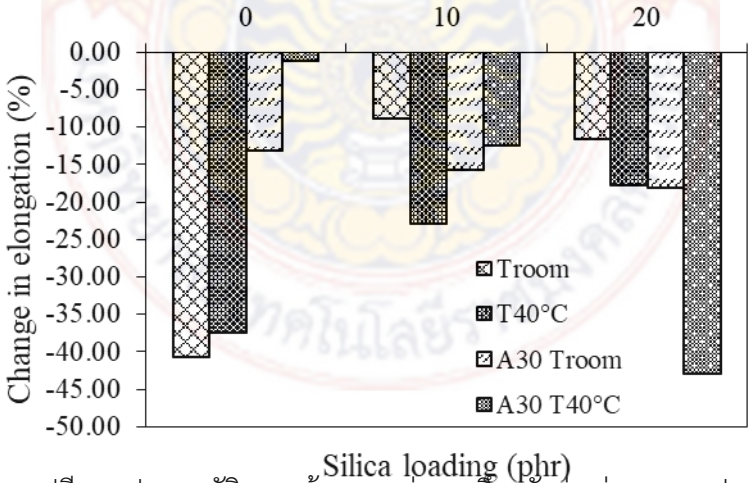
ตารางที่ 3.4 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงได้ดังภาพที่ 3.14 พบว่า การใช้สารตัวเติมซิลิกาแบบไม่ใช้สารทนไฟ เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 0 เป็น 10 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย จากนั้นความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อใช้ซิลิกามากกว่า 10 phr เนื่องจากที่ปริมาณซิลิกาน้อยๆ สามารถกระจายตัวได้ดีในฟองยาง ซิลิกามีโอกาสเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนน้อยกว่าปริมาณซิลิกาสูงๆ ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ พบว่าการใช้สารทนไฟ Antimony trioxide ที่ปริมาณ 30 phr ร่วมด้วยที่ให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสารทนไฟ Antimony trioxide ที่ใช้มีปริมาณสูงเปรียบเสมือนเป็นสารตัวเติมอีกชนิดในยาง ทำให้อนุภาคยางถูกขัดขวางด้วยอนุภาคของสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงทำให้ความสม่ำเสมอ และความแข็งแรงในยางฟองน้ำลดลง ภาพที่ 3.15 แสดงความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำพบว่าความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสารตัวเติมเป็นการเพิ่มของแข็งในยาง ทำให้ความเป็นยางลดลง ยางจึงยืดได้น้อยลง ส่วนอุณหภูมิ และเวลาในการบ่มคอมปาวด์ยางให้ค่าการหดตัวและยุบตัวของยางฟองน้ำใกล้เคียงกัน



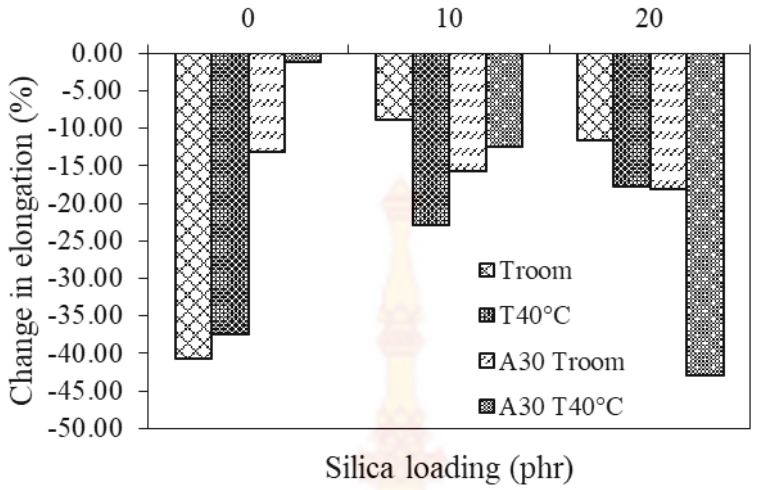
ภาพที่ 3.14 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



ภาพที่ 3.15 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



ภาพที่ 3.16 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

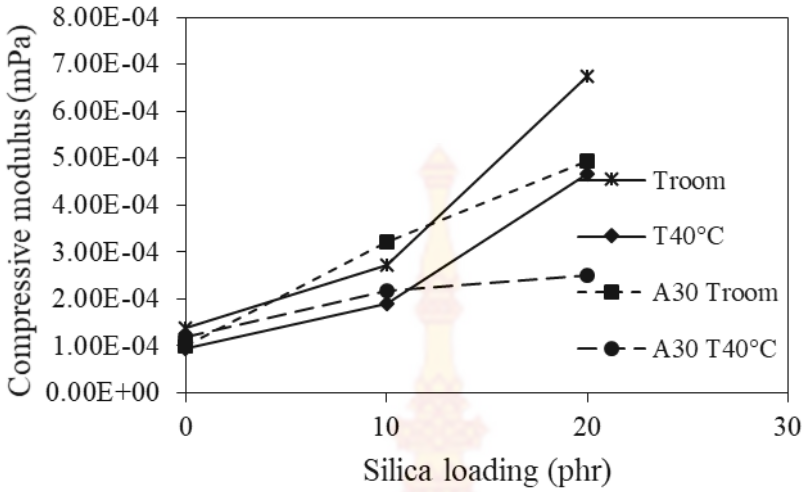


ภาพที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยืดจนขาดหลังบ่มเร่งของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ภาพที่ 3.16 และ 3.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดหลังการบ่มเร่ง พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมซิลิกาลงในยางฟองน้ำ ทำให้การเปลี่ยนแปลงของสมบัติทั้งความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง หรือยางสามารถทน
ต่อความร้อนได้มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสารตัวเติมทำให้ส่วนที่เป็นยางซึ่งไม่ทนต่อความร้อ 37
ปริมาณลดลง ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังบ่มเร่งลดลง

ตารางที่ 3.5 ค่ามอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Silica loading (phr)	Compressive modulus (mPa)			
	Troom	T40°C	A30 Troom	A30 T40°C
0	0.95×10^{-4}	0.88×10^{-4}	1.00×10^{-4}	1.18×10^{-4}
10	2.71×10^{-4}	1.89×10^{-4}	3.20×10^{-4}	2.16×10^{-4}
20	6.74×10^{-4}	4.66×10^{-4}	4.92×10^{-4}	2.49×10^{-4}

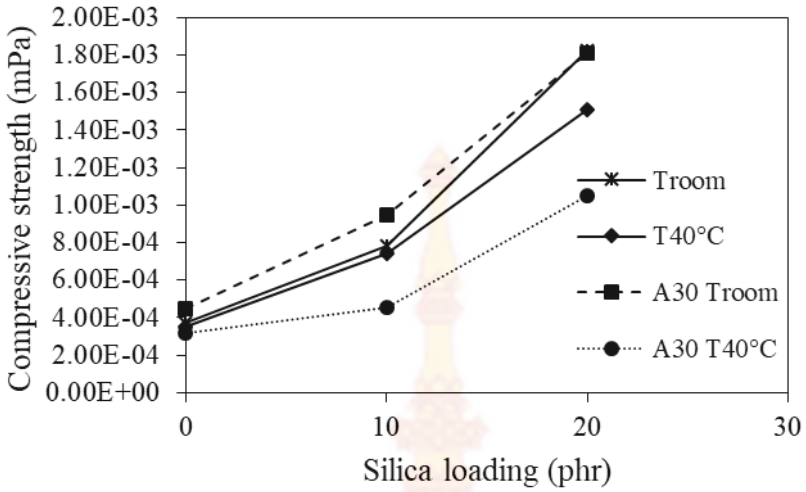


ภาพที่ 3.18 มอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 5 และ ภาพที่ 3.18 แสดงค่ามอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำ พบว่า มอดุลัสของยางฟองน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิการเป็นสารตัวเติมที่มีความเป็นขั้วสูง สามารถเกิดอันตรกิริยา ระหว่างอนุภาคของซิลิกากันเองได้ เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นคาดว่าปริมาณการรวมตัวกันของอนุภาคซิลิกาจะเกิดได้สูงขึ้น ส่งผลต่อค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับความต้านทานต่อแรงกดแสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 9 สามารถอธิบายด้วยเหตุผลเดียวกัน

ตารางที่ 3.6 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

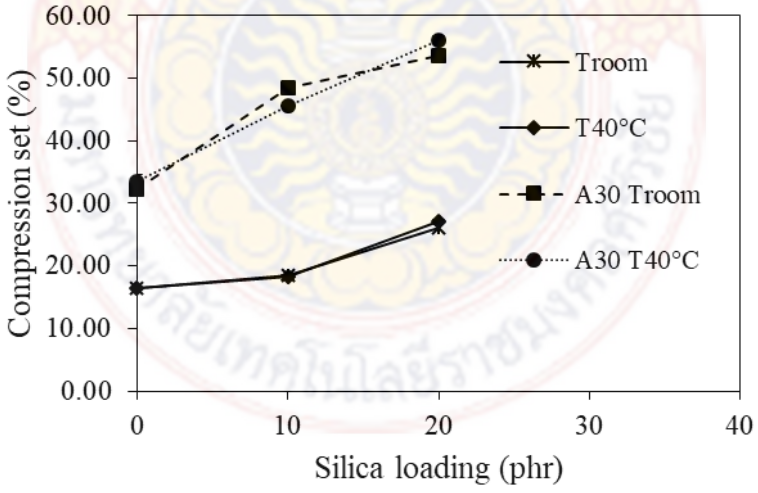
Silica loading (phr)	Compressive strength (mPa)			
	Troom	T40°C	A30 Troom	A30 T40°C
0	3.64×10^{-4}	3.55×10^{-4}	4.49×10^{-4}	3.16×10^{-4}
10	7.82×10^{-4}	7.43×10^{-4}	9.46×10^{-4}	4.55×10^{-4}
20	18.23×10^{-4}	15.06×10^{-4}	18.09×10^{-4}	10.50×10^{-4}



ภาพที่ 3.19 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 3.7 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Silica loading (phr)	Troom	T40°C	A30 Troom	A30 T40°C
0	16.45 ± 0.86	16.36 ± 0.25	32.25 ± 0.76	33.54 ± 0.99
10	18.56 ± 0.06	18.21 ± 0.36	48.52 ± 0.54	45.65 ± 0.12
20	26.12 ± 0.21	27.11 ± 0.32	53.68 ± 0.32	56.16 ± 0.54



ภาพที่ 3.20 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณซิลิกาแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

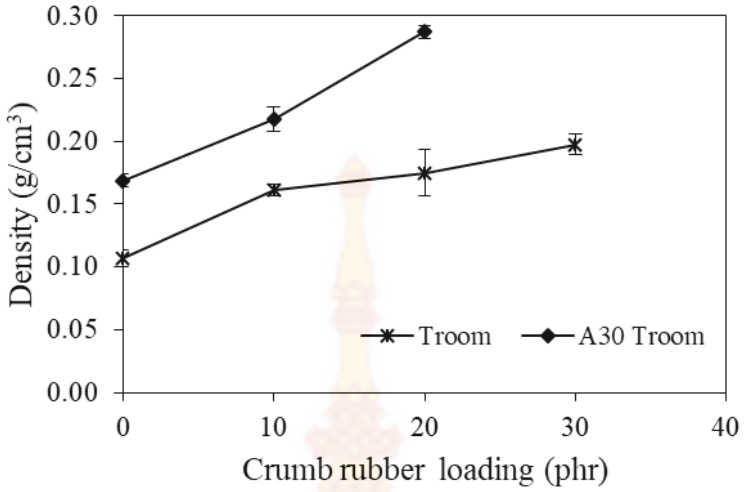
จากภาพที่ 3.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำ พบว่าการเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 0 ถึง 10 phr ทำให้การผิดรูปถาวรจากการกดมีค่าสูงขึ้น หรือกล่าวได้ว่า

เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มสูงขึ้นทำให้ยางฟองน้ำคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมได้น้อยลง เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณซิลิกาเป็นของแข็งลงในเนื้อยาง ทำให้ความยืดหยุ่นของยางลดลง เมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารทนไฟ พบว่า การใช้สารทนไฟร่วมกับซิลิกาทำให้ค่าการผิดรูปถาวรจากการกดมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณของสารทนไฟที่สูงถึง 30 phr จะไปลดสมบัติความยืดหยุ่นของยางฟองน้ำลงทำให้ยางผิดรูปสูงขึ้น ส่วนอุณหภูมิ และเวลาในการบ่มน้ำยางคอมปาวด์ให้ค่าการผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำใกล้เคียงกัน

3.1.2.2 ผลของปริมาณผงกากยางรถยนต์ต่อสมบัติยางฟองน้ำจากคอมปาวด์น้ำยาง

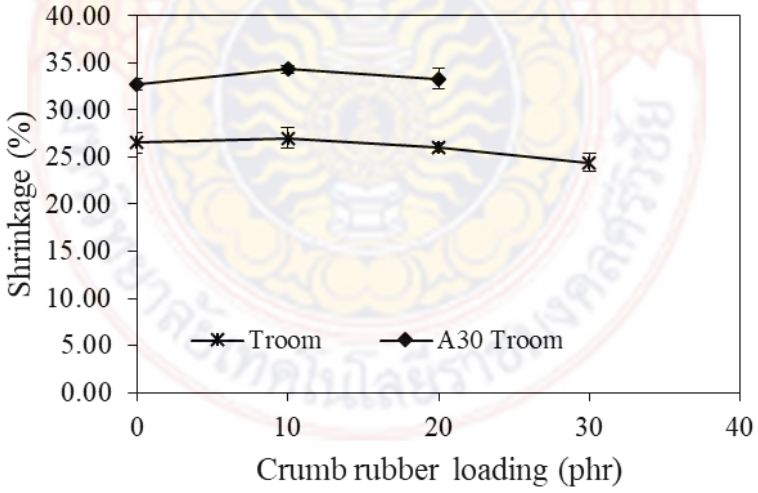
ตารางที่ 3.8 ค่าความหนาแน่น การหดตัว และการยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Properties CRM loading (phr)		Density (g/cm^3)	Shrinkage (%)	Depression (%)
CRM	0	0.1066 ± 0.0069	26.51 ± 1.10	10.44 ± 0.41
	10	0.1831 ± 0.0045	26.99 ± 1.09	10.16 ± 1.47
	20	0.2413 ± 0.0184	26.039 ± 0.45	10.22 ± 0.40
	30	0.2956 ± 0.0081	24.39 ± 0.96	7.99 ± 0.86
A30 CRM	0	0.1689 ± 0.0053	32.74 ± 0.59	13.42 ± 0.13
	10	0.2177 ± 0.0098	34.34 ± 0.42	14.81 ± 0.64
	20	0.2875 ± 0.0051	33.34 ± 1.07	14.37 ± 0.89
	30	-	-	-

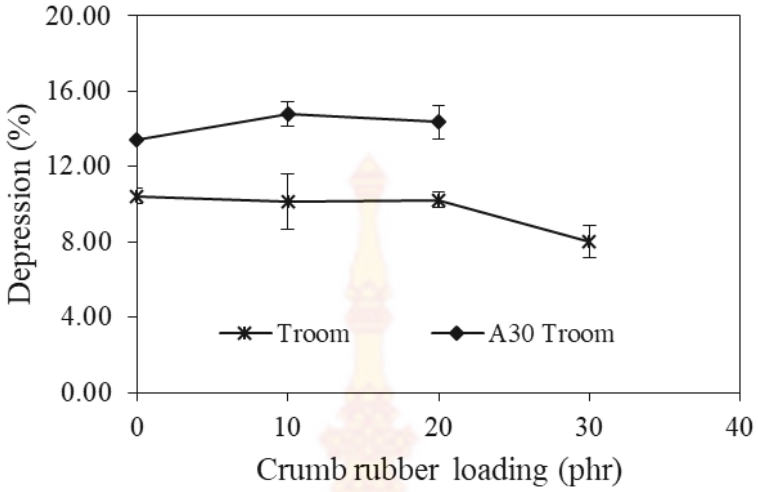


ภาพที่ 3.21 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

จากการทดลองความหนาแน่นของยางฟองน้ำ ที่ผสมผงกากยางรถยนต์จาก 0 ถึง 30 phr แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟชนิด Antimony trioxide เท่ากับ 30 phr แสดงกราฟเปรียบเทียบดังภาพที่ 3.21 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณผงกากยางรถยนต์จาก 0 ถึง 30 phr ทั้งแบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟส่งผลให้ความหนาแน่นของยางฟองน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มปริมาณผงกากยางรถยนต์ร่วมกับการใช้ Antimony trioxide จะให้ความหนาแน่นสูงกว่าแบบไม่ใช้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสารตัวเติม และสารทนไฟดังกล่าวเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับชิ้นงาน



ภาพที่ 3.22 การหดตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

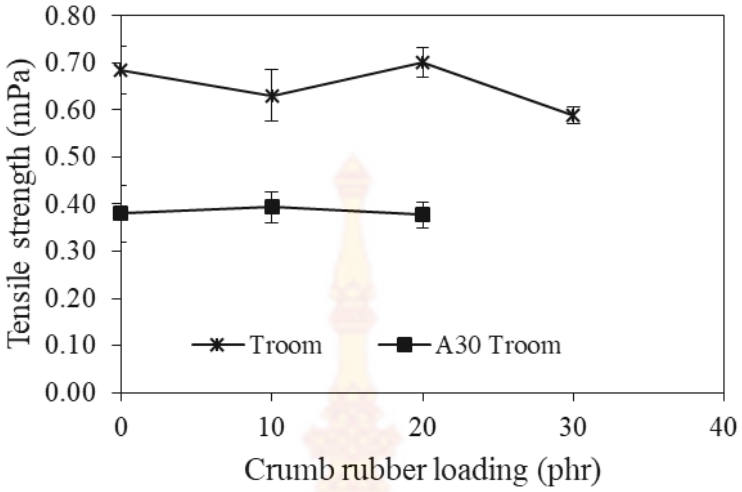


ภาพที่ 3.23 การยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

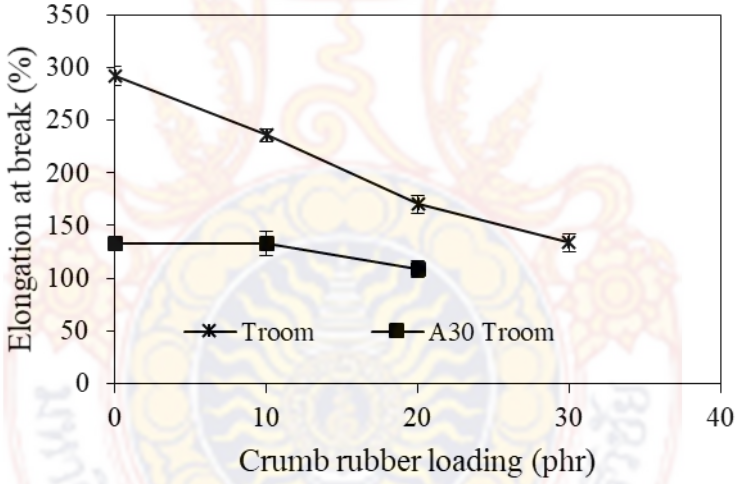
จากการทดลองการหดตัวของยางฟองน้ำที่ผสมซิลิกาจาก 0 ถึง 30 phr แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟชนิด Antimony trioxide เท่ากับ 30 phr แสดงดังภาพที่ 3.22 และการยุบตัวแสดงดังภาพที่ 3.23 พบว่า ปริมาณผงกากยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การหดตัวและยุบตัวมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก ผงกากยางรถยนต์สามารถเข้ากันได้ และกระจายตัวได้ดีในฟองยาง

ตารางที่ 3.9 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Properties		Tensile strength (mPa)		Elongation at break (%)		Change in properties (%)	
CRM loading (phr)		Unaged	Aged	Unaged	Aged	T.S.	E.B.
CRM	0	0.68 ± 0.05	0.50 ± 0.03	293 ± 9	173 ± 5	-26.90	-41.00
	10	0.63 ± 0.05	0.50 ± 0.01	236 ± 6	120 ± 8	-20.35	-49.15
	20	0.70 ± 0.03	0.36 ± 0.02	170 ± 9	90 ± 7	-48.31	-47.06
	30	0.59 ± 0.02	0.33 ± 0.01	134 ± 8	80 ± 0	-43.27	-40.30
A30 CRM	0	0.38 ± 0.06	0.34 ± 0.03	133 ± 4	115 ± 5	-10.41	-13.21
	10	0.39 ± 0.03	0.35 ± 0.05	133 ± 11	107 ± 5	-9.62	-19.50
	20	0.38 ± 0.03	0.32 ± 0.01	108 ± 8	78 ± 5	-16.07	-28.25



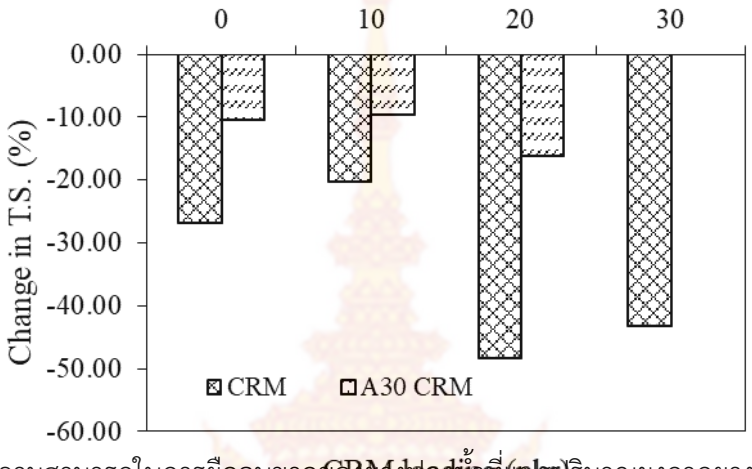
ภาพที่ 3.24 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



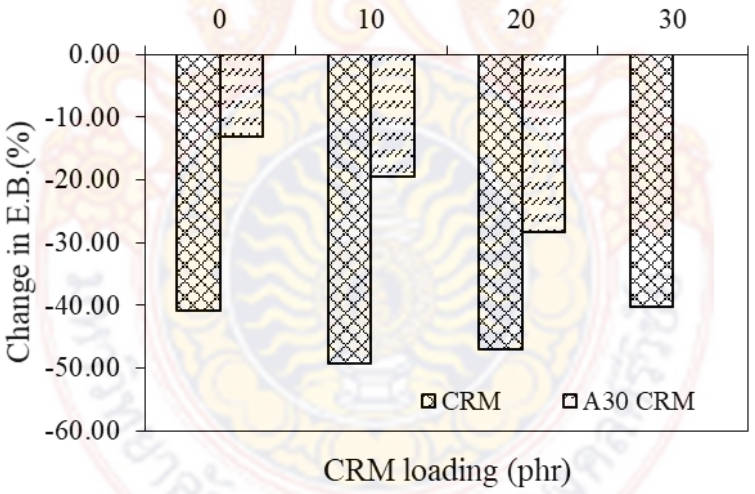
ภาพที่ 3.25 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบสารทนไฟ

ตารางที่ 3.9 สามารถแสดงกราฟเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงได้ดังภาพที่ 3.24 พบว่า การเพิ่มปริมาณผงกากยางรถยนต์ในยางฟองน้ำ มีแนวโน้มให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น และสูงสุดเมื่อใช้ผงกากยางรถยนต์เท่ากับ 20 phr เนื่องจาก การเพิ่มผงกากยางรถยนต์ลงในยางฟองน้ำการใช้ผงกากยางรถยนต์ในปริมาณน้อย ผงกากยางรถยนต์สามารถเข้ากันได้และกระจายตัวได้ดีในยางฟองน้ำ แต่เมื่อเพิ่มผงกากยางรถยนต์เกิน 20 phr ทำให้ผงกากยางรถยนต์เกิดการจับกลุ่มกันเป็นก้อนของอนุภาคผงกากยางรถยนต์ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารทนไฟ พบว่า ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงอย่างชัดเจน

สามารถอธิบายผลได้เช่นเดียวกับการใช้สารตัวเติมซิลิกา ภาพที่ 3.25 แสดงความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำพบว่า ความสามารถในการยืดจนขาดมีค่าลดลงตามปริมาณผงกากยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ผงกากยางรถยนต์เป็นยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์แล้วนำมาบดให้มีขนาดเล็กลง ดังนั้นผงกากยางรถยนต์จึงสามารถยืดได้น้อยกว่ายางฟองน้ำ



ภาพที่ 3.26 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

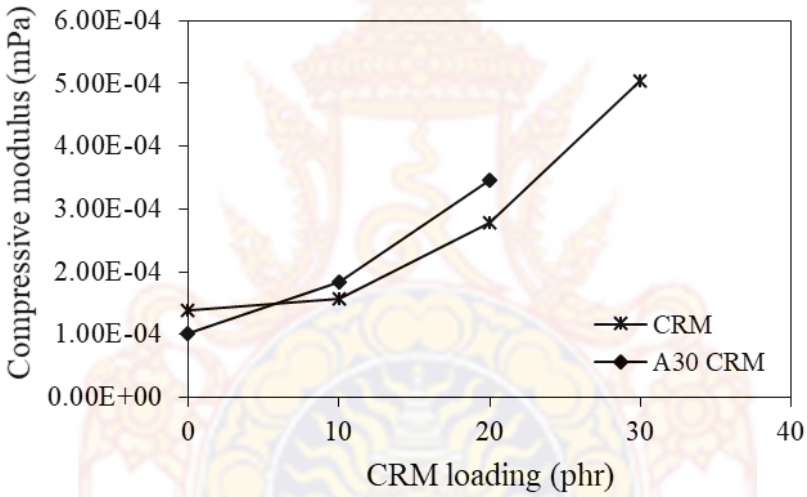


ภาพที่ 3.27 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

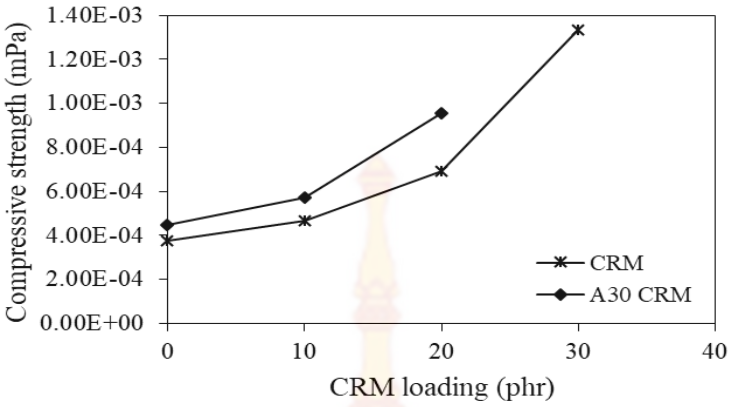
จากภาพที่ 3.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง พบว่า การใช้ผงกากยางรถยนต์ที่ 10 phr ทำให้ยางฟองน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้สารทนไฟ พบว่า การใช้สารทนไฟให้ค่าการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่าไม่ใช้ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงกากยางรถยนต์เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.10 ค่ามอดุลัสแบบกดและความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

CRM loading (phr)	Compressive Modulus (mPa)		Compressive strength (mPa)	
	CRM	A30 CRM	CRM	A30 CRM
0	0.95×10^{-4}	1.00×10^{-4}	3.64×10^{-4}	4.49×10^{-4}
10	1.57×10^{-4}	1.82×10^{-4}	4.65×10^{-4}	5.72×10^{-4}
20	2.77×10^{-4}	3.45×10^{-4}	6.90×10^{-4}	9.55×10^{-4}
30	5.04×10^{-4}	-	13.32×10^{-4}	-



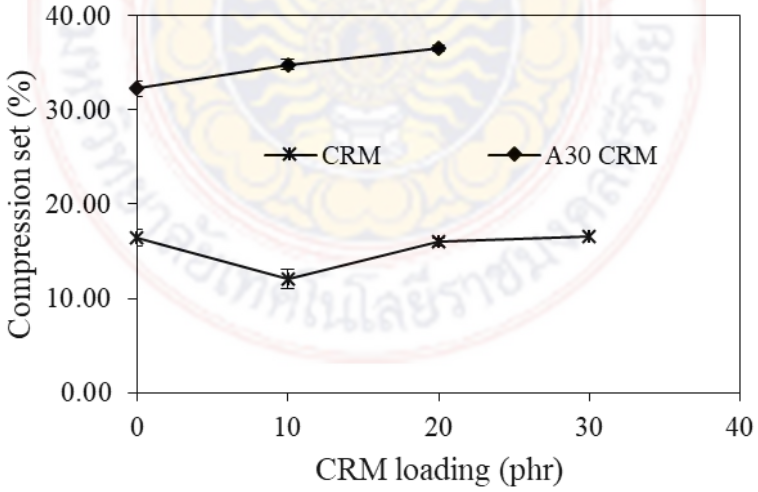
ภาพที่ 3.28 มอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



ภาพที่ 3.29 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 3.11 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

Crumb rubber loading (phr)	CRM	A30 CRM
0	16.45 ± 0.86	32.25 ± 0.76
10	12.08 ± 1.03	34.83 ± 0.55
20	15.98 ± 0.43	36.54 ± 0.32
30	16.62 ± 0.23	-



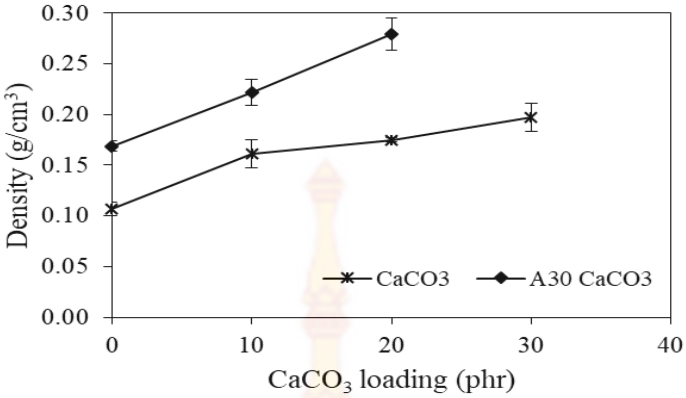
ภาพที่ 3.30 การยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณผงกากยางรถยนต์แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

จากภาพที่ 3.30 แสดงกราฟเปรียบเทียบการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางฟองน้ำ พบว่า การใช้ผงกากยางรถยนต์เท่ากับ 10 phr ให้การผิดรูปถาวรจากการกดต่ำสุด คาดว่าเกิดจากปริมาณผงกากยางรถยนต์ที่ 10 phr เกิดการกระจายตัวในยางฟองน้ำได้ดี และสามารถเสริมความแข็งแรงให้กับฟองยางได้ดีที่สุด เมื่อผงกากยางรถยนต์เพิ่มสูงขึ้น การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารทนไฟ พบว่า การใช้สารทนไฟร่วมกับผงกากยางรถยนต์ทำให้ค่าการผิดรูปถาวรจากการกดมีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณของสารทนไฟที่สูงถึง 30 phr จะไปลดสมบัติความยืดหยุ่นของยางฟองน้ำลงทำให้ยางผิดรูปสูงขึ้น

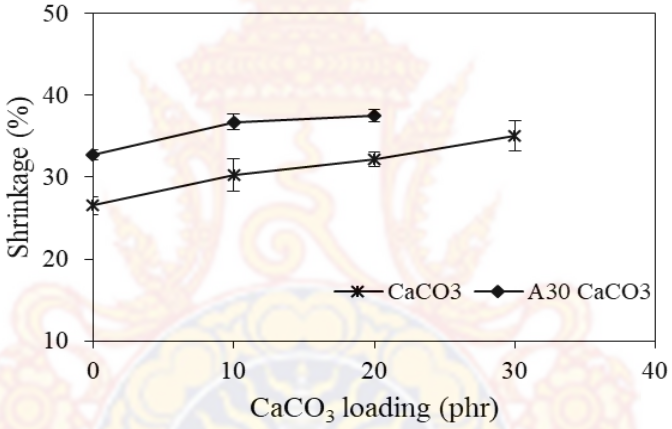
3.1.2.3 ผลของปริมาณแคลเซี่ยมคาร์บอเนตต่อสมบัติยางฟองน้ำจากคอมปาวด์น้ำยาง

ตารางที่ 3.12 ค่าความหนาแน่น การหดตัว และการยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

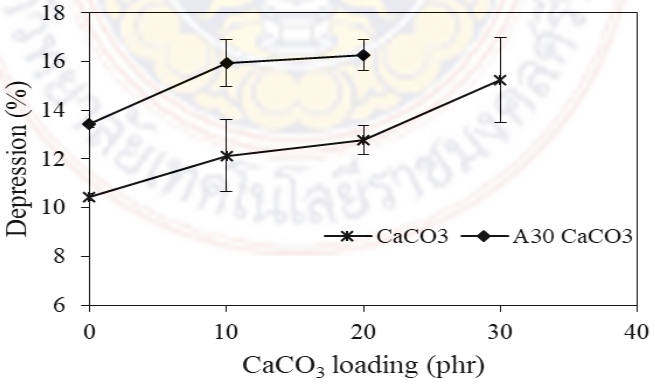
Properties	$CaCO_3$ loading (phr)	$CaCO_3$	A30 $CaCO_3$
Density (g/cm^3)	0	0.1066 ± 0.0069	0.1689 ± 0.0053
	10	0.1612 ± 0.0140	0.2217 ± 0.0125
	20	0.1748 ± 0.0020	0.2794 ± 0.0155
	30	0.1975 ± 0.0138	-
Shrinkage (%)	0	26.51 ± 1.10	32.74 ± 0.59
	10	30.31 ± 1.98	36.74 ± 0.98
	20	32.18 ± 0.88	37.54 ± 0.79
	30	35.08 ± 1.82	-
Depression (%)	0	10.44 ± 0.41	13.42 ± 0.13
	10	12.14 ± 1.48	15.94 ± 0.95
	20	12.78 ± 0.60	16.27 ± 0.63
	30	15.23 ± 1.74	-



ภาพที่ 3.31 ความหนาแน่นของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



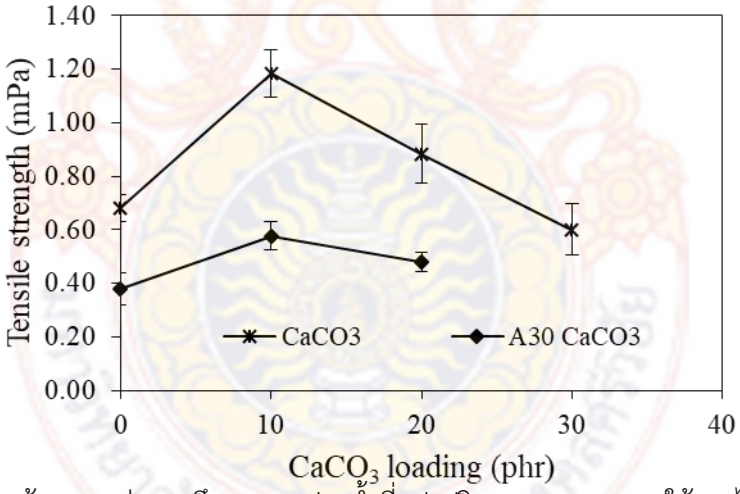
ภาพที่ 3.32 การหดตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



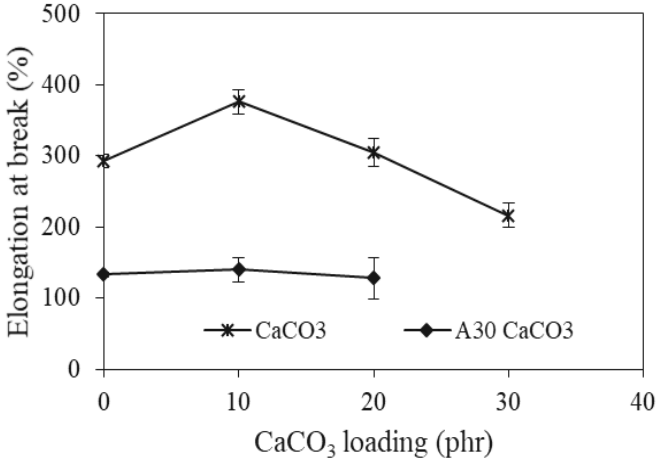
ภาพที่ 3.33 การยุบตัวของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 3.13 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

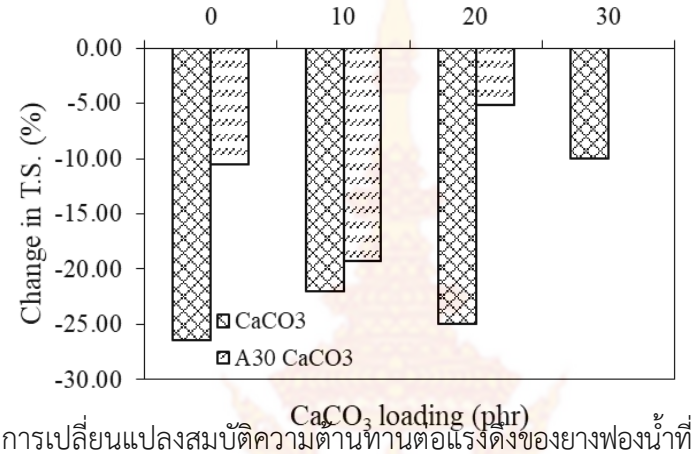
Properties $CaCO_3$ loading (phr)		Tensile strength (mPa)		Elongation at break (%)		Change in properties (%)	
		Unaged	Aged	Unaged	Aged	T.S.	E.B.
$CaCO_3$	0	0.68 ± 0.05	0.50 ± 0.03	293 ± 9	173 ± 5	-26.47	-40.96
	10	1.18 ± 0.08	0.92 ± 0.15	376 ± 17	194 ± 20	-22.03	-48.40
	20	0.88 ± 0.11	0.66 ± 0.03	304 ± 19	163 ± 16	-25.00	-46.38
	30	0.60 ± 0.09	0.54 ± 0.03	216 ± 8	128 ± 16	-10.00	-40.74
A30 $CaCO_3$	0	0.38 ± 0.06	0.34 ± 0.03	133 ± 4	115 ± 5	-10.53	-13.53
	10	0.57 ± 0.05	0.46 ± 0.02	140 ± 16	122 ± 4	-19.30	-12.86
	20	0.39 ± 0.03	0.37 ± 0.05	128 ± 29	80 ± 7	-5.41	-37.50



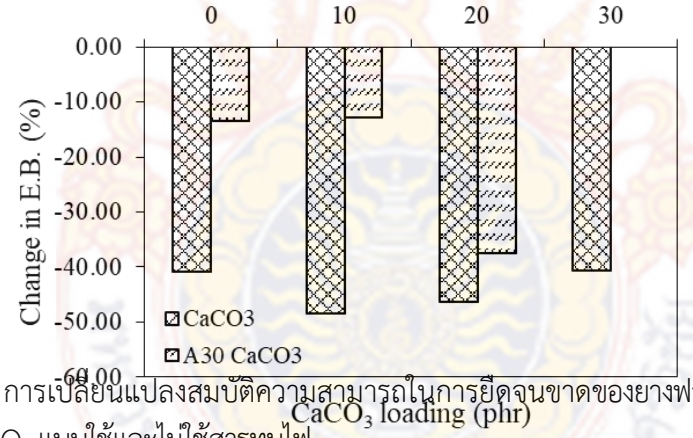
ภาพที่ 3.34 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สาร



ภาพที่ 3.35 ความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ



ภาพที่ 3.36 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

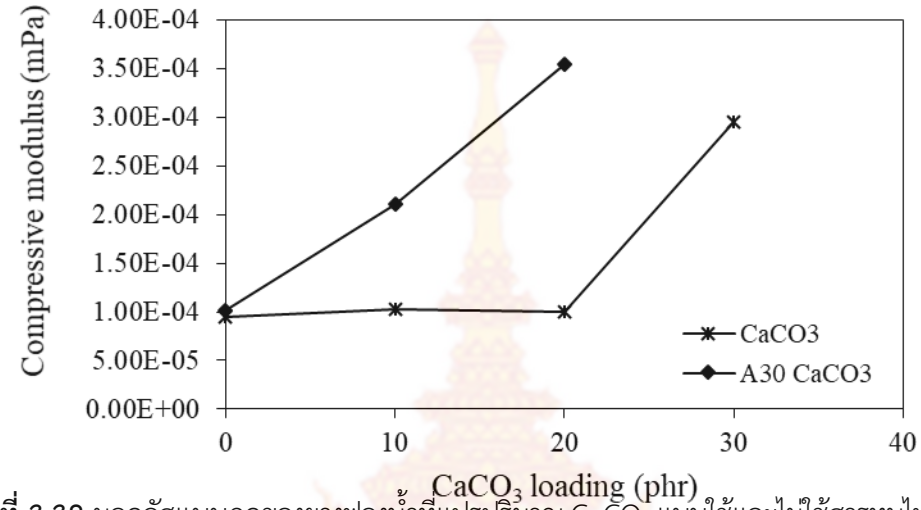


ภาพที่ 3.37 การเปลี่ยนแปลงสมบัติความสามารถในการยืดจนขาดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

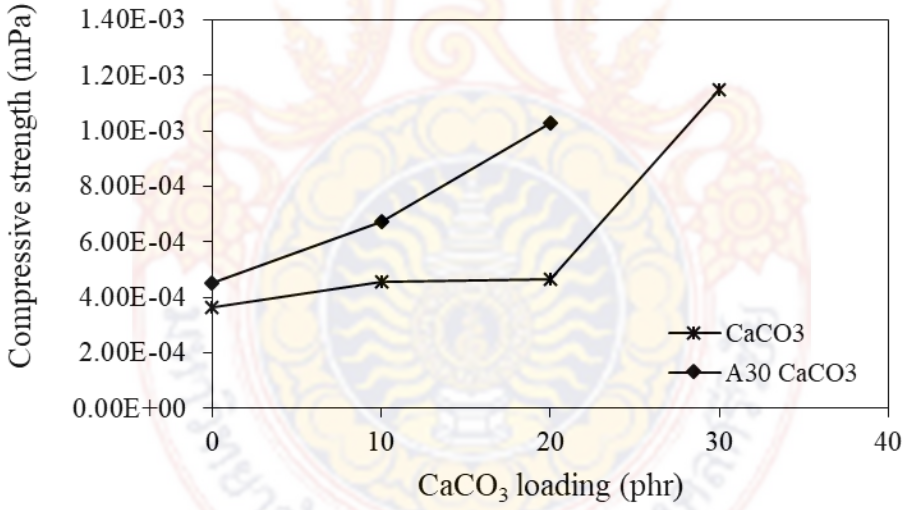
ตารางที่ 3.14 ค่ามอดุลัสแบบกดและความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

$CaCO_3$ loading (phr)	Compressive Modulus (mPa)		Compressive strength (mPa)	
	$CaCO_3$	A30 $CaCO_3$	$CaCO_3$	A30 $CaCO_3$
0	0.95×10^{-4}	1.00×10^{-4}	3.64×10^{-4}	4.49×10^{-4}
10	1.02×10^{-4}	2.11×10^{-4}	4.54×10^{-4}	6.74×10^{-4}
20	1.00×10^{-4}	3.54×10^{-4}	4.66×10^{-4}	10.30×10^{-4}

30	2.95×10^{-4}	-	11.49×10^{-4}	-



ภาพที่ 3.38 มอดุลัสแบบกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

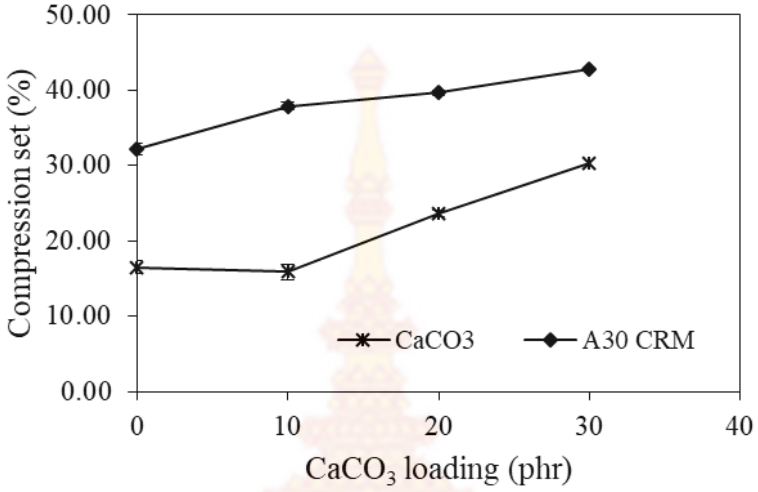


ภาพที่ 3.39 ความต้านทานต่อแรงกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

ตารางที่ 3.15 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ

$CaCO_3$ loading (phr)	$CaCO_3$	A30 $CaCO_3$
0	16.45 ± 0.86	32.25 ± 0.76
10	15.86 ± 0.05	37.87 ± 0.54
20	23.65 ± 0.26	39.64 ± 0.09

30	30.26 ± 0.43	-



ภาพที่ 3.40 การผิดรูปถาวรจากการกดของยางฟองน้ำที่แปรปริมาณ $CaCO_3$ แบบใช้และไม่ใช้สารทนไฟ