



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาเบาะรถจักรยานยนต์จากน้ำยางพาราผสมเส้นใยธรรมชาติ  
Development of Motorcycle Seat from Natural Rubber  
Latex Mixed with Natural Fiber

สุวัฒน์ รัตนพันธ์	Suwat Rattanapan
จุฑาทิพย์ อัจฉมภู	Jutatip Artchomphoo
เดี้ยว สายจันทร์	Diew Saijun

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ.2563

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย เป็นทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2563 เงินอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาและต่อยอดองค์ความรู้สู่การใช้ประโยชน์ ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ เครื่องมือสำหรับการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล และขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และนักศึกษาประจำสาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ทุกท่านที่ทำให้กำลังใจในการวิจัยครั้งนี้ และขอบคุณนางสาวอัสมี หมัดเจริณู และนายปิยะศักดิ์ ศรีส่ง นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของ การทดสอบสมบัติของยางพองน้ำ การเตรียมเส้นใยเปลือกหมากและอื่นๆ จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุวัฒน์ รัตนพันธ์

จุฑาทิพย์ อัจฉมณี

เดี๋ยว สายจันทร์



## การพัฒนาเบาะรถจักรยานยนต์จากน้ำยางพาราผสมเส้นใยธรรมชาติ

สุวัฒน์ รัตนพันธ์<sup>1</sup> จุฑาทิพย์ อัจฉมณี<sup>1</sup> และเตี๋ยว สายจันทร์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

การใช้งานผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำยืดหยุ่นในงานบางประเภทจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติ โดยมักใช้สารตัวเติมสังเคราะห์ วัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติและเศษยางรถยนต์เป็นวัสดุที่น่าสนใจ สำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติยางพองน้ำแทนการใช้สารสังเคราะห์ได้ งานวิจัยนี้ศึกษาผลการใช้ของเส้นใยเปลือกหมากและของผสมเส้นใยเปลือกหมาก (AHF) และ ยางครัมป์ (CRM) เป็นสารตัวเติมในยางพองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ (NRLF) โดยแปรสัดส่วน AHF/CRM ที่ 75/25, 50/50 และ 25/75 แต่ละสัดส่วนแปรปริมาณ 5, 10 และ 15 phr พบว่า AHF/CRM เสริมแรงและเพิ่มความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดให้ยางพองน้ำเมื่อ เทียบกับยางพองน้ำที่ไม่ใช้สารตัวเติม (NRLF) ความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกด ของยางพองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ AHF/CRM เพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้ม ลดลง ความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึงและแรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของ CRM มากกว่า AHF การใช้ AHF/CRM เพิ่มเปอร์เซ็นต์การผิดรูปถาวรหลังการกดเมื่อเทียบกับ NRLF ยาง พองน้ำที่เติม AHF และ CRM แสดงลักษณะเซลล์เปิดและเซลล์ปิด ตามลำดับ ค่าความเสถียรต่อความ ร้อนของยางพองน้ำที่เติมสารตัวเติมรวม AHF/CRM แสดงค่าความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่า NRLF และยางพองน้ำที่เติมสารตัวเติมเพียงชนิดเดียว

**คำสำคัญ:** เส้นใยเปลือกหมาก เส้นใยธรรมชาติ ยางครัมป์ ยางพองน้ำ ยางธรรมชาติ

<sup>1</sup> อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช

## Development Of Motorcycle Seat From Natural Rubber Latex Mixed With Natural Fiber

Suwat Rattanapan<sup>1</sup> Jutatip Artchomphoo<sup>1</sup> and Diew Saijun<sup>1</sup>

### Abstract

The use of flexible rubber foam in some applications requires a property improvement, usually using synthetic fillers. Natural waste material and scrap tire are interesting materials for using as a filler to decrease cost and improve the properties of rubber foam instead of using synthetic fillers. This research studied the effect of using areca husk fibers (AHF) and crumb rubber (CRM) as a filler in natural rubber latex foam with the proportion AHF/CRM ratios of 75/25, 50/50, and 25/75. The contents of each AHF/CRM ratios were varied, 5, 10, and 15 phr. It was found that AHF/CRM reinforced and increased density, tensile strength, and compressive stress of rubber foam when compared with the natural rubber latex foam without fillers (NRLF). The density, tensile strength, and compressive stress of the NRLF increased with an increase AHF/CRM content, but the elongation at the break tended to decrease. The density, tensile strength, compressive stress of the foam tended to increase when the CRM ratio was higher than AHF. Using of AHF/CRM increased the compression set when compared with NRLF. The rubber foam added AHF and CRM showed opened cell and closed cell morphology, respectively. The thermal stability of the rubber foam added co-filler of AHF/CRM was higher than NRLF and the rubber foam added only one filler.

**Keywords:** Areca Husk Fiber, Natural Fiber, Crumb Rubber, Natural Rubber, Natural Rubber Latex Foams

---

<sup>1</sup> Department of rubber and polymer technology, Faculty of science and technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thung Song, Nakhon Si Thammarat.

## สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อ .....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ช
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.2.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex).....	2
1.2.2 น้ำยางข้น (Concentrated Latex).....	4
1.2.3 ยางฟองน้ำ .....	6
1.2.4 เส้นใย (Fiber).....	11
1.2.5 ยางผงหรือยางครัมภ์ (Crumb rubber).....	13
1.2.6 สารตัวเติมในยางฟองน้ำ .....	15
1.2.7 เส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติ.....	15
1.2.8 วัสดุคอมโพสิต (composite materials).....	16
1.2.9 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง .....	18
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	21
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	21
บทที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	22
2.1 ยางและสารเคมี.....	22
2.2 อุปกรณ์ .....	23
2.3 วิธีการทดลอง.....	26
2.3.1 การเตรียมสารตัวเติมและสารเคมี.....	26
2.3.2 การบ่มน้ำยางคอมพาว์น.....	26
2.3.3 การศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยเปลือกหอกมาก .....	27
2.3.4 ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเปลือกหอกมากต่อสมบัติของยางฟองน้ำ .....	27
2.3.5 ศึกษาอิทธิพลของการใช้เส้นใยเปลือกหอกมากร่วมกับยางครัมภ์.....	27
2.3.6 ขึ้นรูปเบาะรถจักรยานยนต์โดยการใช้แม่พิมพ์และการทดลองใช้งานจริง.....	28

บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปรายผล/วิจารณ์ผล .....	30
3.1 ผลของการเตรียมเส้นใยเปลือกหมาก.....	30
3.2 ผลของขนาดเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ .....	31
3.3 ผลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ .....	35
3.4 ผลของการใช้เส้นใยเปลือกหมากเป็นสารตัวเติมร่วมกับยางครีမ် (AHF/CRM).....	43
3.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ .....	58
3.6 สมบัติทางความร้อนของยางพองน้ำ.....	61
3.7 เบาะรถจักรยานยนต์ต้นแบบ .....	63
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	64
4.1 ผลของขนาดเส้นใยเปลือกหมากที่ส่งผลต่อสมบัติยางพองน้ำ .....	64
4.2 ผลของปริมาณและการปรับสภาพผิวเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ.....	64
4.3 ผลจากการใช้เส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครีမ်ต่อสมบัติของยางพองน้ำ .....	65
บรรณานุกรม.....	66



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1	องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ .....	3
ตารางที่ 2	สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ.....	16
ตารางที่ 3	น้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางพองน้ำสำหรับการทดลอง .....	26
ตารางที่ 4	ลักษณะการเกิดฟองยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ขนาดและปริมาณต่างๆ .....	32
ตารางที่ 5	สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมาก ขนาด 0.5 ซม ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	33
ตารางที่ 6	สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมาก ขนาด 1.0 ซม ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	33
ตารางที่ 7	ลักษณะของฟองของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ขนาดและปริมาณต่าง ๆ .....	36
ตารางที่ 8	สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิว ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	37
ตารางที่ 9	สมบัติด้านการยุบตัวของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	40
ตารางที่ 10	สมบัติด้านการกดของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	41
ตารางที่ 11	ลักษณะการเกิดฟองของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 ซม.และ ยางครัมป์ ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วนต่างๆ.....	43
ตารางที่ 12	ลักษณะของการเกิดฟองของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ ขนาด 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วนต่างๆ .....	44
ตารางที่ 13	สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 0.5 ซม ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75.....	47
ตารางที่ 14	สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75 .....	48
ตารางที่ 15	สมบัติด้านการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 0.5 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75.....	48
ตารางที่ 16	สมบัติด้านการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75.....	49
ตารางที่ 17	สมบัติเชิงความร้อนของยางพองน้ำชนิด NRLF, ANRLF, CNRLF และ ACNRLF.....	62

## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1	โครงสร้างทางเคมีของน้ำยาธรรมชาติดี.....	2
ภาพที่ 2	ยางครีမ်บ์หรือยางผง.....	14
ภาพที่ 3	ลักษณะคอมโพสิตชนิดต่างๆ (a) fiber Composite (b) Particulate Composite .....	17
ภาพที่ 4	การจัดเรียงตัวแบบต่างๆ ของเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์ .....	17
ภาพที่ 5	เครื่องตีฟองยางในการผลิตยางฟองน้ำ .....	23
ภาพที่ 6	หม้อนึ่งไอน้ำ.....	23
ภาพที่ 7	ตู้อบลมร้อน .....	24
ภาพที่ 8	หม้ออบสารเคมี.....	24
ภาพที่ 9	เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง.....	24
ภาพที่ 10	เครื่องกวนสารเชิงกล.....	25
ภาพที่ 11	แบบพิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมยางฟองน้ำ.....	25
ภาพที่ 12	ความสามารถในการคืนรูปหลังกด.....	25
ภาพที่ 13	ภาพถ่ายลักษณะของเส้นใยเปลือกหอย ก่อน (ก) และ หลัง (ข) ปรับสภาพผิวด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	30
ภาพที่ 14	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวเส้นใยเปลือกหอย ก่อนและหลังปรับสภาพผิวด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	31
ภาพที่ 15	ลักษณะของฟองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหอยขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	32
ภาพที่ 16	ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางฟองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหอยขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	33
ภาพที่ 17	ผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางฟองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหอยขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr .....	34
ภาพที่ 18	ผลของความหนาแน่นของยางฟองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหอย ขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	35
ภาพที่ 19	ลักษณะของยางฟองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหอยที่ไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr.....	36
ภาพที่ 20	ลักษณะของยางฟองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหอยที่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr.....	37



ภาพที่ 21 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	38
ภาพที่ 22 ผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	38
ภาพที่ 23 ผลของความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	40
ภาพที่ 24 ผลของเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	41
ภาพที่ 25 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	42
ภาพที่ 26 ผลของสมบัติการผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr .....	42
ภาพที่ 27 ลักษณะยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 ซม. ที่ปริมาณและสัดส่วนระหว่างเส้นใย/ยางครีမ် ที่สัดส่วนต่างๆ .....	45
ภาพที่ 28 ลักษณะยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 ซม. ที่ปริมาณและสัดส่วนระหว่างเส้นใย/ยางครีမ် ที่สัดส่วนต่างๆ .....	46
ภาพที่ 29 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ်ที่เส้นใยขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25 .....	49
ภาพที่ 30 ผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ်ที่เส้นใยขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25.....	50
ภาพที่ 31 ความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 75/25) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	51
ภาพที่ 32 ความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 75/25) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	51
ภาพที่ 33 การผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 75/25) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	52
ภาพที่ 34 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	52
ภาพที่ 35 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	53

ภาพที่ 36 ความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	54
ภาพที่ 37 ความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	54
ภาพที่ 38 การผิตรูปลถวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	55
ภาพที่ 39 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	56
ภาพที่ 40 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	56
ภาพที่ 41 ความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	57
ภาพที่ 42 สมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	57
ภาพที่ 43 การผิตรูปลถวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr.....	58
ภาพที่ 44 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ (NRLF) ที่ไม่ใช้สารตัวเติม .	59
ภาพที่ 45 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้ AHF/CRM (50/50) ปริมาณ 10 phr (ACNRLF) เป็นสารตัวเติม .....	59
ภาพที่ 46 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้ยางครัมภ์ปริมาณ 10 phr (CNRLF) .....	60
ภาพที่ 47 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้สารตัวเติมเส้นใยเปลือกหมากปริมาณ 10 phr (ANRLF10).....	60
ภาพที่ 48 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้สารตัวเติมเส้นใยเปลือกหมากปริมาณ 25 phr (ANRLF25).....	61
ภาพที่ 49 สมบัติเชิงความร้อนของยางพองน้ำชนิด NRLF, ANRLF, CNRLF และ ACNRLF.....	63
ภาพที่ 50 เบาะรถจักรยานยนต์ต้นแบบที่มีเส้นใยเปลือกหมากเป็นสารตัวเติม.....	63

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

รถจักรยานยนต์นับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่มีการใช้งานในชีวิตประจำวันของประชากรทั้งโลก โดยเฉพาะชาวเอเชีย หรือประชาชนคนไทย ในปี พ.ศ.2561 มีผู้สนใจทำการศึกษาและรายงานว่า ความต้องการรถจักรยานยนต์ในประเทศไทยปี 2561-2563 มีแนวโน้มขยายตัวตามภาวะเศรษฐกิจที่เติบโตต่อเนื่อง และเป็นที่ทราบกันดีว่าฐานผลิตรถจักรยานยนต์ของโลกส่วนใหญ่อยู่ในภูมิภาคเอเชีย โดยไทยมีสถานะเป็นประเทศผู้ผลิตรถจักรยานยนต์อันดับ 5 ของโลกรองจากจีน อินเดีย อินโดนีเซีย และเวียดนาม ตามลำดับ ในปี 2557-2559 ตลาดรถจักรยานยนต์ซบเซาลงมียอดจำหน่ายทั่วประเทศเฉลี่ยปีละ 1.69 ล้านคัน ในปี 2560 การจำหน่ายรถจักรยานยนต์ในประเทศของไทยขยายตัวต่อเนื่อง ขณะที่การส่งออกเติบโตแรงขึ้นตามการขยายการส่งออก Big Bike หลังจากปี 2559 เป็นต้นมา การส่งออกรถจักรยานยนต์ของไทยมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น 2.8-3.5 แสนคัน/ปี (วรรณ, 2561)

เบาะรถจักรยานยนต์ (motorcycle seat) นับว่าเป็นอุปกรณ์หรือเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ที่ติดกับตัวรถจักรยานยนต์ รถจักรยานยนต์ทุกคันต้องใช้เบาะ เบาะจะให้ความนุ่ม สะดวกสบายในการขับขี่

ปริมาณการใช้เบาะรถจักรยานยนต์ในแต่ละปีมีมาก ซึ่งปริมาณการใช้จะมากแปรผันโดยตรงกับปริมาณรถจักรยานยนต์ที่ทำการผลิตเป็นสองเท่า เพราะมีการใช้ทั้งแบบที่ติดมากับรถตอนซื้อรถใหม่ และแบบที่มีการเปลี่ยนเมื่อของเก่าชำรุด แต่เป็นที่น่าเสียดายวัสดุที่ใช้สำหรับผลิตเบาะรถจักรยานยนต์นั้นส่วนใหญ่จะเป็นโฟมสังเคราะห์ที่ทำจากพอลิยูรีเทน และพอลิเอทิลีน นับว่าเป็นส่วนแบ่งทางการค้าที่สำคัญ หากประเทศไทยสามารถใช้วัสดุชนิดอื่นโดยเฉพาะวัสดุที่สามารถผลิตได้ในประเทศไม่ต้องนำเข้ามาผลิตเป็นโฟมเพื่อใช้เป็นเบาะรถจักรยานยนต์ได้ น่าจะลดค่าใช้จ่ายของประเทศ และสร้างรายได้เพิ่มให้กับประชาชนในประเทศได้

น้ำยางพาราเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญและเป็นพืชเศรษฐกิจลำดับต้นๆของประเทศ น้ำยางพาราสามารถนำมาพัฒนา และเตรียมเป็นยางฟอง (โฟม) ปัจจุบันสามารถนำยางฟองที่ได้จากน้ำยางพาราไปใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันได้หลากหลาย เช่น ที่นอน หมอนประเภทต่างๆ ตุ๊กตาของเล่น หุ่นจำลอง เป็นต้น แต่เป็นที่น่าแปลกใจว่าทำไมไม่นำยางฟองจากน้ำยางพารา มาใช้ผลิตเป็นเบาะรถจักรยานยนต์ซึ่งมีการใช้ต่อปีในปริมาณที่มาก ทางคณะผู้วิจัยสันนิษฐานว่าอาจเนื่องมาจากต้นทุนของยางฟองจากน้ำยางพาราอาจจะสูงกว่าเบาะที่มีการผลิตกันในปัจจุบัน และความนิ่มของยางฟองอาจจะมากเกินไปไม่เหมาะกับการใช้งานสำหรับเบาะรถจักรยานยนต์ ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นช่องทางในการพัฒนาเบาะรถจักรยานยนต์ โดยการผลิตจากยางฟองจากน้ำยางพารา และลดต้นทุนด้วยเส้นใยธรรมชาติ โดยเฉพาะเส้นใยธรรมชาติที่เป็นของเสียที่สามารถหาได้

ในท้องถิ่น เช่นเส้นใยจากเปลือกหมาก และเปลือกลูกตาลโตนด เพราะเส้นใยสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางพองจากน้ำยางพาราได้ และยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมที่อาจจะเกิดจากขยะจากเส้นใยดังกล่าว ลดมลภาวะควันซึ่งมาจากการเผาทำลายเส้นใยของชาวบ้าน แต่ถึงกระนั้นก็ตามการผสมเส้นใยธรรมชาติในยางพองให้ได้ผลและได้สมบัติที่ดีตลอดจนการแปรรูปต้องง่ายต่อการต่อยอดในเชิงพาณิชย์ ทางผู้วิจัยยังต้องทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมทั้งชนิดของเส้นใย ขนาดสารปรับสภาพผิวของเส้นใย เทคนิคการขึ้นรูป และอื่นๆ เพื่อให้ได้ยางเบาะจากน้ำยางพาราที่เหมาะสมและทดแทนเบาะที่มีขายในท้องตลาดได้

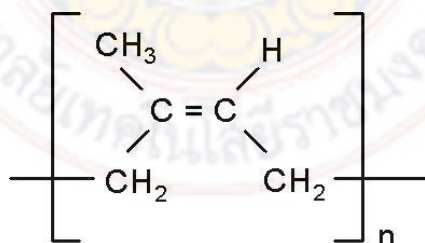
## 1.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)

น้ำยาง (latex) มาจากภาษาละติน หมายถึง ของเหลว (liquid) หรือของไหล (fluid) ในระยะเวลา 10 ปี ก่อนศตวรรษที่ 19 นักพฤกษศาสตร์ให้ความหมายของน้ำยางว่า เป็นน้ำจากเนื้อเยื่อของพืชที่มีลักษณะคล้ายน้ำมันสีขาว ต่อมากลางศตวรรษที่ 19 น้ำยางจึงเป็นคำที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมยาง ความหมายของน้ำยางทางด้านวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และเทคโนโลยีเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีการกระจายตัวแบบคอลลอยด์ในตัวกลางที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากต้นยางพารา *Hevea brasiliensis* จึงเป็นสารพอลิเมอร์ของอนุภาคยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกระจายตัวอยู่ในตัวกลาง (วิภาวี 2554)

#### โครงสร้างทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม ไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรเคมีคือ  $C_5H_8$  เรียกชื่อทางเคมีว่าไอโซพรีน (Isoprene) โดยโครงสร้าง 1 โมเลกุลประกอบด้วย หน่วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบ cis -1,4 -Polyisoprene แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของน้ำยางธรรมชาติ

ที่มา : วิภาวี (2554)

เนื่องจากแต่ละหน่วยไอโซพรีนของน้ำยางธรรมชาติมีพันธะคู่และหมู่แอลฟาเมทิลีนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถันและทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน

ทำให้น้ำยางเกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นจึงมีการออกแบบสูตรน้ำยางจำเป็นต้องเติมสารแอนติออกซิแดนซ์ น้ำยางจะมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6-7 ความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร ความหนืดไม่แน่นอน และมีค่าแรงตึงผิว 40.5 ดายนต์ต่อเซนติเมตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

**1. ส่วนเนื้อยาง (Rubber Phase)** เป็นส่วนของชั้นยางสีขาวที่อยู่ชั้นบนสุดคิดเป็น 30-36% โดยอนุภาคของยางธรรมชาติจะมีขนาด 0.05-3 ไมครอน อนุภาคส่วนมากมีลักษณะเป็นทรงกลมและพื้นผิวของอนุภาคยางจะถูกล้อมด้วยชั้นของโปรตีนและไขมันทำให้อนุภาคยางสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำยางได้อย่างเสถียร แต่หลังจากการกรีตไม่ถึงชั่วโมงแบคทีเรียและเอนไซม์จะทำปฏิกิริยากับชั้นของโปรตีนและไขมัน ถ้าไม่ได้เติมสารเคมีเพื่อยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียจะทำให้น้ำยางสูญเสียความเสถียร

**2. ส่วนชั้นน้ำหรือซีรัม (Serum Phase)** คิดเป็นปริมาณ 44-55% โดยในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยสารที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน โปรตีนบางชนิด คาร์โบไฮเดรต เอนไซม์ และไอออนของโลหะเป็นต้น

**3. ส่วนตกตะกอน (Bottom Phase)** เป็นส่วนที่อยู่ชั้นล่างสุดคิดเป็น 15-20% มีส่วนประกอบที่สำคัญในชั้นนี้ คือ อนุภาคลูทอยด์ (Lutoid Particte) ซึ่งเป็นของที่มีความหนืดมากมีรูปร่างเป็นทรงกลม โดยมีชั้นของเยื่อหุ้มปกคลุมอนุภาคอยู่ ซึ่งภายในอนุภาคลูทอยด์นั้นจะประกอบด้วยสารจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรด และเกลือต่างๆ

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

องค์ประกอบ	น้ำยางธรรมชาติ(%โดยน้ำหนัก)
ยางไฮโดรคาร์บอน	36.0
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4
นิวทรอลลิปิด	1.0
ไกลโคลิปิดและฟอสโฟลิปิด	0.6
คาร์โบไฮเดรต	1.6
สารอนินทรีย์	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

1. ยางประกอบด้วยคาร์บอนและไอโตรเจนล้วนๆ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่ไม่ทนน้ำมันปิโตรเลียม
2. พันธะคู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาทำให้สามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจนและโอโซน ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมของยางทำให้การออกแบบสูตรของยางจำเป็นต้องมีสารกันเสื่อม เช่น สารต้านการออกซิไดซ์ (Antioxidant)
3. สายโซ่ที่เคลื่อนไหวหึ่งงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติมีสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจจะใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) เท่ากับ -72 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์ ยกเว้น ยางบิวทาไดอีนและยางซิลิโคน
4. ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลทำให้ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ เมื่อยืดทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงสูงมากและทำให้ค่าความแข็งแรงของยางดิบและการยึดติดของยางดี
5. มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ยางมีความหนืดสูงเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรงจึงต้องนำยางไปบดเพื่อให้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปผสมกับสารเคมีอื่นๆ

### 1.2.2 น้ำยางข้น (Concentrated Latex)

น้ำยางธรรมชาติจากต้นยางพารามีส่วนประกอบหลัก คือ เนื้อยางแห้ง ซึ่งมีประมาณร้อยละ 30 ถึงร้อยละ 36 และส่วนที่เป็นของแข็งที่ไม่ใช่ยางประมาณร้อยละ 5 ส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำเพื่อความเหมาะสมในการขนส่งน้ำยางไปทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีการขนส่งเป็นระยะทางไกลๆ จึงมีการผลิตน้ำยางธรรมชาติเป็นน้ำยางข้น โดยใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงเพื่อแยกน้ำและสารอื่นๆ ที่ละลายอยู่ให้ออกไปบางส่วน น้ำยางที่ได้จะเรียกว่า น้ำยางเซนตริฟิวจ์ ซึ่งมีน้ำยางข้นกับหางน้ำยาง โดยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านวิธีการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 60 ซึ่งสูงกว่าน้ำสด ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายน้ำยางไม่เสียสภาพ

#### 1.2.2.1 การผลิตน้ำยางข้น มี 4 วิธี คือ

1. การระเหยน้ำ (Evaporation) วิธีนี้ต้องมีการเติมสารที่ทำให้น้ำยางคงตัว (Stabilizer) เช่น Potassium Soap ในถ้าน้ำยางแล้วให้ความร้อนรอบๆ ถังเมื่อน้ำระเหย น้ำยางข้นที่ได้จะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 75 โดยเป็นเนื้อยางแห้งร้อยละ 60 เป็น Caustic Potash ร้อยละ 1.5
2. การเกิดครีม (Creaming) วิธีนี้จะเติมสารทำให้เกิดครีม (Creaming Agent) เช่น Sodium Alginate สารที่ทำให้เกิดครีมเคลือบผิวของอนุภาคยางทำให้อนุภาคยางมีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยมาที่ผิว โดยน้ำยางข้นที่ได้จะมีความบริสุทธิ์และมีโปรตีนน้อยลง เมื่อผ่านวิธีการทำให้เกิดครีมหลายๆ ครั้ง

3. การปั่น (Centrifuging) วิธีนี้จะแยกส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อออกจากส่วนที่เป็นน้ำหรือซีรัม โดยใช้เครื่องปั่นแยก ซึ่งน้ำยางชั้นที่ได้จะมีปริมาณเนื้อเยื่อแห้งประมาณร้อยละ 60

4. การใช้กระแสไฟฟ้าแยก (Electro Decantation) วิธีนี้ใช้ไฟฟ้าเข้ามาช่วยแยกส่วนของเนื้อเยื่อจากส่วนของซีรัม โดยจุ่มขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วบวกลงในน้ำยางที่เติมสารช่วยให้ น้ำยางคงตัวเพื่อทำให้อนุภาคยาง ซึ่งมีประจุลบหุ้มอยู่ค่อยๆ เคลื่อนไปรวมที่ขั้วบวกและลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวของน้ำยาง (ถิราวุธ และคณะ 2557)

### 1.2.2.2 คุณสมบัติน้ำยางชั้น

ข้อกำหนดและการทดสอบสมบัติน้ำยางชั้น โดยทั่วไปจะอิงตามมาตรฐานการทดสอบขององค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) คือ ISO 2000-2004 และมาตรฐานอุตสาหกรรมคือ มอก. 980-2533 ซึ่งระบุสมบัติที่ต้องทดสอบและขีดจำกัดของน้ำยางที่ผลิตจากวิธีการปั่น โดยคุณสมบัติของน้ำยางชั้น คือ

1. ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางเป็นปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อทั้งหมดในน้ำยางรวมกับสารอื่นๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำยาง ซึ่งจะคงเหลือเป็นฟิล์มยาง โดยภายหลังจากการทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม

2. ปริมาณเนื้อเยื่อแห้งเป็นปริมาณของส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อทั้งหมดในน้ำยาง โดยได้จากการทำให้น้ำยางจับตัวด้วยกรดอะซิติกภายใต้การควบคุมสภาพการจับตัวที่แน่นอน จากการทดสอบได้ค่า TSC และ DRC เมื่อนำค่า DRC หักออกจากค่า TSC ก็ได้ค่าของสารอื่นๆ ที่เป็นของแข็งและไม่ใช่น้ำยาง

3. ปริมาณความเป็นต่างเป็นปริมาณความเป็นต่างที่อิสระทั้งหมดในน้ำยาง โดยจะแสดงเป็นปริมาณแอมโมเนียเพราะส่วนใหญ่จะรักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย

4. เวลาความคงตัวของเครื่องมือกลเป็นเวลาที่ยังบอกถึงความเสถียรของน้ำยางต่ออิทธิพลทางกล คือ การปั่นกวนน้ำยางภายใต้การควบคุม เมื่อน้ำยางเสียความคงตัวอนุภาคยางจะเริ่มเกาะหรือจับตัวกันเป็นเม็ด

5. จำนวนกรดไขมันระเหยเป็นปริมาณของกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของคาร์โบไฮเดรตในซีรัมของน้ำยาง ปริมาณของกรดไขมันระเหยในน้ำยางแสดงเป็นจำนวนกรดไขมันระเหย

6. ปริมาณทองแดงเป็นธาตุทองแดงที่อยู่ในส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง มีผลต่อความคงตัวของน้ำยาง เนื่องจากเป็นธาตุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในโมเลกุลยาง

7. ปริมาณแมงกานีสเป็นธาตุแมงกานีสที่อยู่ในส่วนที่ไม่ใช่น้ำยาง มีผลต่อความคงตัวของน้ำยาง

8. จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นจำนวนกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สมดุลพอดีกับอนุมูลของกรดทั้งหมดที่รวมกับแอมโมเนียในน้ำย้างที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 100 กรัม นั่นคือ จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

9. ปริมาณก้อนยางจับตัวเป็นปริมาณของสารที่ตกค้างอยู่บนตัวกรองที่ทำจากสแตนเลสที่มีขนาดความกว้างของช่อง 15 ถึง 180 ไมโครเมตร โดยสารเหล่านี้จะประกอบด้วยเศษยางที่จับตัวและสารอื่นๆ ที่เจือปนในน้ำย้าง

10. ปริมาณตามเป็นสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่ยางจะตกตะกอนลงก้นภาชนะ เมื่อมีการปั่นกวนน้ำย้าง สิ่งเจือปนดังกล่าว ประกอบด้วย สิ่งสกปรกพวกฝุ่นหรือทราย

11. สีและกลิ่นมาตรฐานการทดสอบน้ำย้างทั่วไป ซึ่งไม่กำหนดการทดสอบสีของน้ำย้างแต่จะตรวจดูด้วยสายตาที่เปรียบเทียบกับสีขาวของน้ำย้างคุณภาพ น้ำย้างชั้นที่ดีไม่ควรเป็นสีเทาหรือสีฟ้า ถ้าเป็นสีเหล่านี้แสดงว่า น้ำย้างชั้นนั้น มีสิ่งเจือปน (ถิราวุธ และ คณะ 2557)

### 1.2.3 ยางฟองน้ำ

ความสำคัญของยางฟองน้ำ ยางฟองน้ำ (latex foam) ที่ผลิตจากน้ำย้างธรรมชาติโดยตรงมีลักษณะเป็นรูพรุน ผิวหน้าระบายอากาศออกได้ สามารถกดหรือบิดได้โดยไม่เสียรูปทรง นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องใช้เพื่อรองรับการกระแทก กันการลื่น หรือเพื่อเพิ่มความนุ่ม เช่น ทำเป็นผลิตภัณฑ์ตามแบบของแม่พิมพ์ ได้แก่ เบาะรองนั่ง หมอนหนุน ที่รองนอน ทำเป็นแผ่นฟองน้ำ หรือทำเป็นฟองน้ำฉาบหลังของพวกสิ่งทอต่าง ๆ เป็นต้น วราภรณ์ (2537) กระบวนการผลิตยางฟองน้ำสามารถทำได้โดยนำน้ำย้างธรรมชาติมาผสมสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารทำให้ยางคงรูป สารตัวเร่ง สารกระตุ้น สารทำให้เกิดฟอง และสารตัวเติม เป็นต้น สารตัวเติมนิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ในการใช้สารตัวเติมต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเพราะถ้าใช้มากเกินไปอาจส่งผลเสียต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางฟองน้ำที่ได้

#### 1.2.3.1 วิธีการผลิตยางฟองน้ำ

การทำให้ยางธรรมชาติเกิดฟองของอากาศหรือแก๊สแล้วคงรูปหรือวัลคาไนซ์ฟองยางด้วยสารเคมีและความร้อน เทคโนโลยีการผลิตโฟมยางจากน้ำย้างธรรมชาติมีหลายวิธี ชินรัตน์ (2558) เสนอว่าวิธีที่นิยมสำหรับการผลิตยางฟองน้ำในอุตสาหกรรมมี 2 วิธี หลักๆ ได้แก่

**เทคโนโลยีการผลิตแบบต้นลอป** อาศัยหลักการตีน้ำย้างให้เกิดฟองอากาศและใช้สารก่อเจลอย่างช้าๆ (delayed-action gelling agent) ที่มีชื่อว่า sodium silicofluoride ในการทำให้ฟองเซ็ติดตัวก่อนนำไปอบวัลคาไนซ์ ซึ่งกระบวนการผลิตการจะเป็นแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปนี้



1. กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบกะ (Batch process) การทำยางพองน้ำแบบนี้จะใช้เครื่องตีฟองแบบเดียวกันกับแบบที่ใช้ทำขนมเค้ก ซึ่งประกอบด้วยอ่างหรือหม้อสำหรับใส่น้ำยางคอมปาวด์และตีฟองด้วยตะกร้อที่เคลื่อนที่แบบ epicyclic ขั้นตอนแรกของการทำยางพองน้ำแบบไม่ต่อเนื่องคือ การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์โดยการเติมสารช่วยในการเกิดฟองและสารอื่นๆ ยกเว้น สารซิงค์ออกไซด์และสารช่วยให้เกิดเจล หลังจากบ่มน้ำยางไว้ที่อุณหภูมิห้องไว้ ช่วงระยะหนึ่งแล้วจึงนำน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้มาตีฟองโดยจะตีด้วยความเร็วสูงในช่วงแรก ฟองน้ำ ยางจะค่อยๆ เพิ่มปริมาณจนได้ปริมาณฟองสูงสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารรักษาความเสถียรสารช่วยในการเกิดฟอง แอมโมเนีย ถ้ามีซิงค์ออกไซด์ในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดฟองช้าและปริมาณ สูงสุดของฟองน้ำยางก็จะน้อยกว่าหลังจากนั้นจึงย่อยฟองน้ำยางให้เล็กลงโดยการปรับความเร็วในการปั่นให้ช้าลงและการรักษาความเสถียรของฟองยางในขั้นตอนนี้ หลังจากได้ความละเอียดของฟองน้ำยางตามต้องการแล้วจึงใส่ซิงค์ออกไซด์และสารช่วยในการเจลตามลำดับ หรืออาจใส่ พร้อมๆกันก็ได้ โดยสารช่วยในการเจลอาจมีการเจือจางให้เหลือความเข้มข้นประมาณ 20% ก่อนใส่ ลงไป ทั้งนี้เพื่อการกระจายตัวของสาร เป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้นและควรปรับค่า pH ของฟองน้ำยางให้ เหลือ 6-7 ก่อนใส่ลงไป เมื่อใส่ซิงค์ออกไซด์และสารช่วยในการเจลเรียบร้อยแล้วแน่ใจว่าเข้ากันได้ ดีแล้ว ให้เทฟองน้ำยางลงในแบบพิมพ์ทันที โดยแบบพิมพ์นั้นอาจทาด้วยสารช่วยในการถอด (mold releasing agent) หรืออุ่นเบาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นฟองยางจะเจลภายใน เวลาประมาณ 5 นาที แล้วทิ้งฟองยางที่เจลแล้วไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 10 นาที ก่อนนำไปอบ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเจลอย่างสมบูรณ์หลังจากนั้นนำไปอบด้วยอากาศร้อนไอน้ำ หรือน้ำร้อน เพื่อให้ฟองยางเกิดการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นจึงนำไปล้าง อบแห้ง และตากแต่งต่อไป สารช่วย ในการถอดเป็นกลุ่มซิลิโคน สารละลายกรดไขมัน พอลิเอทิลีนไกลคอลชนิดน้ำหนักโมเลกุลปาน กลาง และโซเดียมคาร์บอกซีเซลลูโลส น้ำยางคอมปาวด์ก่อนที่จะนำมาตีฟองนั้นจะต้องบ่มและ กวนอย่างช้าๆ เป็นเวลา 1-3 วัน ที่อุณหภูมิ 20-35 องศาเซลเซียส โดยการบ่มน้ำยางคอมปาวด์ก่อน นำมาตีฟองนั้นจะช่วยให้สมบัติการทนต่อแรงดึงจนขาด ระยะยืดจนขาดดีขึ้น ลดการหดตัวของยางพองน้ำระหว่างกระบวนการเจลและวัลคาไนซ์

2. กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องนี้จะแตกต่างกับแบบไม่ต่อเนื่องตรงขั้นตอนของการตีฟอง โดยการผลิตแบบต่อเนื่องนี้จะใช้เครื่อง ตีฟองที่สามารถให้ฟองได้แบบต่อเนื่อง เครื่องตีฟองแบบต่อเนื่องที่นิยมกันทั่วไป คือ Oakes Mixer 6 โดยเครื่องประกอบด้วยห้องตีฟองรูปทรงกระบอก ภายในประกอบด้วยใบพัดที่สามารถปรับความเร็วได้ 100-400 รอบต่อนาที ทำหน้าที่ตีน้ำยางกับอากาศซึ่งมีท่อปล่อยเข้ามายังห้องตีฟองท่อน้ำ ยางและท่ออากาศจะแยกออกจากกันทำให้สามารถปรับความหนาแน่นของยางพองน้ำได้ ซึ่งน้ำยางจะถูกฉีดเข้าทางท่อก่อนเข้าหัวตีฟอง และสารช่วยในการเจลจะถูกฉีดเข้าทางผนังห้องผสม โดยใช้เข็มแบบ hypodermic ซึ่งหมายถึงปลายเข็มจมเข้าไปด้านใน อีกวิธีหนึ่งของการเติมซิงค์ออกไซด์และสาร

ช่วยในการเกิดเจล คือ การฉีดท่อของสารดังกล่าวตรงไปยังห้องผสม (blender) ซึ่งภายในทรงกระบอกมีใบพัดกวนโดยเป็นห้องที่ต่อมาจากหัวตีฟอง การเติมซิงค์ออกไซด์และสารช่วยในการเกิดเจลโดยวิธีนี้จะมีข้อดีกว่าวิธีแรกคือลดความถี่ในการทำความสะอาดของหัวตีฟองจากเทคนิคแบบต่อเนื่องนี้ทำให้สามารถควบคุมและแปรความหนาแน่นของยางฟองน้ำทำได้ง่ายกว่ายางฟองน้ำที่มีความสม่ำเสมอว่า เวลาในการแปรรูปรวดเร็วกว่าการสูญเสียน้อยกว่าและสามารถลดต้นทุนด้านแรงงานได้มากกว่า

### ข้อดี

1. โฟมยางมีความหนาแน่นตั้งแต่ต่ำไปจนถึงสูง
2. สามารถควบคุมความนิ่ม-แข็งของโฟมยางได้ด้วยการควบคุมระดับการตีฟอง ถ้าตีฟองให้ฟู เป็นเวลานานจะได้โฟมยางที่นิ่ม ความหนาแน่นต่ำ หากตีฟองเป็นเวลาสั้นๆ จะได้โฟมยางที่แข็ง มีความหนาแน่นสูง ถ้าโฟมยางมีความแข็งสูงก็จะมีความทนทานดี
3. ต้นทุนต่ำกว่าแบบทาลาเลย์
4. รอบของการผลิตผลิตภัณฑ์สั้นกว่า จึงผลิตได้เร็วกว่าแบบทาลาเลย์

### ข้อเสีย

1. ขนาดของรูพูนที่แตกต่างกันทำให้ระดับความนิ่มของโฟมยางไม่สม่ำเสมอตลอดความหนาของโฟมยาง กล่าวคือ ด้านล่างมักจะแข็งกว่าด้านบน
2. โฟมยางมีความหนาแน่นสูงทำให้แข็งและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น

**เทคโนโลยีการผลิตแบบทาลาเลย์** การผลิตโฟมยางธรรมชาติแบบทาลาเลย์พัฒนามาจากกระบวนการดันลอป โดยอาศัยหลักการดูดสุญญากาศให้เต็มแม่พิมพ์ ทำให้ฟองยางเซ็ดตัวที่อุณหภูมิต่ำและเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในฟองน้ำยาง ก่อนนำไปอบวัลคาไนซ์

### ขั้นตอนของเทคโนโลยีการผลิตแบบทาลาเลย์ ประกอบด้วย

1. ทำให้น้ำยางคอมปาวด์เกิดฟองแล้วเทใส่เบ้า
2. ปิดเบ้าด้วยระบบสุญญากาศเพื่อให้ฟองเกิดขยายตัวหรือไหลได้เต็มเบ้า
3. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิประมาณ -30 ก่อนที่จะใส่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปเพื่อทำให้โฟมยางเกิดเจลและคงรูป
4. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100-120 °C
5. จากนั้นจึงนำมาล้างและอบให้แห้ง
6. นำโฟมยางที่แห้งไปตัดตามขนาดที่ต้องการ

### ข้อดี

1. โฟมยางมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้มีความนิ่ม

2. ขนาดของรูพรุนมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชั้นโพลีเมอร์ ทำให้มีความนิ่มสม่ำเสมอตลอดชั้นและนิ่มกว่าโพลีเมอร์ที่ได้จากกระบวนการต้นลอป แม้ว่าจะมี ILD เท่ากัน

#### ข้อเสีย

1. ไม่สามารถทำให้โพลีเมอร์มีความหนาแน่นสูงได้แบบต้นลอป
2. ต้นทุนสูงกว่าแบบต้นลอป
3. สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าแบบต้นลอปประมาณ 5 เท่า (ทำให้เป็นสูญญากาศและการใช้อุณหภูมิต่ำ)
4. การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการทำให้พองแข็งตัวมีผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน
5. รอบของการผลิตผลิตภัณฑ์นานกว่าแบบต้นลอปประมาณ 4 เท่า

#### 1.2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมยางพองน้ำด้วยกระบวนการต้นลอป

##### 1. การปรับปริมาณแอมโมเนียในน้ำยาง

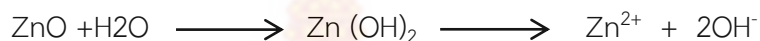
น้ำยางที่ใช้ในการทำยางพองน้ำโดยส่วนมากจะเป็นน้ำยางชั้น ซึ่งจะต้องมีการปรับปริมาณของแอมโมเนียให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตยางพองน้ำที่เลือกใช้ ซึ่งอาจใช้โดยการเติมฟอร์มมาดีไฮด์หรือไล่แอมโมเนียออกจากน้ำยาง โดยทั่วไปการไล่แอมโมเนียจากน้ำยาง ทำให้ได้การพองอากาศขึ้นไปทีผิวของน้ำยางพร้อมกับกวนน้ำยางอย่างช้าๆ เช่น ด้วยความเร็วประมาณ 50 รอบต่อนาที เป็นต้น จนกระทั่งปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางมีค่าประมาณ 0.12 – 0.22% ในทางปฏิบัติ ถ้าในกรณีที่ใช้กระบวนการตีพองแบบไม่ต่อเนื่อง จะควบคุมให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางประมาณ 0.22% ส่วนถ้าเลือกใช้กระบวนการตีพองอย่างต่อเนื่องจะควบคุมให้มีปริมาณแอมโมเนียในน้ำยางประมาณ 0.12%

**2. การเตรียมสารเคมี** เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ จึงต้องเตรียมให้สารเคมีนั้น อยู่ในรูปของสารแขวนลอย โดยใช้เทคนิคการบดสารเคมีและอาศัยแรงทางกลให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-5 ไมครอน ขณะเดียวกันจะใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เพื่อช่วยให้สารเคมีที่บดสามารถแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำได้อย่างเสถียร

**3. กระบวนการทำให้เกิดการเจลอย่างช้าๆ** กระบวนการทำให้เกิดการเจลอย่างช้าๆ มีความสำคัญต่อการเตรียมยางพองน้ำยางธรรมชาติอย่างมาก จัดเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้น้ำยางที่ผสมสารเคมีแล้ว เกิดการสูญเสียความเสถียรอย่างช้าๆ ระบบนี้จะใช้สารก่อเจล (Gelling agent) เป็นตัวที่ทำให้เกิดการเจลขึ้น ซึ่งสารก่อเจลที่สำคัญจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของฟลูออรีน (Fluoro complexes) ตัวที่นิยมที่ใช้มากคือ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ โดยจะเตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยในตัวกลางที่เป็นน้ำ ซึ่งมีค่า pH ของน้ำยางจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ เหลือประมาณ 7.5 เชื่อว่าระบบการทำงานของสารก่อเจลต่อพองน้ำ ไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นสาเหตุให้น้ำ

ยางผสมสารเคมี มีค่า pH ลดลงพร้อมๆกับการเกิดซิลิโคนไฮดรอกไซด์ (Silicon hydroxide,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) ซึ่งจะดูดสารพอกสปูจากอนุภาคของน้ำยาง ทำให้ฟองน้ำเกิดการสูญเสียความเสถียรหรือเจล โดยทั่วไป การเจลโดยสมบูรณ์ภายในระยะ 10-15 นาที การใส่โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์จะช่วยควบคุมเวลาในการเจล ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยในการจัดตัวของฟองยางให้มีการจับตัวแน่นขึ้นและสามารถยึดติดกันได้อย่างสมบูรณ์มากขึ้น

**4. ผลของการใช้ซิงออกไซด์** การใส่ซิงออกไซด์ลงในน้ำยาง ซิงออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ จึงเกิดเป็นซิงค์ไฮดรอกไซด์ (Zinc hydroxide,  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ) ซึ่งจะเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นซิงค์ไอออน ดังปฏิกิริยาดังนี้



ซิงค์คาร์บอกซิเลตที่ไม่ละลายน้ำ โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ร่วมกับการใส่ซิงค์ออกไซด์และโซเดียมโคฟลูออไรด์ร่วมกันจะทำให้เกิดการเจลในน้ำยางชั้นตึ่มากขึ้น โดยจะเกิดการตกตะกอนที่ผิวของอนุภาคยาง ซึ่งส่งผลให้ความเสถียรของน้ำยางลดลง การเกิดการเจลของยางฟองน้ำที่มีซิงค์ออกไซด์และผลรวมของโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์แตกตัวและการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์เอมีนจากซิงค์ออกไซด์ที่อยู่ในน้ำยาง สำหรับการแตกตัวของโซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ คือ เป็นการทำให้เกิดกรดไฮโดรฟลูออริกและเกิดกรดซิลิซิกที่ไปดูดสปูที่ผิวของอนุภาคยาง แต่สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์เอมีนจะไปรวมตัวกับสปูเกิดเป็น Insoluble zinc soap ขึ้น ซึ่งทั้งสองอย่างนี้ล้วนไปทำลายสปูซึ่งเป็นตัวที่ช่วยให้น้ำยางมีความเสถียร เมื่อสปูถูกทำลายไปเรื่อยๆ ความเสถียรของน้ำยางจะลดลงจนเกิดการเจลขึ้น

**5. ผลของการใช้กำมะถัน** ใส่กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซยาง โดยเมื่อใส่กำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อนจะเกิดการวัลคาไนซ์ ทำให้ได้สมบัติของยางดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหนียวและเมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น เนื่องจากกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุล (crosslink)

**6. สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน** โดยทั่วไปแล้วจะไม่ใช่สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชันในงานน้ำยาง ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพน้ำยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดี และพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาพน้ำยางที่ยังไม่ได้ผ่านการบด การเฉือนหรือทำให้สัมผัสกับอุณหภูมิสูงขณะกระบวนการผลิตอย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตมักจะใช้สารป้องกันการเสื่อมชนิด Wingstay L เป็นสารที่ใช้ในน้ำยางเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ

**7. ผลของสารตัวเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์** ZDEC (Zinc diethyl dithiocarbamate) เป็นสารตัวเร่งประเภทซิงค์ไดเอโอคาร์บาเมตสารเคมีในกลุ่มนี้เหมาะกับการใช้เป็น

สารตัวเร่งในการบ่ม (โดยใช้อากาศร้อนหรือไอน้ำ) เพราะเป็นตัวเร่งที่ทำให้เกิดการบ่มเร็วขึ้นสามารถคงรูปได้ดีและวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ 115-125 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาสั้น แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้อาจเกิดการ reversion ขึ้นได้ดังนั้นจึงไม่ควรเกิน 125 องศาเซลเซียส ZMBT (Zinc salt of 2-mercaptobenzothiazole) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไอโซซอล สารเคมีกลุ่มนี้สามารถบ่มได้ทุกแบบของการวัลคาไนซ์และสามารถกระตุ้นให้เกิดการบ่มเร็วขึ้นได้โดยการใช้สารเร่งที่เป็นต่าง หรือสารไดไฮโอคาร์บาเมตและไฮยูแรม แต่การกระตุ้นนี้มีผลให้ scorch time สั้นลงด้วยและใช้ร่วมกับ basic accelerator โดยสัดส่วนจำนวนโมลเท่ากันจะให้ผลสูงสุดและความเร็วในการบ่มเร็วกว่าที่จะใช้ตัวเดี่ยวๆ สารตัวเร่งที่เป็นต่างนิยมใช้เป็นสารกัวนินีน เช่น DPG เป็นต้น DPG (Diphenyl guanidine) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มกัวนินีนเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์ (cure) ช้าถ้าเป็นสารตัวเร่งเสริมจะมีการกระตุ้นสูงมากโดยเฉพาะการกระตุ้นพวกไอโซซอล ถ้าใช้สารเคมีในกลุ่มนี้เป็นสารตัวเร่งหลักจะไม่สามารถวัลคาไนซ์โดยใช้อากาศร้อนได้เพราะการจับตัวช้าเกินไป การทำงานของกัวนินีนต้องใช้ซิงค์ออกไซด์ เป็นตัวกระตุ้นแต่ไม่จำเป็นต้องใช้กรดไขมัน

**8. สารทำให้น้ำยางเกิดฟอง** แอมโมเนียโอเลอเตหรือสบู่โอเลอเต เป็นสารที่ใส่น้ำยางเพื่อทำให้น้ำยางเกิดฟองในขั้นตอนการขึ้นฟอง Chapman *et al.*(1930)

## 1.2.4 เส้นใย (Fiber)

### 1.2.4.1 ชนิดและประเภทของเส้นใย

เส้นใยมี 3 ประเภท ดังนี้

**1. เส้นใยจากธรรมชาติ** ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

- เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ป่าน ปอ ลิ้น ใยสับปะรด โยมะพร้าว ฝ้าย ฝู่น ศรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็น โพลีเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

- เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (wool) ไหม (silk) ผม (hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลงถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

- เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

**2. เส้นใยสังเคราะห์** เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 4 ประเภท

- เส้นใยพอลิเอสเทอร์ เช่น เทโทรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความยืดหยุ่นไม่  
เป็นอันตรายต่อผิวหนัง สำหรับตาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พวกพอลิเอสเทอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่ง  
เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

- เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด  
เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอม  
ในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก มีความแข็งมากกว่า  
พอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะ  
ไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสม  
โซดาหลาม (NaOH + Ca(OH)<sub>2</sub>) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า  
ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น

- เส้นใยอะคริลิก เช่น ออร์โซใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านนม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด  
หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรม เป็นต้น

- เซลลูโลสแอซีเตต เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับ  
กรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตต เช่น  
ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

**3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์** เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุง  
โครงสร้างให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิดเส้นใยกึ่ง  
สังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น  
วิสคอสเรยอง แอมเบอร์กเรยอง เป็นต้น

#### 1.2.4.2 เส้นใยเปลือกหมาก

**ต้นหมาก** มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชียเขตร้อน จัดเป็นไม้ยืนต้นจำพวกปาล์ม มีความสูง  
ของต้นประมาณ 10-15 เมตร ลำต้นตั้งตรง เป็นต้นเดี่ยวไม่แตกกิ่งก้าน ลักษณะของลำต้นเป็นรูป  
ทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 - 12 เซนติเมตร เปลือกลำต้นเป็นรอยขั้วรอบๆ ขึ้นไป  
ตลอดลำต้น ในระยะแรกจะเจริญเติบโตด้านกว้างและด้านสูง แต่หลังจากหยุดการเจริญเติบโตจะ  
เจริญเติบโตด้านความสูง ต้นหมากมีตายอดส่วนปลายสุดของลำต้น ถ้ายอดตายหมากจะตาย ตายอด  
จะเป็นที่เกิดของใบหลังจากใบร่วงหล่นจะทิ้งรอยติดของใบไว้ เรียกว่าข้อ ข้อของต้นหมากสามารถ  
คำนวณหาอายุหมากได้ 1 ปี โดยหมากจะมีใบหรือข้อเพิ่มขึ้น 5 ใบ หรือ 5 ข้อ ต้นหมากจะมีเนื้อเป็น  
เส้นยาวจับตัวกันแน่นบริเวณเปลือกนอกลึกเข้าไปประมาณ 2 เซนติเมตร แต่ส่วนกลางของลำต้นเป็น  
เส้นไม่อัดแน่น และมีเนื้อไม้อ่อนนุ่มคล้ายกับฟองน้ำ จึงทำให้ต้นหมากเหนียวและสามารถโยกเอนได้มาก  
ขยายพันธุ์ด้วยวิธีการเพาะเมล็ด เจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลสูงกว่า 700 เมตร

**ใบหมาก** ใบเป็นใบประกอบแบบขนนก ออกเรียงเวียนหนาแน่นที่ปลายยอด ก้านใบรวมยาวได้ประมาณ 130-200 เซนติเมตร ลักษณะของใบย่อยรูปใบหอก ปลายใบแหลม โคนใบเรียวแคบ ใบอ่อนมีรอยแยก ใบมีขนาดกว้างประมาณ 2.5-6 เซนติเมตรและยาวประมาณ 50-70 เซนติเมตร แผ่นใบเรียบหนา กาบ ใบหุ้มลำต้น

**ดอกหมาก (จั่นหมาก)** โดยจะออกตามซอกโคนก้านใบหรือกาบนอก ดอกออกรวมกันเป็นช่อขนาดใหญ่ประกอบไปด้วยโคนจั่นยึดติดอยู่ที่ข้อของลำต้น ก้านช่อดอกเป็นเส้นยาวแตกออกโดยรอบแกนกลาง มีกลีบหุ้มช่อขนาดใหญ่ยาวประมาณ 40 เซนติเมตร เป็นมันเงา มีใบประดับหุ้มอยู่ ดอกเป็นแบบแยกเพศอยู่บนต้นเดียวกัน กลีบดอกเป็นสีขาวแกมสีเหลืองมี 6 กลีบ เรียงเป็นชั้น 2 ชั้น สีเขียว ยาวประมาณ 5-6 มิลลิเมตร ดอกมีเกสรเพศผู้ 6 อัน มีเกสรเพศเมียเป็นเส้น 3 เส้นบาง ๆ แผลออก ดอกเพศผู้จะมีขนาดเล็กและอยู่ตรงส่วนปลายของก้านช่อดอก ส่วนดอกเพศเมียจะค่อนข้างใหญ่และอยู่ที่โคนก้านช่อดอก ดอกเพศผู้จะใช้เวลาประมาณ 21 วัน หลังจากนั้น 5 วัน ดอกเพศเมียจะเริ่มบาน

**ผลหมาก** ผลออกเป็นทะลาย ลักษณะของผลเป็นรูปทรงกลม รูปกลมรี รูปไข่ รูปไข่ปลายแหลม หรือเป็นรูปกระสวยขนาดเล็ก โดยเฉลี่ยแล้วผลที่รวมกันเป็นทะลาย ในหนึ่งทะลายจะมีผลอยู่ประมาณ 10-150 ผล ผิวผลเรียบ มีกลีบเลี้ยงติดเป็นขั้วผล ผลมีขนาดกว้างประมาณ 5 เซนติเมตร และยาวประมาณ 7 เซนติเมตร ผลดิบหรือผลสดเปลือกผลจะเป็นสีเขียวเข้ม เรียกว่า “หมากดิบ” ผลเมื่อแก่เปลือกผลจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองส้มทั้งผลหรือสีแดงแกมส้ม เรียกว่า “หมากสุก” หรือ “หมากสง” ผลประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ เปลือกชั้นนอก (ส่วนของเปลือกที่เป็นเยื่อบาง ๆ สีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียดเหนียว), เปลือกชั้นกลาง (เป็นเส้นใยหนามากมองเห็นชัด), เปลือกชั้นใน (เป็นเยื่อบาง ๆ ละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก), และส่วนของเมล็ดหรือเนื้อหมาก เมื่ออ่อนจะนิ่ม เนื้อส่วนผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล ส่วนเนื้อจะเป็นสีเหลืองอ่อน ๆ ถึงสีเหลืองเข้มอมแดง ภายในผลมีเมล็ดเดี่ยว มักออกผลในช่วงเดือนพฤษภาคม

### 1.2.5 ยางผงหรือยางครัมป์ (Crumb rubber)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำขยะยาง (เช่น ยางล้อเก่า เศษยางที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต) ไปผ่านกระบวนการบดโดยใช้เครื่องมือเชิงกลต่างๆ เช่น เครื่องแกรนูลเลเตอร์ (granulator) เครื่องพัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer) เครื่องบดกระแทก (hammer mill) เครื่องบดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ทั้งนี้การบดสามารถทำได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปการบดที่อุณหภูมิห้องจะเหมาะกับการผลิตยางผงที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ ยางผงที่ได้จะมีรูปร่างที่ไม่เป็นระเบียบและมีพื้นผิวขรุขระ หากต้องการยางผงที่มีขนาดอนุภาคเล็กลง จำเป็นต้องนำขยะยางไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลายๆรอบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ส่วนการบดที่อุณหภูมิต่ำนั้นเป็นวิธีการบดที่มีต้นทุนสูง เพราะต้องใช้ไนโตรเจนเหลวปริมาณมาก วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการใช้ผลิตยางผงที่มีอนุภาคขนาด

เล็กเท่านั้น ยางผงที่ได้จากการบดด้วยวิธีนี้ส่วนใหญ่จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ปัจจุบันได้มีการนำยางผงที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง นำไปใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในพลาสติก นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยางรีเคลมและยางเทอร์โมพลาสติก รวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา



ภาพที่ 2 ยางครัมป์หรือยางผง

การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมยาง ยางผงได้รับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมทั้งในอุตสาหกรรมยางล้อและในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แผ่นยางและบล็อกยางปูพื้น พรมปูพื้น ยางบังโคลน แผ่นยางรองใต้พรม แผ่นยางชั้นล่างของลู่วิ่งลานกรีฑาหรือ สนามเทนนิส ท่อยาง แผ่นปูพื้นสำหรับคอกปศุสัตว์ กระถางต้นไม้ ยางกันกระแทกท่าเรือ พื้นรองเท้า แผ่นฉนวนกันเสียง

**จุดประสงค์หลักการประยุกต์ใช้ยางผงดังกล่าวมี 3 ประการ คือ**

1. ลดต้นทุนการผลิต
2. ดัดแปรหรือปรับปรุงสมบัติเฉพาะบางประการของผลิตภัณฑ์
3. ลดมลพิษ โดยการนำเอาขยะยางกลับมาใช้ใหม่

เนื่องจากยางผงมีขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ แม้ว่าจะบดให้ละเอียดมากเพียงใดยางผงก็ยังคงมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตรซึ่งถือว่ามีความใหญ่มากเมื่อเทียบกับเขม่าดำและซิลิกา ซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ด้วยเหตุนี้ยางผงจึงเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง การเติมยางผงลงไปในยางจึงมักส่งผลให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลง ซึ่งการด้อยลงของสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดของยางผง ปริมาณยางผง และขนาดของอนุภาคยางผงที่เติมลงไป โดยทั่วไปแล้วการนำยางผงไปใช้เป็นสารตัวเติมจำเป็นต้องพิจารณา ยางผงที่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเติมจะต้องมีความเข้ากันได้กับยางที่นำไปใช้สูง เช่น ถ้ายางมีความเป็นขี้ผึ้ง ยางผงที่เลือกใช้ก็ควรเป็นยางผงชนิดที่มีความเป็นขี้ผึ้งหรือถ้ายางที่มีความเป็นขี้ผึ้งต่ำ ยางผงที่เลือกใช้ก็ควรเป็นชนิดที่มีความเป็นขี้ผึ้งต่ำตามไปด้วยเช่นกัน ถ้าจะให้ได้สมบัติที่ดีที่สุด ทั้งยางผงและยางที่นำยางผงไปผสมควรจะเป็นยางชนิดเดียวกัน ถ้าหากยางผงมี



ระดับความเป็นขั้วหรือมีระดับความเข้ากันได้แตกต่างจากยางที่นำไปผสมมาก แรงดึงดูหรือ อันตรกิริยาระหว่างยางผงและยางหลักก็จะมีค่าต่ำ ส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างรวดเร็ว

### 1.2.6 สารตัวเติมในยางฟองน้ำ

สารตัวเติมในยาง มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็ง ขนาดเล็กที่ถูกเติมลงไปในยางเพื่อวัตถุประสงค์หลายอย่าง เช่น เป็นสารเสริมแรงในยาง สารช่วยในกระบวนการผลิตและ ขึ้นรูปยาง รวมทั้งเป็นสารลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ ทั้งนี้เพราะสารตัวเติมส่วนใหญ่มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติ โดยทั่วไป สารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ สารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรง (ได้แก่ เขม่าดำ ซิลิกา และเส้นใยแก้ว) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กและสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับยางได้ดี ส่วนสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง (ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ และทัลคัม) จะเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีอันตรกิริยากับยางต่ำ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญทั้งที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงและไม่เสริมแรง ปุญญาณิช, (2555)

### 1.2.7 เส้นใยเสริมแรงจากธรรมชาติ

เส้นใยเสริมแรงเป็นสารอื่นที่ใส่ลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น และอาจช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิตได้ด้วย เส้นใยที่ใช้เสริมแรงในยางมีทั้งเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว พอลิเอไมด์ พอลิเอสเทอร์ และเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยมะพร้าว เส้นใยปาล์ม และซีลีเยอที่มีต้นทุนต่ำและมีวิธีการผลิตที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ปัจจุบันเส้นใยจากธรรมชาตินิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในยาง เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ Mohanty et al. (2005) ดังนี้

1. มีน้ำหนักเบา ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้น เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว
2. เป็นวัสดุที่สามารถทดแทนได้ผ่านกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานต่ำ
3. กระบวนการผลิตเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ
4. มีความต้านทานต่อไฟฟ้าสูง
5. ย่อยสลายทางชีวภาพได้
6. สามารถรีไซเคิลโดยใช้ความร้อนได้
7. มีสมบัติในการเป็นฉนวนความร้อนและดูดซับเสียงได้ดี

สมบัติของเส้นใย เส้นใยชนิดต่างๆ ที่นำมาเป็นวัสดุเสริมแรงในยางจะมีสมบัติเชิงกลที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยนั้น โดยทั่วไปพบว่าเส้นใยมีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10-50

mm ความหนาแน่นประมาณ 1.2-1.5 g/cm<sup>3</sup> โดยเส้นใยกาบมะพร้าวมีความสามารถในการยืดจนขาดสูงสุด 30 % เส้นใยแต่ละชนิดจะให้สมบัติที่แตกต่างกันแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใย	ช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความสามารถในการยืดขาด (%)	ความต้านทานต่อแรงดึง (MPa)	มอดูลัสของยัง (GPa)
ฝ้าย	12-38	1.5	7.0-8.0	287-597	5.5-12.6
ปอกระเจา	10-25	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
ผ้าลินิน	5-38	1.5	2.7-3.2	345-1034	27.6
กัญชา	10-51	1.4	1.6	690	35
ป่านศรนารายณ์	8-41	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
กาบมะพร้าว	-	1.2	30.0	175	4-6
ไม้ไผ่	-	0.8	-	391-1000	48-89
ไม้เนื้ออ่อน	-	1.5	-	1000	40
สับปะรด	-	-	1.6	413-1627	34.5-82.5
ปาล์มน้ำมัน	-	1.5	4-18	50-400	0.75-9
อะรามิต (ธรรมดา)	12	1.4	3.3-3.7	3000-3150	63-67
คาร์บอน (มาตรฐาน)	7-10	1.4	1.4-1.8	4000	230-240

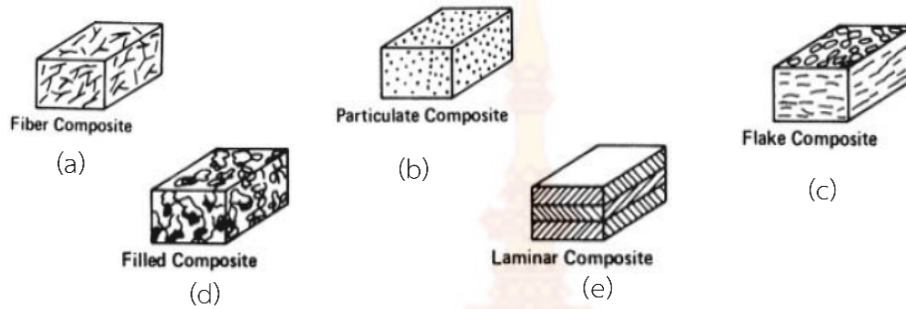
ที่มา : Mohanty *et al.* (2005)

### 1.2.8 วัสดุคอมโพสิต (composite materials)

วัสดุคอมโพสิต คือพอลิเมอร์เชิงประกอบ เป็นวัสดุที่มีหลายเฟสผลิตจากวัสดุที่มีองค์ประกอบ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีพอลิเมอร์ที่เรียกว่า เมทริกซ์เป็นเฟสต่อเนื่องผสมกับวัสดุเสริมแรงเพื่อนำไปใช้ผลิตวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลดี ซึ่งเหตุผลที่ทำให้มีการคิดใช้วัสดุคอมโพสิตเนื่องจาก พอลิเมอร์มีข้อจำกัดเรื่อง ค่าโมดูลัสที่ต่ำกว่าโลหะประมาณ 100 เท่า มีความแข็งแรงน้อยกว่า 5 เท่า ดังนั้นในการใช้งานในทางวิศวกรรม เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน รถยนต์ เรือเดินมหาสมุทร อุตสาหกรรมการผลิตยานอวกาศและอาวุธ การก่อสร้างอาคารสูง การขนส่ง และการใช้ในการผลิตเครื่องมือที่ทนต่อการกัดกร่อนสูง เพราะ วัสดุคอมโพสิตจะให้ความแข็งแรงสูงใกล้เคียงกับโลหะและมีน้ำหนักต่ำกว่าโลหะหลายเท่า

ลักษณะของคอมโพสิตชนิดต่างๆ สามารถจำแนกได้เป็น 5 แบบ คือ เส้นใยยาวกระจายตัวในเมทริกซ์ (Fiber composite) อนุภาคเส้นใยกระจายตัวในเมทริกซ์ (Particulate Composite)

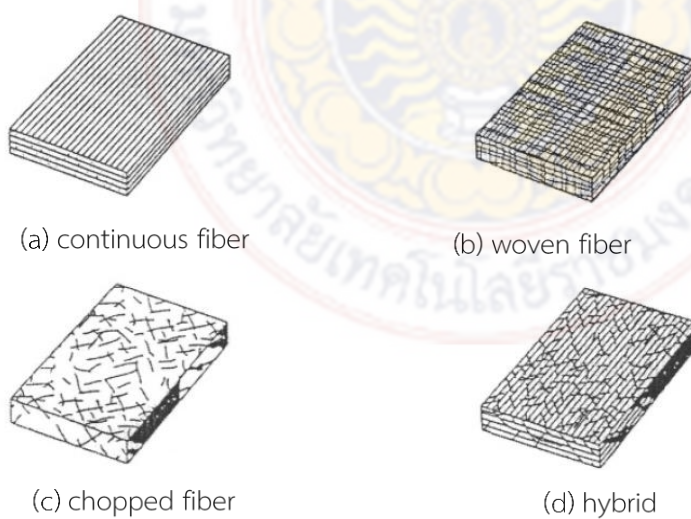
เส้นใยเป็นแผ่นที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความหนากระจายตัวในเมทริกซ์ (Flake composite) วัสดุที่แทรกอยู่ในเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยเกล็ดต่อเนื่อง (Filled composite) และวัสดุที่เป็นแผ่นเชื่อมต่อกันด้วยเมทริกซ์ (Laminar Composite) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 3 ลักษณะคอมโพสิตชนิดต่างๆ (a) fiber Composite (b) Particulate Composite (c) flake Composite (d) Filled Composite (e) laminar composite

ที่มา: Vinson and Sierakowski (2002)

วัสดุคอมโพสิตชนิดที่เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุเมทริกซ์จะมีโครงสร้างซึ่งแสดงทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย ได้เป็น 4 แบบ ซึ่งได้แก่ โครงสร้างเส้นใยแบบต่อเนื่อง (Continuous fiber composite) โครงสร้างเส้นใยแบบถัก (Woven fiber composite) โครงสร้างเส้นใยแบบสับขวาง (Chopped fiber composite) โครงสร้างเส้นใยแบบเชื่อมข้าม (Hybrid composite) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 4 การจัดเรียงตัวแบบต่างๆ ของเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์

ที่มา: Vinson and Sierakowski (2002)

### 1.2.9 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

การใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง มีเส้นใยหลายชนิดสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยมีการพัฒนามาในลักษณะหลายรูปแบบ ดังนี้

1. ซีลื้อจากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเคมีของซีลื้อจากไม้พบว่า ประกอบด้วยเส้นใยลิกนิน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแทสเซียม โซเดียมและแมกนีเซียม จากส่วนประกอบเหล่านี้เส้นใยเป็นส่วนที่สามารถเสริมความแข็งแรงของยาง หรือ พอลิเมอร์อื่นๆ เมื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ ขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมคอมโพสิตที่ศึกษาในประเทศมาเลเซียอยู่ในช่วง 0.5-1.0 มม. ซึ่งหลังจากผ่านการบดผสมเป็นวัสดุคอมโพสิตจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 450 ไมครอน (Sameni, et al., 2002) สำหรับในประเทศไทยขนาดอนุภาคที่ใช้ประมาณ 200-300 ไมครอน (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2548) ผงซีลื้อยนิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ เพื่อช่วยลดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเปราะลดลงและทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และที่สำคัญยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย แต่การใช้ผงไม้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์จะมีจุดด้อย คือ แรงยึดที่ต่ำระหว่างพอลิเมอร์และผงไม้ การขึ้นรูปทำได้ยาก ไม่สามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิการขึ้นรูปสูงกว่า 180°C ได้ (อรอุษา, 2546)

2. เส้นใยหญ้าแฝก ในปี พ.ศ. 2550 ได้มีการวิจัยฉนวนความร้อนจากเส้นใยหญ้าแฝกและน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นตัวประสาน พบว่าสภาวะการเตรียมเส้นใยหญ้าแฝกที่เหมาะสมคือ ที่ปริมาณความเข้มข้นของ NaOH 15% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 °C และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที โดยเส้นใยหญ้าแฝกที่มี aspect ratio เท่ากับ 58.48 เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบพันประสานระหว่างเส้นใยหญ้าแฝกและน้ำยางธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 3 ต่อ 1 ค่าการนำความร้อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับฉนวนความร้อนที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ (สมเจตน์ และคณะ, 2550)

นอกจากนี้วัสดุเหลือทิ้งในทางการเกษตรสามารถนำมาพัฒนาเป็นฉนวนกันความร้อนได้ จากการศึกษาของ อีรพงศ์ และคณะ (2559) ในเส้นใยชนิดต่างๆ คือ ฟางข้าว ชานอ้อย กาบมะพร้าว และปาล์มน้ำมัน และใช้น้ำยางธรรมชาติเป็นตัวประสาน พบว่าฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยปาล์มน้ำมัน เป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุด และเป็นไปได้อย่างยิ่งในการนำมาผลิตเป็นฉนวนทดแทนฉนวนที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรงของเส้นใยในยาง พบว่าการเสริมแรงของเส้นใยสั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ เส้นใยจะกระจายตัวอยู่ในยางทำให้เกิดการเสริมแรงขึ้น โดยเส้นใยจะเกิดการเสริมแรงในด้านของความแข็งแรงและความแข็งตึง (stiffness) เส้นใยสั้นจึงมักใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเทอร์โมไดนามิกส์ของยางในการใช้งานยาง หรือเพื่อลดต้นทุนให้ต่ำกว่าการใช้วัสดุเสริมแรงพวกผ้าใบ อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดของการใช้งานของเส้นใยในยาง ซึ่งจะแตกต่างกันตามการกระจายตัวของเส้นใยในยาง การแตกหักของเส้นใยในระหว่างกระบวนการผลิต รวมไปถึงพันธะระหว่างเส้นใยกับยาง การจะให้เกิดการเสริมแรงของเส้นใยในยางจึงจำเป็นต้องคำนึงถึง ทั้งสมบัติของเส้นใย สมบัติ

ของยาง และวิธีการผลิต การใช้เส้นใยในยางจะทำให้โมดูลัสของยางเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติอื่นๆ ขึ้นอยู่กับเส้นใยที่เติมลงไป ดังนี้

1. ปริมาณเส้นใย การเติมเส้นใยกาบมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันในปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 phr ลงไปในยางทำให้ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) มีค่าลดลงตามปริมาณเส้นใย เนื่องจากอาจส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายของยางอ่อนแอลง อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสที่ระยะยืด 300 เปอร์เซ็นต์ (300% modulus) ของคอมพอสิตยางมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ โดยคอมพอสิตยางที่ผสมเส้นใยทะเลลายปาล์มมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าเส้นใยกาบมะพร้าว ส่วนระยะยืดจนขาด (% Elongation at break) ของยางที่ผสมเส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเส้นใยในยาง เนื่องจากโมดูลัสหรือความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเป็นการลดความยืดหยุ่นของยาง ในส่วนของสมบัติความแข็ง (Hardness) พบว่า การผสมกาบมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันลงไปในยางส่งผลให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นผลมาจากความแข็งแกร่งของยางโดยรวม

2. ขนาดและรูปร่างของเส้นใย ขนาดอนุภาคที่ใช้เตรียมคอมพอสิตที่ศึกษาในประเทศไทยมาเลเซียอยู่ในช่วง 0.5-1.0 มม. ซึ่งหลังจากผ่านการบดผสมเป็นวัสดุคอมพอสิตจะมีขนาดอนุภาคประมาณ 450 ไมครอน (Sameni *et al.*, 2002) ในประเทศไทยขนาดอนุภาคที่ใช้ประมาณ 200-300 ไมครอน (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2548) นอกจากนี้การใช้ผงใยปาล์มในปริมาณ 15-50 phr พบว่ามีผลให้ความต้านทานต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดขาดลดลง แต่ 300% โมดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็ง เพิ่มขึ้นตามปริมาณผงใยปาล์มที่เพิ่มขึ้น โดยขนาดอนุภาค 75-180  $\mu\text{m}$ . มีผลในการเสริมแรงที่ดีที่สุด รองลงมาขนาด 180-270  $\mu\text{m}$ . และ 270-500  $\mu\text{m}$ . ตามลำดับ และการใช้ซิลิกา ร่วมกับผงใยปาล์มในปริมาณรวมกัน 50 phr พบว่าการเพิ่มสัดส่วนซิลิกามีผลทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความแข็ง และความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้น (Ismail *et al.*, 2002)

3. การจัดเรียงตัวของเส้นใย การจัดเรียงตัวของเส้นใยในลักษณะการเสริมแรงเป็นไปตามทิศทางการแปรรูป โดยเส้นใยจะไม่เกิดการถูกตัดหรือถูกฉีกจนโมเลกุลมากจึงทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติด้านไดนามิกส์ และสมบัติด้าน โมดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อเทียบกับการจัดการเรียงตัวของเส้นใยแบบไม่มีทิศทาง (Mohanty *et al.*, 2005)

4. การปรับปรุงผิวของเส้นใย เส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงผิวของเส้นใย เพื่อให้เส้นใยมีโครงสร้างผิวที่สามารถยึดติดกับยางได้ง่ายขึ้น (Mohanty *et al.*, 2005) โดยเฉพาะการใช้สารละลายไฮดรอกไซด์ปรับสภาพผิว ในปี 2007 มีผู้สนใจใช้สารละลายไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5% ปรับสภาพผิวป่านครนารายณ์ ที่เวลาตั้งแต่ 2-72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (Li *et al.*, 2007) และ มีการนำเส้นใยกาบมะพร้าวและทะเลลายปาล์มมาต้มในสารละลายไฮดรอกไซด์ที่ความ

เข้มข้น 25% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (รัตน และคณะ 2553) พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะช่วยให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 17% โดยน้ำหนัก ที่ปรับปรุงผิวโดยวิธีต่างๆ พบว่า การปรับปรุงด้วยต่างที่ 2, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก ที่ 2% จะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมากที่สุด ที่ 5% ให้สมบัติความต้านทานการหักงอ และการทนต่อแรงกระแทกมากที่สุด ส่วนการปรับปรุงผิวด้วยการฟอกสีพบว่า การฟอกสีที่อุณหภูมิ 65 °C จะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อการหักงอ และการทนต่อแรงกระแทกสูงที่สุดและการกราฟต์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 5% จะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อการหักงอ และการทนต่อแรงกระแทกดีที่สุดในที่สุด

ตรีญญา และ อรุณศรี (2556) สนใจศึกษาอิทธิพลของรำสกัดน้ำมันต่อสมบัติของฟองน้ำยางธรรมชาติ โดยใช้รำสกัดน้ำมันที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมช แปรปริมาณดังนี้ 0, 10, 20, 30 และ 40 phr จากการทดลองพบว่าปริมาณรำสกัดน้ำมันที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติได้คือไม่เกิน 30 phr เมื่อเพิ่มปริมาณรำสกัดน้ำมันส่งผลให้การตีฟองยากขึ้น เวลาในการเจล ค่าความหนาแน่น แรงกดที่ทำให้ฟองน้ำยุบตัว และค่าการยุบตัวจากแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ฟองน้ำยางธรรมชาติที่ผสมรำสกัดน้ำมัน 10 phr มีสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 173-2519 สามารถจัดชั้นได้เทียบเท่ากับชั้น RU 20 โดยมีแรงกดที่ทำให้ความหนาแน่นลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 2.08 kPa และมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดเท่ากับ 9.20 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้พบว่าการใช้รำสกัดน้ำมันที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 เมช ปริมาณ 10 phr เป็นสารตัวเติมทำให้ต้นทุนยางผสมสารเคมีลดลงประมาณ 14 บาทต่อกิโลกรัม

ในปี พ.ศ.2561 มีผู้ศึกษาสูตรยางและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติเพื่อผลิตสื่อการสอนสำหรับเด็ก โดยการนำยางคอมพาวด์มาทำการบ่มเป็นระยะเวลา 32 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้น กวนอย่างช้า ๆ ด้วยเครื่องตีขนมเค้ก (ในเวลาเดียวกันได้เติมสาร DPG, ZMBT, ZDEC, Sulphur, SFF ตามลำดับ) เทฟองน้ำที่ได้ลงในเบ้ารอจนเกิดการเจลภายใต้อุณหภูมิห้อง และนำไปอบในตู้อบลมร้อน จนได้ฟองน้ำที่สุกสมบูรณ์ และได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของฟองน้ำสูตรที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตและเคลย์เป็นสารตัวเติม โดยวิธีการแบบต้นลอป ที่ปริมาณ 0, 15 และ 30 phr ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในการเตรียมฟองน้ำจากยางธรรมชาติดีกว่าการใช้สารตัวเติมเคลย์ เนื่องจากสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตให้ฟองน้ำที่มีคุณสมบัติดี ผิวเรียบเกิดการเจลได้เร็ว และฟองน้ำไม่เกิดการหดตัว ดังนั้น แคลเซียมคาร์บอเนตจึงเป็นสารตัวเติมที่ลดต้นทุนในการผลิตโดยแปรปริมาณในระดับ 50, 100 และ 150 phr พบว่าสามารถผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณสูง 100 phr โดยฟองน้ำยังมีคุณสมบัติเด่น และสามารถนำไปแปรรูปเป็นสื่อการสอนได้ (กุชชานา, 2561)

ในปี 2018 Rattanapan *et al.* (2018) ได้ทำการเตรียมยางพองน้ำจากน้ำยางพาราโดยใช้ยางครัมป์เป็นสารตัวเติม ศึกษาขนาดและปริมาณของยางครัมป์ที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำ พบว่าการใช้ยางครัมป์ขนาดที่เล็กจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางพองน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และยังพบอีกว่าการใช้สารตัวเติมลดต้นทุนร่วมกับยางครัมป์ผสมในยางพองน้ำจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำลดลง และยางพองน้ำที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นแบบเซลเปิด

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเส้นใยธรรมชาติที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและสมบัติของยางพองน้ำเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเบาะรถจักรยานยนต์
2. ศึกษาผลของสารปรับสภาพผิวของเส้นใยธรรมชาติต่อการขึ้นรูปและสมบัติของยางพองน้ำเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเบาะรถจักรยานยนต์
3. ศึกษาผลของการใช้เส้นใยธรรมชาติร่วมกับสารตัวเติมยางครัมป์ต่อการขึ้นรูปและสมบัติของยางพองน้ำเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเบาะรถจักรยานยนต์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1. ด้านวิชาการ:

- องค์ความรู้ใช้พัฒนาการเรียนการสอน การทำโครงการของนักศึกษา และเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบความวิจัยในวารสารวิชาการ ทั้งในประเทศ และต่างประเทศ
- ได้สถานะ และเทคนิคการขึ้นรูปยางพองน้ำที่ใช้ เส้นใยเปลือกหมากเป็นสารตัวเติม เพื่อเตรียมเป็นเบาะรถจักรยานยนต์จากน้ำยางพารา ตลอดจนการพัฒนางานวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

**2. ด้านนโยบาย:** ลดการนำเข้าสารสำหรับเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนจากต่างประเทศ ลดปริมาณขยะ แก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ลดปริมาณการใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

**3. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์:** เป็นแนวทางในการทำผลิตภัณฑ์ใหม่ เพิ่มมูลค่าให้ยางพารา เพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากเส้นใยธรรมชาติ ลดปัญหาหมอกควันเนื่องจากการเผาทำลายเส้นใยธรรมชาติเพื่อการกำจัดทิ้ง ลดค่าใช้จ่ายของรัฐบาลสำหรับการกำจัดหมอกควัน สร้างรายได้เพิ่มให้เกษตรกร โดยสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเป็นการอุดหนุนและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรชาวสวนยาง ตามนโยบายเร่งด่วนของรัฐบาลที่มีอยู่ในขณะนี้

**4. ด้านสังคมและชุมชน:** ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสามารถถ่ายทอดให้กับอุตสาหกรรม หรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางพองน้ำ หรือ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อื่นๆ หน่วยงานทางการเกษตรของภาครัฐ ชุมชน เกษตรกร และตลอกจมนักวิชาการทั้งในและต่างประเทศที่สนใจ

## บทที่ 2 วิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 ยางและสารเคมี

1. น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High concentrated, HA latex) ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) 60% ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content, TSC) อยู่ในช่วง 61 - 62% ผลิตโดยบริษัทเมืองใหม่กัททรี จำกัด
2. กำมะถัน (Sulphur, S) ใช้ในรูป 50% dispersion เป็นเกรดที่ใช้ในการค้ามีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ใช้ในรูป 50% dispersion เป็นชนิด white seal มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้เป็นสารกระตุ้น (Activator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
4. ซิงค์ไดเอทิลไดไทโธคาร์บาเมต (Zinc diethyldithiocarbamate, ZDEC) ใช้ในรูป 50% dispersion มีลักษณะเป็นผงสีขาวครีม ใช้เป็นสารตัวเร่งหลัก (primary accelerator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
5. ซิงค์เมอร์แคปโทเบนโซไทโซน (Zinc 2-mercaptobenzothiazone, ZMBT) ใช้ในรูปของ 50% dispersion ใช้เป็นสารตัวเร่งเสริม (secondary accelerator) ในปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
6. โซเดียมซิลิโคฟลูออไรด์ (Sodium silicofluoride, SSF) ใช้ในรูป 25% dispersion มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล ใช้เป็นสารก่อเจล ผลิตโดยบริษัท China National Chemical Construction ประเทศจีน
7. ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine, DPG) ใช้ในรูป 33% dispersion มีลักษณะเป็นผงสีเทา ใช้เป็นสารหน่วงเวลาในการเจลผลิตโดยบริษัท บริษัท เคเอสที อินเตอร์เคม จำกัด
8. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide, KOH) มีลักษณะเป็นก้อนกลมแบน สีขาว ชุ่มมีความบริสุทธิ์ 88.5% ใช้ในการเตรียมสบู่โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
9. กรดโอเลอิก (Oleic acid) มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองใส ใช้ในการเตรียมสบู่โพแทสเซียมโอเลอิก
10. เบนโทไนท์เคลย์ (Bentonite clay) เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีเทา ใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมีที่บดเมื่อเตรียมให้อยู่ในรูปของสารแขวนลอย
11. วัลทามอล (Vultamol) เป็นเกลือของ Alkalated naphthalene sulphonic acid มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน ใช้เป็นสารที่ช่วยให้สารเคมีที่บดเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในรูปของสารแขวนลอย
12. เส้นใยเปลือกหมาก (Areca husk fiber, AHF) มีลักษณะเป็นเส้นสีน้ำตาล หยาบ ใช้เส้นใยเปลือกหมาก 100 % ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม



## 2.2 อุปกรณ์

1. เครื่องตีฟอง (Shaker) ยี่ห้อ Thaimixer รุ่น KV-50 มีลักษณะคล้ายเครื่องทำขนมเค้ก ประกอบด้วยหม้อที่ใช้บรรจุน้ำยาง หัวตะกร้อสำหรับตีฟองอย่างให้มีปริมาณฟองยางตามต้องการ และมีตัวปรับระดับควบคุมความเร็วในการตีฟอง



ภาพที่ 5 เครื่องตีฟองยางในการผลิตยางฟองน้ำ

2. หม้อนึ่งไอน้ำ (Steam Boiler) ใช้ในการนึ่งยางฟองน้ำเพื่อให้เกิดการวัลคาไนส์



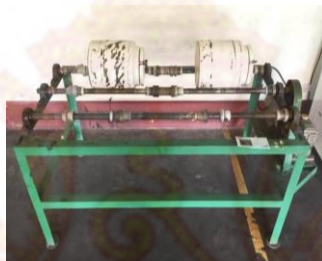
ภาพที่ 6 หม้อนึ่งไอน้ำ

3. ตู้อบลมร้อน (Oven) ยี่ห้อ BINDEN ใช้ระบบอากาศร้อนหมุนเวียน ควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้ความร้อนของตู้อบมาเอาขึ้นทดสอบยางฟองน้ำให้แห้ง หลังจากล้างทำความสะอาด ผลิตโดยบริษัท Memmert GmbH ประเทศเยอรมัน



ภาพที่ 7 ตู้อบมร้อน

4. หม้อบด (Ball mill) ประกอบด้วยถังกลมทรงกระบอกทำด้วยกระเบื้องเคลือบ การหมุนของหม้อจะหมุนตามแนวนอน ซึ่งการหมุนจะทำให้ลูกเซรามิกไหลตกกระทบกันทำให้สารเคมีที่อยู่ระหว่างลูกเซรามิกถูกกระทบจนแตก และมีขนาดเล็ก



ภาพที่ 8 หม้อบดสารเคมี

5. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electronic balance) ยี่ห้อ monobloc เป็นเครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง เพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักยาง สารเคมีและเพื่อใช้ในการชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบ มีความละเอียดในการชั่ง 0.01 ผลิตโดยประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ดังแสดงในภาพที่ 3.5



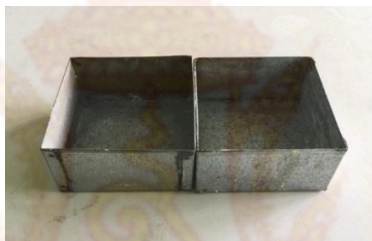
ภาพที่ 9 เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง

6. เครื่องกวนสารเชิงกล (Mechanical stirrer) ประกอบด้วยใบพัด ซึ่งทำด้วยสแตนเลส ใช้สำหรับกวนน้ำยาระหว่างการบ่มเร่ง ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 10 เครื่องกวนสารเชิงกล

7. แบบพิมพ์ (Mold) มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร, ยาว 10 เซนติเมตร, สูง 5 เซนติเมตร ทำจากอะลูมิเนียม ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 11 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมยางพองน้ำ

8. ชุดทดสอบความสามารถในการคืนรูปหลังกด (Compression set) มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กสี่เหลี่ยมประกบกันด้วยแผ่นกั้นเหล็กแบน ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 12 ความสามารถในการคืนรูปหลังกด

9. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile testing machine) ใช้สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำ

## 2.3 วิธีการทดลอง

### 2.3.1 การเตรียมสารตัวเติมและสารเคมี

นำเปลือกหมากมาล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแห้ง และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาตัดให้ได้ขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร แบ่งเส้นใยเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปเก็บเพื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยต่อสมบัติของยางพองน้ำ ส่วนที่ 2 นำไปปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15% (15% NaOH)

### 2.3.2 การบ่มน้ำยางคอมปาว์

น้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางพองน้ำสำหรับการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 น้ำยางและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางพองน้ำสำหรับการทดลอง

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)	น้ำหนักเปียก (g)
ขั้นตอนการบ่ม		
60% Natural rubber latex	100	167
20% K-Oleate	1.0	5.0
50% Sulphur	5.0	10
50% ZDEC	1.0	2.0
50% ZMBT	1.0	2.0
50% Wingstay L	1.0	2.0
ขั้นตอนการตีฟอง		
คอมปาวด์จากขั้นตอนการบ่ม		
เส้นใยเปลือกหมาก (AHF)	5, 10, 15, 20, 25	
50% ZnO	5.0	10
33% DPG	1.0	3.0
25% SSF	1.5	6.0

ที่มา : จุฑาทิพย์ (2558)

ในขั้นตอนการบ่มน้ำยางจะทำการใส่สารเคมีตามลำดับ คือ 60% Natural rubber latex, 20% K-Oleate, 50% Sulphur, 50% ZDEC, 50% ZMBT, และ 50% Wingstay L นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนน้ำยางเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จนน้ำยางและสารเคมีเข้าด้วยกัน จากนั้นในขั้นตอนการตีฟองน้ำคอมปาวด์จากขั้นตอนการบ่มมาเติมสารเคมีดังนี้ คือ 50% ZnO, 33% DPG, 25% SSF

### 2.3.3 การศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยเปลือกหมาก

ศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยเปลือกหมาก (areca husk fiber, AHF) ต่อการเตรียมและสมบัติของยางพองน้ำโดยใช้น้ำยาง สารเคมี และเส้นใยเปลือกหมาก เลือกใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ ทำการเตรียมยางพองน้ำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำน้ำยางคอมปาวด์ที่ผ่านการบ่มมาผสมกับเส้นใยเปลือกหมาก ปั่นให้เส้นใยเปลือกหมากกับน้ำยางผสมเป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 3 นาที
2. เติมดิสเพอร์ซัน ZnO, DPG และ SSF ตามลำดับ โดยหลังจากใส่สารแต่ละชนิดและปั่นด้วยเครื่องตีฟอง
3. นำยางพองน้ำที่ได้เทใส่เบ้าร่อนกระทั่งเกิดการเจล เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมาก
4. นำไปนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปล้างทำความสะอาด
5. นำไปอบด้วยตู้อบอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หรือร่อนกว่ายางแห้ง) และทดสอบสมบัติดังรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.3.7

### 2.3.4 ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะแบ่งเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว

ตอนที่ 2 ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเปลือกหมากต่อการเตรียมและสมบัติของยางพองน้ำโดยใช้น้ำยาง สารเคมี และเส้นใยเปลือกหมาก โดยเลือกใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ขนาด 0.5 เซนติเมตร ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr ตามลำดับ

### 2.3.5 การศึกษาอิทธิพลของการใช้เส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครัมป์

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครัมป์ต่อการเตรียมและสมบัติของยางพองน้ำ โดยเลือกใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ 2 ขนาด คือ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร เลือกใช้ยางครัมป์ขนาด 40 เมช ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ แปรสัดส่วนเส้นใยเปลือกหมากต่อยางครัมป์ 3 ระดับ คือ 75/25, 50/50 และ 25/75 phr โดยมีวิธีการเตรียมและทดสอบสมบัติของยางพองน้ำตามวิธีการทดลองในข้อ 2.3.3 และ 2.3.7 ตามลำดับ

### 2.3.6 ขึ้นรูปเบาะรถจักรยานยนต์โดยใช้แม่พิมพ์และการทดลองใช้งานจริง

หลังได้สภาวะต่างๆที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปยางพองน้ำแล้ว ทำการเตรียมยางพองน้ำเพื่อขึ้นรูปเบาะรถจักรยานยนต์ต้นแบบโดยใช้แม่พิมพ์และทำการผลิตเบาะรถจักรยานยนต์ต้นแบบ

### 2.3.7 การทดสอบสมบัติของยางพองน้ำ

#### 1. ความหนาแน่น (density)

เตรียมชิ้นทดสอบยางพองน้ำที่ใช้ในการทดสอบ  $5 \times 5 \times 2.5$  เซนติเมตร ซึ่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง นำค่าที่ได้มาคำนวณดังสมการดังต่อไปนี้

$$D = \frac{M}{V}$$

โดยที่  $D$  = ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ ( $\text{g/cm}^3$ )

$M$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบ ( $\text{g}$ );  $V$  = ปริมาตรของชิ้นทดสอบ ( $\text{cm}^3$ )

#### 2. ความสามารถในการคืนรูปหลังกด (Compression set)

ทดสอบมาตรฐาน ASTM D3574 โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปที่เหลี่ยมมีขนาด  $5 \times 5 \times 2.5$  เซนติเมตร แล้ววางบนชุดทดสอบกดให้ยุบตัว 50% ของความสูงเดิม วางทิ้งไว้ 15 นาที แล้วนำเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบทิ้งไว้ 15 นาที บันทึกผลที่ได้รายงานผลในรูปของร้อยละดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการคืนรูปหลังกด (\%)} = \frac{T_0 - T_1}{T_0} \times 100$$

โดยที่  $T_0$  = ความหนาก่อนการกด (cm),  $T_1$  = ขนาดของยางพองน้ำที่เหลือ (cm)

#### 3. เปอร์เซ็นต์การยุบตัว (Depression)

วัดความสูงเดิมของยางพองน้ำที่ใช้ทดสอบแล้ววัดส่วนที่ยุบตัวลงไปจากความสูงเดิมนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสูตรต่อไปนี้

$$\% \text{ การยุบตัว} = \frac{C - D}{C} \times 100$$

โดยที่  $C$  = ความสูงของแม่พิมพ์ (cm);  $D$  = ความสูงเฉลี่ยของยางพองน้ำ (cm)

#### 4. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

ทำการทดสอบมาตรฐาน ASTM D412 ทำโดยตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบล จากชิ้นทดสอบที่ได้จากการตีฟองขึ้นรูปด้วยโมลที่มีความหนาระหว่าง 1.50 - 3.00 มิลลิเมตร นำไปวัดความหนา แล้วนำชิ้นตัวอย่างไปจับยึดด้วยหัวจับทั้งสองด้าน ทำการดึงขึ้นตัวอย่างโดยใช้อัตราความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที วัดแรงดึงและระยะยืดจนขาด แล้วนำไปคำนวณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติด้านความสามารถในการยืด ณ จุดขาด

$$\text{ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength, MPa)} = \frac{F}{A}$$

โดย F = แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นตัวอย่างขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break, \%)} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

โดย L = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (mm)

L<sub>0</sub> = ระยะห่างระหว่างเส้นเริ่มต้นก่อนทำการทดสอบ (25 mm)

#### 5. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength)

ทดสอบมาตรฐาน ASTM D3574 โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปที่เหลี่ยมมีขนาด 5×5×2.5 เซนติเมตร แล้ววางบนชุดทดสอบกดให้ยุบตัว 50% ของความสูงเดิมวางทิ้งไว้ 60 นาที แล้วบันทึกผลที่ได้แล้วนำไปคำนวณสมบัติความต้านทานต่อแรงกด

$$\text{ความต้านทานต่อแรงกด (Compressive strength kPa)} = \frac{F}{A}$$

โดย F = แรงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นตัวอย่างขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm)

#### 6. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

กราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ยี่ห้อ ZEISS รุ่นMERLIN COMPACT ชิ้นทดสอบมีขนาด 10 × 10 × 3 มิลลิเมตร เคลือบผิวด้วยทองคำ ทดสอบที่กำลังขยาย 25 เท่า 10 kV

#### 7. คุณสมบัติเชิงความร้อน วิเคราะห์ด้วยเครื่องThermogravimetric analysis,

TGA (TGA4000, Perkin Elmer) ช่วงอุณหภูมิการทดสอบ 30 – 900 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะไนโตรเจน อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที

### บทที่ 3 ผลการวิจัยและอภิปรายผล/วิจารณ์ผล

จากการศึกษาอิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติ (เส้นใยเปลือกหมาก) ต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติของยางพองน้ำจากยางธรรมชาติ โดยศึกษาปริมาณเส้นใยที่มีผลต่อสมบัติของยางพองน้ำ และเส้นใยที่ทำการทดลองมีทั้งแบบที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH แปรปริมาณของเส้นใย 0, 5, 10, 15, 20, และ 25 phr เลือกปริมาณที่เหมาะสมนำไปศึกษาผลของขนาดเส้นใย แปรขนาดความยาวของเส้นใย 0.5 และ 1.0 ซม. หลังจากได้ปริมาณและขนาดของเส้นใยที่เหมาะสมแล้วทำการศึกษาโดยใช้เส้นใยร่วมกับยางผง (ยางครัมป์) เป็นสารตัวเติมร่วมในการเตรียมยางพองน้ำ หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสม นำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบเบาอย่างรถจักรยานยนต์ต่อไป

#### 3.1 ผลของการเตรียมเส้นใยเปลือกหมาก

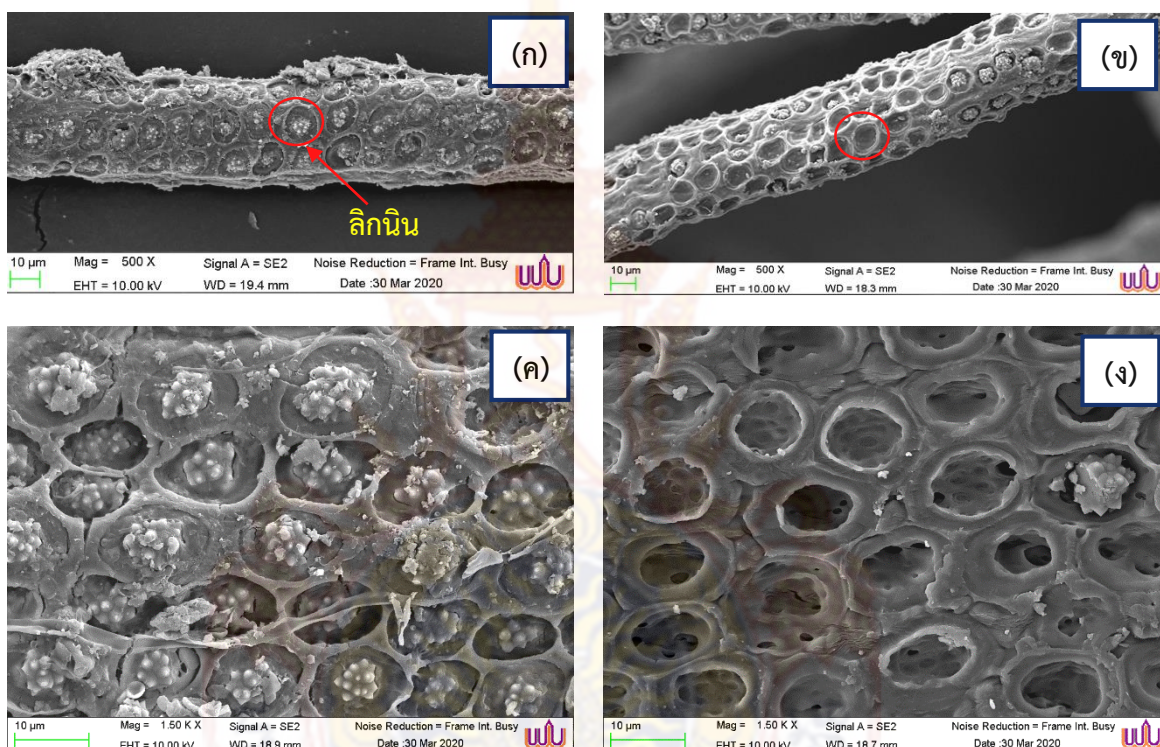
จากการนำเปลือกหมากมาล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแห้ง และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาตัดให้ได้ขนาด 0.5 เซนติเมตร แบ่งเส้นใยเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปเก็บเพื่อศึกษาปริมาณของเส้นใยต่อสมบัติของยางพองน้ำ ส่วนที่ 2 นำไปปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15% (15% NaOH) ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ภาพถ่ายลักษณะของเส้นใยเปลือกหมาก ก่อน (ก) และ หลัง (ข) ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์



จากภาพที่ 13 เป็นภาพถ่ายลักษณะของเส้นใยเปลือกหมาก ก่อน (ก) และหลัง (ข) ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้เส้นใยมีลักษณะสีเข้มขึ้น และจากผลการทดสอบด้วย SEM ดังภาพที่ 14 พบว่า ลักษณะผิวของเส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีลักษณะสะอาด และมีรูพรุนหรือลักษณะหลุมลึกที่ผิวมากขึ้น เนื่องจากลิกนินที่บริเวณผิวของเส้นใยถูกกำจัดหรือละลายออกจากผิวของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กัลทิมา และ วัลลภ, 2558)



ภาพที่ 14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวเส้นใยเปลือกหมาก ก่อนและหลังปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)  
 (ก) ก่อนปรับสภาพผิวกำลังขยาย 500X; (ข) หลังปรับสภาพผิวกำลังขยาย 500X  
 (ค) ก่อนปรับสภาพผิวกำลังขยาย 1500X; (ง) หลังปรับสภาพผิวกำลังขยาย 1500X

### 3.2 ผลของขนาดเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ

ศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นใยเปลือกหมากต่อการเตรียมและสมบัติของยางพองน้ำ เลือกใช้เส้นใยเปลือกหมาก 2 ขนาด คือ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร แต่ละขนาดเลือกศึกษาที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4 – 8

ตารางที่ 4 ลักษณะของการเกิดฟองของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ขนาดและปริมาณต่างๆ

AHF Size (cm)	Amount of AHF (phr)	Appearance
0.5	5	หดตัวเล็กน้อย ฟองยางละเอียดและนิ่มยืดหยุ่นได้ดี
	10	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียดนิ่มและยืดหยุ่นได้ดี
	15	ยุบตัวและหดตัวน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียดแต่มีฟองอากาศกระจายตัวเล็ก ฟองยางค่อนข้างแข็งและยืดหยุ่นน้อย
1.0	5	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางละเอียดและนิ่มยืดหยุ่นดี
	10	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียดมีฟองอากาศเล็กน้อย ยางค่อนข้างแข็งและไม่ค่อยยืดหยุ่นและยืดหยุ่นได้น้อย
	15	ฟองยางค่อนข้างละเอียด แต่มีฟองอากาศเล็กน้อย ยางค่อนข้างแข็ง



0.5 ซม. 5 phr



0.5 ซม. 10 phr



0.5 ซม. 15 phr



1.0 ซม. 5 phr



1.0 ซม. 10 phr



1.0 ซม. 15 phr

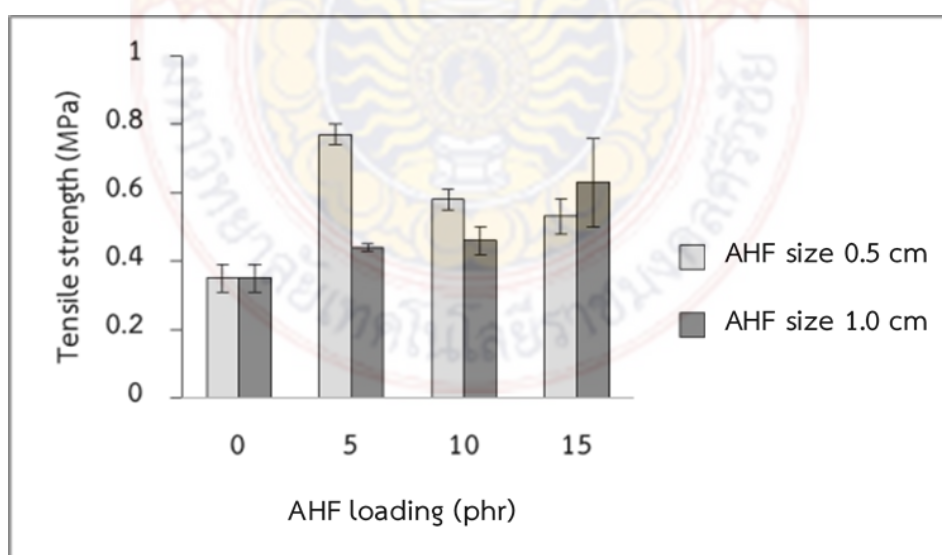
ภาพที่ 15 ลักษณะของฟองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

ตารางที่ 5 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมาก ขนาด 0.5 ซม ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

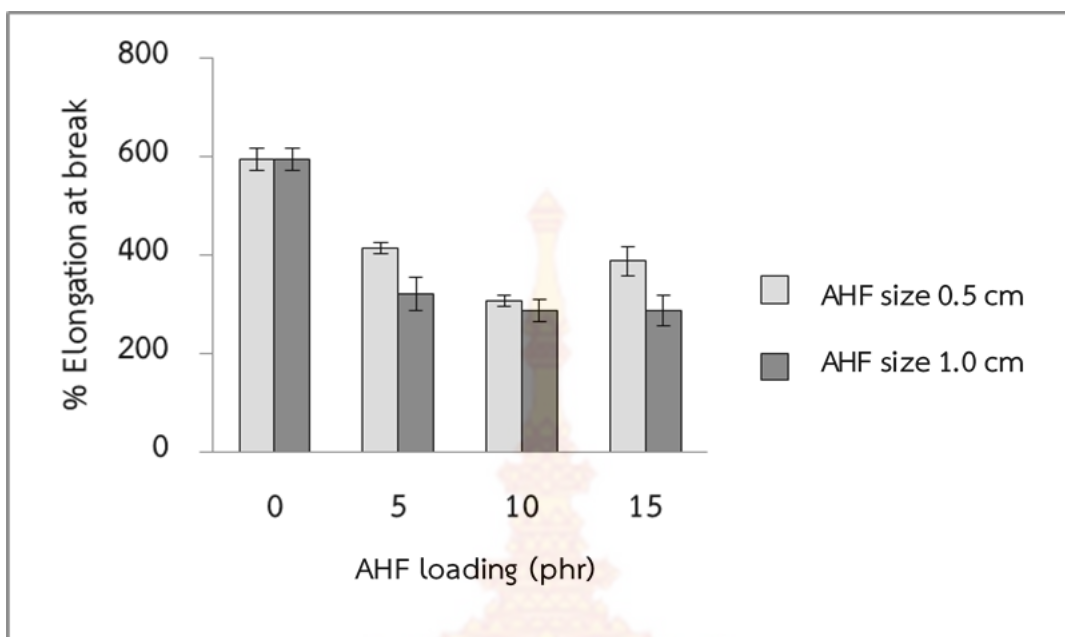
Amount of AHF (phr)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
0	0.35±0.04	593±23	0.1672±0.0154
5	0.77±0.03	413±11	0.2150±0.0096
10	0.58±0.03	306±11	0.2571±0.0176
15	0.53±0.05	386±30	0.2441±0.0018

ตารางที่ 6 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมาก ขนาด 1.0 ซม ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

Amount of AHF (phr)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
0	0.35±0.04	593±23	0.1672±0.0154
5	0.44±0.01	320±34	0.1881±0.0004
10	0.46±0.04	286±23	0.2054±0.0011
15	0.63±0.13	286±30	0.2406±0.0003

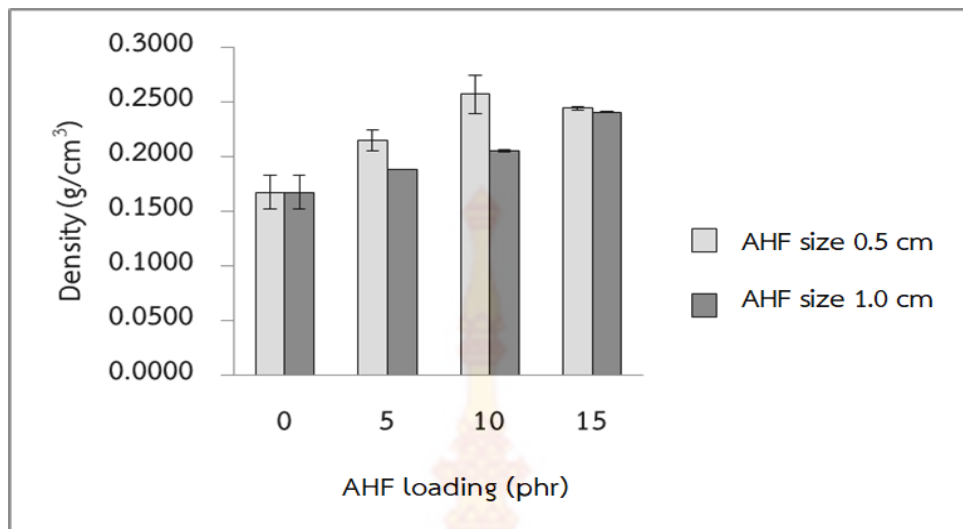


ภาพที่ 16 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr



ภาพที่ 17 ผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

จากตารางที่ 5 – 6 และภาพที่ 16 - 17 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง พบว่า ยางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากจะให้สมบัติที่ดีกว่าทั้ง 2 ขนาด เมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก เนื่องจากเส้นใยเปลือกหมากอาจช่วยในการกระจายแรงดึงที่กระทำต่อยางพองน้ำที่มีเส้นใยเปลือกหมากเป็นสารตัวเติมแสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงของเส้นใยจะมีบทบาทเมื่อเติมลงในยางพองน้ำ และยังพบอีกว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากสายโมเลกุลเซลลูโลสจากเส้นใยเปลือกหมากที่มีขนาดที่ยาวกว่าจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าส่งผลให้ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกันภายในและระหว่างโมเลกุลมีโอกาสเกิดขึ้นได้สูงกว่ากรณีของเส้นใยสั้นผลการทดลองดังภาพที่ 16 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใย 2 ขนาด พบว่าการใช้เส้นใยในปริมาณไม่เกิน 10 phr ยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร จะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ากรณีใช้เส้นใย 1.0 เซนติเมตร และภาพที่ 17 เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่าเมื่อใส่เส้นใยเปลือกหมากทำให้สมบัติลดลงทั้ง 2 ขนาด เมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด เส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร ให้สมบัติเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่ดีกว่าเส้นใย 1.0 เซนติเมตร เมื่อเทียบที่ปริมาณเดียวกัน



ภาพที่ 18 ผลของความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมาก ขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

จากตารางที่ 5 – 6 และภาพที่ 18 ผลการทดลองความหนาแน่น พบว่าเมื่อใส่เส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด ให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่ายางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lim *et al.* (2018) ซึ่งศึกษาการใช้เส้นใยจากต้นปาล์ม พบว่าเมื่อใส่เส้นใยจากต้นปาล์มมากขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นของยางพองน้ำที่ได้มากขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด ที่ปริมาณเท่ากัน พบว่า เส้นใยเปลือกหมากที่ขนาด 0.5 เซนติเมตร ให้สมบัติที่ดีกว่าขนาด 1.0 เซนติเมตร และเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของยางพองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยทั้ง 2 ขนาด ของเส้นใยเปลือกหมากดังภาพที่ 18

### 3.3 ผลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ

จากผลการทดลองข้อที่ 3.2 เป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลของขนาดของเส้นใยเปลือกหมากที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความหนาแน่น พบว่าการใช้เส้นใยเปลือกหมากที่มีขนาด 0.5 ซม. จะมีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้เส้นใย 1.0 ซม. ดังนั้นสำหรับการทดลองในตอนนี้จะเป็นการศึกษาผลของปริมาณเส้นใยและผลของการใช้สารช่วยปรับสภาพผิวของเส้นใยที่มีผลต่อการขึ้นรูปยางพองและสมบัติต่างๆ ของยางพอง โดยการทดลองจะเลือกใช้เส้นใยเปลือกหมากที่มีขนาด 0.5 ซม.

ดังนั้นการทดลองในหัวข้อนี้จะแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว และตอนที่ 2 ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

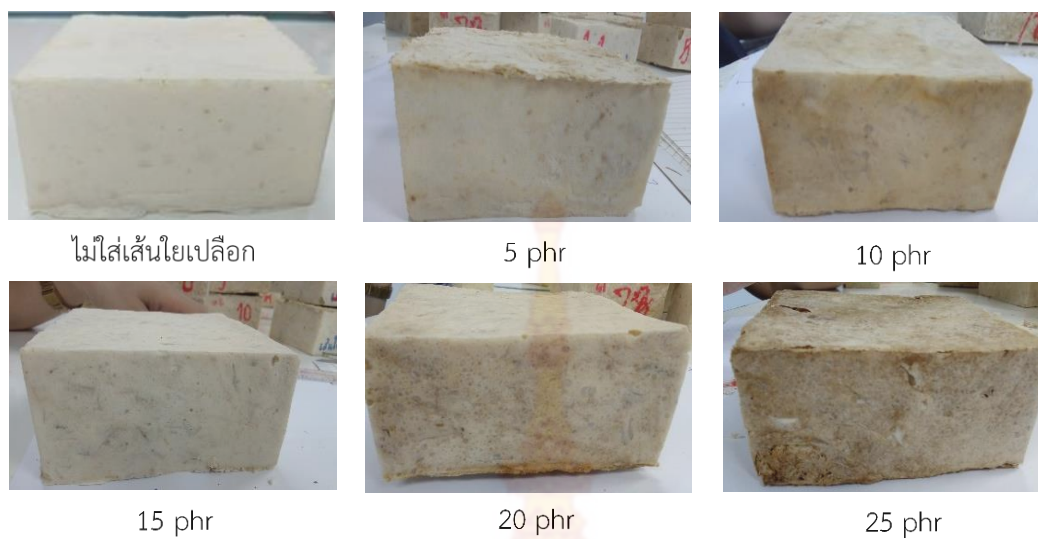
ผลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมากและการปรับสภาพผิวต่อการเตรียมและสมบัติของยางพองน้ำ เส้นใยเปลือกหมากที่ใช้ขนาด 0.5 เซนติเมตร ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr ตามลำดับ ได้ผลดังตารางที่ 7 – 10

ตารางที่ 7 ลักษณะของฟองของยางฟองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ขนาดและปริมาณต่าง ๆ

Condition	AHF loading (phr)	Appearance
Treated	0	หดตัวเล็กน้อย ฟองยางละเอียด นิ่ม
	5	ฟองน้ำค่อนข้างละเอียดแต่มีฟองอากาศเล็กน้อยด้านข้าง
	10	นิ่ม ฟองยางค่อนข้างละเอียดแต่มีฟองอากาศด้านข้าง
	15	หดตัวเล็กน้อย นิ่ม ฟองยางละเอียด
	20	มีความแข็งเล็กน้อย ฟองยางมีอากาศเล็กน้อย
	25	ค่อนข้างแข็ง ฟองยางมีความหยาบเล็กน้อย
Untreated	5	ฟองยางค่อนข้างนิ่ม แต่มีฟองอากาศเล็กน้อย
	10	ฟองยางค่อนข้างนิ่ม มีฟองอากาศเล็กน้อย
	15	ฟองยางละเอียด มีความนิ่ม
	20	ฟองยางค่อนข้างแข็ง มีฟองอากาศเล็กน้อย
	25	ยุบตัวเล็กน้อย มีฟองอากาศ แข็ง



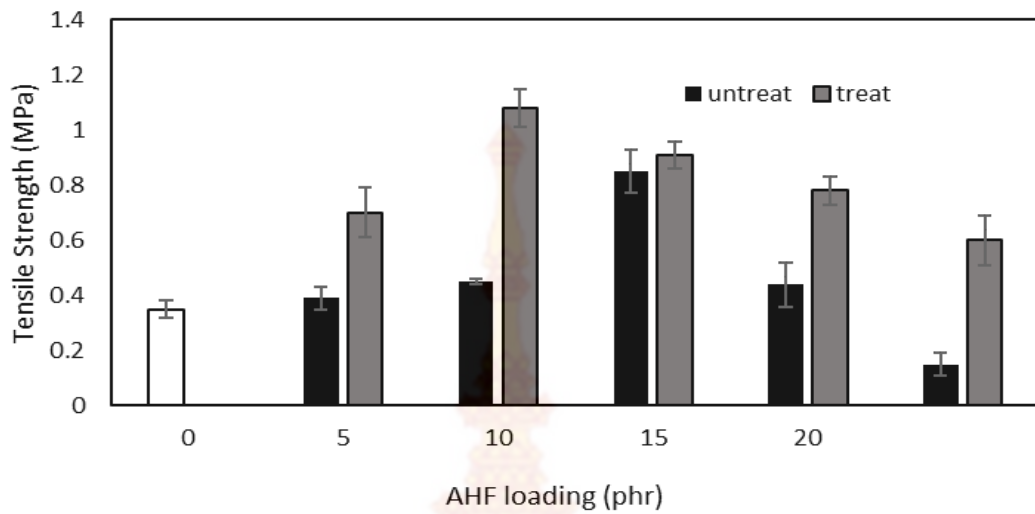
ภาพที่ 19 ลักษณะของยางฟองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr



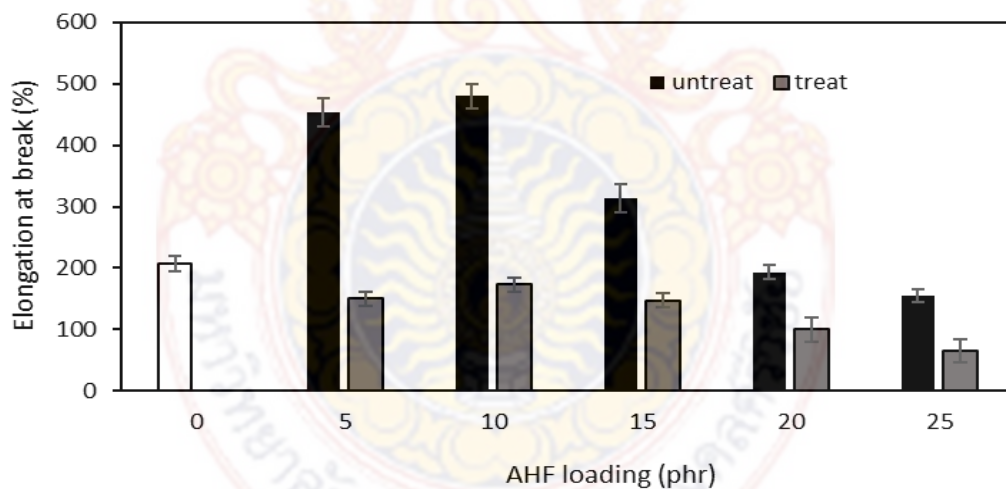
ภาพที่ 20 ลักษณะของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

ตารางที่ 8 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิว ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

AHF loading (phr)	Tensile Strength (MPa)		Elongation at break (%)		Density (g/cm <sup>3</sup> )	
	untreated	treated	untreated	treated	untreated	treated
0	0.35±0.03	0.35±0.03	207±12	207±12	0.1223±0.0019	0.1223±0.0019
5	0.39±0.04	0.70±0.09	453±12	150±12	0.1321±0.0041	0.1424±0.0008
10	0.45±0.01	1.08±0.07	480±12	173±12	0.1442±0.0023	0.1566±0.0011
15	0.85±0.08	0.91±0.05	313±12	147±12	0.1589±0.0074	0.1649±0.0048
20	0.44±0.08	0.78±0.05	193±20	100±20	0.1646±0.0021	0.2073±0.0071
25	0.15±0.04	0.60±0.09	155±19	65±19	0.1859±0.0081	0.2532±0.0046



ภาพที่ 21 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr



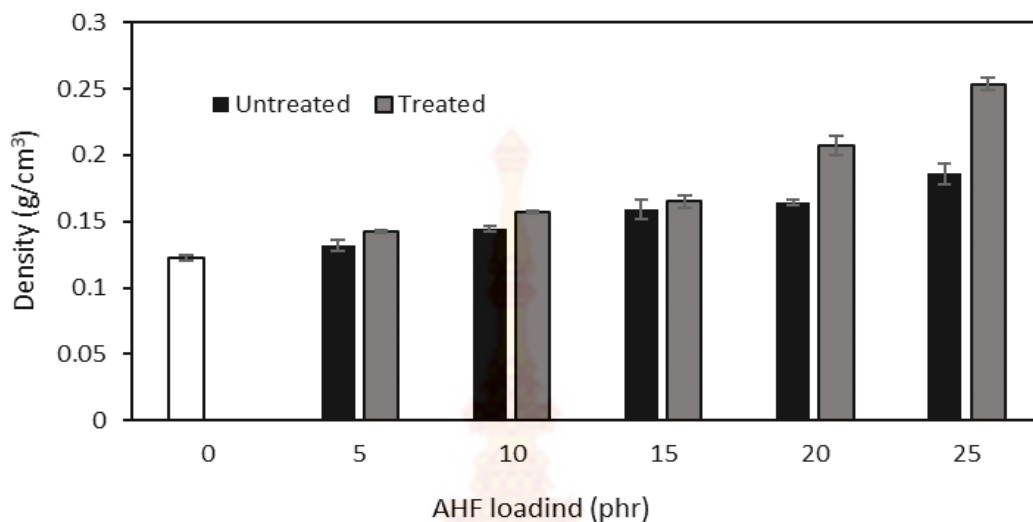
ภาพที่ 22 ผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

จากตารางที่ 8 และภาพที่ 21 -22 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืด ณ จุดขาด พบว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวจะให้ค่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มขึ้นในขณะที่ความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากมากกว่า 15 phr อันเนื่องจากการใช้



เส้นใยเปลือกหมากในปริมาณน้อยไม่เกิน 15 phr เส้นใยเปลือกหมากสามารถกระจายตัวในน้ำยางธรรมชาติได้ง่ายและสามารถเกิดอันตรกิริยากันระหว่างเส้นใยเปลือกหมากกับอนุภาคของยางธรรมชาติ แต่ในทางกลับกันเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากขึ้นมากกว่า 15 phr พบว่าเส้นใยเปลือกหมากจะกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ยากขึ้นและทำให้เส้นใยเปลือกหมากมีโอกาสจับตัวรวมกันเป็นก้อนได้มากขึ้นส่งผลให้เป็นจุดด้อยของชิ้นงานได้ ซึ่งการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ (Ramasamy *et al.*, 2013) โดย Ramasamy และคณะ ได้ทดลองใช้ผงแคลบเป็นสารตัวเติมในยางพองน้ำพบว่าเมื่อปริมาณผงแคลบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวจะให้ผลในลักษณะเดียวกัน และหากเปรียบเทียบกันระหว่างยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากไม่ปรับสภาพผิวและใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวด้วย NaOH พบว่าการใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวจะให้ความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ที่น้อยกว่าสูตรยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว และหากเปรียบเทียบกันระหว่างยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิว พบว่าการใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพผิวจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่ดีกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว จากผลการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังภาพที่ 14 พบว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากจะทำให้เส้นใยเปลือกหมากมีความสะอาดมากขึ้นแล้วยังมีส่วนช่วยให้เส้นใยเปลือกหมากมีลักษณะขรุขระมากขึ้นด้วยอันเนื่องจากลักษณะที่หลุดออกไปจากผิวของเส้นใย (กัลทิมา และ วัลลภ, 2558) จึงส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าสูงกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ผ่านการปรับสภาพซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ (Karim *et al.*, 2018)

จากตารางที่ 8 และภาพที่ 23 ผลการทดลองความหนาแน่นพบว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากให้ค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากที่สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวให้ค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการปรับสภาพผิวของเส้นใยเปลือกหมากจะส่งผลให้เส้นใยมีขนาดที่เล็กลงเล็กน้อยจึงทำให้เส้นใยเปลือกหมากเข้ากันได้ดีกับน้ำยางมากขึ้นจึงส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น (Karim *et al.*, 2018)



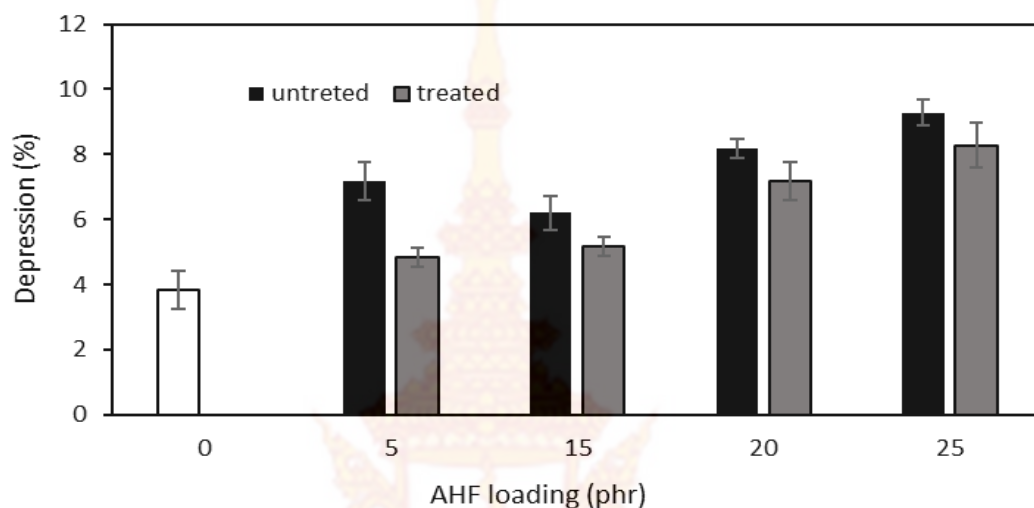
ภาพที่ 23 ผลของความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

ตารางที่ 9 สมบัติด้านการยุบตัวของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

AHF loading (phr)	Depression (%)	
	Untreated	treated
0	3.83±0.58	3.83±0.58
5	7.17±0.58	4.83±0.29
10	5.00±0.50	4.33±0.76
15	6.20±0.52	5.17±0.29
20	8.17±0.29	7.17±0.58
25	9.17±0.40	8.27±0.68

จากตารางที่ 9 และภาพที่ 24 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากให้ค่าการยุบตัวที่สูงกว่ายางพองน้ำที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและเส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวให้ค่าการยุบที่น้อยกว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิว นั่นแสดงว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือก

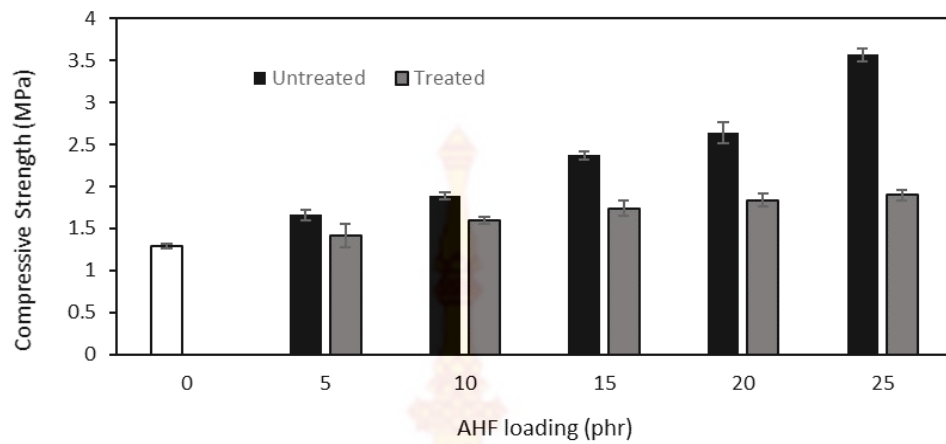
หมากที่ปรับสภาพผิวให้สมบัติดีกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและยังพบอีกว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มมากขึ้นเปอร์เซ็นต์การยุบตัวจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งอยู่ในช่วง 4-10 % มีความแตกต่างไม่มากนัก



ภาพที่ 24 ผลของเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

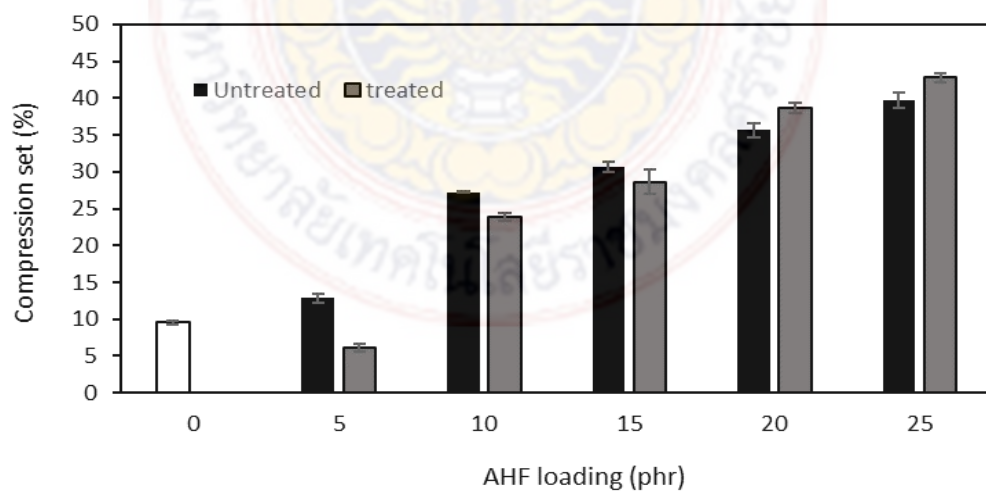
ตารางที่ 10 สมบัติด้านการกดของยางพองน้ำที่ผสมเส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

AHF loading (phr)	Compressive Strength (MPa)		Compression set (%)	
	untreated	treated	untreated	Treated
0	1.29±0.03	1.29±0.03	9.58±0.27	9.58±0.27
5	1.66±0.06	1.41±0.14	12.83±0.68	6.14±0.48
10	1.89±0.04	1.60±0.04	27.26±0.12	23.88±0.45
15	2.37±0.05	1.74±0.09	30.65±0.71	28.61±1.64
20	2.64±0.13	1.84±0.08	35.64±0.89	38.68±0.64
25	3.57±0.08	1.90±0.06	39.72±1.08	42.78±0.65



ภาพที่ 25 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

จากตารางที่ 10 และภาพที่ 25 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานต่อแรงกดพบว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากมีค่าความต้านทานต่อแรงกดสูงกว่ายางพองน้ำที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมากและเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและเส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวให้ค่าความต้านทานต่อแรงกดสูงกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 26 ผลของสมบัติการผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากทั้งที่ปรับสภาพผิวและไม่ปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 25 phr

จากตารางที่ 10 และภาพที่ 26 ผลการทดลองเปอร์เซ็นต์การผิตรงรูปหลังการกดพบว่ายางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากมีค่าการผิตรงรูปถาวรหลังการกดที่สูงกว่ายางพองน้ำที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิว พบว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ปรับสภาพผิวให้ค่าการผิตรงรูปถาวรหลังการกดน้อยกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิว ในขณะที่ปริมาณเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มขึ้นถึง 20 phr ค่าการผิตรงรูปถาวรหลังการกดก็เพิ่มสูงขึ้นกว่ายางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากที่ไม่ปรับสภาพผิว และเมื่อปริมาณเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการผิตรงรูปถาวรเนื่องจากการกดสูงขึ้นด้วยนั้นหมายความว่าความเป็นยางและความยืดหยุ่นของยางพองน้ำลดลงส่งผลให้การคืนตัวของยางพองน้ำลดลงด้วยให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกับการทดลองของ (Kudori *et al.*, 2019) ซึ่ง Kudori ได้ทำการศึกษาผลของเส้นใยปอแก้วในยางพองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ

### 3.4 ผลของการใช้เส้นใยเปลือกหมากเป็นสารตัวเติมร่วมกับยางครีမ် (AHF/CRM)

ศึกษาอิทธิพลของการใช้เส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครีမ်ต่อการเตรียมและสมบัติของยางพองน้ำ ศึกษาอิทธิพลของขนาด ปริมาณ และสัดส่วนระหว่าง เส้นใยเปลือกหมาก (AHF) และ ยางครีမ် (CRM) สัดส่วน AHF/CRM คือ 75/25, 50/50 และ 25/75 โดยน้ำหนัก ขนาดของเส้นใยเปลือกหมากที่ใช้คือ 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 11 ลักษณะการเกิดฟองของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 ซม.และยางครีမ် ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วนต่างๆ

AHF/CRM ratio	AHF/CRM loading (phr)	Appearance
75/25	5	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียดเส้นใยยางครีမ်กระจายตัวได้ดี
50/50		ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศเล็กน้อย เส้นใยและยางครีမ်กระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว
25/75		ฟองยางค่อนข้างละเอียด กระจายตัวได้ดี มีฟองอากาศกระจายตัวอยู่เล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว
75/25	10	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด ฟองอากาศกระจายตัวอยู่เล็กน้อย ฟองยางแข็งคืนรูปเร็ว
50/50		ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่บางส่วนเส้นใยและยางครีမ်กระจายตัวได้ดีและมีความยืดหยุ่นดี

ตารางที่ 11 (ต่อ)

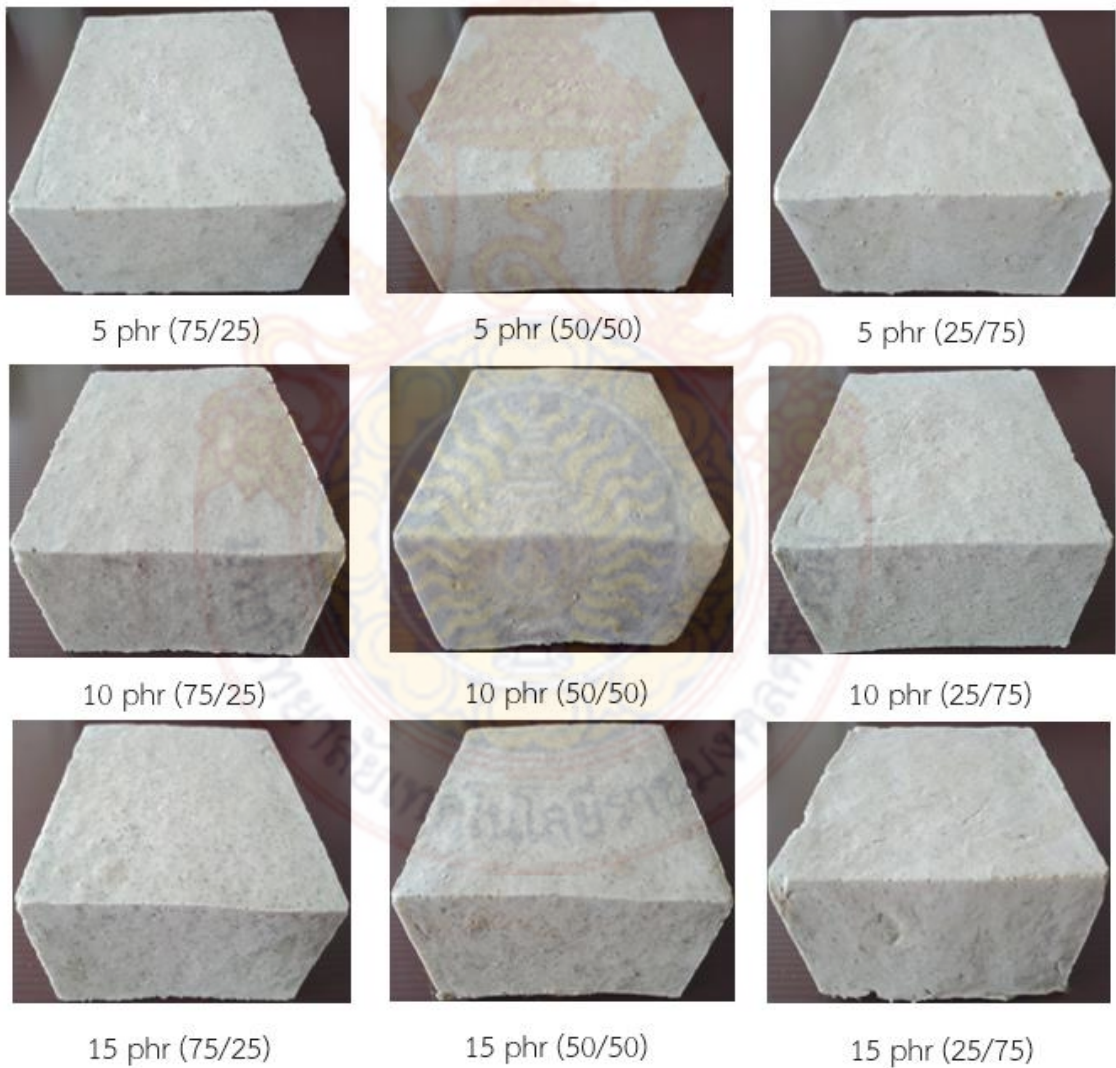
AHF/CRM ratio	AHF/CRM loading (phr)	Appearance
25/75	10	ยุบตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่เล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว
75/25	15	ยุบตัวและหดเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่บางส่วน เส้นใยจับตัวเป็นกลุ่มก้อนอย่างครึ้มกระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างแข็งยืดหยุ่นได้น้อยคืนรูปเร็ว
50/50		ยุบและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด เส้นใยจับตัวเป็นก้อนบางส่วน ยางครึ้มกระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว
25/75		ยุบตัวอย่างเห็นได้ชัด ฟองยางค่อนข้างละเอียดมีฟองอากาศกระจายอยู่ด้วยบางส่วน เส้นใยและยางครึ้มกระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างแข็งยืดหยุ่นได้น้อย

ตารางที่ 12 ลักษณะของการเกิดฟองของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครึ้มขนาด 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วนต่างๆ

AHF/CRM ratio	AHF/CRM loading (phr)	Appearance
75/25	5	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่บางส่วน เส้นใยจับตัวเป็นกลุ่มก้อน ยางครึ้มกระจายตัวได้ดี ยืดหยุ่นได้ดี
50/50		ยุบตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่บางส่วน เส้นใยและยางครึ้มกระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างนิ่มมีความยืดหยุ่นดี
25/75		ยุบตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่บางส่วน เส้นใยและยางครึ้มกระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนตัวเร็ว
75/25	10	ยุบตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่บางส่วน เส้นใยจับตัวเป็นกลุ่มก้อนบางส่วน ยางครึ้มกระจายตัวได้ดี ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว
50/50		ยุบตัวอย่างเห็นได้ชัดและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่ด้วยบางส่วน ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว
25/75		ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่ด้วยบางส่วน ฟองยางค่อนข้างแข็งคืนรูปเร็ว

ตารางที่ 12 (ต่อ)

AHF/CRM ratio	AHF/CRM loading (phr)	Appearance
75/25	15	ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค้อยละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่ด้วยบางส่วน ฟองยางค่อนข้างแข็งคึนรูปเร็ว
50/50		ยุบตัวอย่างเห็นได้ชัดและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่ด้วยบางส่วน ฟองยางค่อนข้างแข็งและคึนรูปเร็ว
25/75		ยุบตัวและหดตัวเล็กน้อย ฟองยางค่อนข้างละเอียด มีฟองอากาศกระจายอยู่ด้วยบางส่วน ฟองยางค่อนข้างแข็งและคึนรูปเร็ว



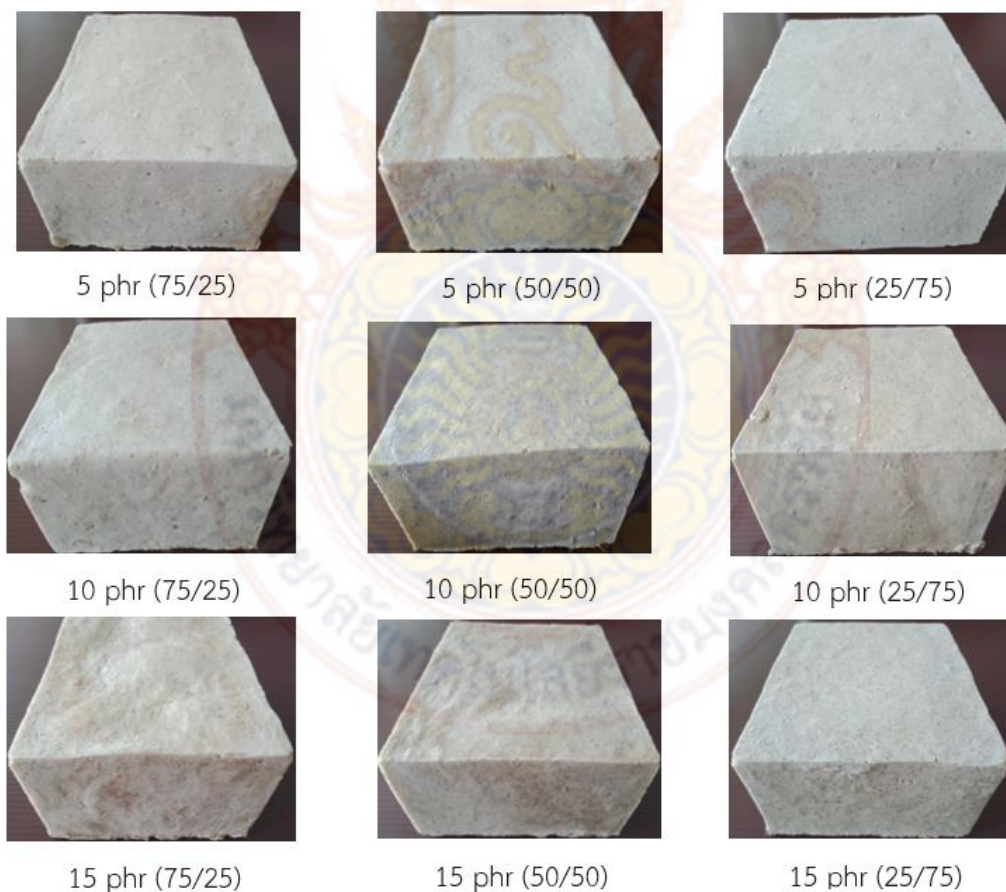
ภาพที่ 27 ลักษณะยางฟองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 ซม. ที่ปริมาณและสัดส่วนระหว่างเส้นใย/ยางครัมป์ ที่สัดส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 27 เป็นลักษณะของยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร ร่วมกับ CRM ที่สัดส่วน AHF/CRM เท่ากับ 75/25, 50/50 และ 25/75 ในปริมาณ 5, 10 และ 15 phr มีลักษณะดังนี้

1. การใช้ AHF/CRM ปริมาณ 5 phr จะขึ้นรูปได้ง่ายสุด ที่สัดส่วน 50/50 เมื่อเปรียบเทียบกับ สัดส่วนทั้ง 3 สัดส่วน เส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ်ผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่ายกว่า

2. การใช้ AHF/CRM ปริมาณ 10 phr จะขึ้นรูปได้ง่ายสุด ที่สัดส่วน 25/75 เมื่อเปรียบเทียบกับ สัดส่วนทั้ง 3 สัดส่วน ที่สัดส่วนนี้เส้นใยเปลือกหมากจะมีปริมาณที่น้อยกว่ายางครีမ်เมื่อเทลงเบาๆ ต่อการขึ้นรูปและผิวของชิ้นงานไม่ขรุขระและผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

3. การใช้ AHF/CRM ปริมาณ 15 phr จะขึ้นรูปได้ง่ายสุด ที่สัดส่วน 50/50 เมื่อเปรียบเทียบกับ สัดส่วนทั้ง 3 สัดส่วน ที่สัดส่วนนี้ เส้นใยเปลือกหมากมีปริมาณที่เท่ากับยางครีမ်เมื่อเทลงเบาๆ ต่อการขึ้นรูปและผิวของชิ้นงานไม่ขรุขระและผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 28 ลักษณะยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 ซม. ที่ปริมาณและสัดส่วนระหว่าง เส้นใย/ยางครีမ် ที่สัดส่วนต่างๆ



จากภาพที่ 28 เป็นลักษณะของยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร ร่วมกับ CRM ที่สัดส่วน AHF/CRM เท่ากับ 75/25, 50/50 และ 25/75 ในปริมาณ 5, 10 และ 15 phr มีลักษณะดังนี้

1. ที่การใช้ AHF/CRM ปริมาณ 5 phr จะขึ้นรูปได้ง่ายสุด ที่สัดส่วน 50/50 เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนทั้ง 3 สัดส่วน ที่สัดส่วนนี้ เส้นใยเปลือกหมากมีปริมาณที่เท่ากับยางครัมป์เมื่อเทลงเบ้าง่ายต่อการขึ้นรูปและผิวของชิ้นงานไม่ขรุขระและผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

2. การใช้ AHF/CRM ปริมาณ 10 phr จะขึ้นรูปได้ง่ายสุด ที่สัดส่วน 25/75 ขึ้นรูปได้ง่ายสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนทั้ง 3 สัดส่วน ที่สัดส่วนนี้เส้นใยเปลือกหมากจะมีปริมาณที่น้อยกว่ายางครัมป์เมื่อเทลงเบ้าง่ายต่อการขึ้นรูปและผิวของชิ้นงานไม่ขรุขระและผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

3. การใช้ AHF/CRM ปริมาณ 15 phr จะขึ้นรูปได้ง่ายสุด ที่สัดส่วน 25/75 เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนทั้ง 3 สัดส่วน ที่สัดส่วนนี้เส้นใยเปลือกหมากจะมีปริมาณที่น้อยกว่ายางครัมป์เมื่อเทลงเบ้าง่ายต่อการขึ้นรูปและผิวของชิ้นงานไม่ขรุขระและผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

**ตารางที่ 13** สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 0.5 ซม ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75

AHF/CRM ratio	AHF/CRM (phr)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
75/25	5	0.53±0.02	320±20	0.2320±0.0015
	10	0.54±0.06	253±30	0.2475±0.0568
	15	0.64±0.06	146±11	0.2369±0.0086
50/50	5	0.46±0.02	306±11	0.2382±0.0105
	10	0.69±0.05	393±23	0.2141±0.0012
	15	0.79±0.02	160±20	0.2685±0.0064
25/75	5	0.55±0.07	260±34	0.2539±0.0640
	10	0.69±0.05	146±30	0.2663±0.0017
	15	0.78±0.05	240±20	0.2949±0.0020

ตารางที่ 14 สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75

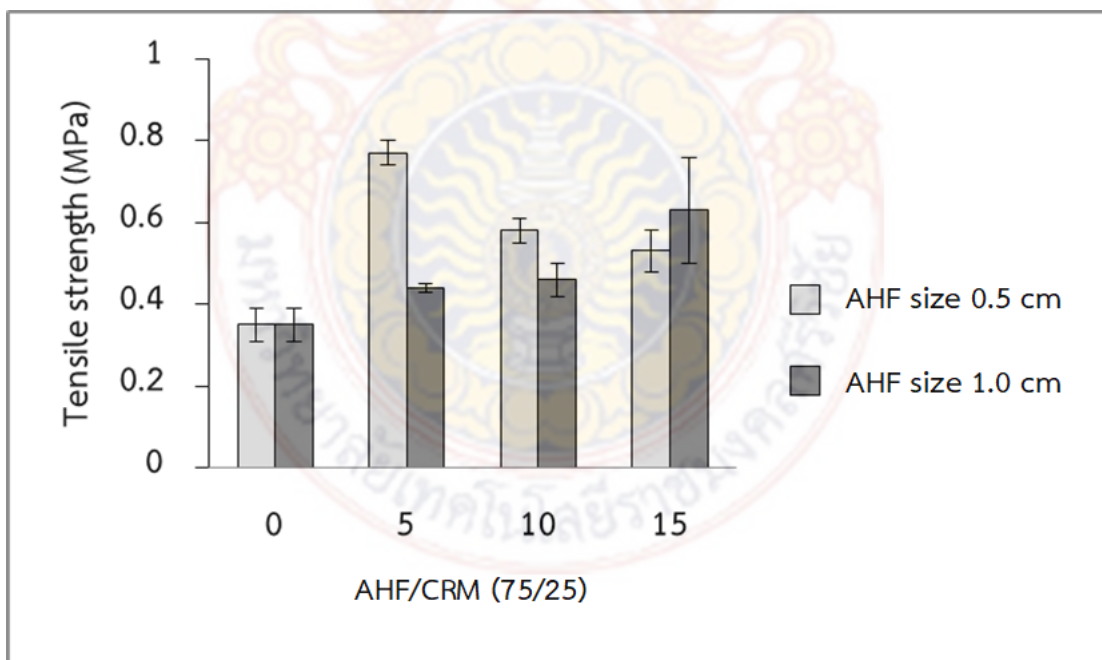
AHF/CRM ratio	AHF/CRM (phr)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
75/25	5	0.33±0.03	253±30	0.1643±0.0159
	10	0.56±0.02	193±23	0.2085±0.0089
	15	0.76±0.04	166±11	0.2153±0.0191
50/50	5	0.47±0.08	233±23	0.1793±0.0367
	10	0.70±0.04	186±11	0.2146±0.0047
	15	0.80±0.02	226±30	0.2357±0.0358
25/75	5	0.60±0.02	280±20	0.1796±0.0202
	10	0.55±0.04	173±11	0.2537±0.0017
	15	0.41±0.04	166±11	0.2452±0.0555

ตารางที่ 15 สมบัติด้านการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 0.5 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75

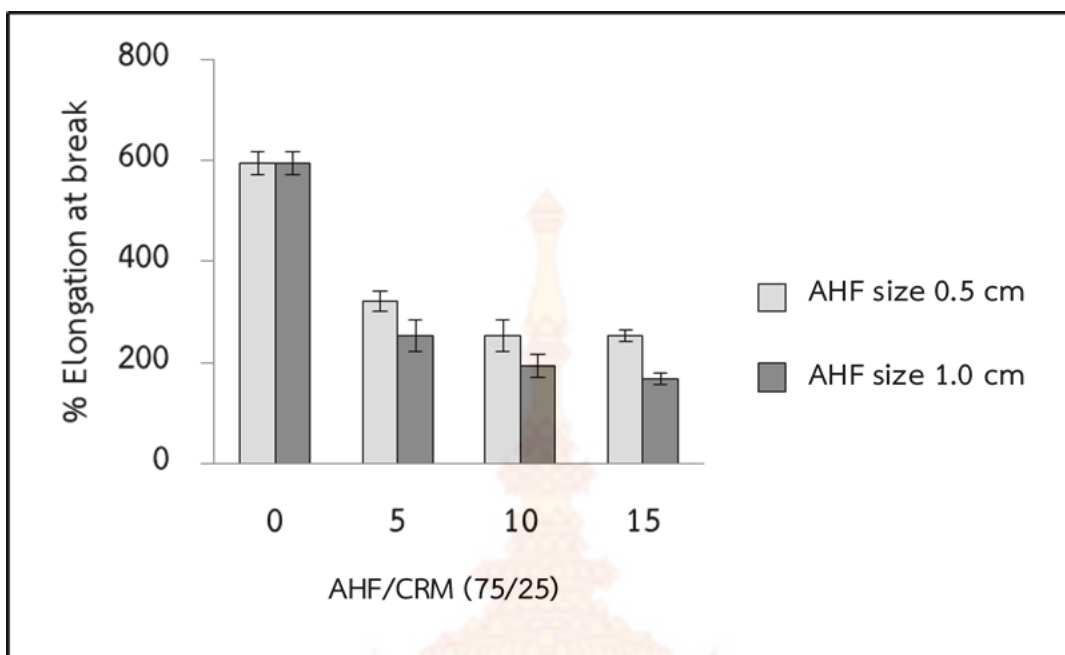
AHF/CRM ratio	AHF/CRM (phr)	Compressive Stress (kPa)	Compression set (%)
75/25	5	55.04±1.64	76.80±3.49
	10	21.38±1.05	69.07±10.80
	15	73.96±1.78	45.87±4.55
50/50	5	58.62±1.64	51.47±11.32
	10	68.10±0.36	76.00±8.12
	15	94.01±0.78	48.53±3.03
25/75	5	63.41±2.21	56.27±5.90
	10	65.84±3.45	70.93±4.11
	15	87.21±5.46	45.07±2.31

ตารางที่ 16 สมบัติด้านการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25, 50/50 และ 25/75

AHF/CRM ratio	AHF/CRM (phr)	Compressive Stress (kPa)	Compression set (%)
75/25	5	30.28±0.08	74.40±4.45
	10	22.08±1.69	77.60±1.60
	15	68.38±6.35	60.00±2.12
50/50	5	22.97±0.88	75.73±2.61
	10	23.34±2.13	87.47±0.46
	15	74.72±1.02	56.27±2.44
25/75	5	50.06±1.66	70.67±4.11
	10	52.67±0.58	86.13±3.33
	15	57.75±1.82	51.20±2.77



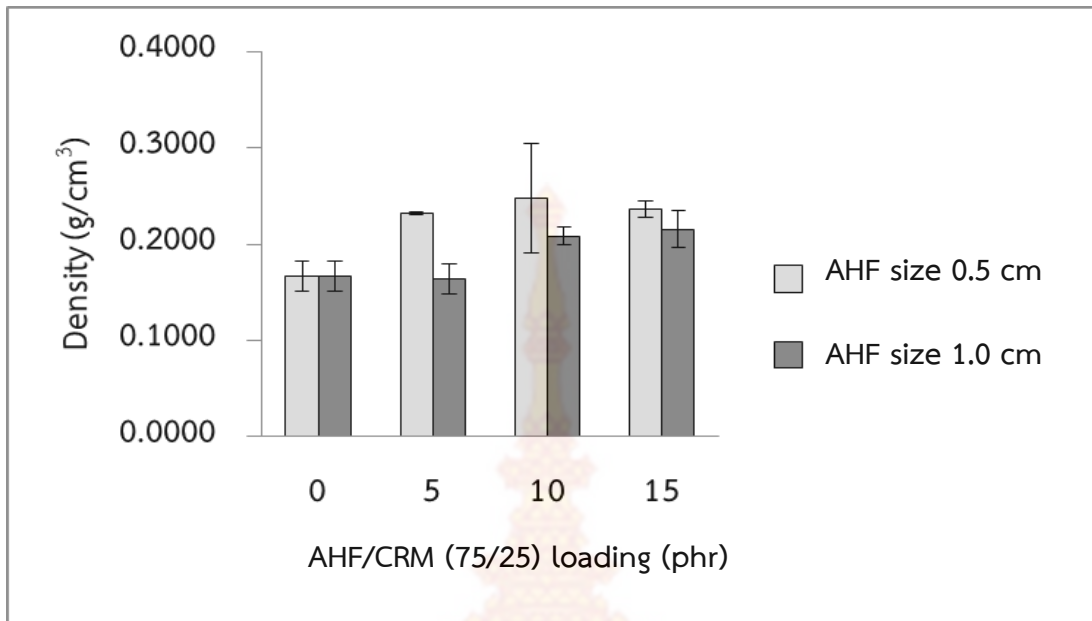
ภาพที่ 29 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมป์ที่เส้นใยขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25



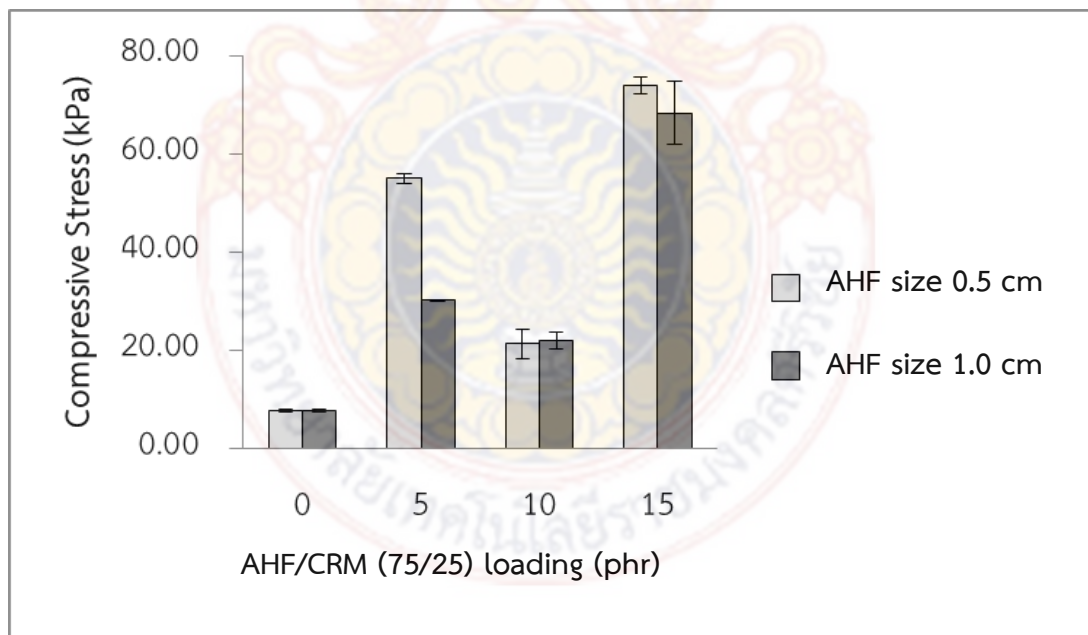
ภาพที่ 30 ผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมพ์ที่เส้นใยขนาด 0.5 และ 1.0 ซม. ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ที่สัดส่วน 75/25

จากตารางที่ 13 – 14 และภาพที่ 29 – 30 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำที่สัดส่วนระหว่าง AHF/CRM เท่ากับ 75/25 พบยางพองน้ำที่ใส่ AHF/CRM ในปริมาณมากจะมีแนวโน้มทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่ AHF/CRM เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างขนาดของเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด เส้นใยขนาด 1.0 เซนติเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณของ AHF/CRM เพิ่มจะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ และให้สมบัติที่ดีกว่าขนาด 0.5 เซนติเมตร เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่ายางพองน้ำที่ใส่ AHF/CRM ให้สมบัติที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่ AHF/CRM ในทุกขนาดและทุกปริมาณ และจากตารางที่ 13 – 14 และภาพที่ 31 ผลการทดลองความหนาแน่นพบว่ายางพองน้ำสูตรที่ใส่ AHF/CRM ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ขนาด เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยางพองน้ำสูตรไม่ใส่ AHF/CRM

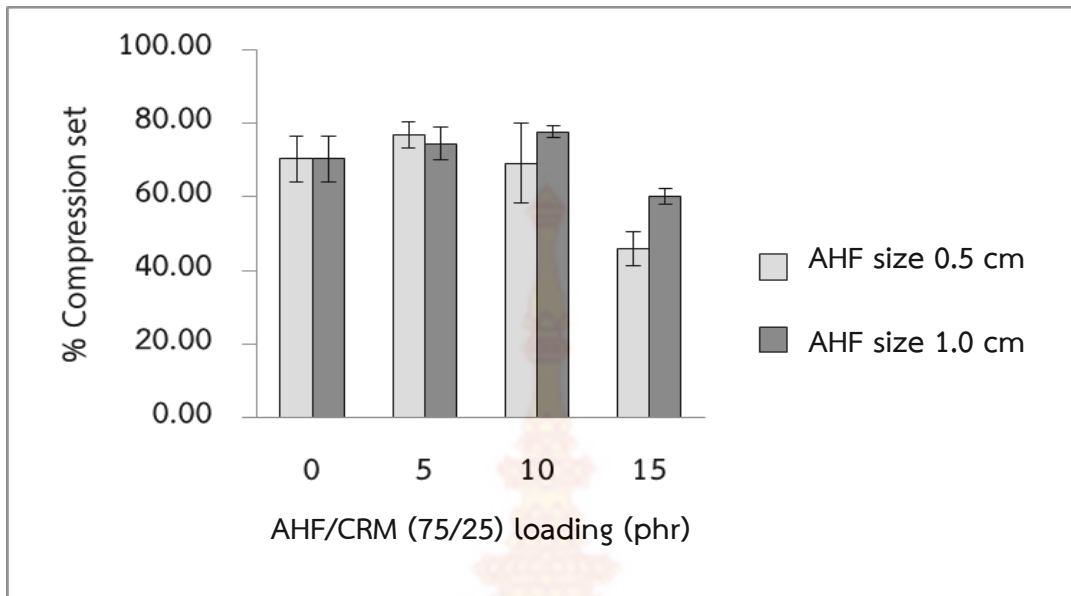
จากตารางที่ 15 – 16 และภาพที่ 32 ผลของสมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำที่สัดส่วนระหว่าง AHF/CRM เท่ากับ 75/25 พบว่ายางพองน้ำสูตรที่ใส่ AHF ทั้ง 2 ขนาด ปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงกดที่ดีกว่าเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่ AHF/CRM ระหว่างเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด จะเห็นได้ว่าเส้นใยเปลือกหมากทั้งสองขนาดที่ 10 phr มีแนวโน้มทำให้สมบัติของความต้านทานต่อแรงกดที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ 5 และ 15 phr แต่ที่ขนาด 0.5 เซนติเมตร ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกดที่ดีกว่าขนาด 1.0 เซนติเมตร



ภาพที่ 31 ความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 75/25) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

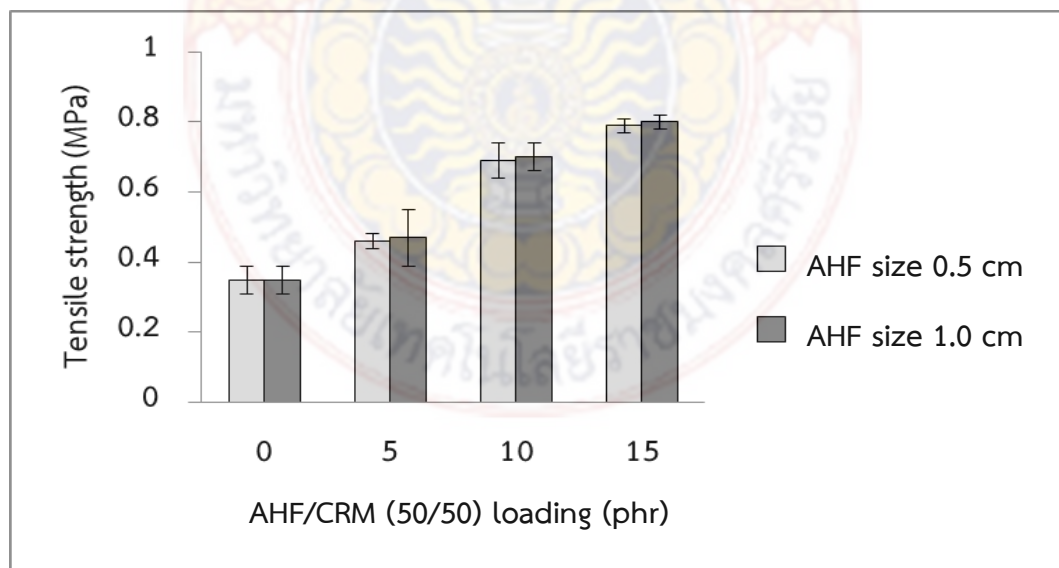


ภาพที่ 32 ความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 75/25) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

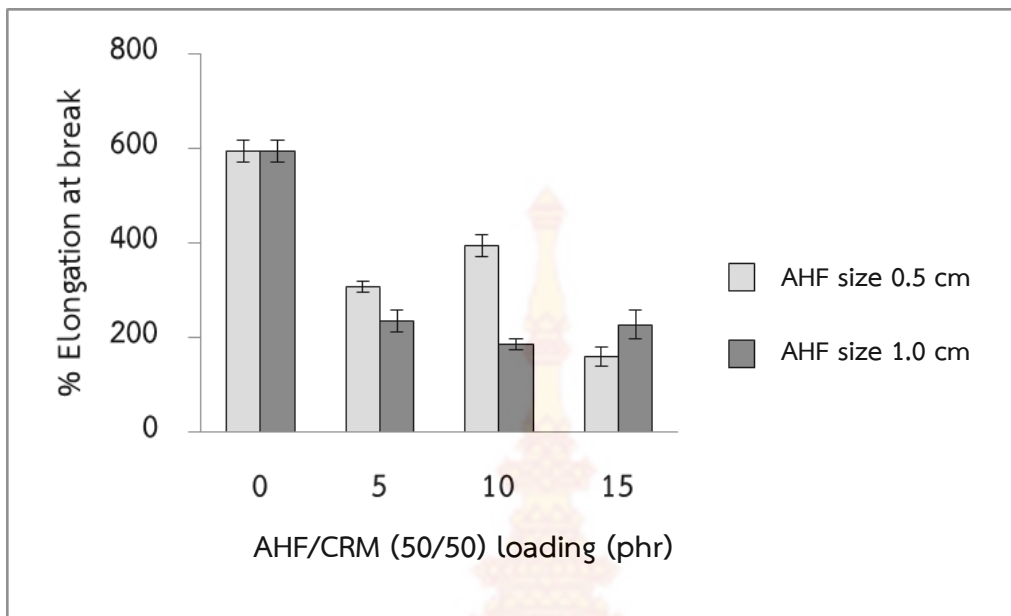


ภาพที่ 33 การผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 75/25) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

จากตารางที่ 15 – 16 และภาพที่ 33 ผลของสมบัติการผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำที่สัดส่วนระหว่าง AHF/CRM เท่ากับ 75/25 พบว่ายางพองน้ำสูตรที่ใส่ AHF ทั้ง 2 ขนาด มีแนวโน้มทำให้สมบัติต้านสมบัติการผิดรูปถาวรหลังการกดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก



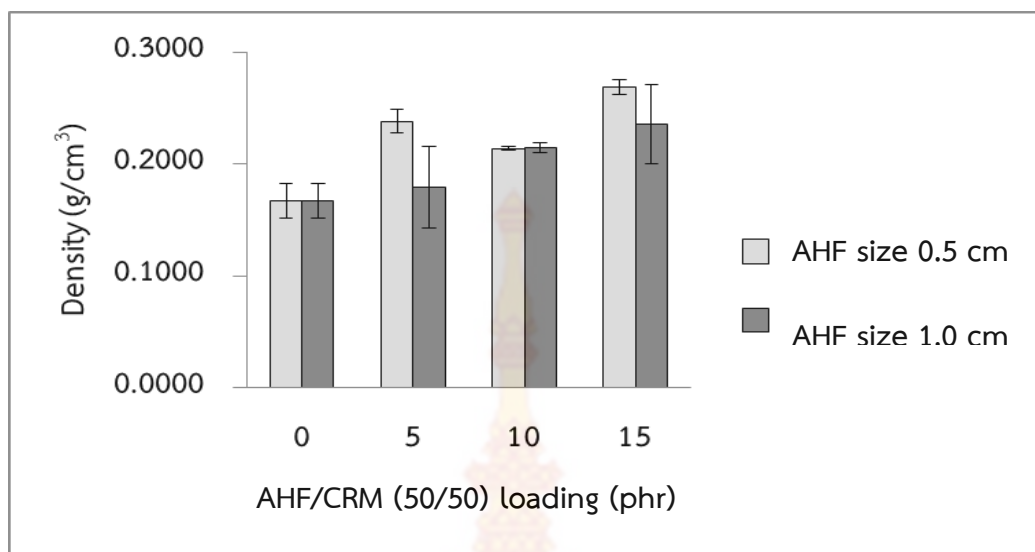
ภาพที่ 34 ความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr



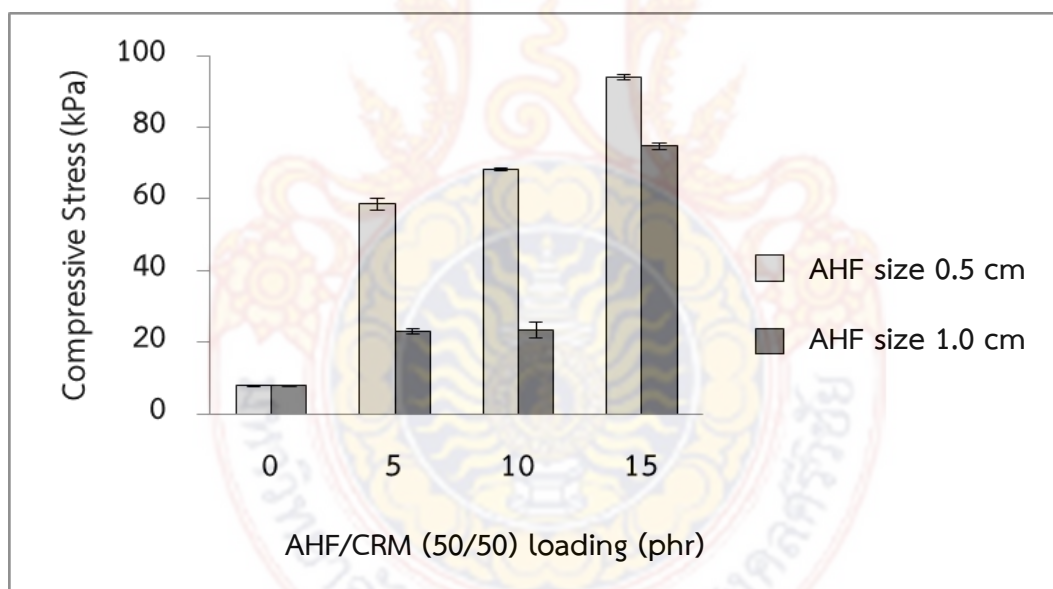
ภาพที่ 35 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

จากตารางที่ 13 – 14 และภาพที่ 34 – 35 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) พบว่ายางพองน้ำสูตรที่ใส่ AHF/CRM ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงดีขึ้นทั้ง 2 ขนาดของ AHF เหมือนเปรียบเทียบกับสูตรยางพองน้ำไม่ใส่ AHF/CRM เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด เส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีขึ้นตามลำดับในทุกปริมาณ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเส้นใยเปลือกหมากที่ขนาด 0.5 เซนติเมตร ส่วนเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด พบว่าเมื่อใส่ AHF/CRM ทำให้สมบัติเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด ลดลงทั้ง 2 ขนาดเมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรไม่ใส่ AHF/CRM

จากตารางที่ 13 – 14 และภาพที่ 36 ผลการทดลองความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) พบว่า สูตรที่ใส่ AHF/CRM ทั้งขนาด 2 ขนาดของ AHF ให้สมบัติของความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยทั้ง 2 ขนาด เส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร มีแนวโน้มทำให้สมบัติความหนาแน่นที่สูงกว่าเส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร



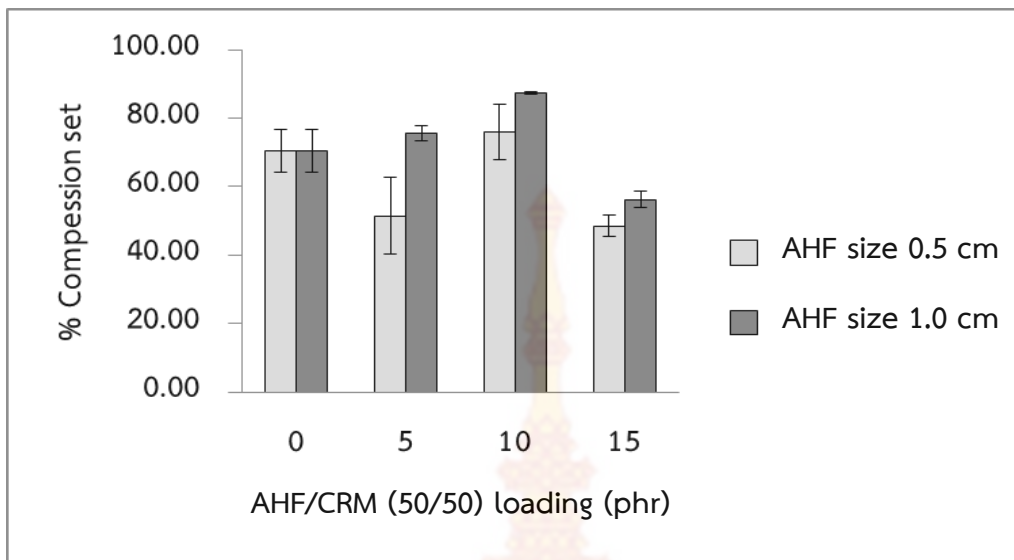
ภาพที่ 36 ความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr



ภาพที่ 37 ความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

จากตารางที่ 15 – 16 และภาพที่ 37 ผลการทดลองของสมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครัมภ์ (AHF/CRM = 50/50) พบว่าสูตรที่ใส่ AHF/CRM ปรับปรุงสมบัติของความต้านทานต่อแรงกดดีขึ้นทั้ง 2 ขนาดของ AHF เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใส่ AHF/CRM และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด การใช้เส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร มีแนวโน้มทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกดที่ดีกว่า ขนาด 1.0 เซนติเมตร



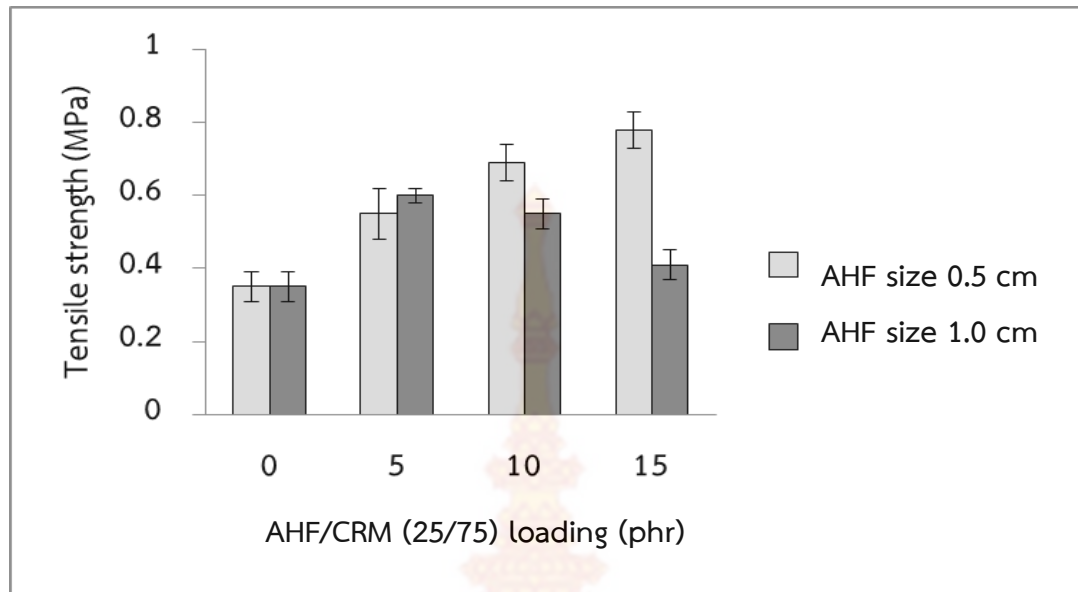


ภาพที่ 38 การผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

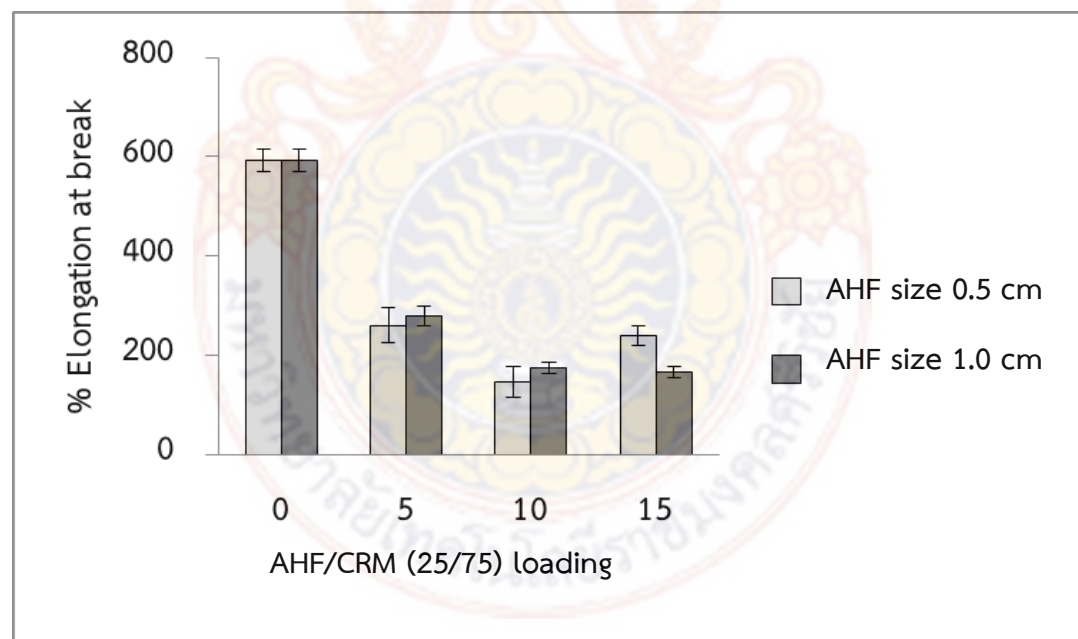
จากตารางที่ 15 – 16 และภาพที่ 38 ผลของการผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 50/50) พบว่าการใช้เส้นใยเปลือกหมากในยางพองน้ำมีแนวโน้มส่งผลการผิดรูปถาวรหลังการกดดีกว่ายางพองน้ำ โดยเฉพาะเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร จะช่วยปรับปรุงสมบัติการผิดรูปถาวรหลังการกดให้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

จากตารางที่ 13 – 14 และภาพที่ 39 – 40 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) พบว่าสูตรที่ใส่ AHF/CRM ทั้ง 2 ขนาดของ AHF ให้สมบัติของความต้านทานต่อแรงดึงที่ดีขึ้นทั้ง 2 ขนาด เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรยางพองน้ำไม่ใส่ AHF/CRM เส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด เส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร มีแนวโน้มทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงดีขึ้น ตรงกันข้ามกับเส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร เมื่อปริมาณเพิ่ม AHF/CRM ทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงลดลง ส่วนผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด พบว่าเมื่อใส่ AHF/CRM มีแนวโน้มทำให้สมบัติผลของเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง

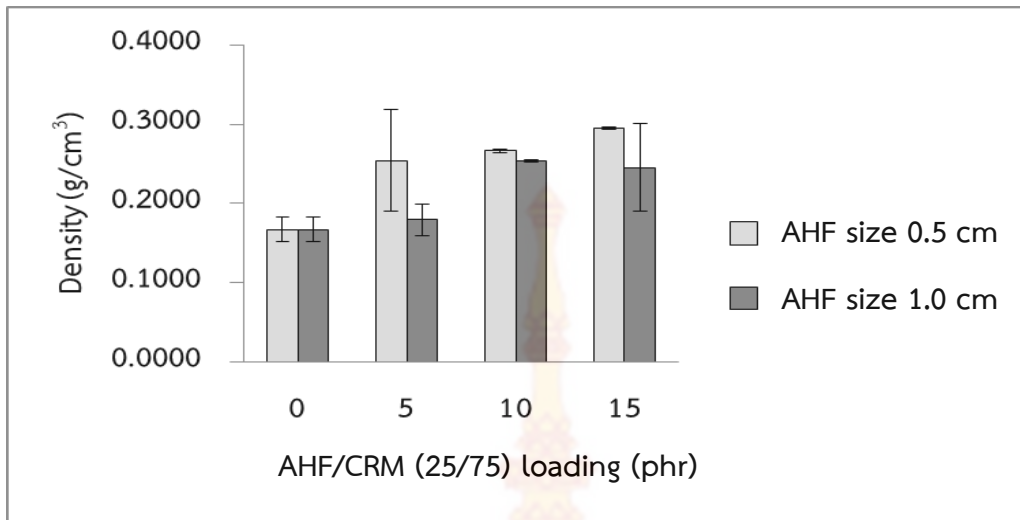
จากตารางที่ 13 – 14 และภาพที่ 41 ผลการทดลองความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) พบว่าที่ใส่ AHF/CRM ทั้ง 2 ขนาดของ AHF ให้สมบัติที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรไม่ใส่ AHF/CRM และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ขนาด พบว่าเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร มีแนวโน้มปรับปรุงทำให้สมบัติความหนาแน่นที่ดีขึ้นตามลำดับทุกปริมาณเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร



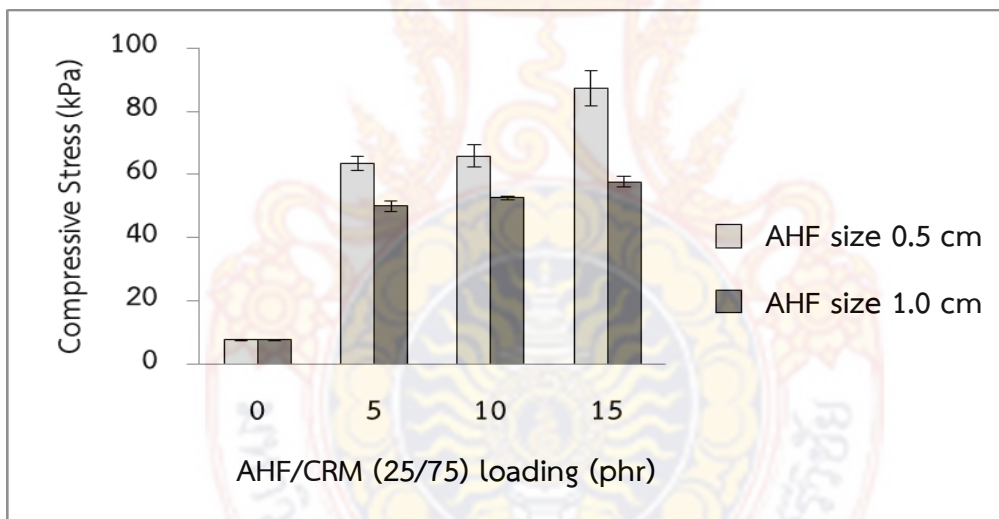
ภาพที่ 39 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ်บ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr



ภาพที่ 40 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ်บ์ (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

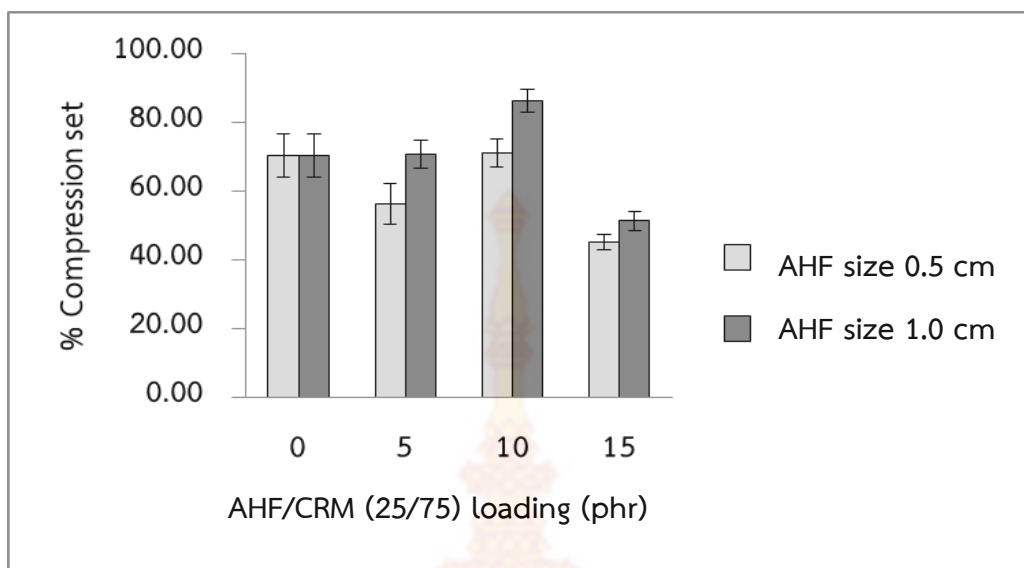


ภาพที่ 41 ความหนาแน่นของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr



ภาพที่ 42 สมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

จากตารางที่ 15 – 16 และภาพที่ 42 สมบัติความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) พบว่าสูตรที่ AHF/CRM ทั้ง 2 ขนาดของ AHF ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกดที่ดีขึ้นทั้ง 2 ขนาด เมื่อเปรียบเทียบกับยางพองน้ำสูตรไม่ใส่ AHF/CRM เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมาก จะเห็นได้ว่าเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร มีแนวโน้มทำให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกดที่ดีขึ้นตามลำดับทุกปริมาณ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร

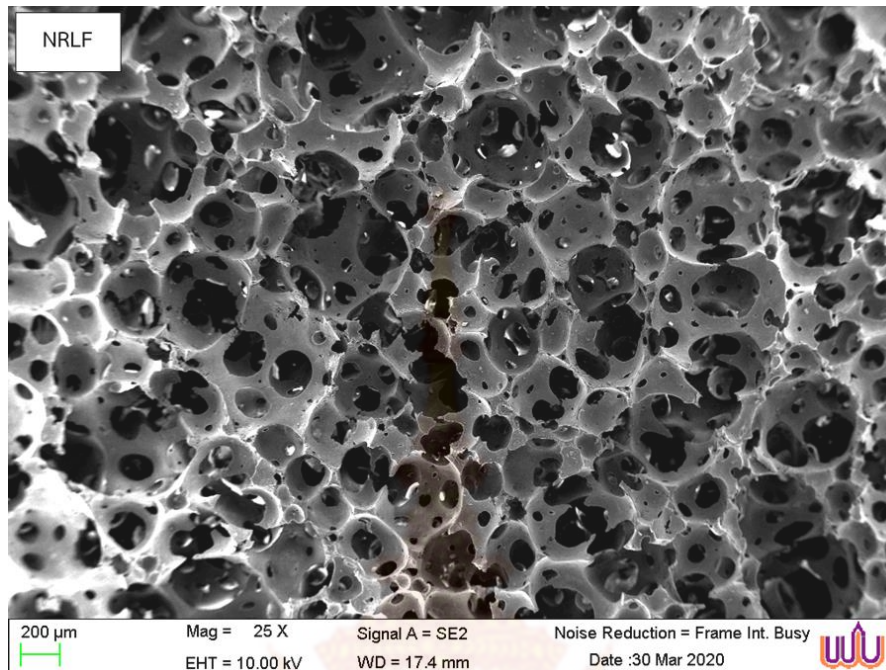


ภาพที่ 43 การผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr

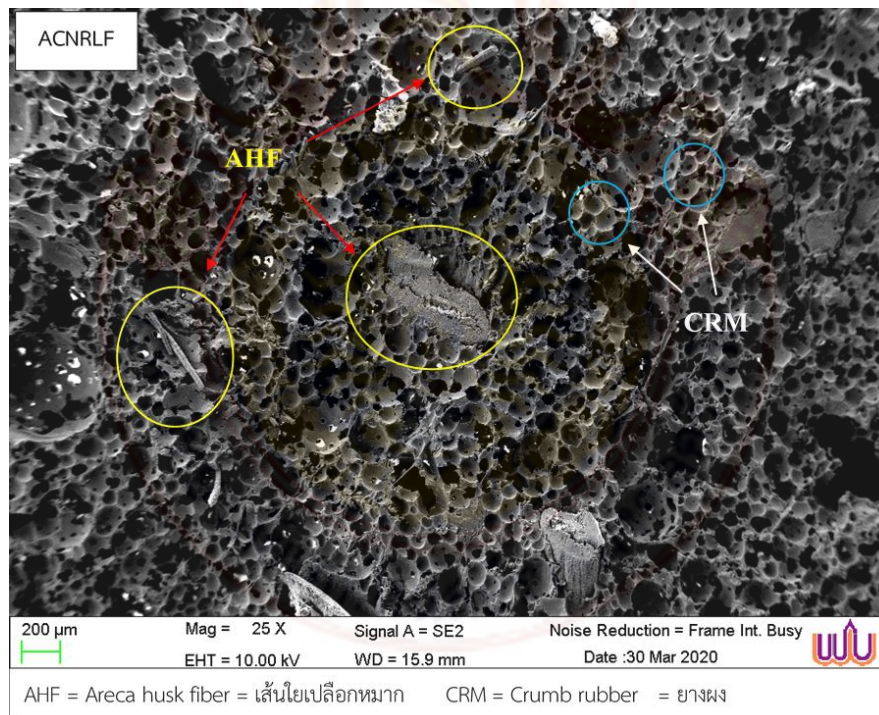
จากตารางที่ 15 – 16 และภาพที่ 43 ผลของการผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำผสมเส้นใยเปลือกหมากและยางครีမ် (AHF/CRM = 25/75) พบว่าการใช้เส้นใยเปลือกหมากในยางพองน้ำมีแนวโน้มส่งผลการผิดรูปถาวรหลังการกดดีกว่ายางพองน้ำ โดยเฉพาะเส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร จะช่วยปรับปรุงสมบัติการผิดรูปถาวรหลังการกดให้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

### 3.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำ

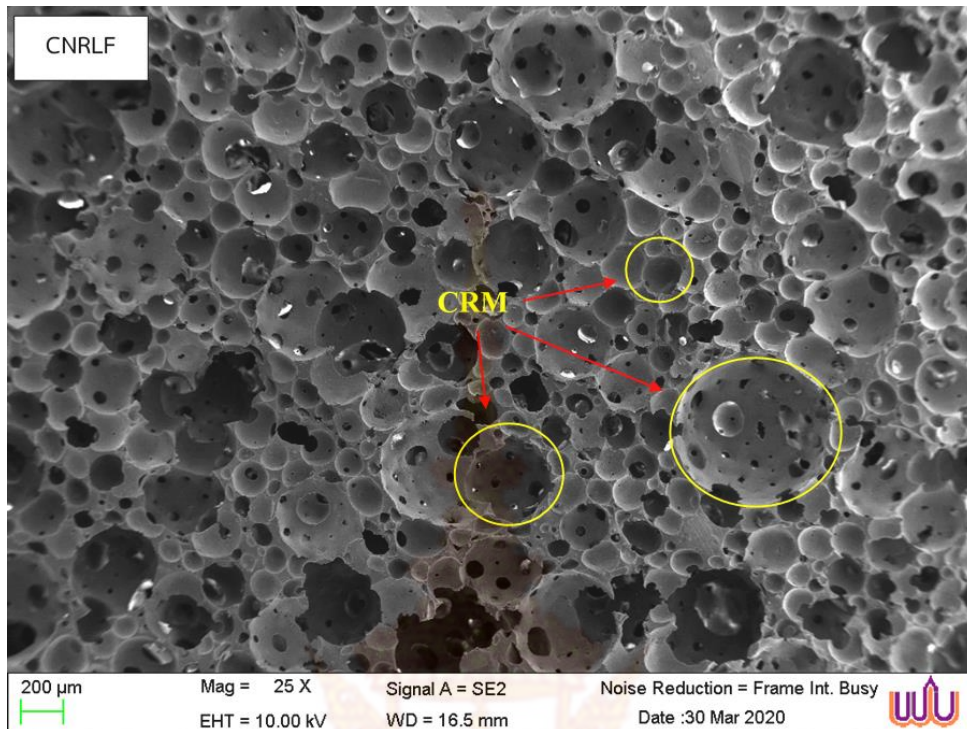
ภาพที่ 44 – 48 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำที่ไม่ใช้สารตัวเติม (NRLF) ใช้เส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครีမ်เป็นสารตัวเติม AHF/CRM เท่ากับ 50/50 ปริมาณ 10 phr (ACNRLF) ใช้ยางครีမ်ปริมาณ 10 phr (CNRLF) ใช้เส้นใยเปลือกหมากปริมาณ 10 phr (ANRLF10) และ ใช้เส้นใยเปลือกหมากปริมาณ 25 phr (ANRLF25) เป็นสารตัวเติม ตามลำดับ พบว่าลักษณะฟองของยางพองน้ำ NRLF, ACNRLF, ANRLF10 และ ANRLF25 มีลักษณะส่วนใหญ่เป็นเซลล์เปิดผนังจะเชื่อมโยงทะลุถึงกันได้ ในขณะที่ CNRLF จะมีลักษณะส่วนใหญ่เป็นแบบเซลล์ปิด และหากทำการเปรียบเทียบขนาดของฟองแต่ละแบบพบว่าฟองของยางพองน้ำที่ใช้ AHF/CRM เป็นสารตัวเติมร่วมจะให้ฟองที่มีขนาดเล็กกว่ายางพองน้ำแบบอื่น ยางพองน้ำ ACNRLF จึงมีค่าความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลสูงกว่ายางพองน้ำที่ไม่ใช้สารตัวเติม



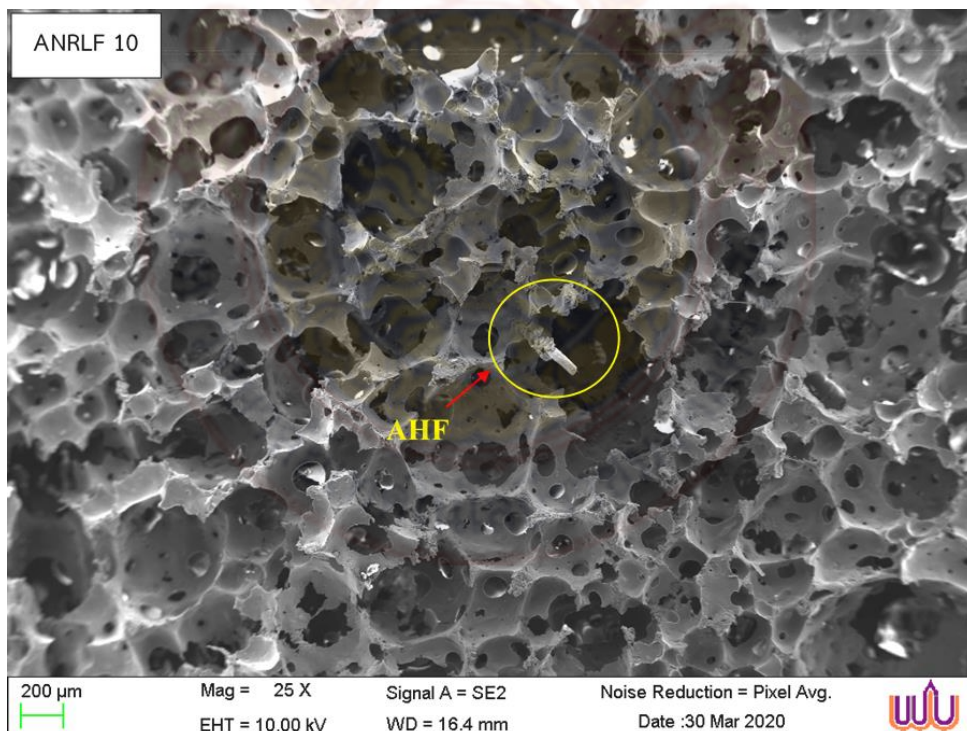
ภาพที่ 44 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติ (NRLF) ที่ไม่ใช่สารตัวเติม



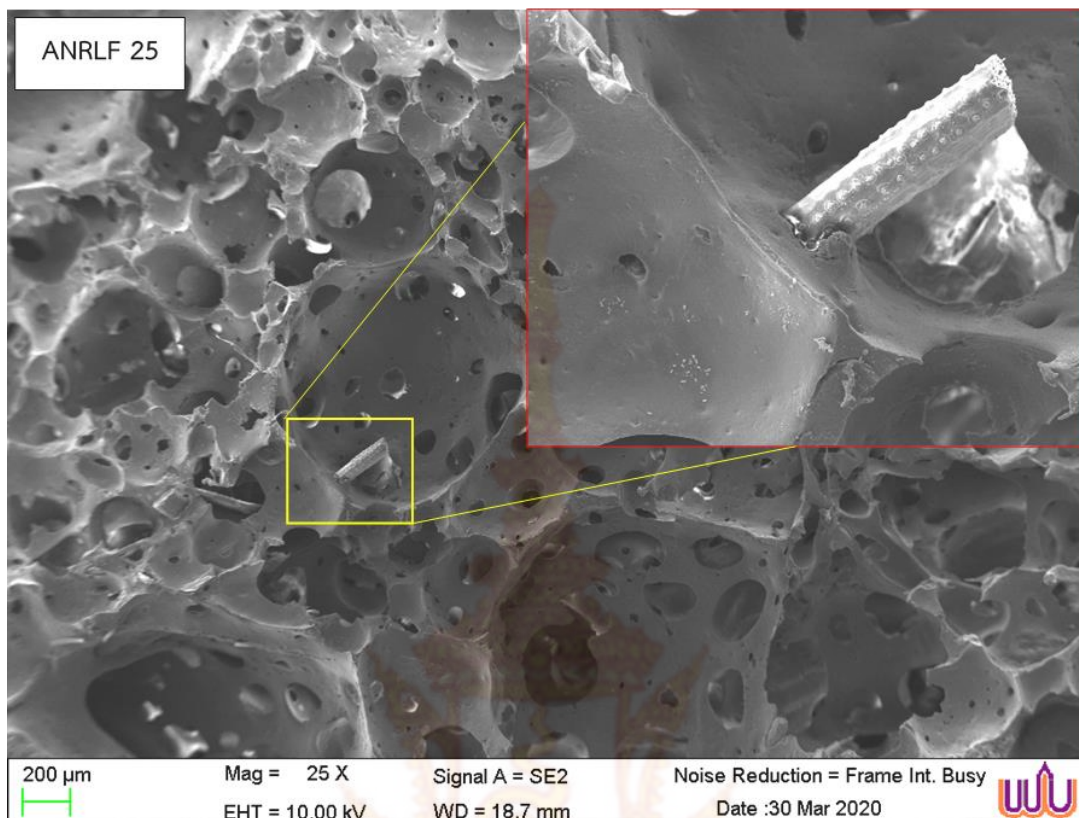
ภาพที่ 45 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางฟองน้ำใช้ AHF/CRM (50/50) ปริมาณ 10 phr (ACNRLF) เป็นสารตัวเติม



ภาพที่ 46 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้ยางครีบบปริมาณ 10 phr (CNRLF)



ภาพที่ 47 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้สารตัวเติมเส้นใยเปลือกหมากปริมาณ 10 phr (ANRLF10)



ภาพที่ 48 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางพองน้ำใช้สารตัวเติมเส้นใยเปลือกหอยมากปริมาณ 25 phr (ANRLF25)

### 3.6 สมบัติทางความร้อนของยางพองน้ำ

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA (Thermogravimetric analysis) ศึกษาพฤติกรรมของการสลายตัวที่อุณหภูมิที่เหมาะสมของพอลิเมอร์เป็นการวิเคราะห์หาช่วงเริ่มต้นของการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนเกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ จากผลการทดลองกราฟที่เกิดขึ้นมีลักษณะการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 – 800 องศาเซลเซียส โดยในช่วงแรกอุณหภูมิ 200 – 300 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำหนักของไอน้ำที่ดูดซับอยู่บนชิ้นทดสอบ ช่วงที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 300 - 400 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการสลายตัวอย่างรวดเร็วของยางพองน้ำ ซึ่งถือว่าเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมาก สูญเสียน้ำหนักไปประมาณร้อยละ 95 - 99 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักชิ้นทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 17 ซึ่งเป็นช่วงที่ยางพองน้ำถูกเผาไหม้และเมื่อระบบมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นการเผาไหม้ของยางพองน้ำจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เป็นการสลายตัวของเซลลูโลสหรือสารอินทรีย์ในช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป มีการ

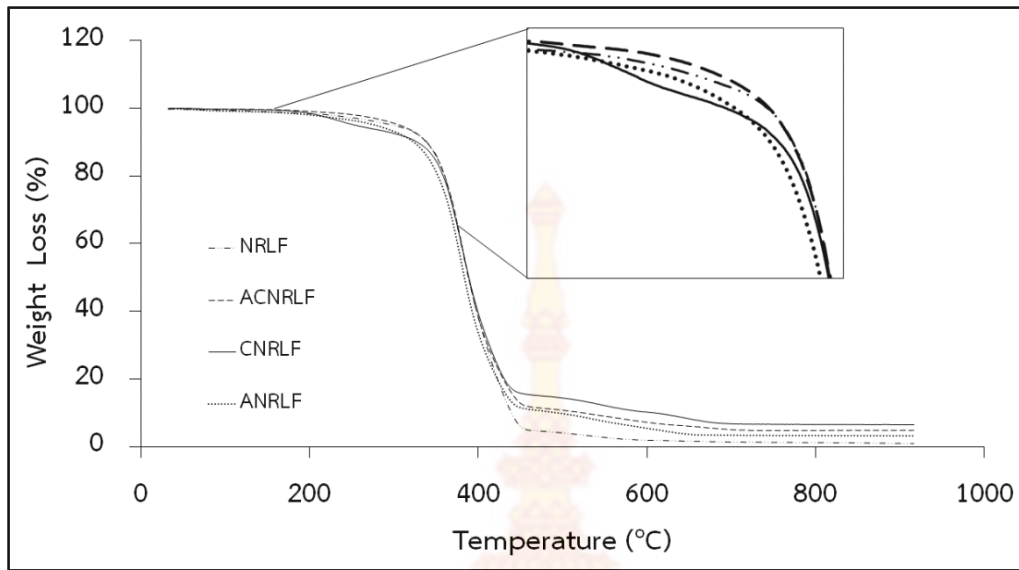
สลายตัวทางความร้อนของเซลลูโลส ลิกนิน หรือสารอินทรีย์ เนื่องจากเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ จนเกิดการสลายตัวกลายเป็นเถ้า (residual) โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักอีก

ตารางที่ 17 สมบัติเชิงความร้อนของยางพองน้ำชนิด NRLF, ANRLF, CNRLF และ ACNRLF

Sample Code	Degradation Temperature (°C)		Maximum Weight Loss (%)	Temperature at Maximum Weight Loss (°C)	Final Char Residue (%)
	T <sub>d5</sub>	T <sub>d10</sub>			
	NRLF	297.7	338.85	98.94	379
ACNRLF	307.21	338.30	95.16	382	4.84
CNRLF	277.75	323.55	96.82	379	3.20
ANRLF	254.27	327.58	93.53	382	6.47

จากตารางที่ 17 พบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าคงเหลือของยางพองน้ำ ANRLF มีค่าสูงสุดคือ 6.47% มากกว่าสูตร ACNRLF, CNRLF และ NRLF ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นเป็นเถ้าที่ได้จากการสลายตัวอย่างช้าๆของลิกนิน และพบว่าสูตร ANRLF เป็นสูตรที่ใช้ AHF เป็นสารตัวเติมเพียงชนิดเดียวในปริมาณ 10 phr จึงมีปริมาณเถ้ามากกว่าสูตร ACNRLF เป็นสูตรที่ใช้สารตัวเติมร่วมระหว่าง AHF/CRM สัดส่วน 50/50 และสูตร CNRLF กับ สูตร NRLF ซึ่งไม่มี AHF เป็นองค์ประกอบปริมาณเถ้าจึงน้อยมาก (Fikri *et al.*, 2014) อุณหภูมิการเสื่อมที่ระดับ 5 และ 10 % พบว่ายางพองน้ำ ACNRLF จะมีอุณหภูมิการเสื่อมสูงกว่า NRLF, CRLF และ ANRLF ตามลำดับ จากการทดลองเปรียบเทียบระหว่างยางพองน้ำ NRLF, ANRLF, CNRLF และ ACNRLF ได้ผลดังภาพที่ 49 พบว่าที่ระดับอุณหภูมิการเสื่อม 5% ยางพองน้ำ ANRLF มีความเสถียรทางความร้อนต่ำที่สุดเนื่องจากเส้นใย AHF มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสมีอุณหภูมิการสลายตัว 200 – 400 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่ายางวัลคาไนซ์ สูตร ANRLF เป็นสูตรที่ใช้เส้นใย AHF เพียงชนิดเดียวจึงทำให้อุณหภูมิการเสื่อมมีค่าต่ำกว่ายางพองน้ำสูตรอื่น (Fikri *et al.*, 2014) และ ACNRLF มีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่ายางพองน้ำที่ใช้สารตัวเติมเพียงชนิดเดียวและทนความร้อนได้มากขึ้น





ภาพที่ 49 สมบัติเชิงความร้อนของยางพองน้ำชนิด NRLF, ANRLF, CNRLF และ ACNRLF

### 3.7 เบาะรถจักรยานยนต์ต้นแบบ

จากผลการดำเนินงานและผลการทดลองข้างต้นสามารถนำสภาวะที่ได้จากการทดลองมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบเบาะรถจักรยานยนต์ที่มีเส้นใยเปลือกหอยมากเป็นสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความแข็งแรงของยางพอง ได้ต้นแบบดังภาพที่ 50



ภาพที่ 50 เบาะรถจักรยานยนต์ต้นแบบที่มีเส้นใยเปลือกหอยมากเป็นสารตัวเติม

## บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 4.1 ผลของขนาดเส้นใยเปลือกหมากที่ส่งผลต่อสมบัติของยางพองน้ำ

ยางพองน้ำที่ใส่เส้นใยเปลือกหมากจะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงดีกว่ายางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่เส้นใยเปลือกหมาก และความต้านทานต่อแรงดึงของยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เส้นใยเปลือกหมากขนาด 1.0 เซนติเมตร จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของยางพองน้ำลดลงเมื่อใส่เส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเปลือกหมากทั้ง 2 ขนาด เส้นใยเปลือกหมากขนาด 0.5 เซนติเมตร ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่าเส้นใยขนาด 1.0 เซนติเมตร เมื่อเทียบปริมาณเดียวกัน เส้นใยเปลือกหมากที่ขนาด 0.5 เซนติเมตร จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นสูงกว่าขนาด 1.0 เซนติเมตร และเมื่อปริมาณของเส้นใยเปลือกหมากเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของยางพองน้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยทั้ง 2 ขนาด

### 4.2 ผลของปริมาณและการปรับสภาพผิวเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติของยางพองน้ำ

การใช้ AHF ที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วย NaOH (treat-AHF) เป็นสารตัวเติมในยางพองน้ำ ส่งผลให้ยางพองน้ำที่ได้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความหนาแน่นสูงกว่ายางพองน้ำที่ใช้ AHF ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว (untreat-AHF) แต่สมบัติความสามารถในการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำที่ใช้ treat-AHF มีค่าต่ำกว่ายางพองน้ำที่ใช้ untreat-AHF

ผลของปริมาณเส้นใยเปลือกหมากต่อสมบัติเชิงกล สมบัติของยางพองน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืด ณ จุดขาด เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่สมบัติเชิงกลของยางพองน้ำจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยที่ใช้มากกว่า 15 phr ต่างจากสมบัติความหนาแน่น ค่าความหนาแน่นและความต้านทานต่อแรงกดของยางพองน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยุบตัวและค่าเปอร์เซ็นต์การผิดรูปถาวรหลังการกดของยางพองน้ำจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### 4.3 ผลจากการใช้เส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครัมป์ต่อสมบัติของยางพองน้ำ

ยางพองน้ำที่ใช้เส้นใยเปลือกหมากร่วมกับยางครัมป์ ที่สัดส่วนระหว่าง AHF/CRM ทุกสัดส่วนจะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อใช้ AHF/CRM ในปริมาณที่สูงขึ้น และจะสูงกว่ายางพองน้ำสูตรที่ไม่ใส่ AHF/CRM ในขณะที่สมบัติความสามารถในการยืด ณ จุดขาดจะให้ผลในทางตรงข้ามกันคือจะให้ค่าลดลงเมื่อปริมาณการใช้ AHF/CRM เพิ่มขึ้นและเมื่อใช้เส้นใยขนาด 0.5 เซนติเมตร ร่วมกับ CRM จะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงกด สูงกว่าการใช้เส้นใยขนาด 1.0 เซนติเมตร ยางพองน้ำสูตรที่ใส่ AHF/CRM ความหนาแน่น และความต้านทานต่อแรงกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้ง 2 ขนาด (0.5 และ 1.0 เซนติเมตร) เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยางพองน้ำสูตรไม่ใส่ AHF/CRM กับยางพองน้ำที่ใช้ AHF/CRM เป็นสารตัวเติมมีแนวโน้มทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การผิรูปลถาวรหลังการกดมีค่าน้อยกว่ากรณีไม่ใส่ AHF/CRM นั้นหมายถึงสามารถยืดหยุ่นและคืนตัวได้ดีทั้งขนาด 0.5 และ 1.0 เซนติเมตร ยางพองน้ำที่เติม AHF และ CRM แสดงลักษณะเซลล์เปิดและเซลล์ปิด ตามลำดับ ค่าความเสถียรต่อความร้อนของยางพองน้ำที่เติมสารตัวเติมร่วม AHF/CRM แสดงค่าความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่า NRLF และยางพองน้ำที่เติมสารตัวเติมเพียงชนิดเดียว



## บรรณานุกรม

- กัลทิมา เชาวน์ชาญชัยกุล และ วัลลภ หาญณรงค์ชัย. 2558. การผลิตวัสดุดูดซับเสียงจากวัสดุผสมยาง โฟมธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติ. รายงานฉบับสมบูรณ์ “การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ วัสดุผสมพีวีซีและผงซีลี้อยไม้ ภายใต้สภาวะการใช้งานที่มีความชื้น” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร.
- กุชชานา ยาวออาซัน. 2561. การพัฒนาสูตรยางฟองน้ำจากน้ำยางธรรมชาติเพื่อผลิตสื่อการสอน สำหรับเด็ก. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2561
- จันทร์เพ็ญ ชุมแสง และ พิทักษ์ อุปัญญา. 2556. รายงานการวิจัย การสร้างมูลค่าเพิ่มวัสดุเหลือทิ้งจาก ตาลโตนดแบบมีส่วนร่วมของชุมชนโดยการจัดการองค์ความรู้ภาคปฏิบัติการชุมชน. ได้รับ ทุนอุดหนุนการทำจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- จุฑาทิพย์ และคณะ. 2555. แนวทางการพัฒนาอย่างประหยัดพลังงานจากยางธรรมชาติความหนืดต่ำ ซิลิกาเมสเตอร์แบท. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. กรุงเทพมหานคร. 32 น.
- จุฑาทิพย์ อาจชมพู. 2558. การประยุกต์ใช้น้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเตอร์แบทร่วมกับน้ำ ยางคลอโรพรีนในอุตสาหกรรมยางรองพรม. รายงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- ชลดา และคณะ. 2548. การเตรียมยางธรรมชาติเหลวและการนำไปใช้. กลุ่มโครงการวิจัยขนาดเล็ก วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ – มอ.7
- ชินรัตน์ ลากพูลธนะอนันต์. 2558. เทคโนโลยีและทดสอบโฟมยางจากน้ำยางธรรมชาติ. เครือข่าย พัฒนาอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ฐิตินันท์ พัวตระกูล. ทวีศักดิ์ พลายรักษา และ ภาพพิมพ์ ชัยศิริวารินทร์. การผลิตฟองน้ำยางธรรมชาติ โดยเข้าพิมพ์อูมิเนียม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ฐิตินันท์ รัตนพรหม. 2555. การเสริมแรงยางฟองน้ำด้วยถั่วลอ. การประชุมวิชาการสมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่13 4-5 เมษายน 2555. เชียงใหม่. หน้า 743-750.
- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. จักริน พรหมจรัสสุ. เสกสรร อินทร์ฤทธิ์. เอกมัย วิมลมาลา. และชัชวาล กัลป์ ทะลา. 2547. การผลิตไม้พีวีซีจากผงซีลี้อยไม้ยางพารา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี.กรุงเทพมหานคร
- ตรีญญา มุลชัย และ อรุณศรี เอี่ยมรัมย์. 2556. อิทธิพลของร้าสกัดน้ำมันต่อสมบัติของฟองน้ำยาง ธรรมชาติ. ว.วิทย์. มข. 41(4) 1019-1029.

- ถิราวูธิ และคณะ. 2557. การศึกษาการนำซิลิกาที่ปรับปรุงด้วยเทคนิคแอตไมเซลล์าร์พอลิเมอร์โรเซชันใช้กับน้ำยางธรรมชาติ.
- ธีรพงศ์ ชีรัมย์ ไพรัช อุศุภรัตน์ และ หาญพล พึ่งรัมย์. 2559. การพัฒนาฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต ครั้งที่ 6
- บุญญาวิช อินทรพัฒน์. 2555. สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. ปีที่ 14, 30-43.
- พรทิพย์ ประกายมณีวงศ์ นุชนาฏ ณ ระนอง ณพรัตน์ วิชิตชลชัย วิภาวี พัฒนกุล และ สุมนา แจ่มเหมือน. 2553. การพัฒนาสูตรและเทคนิคการผลิตยางพองน้ำเพื่อลดต้นทุนการผลิตและสร้างเครื่องต้นแบบ. กรมวิชาการเกษตรสถาบันวิจัยยาง.
- รัตนา ตันทเทอดธรรม วุฒินันท์ คงทัด และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2553. การศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติกับเส้นใยกาบมะพร้าวและปาล์มน้ำมัน. การประชุมทางวิชาการของสถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 8, หน้า 17-24
- วรรณฯ ยงพิศาลภพ. 2561. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2561-63 อุตสาหกรรมรถจักรยานยนต์. เข้าถึงได้จาก <https://www.krungsri.com>
- วรารณณ์ ขจรไชยกูล. 2537. เอกสารวิชาการ ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ: หน้า 46.
- วิภาวี พัฒนกุล. 2554. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. กลุ่มอุตสาหกรรมวิจัยยาง.
- สมเจตน์ พัชรพันธ์ พัฒนะ รักความสุข นุชนาฏ ณ ระนอง ศกุนธิ สมบูรณ์วิทย์ และ รุ่งอรุณ ประเสริฐศักดิ์. 2550. การผลิตฉนวนความร้อนจากเส้นใยหญ้าแฝกและน้ำยางธรรมชาติ. ภาควิชาอุตสาหกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. ฉบับที่ 61, ปีที่ 20.
- สุทธิพร เนียมหอม. 2551. การพัฒนาเครื่องปอกเปลือกหุ้มมาก. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี และ นทีภัทร เพชรรัตนมณี. ผลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อการทำพองน้ำยางธรรมชาติ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- อรอุษา สรวารี. 2546. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- อาชีชัน แกสมาน วิลาสินี รัตน์ะ และ เจริญ นาคะสรรคร์. อิทธิพลของสบู่อต่อการเกิดพองในน้ำยางธรรมชาติ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- Chapman, W.H., Ponde, D.W. and Murphy, E.A. 1930. Improvement in or relating to the Manufacture of good of rubber or semilor material.

- Fikri, A.K., Hanafi, I. and Zulkifli, M.A. 2014. Mechanical and morphological properties of kenaf powder filled natural rubber latex foam. *Malaysian Journal of Microscopy*, vol. 10, pp. 106-111, 2014.
- Ismail, H., Nordin, R. and Noor, A.M. 2002. Cure characteristics, tensile properties and swelling behaviour of recycled rubber powder-filled natural rubber compounds *Polymer Testing*, 21 (565–569).
- Karim, A., Ismail, H. and Ariff, Z. 2018. Effects of kenaf loading and alkaline treatment on properties of kenaf filled natural rubber latex foam. *Sains Malaysiana*, 47, 2163-2169.
- Kudori, S.N.I., Ismail, H. and Shuib, R.K. 2019. Kenaf core and bast loading vs. properties of natural rubber latex foam (NRLF). *Bioresources*, 14(1), 1765-1780.
- Li, X., Tabil, L.G. and Panigrahi, S. 2007. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites : A review. *Journal of Polymers and the Environment*. 15: 25-33.
- Lim, H. M., Singh, M., and Geraghty, M. 2018. Oil Palm Trunk Fibre Filled natural Rubber Latex Biocomposite Foam. *Journal of Rubber Research* 21(3):182-193.
- Mohanty, A. K., Misra, M. and Drzal, T. L. 2005. Natural fibers, Biopolymers, and biocomposites. Taylor & Francis Group. America.
- Perera, D.G.P.M., Kumanayaka, T.O. and Walpalage, S. 2015. Effect of Zeolite on the Properties of Natural Rubber Foams. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(9):1-4.
- Ramasamy S., Ismail H. and Munusamy, Y. 2013. Effect of Rice Husk Powder on Compression Behavior and thermal Stability of Natural Rubber Latex Foam. *Bioresources*, 8(3):4258-4269.
- Ramasamy, S., Ismail, H. and Manusamy, Y. 2012. Preparation and characterization of rice husk powder incorporated natural rubber latex foam. *Advanced Materials Research*, 626, 523-529.
- Rattanapan, S., Artchomphoo, J. and Wichianchom. A. 2018. Effect of Waste Tire Powder on the Properties of Natural Rubber Latex Foams. The 9th Rajamangala University of Technology International Conference “RMUT Driving Innovation for Thailand4.0”(Proceeding)

- Sameni, J.K., Ahmad, S.H. and Zakaria, S. 2002. Effects of processing parameters and graft-copolymer (propylene/maleic anhydride) on mechanical properties of thermoplastic natural rubber composites reinforced with wood fiber. *Plastic, Rubber and Composite*, 31:162-165 p.
- Vinson.J.R. and Sierkowski, R. L. 2002. *The behavior of structures composite materials* second Edition, Kluwer Academic Publishers

