



รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทช์ในยางร่วมกับยาง EPDM
เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์หลังคายาง

The applications of natural rubber silica masterbatch in
NR/EPDM blends for natural rubber roofs



จุฑาทิพย์ อัจฉมณู Jutatip Artchomphoo
อนุชิต วิเชียรชม Anuchit Wichianchom

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2558



รายงานการวิจัย

การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติซิลิกา มาสเตอร์แบทช์ในยางร่วมกับยาง EPDM
เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์หลังคายาง

The applications of natural rubber silica masterbatch in
NR/EPDM blends for natural rubber roofs



จุฑาทิพย์ อัจฉมภู Jutatip Artchomphoo
อนุชิต วิเชียรชม Anuchit Wichianchom

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2558

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง “การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติซิลิกาพลาสเตอร์แบบทึบในยางผสมร่วมกับยาง EPDM เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์หลังคายาง” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้ให้การสนับสนุนสถานที่ และเครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีการยางที่ช่วยเหลือในงานทดลองและเก็บข้อมูลจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

จุฑาทิพย์ อัจฉมณ
อนุชิต วิเชียรชม



การประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมร่วมกับยาง EPDM เพื่อพัฒนา ผลิตภัณฑ์หลังคายาง

จุฑาทิพย์ อาจชมภู และอนุชิต วิเชียรชม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมหลังคายางจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (NR/EPDM) โดยใช้ยางผสมที่สัดส่วนยางอีพีดีเอ็ม 30 phr และ 50 phr แปรปริมาณสารตัวเร่ง เตตระเมธิล ไฮยูเรม ไดซัลไฟด์ (TMTD) ปริมาณ 0.3 และ 0.5 phr และสารตัวเติมซิลิกาในรูปผงและมาสเตอร์แบท ศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของหลังคายาง พบว่าการใช้ TMTD 0.5 phr ให้ scorch time และ cure time ที่เหมาะสม การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทเป็นสารตัวเติมในยางผสมทั้งซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด (NRmSi) และจากน้ำยางธรรมชาติความหนืดต่ำ (LNRmSi) โดยการใช้ร่วมกับเขม่าดำและไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าการใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทให้ scorch time สูงกว่าการใช้ซิลิกาผง แต่ให้ cure time ลดลง จึงเป็นจุดเด่นในการปรับปรุงสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางที่ใช้ซิลิกา นอกจากนี้ยางผสมที่ใช้ NRmSi และ LNRmSi ยังให้สมบัติเชิงกล ทั้งมอดูลัสที่ระยะยืด 100% มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผง (NRpSi) ทั้งยางผสมที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50

คำสำคัญ มาสเตอร์แบท ซิลิกา ยางธรรมชาติ ยางอีพีดีเอ็ม หลังคายาง

The applications of natural rubber silica masterbatch in NR/EPDM blends for natural rubber roofs

Jutatip Artchomphoo and Anuchit Wichianchom

ABSTRACT

The objective of this work was analyzed the rubber roofs from natural rubber and ethylene propylene diene monomer (NR/EPDM) blends. The effects of NR/EPDM ratio (70/30 and 50/50 %wt), amount of TMTD (0.3 and 0.5 phr) and silica filler (powder and masterbatch) on cure characteristics and physical properties of rubber roof were investigated. The results reveal that the TMTD 0.5 phr showed appropriate scorch time and cure time. The use of silica masterbatch as a filler in rubber blends including silica masterbatch from fresh latex (NRmSi) and from low viscosity natural rubber (LNRmSi) by combining with carbon black and titanium dioxide were used in this work. It was found that the addition of silica masterbatch provided higher scorch time than silica powder but with a reduced cure time. It is a prominent feature in improving the vulcanization properties of silica filled rubber. In addition, the NRmSi and LNRmSi blends enhance mechanical properties such as 100% modulus, 300% modulus, tensile strength and elongation at break, which are higher than NRpSi blended rubber in both 70/30 and 50/50 ratio.

Key words : masterbatch; silica; natural rubber; EPDM rubber; roof

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1. บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2. การตรวจเอกสาร.....	3
บทที่ 3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย.....	25
วัสดุและสารเคมี.....	25
อุปกรณ์และเครื่องทดสอบ.....	25
วิธีการทดลอง.....	30
บทที่ 4. ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย.....	36
บทที่ 5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด	5
2.2 ปัจจัยที่ทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น	8
3.1 สูตรการเตรียม 20% Silica dispersion	31
3.2 สูตรยางคอมปาวด์อีพีดีเอ็มที่ใช้ศึกษาเวลาในการ preheat	32
3.3 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์หลังคายางที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 70/30	34
3.4 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์หลังคายางที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 50/50	35
4.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัมของยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท และยางธรรมชาติลดความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบท	38
4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM ที่ใช้สารตัวเร่ง TBBS 1.8 phr ร่วมกับ TMTD 1.0 phr และแปรเวลาในการ preheat	40
4.3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM ที่มีปริมาณสารตัวเร่งแตกต่างกัน	41
4.4 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ	42
4.5 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ	44
4.6 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์	50
4.7 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์	52

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ	3
2.2 การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่อายุต่างๆ กัน	6
2.3 ปฏิกริยาของสารควบคุมความหนืด	12
2.4 โครงสร้างยางอีพดีเอ็ม	12
2.5 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา	14
2.6 ลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกา	15
2.7 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์	20
3.1 เครื่องกวนน้ำยาง	27
3.2 เครื่องรีดยาง	27
3.3 เครื่องผสมแบบปิด	27
3.4 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง	28
3.5 เครื่องอัดเบ้า	28
3.6 เครื่องทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์	28
3.7 เครื่องชั่งไฟฟ้า	29
3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง	29
3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	29
3.10 เครื่องวัดความหนืด	30
4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท : ซิลิกา 40 phr (ก) และ ซิลิกา 43 phr (ข)	36
4.2 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท : ซิลิกา 40 phr (ก) และซิลิกา 43 phr (ข)	37
4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัมของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท	38
4.4 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM ที่สัดส่วน 50/50 ในระยะเวลาการ preheat ต่างกัน	39
4.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM : scorch time ของสัดส่วน 70:30 (ก) 50:50 (ข) cure time ของสัดส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน 70:30 (ก) และ สัตส่วน 50:50 (ข)	45
4.7 มอดูลัสก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : ที่ระยะยืด 100% ของสัตส่วน 70:30 (ก) 50:50 (ข) ที่ระยะยืด 300% ของสัตส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)	46
4.8 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน 70:30 (ก) และสัตส่วน 50:50 (ข)	47
4.9 ความสามารถในการยืดขาดก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน 70:30 (ก) และสัตส่วน 50:50 (ข)	48
4.10 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM : scorch time ของสัตส่วน 70:30 (ก) 50:50 (ข) cure time ของสัตส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)	51
4.11 ความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน 70/30 (ก) และ สัตส่วน 50/50 (ข)	53
4.12 มอดูลัสก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : ที่ระยะยืด 100% ของสัตส่วน 70:30 (ก) 50:50 (ข) ที่ระยะยืด 300% ของสัตส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)	54
4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน 70/30 (ก) และสัตส่วน 50/50 (ข)	55
4.14 ความสามารถในการยืดขาดก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน 70/30 (ก) และสัตส่วน 50/50 (ข)	56

บทที่ 1 บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ทำให้ต้องใช้พลังงานในการใช้เครื่องปรับอากาศภายในอาคาร สำนักงาน หรือที่พักอาศัยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ใช้สำหรับเครื่องปรับอากาศ (Chirattananon and Taweekun, 2002) การลดความร้อนเข้าสู่ภายในตัวอาคารโดยการติดตั้งวัสดุฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา เป็นวิธีหนึ่งในการช่วยลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ อย่างไรก็ตามการใช้ฉนวนกันความร้อนยังมีปัญหาหลายด้าน เช่น การออกแบบติดตั้ง การบำรุงรักษา การหลุดลอก และการเสื่อมสภาพของฉนวนกันความร้อน เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์หลังคาอาจเป็นทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้หลังคาชนิดอื่นๆ เพื่อลดพลังงานได้ เพราะมีสมบัติเด่นด้านความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีกว่าหลังคากระเบื้องทั่วไปประมาณ 2-3 เท่า (ณรงค์ฤทธิ์ และคณะ, 2548) แต่ยังมีปัญหาด้านการทนต่อสภาวะแวดล้อม การหลุดลอกของสีเมื่อสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติด้อยด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เกิดการเสื่อมได้ง่ายจากออกซิเจน ความร้อนและโอโซน ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งานในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร การยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปทำได้โดยการใส่สารแอนติออกซิแดนท์ร่วมกับแอนติโอไซด์ ซึ่งสารป้องกันการเสื่อมเหล่านี้มีโอกาสเกิดการชะล้างได้ง่ายในสภาวะการใช้งานนอกอาคาร และสารที่มีประสิทธิภาพสูงคือ กลุ่มอะมีนและอนุพันธ์ ยังมีข้อจำกัดที่ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีสีคล้ำเท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติตกสี ทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาการทนต่อสภาพแวดล้อม คือการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็มแต่มักจะได้อย่างเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลด้อย เนื่องจากมีปัญหาความแตกต่างของอัตราการวัลคาไนซ์และปัญหาการกระจายตัวของสารตัวเติมในเฟสยางทั้งสอง (Chapman and Tinker, 2003) อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารตัวเติมเสริมแรงอย่างซิลิกาจะช่วยให้ยางเบลนด์ที่ได้ มีสมบัติเชิงกลที่ดีและทนทานต่อการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้พบว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทช์จะช่วยลดปัญหาการผสมคอมพาวด์ ทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของซิลิกาในเฟสยาง เกิดการเสริมแรงที่ดีขึ้นและให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้ในรูปซิลิกาผงปกติ (Artchomphoo and Boonsong, 2013)

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์หลังคาจากยางธรรมชาติเบลนด์กับยาง EPDM โดยเลือกใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปแบบซิลิกามาสเตอร์แบทช์จากน้ำยางสด และน้ำยางสดที่ผ่านการลดความหนืดร่วมกับสารตัวเติมซิลิกา ร่วมกับเขม่าดำ และซิลิกา ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้ได้จุดเด่นด้านการทนต่อสภาพแวดล้อมจากยาง EPDM การเสริมความเป็นฉนวนความร้อนของยางธรรมชาติและช่วยสะท้อนแสงอาทิตย์จากการใช้ซิลิกาและไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้เกิดการเสริมแรงที่ดีและให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าจากการใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทช์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์หลังคาที่มีสมบัติที่เหมาะสมในทุกด้านทั้งการแปรรูปผลิตภัณฑ์ สมบัติเชิงกลและอายุการใช้งานสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของซิลิกาเมสเทอร์แบทต่อสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตร NRmSi/EPDM และ LNRmSi/EPDM เทียบกับยางผสมที่ใช้ซิลิกาผง
2. เพื่อศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์หลังคายางที่ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเคมีดำ และซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อทำผลิตภัณฑ์หลังคายางจากยางผสม
3. เพื่อศึกษาปริมาณสารตัวเร่ง และเวลาในการ preheat ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางอีพีดีเอ็ม

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผลของซิลิกาเมสเทอร์แบทในยางผสมสูตร NRmSi/EPDM และ LNRmSi/EPDM เทียบกับยางผสมที่ใช้ซิลิกาผงที่สัดส่วนการผสม 70/30 และ 50/50 ใช้เทคนิคการเบรนต์แบบรีแอกทีฟต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพ
2. ศึกษาสมบัติคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์หลังคายางที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบทที่สัดส่วนการเบลนด์ NR/EPDM เท่ากับ 70/30 และ 50/50 ในปริมาณสารตัวเติมซิลิกา 40 และ 43 phr
3. ศึกษาการทำผลิตภัณฑ์ยางจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ และยางอีพีดีเอ็ม

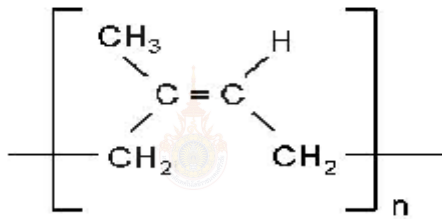
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การพัฒนางานวิจัยต่อยอดงานจากการเตรียมยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง
2. ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ เป็นแนวทางเพิ่มมูลค่าให้ยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศ โดยสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งอุตสาหกรรมยางต้นน้ำ และปลายน้ำ
3. ด้านวิชาการ องค์ความรู้ใช้พัฒนาการเรียนการสอน การทำโครงการของนักศึกษา และเผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปแบบบทความวิจัยในวารสารวิชาการทั้งในประเทศ และต่างประเทศ

บทที่ 2 การตรวจเอกสาร

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลง และกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (abrasion resistance) สูง



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ

ที่มา : Burak *et al.* (2005)

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติดีเยี่ยมด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ สายพานยาง เป็นต้น แต่ยางธรรมชาติที่เป็นยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กล่าวคือ ยางจะอ่อนตัวเยิ้ม และเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยาง จำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน เรซิน และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น

หลังจากการบดผสมยางหรือยางคอมปาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อน และความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น สมบัติของยางธรรมชาติสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง และมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ยางรัดของ เป็นต้น

2. สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูงในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat buildup) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบินหรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

3. ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิสูงจึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระป๋องน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อนยางที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

4. ข้อเสียของยางธรรมชาติ คือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดดออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) มากทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน และโอโซน โดยมีแสงแดด และความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารในกลุ่มของการป้องกันการเสื่อม (antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมัน สารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันหรือสารเคมีดังกล่าว

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ ขณะเป็นน้ำยางสดจะมีสีขาวหรือขาวออกเหลือง มีความหนืดประมาณ 12-15 เซนติพอยส์ (บุญธรรม, 2532) มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเป็นกรด-เบส (pH) เท่ากับ 6.5-7.0 นอกจากนี้มีส่วนประกอบของสารต่างๆในปริมาณที่ไม่คงที่แตกต่างกัน เช่น อายุของยาง พันธุ์ยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น โดยยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 95 ที่เหลือเป็นโปรตีนไขมัน และเกลืออนินทรีย์อื่นๆ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1,300,000 กรัม/โมล

น้ำยางธรรมชาติเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่งประกอบด้วยสารที่มีน้ำเป็นตัวกลางนอกจากนี้ในส่วนที่เป็นของเหลวยังมีส่วนที่ไม่ใช่ยางอยู่ในรูปของสารแขวนลอย และสารละลายอีกด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
สารที่เป็นของแข็ง	27-48
เนื้อยางแห้ง	25-45
สารพวกโปรตีน	1-1.5
สารพวกเรซิน	1-2.5
ซีเล้า	สูงถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100

ที่มา : Blackley (1997)

องค์ประกอบของน้ำยางในยางธรรมชาติมีทั้งส่วนที่เป็นยาง และส่วนประกอบอื่นๆ ไม่ใช่ยาง ดังนี้

1. อนุภาคยาง ถูกห่อหุ้มด้วยสารพวกไขมัน และโปรตีน โดยโปรตีนจะอยู่ชั้นนอก และอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงปะปนอยู่ปริมาณเล็กน้อยประมาณ 0.5% อนุภาคเม็ดยางประกอบด้วยสารพวกไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีพอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene)

2. โปรตีน ส่วนของสารพวกโปรตีนที่ห่อหุ้มตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยาง มีอยู่ประมาณ 25% ของโปรตีนทั้งหมดที่อยู่ในน้ำยาง อีก 50% อยู่ในชั้นน้ำ และอีก 25% จะปะปนในส่วนของสารลูทอยด์ โปรตีนส่วนที่อยู่ในน้ำยางส่วนใหญ่จะเป็นชนิดแอลฟาไกลูบูลิน และฮีวิน (α -Globulin and hevein)

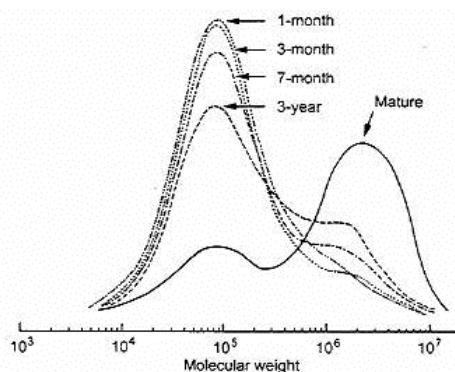
3. ไขมัน จะอยู่ระหว่างผิวของอนุภาคยาง และโปรตีน ส่วนใหญ่เป็นสารพวกฟอสโฟไลปิดชนิดแอลฟาเลซิธิน (α -Lecithin) เชื่อว่าทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะอยู่บนผิวของอนุภาคยาง

4. ส่วนที่เป็นน้ำหรือเซรัม ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกรดอะมิโน

5. ส่วนของลูทอยด์ และสารอื่นๆ ลูทอยด์เป็นอนุภาคค่อนข้างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-3.0 ไมครอน ห่อหุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียวสามารถเกิดการออสโมซิส (osmosis) ได้ง่าย การเติมน้ำลงในน้ำยางสดจะทำให้ลูทอยด์บวม และแตกง่ายอนุภาคเฟรย์วีสลิง (frey wysling) เป็นสารที่มีอนุภาคใหญ่กว่ายางแต่ความหนาแน่นน้อยกว่าประกอบด้วยสารเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์

2.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ และอายุของต้นยาง โดยค่าของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ช่วง (bimodal) ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นค่าของน้ำหนักโมเลกุลโดยน้ำหนักที่ $1.0-2.0 \times 10^5$ และ $1.0-2.5 \times 10^6$ (Tangpakdee, 1996; Tanaka, 2001) โดยสัดส่วนระหว่างส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำต่อส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีค่า

ลดลงเมื่ออายุของต้นยางมากขึ้น นั่นคือส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเห็นได้ชัดเจนในต้นยางที่มีอายุน้อยๆ และจะมีค่าลดลงเมื่ออายุของต้นยางมากขึ้น ยางส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีค่าลดลงเมื่อผ่านการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) ทั้งนี้เพราะคาดว่ายางส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นส่วนกิ่งก้าน (branching) ของสายโซ่ซึ่งเมื่อผ่านการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ส่วนของกิ่งก้านสายโซ่จะถูกตัดเปลี่ยนเป็นสายโซ่ตรง



ภาพที่ 2.2 การกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติอายุต่างๆ กัน
ที่มา : Tangpakdee and Tanaka (2001)

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยทั่วไปจะพิจารณาถึงการนำไปใช้ประโยชน์ และการเลือกใช้สารเคมีในการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีการศึกษาแล้วแบ่งตามระดับของน้ำหนักโมเลกุลที่ได้ออกเป็น 4 ประเภท (Roberts, 1988)

1. การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในระดับต่ำ ที่มีการควบคุมการเกิดการแตกย่อยของพันธะโดยจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติอยู่ในระดับ $4 \times 10^5 - 1.0 \times 10^6$ จุดมุ่งหมายเพื่อลดความหนืดของยางดิบ และเป็นการขจัดส่วนที่เป็นโครงสร้างร่างแหที่เป็นเจลที่อยู่ในยาง ซึ่งทำได้ง่ายในโรงงานทั่วไปโดยการใส่สารเคมีลงไปในยางธรรมชาติในรูปน้ำยาง หรือยางแห้งเพื่อตัดสายโซ่ของโมเลกุลยางให้สั้นลง โดยที่ความหนืดของยางไม่มีการเปลี่ยนแปลงสารที่ใช้เติมในยางจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาที่ทำให้ความแข็งของยางระหว่างการเก็บเพิ่มขึ้น

2. การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในระดับกลางโดยจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของยางธรรมชาติอยู่ในระดับ 1.5×10^5 ถึง 4.0×10^6 ยางที่ได้จะนิ่ม และมีสมบัติการติดที่ดี ทำใหยางประเภทนี้ถูกนำไปใช้งานในรูปของกาว ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ สารที่ใช้จะต้องไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อให้การออกซิเดชันมีความเสถียรเพื่อรักษาระดับของน้ำหนักโมเลกุลของยางไม่ให้ลดลงต่ำกว่าที่กำหนด เพื่อประโยชน์ในการใช้งานต่อไป

3. การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในระดับสูง ซึ่งมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง หรือที่เรียกว่า ยางเหลว (liquid rubber) โดยจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่า 150,000

4. การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในระดับพิเศษโดยจะทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำกว่า 500 ด้วยวิธีการทำไพโรไลซิส (pyrolysis) ยางที่ได้เป็นที่น่าสนใจทางด้านเคมี แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับ (Madorsky, 1964; Dulngali, 1978; Dulngali, 1979) ปกติยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุล 1.6×10^6 ถึง 2.3×10^6 จึงจำเป็นต้องมีการบดยาง (mastication) เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลงประมาณ 400,000 ถึง 500,000 ก่อนการผสมสารเคมีในกระบวนการเตรียมยางคอมพาวด์ ซึ่งในอุตสาหกรรมจะใช้แรงเฉือนจากเครื่องบดผสม (เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง หรือเครื่องผสมแบบปิด) เพื่อลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติก่อนการผสมสารเคมี ทำให้ต้องใช้พลังงานสูง และใช้เวลาในการคอมพาวด์มากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการลดขนาดโมเลกุลยังขึ้นอยู่กับสภาวะ และเทคนิคการบดด้วย การลดขนาดโมเลกุล และควบคุมความหนืดของน้ำยางสดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งทำได้โดยการเติมสารลดขนาดโมเลกุล และสารควบคุมความหนืด เช่น การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 1 phr หรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1 phr หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr และใช้ไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืดให้ยางมีขนาดโมเลกุล 4×10^5 ถึง 5×10^5 และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 (อรสา และคณะ, 2546; Akinlabi *et al.*, 2006)

2.1.3 ความหนืดของยางธรรมชาติ

2.1.3.1 ความหนืดของยางดิบ ความหนืด (viscosity) ของยางธรรมชาติมีความแปรปรวนแตกต่างกันตามปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง ฤดูกาลที่กรีดยาง อายุของต้นยาง และวิธีการผลิตความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น การผลิตการขนส่ง และการเก็บยาง ซึ่งไม่สามารถทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ มีการตั้งสมมติฐานว่าการเพิ่มความหนืดของยางเกิดจากการเชื่อมโยง (crosslinking) ของโมเลกุลยางด้วยกลุ่มอัลดีไฮด์ (aldehyde) ที่กระจายอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ดังนั้นยางธรรมชาติเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานจะเกิดการแข็งตัว เช่น ความหนืดเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์การเกิด storage hardening สามารถยับยั้งได้โดยปฏิกิริยาระหว่างยางกับไฮดรอกซิลามีน (hydroxylamine) หรือเกลือของไฮดรอกซิลามีนระหว่างการผลิต (พรรษา, 2538) ความหนืดของยางจะเพิ่มขึ้นทันทีหลังจากยางถูกกรีดยางจากต้น น้ำยางที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย 0.3% มีค่าความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) เพิ่มขึ้น 5 หน่วย แต่ถ้ารักษาสภาพน้ำยางด้วยโซเดียมซัลไฟท์หรือฟอร์มาลีน ความหนืดของยางจะไม่เพิ่มขึ้น ยางที่ได้จากการจับตัวด้วยกรด เช่น ยางแผ่นรมควัน และยางแท่ง STR5L ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนมากกว่าในยางที่มีเศษยางผสมอยู่ เช่น ยางเครฟลี้น้ำตาล ยางแท่ง STR10 และ STR20 ทั้งนี้เนื่องจากเศษยางเป็นยางที่ได้จับตัวตามธรรมชาติ ความหนืดของยางที่จับตัวตามธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าที่จับตัวด้วยกรดพบว่าการเก็บบ่มยางก่อนที่จับตัวแล้วเป็นระยะเวลาสั้น และการอบยางที่อุณหภูมิสูงมีผลให้ยางมีค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยน pH หรือการเจือจางน้ำหนักโมเลกุลของยาง และส่วนที่เป็นเจลทั้งหมดในยางจะมีผลอย่างมากจากสภาวะของการจับตัวน้ำยาง การเก็บยาง และวิธีการทำให้น้ำยางแห้งหลังจากที่ล้างด้วยน้ำ

ซึ่งการทำให้ยางแห้งหลังจากล้างด้วยน้ำมี 2 แบบ คือ วิธีแรกเป็นการทำยางแผ่นรมควัน และการทำยางแห้งโดยในยางแผ่นรมควันจะทำให้ความร้อนด้วย อากาศร้อนที่ 60 °C เป็นเวลา 5-7 วัน ส่วนยางแห้งจะให้อากาศร้อนที่ 120 °C ประมาณ 6 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามสภาวะของการทำให้ยางแห้งของยางแผ่นรมควันจะส่งเสริมให้เกิดการเจลขึ้นในยาง ส่วนการทำยางแห้งจะเป็นการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางแต่ทั้งสองแบบเมื่อเก็บไว้จะมีผลทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ต้องบดยางก่อนการแปรรูป (Toratani and Hirata, 1997)

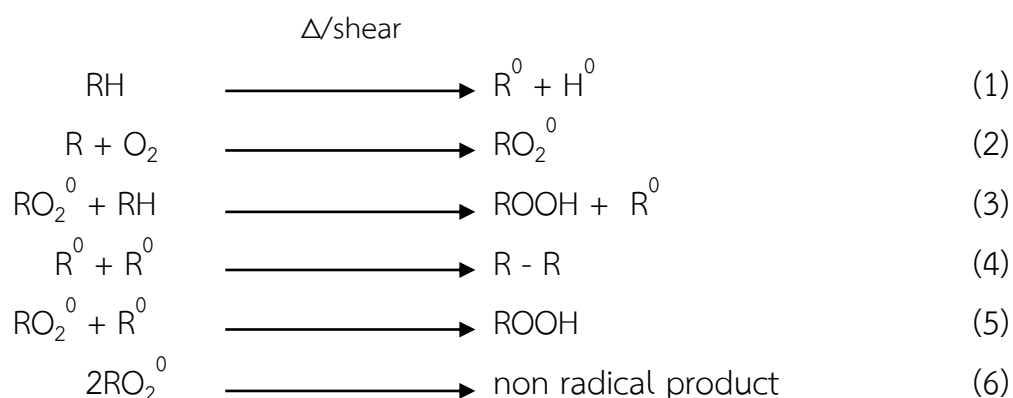
ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่ทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น

ลำดับที่	ปัจจัย	ช่วงระหว่าง	ค่าความหนืดมูนี้ที่เพิ่มขึ้น
1	เจือจางน้ำยาง (%DRC)	10-33	0-5
2	pH ของการจับตัว	4.5-5.5	0-3
3	การเก็บบ่มยางก่อนที่จับตัวแล้วก่อนวัด (ชั่วโมง)	8-48	0-6
4	การเก็บบ่มยางฝอยที่เปียกก่อนนำไปอบ (ชั่วโมง)	1-24	0-3
5	อุณหภูมิอบ (°C)	50-100	0-6

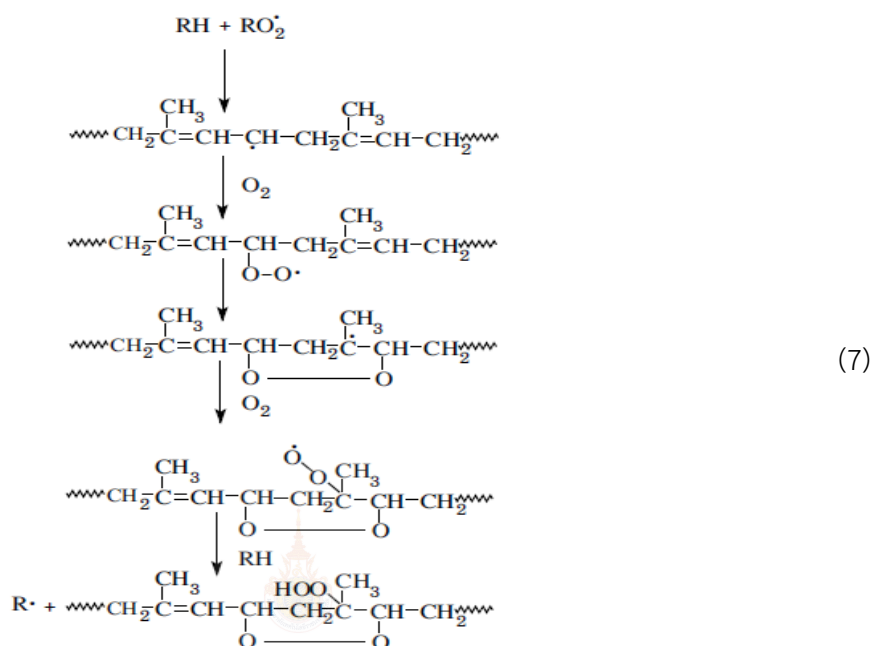
ที่มา : Sopapun (2553)

ได้มีการพยายามอธิบายการเพิ่มขึ้นของความหนืดในยางธรรมชาติมาเป็นเวลานานแล้ว ซึ่งก็มีนักวิทยาศาสตร์หลายคนได้เสนอความคิดเห็น และสามารถสรุปสาเหตุได้ 2 ประการ คือ (Bolland and Gee, 1946)

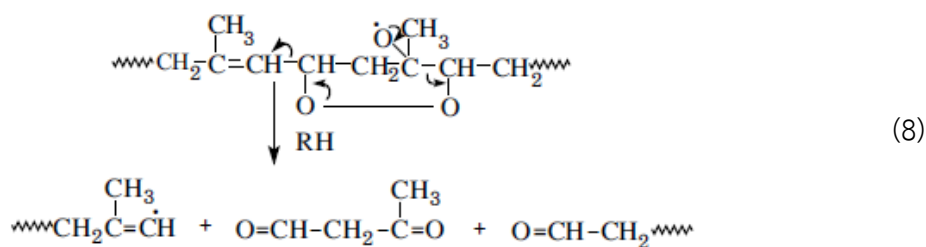
1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) มีสาเหตุการเกิดได้หลายประการ คือ ความร้อน ออกซิเจน โอโซน และอื่นๆ โดยมีหลักการสำคัญเกี่ยวกับปฏิกิริยานี้ 3 ประการ คือ ROOH คือ สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปฏิกิริยาขั้นยุดิเป็น ดังนี้



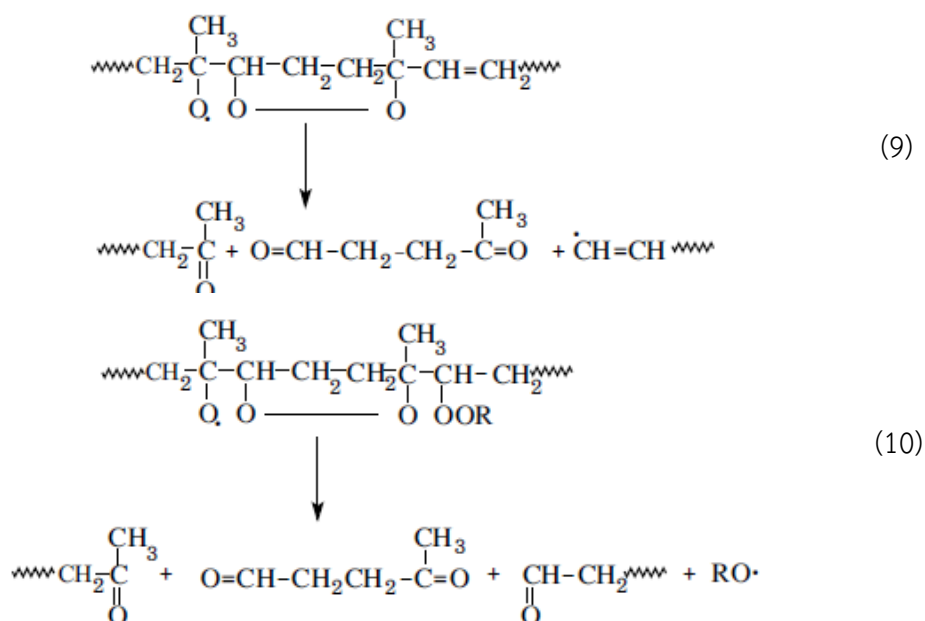
โดยปฏิกิริยาที่ (4) จะเป็นกระบวนการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง และปฏิกิริยาที่ (6) เป็นกระบวนการตัดสายโซ่ (chain scission) สำหรับในยางธรรมชาติกระบวนการออกซิเดชันเกิดคล้ายกับพวกอเลฟิน (Bevilacqua, 1955; Bamard and Lewis, 1963) ได้เสนอรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติดังสมการที่ (7) วงแหวนของไดเปอร์ออกไซด์ (cyclic diperoxide) เกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



จากสมการที่ (7) อนุมูลของอัลคอกซี (alkoxy radical) จะเกิดการแตกตัวได้เป็นบิวเทน-2-โอิน-4-อัล (butan-2-one-4-al) ซึ่งเกิดมากกว่าเลวูลินัลดีไฮด์ (levulinaldehyde) และอนุมูลไวนิล (vinyl radical) ซึ่งอาจจะถูกออกซิไดซ์ต่อได้หมู่ปลายเป็นเมทิลคีโตน (methyl ketone end groups) ดังสมการที่ (8) (Bolland and Hughes, 1949)



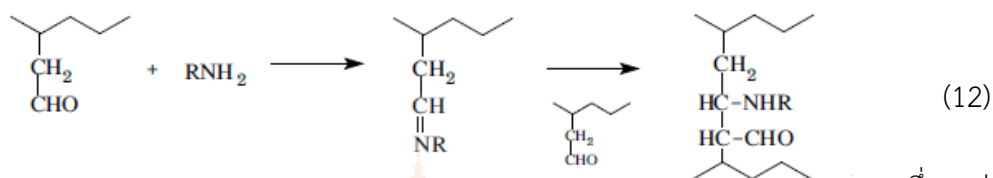
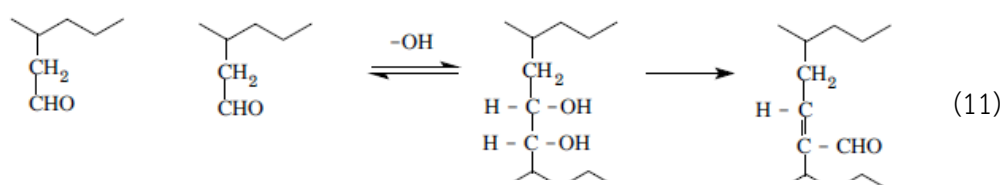
Bevilacqua (1957) เสนอว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเป็น levulinaldehyde และ terminal ketone และ terminal aldehyde group (เมื่อ vinyl radical ถูกออกซิเดชัน) ดังสมการ (9) นอกจากนี้ Mayo (1960) ได้เสนอรูปแบบปฏิกิริยาที่แตกต่างจาก bevilacqua โดยที่มีการเติมอนุมูลของเปอร์ออกไซด์ไปที่พันธะคู่แล้วตามด้วยการเติมการออกซิเดชัน/ไซโคลเซชัน (cyclization) ส่วนอนุมูลอัลคอกซี (alkoxy radical) เกิดการแยกตัวได้เป็น levulinaldehyde, terminal ketone, aldehyde group และ alkoxy radical ดังสมการที่ (10)



โครงสร้างทั้งสองรูปแบบ คือ รูปแบบที่เสนอโดย bevilacqua และ Mayo สำหรับวงแหวนเปอร์ออกไซด์ (cyclic peroxide) ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าทำไมอนุมูลเทอร์เชียรีเปอร์ออกไซด์ (tertiary peroxy radical) ถึงไม่เกิดปฏิกิริยาซ้ำๆ ตลอดสายโซ่โมเลกุล ก่อนที่จะเกิดการตั้งอะตอม

ไฮโดรเจนออกจากไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) จากข้อสันนิษฐานข้างต้นจะเห็นว่าเกิดอัลดีไฮด์ในยางปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเพิ่มขึ้นของความหนืดในยางธรรมชาติ

2. ปฏิกิริยานอนออกซิเดชัน (non-oxidation reaction) Sekhar (1961) ได้เสนอว่าภายในเซลล์ต้นยางมีหมู่คาร์บอนิลที่เกาะอยู่กับโมเลกุลยาง หมู่อัลดีไฮด์ในยางธรรมชาติจะมีโดยเฉลี่ย 1 หมู่ต่อไอโซพรีน 2500-7500 หน่วย ซึ่งหมู่คาร์บอนิลทำปฏิกิริยากับหมู่อื่นบางหมู่ เรียกว่าอัลดีไฮด์คอนเดนซิงเอเจนต์ (aldehyde condensing agent) โดยจะเป็นปฏิกิริยาอัลดอลคอนเดนเซชัน (aldol condensation) ระหว่างโมเลกุลยาง 2 โมเลกุล เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ทำให้ความแข็งแรงของยางระหว่างการเก็บเพิ่มขึ้น (Tanaka *et al.*, 1988)

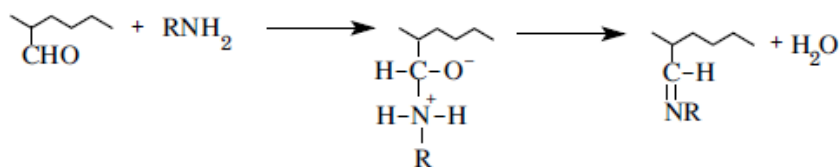


การศึกษา ซึ่งพบว่าสารประกอบพวกเอมีน เช่น ไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ สามารถยับยั้งการเพิ่มขึ้นของความหนืดในยางธรรมชาติได้ และยังพบว่าไดมิโดน (dimedone) ให้ผลในการยับยั้งหมู่อัลดีไฮด์ได้

2.1.3.2 การใช้สารควบคุมความหนืดในยางธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วยางธรรมชาติมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในระดับอุตสาหกรรม เช่น การผลิตยางแท่ง หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทั้งนี้เพราะยางมีสมบัติทางฟิสิกส์ดีเยี่ยม หลังจากการแปรรูปให้อยู่ในรูปยางดิบค่าความหนืดมูนี้จะมีค่าต่ำคือ อยู่ในช่วง 60-70 แต่เมื่อทำการขนส่งไปยังต่างประเทศพบว่าค่าความหนืดมูนี้ของยางจะเพิ่มขึ้นเป็น 90-100 ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในระหว่างการเก็บ คาดว่าสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของความหนืดเกิดจากการเชื่อมโยงของพันธะที่มีความแตกต่างกันในโมเลกุลยาง เช่น หมู่อัลดีไฮด์โดยสายโซ่ของโมเลกุลยางประกอบด้วยโปรตีน และกรดอะมิโน ทำให้เกิดการเจลซึ่งกลไกการเกิดไม่ทราบแน่ชัด การเพิ่มความหนืดดังกล่าวทำให้ยากต่อการนำไปแปรรูป (Toratani and Hirata, 1997)

ในการผลิตยางความหนืดคงที่ทั้งในรูปน้ำยาง และยางแท่ง (เสาวนีย์, 2547) โดยการเติมสารเคมีกลุ่ม monofunctional aldehydic condensing agent เช่น hydroxylamine hydrochloride, hydroxylamine neutral sulphate และ semicarbazide hydrochloride โดยใส่ได้ทั้งในรูปของน้ำยางและยางแท่ง ในน้ำยางมีวิธีการดังนี้ นำน้ำยางสดที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียในปริมาณ 0.01-0.1% ของน้ำยางซึ่งใช้ในปริมาณที่น้อยเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางมีสีคล้ำแล้วใช้ไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ 0.4 phr ส่วนในยางแท่งจะย่อยยางก่อนแล้วจึงเติมไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ 0.4% ของเนื้อยางพบว่าการทำยางความหนืดคงที่จะให้ยางที่มีสีคล้ำกว่ายางแท่ง STR 5L

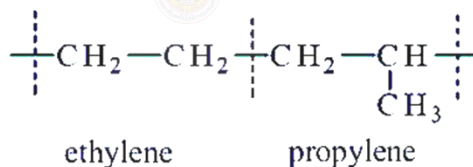
และผลจากการเพิ่มปริมาณแอมโมเนียหรือความร้อนจะส่งผลให้ยางมีสีคล้ำ ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้แอมโมเนียในปริมาณที่น้อย และอุณหภูมิในการอบควรเป็น 100°C สารนิยมนำใช้คือ ไฮดรอกซิลอะมีน ไฮโดรคลอไรด์ เพราะหาซื้อง่าย ราคาถูก และเข้ากับน้ำได้ง่ายโดยปฏิกิริยาของการใช้สารควบคุมความหนืดน่าจะเป็นดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาของสารควบคุมความหนืด
ที่มา : Toratani and Hirata (1997)

2.2 ยางอีพดีเอ็ม

ยางอีพดีเอ็ม (ethylene-propylene diene rubber) ได้จากการสังเคราะห์ โดยการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างเอทิลีน (ethylene) กับโพรพิลีน (propylene) ดังภาพที่ 2.4 โดยไดโอรินที่เติมลงไปจะไปเกาะอยู่ที่สายโซ่หลักในลักษณะกิ่งก้านสาขา ทำให้ยางอีพดีเอ็มมีส่วนของพันธะคู่ (ส่วนที่ไม่อิ่มตัว) จึงสามารถวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน และเปอร์ออกไซด์ได้ ยางที่มีขายทั่วไปจะมีเอทิลีนอยู่ประมาณร้อยละ 50-70 โดยโมล และมีปริมาณไดโอรินอยู่ในช่วงร้อยละ 3-11 โดยโมล (ชินรัตน์, 2553)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างยางอีพดีเอ็ม
ที่มา : พงษ์ธร (2547)

จากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลจะเห็นว่ายาง EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายที่ไม่มีขั้ว และเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ในสายโมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ (random) ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) ยางชนิดนี้จึงไม่ตกผลึกส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ และต้องอาศัยสารเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย อย่างไรก็ตามในยางที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูงจะมีสมบัติผลึกได้บ้างจึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงในสภาพยังไม่คงรูปสูง (high green strength) สามารถที่จะเติมน้ำมัน และสารตัวเติมได้มากซึ่งเป็นจุดเด่นของยางชนิดนี้ เพราะในบางครั้งอาจเติมสารตัวเติมได้มากถึง 2 เท่าของปริมาณยางที่ใช้ (200 phr) แต่ข้อเสียของยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูงคือ การบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำได้ยาก และสมบัติของยางที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ดีเพราะการตกผลึกของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

2.2.1 สมบัติทั่วไปของยางอีพดีเอ็ม (ethylene propylene diene rubber, EPDM) เป็นยางที่มีสมบัติเด่นคือมีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน

โอโซน และสารเคมีที่กว่ายางธรรมชาติยางบิวทาไดอีน (butadiene rubber, BR) และยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber, SBR) ยางอีพดีเอ็มนิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานนอกอาคารกลางแจ้ง และงานที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง (ชินรัตน์, 2553)

2.2.2 การวัลคาไนซ์ยางอีพดีเอ็ม ยางอีพดีเอ็มสามารถคงรูปได้โดยใช้เปอร์ออกไซด์หรือใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงสำหรับการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน ปริมาณของกำมะถัน และสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของไดอีนที่มีอยู่ในโมเลกุลส่วนใหญ่แล้วจะใช้กำมะถัน (หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถัน) ประมาณ 0.2 ถึง 2.0 phr นอกจากนี้หากต้องการให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็ว และมีระดับของการคงรูปสูงก็ไม่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงตัวเดียว แต่ควรใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหลายๆ ตัวร่วมกันเพื่อให้เกิดผลแบบเสริม (synergistic effect) สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มที่นิยมใช้ร่วมกันได้แก่ กลุ่มไฮอะโซล กลุ่มไฮยูเรม และกลุ่มไดไฮโอคาร์บาเมต ปัญหาหลักที่มักพบในยาง EPDM คือปัญหาการบวมที่พื้นผิวของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกตัวให้กำมะถันให้ต่ำกว่า 0.8 phr หรือสังเกตว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใดที่บวม และทำการปรับลดปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยานั้นๆ ให้อยู่ระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหา

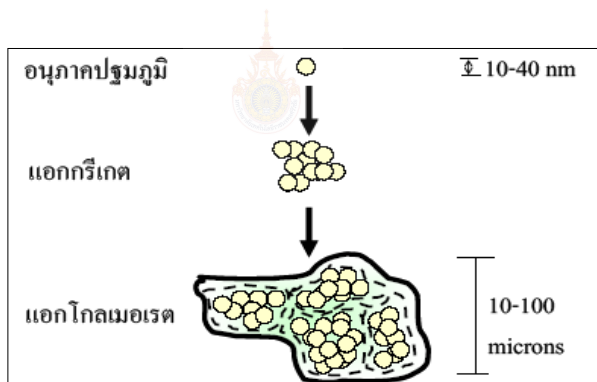
2.2.3 การใช้งาน ผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ภายนอกเนื่องจากทนต่อสภาพอากาศได้ดี และใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นส่วนใหญ่ เช่น ยางขอบกระจก ยางปิดน้ำฝน ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ (radiator hose) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา อีกด้วย

2.3 ซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็ก เป็นสารตัวเติมที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ สูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 และอาจมีผลึกน้ำอยู่ด้วยซิลิกามีการใช้งานกับยางได้หลากหลาย โดยเฉพาะในยางซิลิโคน มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ดัชนีการหักเหเท่ากับ 1.46-1.54 แล้วแต่เกรด สำหรับ Hisil 233 เป็นซิลิกาชนิดตะกอนพบว่ามีการหักเหใกล้เคียงกับยางมากจึงนิยมใช้ Hisil 233 ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสี และให้ความแข็งแรงกับยางด้วย การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมทำให้ยางมีสมบัติกายภาพเนื่องจากซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเขม่าดำ โดยซิลิกาที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติ หรือซิลิกาที่เตรียมขึ้นเองที่ได้จากธรรมชาติ หรือซิลิกาที่เตรียมขึ้นเองที่ได้จากการตกตะกอน (พงษ์ธร, 2550; วิภา, 2548)

2.3.1 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวซิลิกา

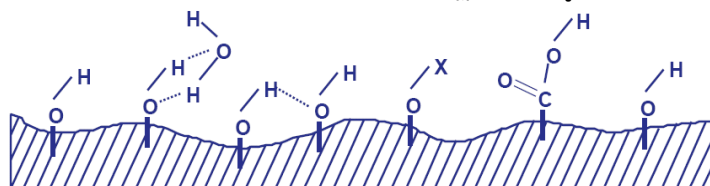
2.3.1.1 โครงสร้างของซิลิกา ซิลิกาที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวในรูปของอนุภาคปฐมภูมิแต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า แอกริเกต (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสมนอกจากนี้แอกริเกตของซิลิกาชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้นเรียกว่า แอกลอมเมอเรต (agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา
ที่มา : พงษ์ธร (2548)

2.3.1.2 สมบัติทางเคมีของพื้นผิวซิลิกา ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นปัจจัยที่ควบคุมระดับการเสริมแรงของซิลิกา เพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไปบนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลกลุ่มอยู่อย่างหนาแน่น หมู่ไฮดรอกซิลจะทำให้พื้นผิวซิลิกาเป็นกรด และความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหมู่ไฮดรอกซิลก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ที่มีอยู่ในยางคอมพาวด์ได้ หมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกาสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ดังภาพที่ 2.5 โดยในสภาพการเก็บทั่วไปซิลิกาจะมีความชื้นอยู่ประมาณ 4-7% โดยปริมาณความชื้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ดีขึ้นอยู่กับความชื้นของสิ่งแวดล้อม ซึ่งความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวซิลิกานี้ นอกจากจะทำให้ซิลิกาแตกตัว และกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อยแล้ว ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของยางอีก

ด้วย โดยทั่วไปถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้นเวลาใน scorch time และ cure time ของยางที่วัลคาไนซ์ในระบบที่ใช้กำมะถันจะยาวขึ้น เพราะซิลิกาที่อิมัตว์ด้วยน้ำจะห่วงปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อย่างไรก็ตามความชื้นบางส่วนจะถูกไล่ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมสารเคมีเข้าไปในยาง เพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมสารเคมีจะสูงมากทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไปด้วยเหตุนี้การผสมยางที่อุณหภูมิแตกต่างกันก็สามารถทำให้เกิดการแปรปรวนของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เช่นกัน



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของหมู่ซิลิเกตบนพื้นผิวของซิลิกา
ที่มา : พงษ์ธร (2548)

2.3.2 อิทธิพลของสมบัติซิลิกาต่อยาง ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยาง โดยการใช้ซิลิกาในยางจะมีผลต่อการแปรรูป และสมบัติเชิงกลโดยขึ้นกับปัจจัยต่างๆ คือ

2.3.2.1 อิทธิพลจากความเป็นกรด ซิลิกามีผิวเป็นกรด และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสารเคมีอื่นได้ นอกจากนี้การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในยาง อาจส่งผลให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ช้าลง เนื่องจากซิลิกาจะดูดสารตัวเร่งไว้ที่ผิว ซึ่งอาจแก้ได้โดยการเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง หรือใส่สารประเภทที่เป็นตัวลดประสิทธิภาพผิว (deactivator) ลงไปสารเหล่านี้ ได้แก่ สารประกอบประเภทเอมีน และแอลกอฮอล์ สารประเภทอะมีน ได้แก่ อะมีนที่เป็นของเหลว เช่น ไดเอทาโนลามีน ไดบิวทิลอะมีนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ เฮกซะเมทิลีนเตตระอามีน ไซโคลเฮกซิลอะมีน (DPG) สารประเภทแอลกอฮอล์ ได้แก่ เฮกเซนไทรออลกลีเซอรอลเอทิลีน ไกลคอลโพรพิลีนไกลคอล เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยตามลำดับ

2.3.2.2 อิทธิพลจากขนาดของซิลิกา ซิลิกามีลักษณะเป็นผงสีขาว เบา ร่วมทำให้การผสมทำได้ยากกว่าการใช้สารตัวเติมชนิดอื่น และใช้เวลาในการผสมนานกว่าปกติ นอกจากนี้การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยางจะทำให้ยางแข็งมากอาจทำให้เกิดความร้อนในการบดผสม ซึ่งส่งผลให้ยางสุกก่อนกำหนดได้ง่ายอีกทั้งจะทำให้การขาดของโมเลกุลยางลดลงทำให้สมบัติของยางตกลง ดังนั้นการผสมยางกับซิลิกาเพื่อไม่ให้เสียเวลานานไม่ควรผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้งแต่ควรผสมในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) แต่ในกรณีไม่มีเครื่องบดผสมแบบปิด และจำเป็นต้องผสมในเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ให้ทำด้วยความระมัดระวังอย่าผสมให้นานเกินไป และขณะผสมให้ใส่ยางกับซิลิกาเท่านั้นห้ามใส่สารเคมีอื่นลงไป เพราะจะทำให้การผสมยากขึ้น เมื่อผสมเสร็จตั้งทิ้งไว้ 1 คืน และจึงใส่สารเคมีตัวอื่นลงไปส่วนการผสมในเครื่องผสมแบบปิดนั้นสามารถผสมในเครื่องผสมแบบปกติได้ เนื่องจากยางที่ผสมซิลิกาแล้วจะแข็งขึ้น และขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูง อาจเป็นเหตุให้ยางสุกก่อนกำหนด ดังนั้นควรลดปริมาณสารในการผสม

2.3.2.3 อิทธิพลจากความเป็นสารอนินทรีย์ โดยทั่วไปซิลิกาทุกชนิดที่นิยมใช้ในยางทั้งชนิดตกตะกอน และชนิดเผาไหม้มีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึง

ความต้านทานต่อการยึดของยางไม่ดีเท่ากับยางที่ใช้เขม่าดำ เป็นสารตัวเติมแต่ความต้านทานต่อการสึกหรอ และโมดูลัสต่ำกว่ายางที่ใช้เขม่าดำ เนื่องจากซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ทำให้การยึดติดกับยางไม่ดี ส่งผลให้สมบัติบางประการต่ำกว่าการใช้เขม่าดำ ความต้านทานต่อการสึกหรอมีเพียง 60% และโมดูลัสสูงเพียง 25% เมื่อเทียบกับยางที่ใช้กับยางเกรด HAF อาจแก้ไขโดยการใส่สารประกอบโซเลนประมาณร้อยละ 0.5-2 โดยน้ำหนักของซิลิกา ซึ่งโซเลนจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมจะช่วยให้การยึดติดกันระหว่างสารตัวเติมกับยางได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ดีขึ้นด้วย (ชาคริต และคณะ, 2551)

2.4 มาสเตอร์แบท

มาสเตอร์แบท (masterbatch) คือ ยางที่ผสมสารเคมีเพียงตัวเดียว หรือสองตัวในปริมาณที่สูง เช่น 50% ซิลิกา หมายถึง ยางดิบที่มีเนื้อซิลิกาผสมอยู่ 50 ส่วนในคอมพาวด์ 100 ส่วน โดยการเตรียมมาสเตอร์แบทจะใช้ในกรณีที่สารเคมีกระจายตัวเข้ากับยางได้ไม่ดี การทำมาสเตอร์แบทจึงเป็นการแก้ปัญหาในกระบวนการแปรรูปยางในกรณีผสมสารเข้ากับยางได้ยาก และเพื่อต้องการลดเวลาในกระบวนการแปรรูปยางได้ (Barlow, 1993) ซึ่งปกติมักเป็นสารหลักชนิดใดชนิดหนึ่ง การใช้มาสเตอร์แบทนั้นเพื่อความสะดวก สะอาด หรือความแน่นอนของการชั่งน้ำหนักสาร สำหรับสูตรยางที่มีการใช้สารบางชนิดในปริมาณน้อยมาก และสารนั้นๆ มีราคาแพงมีประสิทธิภาพ หรือมีผลกระทบต่อคุณภาพของสูตรยางมาก โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าการทำมาสเตอร์แบทจะช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจำเป็นต้องให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวผสมในยางอย่างทั่วถึง และเป็นเนื้อเดียวกันกับยาง ในการทำมาสเตอร์แบทนั้นสัดส่วนของสารต่างๆในมาสเตอร์แบทอาจจะเท่ากับในสูตรที่กำหนดไว้ ยกเว้นไม่เติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปประกอบเฉพาะส่วนของยางกับสารตัวเติม และสารช่วยให้ยางนิ่ม หรือมีสารตัวเติมในปริมาณมากกว่าสูตรที่กำหนด โดยแต่ละชนิดของมาสเตอร์แบทดังกล่าว สามารถให้ผลการปรับปรุงการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางต่างกันได้ อย่างไรก็ตาม มาสเตอร์แบทชนิดที่มีสารตัวเติมในปริมาณที่มากกว่าในสูตรที่กำหนดไว้จะสู้อมาสเตอร์แบทแบบที่ใช้สารตัวเติมเท่ากับในสูตรที่กำหนดไว้ และมาสเตอร์แบทแบบประกอบเฉพาะส่วนของยางกับสารตัวเติมไม่ได้ เพราะมาสเตอร์แบทแบบมีสารตัวเติมในปริมาณมากกว่าสูตรที่กำหนดจะทำให้ยางแข็งมาก และเกิดปัญหาในการนำมาสเตอร์แบทที่แข็งเช่นนี้ไปผสมกับยางในขั้นที่จะนำมาใช้งาน อนึ่งถ้าหากจะทำการผสมมาสเตอร์แบทในเครื่องผสมแบบปิดไม่ควรใส่สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปในมาสเตอร์แบท เพราะอุณหภูมิขณะผสมมักสูง สารเหล่านี้อาจเกิดปฏิกิริยาทำให้ยางคงรูป คือ มีผลทำให้เกิดยางตายภายในเครื่องผสมทำให้เกิดปัญหายุ่งยากมาก (สถาบันวิจัยยาง, 2540)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในยางโดยเฉพาะอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เนื่องจากซิลิกาทำให้ความต้านทานต่อการหมุน (rolling resistance) ลดลงพร้อมๆ กับประสิทธิภาพยางล้อที่ดี อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาในคอมพาวด์ผลิตภัณฑ์ยางมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเป็นกรดทำให้ซิลิกาต้องใช้สารลดประสิทธิภาพผิวด้วยเสมอความเป็นสารอนินทรีย์ของซิลิกาทำให้ซิลิกาเข้ากับยางธรรมชาติ และยางไม่มีขั้วอื่นๆ ได้ยากจำเป็นต้องใช้สารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวของซิลิกากับยางเนื่องจากซิลิกากระจายตัว และเกิดอันตรกิริยากับยางได้ยากกว่าเขม่าดำ จึงได้มีการศึกษาอัตราส่วนต่างๆของซิลิกาที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่ายางที่มีซิลิกา 20 และ 30 phr ทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอดีขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกา 50 phr (Rattanasom *et al.*,

2007) แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่จะให้ได้ผลดีก็คือ การทำมาสเตอร์แบท ซึ่งทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาการเติมซิลิกาลงในน้ำยางเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และแก้ปัญหาการกระจายตัวยากของการผสมในรูปผงในยางแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมอนุภาคเล็กที่เข้ากับยางได้ยาก การเติมซิลิกาลงในน้ำยางธรรมชาติพบว่าอนุภาคนาโนซิลิกาขนาด 60-150 นาโนเมตรจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แม้จะเกิดการเกาะกลุ่มก็จะเป็นก้อนเล็กๆ (primary aggregate) ซึ่งจะเกิดเมื่อปริมาณของซิลิกาในน้ำยางมีปริมาณมากขึ้น การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซิลิกา ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพทำให้ง่ายมีสมบัติต้านทานต่อความร้อน และสมบัติเชิงกลสูงชันกว่าการใช้งานในรูปยางแห้ง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม พบว่าการกระจายตัวของซิลิกาในเนื้อยางมีการกระจายที่สม่ำเสมอ (Peng, *et al.*, 2007; Yanakisawa, *et al.*, 2005) นอกจากการเตรียมซิลิกามาสเตอร์แบทในน้ำยางธรรมชาติแล้ว ยังสามารถเตรียมซิลิกามาสเตอร์แบทได้ในน้ำยางสังเคราะห์ เช่นน้ำยาง SBR น้ำยาง NBR เป็นต้น โดยสามารถเตรียมได้ทั้งในรูปซิลิกามาสเตอร์แบทและเขม่าดำมาสเตอร์แบท ซึ่งหลังจับตัวน้ำยางมาสเตอร์แบทที่ได้ ทดสอบหาปริมาณซิลิกาในน้ำยางที่เติมลงไปโดยวิธีการหาปริมาณซีเถ้า พบว่าสามารถตรวจพบปริมาณซิลิกา สูงถึง 97-98 % โดยซิลิกามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในน้ำยางธรรมชาติ และน้ำยางสังเคราะห์ (Lightsey *et al.*, 1998)

2.5 ยางเบลนด์

การเบลนด์ยางหรือการใช้ยางร่วมกันมีเหตุผลสามประการด้วยกันคือ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางตัวหลัก ทำให้การแปรรูปง่ายขึ้น และเพื่อลดต้นทุนการผลิตยางทุกชนิดมีสมบัติข้อเด่นและด้อยที่แตกต่างกันออกไป การเบลนด์จึงเป็นวิธีง่ายๆ ที่ทำให้ง่ายมีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง แต่ก็พบปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเบลนด์ได้เช่นกัน นั่นคือ หลังการเบลนด์มีผลทำให้สมบัติของยางเบลนด์ด้อยลงไปมากกว่าที่จะได้คุณสมบัติที่เด่นของยางแต่ละชนิด โดยปกติจุดประสงค์ที่ต้องการเบลนด์คือ ได้ยางที่มีสมบัติอยู่ระหว่างยางทั้งสองชนิดยางทั้งสองจึงควรมีความเข้ากันได้ (miscibility) ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติสุดท้ายของยางเบลนด์ ได้แก่

2.5.1 ปัจจัยที่มาจากยางตั้งต้น

2.5.1.1 ความหนืด (viscosity incompatibility) ปัจจัยในเรื่องความหนืดของยางที่นำมาเบลนด์กันเป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากความหนืดของยางมีผลต่อการเข้ากันได้ของยางการกระจายตัวของสารเคมีที่มีอยู่ในยาง ซึ่งพบว่าในขณะที่ทำการหลอมหรือให้ความร้อนกับยางเบลนด์ สารเคมีสามารถกระจายตัวเข้าไปในเฟสของยางที่มีความหนืดต่ำกว่า (lower viscosity phase) ซึ่งเฟสที่มีความหนืดต่ำจะเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ดังนั้นถ้าค่าความหนืดของยางซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานพื้นผิวของยางแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน ก็จะได้ยางเบลนด์ที่มีความเข้ากันได้ตั้งแต่ในขั้นตอนของการผสม ความเข้ากันได้นี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับอัตราส่วนของน้ำมัน หรือสารตัวเติมหรือปรับปรุงในส่วนของการกระบวนการแปรรูป โดยการปรับความหนืดของยางให้เท่ากันก่อนนำมาเบลนด์กัน

2.5.1.2 สภาพขั้วของยาง (polar) ยางที่นำมาเบลนด์กันจะต้องมีสภาพขั้วที่ใกล้เคียงกันสภาพขั้วของยางได้จากค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) ซึ่งพบว่า

การเบลนดฺยงที่มีสภพขั้วที่แตกต่งกัน การผสมเข้กันได้ก็จลตลง ในการผสมยงที่มีสภพขั้วต่งกันอจแก้ปัญหโดยการใช้สารประภท coupling agent หรือ compatibilizer

2.5.1.3 อุณหภูมิล้ยแก้ว (glass transition, Tg) ค่อุณหภูมิล้ยแก้วของยงจเป็นอุณหภูมิล้ยแก้วที่บงบอสถานะที่สมรถใช้งนได้ของยง ซึ่งยงสมรถที่จะไหล (flow) เมื่มี การแปรรูปได้ดีดิ่งนั้นคู่ยงที่นำมเบลนดฺกันจต้องมีค่อุณหภูมิล้ยแก้วที่ใกล้เคียงกัน เพราะใน ระหว่งการแปรรูปยงทั้งคู่สมรถที่จะไหลเข้ด้วยกัน

2.5.1.4 ความไม่เข้กันของอัตราการวัลคไนซ์ (cure-rate incompatibility) การที่อัตราเร็วในการวัลคไนซ์ไม่เท่กัน เป็นผลเนื่องมจกที่ยงแต่ละชนิดมีพลังงนในการกระตุ้น ในการวัลคไนซ์ที่แตกต่งกัน โดยพบว่ในการวัลคไนซ์ในระบบก่บมถัน ยงที่ไม่อิมต้วใน โครงสร้ง หรือการมีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้ง จะทำให้ยงมีความว่งไวต่อการเกิดปฏิกิริยา การวัลคไนซ์ที่ว่งไวกว่ ทำให้อัตรวัลคไนซ์ของยงที่มีพันธะคู่สูงกว่ยงที่ไม่มีพันธะคู่



นอกจากนี้ยังมีผลมาจากการกระจายตัวของสารเคมีในยางแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยเฉพาะสารตัวเร่งหรือสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ สามารถที่จะละลายในเฟสของยางที่มีพันธะคู่ได้ดีกว่าเฟสยางที่ไม่มีพันธะคู่ หรือในเฟสยางที่มีสภาพความเป็นขั้วทำให้เฟสยางที่มีพันธะคู่สามารถเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้เร็วกว่าเฟสยางที่ไม่มีพันธะคู่หรือยางที่มีสภาพขั้วสูง ซึ่งการที่อัตราการวัลคาไนซ์ของยางทั้งสองชนิดที่นำมาเบลนด์กันจะส่งผลให้สมบัติสุดท้ายของยางเบลนด์ การแก้ไขเรื่องอัตราการวัลคาไนซ์ที่ต่างกันสามารถทำได้คือ การเตรียมยางแต่ละชนิดให้อยู่รูปของมาสเตอร์แบท

2.5.2 ปัจจัยที่มาจากกระบวนการแปรรูป ในการเบลนด์ยางสามารถเบลนด์ หรือผสมได้ทั้งในรูปของของแข็ง และในรูปของสารละลายซึ่งการผสมยาง หรือเบลนด์ยางในรูปของของแข็ง (solid blend) ในการนำยางมาเบลนด์หรือผสมกันในรูปของแข็ง จะต้องพิจารณาดังนี้

2.5.2.1 อุณหภูมิการใช้งานของยาง โดยดูค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิการเบลนด์ที่สูงกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของยางตัวนั้น แต่อุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้ในการผสมยางเบลนด์จะต้องเป็นอุณหภูมิที่ไม่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นจะพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อยางเบลนด์ในการผสมในรูปของของแข็งคือ อุณหภูมิเบลนด์ (blending temperature)

2.5.2.2 ความเร็วของลูกกลิ้ง หรือความเร็วของโรเตอร์ (rotor speed) ความเร็วของลูกกลิ้งหรือโรเตอร์ที่ใช้ในการเบลนด์มีผลต่ออัตราเฉือน (shear rate) ที่เกิดขึ้นในสายโซ่ของยาง ซึ่งส่งผลถึงความเร็วหรือความสามารถในการไหลของยาง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วโรเตอร์ หรือความเร็วลูกกลิ้งสายโซ่จะถูกแรงเฉือนมาก ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่ทำให้ความหนืดลดลงสามารถไหลได้ง่ายขึ้น แต่การที่สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลงจะมีผลต่อสมบัติสุดท้ายของคูกยางเบลนด์ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงความเร็วของลูกกลิ้ง หรือโรเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ด้วย

2.5.2.3 เวลาที่ใช้ในการผสม (blending time) เวลาที่ใช้ในการเบลนด์จะมีผลต่อความหนืดของยาง ซึ่งส่งผลต่อเฟสของยางที่กระจายมีขนาดเล็ก หรือ Dispersion phase โดยพบว่าในเวลาการผสมที่เหมาะสมจะทำให้เฟสยางที่กระจายมีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลถึงสมบัติเชิงกลที่ดีในขณะเดียวกัน ถ้าใช้เวลาในการผสมน้อย หรือมากเกินไปจะทำให้เฟสยางที่กระจายตัวมีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่ดีเช่นเดียวกัน

2.5.2.4 การเบลนด์ยางในรูปของสารละลาย (solution blend) ในการเบลนด์ยางในรูปของสารละลายสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ คูกยางเบลนด์ต้องละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกัน หรือถ้าในกรณีที่คูกยางเบลนด์ละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน ตัวทำละลายที่ต่างชนิดกันต้องสามารถละลายเข้าด้วยกันได้ ในการเบลนด์ด้วยระบบนี้ สารตั้งต้นคือยางจะต้องสามารถละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) ซึ่งจะทำให้สายโซ่ของยางแต่ละชนิดสามารถที่จะแพร่เข้าหากันได้ การเข้ากันได้ของการเบลนด์เป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ไม่มีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่ต่างกัน และสามารถที่จะผลิตพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ

2.6 ผงไททาเนียมไดออกไซด์

ผงไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide: TiO₂) เป็นผงอนินทรีย์ที่มีความเสถียรภาพสูงมีสีขาว ทึบแสง ช่วยสะท้อนรังสียูวีใน แสงแดด สารไททาเนียมไดออกไซด์สะท้อนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ จึงเป็นเม็ดสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. anatase มีโครงสร้างเป็น tetragonal มีความขาวมาก มีค่าดัชนีหักเห (refractive index) เท่ากับ 2.55 การนำไปใช้งานสามารถเกิดเป็นฝุ่น (chalking) ได้ง่าย

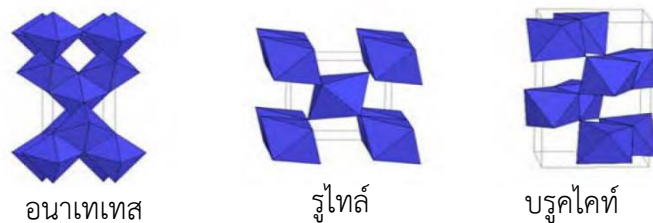
2. rutile มีโครงสร้างเป็นแบบ tetragonal มีสีเหลืองเล็กน้อยหากเทียบกับ anatase มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 2.76 ลักษณะโครงสร้างที่หนาแน่นกว่า ความเสถียร และความทึบแสงมากกว่า anatase มีความต้านทานการเกิดเป็นฝุ่นได้ดี ถ้านำไปใช้งานภายนอก

3. brookite มีโครงสร้างแบบ orthorhombic แต่ไม่นิยมนำมาใช้เป็นผงสี เนื่องจากมีราคาแพง ผงไททาเนียมไดออกไซด์ มีสมบัติในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดี และสามารถป้องกัน การเสื่อมสภาพของชิ้นงานได้ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในงานผงสีที่มีโครงสร้างแบบ anatase และ rutile

โครงสร้าง และคุณสมบัติของผงไททาเนียมไดออกไซด์ที่พบตามธรรมชาติมีโครงสร้างผลึก 4 แบบ คือ

- 1) อนาเทส (anatase) โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (tetragonal)
- 2) บรูคไคท์ (brookite) โครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic)
- 3) รูไทล์ (rutile) โครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนอล (tetragonal)
- 4) ไททาเนียมไดออกไซด์บี โครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิก (monoclinic)

โครงสร้างผลึกแบบอนาเทส รูไทล์ และบรูคไคท์ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 มีลักษณะเป็น ปริมาตรฐานสี่เหลี่ยมสองอันประกบกันหรือออกตะฮีดรอล (octahedral) โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันเนื่องจากการบิดตัวของแต่ละออกตะฮีดรอลที่เรียงต่อกัน และจากรูปแบบ การเรียงตัวของออกตะฮีดรอลโดยโครงสร้างผลึกอนาเทส เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วน ยอดของแต่ละออกตะฮีดรอล ส่วนโครงสร้างผลึกรูไทล์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยใช้ส่วนขอบ ของแต่ละออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกบรูคไคท์เกิดมาจากการเรียงตัวต่อกันโดยด้านส่วนยอด และส่วนขอบของแต่ละออกตะฮีดรอล



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา : เอกชัย (2553)

โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์มีอยู่หลายชนิดโครงสร้างแบบอนาเทส และรูไทล์ เป็นโครงสร้างผลึกที่พบเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วโครงสร้างผลึกอนาเทสสามารถเปลี่ยนโครงสร้าง เป็นแบบโครงสร้างผลึกรูไทล์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 600 °C ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการ เปลี่ยนโครงสร้างผลึกจากอนาเทสเป็นรูไทล์ค่อนข้างมาก เนื่องจากโครงสร้างผลึกของไททาเนียมได ออกไซด์เป็นตัวแปรที่สำคัญมากในการกำหนดประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แบบใช้แสงร่วมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบปกติ (ไม่ใช่แสงร่วม) หรือเซรามิกส์ที่ใช้ทำเยื่อแผ่นบาง (membrane) นอกจากนี้อีกหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนโครงสร้างผลึกดังกล่าว เช่น ความดัน ปริมาณ ผลึก ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และขนาดของผลึก

2.7 ผลิตภัณฑ์หลังคายาง

ผลิตภัณฑ์หลังคาเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของอาคาร ทำหน้าที่ป้องกันแดด ฝน พายุ หิมะ แสง สว่าง และภัยจากธรรมชาติต่างๆ อีกหลายประการ วัสดุผนังหลังคาจึงควรมีคุณสมบัติป้องกันสิ่งต่างๆ รวมทั้งภัยธรรมชาติที่ใดกล่าวมาแล้ว ดังนั้นการใช้วัสดุผนังหลังคาต่างกันย่อมทำให้เกิดความแตกต่าง ในโครงสร้างของหลังคา มุมเอียงของหลังคา และวัสดุยึดเหนี่ยววัสดุผนังหลังคาแตกต่างกันไปด้วย มาตรฐานที่สำคัญของวัสดุผนังหลังคามีดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพ ค่าสีมาตรฐาน CIE system
2. สมบัติการสะท้อนรังสีอาทิตย์ ใช้มาตรฐาน ASTM E 891 การนำความร้อน (thermal conductivity) ใช้มาตรฐาน ISO/DIS 2207-2
3. สมบัติเชิงกลของหลังคาเคลือบ ทดสอบสมบัติเฉพาะ ดังนี้ การยึดเกาะของฟิล์ม ใช้ มาตรฐาน ASTM D 3359 การตัดโค้งของฟิล์ม ใช้มาตรฐาน ASTM D 522
4. สมบัติเชิงกลของหลังคาจากพลาสติก ใช้มาตรฐาน ASTM D 638

2.7.1 หลังคาที่ใช้ยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อย หลังคาจากวัสดุยางธรรมชาติผสมขี้เลื่อยไม่ การเตรียมจากยางธรรมชาติชนิด STR 20 ผสมขี้เลื่อยไม้ ขนาดผงขี้เลื่อยไม้ประมาณ 200-300 ไมครอน ในปริมาณ 80 phr โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ใช้เวลาในการผสม สารเคมีทั้งหมด 40 นาที ขึ้นรูปหลังคาด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (hot press) อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160 °C ใช้แรงดันโมลด์ที่ 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการ วัลคาไนซ์ 10 นาที ชัดผิวชิ้นงานเพื่อขจัดไขมัน และพ่นเคลือบสารรองพื้น (primer) เพื่อเพิ่มการยึด เกาะกับผิวชิ้นงาน จากนั้นผสมไททาเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วน 1, 3, 5, 7, 9 และ 15 ต่อน้ำหนักสาร พอลิยูรีเทน 100 ส่วน ทำการผสมในเครื่องปั่นกวนที่ความเร็วประมาณ 300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที ใส่สารแข็งที่สัดส่วนเท่ากับพอลิยูรีเทนปั่นกวนสารเคลือบแต่ละสูตรทำการพ่นเคลือบบนชิ้นงาน โดยใช้สภาวะการพ่นเคลือบเหมือนกันระยะห่างการพ่น 20 30 และ 40 ซม. (ระยะห่างระหว่างชิ้นงาน ถึงปืนพ่น) จำนวนรอบการพ่นเคลือบที่ 1-7 รอบ แรงดันลมในการพ่นคองที่ 6-6.5 kg/cm² (ณฐิตา, 2551)

2.7.2 หลังคาจากยางธรรมชาติเคลือบยางอีพิตีเอ็ม การเตรียมวัสดุกระเบื้องยางหลังคาจาก ยางธรรมชาติ โดยการทำให้เป็นแผ่นกระเบื้องยางหลังคาสองชั้น ยางหลังคาชั้นบนเตรียมโดยการ เบลนด์ระหว่าง คอมปาวด์อีพิตีเอ็มกับคอมปาวด์ยางธรรมชาติ ที่สัดส่วนการเบลนด์ 60/40 ส่งผลให้ สมบัติความทนทานต่อการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนดีที่สุด ยางคอมปาวด์อีพิตีเอ็มที่ใช้ในกระบวนการนี้ เป็นยางคอมปาวด์อีพิตีเอ็มที่ทำการพรีวัลคาไนซ์โดยใช้ตู้อบอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา

1 ชั่วโมง นอกจากนี้การผสมยางบิวทาไดอินในยางเบลนด์ 5 phr เป็นตัวประสานทำให้การกระจายตัวของยางธรรมชาติในยางอีพดีเอ็มสม่ำเสมอมากขึ้น โดยสังเกตได้จาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลังคาชั้นล่างเตรียมโดยการเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม พบว่าสัดส่วนการเบลนด์ 100/80 มีความทนทานต่ออากาศร้อนที่สุด การใช้ยางธรรมชาติเบลนด์กับยางรีเคลมที่สัดส่วนการเบลนด์ 100/80 ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีความทนทานต่ออากาศร้อนดีกว่าการใช้ยางธรรมชาติร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อผลิตเป็นหลังคาจากยางธรรมชาติ โดยชั้นบนมีความหนา 1.3 มิลลิเมตร และชั้นล่างหนา 3.7 มิลลิเมตร พบว่ากระเบื้องยางหลังคาจากยางธรรมชาติผ่านมาตรฐาน UEAtc และมีความทนทานต่ออากาศร้อน สภาพแวดล้อม แสงอัลตราไวโอเล็ต และความชื้น นอกจากนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนสีหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน และสภาพแวดล้อม (ปิยะพร, 2551)

2.7.3 หลังคาจากโพลีไวนิลคลอไรด์ ผลิตครั้งแรกในยุโรปเมื่อปี 1960 หลังคาชนิดนี้ได้รับการออกแบบเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของหลังคายางอีพดีเอ็ม ทำให้สามารถยับยั้งแสงอัลตราไวโอเล็ต ความร้อนได้ดี หลังคาจากวัสดุพีวีซีมีการเสริมแรงด้วยโพลีเอสเตอร์ ทำให้หลังคาพีวีซีทนทานกว่าหลังคาจากยางอีพดีเอ็ม มีความทนทาน อายุการใช้งาน และประสิทธิภาพในการใช้งานสูง ส่งผลให้มีราคาแพงกว่าหลังคายางอีพดีเอ็ม สมบัติของหลังคาจากโพลีไวนิลคลอไรด์ มีสมบัติเด่น คือทนต่อความชื้น ในสภาวะแวดล้อมที่มีน้ำขัง ทนต่อรังสียูวี ลม ไฟ สารเคมี รากพืช เชื้อรา แบคทีเรีย และยังพบว่าหลังคาจากยางอีพดีเอ็มจะมีส่วนประกอบของน้ำมัน เมื่อสัมผัสด้วยแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ในทางกลับกันหลังคาจากโพลีไวนิลคลอไรด์เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าหลังคาจากยางอีพดีเอ็ม หลังคาจากโพลีไวนิลคลอไรด์ได้รับการออกแบบให้เป็นหลังคากระเบื้องเย็นสะท้อนแสงอาทิตย์ได้ถึง 90 % จึงช่วยลดการใช้พลังงานจากการใช้ระบบ HVAC อาคารเย็น และเพื่อลดความร้อน นอกจากนี้หลังคาจากโพลีไวนิลคลอไรด์ สามารถนำมารีไซเคิลได้

2.7.4 หลังคาจากยางอีพดีเอ็มเคลือบอะคริลิก หลังคายนชนิดนี้ได้บังคับใช้ในหลังคาที่ลาดต่ำมีการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์เริ่มต้น และอายุการใช้งานที่ตรงตามมาตรฐานของหน่วยควบคุมสิ่งแวดล้อม การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์เริ่มต้นสำหรับหลังคาแบบใหม่จะต้องไม่ต่ำกว่า 65% หลังคาอีพดีเอ็มสีดำมีการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ 10% ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด จึงมีการเคลือบอะคริลิกสีขาวบนหลังคายาง จึงทำให้หลังคาที่มีการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์เริ่มต้นที่ 80% ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน คุณสมบัติของหลังคาอีพดีเอ็มที่เคลือบอะคริลิกจะเพิ่มการยึดเกาะได้ดี และมีสมบัติเด่นคือการทนต่อสภาวะการใช้งานจริง เช่น ฝน รังสี โอโซน และแสงแดด มีความต้านทานต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น แต่หลังคายางอีพดีเอ็มจะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยึดขาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 15 ปี (Rokowski *et al.* 2004)

2.7.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดความร้อนของหลังคา Asphalt shingle หลังคาที่เคลือบด้วยสีดำ สีขาว สีเทา และสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวพบว่า หลังคาที่ทำด้วยสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวมีประสิทธิภาพในการลดความร้อนสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่เคลือบด้วย สีดำ สีขาว และสีเทา มีค่าเท่ากับ 0.2, 0.05 และ 0.22

ตามลำดับ ส่วนสีเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์สีขาวมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงถึง 0.65 - 0.72 (Oren and Nayan, 2557)

2.7.6 ผลของความเรียบบนหลังคาเหล็กต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ โดยสร้างแบบจำลองหลังคาเหล็กในรูปแบบต่างๆ พบว่าหลังคาเหล็กที่ถูกทำให้เย็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงจะมีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ลดลงเมื่อเทียบกับหลังคาเหล็กที่เรียบ ซึ่งการลดลงของค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์จะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นกับมุมของแสงที่ตกกระทบหลังคา (Oren and Nayan, 2557)

2.7.7 อิทธิพลของความหนาผิวเคลือบต่อค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาว หลังคาที่มี TiO_2 17% PVC ซึ่งความหนาของผิวเคลือบตั้งแต่ 28-163 ไมโครเมตร พบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้น และค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงสุดคือ 0.93 ที่ความหนา 134 ไมโครเมตร การสะท้อนรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่แม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นก็ตาม เนื่องจากที่ความหนาของผิวเคลือบน้อย แสงสามารถเดินทางผ่านผิวเคลือบได้แต่เมื่อความหนาผิวเคลือบมากขึ้น แสงสามารถเดินทางผ่านได้น้อยลงทำให้มีแสงส่วนที่สะท้อนกลับมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่แสงไม่สามารถเดินทางผ่านผิวเคลือบได้เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการดูดกลืน และสะท้อนกลับของแสงอย่างสมบูรณ์ทำให้แม้ความหนาจะเพิ่มขึ้นแต่ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ยังคงเท่าเดิม (Guo *et al.*, 2556)

2.7.9 การพัฒนาสีเคลือบเพื่อเพิ่มค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ชนิดของผงสีความเข้มข้นของผงสี (pigment volume concentration) และความหนาของสีเคลือบพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี และความหนาของสีเคลือบเพิ่มขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับสีเคลือบเชิงพาณิชย์พบว่า สีเคลือบที่ได้มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์สูงกว่า ยกเว้นสีแดง และ สีฟ้าที่มีค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกับสีเคลือบเชิงพาณิชย์ และได้ศึกษาการเสื่อมสภาพของสีเคลือบโดยทดสอบด้วยวิธีการเร่งสภาวะพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ของสีขาวลดลงเล็กน้อยในช่วงแรกของการทดสอบในขณะที่สีอื่นไม่เปลี่ยนแปลง (วัลลภ, 2548)

2.7.10 วัสดุผิวเคลือบสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่เตรียมจากการผสมไททาเนียมไดออกไซด์ วัสดุผิวเคลือบที่ใช้สารเพิ่มเนื้อ และสารยึด ที่มีผลต่อค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ คือสัดส่วนสารยึด ชนิดผงสี สารเพิ่มเนื้อ และปริมาณ TiO_2 ความเข้มข้นโดยปริมาตรของผงสี (PVC) และความหนาผิวเคลือบจากการ ทดลองพบว่าค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ขึ้นกับชนิดผงสี ปริมาณ TiO_2 และความหนาผิวเคลือบ แต่ไม่ขึ้นกับสัดส่วนของสารยึดโดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณ TiO_2 และความหนาผิวเคลือบ ส่งผลให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัวค่าหนึ่งถึงแม้ปริมาณ TiO_2 และความหนาของผิวเคลือบเพิ่มขึ้นค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ได้คงที่ นอกจากนี้พบว่าสารเคลือบทั้งที่มีน้ำยางธรรมชาติ และน้ำยางสังเคราะห์ผสมในสารยึดให้ค่าการสะท้อนรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกันรวมถึงให้สมบัติทางกล และทางกายภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้การสะท้อนรังสีอาทิตย์ของผิวเคลือบลดลงมากในช่วงแรกของการทดสอบ และลดลงจนคงที่ และเมื่อทดสอบโดยการวางผิวเคลือบนี้บนหลังคาพบว่าผิวเคลือบที่ได้มีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวเคลือบทางการค้าถึง 13 °C (อนุสรณ์, 2548)



บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. **ยางแท่ง (STR 5L)** ผลิตภัณฑ์บริษัท องค์การสวนยาง (นาบอน) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
2. **ยางอีพีดีเอ็ม** เป็นยางเกรด Vistalon 2504 N มีปริมาณเอทิลีนเท่ากับ 55.5 % โดยน้ำหนักและประกอบด้วย ENB ปริมาณ 3.8% โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์บริษัท Exxon Mobile Chemical
3. **ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO₂)** ลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตภัณฑ์บริษัท Univar Ltd. ใช้เป็นสารปรับสภาพผิว
4. **น้ำยางสด (Fresh latex)** ลักษณะสีขาวหรือขาวออกเหลือง จากจุดรับซื้อน้ำยางสด ตำบล ถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช
5. **ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)** ลักษณะเป็นของเหลวใส เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท โซลเวย์ เพอรอกซีเทน จำกัด ใช้สำหรับการเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำ
6. **ขี้ผึ้ง (Wax)** ลักษณะเป็นของแข็งใส ผลิตภัณฑ์บริษัทไทยโพลีเคมีคอล จำกัด ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อม
7. **กรดอะซิติก (Acetic acid)** มีลักษณะเป็นของเหลวใส เข้มข้น 99.7 เปอร์เซ็นต์ เป็นกรดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ผลิตภัณฑ์บริษัท Ried-de haen ประเทศเยอรมัน ใช้จับตัวยาง
8. **แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)** ลักษณะเป็นสารของเหลวใส เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท J.T. Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เป็นสารรักษาสภาพน้ำยางสด
9. **ซิลิกา (Silica)** ลักษณะเป็นผงสีขาวและมีขนาดอนุภาคเล็ก เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท Evonik Industries ใช้เป็นสารตัวเติมในคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยาง ในรูปซิลิกาผง และ 20% Silica dispersion สำหรับเตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท
10. **ไซเลน (Bis-[3-(triethoxysilyl)-propyl]-tetrasulfide)** ลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท Behn Meyer Co., Ltd. ใช้เป็นสารคู่ควบ
11. **เบนโทไนท์ (Bentonite)** ลักษณะเป็นผงสีเทาอ่อน เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท เค.เอส.พี.อินเตอร์เคม ใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมีในการเตรียมดิสเพอร์ชัน
12. **วัลทามอล (Vultamon)** ลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท เค.เอส.พี.อินเตอร์เคม ใช้เป็นสารช่วยกระจายตัวของสารเคมีในการเตรียมดิสเพอร์ชัน
13. **กรดสเตียริก (Stearic acid)** ลักษณะเป็นกรดสีขาว เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท Oleon ประเทศมาเลเซีย ใช้เป็นสารตัวกระตุ้นร่วมกับ Zinc oxide และเป็นสารช่วยให้ยางนิ่มและพันลูกได้ง่าย

14. **ซิงออกไซด์** (Zinc oxide, ZnO) ลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท ยูนิไทย จำกัด ใช้ในรูปของแข็ง ใช้เป็นสารกระตุ้นในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์
15. **กำมะถัน** (Sulphur, S) ลักษณะเป็นผงสีเหลือง เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด ประเทศไทย ใช้ในรูปของแข็ง เพื่อเป็นสารวัลคาไนซ์ยาง
16. **น้ำมันแนฟทานิก** (Naphthanic Oil) ลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท PSP Specialties Co., Ltd. ใช้เป็นสารช่วยในการแปรรูป
17. **เอ็นเทอร์ทิวทิล-2-เบนโซไทอาโซล ซัลฟิनाไมด์** (N-tert-butyl-2-benzothiazole sulfonamide, TBBS) ลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลอ่อน เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด ใช้เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยาง
18. **ไดเอทิลีน ไกลคอล** (Diethylene glycol, DEG) ลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีกลิ่น เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ใช้เป็นสารลดประสิทธิภาพผิวของซีลิกา
19. **เอ็น-1,3 ไดเมทิลบิวทิล เอ็น-ฟีนิลพาราฟีนิลไดเอมีน** (N-(1,3-dimethyl butyl)N-phenyl-p-phenylene diamine, 6PPD) ลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาลเข้ม ผลิตภัณฑ์บริษัท Chemicals Industrial Co., Ltd. ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ
20. **เตตระเมทิลไทูรามดิซัลไฟด์** (Tetramethyl thiuramdisulphide, TMTD) ลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์บริษัท Asia pacific specialty Limited ประเทศออสเตรเลีย ใช้เป็นสารตัวเร่งในปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์
21. **เขม่าดำ** (N330) ลักษณะเป็นผงสีดำ ผลิตภัณฑ์จากบริษัท Baoma carbonblack Co., Ltd.
22. **ไฮสไตรเรซิน** (High styrene resin) มีลักษณะเป็นเม็ดสีขาว ผลิตภัณฑ์บริษัท Zeon corporation Co., Ltd.
23. **วิงสแตย์ แอล** (Wingstay U) ลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้เป็นสารป้องกันการเสื่อม
24. **แอนติโมนีไดออกไซด์** (Antimony trioxide, Sb₂O₃) ลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้เป็นสารลดการติดไฟ

3.2 อุปกรณ์และเครื่องทดสอบ

1. **เครื่องเตรียมดินสเตอร์ชัน** เป็นเครื่องมือที่ใช้บดสารเคมีให้อยู่ในรูป dispersion ประกอบด้วย หม้อบด (Ball Mill) ที่ทำจากเซรามิกมีความจุ 2 ลิตร ภายในบรรจุลูกเซรามิก และหมุนด้วยอัตราเร็ว 65 รอบ/นาที
2. **เครื่องกวนเชิงกล** (Mechanical stirrer) ผลิตภัณฑ์บริษัท IKA Co., Ltd. ใช้ในการกวนผสมซีลิกากับน้ำยาง



ภาพที่ 3.1 เครื่องกวนน้ำยาง

3. เครื่องรีดยาง ประกอบด้วยลูกกลิ้งบน ล่าง ใช้สำหรับรีดยางให้เป็นแผ่นๆ



ภาพที่ 3.2 เครื่องรีดยาง

4. เตาอบอากาศร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UE500 ผลิตภัณ์บริษัท Memmert GmbH Co.,Ltd. ใช้สำหรับอบแห้งยางซิลิกามาสเตอร์แบท และอบยางที่ทำการ preheat

5. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เครื่องผสมแบบปิดรุ่น MX500-CTE-D25L750 ขนาดห้องผสมมีปริมาตร 500 ml ผลิตภัณ์บริษัทเจริญทัศน์ จำกัด ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์



ภาพที่ 3.3 เครื่องผสมแบบปิด

6. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ผลิตภัณ์บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ใช้เตรียมคอมปาวด์ของซิลิกามาสเตอร์แบท



ภาพที่ 3.4 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง

7. เครื่องอัดเบ้า (Compression moulding) มีชุดควบคุมความร้อน 2 ชุด สามารถตั้งอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องเท่ากับ 400°C ผลิตภัณฑ์บริษัทหงส์ยาวไทย จำกัด ใช้ขึ้นรูปและวัลคาไนซ์ขึ้นทดสอบตามแบบพิมพ์ต่างๆ



ภาพที่ 3.5 เครื่องอัดเบ้า

8. เครื่องทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ (Oscillating disk rheometer, ODR) ยี่ห้อ TECH PRO รุ่น rheo TECH OD+ ผลิตภัณฑ์บริษัท Tech-Pro, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์



ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์

9. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electronic balance) รุ่น PB 3002 -S มีพิกัดกำลังชั่งสูงสุด 3,100 กรัม ความละเอียดในการชั่ง 0.01 กรัม ผลิตภัณฑ์บริษัท Mettler-Toledo (Thailand) Limited และรุ่น METTLER AJ 150 มีพิกัดกำลังชั่งสูงสุด 150 กรัม ความละเอียดในการชั่ง 0.0001 กรัม ผลิตภัณฑ์บริษัท Diethelm Co., Ltd. ใช้ชั่งน้ำหนักของยาง และสารเคมี



ภาพที่ 3.7 เครื่องชั่งไฟฟ้า

10. เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester) ระบบ Durometer แบบ Shore A วัดความแข็ง 0-100 Shore A ผลิตภัณ์บริษัท Rex Gauge Co., Ltd. ประเทศสหรัฐอเมริกา



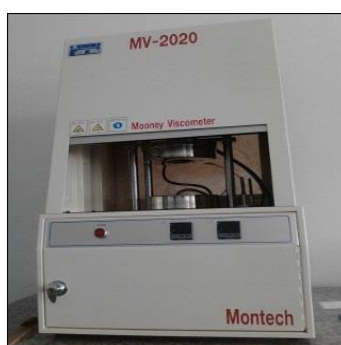
ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง

11. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensometer) ยี่ห้อ Testometric AX M350-10 kN ผลิตภัณ์บริษัท Testometric Co, Ltd. ประเทศอังกฤษ ใช้ทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง

12. เครื่องวัดความหนืด (Mooney viscometer) รุ่น MV 2020 ผลิตภัณ์บริษัท Montech ใช้วัดความหนืดของยางดิบหรือยางคอมปาวด์



ภาพที่ 3.10 เครื่องวัดความหนืด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท

เตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด (NRmSi) และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท (LNRmSi) ตามวิธีการเตรียมของจุฑาทิพย์ และคณะ (2556) โดยใช้น้ำยางสดปกติจากสวน และน้ำยางสดความหนืดต่ำที่ได้ปรับลดขนาดโมเลกุล และความหนืดให้เหมาะสมด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง ใช้น้ำยางสดที่ 30% TSC เติมสารรักษาสภาพน้ำยางผสม 20% Silica dispersion ตามสูตรในตารางที่ 1 ที่ปริมาณซิลิกา 40 phr และ 43 phr สำหรับใช้ในสูตรยางผสมที่สัดส่วนยาง NR/EPDM เท่ากับ 50/50 และ 70/30 ตามลำดับ โดยกวนส่วนผสมที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที (สำหรับน้ำยางความหนืดต่ำ ในขั้นตอนนี้จะเติมสารลดขนาดโมเลกุล กวนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที บ่มไว้ตามเวลาที่กำหนด เติมไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด กวนต่ออีก 30 นาที ก่อนการเติม 20% Silica dispersion จับตัวด้วยกรดอะซิติก 5% โดยน้ำหนัก ริดแผ่น นำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง แล้วนำไปผึ่งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ต่อด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทดสอบปริมาณซิลิกาที่เหลือในน้ำเซรัม โดยการหาเปอร์เซ็นต์ TSC น้ำเซรัมที่ได้จากการจับตัวน้ำยางซิลิกามาสเตอร์แบท

ตารางที่ 3.1 สูตรการเตรียม 20% Silica dispersion

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

3.3.2 ศึกษาผลของระยะเวลาการ preheat และปริมาณสารตัวเร่งต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางอีพดีเอ็ม

ศึกษาโดยใช้สารตัวเติมเป็นซิลิกาผง เตรียมคอมปาวด์ยางอีพดีเอ็มในสูตรที่นำไปใช้ในยางผสม สัดส่วนยางอีพดีเอ็มเท่ากับ 30 phr และ 50 phr ตามตารางที่ 3.2 บดผสมด้วยเครื่องผสมระบบเปิด (Two roll mill) โดยใช้เวลาในการผสม 15 นาที ตามวิธีการผสมดังนี้ ใส่สารเคมีทุกตัว ยกเว้นยางธรรมชาติ ซิลิกา high styrene resin และ DEG นำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเครื่อง Oscillating disk rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-07 แล้วนำคอมปาวด์ที่ได้ไป preheat ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยตู้อบความร้อนเป็นเวลา 0, 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 นาที นำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเครื่อง Oscillating disk rheometer (ODR) อีกครั้ง เลือกเวลาในการ preheat ที่ให้สมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ที่ดี มาแปรปริมาณสารตัวเร่ง TBBS และ TMTD จนได้อัตราการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสมสำหรับจะใช้ในสูตรยางผสมต่อไป

ตารางที่ 3.2 สูตรยางคอมปาวด์อีพดีเอ็มที่ใช้ศึกษาเวลาในการ preheat

Ingredient	Quantity of Ingredient (phr)			
	NR/EPDM : 70/30		NR/EPDM : 50/50	
NR	70	70	50	50
EPDM	30	30	50	50
Silica	30	30	20	20
High styrene resin	30	30	30	30
Naphthenic Oil	5	5	5	5
N330	30	-	30	-
TiO ₂	-	30	-	30
Zinc oxide	5	5	5	5
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5
6PPD	2	-	2	-
Wing stay L	-	2	-	2
Wax	1.5	1.5	1.5	1.5
TBBS	1.8	1.8	1.8	1.8
TMTD	1	1	1	1
Sulphur	2	2	2	2
Flame retardant	15	15	15	15
DEG (% by wt silica)	6	6	6	6
Silane (% by wt silica)	9	9	9	9

3.3.3 ศึกษาผลของชนิดซิลิกา และสัดส่วนของยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสมที่ใช้สารตัวเติมซิลิกา ร่วมกับเขม่าดำ

เตรียมคอมปาวด์ของยางอีพิตีเอ็ม โดยใช้สูตรคอมปาวด์ตามตารางที่ 3.3 และ 3.4 โดยบดผสมคอมปาวด์ยางอีพิตีเอ็มกับสารเคมีทุกตัวยกเว้น ยางธรรมชาติ ซิลิกา high styrene resin และ DEG บดผสมใส่สารเคมีเป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไป preheat เป็นเวลา 3 นาที ด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ซึ่งได้ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.2 นำยางคอมปาวด์ที่ได้มาทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเครื่อง Oscillating disk rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-07 แล้วนำมาผสมกับชนิดของยางโดยทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมระบบเปิด (Two roll mill) เป็นเวลา 10 นาที ประกอบด้วยยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติซิลิกา มาสเตอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำ ทั้งสัดส่วนยางธรรมชาติ และยางอีพิตีเอ็ม 70/30 และ 50/50 ตามลำดับ ร่วมกับซิลิกาผง DEG และ High styrene resin แล้วนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปทดสอบค่า scorch time (t_{s1}) ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเครื่อง Oscillating disk rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-07 นำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปอัดเข้าเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล ด้านความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM D 2240 มอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 412 และสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพจากการบ่มเร่ง

3.3.4 ศึกษาผลของชนิดซิลิกา และสัดส่วนของยางธรรมชาติ และยางอีพิตีเอ็มต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสมที่ใช้สารตัวเติมซิลิกา ร่วมกับไททานเนียมไดออกไซด์

เตรียมคอมปาวด์ตามข้อ 3.3.3 แต่ใช้สารตัวเติมไททานเนียมไดออกไซด์ร่วมกับซิลิกาแทนการใช้เขม่าดำ เพื่อใช้ในงานสี

ตารางที่ 3.3 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์หลังคayangที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 70/30

Ingredient	Quantity of Ingredient (phr)					
	NRpSi/EPDM		NRmsi/EPDM		LNRmsi/EPDM	
NR	70	70	NRmSi ₄₃	NRmSi ₄₃	LNRmSi ₄₃	LNRmSi ₄₃
EPDM	30	30	30	30	30	30
Silica	30	30	NRmSi ₄₃	NRmSi ₄₃	LNRmSi ₄₃	LNRmSi ₄₃
High styrene resin	30	30	30	30	30	30
Naphthenic Oil	5	5	5	5	5	5
N330	30	-	30	-	30	-
TiO ₂	-	30	-	30	-	30
Zinc oxide	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
6PPD	2	-	2	-	2	-
Wing stay L	-	2	-	2	-	2
Wax	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5	0.5
TBBS	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulphur	2	2	2	2	2	2
Flame retardant	15	15	15	15	15	15
DEG (%by wt silica)	6	6	6	6	6	6
Silane (%by wt silica)	9	9	9	9	9	9

ตารางที่ 3.4 สูตรคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์หลังคayangที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 50/50

Ingredient	Quantity of Ingredient (phr)					
	NRpSi/EPDM		NRmsi/EPDM		LNRmsi/EPDM	
NR	50	50	NRmSi ₄₀	NRmSi ₄₀	LNRmSi ₄₀	LNRmSi ₄₀
EPDM	50	50	50	50	50	50
Silica	20	20	NRmSi ₄₀	NRmSi ₄₀	LNRmSi ₄₀	LNRmSi ₄₀
High styrene resin	30	30	30	30	30	30
Naphthenic Oil	5	5	5	5	5	5
N330	30	-	30	-	30	-
TiO ₂	-	30	-	30	-	30
Zinc oxide	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
6PPD	2	-	2	-	2	-
Wing stay L	-	2	-	2	-	2
Wax	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
TBBS	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
TMTD	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulphur	2	2	2	2	2	2
Flame retardant	15	15	15	15	15	15
DEG (% by wt Silica)	6	6	6	6	6	6
Silane (%by wt silica)	9	9	9	9	9	9

3.3.5 ผลิตภัณฑ์หลังคayang

ขึ้นรูปยางผสมจากการใช้สารตัวเติมซิลิกาผง ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ด้วยวิธีการอัดเข้าแบบพิมพ์หลังคayangโดยใช้อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลาการวัลคาไนซ์ที่ได้จากการศึกษา

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 การเตรียมยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบ

4.1.1 ยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบจากน้ำยางสด

น้ำยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบจากน้ำยางสด (NRmSi) สามารถเตรียมได้โดยใช้ น้ำยางสดที่ได้จากสวนยางพารา เติมสารรักษาสภาพน้ำยางแล้วปรับ %TSC น้ำยางให้ได้ 30% TSC นำไปผสมกับ 20% silica dispersion ที่มีปริมาณซิลิกา 40 phr และ 43 phr สำหรับใช้ผสมในสูตร ยางที่สัดส่วน NR/EPDM เท่ากับ 50/50 และ 70/30 ตามลำดับ โดยใช้อัตราเร็วในการกวน 200 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจับตัวด้วยกรดอะซิติกความเข้มข้น 5 % โดยน้ำหนัก ริดแผ่นยาง นำไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง เพื่อชะล้างกรดอะซิติกที่ตกค้างแล้วนำไปผึ่งแห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้น นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบ ดังภาพที่ 4.1 พบว่าลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบที่มีปริมาณซิลิกา 43 phr จะมีสีขาว ชุ่มกว่าแผ่นยางที่มีปริมาณซิลิกา 40 phr และเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้น แผ่นยางจะมีความแข็ง มากขึ้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบ : ซิลิกา 40 phr (ก) และซิลิกา 43 phr (ข)

4.1.2 ยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบจากน้ำยางสดที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล

ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมาสเตอร์แบบ (LNRmSi) สามารถเตรียมได้โดยใช้ น้ำยางสดความหนืดต่ำที่ได้ปรับลดขนาดโมเลกุล และความหนืดให้เหมาะสมด้วยไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ปริมาณ 1 phr ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้ น้ำยางสดเติมสารรักษาสภาพ เติม สารลดขนาดโมเลกุลกวนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที บ่มไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เติมไฮดรอก ซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด กวนต่ออีก 30 นาที ก่อนการ เติม 20% silica dispersion จับตัวด้วยกรดอะซิติก 5% โดยน้ำหนัก นำไปริดเป็นแผ่น แช่อย่างทิ้งไว้ ในน้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปผึ่งแห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง และอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำนองเดียวกับยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบบ ได้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกา เมาสเตอร์แบบดังภาพที่ 4.2 พบว่าลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกา

มาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 43 phr จะมีสีขาวขุ่นกว่าแผ่นยางที่มีปริมาณซิลิกา 40 phr และเมื่อมีปริมาณซิลิกามากกว่า แผ่นยางจะมีความแข็งมากขึ้น ให้ผลในทำนองเดียวกับยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยางสดซิลิกามาสเตอร์แบทที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล พบว่าลักษณะแผ่นยางที่ได้จะมีผิวที่เรียบกว่า และมีความแข็งที่น้อยกว่า



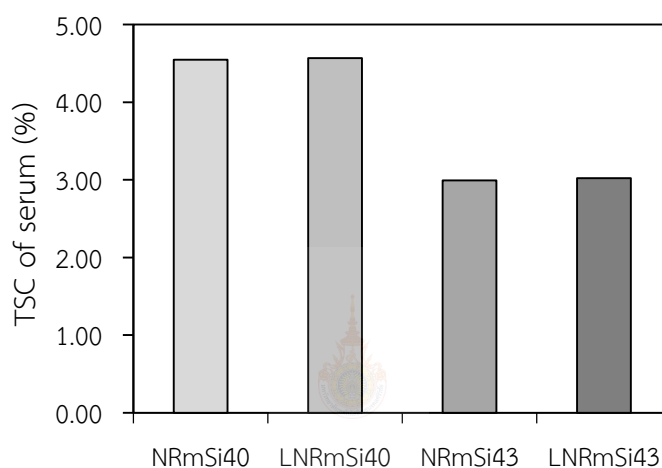
ภาพที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท : ซิลิกา 40 phr (ก) และซิลิกา 43 phr (ข)

4.1.3 ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัม

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัมจากการจับตัวยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ซึ่งหมายถึง ปริมาณส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง และอาจรวมถึงซิลิกาที่หลงเหลือจากการจับตัว ที่ซิลิกามาสเตอร์แบท 40 phr และ 43 phr ดังตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 2-5% แสดงว่ามีส่วนที่เป็น Silica dispersion ที่ไม่อยู่ในเนื้อยางน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการเตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 30-50 phr ซึ่งรายงานว่เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัมที่เหลือจากการจับตัวอยู่ในช่วง 1.5-3.5% ไม่แตกต่างจากการจับตัวน้ำยางแบบปกติ (จุฑาทิพย์ และคณะ, 2546)

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัมของยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบต และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบต

type of silica masterbatch	TSC of serum (%)
NRmSi40	4.55
LNRmSi40	4.57
NRmSi43	3.00
LNRmSi43	3.02



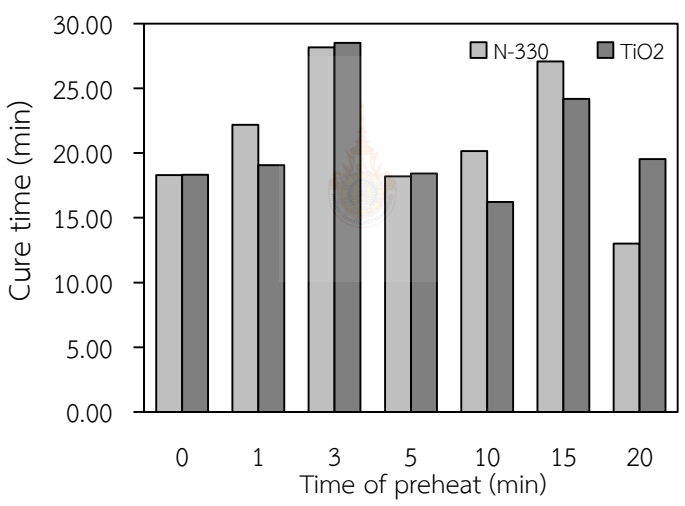
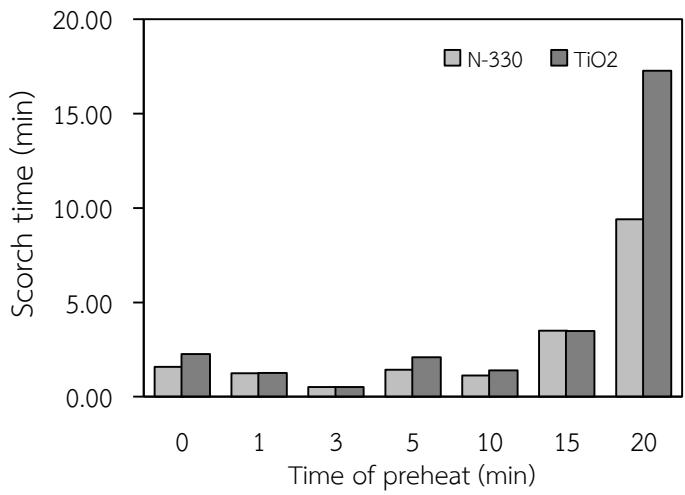
ภาพที่ 4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเซรัมของยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบต และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบต

4.2 ผลของระยะเวลาการ preheat และสารตัวเร่งต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM

4.2.1 ผลของระยะเวลาที่ preheat ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM

ผลของระยะเวลาการ preheat ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM สัดส่วนเท่ากับ 50/50 แปรเวลาการ preheat ที่ 0, 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 นาที แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ายางผสม NR/EPDM จะให้ค่า scorch time ที่สั้นลง ในช่วงเวลาการ preheat 1 ถึง 5 นาที ตามลำดับ เนื่องจากการ preheat ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในยางผสม NR/EPDM เกิดเป็น rubber bound intermediate (กรรณิการ์และคณะ, 2551) แต่เมื่อเวลาในการ preheat เกิน 10 นาที พบว่าค่า scorch time เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดการวัลคาไนซ์ก่อให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล และเกิดการ scorch หลังจากการ preheat ทำให้ยางหมดสภาพการไหลส่งผลให้ไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ ค่า cure time มีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการ preheat เพิ่มขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนขณะ preheat ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์แล้วบางส่วน เวลาในการวัลคาไนซ์สมบูรณ์จึงลดลง เหมือนกันทั้งยางที่ใช้สารตัวเติมซิลิกาพร้อมกับเขม่าดำ และซิลิ

การร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ดังภาพที่ 4.4 อย่างไรก็ตามอย่างที่ใส่สารตัวเติมไททาเนียมไดออกไซด์ให้ scorch time สูงกว่าการใช้เขม่าดำ ทำให้ยางมีสมบัติการไหลที่ดีกว่า



ภาพที่ 4.4 : Scorch time และ Cure time ของยางที่เติมสารตัวเติมไททาเนียมไดออกไซด์และเขม่าดำต่างกันในระยะเวลาการ preheat 50 นาที

ตารางที่ 4.2 สมบัติการวัลคาไนซ์ยางผสม NR/EPDM ที่ใช้สารตัวเร่ง TBBS 1.8 phr ร่วมกับ TMTD 1.0 phr และแปรเวลาในการ preheat

time of preheat (min)	vulcanization properties	
	scorch time (min)	cure time (min)
EPDM 50/N330		
0	1.59	18.29
1	1.24	22.17
3	0.51	28.51
5	1.43	18.19
10	1.13	20.16
15	3.50	27.08
20	9.40	13.01
EPDM 50/TiO ₂		
0	2.27	18.32
1	1.27	19.06
3	0.51	28.51
5	2.10	18.43
10	1.40	16.21
15	3.49	24.19
20	17.27	19.54

4.2.2 ผลของปริมาณสารตัวเร่งในยางผสม NR/EPDM ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์

ผลของสารตัวเร่งต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM โดยใช้สารตัวเร่ง TBBS 1 phr ร่วมกับ TMTD 0.5 และ 0.3 phr นำไปใช้ในยางผสม EPDM/NR ที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 พบว่าค่า scorch time ของยางผสม NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อ preheat ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในยางผสม NR/EPDM ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเร่ง ค่า scorch time และ cure time ลดลง นอกจากนี้ค่า scorch time และ cure time จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสัดส่วนของยาง EPDM เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางอีพิตีเอ็มมีพันธะคู่ย่อย ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลน้อยกว่ายางธรรมชาติ จึงวัลคาไนซ์ได้ช้ากว่าในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 4.3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM ที่มีปริมาณสารตัวเร่งแตกต่างกัน

NR/EPDM ratios	vulcanization properties	
	scorch time (min)	cure time (min)
EPDM Compound for 70/30 blend		
TBBS 1 phr TMTD 0.3 phr		
Before preheat	1.25	8.17
After preheat	1.05	7.55
TBBS 1 phr TMTD 0.5 phr		
Before preheat	1.07	22.14
After preheat	1.05	19.11
EPDM Compound for 50/50 blend		
TBBS 1 phr TMTD 0.3 phr		
Before preheat	1.59	24.33
After preheat	1.48	23.06
TBBS 1 phr TMTD 0.5 phr		
Before preheat	1.35	25.07
After preheat	1.23	22.16

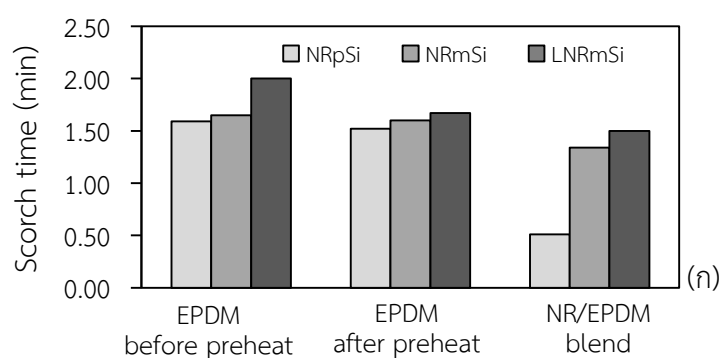
4.3 ผลของชนิดซิลิกา และสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพีดีเอ็มต่อสมบัติของยางผสมที่ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ

4.3.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

สมบัติการวัลคาไนซ์ของคอมปาวด์ยางผสม (NR/EPDM) ที่แปรชนิดซิลิกา คือ ซิลิกาผง ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 70/30 และ 50/50 ร่วมกับสารตัวเติมเขม่าดำที่ 30 phr พบว่ายางผสมซิลิกามาสเตอร์แบท และยางผสมความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท จะมีค่า scorch time ที่สูงกว่ายางผสมซิลิกาผง เนื่องจากยางซิลิกามาสเตอร์แบทมีการกระจายตัวของซิลิกาได้ดีตั้งแต่สภาวะการเตรียมมาสเตอร์แบทในน้ำยาง จึงส่งผลให้ซิลิกามาสเตอร์แบทเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าซิลิกาแบบผง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของซิลิกาและเฟสยางดีขึ้น จึงให้ค่า scorch time สูงขึ้น ในขณะที่ cure time ลดลง ส่วนค่า scorch time และ cure time ของยางผสมก่อนและหลังการ preheat ไม่เปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทและยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ให้ยางผสมที่มีอัตราการวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนผสมที่ต่างกัน พบว่าเมื่อสัดส่วนยาง EPDM ในคู่ผสมเพิ่มขึ้น ยางผสมจะมี scorch time และ cure time เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณพันธะคู่ในยางผสมลดลงตามปริมาณยาง EPDM ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ

type of compound	vulcanization properties	
	scorch time (min)	cure time (min)
NR/EPDM : 70/30		
NRpSi		
EPDM (before preheat)	1.59	24.33
EPDM (after preheat)	1.52	24.06
NR/EPDM blend	0.51	23.34
NRmSi		
EPDM (before preheat)	1.65	17.16
EPDM (after preheat)	1.60	16.00
NR/EPDM blend	1.34	18.56
LNRmSi		
EPDM (before preheat)	2.00	16.41
EPDM (after preheat)	1.67	16.21
NR/EPDM blend	1.50	20.34
NR/EPDM : 50/50		
NRpSi		
EPDM (before preheat)	1.01	28.51
EPDM (after preheat)	0.59	28.00
NR/EPDM blend	0.52	27.97
NRmSi		
EPDM (before preheat)	1.59	18.29
EPDM (after preheat)	1.50	18.20
NR/EPDM blend	1.68	18.56
LNRmSi		
EPDM (before preheat)	1.66	18.34
EPDM (after preheat)	1.60	18.78
NR/EPDM blend	1.39	19.01





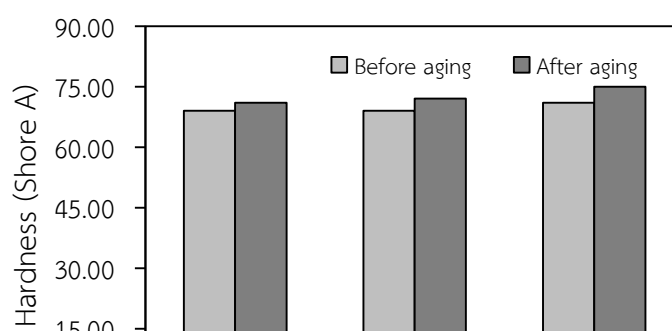
ภาพที่ 4.5 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM : scorch time ของสัดส่วน 70:30 (ก)
50:50 (ข) cure time ของสัดส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)

4.3.2 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM ที่แปรชนิดซิลิกา คือ ซิลิกาผง ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางลดความหนืดซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 70/30 และ 50/50 ร่วมกับสารตัวเติมเขม่าดำที่ 30 phr ดังตารางที่ 4.5 พบว่าสมบัติด้านความแข็งของยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทและยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท มีค่าความแข็งสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาชนิดผงเล็กน้อย และความแข็งหลังจากการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.6 เหมือนกันทั้งสัดส่วน 70/30 และ 50/50 เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนยางผสมสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้มากขึ้น

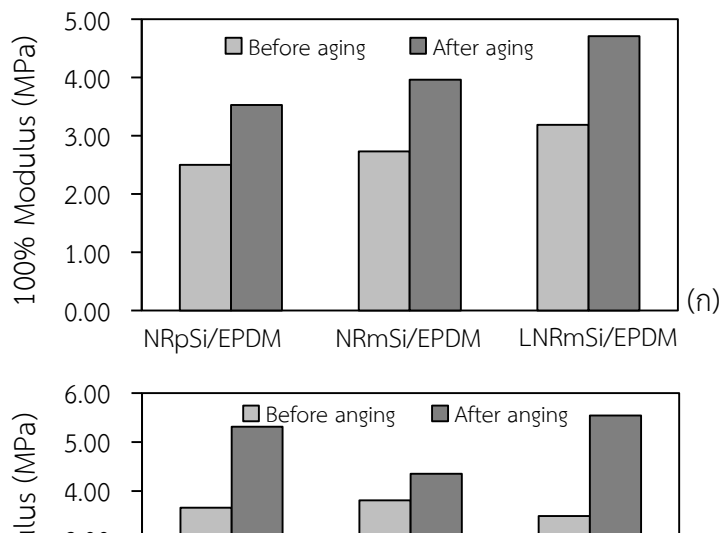
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิกา ร่วมกับเขม่าดำ

type of compound	hardness (Shore A)	100% modulus (MPa)	300% modulus (MPa)	tensile strength (MPa)	elongation at break (%)
NR/EPDM : 70/30					
Before aging					
NRpsi/EPDM	69	2.59	4.68	5.81	300
NRmsi/EPDM	69	3.10	5.72	7.53	420
LNRmsi/EPDM	71	3.19	6.16	8.97	460
After aging					
NRpsi/EPDM	71	3.53	-	4.49	220
NRmsi/EPDM	72	3.96	-	7.42	260
LNRmsi/EPDM	75	4.71	-	8.40	280
NR/EPDM : 50/50					
Before aging					
NRpsi/EPDM	71	3.66	7.41	10.3	400
NRmsi/EPDM	71	3.81	8.82	8.97	420
LNRmsi/EPDM	74	3.49	8.83	9.75	460
After aging					
NRpsi/EPDM	72	5.31	7.93	9.67	340
NRmsi/EPDM	72	4.35	7.90	8.11	340
LNRmsi/EPDM	75	5.54	7.85	8.99	320



ภาพที่ 4.6 ความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัดส่วน 70:30 (ก) และสัดส่วน 50:50 (ข)

มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมที่สัดส่วน 70/30 ที่ใช้ซิลิกาเมสเทอร์แบท ทั้งยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบท จะให้มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% สูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผง เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีกว่าของซิลิกาตั้งแต่ในสถานะน้ำยาง ทำให้เกิดการเสริมแรงที่ดีขึ้น และยางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบท จะให้มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% สูงกว่ายางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท เนื่องจากความหนืดที่น้อยลงของยางธรรมชาติ ทำให้ซิลิกามีการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น ดังภาพที่ 4.7 อย่างไรก็ตามที่สัดส่วน 50/50 ซึ่งมีสัดส่วนของยางธรรมชาติลดลง การเสริมแรงเนื่องจากการกระจายตัวของซิลิกาไม่แสดงผลชัดเจน ทำให้มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางผสมที่ใช้ซิลิกาเมสเทอร์แบท และซิลิกาผงให้ค่าไม่แตกต่างกัน หลังจากการบ่มแรง มอดูลัสที่ระยะยืด 100% มีค่าเพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งสัดส่วน 70/30 และ 50/50 เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนยางผสมสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้มากขึ้น ทำให้ยางแข็งขึ้นค่ามอดูลัสจึงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากการบ่มแรงทำให้ยางผสมเกิดการเสื่อมสภาพ มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของสัดส่วน 50/50 จึงมีค่าลดลง และยางผสมเกิดการขาดก่อนถึงระยะยืดที่ 300% สำหรับสัดส่วน 70/30



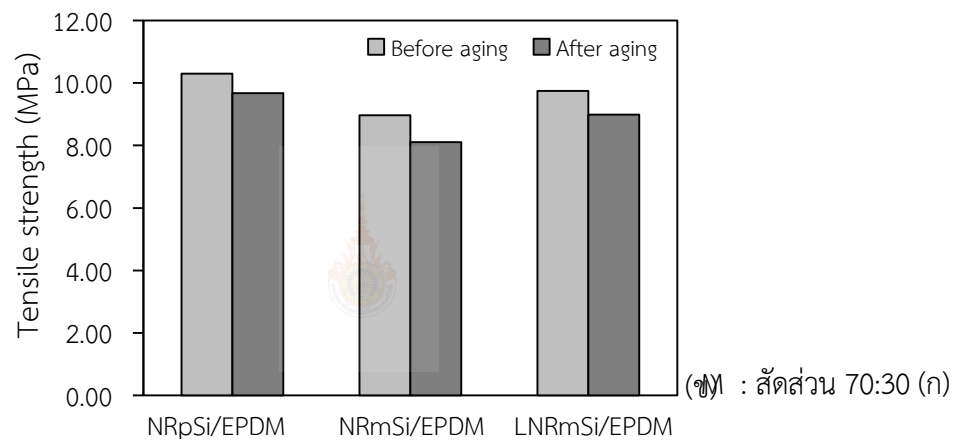
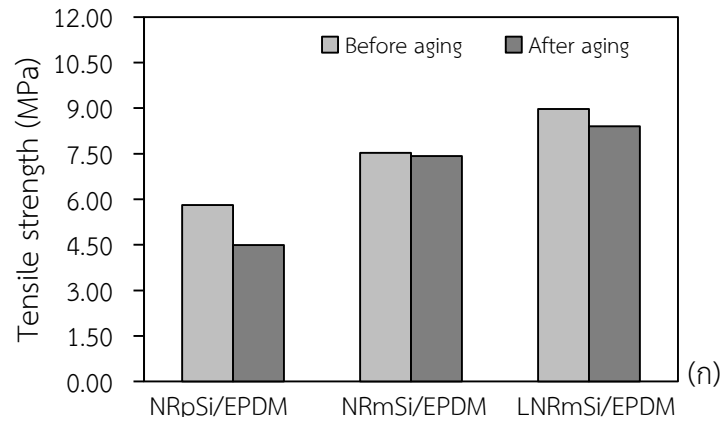


ภาพที่ 4.7 มอดูลัสก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : ที่ระยะยืด 100% ของสัดส่วน
7 0 : 3 0

(ก) 50:50 (ข) ที่ระยะยืด 300% ของสัดส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)

ความต้านทานต่อแรงดึงของยางผสมที่สัดส่วน 70/30 ที่ใช้ซิลิกาเมาสเตอร์แบท ทั้งยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมาสเตอร์แบท จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผงอย่างชัดเจน เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีกว่าของซิลิกาตั้งแต่ในสถานะน้ำยาง ทำให้เกิดการเสริมแรงที่ดีขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว และยางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมาสเตอร์แบท จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกาเมาสเตอร์แบท เนื่องจากความหนืดที่น้อยลงของยางธรรมชาติ ทำให้ซิลิกามีการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น ดังภาพที่ 4.8 และการบ่มแรงทำให้ยางผสมเกิดการเสื่อมสภาพความต้านทานต่อแรงดึงจึงลดลง เหมือนกันทั้งที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 อย่างไรก็ตามเนื่องจากที่สัดส่วน 50/50 ปริมาณยางธรรมชาติมีสัดส่วนที่ลดลง และการกระจายตัวของซิลิกามีผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงน้อยกว่าที่สัดส่วน 70/30 ดังนั้นที่สัดส่วนนี้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน และความต้านทานต่อ

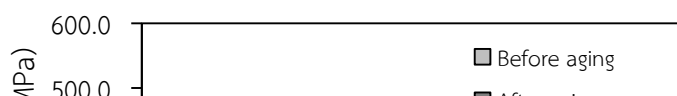
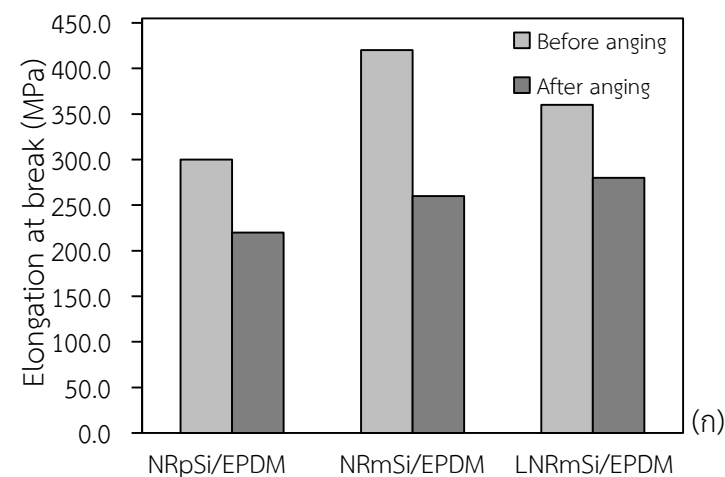
แรงดึงหลังการบ่มแรงลดลงน้อยกว่าที่สัดส่วน 70/30 เนื่องจากยาง EPDM มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลน้อยกว่ายางธรรมชาติ จึงทนต่อการเสื่อมได้ดีกว่ายางธรรมชาติ



ภาพที่ 4.8

(ข) : สัดส่วน 70:30 (ก)

ความสามารถในการยืดขาดของยางผสมทสสัดส่วน 70/30 และ 50/50 ที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้งยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ให้ผลในการทำงานเดียวกัน คือ ให้ความสามารถในการยืดขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของซิลิกาทำใหยางผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.9 และการบ่มแรงทำใหยางผสมเกิดการเสื่อมสภาพ ความสามารถในการยืดขาดจึงลดลงให้ผลในการทำงานเดียวกับความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสที่ระยะยืด 300%



ภาพที่ 4.9 ความสามารถในการยืดขาดก่อนและหลังปั๊มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัดส่วน 70:30 (ก)
และสัดส่วน 50:50 (ข)



4.4 ผลของชนิดซิลิกา สัดส่วนยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มต่อสมบัติของยางผสมที่ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์

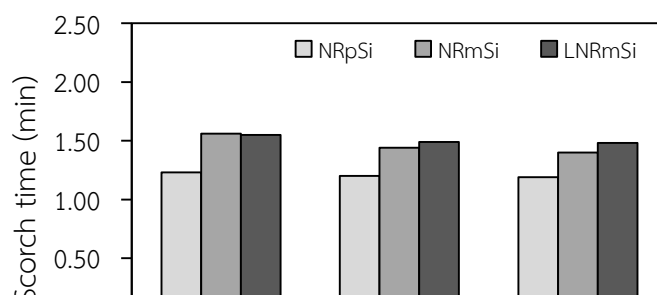
4.4.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

สมบัติการวัลคาไนซ์ของคอมปาวด์ยางผสม (NR/EPDM) ที่แปรชนิดซิลิกา คือ ซิลิกาผง ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 70/30 และ 50/50 ร่วมกับสารตัวเติมไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 30 phr ดังตารางที่ 4.6 พบว่ายางผสมซิลิกามาสเตอร์แบท และยางผสมความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท จะมีค่า scorch time ที่สูงกว่ายางผสมซิลิกาผง เนื่องจากยางซิลิกามาสเตอร์แบทมีการกระจายตัวของซิลิกาได้ดีตั้งแต่สถานะการเตรียมมาสเตอร์แบทในน้ำยาง จึงส่งผลให้ซิลิกามาสเตอร์แบทเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าซิลิกาแบบผง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของซิลิกาและเฟสยางดีขึ้น จึงให้ค่า scorch time สูงขึ้นเหมือนกันทั้งสัดส่วน 70/30 และ 50/50 และมีแนวโน้มเดียวกับการใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ ค่า cure time ของสัดส่วน 70/30 ที่ใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทจะให้ค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ของสัดส่วน 50/50 ค่า cure time ลดลงเมื่อใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบท การ preheat ให้ค่า scorch time ลดลงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.10 นอกจากนี้การใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ให้ค่า cure time น้อยกว่าการใช้ซิลิการ่วมกับเขม่าดำ เหมือนกันทั้งยางผสมที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50



ตารางที่ 4.6 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิกาพร้อมกับไททาเนียมไดออกไซด์

type of compound	vulcanization properties	
	scorch time (min)	cure time (min)
NR/EPDM : 70/30		
NRpSi		
EPDM (before preheat)	1.23	16.12
EPDM (after preheat)	1.20	16.00
NR/EPDM blend	1.19	17.11
NRmSi		
EPDM (before preheat)	1.56	17.10
EPDM (after preheat)	1.44	16.89
NR/EPDM blend	1.40	17.23
LNRmSi		
EPDM (before preheat)	1.55	17.56
EPDM (after preheat)	1.49	17.08
NR/EPDM blend	1.48	17.31
NR/EPDM : 50/50		
NRpSi		
EPDM (before preheat)	0.51	24.15
EPDM (after preheat)	0.50	23.55
NR/EPDM blend	0.61	22.94
NRmSi		
EPDM (before preheat)	1.87	16.34
EPDM (after preheat)	1.80	16.23
NR/EPDM blend	1.88	16.33
LNRmSi		
EPDM (before preheat)	1.67	17.32
EPDM (after preheat)	1.64	16.74
NR/EPDM blend	1.71	17.21





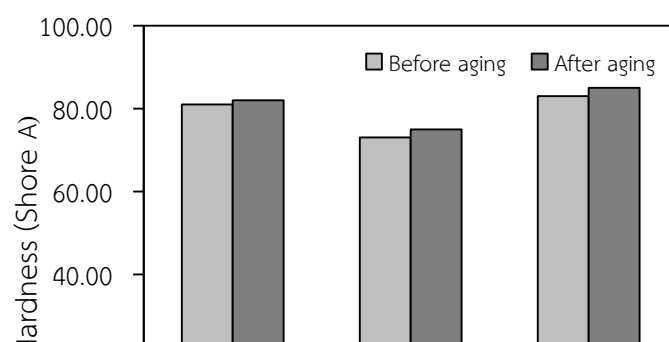
ภาพที่ 4.10 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM : scorch time ของสัดส่วน 70:30 (ก)
50:50 (ข) cure time ของสัดส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)

4.4.2 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM ที่แปรชนิดซิลิกา คือ ซิลิกาผง ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วนของ NR/EPDM เท่ากับ 70/30 และ 50/50 ร่วมกับสารตัวเติมไททานเนียมไดออกไซด์ที่ 30 phr ดังตารางที่ 4.7 พบว่าสมบัติด้านความแข็งของยางผสมที่สัดส่วน 70/30 จะให้ความแข็งสูงกว่าที่สัดส่วน 50/50 และความแข็งหลังการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.11 เหมือนกันทั้งสัดส่วน 70/30 และ 50/50 เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนยางผสมสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้มากขึ้น

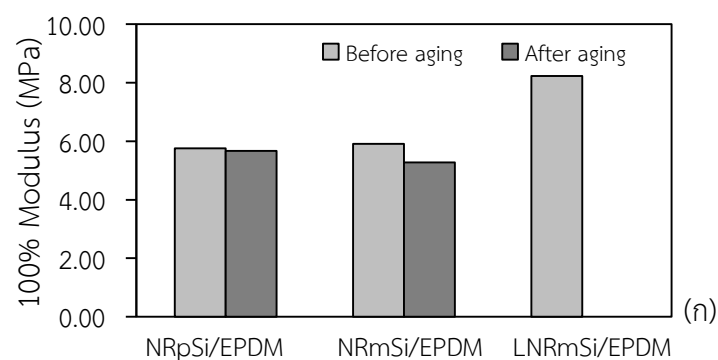
ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับไททานเนียมไดออกไซด์

type of compound	hardness (Shore A)	100%modulus (MPa)	300%modulus (MPa)	tensile strength (MPa)	elongation at break (%)
NR/EPDM : 70/30					
Before aging					
NRpsi/EPDM	81	5.76	-	5.81	300
NRmsi/EPDM	73	7.51	-	7.53	300
LNRmsi/EPDM	83	6.46	7.51	8.97	340
After aging					
NRpsi/EPDM	82	3.10	-	5.80	220
NRmsi/EPDM	75	4.29	-	7.31	260
LNRmsi/EPDM	85	-	-	8.09	100
NR/EPDM : 50/50					
Before aging					
NRpsi/EPDM	71	2.93	6.10	6.45	250
NRmsi/EPDM	69	3.06	6.23	8.02	300
LNRmsi/EPDM	69	3.91	7.24	10.13	350
After aging					
NRpsi/EPDM	72	5.31	7.93	6.06	100
NRmsi/EPDM	70	4.35	7.90	7.95	280
LNRmsi/EPDM	70	5.54	7.85	9.20	380



ภาพที่ 4.11 ความแข็งก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : สัดส่วน 70/30 (ก) และสัดส่วน 50/50 (ข)

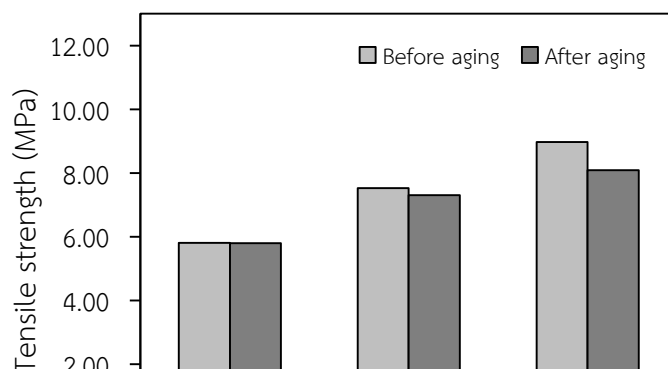
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางผสมที่สัดส่วน 70/30 จะให้ค่าสูงกว่าที่สัดส่วน 50/50 และค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของสัดส่วน 70/30 หลังการบ่มแรงจะลดลง เนื่องจากยางผสมเกิดการเสื่อมทำให้ความแข็งแรงลดลง อย่างไรก็ตามยางผสมที่สัดส่วน 50/50 มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่ดีกว่าของสัดส่วน 70/30 เนื่องจากมีสัดส่วนของยาง EPDM มากขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแรง ดังภาพที่ 4.12 เนื่องจากเมื่อได้รับความร้อนทำให้ยางผสมสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้มากขึ้น ส่งผลให้ยางแข็งขึ้นค่ามอดูลัสจึงเพิ่มขึ้น





ภาพที่ 4.12 มอดูลัสก่อนและหลังบ่มแรงของยางผสม NR/EPDM : ที่ระยะยืด 100% ของสัดส่วน 70:30 (ก) 50:50 (ข) ที่ระยะยืด 300% ของสัดส่วน 70:30 (ค) และ 50:50 (ง)

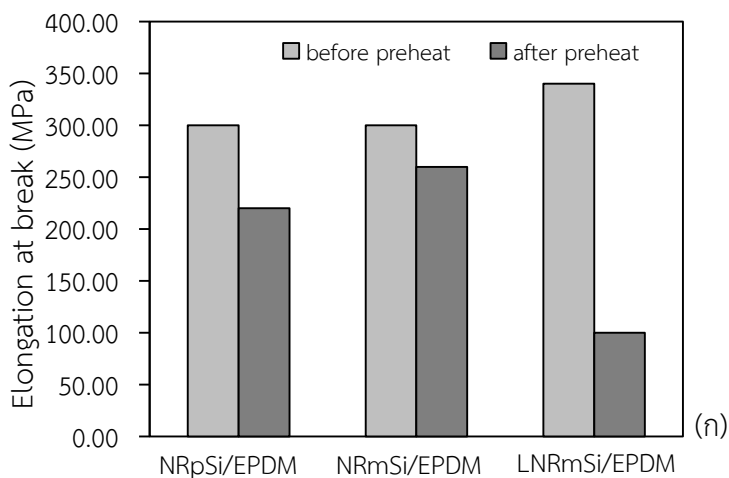
ความต้านทานต่อแรงดึงของยางผสมที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ที่ใช้ซิลิกาเมสเทอร์แบท ทั้งยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบท จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผงอย่างชัดเจน เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีกว่าของซิลิกาตั้งแต่ในสถานะน้ำยาง ทำให้เกิดการเสริมแรงที่ดีขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว และยางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบท จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท เนื่องจากความหนืดที่น้อยลงของยางธรรมชาติ ทำให้ซิลิกามีการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น ดังภาพที่ 4.13 และการบ่มแรงทำให้ยางผสมเกิดการเสื่อมสภาพความต้านทานต่อแรงดึงจึงลดลง เหมือนกันทั้งที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50



ภาพที่ 4.13 ความต้านทานต่อแรงดึงก่อนและหลังป้อนแรงของยางผสม NR/EPDM : สัดส่วน 70/30 (ก) และสัดส่วน 50/50 (ข)



ความสามารถในการยืดขาดของยางผสมที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ที่ใช้ซิลิกาเมสเทอร์แบท ทั้งยางธรรมชาติซิลิกาเมสเทอร์แบท และยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกาเมสเทอร์แบท ให้ผลในการทำงานเดียวกัน คือ ให้ความสามารถในการยืดขาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของซิลิกาทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.14 และการป้อนแรงทำให้ยางผสมเกิดการเสื่อมสภาพ ความสามารถในการยืดขาดจึงลดลง



ภาพที่ 4.14 ความสามารถในการยืดขาดก่อนและหลังบ่มเร่งของยางผสม NR/EPDM : สัตส่วน
70/30 (ก) และ สัตส่วน 50/50 (ข)



บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การเตรียมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท

น้ำยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดและน้ำยางสดที่ผ่านการลดโมเลกุลผสมกับ 20% silica dispersion ที่ปริมาณซิลิกา 40 phr และ 43 phr พบว่ายางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 43 phr จะมีสีขาวขุ่นกว่าแผ่นยางที่มีปริมาณซิลิกา 40 phr และเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้น แผ่นยางจะมีความแข็งมากขึ้น นอกจากนี้ น้ำยางสดซิลิกามาสเตอร์แบทที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลมีลักษณะผิวของแผ่นยางที่เรียกว่า และมีความแข็งที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยางเสริมมีค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 2-5%

5.1.2 ผลของระยะเวลาการ preheat และปริมาณสารตัวเร่งต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM

ยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 50/50 ที่เวลาการ preheat 0, 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 นาที จะให้ค่า scorch time ที่สั้นลง ในช่วงเวลาการ preheat 1 ถึง 5 นาที และค่า cure time มีแนวโน้มลดลง เมื่อเวลาในการ preheat เพิ่มขึ้น เวลาการ preheat ที่เหมาะสม คือ 3 นาที เหมือนกันทั้งยางที่ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ และซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ แต่ยางที่ใช้สารตัวเติมไททาเนียมไดออกไซด์ให้ค่า scorch time สูงกว่าการใช้เขม่าดำ สำหรับสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางผสม NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 และ 50/50 โดยใช้สารตัวเร่ง TBBS 1 phr ร่วมกับ TMTD 0.5 และ 0.3 phr ค่า scorch time มีค่าลดลง และเมื่อปริมาณสารตัวเร่งเพิ่มขึ้น ค่า scorch time และ cure time ให้ค่าลดลง นอกจากนี้ค่า scorch time และ cure time จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสัดส่วนของยางอีทีดีเอ็มเพิ่มขึ้น

5.1.3 ผลของชนิดซิลิกา และสัดส่วนของยาง NR/EPDM ต่อสมบัติของยางผสมที่ใช้สารตัวเติมซิลิการ่วมกับเขม่าดำ และซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์

ยางผสม NR/EPDM สัดส่วน 70/30 และ 50/50 ที่แปรชนิดซิลิการ่วมกับเขม่าดำปริมาณ 30 phr และซิลิการ่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ 30 phr ให้ผลในทำนองเดียวกัน ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้มีค่า scorch time ที่สูงกว่ายางผสมซิลิกาผง แต่ค่า cure time ลดลง ส่วนค่า scorch time และ cure time ของยางผสมก่อนและหลังการ preheat ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงกลของยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท มีค่าความแข็งที่สูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาชนิดผง และความแข็งหลังจากการบ่มเร่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สมบัติการดึงยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท และยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทให้สมบัติด้านการดึง ได้แก่ มอดูลัสที่ระยะยืด 100% มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดขาดสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผงอย่างชัดเจน ในยางผสมที่สัดส่วน 70/30 และยางผสมที่สัดส่วน 50/50 สามารถต้านทานต่อการเสื่อมสภาพได้ดีกว่าที่สัดส่วน 70/30

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ยางธรรมชาติซิลิกาไมสเตอร์แบบผสมกับยางชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติ
2. การใช้วัสดุชนิดต่างๆ เคลือบผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์



เอกสารอ้างอิง

- กรรณิการ์ สหกะโร และคณะ. 2551. ยางธรรมชาติด้านการเชื่อมจากยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพดีเอ็มเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดสีขาว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ชาคริต สิริสิงห์ พงษ์ธร แซ่ฮ่วย และภุชงค์ ทับทอง. 2551. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาในยางธรรมชาติ. **วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ** 24(1): 95-110.
- ชินรัตน์ ลาภกุลธนะอนันต์. 2553. ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) ใหม่ที่สังเคราะห์ด้วย 5-vinyl-2-norbornene. **วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย** 4(3): 29.
- ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ เอกชัย วิมลมาลา ธีระศักดิ์ หมากผิน และชัชวาลย์ กันทะลา. 2548. โครงการการผลิตและทดสอบหลังคายางพาราจากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับซีลี้อย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- พงษ์ธร แซ่ฮ่วย. 2548. **สารเคมียาง**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร.
- พงษ์ธร แซ่ฮ่วย. 2548. **การใช้ซิลิกาเป็นสารเคมีในยาง**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร.
- พนิดา บุญโท และ เนตรนารี เพ็ชรจำรัส. 2551. การเตรียมมาสเตอร์แบบของซิลิกาในน้ำยางสด คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดนครศรีธรรมราช.
- วาทีณี ภาคอารีย์ และณัฐพงศ์ นิธิอุทัย. 2552. การเตรียมวัสดุเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์จากเศษยางครัมป์และพลาสติก. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- โสภภาพรรณ จินดาไพศาล. 2553. การเตรียมยางธรรมชาติเหลวควบคุมน้ำหนักโมเลกุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อรสา ภัทรไพบูลย์ชัย ชลดา เลวิส โสภากิสรุณ ฐิติการณ ชูใหม่ อัจฉรีย์ ศรีประพันธ์ และสมคิด ศรีสุวรรณ. 2546. การปรับสภาพยางธรรมชาติเพื่อลดพลังงานที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- Akinlabi A.K., Okieimen F.E., Egharevba F., Malomo D. 2006. Investigation of the effect of mixing schemes on rheological and physico-mechanical properties of modified natural rubber blends. **Materials and Design** 27: 783–788.
- Ansarifar A., Shiah S. F., Bennett M. 2006. Optimising the chemical bonding between silanised silica nanofiller and natural rubber and assessing its effects on the properties of the rubber. **International Journal of Adhesion & Adhesive**. 26: 454-463.

- Arayaprane, W. and Rempel, G. L. 2007. Properties of NR/EPDM Blends with or without Methyl Methacrylate-Butadiene-Styrene (MBS) as a Compatibilizer. **International Journal of Materials & Structural Reliability**. 5(1): 1-12.
- Artchomphoo, J. and Boonsong, K. 2013. Nanocomposite based on silica masterbatch reinforced natural rubber. **Burapha University International Conference 2013**. 4th-5th July 2013. Thailand.
- Chapman A. V. and Tinker A.J. 2003. Vulcanization of blends-crosslink distribution and its effect on properties. **KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe** 56(10): 533-544.
- Chirarattananon, S. and Taweekun, J., 2002, A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. **Energy Conversion and Management**. 44(5): 743-762.
- Cook S. 1998. **Blends of Natural Rubber**. Chapman and Hall Publishers, London.
- El-Sabbagh S. H. 2003. Compatibility study of natural rubber and ethylene-propylene-diene rubber blends. **Journal of Applied Polymer Science** 90: 1-11.
- Frohlich J., Niedermeier W. and Luginsland H. D. 2005. The effect of filler-filler and filler-elastomer interaction on rubber reinforcement. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. 36: 449-460.
- Ghosh A. K., Das A. and Basu D. K. 2004. Effect of bis(diisopropyl) thiophosphoryl disulfide on the covulcanization of styrene-butadiene rubber and ethylene-propylene-diene (monomer) blends. **Journal of Applied Polymer Science** 92: 1231-1242.
- Layer R.W. and Lattimer R.P. 1990. Protection of rubber against azone. **Rubber Chemistry and Technology** 63: 426-450.
- LeBlanc J. L. 2002. Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. **Progress in Polymer Science**. 27: 627-687.
- Lewis C., Bunyung S. and Kiatkamjornwong S. 2003. Rheological properties and compatibility of NR/EPDM and NR/Brominated EPDM blends. **Journal of Applied Polymer Science** 89: 837-847.
- Niyogi, K. 2007., **Natural and Synthetic Rubber**. Science and Technology of Rubber : 1-33
- Peng Z., Kong L. X., Li S. D., Chen Y., Huang M. F. 2007. Self-assembled natural rubber/silica nanocomposites: its preparation and characterization. **Composites Science and Technology**. 67: 3130-3139.

- Rattanasom N., Saowapark T. and Deeprasertkul C. 2007. Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. **Polymer Testing** 26: 369-377.
- Rokowski, J. M. and Ennis, T. 2004. Acrylic roof coatings for EPDM roofing : 22-25.
- Sae-ouia, P., Sirisinhab, C., Thepsuwana, U., and Thapthonga , P.2007. Influence of accelerator type on properties of NR/EPDM blend. **Polymer Testing** 26:1062-1067.
- Suma, N., Joseph, R. and George, K. E. 1993. Improved mechanical properties of NR/EPDM and NR/butyl blends by precuring EPDM and butyl. **Journal of Applied Polymer Science** 49: 549-557.
- Tanaka, Y., Sakaki, T., Kawasaki, A., Hayashi, M., kanamaru, E. and Shibata. 1999. Production process of depolymerized natural rubber. US Patent No 5856600.
- Van de Ven, P. M. and Noordermeer, J. W. M. 2000. Design of EPDM for blends with NR/BR for tire sidewalls: influence of molecular structure and carbon black distribution on properties. **Rubber World**. 222 (6): 55-60.
- Yahya, S., Azura , R. and Ahmad, Z. 2011. Effect of Curing Systems on Thermal Degradation Behaviour of Natural Rubber (SMR CV 60). **Journal of Physical Science** 22(2): 1-14.
- Yanagisawa, K.,Someno, K. and Mukai, U. 2005. Natural Rubber Composition. US Patent No. 6841606 B2.
- Zaharescu, T., Melter,V. and Vilcu, R. 2000. Thermal properties of EPDM/NR blend. **Polymer Degradation and Stability** 70 : 341-345.