อิทธิพลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของบล็อกยางปูพื้น

Effects of Type and Content of Carbon Black on the Mechanical Properties of Rubber Flooring Block

นิศารัตน์ เจือสนิท

รวิภา ทองศรี

Nisarat Juasanit

Ravipha Thongsri

โครงงานสหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ 2563

บริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด
เลขที่ 49 หมู่ 7 ต.นาแขม อ.กบินทร์บุรี
จ.ปราจีนบุรี 25110

19 มีนาคม 2564

เรื่อง ขอส่งรายงานสหกิจศึกษา

เรียน ประธานหลักสูตรวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์

ตามที่ข้าพเจ้า นางสาวนิศารัตน์ เจือสนิท และนางสาววริภา ทองศรี นิสิตหลักสูตรวิศวกรรมยางและ พอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ ได้ฝึกงานสหกิจศึกษา ระหว่างวันที่ 30 พฤศจิกายน 2563 – 19 มีนาคม 2564 ในตำแหน่ง นิสิตฝึกงานแผนกวิจัยและพัฒนา ณ บริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด บัดนี้การฝึกสหกิจศึกษาได้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์แล้ว ข้าพเจ้าจึงขอส่งรายงานสหกิจศึกษาดังกล่าว

จึงเรียนมาเพื่อทราบโปรดพิจารณา

ขอแสดงความนับถือ

(นางสาวนิศารัตน์ เจือสนิท)

(นางสาววริภา ทองศรี)
นิสิตหลักสูตรวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

( ) อนุมัติ ( ) ไม่อนุมัติ

(อาจารย์ดร.อนิดา เพ็ชรแก้ว)
ประธานหลักสูตรวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

ชื่องานวิจัย อิทธิพลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของบล็อกยางปูพื้น

Effects of Type and Content of Carbon Black on the Mechanical Properties of Rubber Flooring Block

ผู้วิจัย นางสาวนิศารัตน์ เจือสนิท

นางสาวรวิภา ทองศรี

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา พัชรสิทธิ์

อาจารย์ ดวงพร ริยาพันธ์

หลักสูตร วิศวกรรมยางและพอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของบล็อกยางปูพื้นจากยางรีเคลม เพื่อลดของเสียที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางและลดต้นทุนในการผลิตบล็อกยางปูพื้น โดยมีการนำยางรีเคลมมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต ซึ่งทำการแปรชนิดของเขม่าดำ (N220, N330 และ N550) และปริมาณของเขม่าดำที่ 25 phr, 35 phr และ 45 phr ตามลำดับ โดยเขม่าดำทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางรีเคลม จากการทดลองพบว่าปริมาณของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดมูนี่เพิ่มขึ้น เวลาเริ่มการคงรูปและเวลาคงรูปลดลง และผลของการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมเขม่าดำในปริมาณที่สูงขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งขนาดของเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของการเสริมแรงลดลง ในขณะที่ความยืดเมื่อขาด ค่าการเสียรูปจากการกด และค่าความต้านทานต่อการขัดถู มีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำชิ้นทดสอบไปผ่านการเร่งการเสื่อมอายุ พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมขวางต่อเนื่อง (post curing) ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่า ชนิดและปริมาณของเขม่าดำ N330 ที่ปริมาณ 25 phr และ N550 ที่ปริมาณ 45 phr มีความเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกยางปูพื้น

คำสำคัญ : ยางรีเคลม เขม่าดำ บล็อกยางปูพื้น สมบัติเชิงกล

ประกาศคุณูปการ

ข้าพเจ้า นางสาวนิศารัตน์ เจือสนิท และนางสาววริภา ทองศรี นิสิตหลักสูตรวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ ได้ฝึกงานสหกิจศึกษา ระหว่างวันที่ 30 พฤศจิกายน 2563 – 19 มีนาคม 2564 พร้อมทั้งจัดทำโครงงานสหกิจศึกษาฉบับนี้ขึ้น โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา พัชรสิทธิ์ และ อาจารย์ ดวงพร ริยาพันธ์

ขอขอบพระคุณที่กรุณาเป็นที่ปรึกษา โดยให้คำปรึกษามาตลอดการปฏิบัติสหกิจศึกษา ซึ่งการปฏิบัติงานและการทำโครงงานในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความร่วมมือ และได้รับการสนับสนุนจากบุคคลดังนี้

1. คุณธนกฤษ เตชะปัญญารักษ์ ผู้บริหาร
2. คุณสมพงษ์ กอจิรัฐิติกาล ผู้จัดการโรงงาน
3. คุณจิรวัฒน์ สิมผาบ หัวหน้าแผนกวิจัยและพัฒนา
4. คุณโสภณ คำงาม เจ้าหน้าที่แผนกวิจัยและพัฒนา
5. คุณวัชรพล บุญครอง เจ้าหน้าที่ควบคุมคุณภาพ
6. คุณวินัย ไวยนิธา เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ
7. คุณอรุณ โพธิสาร เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ
8. นายณัฐพล อินอ่อน นักศึกษาฝึกงานจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
9. หัวหน้าแผนกและพนักงาน บริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ทั้งคณาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำรายงานฉบับนี้จนสมบูรณ์ ตลอดจนให้การดูแลและให้ความรู้ความเข้าใจในโครงงานสหกิศึกษาที่ได้จัดทำขึ้น และขอขอบคุณทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่มีส่วนร่วมในการติดต่อสื่อสารกับทางบริษัท ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ขบ

สารบัญ

	หน้า
จดหมายส่งรายงาน	**ก**
บทคัดย่อ	**ข**
ประกาศคุนูปการ	**ค**
สารบัญ	**ง**
สารบัญรูปภาพ	**ฉ**
สารบัญรูปภาพ (ต่อ)	**ช**
สารบัญตาราง	**ซ**
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 สถานที่วิจัย	2
1.5 ระยะเวลาในการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**3**
2.1 ทฤษฎี สมมติฐานและ/หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
2.1.1 ยางธรรมชาติ	3
2.1.2 สารเคมีสำหรับยาง	7
2.1.3 เขม่าดำ	11
2.1.4 กระบวนการดีวัลคาไนซ์	18
2.1.5 บล็อกยางปูพื้น	19
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดีวัลคาไนเซชันและยางรีเคลม	22
2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เขม่าเขม่าดำเป็นสารตัวเติม	23
2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบล็อกยางปูพื้น	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการทดลอง	**27**
3.1 สารเคมี	27
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	28
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	**36**
4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อพฤติกรรมการคงรูป	36
4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความหนืดมูนี่ของยางรีเคลม	37
4.3 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกลของยาง	38
4.3.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความแข็ง (Hardness properties)	38
4.3.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Tensile strength และ Elongation at break	39
4.3.3 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance)	40
4.3.4 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่าการเสียรูปจากการกด (Compression set)	41
4.4 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ	42
บทที่ 5 สรุปผลแนะข้อเสนอแนะ	**49**
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	**50**
ภาคผนวก	**52**

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ	4
2.2 โครงสร้างกึ่งแกรไฟต์ของเขม่าดำ	12
2.3 โมเดลแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ	13
3.1 เครื่องชั่งสาร	28
3.2 เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)	28
3.3 เครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer)	29
3.4 เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Mooney viscometer)	29
3.5 เครื่องอัดเบ้า (Compression Molding Machine)	29
3.6 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength Tester)	30
3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer Hardness Machine)	30
3.8 เครื่องทดสอบการขัดถู (Abrasion Tester)	30
3.9 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)	31
3.10 เครื่องทดสอบความทนต่อการเสียรูปจากการกด (Compression set)	31
3.11 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ Die C	33
3.12 การทดสอบ Compression set	34
4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความแข็ง (Hardness properties)	38
4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Tensile strength	39
4.3 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Elongation at break	40
4.4 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance)	41
4.5 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่าการเสียรูปจากการกด (Compression set)	42
4.6 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 25 phr ต่อความแข็งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ	43
4.7 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 35 phr ต่อความแข็งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ	43
4.8 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 45 phr ต่อความแข็งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

4.9 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 25 phr ต่อค่า Tensile strength ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ 44
4.10 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 25 phr ต่อค่า Elongation at break ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ 44
4.11 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 35 phr ต่อค่า Tensile strength ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ 45
4.12 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 35 phr ต่อค่า Elongation at break ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ 45
4.13 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 45 phr ต่อค่า Tensile strength ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ 46
4.14 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 45 phr ต่อค่า Elongation at break ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ 46

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูป (พงษ์ธร, 2547)	6
2.2 การแบ่งกลุ่มขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสมเคมียาง (พงษ์ธร, 2548)	7
2.3 การแบ่งเกรดและสมบัติพื้นฐานของเขม่าดำ (พงษ์ธร, 2548)	15
2.4 ผลของขนาดอนุภาคปฐมภูมิและโครงสร้างของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง (พงษ์ธร, 2548)	17
2.5 ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด	20
2.6 มอดุลัสกดอัด	21
3.1 สูตรยางคอมปาวด์ที่มีเขม่าดำชนิดและปริมาณต่างๆ	32
4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อพฤติกรรมการคงรูปของยางรีเคลม	36
4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความหนืดมูนี่ของยางรีเคลม	37
4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่มีชนิดและปริมาณของเขม่าดำแตกต่างกันเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	48

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งในปี 2563 ภาพรวมปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติรวมของไทยอยู่ที่ 811,120 ตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2562 ที่ปริมาณ 771,331 ตัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ5.16 [1] ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ผลิตภัณฑ์จากยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ อาทิ ความยืดหยุ่นสูง ความต้านทานแรงดึงที่ดี ความทนทานต่อการฉีกขาดสูง และความกระเด้งกระดอนสูง จึงมีการนำยางธรรมชาติไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ยางปูพื้น ยางชะลอความเร็ว ยางชิ้นส่วนของยานพาหนะ ยางรถยนต์ สายพาน ถุงมือยาง เป็นต้น ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจะต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้ยางมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ หรือที่เรียกว่า การเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง [2] โดยยางที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันแล้วจะสามารถกำจัดและย่อยสลายได้ยาก ซึ่งในอดีตมีการกำจัดยางเหล่านี้หลายวิธี เช่น การนำยางล้อเก่ามาใช้เป็นปะการังเทียม การนำถุงมือยางมาใช้เป็นสารตัวเติม เป็นต้น ซึ่งวิธีการกำจัดของเสียเหล่านี้สามารถกำจัดของเสียได้เพียงบางส่วน และในการกำจัดของเสียบางวิธีก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจึงนำยางเหล่านี้มาผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชัน เพื่อทำลายพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางสามารถผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันได้อีกครั้ง โดยกระบวนการดีวัลคาไนเซชันมีหลายวิธี เช่น กระบวนการเชิงความร้อน กระบวนการเชิงกล การใช้คลื่นไมโครเวฟ การใช้คลื่นอัลตร้าซาวด์ กระบวนการทางเคมี กระบวนการใช้เชื้อจุลินทรีย์ และกระบวนการใช้แรงเชิงกลร่วมกับสารเคมี [3] ทำให้ได้เป็นยางรีเคลม ซึ่งปัจจุบันมีการนำยางรีเคลมมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างไรก็ตามยางรีเคลมยังคงมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางที่ไม่ผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชัน ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงต้องมีการเติมสารตัวเติมบางชนิด เช่น เขม่าดำ ซิลิกา เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น โดยสารตัวเติมเหล่านี้จะยึดติดกับโมเลกุลของยาง ซึ่งเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ราคาถูกรวมทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางได้ดี ซึ่งเขม่าดำมีหลายชนิดโดยแต่ละชนิดจะให้สมบัติที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของเขม่าดำชนิด (N220, N330 และ N550) ที่ปริมาณต่างๆ (0 phr, 25 phr, 35 phr และ 45 phr) ต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์บล็อกยางปูพื้นที่มีสมบัติตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลม

1.2.2 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์บล็อกยางปูพื้นจากยางรีเคลม ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของบล็อกยางปูพื้น

1.3.1.1 ชนิดของเขม่าดำ

1.3.1.2 ปริมาณของเขม่าดำ

1.3.2 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของบล็อกยางปูพื้น

1.3.2.1 สมบัติการคงรูปของยาง

1.3.2.2 ความหนืดมูนี่

1.3.2.3 ความแข็ง

1.3.2.4 ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด

1.3.2.5 การเร่งการเสื่อมอายุ

1.3.2.6 ความทนต่อการขัดถู

1.3.2.7 ความทนต่อการเสียรูปจากการกด

1.4 สถานที่วิจัย

ห้องปฏิบัติการ บริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด (สาขา กบินทร์บุรี)

1.5 ระยะเวลาในการวิจัย

1 กุมภาพันธ์ – 18 มีนาคม 2564

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่ต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่เหมาะสมสำหรับเตรียมเป็นบล็อกยางปูพื้น

1.6.2 ได้ผลิตภัณฑ์บล็อกยางปูพื้น ที่มีสมบัติเชิงกลเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี สมมติฐานและ/หรือกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

2.1.1 ยางธรรมชาติ

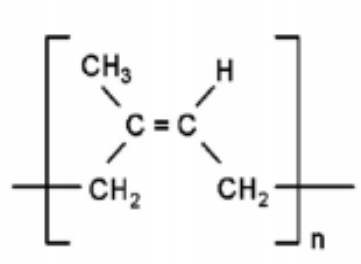
2.1.1.1 ลักษณะทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง Hevea Brazilliensis ซึ่งมีต้นกำเนิดจากลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรทางเคมี คือ C_5H_8 โครงสร้าง 1 โมเลกุลยางประกอบด้วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบซิส (Linear cis-1,4-polyisoprene) ประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วยไอโซพรีน มีน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 400,000 กรัมต่อโมล มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงกว้างมาก โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีไฮโดรคาร์บอนแล้วยังมีสิ่งเจือปนอยู่ด้วยประมาณ 5% [4] ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อถูกยืดหรือเย็นตัวลง มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215 – 1.5238 ที่อุณหภูมิ 20°C น้ำยางสดที่กรีดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวข้นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30% แขวนลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60% เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) แต่เมื่อนำน้ำยางสด มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งและมีการแยกชั้นระหว่างน้ำกับก้อนยาง จากนั้นนำก้อนยางไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (Two roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้น ก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C เป็นเวลา 3 วัน จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยาง

2.1.1.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่ได้มาจากต้นยางพาราที่อยู่ในตระกูล Hevea Brasiliensis มีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางจะสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี กล่าวได้ว่ายางจะมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด

(Tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมหรือใกล้เคียงอย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่ดีด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ อย่างไรก็ตามยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ยางจะอ่อนเยิ้มและเหนียวเมื่อได้รับความร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้งานจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน เขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ หลังจากการบดผสม ซึ่งยางผสม (Rubber compound) ที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป (Vulcanizate)” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ

2.1.1.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

1) อุณหภูมิการใช้งาน ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่ -55 ถึง +100 °C
2) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูงมาก เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ยางจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมหรือใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว
3) ความเหนียวติดกัน (Tack) ยางธรรมชาติในสภาพที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน
4) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้สามารถตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง โดยค่าความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติมีค่าประมาณ 20

MPa หรือสูงกว่านั้น และด้วยสมบัติดังกล่าวทำให้ยางธรรมชาติสามารถทนต่อแรงฉีกขาดได้ดีอีกด้วย

5) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับยางชนิดอื่นๆ
6) ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 1015 หรือ 1016 ohm cm
7) ความทนต่อของเหลวและสารเคมี เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ยางจะเกิดการบวมตัวในตัวทำละลาย ที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน , เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางดังกล่าวทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง และด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเคมี หรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ
8) การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging Properties) ยางธรรมชาติมีความไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ยางเกิดการยืดตัว และเกิดเป็นรอยแตกเล็กๆ จำนวนมากทำให้ยางเสื่อมสภาพไปในที่สุด
9) การกระเด้งกระดอน (Rebound Resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเด้งกระดอนสูงมาก และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปแบบความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงสะสมความร้อนระหว่างการใช้งานต่ำ (Enjoy Wissen, 2018)
10) สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมากอีกด้วย
11) การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งมีสมบัติด้อยกว่ายางเพียง 2 ชนิดเท่านั้น คือ ยางบิวตาไดอีน (BR) และยางซิลิโคน (Q)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูป (พงษ์ธร, 2547)

สมบัติ	ชนิดของยาง							
	NR	IR	SBR	BR	NBR	CR	(X)IIR	EPDM
ความทนทานต่อแรงดึง (ไม่มีสารตัวเติมเสริมแรง)	1	2	5	6	5	3	4	5
ความทนทานต่อแรงดึง (มีสารตัวเติมเสริมแรง)	1	2	2	4	2	2	3	3
การยืดตัวสูงสุด	1	1	2	3	2	2	2	3
ความต้านทานต่อการขัดถู (มีสารตัวเติมเสริมแรง)	4	4	3	1	2	3	4	3
ความทนต่อการฉีกขาด	2	2	3	5	3	2	3	3
การกระเด้ง	2	2	3	1	3	3	6	3
การยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ	2	2	3	2	3	3	2	2
ความทนทานต่อความร้อน	5	5	4	4	3	3	3	2
ความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	4	4	3	2	3	2	2	1
ความทนทานต่อแสง UV	4	4	3	3	3	2	2	1
ความทนทานต่อโอโซนและสภาพอากาศ	4	4	4	3	3	2	2	1
ความทนต่อน้ำมัน	6	6	5	6	1	2	6	4
ความทนทานต่อน้ำมันเชื้อเพลิง	6	6	6	6	2	3	6	5
ความทนทานต่อกรด	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนทานต่อด่าง	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนทานต่อการติดไฟ	6	6	6	6	6	2	6	6
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	1	1	2	2	5	4	2	2
การซึมผ่านของก๊าซ	5	5	4	4	2	3	1	4

หมายเหตุ 1 = ดีมากที่สุด, 6 = ด้อยที่สุด

NR = ยางธรรมชาติ
IR = ยางไอโซพรีน
SBR = ยางสไตรีนบิวตาไดอีน
BR = ยางบิวตาไดอีน
NBR = ยางไนไตรล์
CR = ยางคลอโรพรีน
X(IIR) = ยางบิวไทล์
EPDM = ยางเอธิลีนโพรพิลีนไดอีน

2.1.2 สารเคมีสำหรับยาง

ยางดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานต่างๆมากมาย เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดี และสมบัติเชิงกลเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยางดิบยังมีความทนทานต่อสารเคมีและสารละลายต่างๆ ต่ำ อีกทั้งยังไม่สามารถคงรูปได้หลังจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการพัฒนาหรือปรับปรุงคุณภาพของยางเพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน หรือต้องทำการเปลี่ยนสภาพจากยางดิบให้เป็นยางสุกหรือยางคงรูปก่อน จึงจะสามารถนำยางดังกล่าวไปใช้งานได้ (พงษ์ธร, 2548) ซึ่งในการปรับปรุงคุณภาพยางจะต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติตามต้องการ ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีสูตรการผสมสารเคมีที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปจะวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 กลุ่มหลักดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การแบ่งกลุ่มขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสมเคมียาง (พงษ์ธร, 2548)

กลุ่ม	องค์ประกอบ
1	ยาง (elastomer)
2	สารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agents)
3	สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)
4	สารตัวกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarder)
5	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradents)
6	สารตัวเติม (fillers)
7	สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)
8	องค์ประกอบอื่นๆ เช่น สี (pigments) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (flame retarders) การป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต (anti-static agents) เป็นต้น

2.1.2.1 สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents)

สารวัลคาไนซ์ คือ สารที่ทำให้โมเลกุลยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติผ่านปฏิกิริยาเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง และมีสมบัติที่เสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก การวัลคาไนซ์ยางที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบกำมะถัน ระบบเพอร์ออกไซด์ และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ

1.) กำมะถัน (sulfur) กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยาวัลคาไนซ์สามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยาง

สังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR, IR, BR, NBR เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบนี้ก็มีข้อจำกัดหลัก คือ ไม่สามารถใช้วัลคาไนซ์ยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน หรือยาง EPM ได้ การทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน มี 3 ระบบ คือ

ระบบธรรมดา (conventional vulcanization, CV system) ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย ทำให้มีพันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ polysulphide crosslinks

ระบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV system) ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบ monosulphide และ disulphidecrosslinks

ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficient vulcanization, semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น

2.) เพอร์ออกไซด์ (peroxide) แม้ว่าการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้ดีกับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกล และเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ประกอบกับเพอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล (เช่น EPM, EVA, CPE หรือ Q เป็นต้น) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น HNBR, EPDM) สำหรับยางอื่นๆ นิยมวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นกรณีที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีหรือมีค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (compression set) ต่ำเท่านั้น

3.) สารเคมีอื่นๆ นอกจากระบบหลักๆ 2 ระบบดังที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการนำสารวัลคาไนซ์ชนิดอื่น ๆ มาใช้ในการคงรูปด้วยเช่นกัน แต่มีการใช้น้อยหรือใช้ในกรณีที่จำเป็น เช่น การใช้โลหะออกไซด์ ในการคงรูปของยางคลอโรพรีน (chloroprene; CR) หรือการใช้สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซม์นิยมใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง IIR เป็นต้น (พงษ์ธร, 2548)

2.1.2.2 สารตังเร่งปฏิกิริยา (accelerators)

สารตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลง และทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน ปัจจุบันสามารถแบ่งกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็นหลายกลุ่ม ดังนี้

1.) ไทอะโซล (thiazole) สารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้ดีกับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอร์ชสั้นและมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มเมอร์แคพโตนี้ ได้แก่

เมอร์แคพโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole; MBT) และไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide; MBTS)

2.) ซัลฟีนาไมด์ (sulfenamide) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงและให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้นยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง ตัวอย่างที่สำคัญของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; CBS) บิวทิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (N-tert.butyl-2-benzothiazole sulfonamide; TBBS) ไดไซโคลเฮกซิลเบนโซไธอะโซลซัลฟีนาไมด์ (N,N'-dicyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; DCBS) และ มอโฟลิโนไธโอเบนโซไธอะโซล (2-(4-morpholinothio) benzothiazole; MBS) เป็นต้น

3.) ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamates) สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอร์ชสั้นและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย เมื่อได้รับการวัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก ไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในทางการแพทย์ เภสัชกรรม หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ ซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyldithiocarbamate; ZDEC) ซิงก์ไดเบนซิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dibenzyldithiocarbamate; ZBEC) เป็นต้น

4.) ไทยูแรม (thiurams) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มมีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะที่ให้ระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไทโอคาร์บาเมตเล็กน้อย ตัวอย่างที่สำคัญของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ เททระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide; TMTD) และเททระเมทิลไทยูแรมโมโนซัลไฟด์ (tetramethylthiuram monosulfide; TMTM) และเททระเบนซิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetrabenzylthiuram disulfide; TBzTD) เป็นต้น

5.) กัวนิดีน (guanidines) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิแต่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่นๆ ตัวอย่างที่สำคัญที่สุดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenylguanidine; DPG) ไดโทลิลกัวนิดีน (dio-tolylguanidine; DOTG) และโทลิลไบกัวไนด์ (o-tolylbiguanide; OTBG) อย่างไรก็ตาม ผู้ออกสูตรเคมียางส่วนใหญ่มักใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่า เพื่อให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทำงานแบบเสริมกัน (synergistic effect) ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น เรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากกว่าว่า “สารตัวเร่ง

ปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary accelerator)" และเรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณน้อยกว่าว่า "สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary accelerator)"

6.) ไทโอยูเรีย (thioureas) สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว ซึ่งนิยมใช้เฉพาะในยาง CR EPDM และ ECO เท่านั้น ตัวอย่างของสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ เอทิลีนไทโอยูเรีย (ethylenethioureas; ETU)

7.) แซนเทต (xanthate) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ยางคอมปาวด์ที่ได้มีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสูงมาก ส่วนใหญ่จึงนิยมใช้สารตัวเร่งกลุ่มนี้ในการคงรูปน้ำยาง และสารตัวเร่งกลุ่มนี้ยังทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายหากได้รับการคงรูปนานเกินไป ดังนั้นจึงควรทำการคงรูปที่อุณหภูมิต่ำ ตัวอย่างสารตัวเร่งในกลุ่มนี้เช่น ซิงก์บิวทีลแซนเทต (zinc butylxanthate; ZBX)

2.1.2.3 สารตัวกระตุ้นและสารหน่วงปฏิกิริยา (activators and retarder)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators) คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดียิ่งขึ้น สารกระตุ้นปฏิกิริยาสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริก โดยทั่วไป นิยมใช้ซิงก์ออกไซด์ในปริมาณ 2-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-2 phr

สารหน่วงปฏิกิริยา (retarders) คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อยืดระยะเวลาสกอร์ช ทำให้ลดโอกาสของการเกิดยางตายทั้งในระหว่างการเก็บรักษายางคอมปาวด์และในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

2.1.2.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradents)

สารป้องกันการเสื่อมสภาพเป็นสารเคมีที่เติมลงไปในสูตรเคมีเพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่นิยมเติมลงไปในปริมาณ 1-3 phr สารป้องกันการเสื่อมสภาพมีหลายชนิดทั้งที่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของเอมีน (amine derivatives) และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น กลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (phenol derivatives) โดยทั่วไป สารป้องกันการเสื่อมสภาพที่เปลี่ยนสียางอย่างรุนแรงจะมีประสิทธิภาพในการปกป้องยางสูงกว่าสารป้องกันการเสื่อมสภาพที่ไม่เปลี่ยนสียาง

2.1.2.5 สารตัวเติม (fillers)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อทำให้ยางผสมมีสมบัติเฉพาะที่เหมาะกับกระบวนการผลิต หรือเพื่อลดต้นทุน สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ และซิลิกา และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง เช่น ดินขาว ทัลคัม แคลเซียมคาร์บอเนต

2.1.2.6 สารทำให้ยางนิ่มและสารช่วยในกระบวนการผลิต (plasticizers and processing aids)

สารทำให้ยางนิ่ม (plasticizers) หรือ “พลาสติไซเซอร์” หมายถึง สารเคมีที่เติมลงไปในยางแล้วทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้นหรือมีความหนืดต่ำลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากจะช่วยลดความหนืดของยางผสมแล้ว สารทำให้ยางนิ่มยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติด ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยางได้ด้วย

สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids) คือ สารเคมีที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้การผสมหรือการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มนี้จะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการผลิต

2.1.2.7 องค์ประกอบอื่นๆ

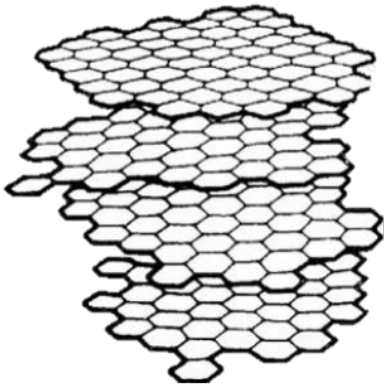
สารกลุ่มนี้โดยทั่วไปแล้วไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกสูตร แต่ในกรณีที่ต้องการให้ยางมีสมบัติพิเศษบางประการจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีบางตัวเข้าช่วยเช่น สี (pigments) สารทำให้เกิดฟอง (blowing agents) สารหน่วงการติดไฟ (flame retarders) การป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต (anti-static agents) เป็นต้น

2.1.3 เขม่าดำ

เขม่าดำ (carbon black) เป็นเขม่าสีดำที่ได้จากการเผาแบบย่อยสลายภายใต้การควบคุม (controlled vapor-phase pyrolysis and partial combustion) ของเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอน โดยอาจเกิดปนกันอยู่กับสารกลุ่มฟูลเลอรีน เขม่าดำมีหลายชนิด บางชนิดก็มีขนาดนาโนเท่านั้น แต่บางชนิดก็เป็นส่วนผสมของอนุภาคขนาดนาโนและอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าบ้าง เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง มีหลายเกรด โดยแต่ละเกรดจะมีสมบัติพื้นฐานโดยเฉพาะขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ พื้นที่ผิว และโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้น เขม่าดำแต่ละเกรดจึงมีความสามารถในการเสริมแรงในยางได้ไม่เท่ากัน การเลือกใช้เกรดของเขม่าดำให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์จึงเป็นเรื่องที่สำคัญ

2.1.3.1 โครงสร้างของอนุภาคเขม่าดำ

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของเขม่าดำคือ ธาตุคาร์บอน อนุภาคของเขม่าดำมีโครงสร้างกึ่งแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะมีลักษณะของอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ขนานกัน บางส่วนเกิดการเหลื่อมล้ำกันเล็กน้อย ทำให้อนุภาคมีโครงสร้างแบบกึ่งแกรไฟต์ ซึ่งเขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ขะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10 -100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.2 โครงสร้างกึ่งแกรไฟต์ของเขม่าดำ

2.1.3.2 การผลิตเขม่าดำ

เขม่าดำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดหลัก ๆ ตามกรรมวิธีการผลิต ได้แก่

1.) เฟอร์เนซแบล็ก (furnace black) เป็นเขม่าดำชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่มีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นวงแหวน (highly aromatic oils) อนุภาคปฐมภูมิของเฟอร์เนซแบล็กมีขนาดค่อนข้างเล็กโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20-80 นาโนเมตร

2.) เทอร์มอลแบล็ก (thermal black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300°C ในภาวะที่ไม่มีอากาศของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำชนิดนี้มีอนุภาคปฐมภูมิค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 120–500 นาโนเมตร และที่พื้นผิวของเขม่าดำชนิดนี้ไม่มีรูพรุน จึงมีพื้นที่ผิวจำเพาะไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำชนิดอื่นๆ ด้วยเหตุนี้เขม่าดำชนิดนี้จึงไม่เสริมแรงในยางเพราะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของยางคงรูปสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เขม่าดำชนิดนี้จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติการกระเด้งกระดอนและสมบัติเชิงพลวัตที่ดีกว่าเฟอร์เนซแบล็ก

3.) ชาแนลแบล็ก (channel black) เป็นเขม่าดำที่ได้จากการเผาไหม้บางส่วน โดยการผ่านก๊าซธรรมชาติไปยังช่องเปลวไฟ เขม่าดำที่เกิดขึ้นจะไปเกาะบนฝาเหล็กด้านบน จากนั้นจึงรวบรวมเก็บเขม่าดำที่ได้ อนุภาคปฐมภูมิของชาแนลแบล็กมีขนาดเล็กมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 9-30 นาโนเมตร และมีความเป็นกรดค่อนข้างสูงจึงมีฤทธิ์หน่วงปฏิกิริยาการคงรูป

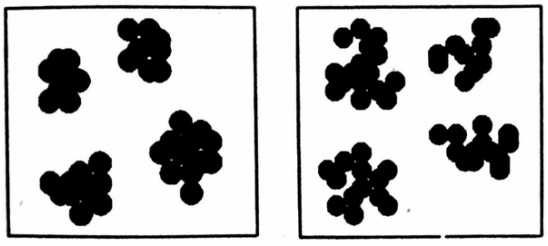
2.1.3.3 สมบัติของเขม่าดำ

1.) ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

อนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมและจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า แอกกรีเกต ขอบเขตของการเสริมแรงของเขม่าดำจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแอกกรีเกตแต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ เขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางทั่วไปจะมีอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 19-95 นาโนเมตร โดยทั่วไปเขม่าดำที่มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงก็จะเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี

2.) โครงสร้างของเขม่าดำ

โครงสร้างของเขม่าดำจะบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากนี้การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิเกิดเป็นแอกกรีเกตซึ่งจัดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิแล้ว แอกกรีเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวมๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่า แอกโกลเมอเรต ซึ่งโครงสร้างนี้ทุติยภูมินี้จะถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม การเกาะกลุ่มกันเป็นโครงสร้างดังกล่าวส่งผลให้เขม่าดำมีรูพรุนภายในเกิดขึ้น โดยทั่วไปโครงสร้างเขม่าดำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบตามระดับของการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน คือ โครงสร้างแบบต่ำ (low structure) โครงสร้างแบบปรกติ (normal structure) และโครงสร้างแบบสูง (high structure) ซึ่งเขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบต่ำคือ เขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิมาเกาะกันอยู่เป็นกลุ่มก้อนอย่างหนาแน่น ทำให้มีรูพรุนหรือช่องว่างภายในน้อย ส่วนเขม่าดำที่มีโครงสร้างแบบสูงคือ เขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิมาเกาะกันอย่างหลวมๆ ทำให้มีรูพรุนภายในมาก ซึ่งเขม่าดำที่มีโครงสร้างยิ่งสูง รูปร่างของแอกกรีเกตก็จะไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นแอกกรีเกตเหล่านี้ก็จะมีความสามารถในการเกาะกลุ่มกันได้น้อยลง ส่งผลให้เขม่าดำมีปริมาตรของช่องว่างภายในสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงใช้การวัดปริมาตรของช่องว่าง เช่น เทคนิคการดูดซึมน้ำมัน เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับของโครงสร้างเขม่าดำ โดยทั่วไปเทอร์มอลแบล็กจะมีโครงสร้างต่ำมาก ชาแนลแบล็กจะมีโครงสร้างปานกลางและเฟอร์เนซแบล็กจะมีโครงสร้างสูงมาก



(ก.) (ข.)

รูปที่ 2.3 โมเดลแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ
(ก.) แบบโครงสร้างต่ำ และ (ข.) แบบโครงสร้างสูง

3.) สมบัติทางเคมีของพื้นผิว

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90 – 95% ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ออกซิเจน และไฮโดรเจน ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมากเพราะพื้นผิวของเขม่าดำประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้ไม่เพียงจะมีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา แต่ยังมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูป การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำจะทำให้ยางมีค่าระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวขึ้น มีอัตราเร็วในการคงรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง

4.) การนำไฟฟ้าและความร้อน

ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้าและพื้นที่ผิวของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบก็มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของเขม่าดำ เนื่องจากการมีการศึกษาพบว่าการกำจัดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้โดยบการใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยจะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของเขม่าดำลดลงอย่างมาก

2.1.3.4 เกรดของเขม่าดำและการเลือกใช้งาน

ในอดีตนิยมแบ่งเกรดเขม่าดำออกเป็น 6 เกรด คือ

1.) Super-Abrasion Furnace (SAF)
2.) Intermediate Super-Abrasion Furnace (ISAF)
3.) High Abrasion Furnace (HAF)
4.) Super-Processing Furnace (SPF)
5.) General-Purpose Furnace (GPF)
6.) Semi-reinforcing Furnace (SRF)

แต่ในปัจจุบันนิยมใช้มาตรฐาน ASTM ในการตั้งชื่อและแบ่งเกรดของเขม่าดำโดยเริ่มต้นด้วยตัวอักษรซึ่งบ่งบองถึงอัตราเร็วของปฏิกิริยาการคงรูป กล่างคือ ใช้อักษร “N” สำหรับเขม่าดำที่ให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการคงรูปปรกติ (normal curing) และอักษร “S” สำหรับเขม่าดำที่ให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการคงรูปช้า (slow curing) และตามด้วยตัวเลขสามตัว โดยตัวเลขตัวแรกจะบ่งบอกถึงขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ ส่วนตัวเลขสองตัวหลังไม่ได้มีความหมายใดๆ ยกเว้นในกรณีที่ทเขม่าดำเกรดนั้นมีระดับของโครงสร้างมาตรฐาน (standard level of structure) ตัวเลขตัวที่สองมักจะใช้ซ้ำกับตัวเลขตัวแรกและตามด้วยเลขศูนย์ เช่น N330 เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 การแบ่งเกรดและสมบัติพื้นฐานของเขม่าดำ (พงษ์ธร, 2548)

เกรด	ค่าการดูดซับไอโอดีน, g/kg (ASTM D1510)	ค่า DBPA, cm^3/100 g (ASTM D2414)	ค่า DBPA ของตัวอย่างที่ถูกอัด, cm^3/100 g (ASTM D3493)	CTAB, m^2/g (ASTM D3765)	การดูดซับไนโตรเจน, m^2/g (ASTM D3037)
N110	145	113	98	126	143
N121	121	132	112	121	132
S212	-	85	82	119	117
N220	121	114	100	111	119
N231	121	92	86	108	117
N234	120	125	100	119	126
N242	121	124	106	111	125
N293	145	100	92	114	130
N299	108	124	105	104	108
S315	-	79	75	95	88
N326	82	72	69	83	84
N330	82	102	88	83	83
N332	84	101	90	-	-
N339	90	120	101	95	96
N347	90	124	100	88	90
N351	68	120	97	74	73
N358	84	150	112	88	87
N375	90	114	97	98	100
N472	250	178	114	145	27
N539	43	111	84	41	41
N550	43	121	88	42	42
N630	36	78	62	38	38
N642	36	64	62	37	37
N650	36	122	87	38	38

เกรด	ค่าการดูดซับไอโอดีน, g/kg (ASTM D1510)	ค่า DBPA, cm^3/100 g (ASTM D2414)	ค่า DBPA ของตัวอย่างที่ถูกอัด, cm^3/100 g (ASTM D3493)	CTAB, m^2/g (ASTM D3765)	การดูดซับไนโตรเจน, m^2/g (ASTM D3037)
N660	36	90	75	35	35
N683	35	133	-	39	37
N754	24	58	57	29	-
N762	27	65	57	29	28
N765	31	115	86	33	31
N774	29	72	62	29	29
N787	30	80	74	32	30
N907	-	34	-	-	11
N908	-	34	-	-	-
N990	-	43	40	9	9
N991	-	35	38	8	7

2.1.3.5 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง

โดยปกติเขม่าดำที่มีอนุภาคปฐมภูมิเล็กหรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แม้ว่าจะให้การเสริมแรงที่ดี แต่ก็จะทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากเพราะความหนืดของยางคอมปาวด์จะสูงมาก ส่วนโครงสร้างของเขม่าดำก็จะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติของยางคงรูป ถ้าโครงสร้างของเขม่าดำสูงขึ้นจะทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดสูงขึ้น ส่วนยางคงรูปที่ได้แม้ว่าจะมีค่ามอดูลัสและความแข็งที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่มีผลต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงหรือความทนทานต่อการฉีกขาดมากนัก (พงษ์ธร, 2548)

ตารางที่ 2.4 ผลของขนาดอนุภาคปฐมภูมิและโครงสร้างของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง (พงษ์ธร, 2548)

สมบัติ	เมื่อขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กลง	เมื่อโครงสร้างสูงขึ้น
สมบัติของยางในกระบวนการผลิต		
ปริมารของเขม่าดำที่ยางสามารถรับได้	ลดลง	ลดลง
เวลาที่ต้องใช้ในการทำให้ยางกับเขม่าดำเข้ากัน	ยาวขึ้น	ยาวขึ้น
ความสามารถในการแตกตัว	ลดลง	สูงขึ้น
ความหนืดของยางคอมปาวด์	สูงขึ้น	สูงขึ้น
ระยะเวลาสกอร์ช	สั้นลง	สั้นลง
อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูป	ลดลง	มีผลเล็กน้อย
การบวมตัวหลังอัดผ่านดาย	ลดลง	ลดลง
ความเรียบของผิวยางลังอัดผ่านดาย	สูงขึ้น	สูงขึ้น
อัตราเร็วในการอัดผ่านดาย	ลดลง	มีผลเล็กน้อย
สมบัติของยางคงรูป		
ความทนทานต่อแรงดึง	สูงขึ้น	ลดลง
มอดูลัส	สูงขึ้น	สูงขึ้น
ความแข็ง	สูงขึ้น	สูงขึ้น
การยืดตัว ณ จุดขาด	ลดลง	ลดลง
ความต้านทานต่อการขัดถู	สูงขึ้น	สูงขึ้น
ความทนทานต่อการฉีกขาด	สูงขึ้น	มีผลเล็กน้อย
ความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก	สูงขึ้น	ลดลง
ความต้านทานต่อการหักงอ	สูงขึ้น	ลดลง
การกระเด้งกระดอน	ลดลง	มีผลเล็กน้อย
ความร้อนสะสม	สูงขึ้น	สูงขึ้นเล็กน้อย
การเสียรูปหลังการกดอัด	มีผลเล็กน้อย	มีผลเล็กน้อย
การนำไฟฟ้า	สูงขึ้น	มีผลเล็กน้อย

2.1.4 กระบวนการดีวัลคาไนซ์

กระบวนการดีวัลคาไนซ์เป็นการนำเศษยางวัลคาไนซ์ มาตัดหรือบดให้เป็นผงขนาดประมาณ 20 - 30 เมซ ก่อนแล้วนำมาผ่านกระบวนการดีวัลคาไนซ์เพื่อทำลายพันธะเชื่อมโยงโมเลกุลของยางคงรูป (ยางวัลคาไนซ์) เพื่อให้ได้ยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง สามารถไหลได้ ยางที่ผ่านการดีวัลคาไนซ์แล้วสามารถนำมาขึ้นรูปหรือวัลคาไนซ์ใหม่ได้

2.1.4.1 เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์

1.) การใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน

เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์ยางโดยใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน เริ่มจากการนำยางผงไปผสมสารเคมี เช่น ไดเอริลไดซัลไฟด์ ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180°C ด้วยหม้ออบไอน้ำเป็นเวลา 5–10 ชั่วโมง ภายในหม้ออบไอน้ำจะมีใบกวนเพื่อให้ยางได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง ยางจะเกิดการดีพอลิเมอไรซ์ จะมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลวและจะนิ่มลง จากนั้นยางที่ผ่านการดีพอลิเมอไรซ์แล้วผ่านเข้ากระบวนการล้างเพื่อกำจัดสารเคมีที่ตกค้างผ่านระบบการกำจัดน้ำ ทำให้ยางแห้งและรีดผ่านลูกกลิ้งให้เป็นแผ่นในขั้นตอนสุดท้าย ยางดีวัลคาไนซ์ที่ได้สามารถนำมาใช้ผสมกับยางดิบหรือยางคอมปาวด์แล้วขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามต้องการ

2.) กระบวนการดีลิงค์ (De-Link Process)

เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์ยางโดยกระบวนการดีลิงค์ เริ่มจากการนำยางบดมาเติมสารเคมีที่มีชื่อทางการค้าว่าดีลิงค์ (De-Link) แล้วผสมในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งหรือเครื่องแบนบูรี่ (banbury) ที่อุณหภูมิ 80-90°C ทำให้ยางเกิดการดีวัลคาไนซ์ ซึ่งสารดีลิงค์สามารถใช้ในการดีวัลคาไนซ์ได้ทั้งเศษยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยในปี ค.ศ. 1997 Kohler และคณะ ได้ทำการศึกษาการนำยางดีวัลคาไนซ์ (ยางบดมาผสมสารดีลิงค์) มาผสมกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอีน ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100°C แล้วเปรียบเทียบสมบัติกับยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอีนที่ไม่ผสมยางดีวัลคาไนซ์ พบว่า สมบัติของยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอีนที่ผสมกับยางดีวัลคาไนซ์มีค่าความทนต่อแรงดึง และค่าการยืดตัวใกล้เคียงกับยางที่ไม่ผสมยางดีวัลคาไนซ์

3.) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก

เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์ยางโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก เริ่มจากการนำยางผงมาผ่านเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดที่มีการติดตั้ง อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ที่ให้คลื่นอัลตราโซนิก (ความถี่ในช่วง 10-40 กิโลเฮิรตซ์) และให้พลังงานมากกว่า 1,000 วัตต์ เข้าไปในยางทำให้พันธะเชื่อมโยงภายในยางทั้งพันธะคาร์บอน-กำมะถัน และ กำมะถัน-กำมะถัน ถูกทำลายลง ยางที่ได้นำมาผ่านระบบหล่อเย็นจะได้ยางดีวัลคาไนซ์ การใช้คลื่นอัลตราโซนิกเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อจำกัด ถ้ายางได้รับคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลานานมากเกินไป ยางอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้

4.) การใช้คลื่นไมโครเวฟ

เทคโนโลยีการดีวัลคาไนซ์ยางโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เริ่มจากการนำเศษยางมาผ่านเข้าเครื่องไมโครเวฟที่ให้คลื่นไมโครเวฟ ความถี่ 915 และ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลยางเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนพันธะการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลยาง (พันธะคาร์บอน-กำมะถัน และ กำมะถัน-กำมะถัน) ถูกทำลายลง ยางที่ได้นำมาผ่านระบบหล่อเย็นจะได้ยางดีวัลคาไนซ์ การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและยางที่ดีวัลคาไนซ์ด้วยกระบวนการนี้จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางที่ดีวัลไนซ์ด้วยวิธีอื่น แต่มีข้อจำกัดสำหรับยางที่นำมาใช้ด้วยวิธีนี้ควรเป็นยางที่มีขั้ว (เช่น ยางคลอโรพรีน ยางไนไทรล์) หรือยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง จะตอบสนองต่อคลื่นไมโครเวฟได้ดี

2.1.4.2 การนำยางดีวัลคาไนซ์ไปใช้งาน

ยางดีวัลคาไนซ์หรือยางรีเคลมสามารถนำไปใช้ผสมกับยางใหม่ ซึ่งจะช่วยลดเวลาและพลังงานในการผสมลง และช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และเมื่อนำยางดีวัลคาไนซ์ผสมกับยางคอมปาวด์จะช่วยให้การขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้น

การนำยางดีวัลคาไนซ์มาใช้งานในอุตสาหกรรมยางล้อ โดยนำมาใช้เป็นส่วนผสมในส่วนที่เป็นโครงยางสำหรับยางล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ เช่น ยางหุ้มขอบลวด ส่วนผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ สามารถนำยางดีวัลคาไนซ์มาผลิตพื้นรองเท้า ปะเก็น เสื่อ เป็นต้น (สถาบันพลาสติก)

2.1.5 บล็อกยางปูพื้น

2.1.5.1 ความหมายของบล็อกยางปูพื้น

บล็อกยางปูพื้น หมายถึง ก้อนยางที่ทำจากยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ หรือยางรีไซเคิล สามารถนำมาเรียงวางประสานกันได้อย่างต่อเนื่อง มีสีตามธรรมชาติหรือสีใดๆก็ได้ จะมีรูปร่างแบบใดก็ได้ โดยมีอัตราส่วนของความหนาต่อเส้นรอบรูป มากกว่าร้อยละ 1 เหมาะสำหรับใช้ปูภายนอกหรือภายในอาคาร

2.1.5.2 ประเภทของบล็อกยางปูพื้น

แบ่งตามประเภทการใช้งานจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทใช้ภายในอาคาร และประเภทใช้ภายนอกอาคาร

แบ่งตามความแข็งจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

ประเภทความแข็ง 60

ประเภทความแข็ง 70

ประเภทความแข็ง 80

ประเภทความแข็ง 90

2.1.5.3 คุณลักษณะของบล็อกยางปูพื้น

1.) ลักษณะทั่วไป ต้องปราศจากข้อบกพร่องที่มีผลเสียต่อการใช้งานหรือมีผลต่อการใช้งาน เช่น ความหนา ลวดลาย และสีไม่สม่ำเสมอ สีหลุดหรือลอกออกได้ง่าย รอยตัดแต่งไม่เรียบร้อย มีรอยฉีกขาด รูฟองอากาศ หรือสิ่งแปลกปลอมฝังอยู่ในเนื้อยาง

2.) ความแข็ง จะต้องมีค่าความแข็งเป็นไปตามประเภทที่กำหนด โดยให้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ±5 shore A

3.) ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด ต้องมีความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาดเป็นไปตามตารางที่ 2.5

4.) การเร่งการเสื่อมอายุ ต้องมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด

สมบัติ	**หน่วย**	**ประเภท ภายในอาคาร**	**ประเภท ภายนอกอาคาร**
ความต้านทานแรงดึง ไม่น้อยกว่า	MPa	4	6
ความยืดเมื่อขาด	%	150	200
การเร่งการเสื่อมอายุ (เมื่อเทียบกับค่าก่อนเร่งการเสื่อมอายุ) ความแข็ง เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน		±5	±5
ความต้านทานแรงดึง เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน	%	±30	±50
ความยืดเมื่อขาด เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน	%	±50	±50

5.) ความทนต่อการขัดถู ปริมาตรสูญเสียต้องไม่เกิน 250 mm^3

6.) ความทนต่อโอโซน (เฉพาะประเภทภายนอกอาคาร) ต้องไม่มีรอยแตก

7.) ความคงทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งสภาวะ (เฉพาะประเภทภายนอกอาคาร) ความแตกต่างของสีชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบแล้วกับชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการทดสอบ (controlled specimen) ต้องไม่ต่ำกว่าเกรย์สเกลระดับ 3

8.) มอดุลัสกดอัด ต้องมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 มอดุลัสกดอัด

ความแข็ง	มอดุลัสกดอัด ไม่น้อยกว่า (MPa)
60	5
70	7
80	9
90	12

2.1.5.4 การทดสอบ

1.) ความแข็ง ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7619-1 โดยใช้เครื่อง Durometer type A ทดสอบโดยการกดลงบนผิวของชิ้นทดสอบค้างไว้ประมาณ 5 วินาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 23±3 °C

2.) ความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37 โดยการตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ Type 1 ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 23±3 °C

3.) การเร่งการเสื่อมอายุ ทำการบ่มเร่งการเสื่อมอายุตามมาตรฐาน ISO 188 air-oven method ที่อุณภูมิ 70±1 °C เป็นเวลา 72 hr.

4.) ความทนต่อการขัดสี ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 4649 method A ที่อุณหภูมิ 23±3 °C

5.) ความทนต่อโอโซน ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1431-1 procedure A โดยใช่สภาวะทดสอบดังนี้ความเข้มข้นของโอโซน 255 cm^2 ต่อ 100 m^3 อุณหภูมิ 40±2 °C เป็นเวลา 48 hr. และความยืด 5%

6.) มอดุลัสกดอัด ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7743 method A ใช้ความเร็วในการกดอัดชิ้นทดสอบ 10 mm/min จนกระทั่งได้ระยะการกดอัดชิ้นทดสอบถึง 25% ของความสูง ปล่อยการกดอัดชิ้นทดสอบด้วยความเร็ว 10 mm/min เช่นเดียวกัน ทำซ้ำ 3 รอบ บันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะกดอัดในรอบที่ 4 ที่ระดับการกดอัด 20% ของความสูง รายงานค่ามอดุลัสเป็น MPa

7.) ความคงทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งสภาวะ ตัดชิ้นทดสอบจากผลิตภัณฑ์บล็อกยางปูพื้นจำนวน 3 ชิ้น แต่ละชิ้นมีขนาดความกว้างและความยาวไม่น้อยกว่า 75 mm และ 150 mm ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G154 โดยทดสอบภายใต้แสงอัลตราไวโอเลต (UVA) ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 8 hr. และในบรรยากาศที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ

50 °C เป็นเวลา 4 hr. ทำสลับจนครบ 168 hr. วัดความแตกต่างของสีชิ้นตัวอย่างที่ทำการทดสอบแล้วกับชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการทดสอบ (controlled specimen) เป็นเกรย์สเกล

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดีวัลคาไนเซชันและยางรีเคลม

ในปี 2560 ลียานา บินมะยะโกะ ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีเคลมและพอลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสมบัติเชิงความร้อน เชิงกลของวัสดุตัวอย่างและได้นำวัสดุธรรมชาติรอบตัว ราคาถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยผสมยางธรรมชาติ (NR) ในปริมาณ 100 phr ยางรีเคลม (RR) 200 phr, 400 phr สารก่อฟอง (BA) 0, 10 phr และแปรปริมาณ LDPE 2, 4, 6 และ 8 phr ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนศึกษาสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้ชุดทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 79°C พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณยางรีเคลม, สารก่อฟองและ LDPE สูตรยางที่ดีที่สุดคือ NR 100 phr, RR 400 phr และ LDPE 8 phr ค่า k เท่ากับ 0.0004 W/m.K และศึกษาสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึงความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 50, 100, 200, 300 และ 400 mm/min พบว่าเมื่อมีการเพิ่ม LDPE และ RR ค่า Tensile Strength และ ค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มค่า BA เข้าไป พบว่าค่า Tensile Strength และค่า Modulus มีแนวโน้มลดลง

ในปี 2551 พิพัฒน์ ไทยเจริญ และคณะ ได้ทำการศึกษากระบวนการเชิงกลร่วมเคมีสำหรับยางรีเคลม งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการดีวัลคาไนเซชั่นในยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยวิธีเชิงกลร่วมเคมีในยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ ยางวัลคาไนซ์ถูกนำมาบดและผสมกับกรดไทโอซาลิไซลิก หรือไดฟีนิล ไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นตัวดีวัลคาไนซิ่ง เอเจนต์ หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 30 นาที ได้"ยางรีเคลม" นำยางธรรมชาติ (Virgin Rubber) มาผสมกับยางรีเคลมที่ได้ ในอัตราส่วน 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 ตามลำดับ หลังจากนั้นเติมสารคงรูปแล้วนำไปขึ้นรูปอีกครั้ง ได้ "ยางรีวัลคาไนซ์" จากผลการทดลองพบว่าเวลาการคงรูปก่อนกำหนด (Scorch time) และเวลาเหมาะสมในการคงรูป (Optimum cure time) จะลดลงเมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเป็น 80/20 ร่วมกับการเติมไดฟินิล ไดซัลไฟด์จะให้ค่าทนต่อแรงดึง และร้อยละของการยืดที่จุดขาด คือ 17.23 MPa และ 541% ตามลำดับ ในขณะที่การใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลมเป็น 80/20 ร่วมกับการเติมกรดไทโอซาลิไซลิก เป็นสารดีวัลคาไนซิ่งเอเจนต์ จะให้ค่าทนต่อแรงดึงและร้อยละของการยืดที่จุดขาด คือ16.45 MPa และ 503% ตามลำดับ ซึ่งสมบัติเชิงกลที่ได้จะกลับคืนมากว่า 75% เมื่อเปรียบเทียบกับยางวัลคาไนซ์

ในปี 2017 Rafael Barbosa และคณะได้ศึกษาการตรวจสอบผลกระทบของกระบวนการดีวัลคาไนเซชันโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่แบบหมุนร่วม (ICTSE) ที่มีต่อคอมโพสิตยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ (NR)

สามตัวที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (CD) ที่แตกต่างกัน พารามิเตอร์การอัดขึ้นรูปได้รับการแก้ไขเช่นเดียวกับแกรนูเมตรีของวัสดุเริ่มต้นและเทอร์โมพลาสติกเสริมที่เพิ่มเข้าไปในกระบวนการ หลังจากการวัลคาไนซ์คอมโพสิตมีลักษณะตามเศษส่วนที่ละลายน้ำได้ (SF) ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (CD) สมบัติเชิงกลและการวัดความร้อน (TGA) การอัดขึ้นรูปได้ดำเนินการกับอีลาสโตเมอร์ที่วัลคาไนซ์โดยใช้การแตกของ crosslink แบบคัดสรรและการระบุลักษณะเดียวกันนี้ได้ดำเนินการกับวัสดุ devulcanized ยกเว้นการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกล การอัดขึ้นรูปแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวที่มีประสิทธิภาพโดยเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของเศษส่วนที่ละลายน้ำได้การลดความหนาแน่นของการเชื่อมขวางและการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ผลลัพธ์เหล่านี้ได้รับผลกระทบโดยตรงจากความแตกต่างเบื้องต้นของโครงสร้างวัสดุและการมีเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (EVA) ในการอัดขึ้นรูป

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เขม่าเขม่าดำเป็นสารตัวเติม

ณัฐพร มโนอิ่ม และ เนตรชนก พันธุ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยาง HNBR เมื่อผสมเขม่าดำชนิด N330 N550 และ N660 ในปริมาณ 60 และ 70 phr ตามลำดับ โดยสมบัติการไหลและการคงรูปที่ได้ศึกษา ได้แก่ ความหนืดมูนี่และระยะเวลาในการคงรูปของยางที่ 90% ในขณะที่สมบัติเชิงกลที่ได้ศึกษา ได้แก่ สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขัดสี ค่าความแข็ง รวมทั้งความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ซึ่งได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานยางทั้งก่อนและหลังผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมันร้อนจากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนืดมูนี่เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเขม่าดำ ในขณะที่เวลาเริ่มคงรูปและเวลาคงรูปของยางที่ 90% มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพบว่า เมื่อบดผสมขม่าดำในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานยางมีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขัดสีมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามการผสมเขม่าดำที่มีอนุภาคขนาดเล็กในปริมาณที่สูงเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการบดผสมลดลง ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่หรือลดลง และนอกจากนี้พบว่าเขม่าดำชนิด N550 ซึ่งมีโครงสร้างสูง เมื่อบดผสมเข้ากับยาง HNBR ทำให้ชิ้นงานยางมีค่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นและผลจากการนำชิ้นงานยางไปผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนและการบ่มเร่งด้วยน้ำมันร้อนพบว่าชิ้นงานยาง HNBR มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการบ่มเร่ง เนื่องจากยาง HNBR มีสมบัติการทนต่อความร้อนที่สูง และชิ้นงานยางเกิดพันธะเชื่อมขวางต่อเนื่อง (Post curing) จากการวิจัยนี้พบว่าเขม่าดำชนิด N550 ที่ปริมาณการผสม 60 phr มีความเหมาะสมต่อการนำพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์แหวนกันซึมน้ำมันที่ผลิตจากยาง HNBR

ในปี 2557 ชิตสุปรีย์ กตาธิการกุล และคณะ ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผงเขม่าดำซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติ

เชิงกลและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีผงเขม่าดำเกรด N220, N330 และ N660 ที่ปริมาณ 0, 20, 40 และ 60 ส่วนในยางร้อยส่วน (phr) เติมสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด 2-Hydroxypropyl-3-Piperazinyl-Quinoline carboxylic acid Methacrylate (HPQM) based Neusilin ปริมาณ 0, 3, 5 และ 7 phr เชื้อแบคทีเรียที่ใช้คือ Escherichia coli (E. coli) ATCC 25923 และ Staphylococcus aureus (S. aureus) ATCC 25922 ทดสอบความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีการวัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Halo test) และการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย (PCA) พบว่าการเติมผงเขม่าดำเกรด N330 ที่ปริมาณ 40 phr ทำให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดุลัสแรงดึง ค่าความแข็ง และความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าเกรด N220 และ N660 และพบว่าสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด HPQM based Neusilin และไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล โดยที่สารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียร่วมกับผงเขม่าดำ สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด E. coli ได้ดีกว่าชนิด S. aureus ซึ่งระดับการเสริมแรงส่งผลต่อความสามารถการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยการเสริมแรงที่ดีส่งผลให้มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลง

ในปี 2548 โอบเอื้อ อิ่มวิทยา ได้ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเขม่าดำ (N330, N550 และ N660) และแคลเซียมคาร์บอเนต มาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ STR 5L เพื่อศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมเหล่านี้ต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของยางรองแท่นเครื่องจักร จากการทดลองพบว่าการใช้เขม่าดำ N330 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด จะให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงได้นำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้ร่วมกับเขม่าดำ N330 เพื่อลดต้นทุนในการผลิต จากการศึกษาทั้งสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล พบว่าการใช้เขม่าดำ N330 ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 45/15 โดยน้ำหนัก จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำยางแท่นรองเครื่องจักรมากที่สุด

ในปี 2007 Hong et al. ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภคและโครงสร้างของเขม่าดำชนิดต่างๆ ต่อความเสียดทานและพฤติกรรมขัดถูของยางธรรมชาติ (NR), ยางสำตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และยางบิวทาไดอีน (BR) จากการศึกษาพบว่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของยางมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับ Characteristic parameter (ψ) ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ผิวและโครงสร้างของเขม่าดำ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและโครงสร้างของเขม่าดำ อัตราการขัดถูของยางลดลงเมื่อพื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างของเขม่าดำเพิ่มขึ้น

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบล็อกยางปูพื้น

ในปี 2552 ศุภชัย แก้วจัง ได้ทำการพัฒนาบล็อกปูพื้นที่ทำจากยางธรรมชาติและ EPDM เหลือทิ้งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาบล็อกปูพื้นที่ทำจากยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็ม บล็อกยางปูพื้นประกอบด้วยสองชั้น ชั้นแรกคือส่วนฐานรองรับ ทำจากยางธรรมชาติชนิดยางสกิมซึ่งเป็นยางต้นทุนต่ำผสมกับสารตัวเติมผงฝุ่นขี้เลื่อยไม้ยางพาราทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ใช้เวลาในการขึ้นรูป 12, 15 และ 20 นาที ที่ความหนา 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ ชั้นที่สองทำจากยางสกิมผสมยางอีพีดีเอ็มซึ่งเป็นวัสดุจากฉนวนหุ้มท่อแอร์เหลือทิ้งโดยมีคุณสมบัติความต้านทานต่ออุณหภูมิได้ดี ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมโดยมีการแปรผันปริมาณสัดส่วนยางอีพีดีเอ็มในช่วง 0-300 phr ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100°C ผลการทดลองพบว่า สมบัติความต้านทานแรงฉีกขาด สมบัติการกระเด้งกระดอน และทดสอบสมบัติการกระเด้งตัวในแนวดิ่งของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงตามปริมาณสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของยางอีพีดีเอ็มในทางตรงกันข้ามเวลาในการคงรูปยาง สมบัติความแข็ง และสมบัติการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นโดยสามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุดที่ปริมาณยางอีพีดีเอ็ม 300 phr ต้นทุนด้านวัสดุลดลงเมื่อชั้นฐานรองรับ และปริมาณสัดส่วนยางอีพีดีเอ็มเพิ่มขึ้น แต่ต้นทุนด้านพลังงานกลับเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นฐานรองรับเพิ่มขึ้น และปริมาณสัดส่วนยางอีพีดีเอ็ม เพิ่มขึ้น

ในปี 2551 ณัฐพล ไพโรจน์ ได้ทำการศึกษาศักยภาพการใช้ยางธรรมชาตรีไซเคิลและพลาสติกทำบล็อกยางปูพื้น จุดประสงค์การทำวิจัยนี้เพื่อศึกษาสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยาง STR 20 ผสมยางครัม ในช่วง 50-150 phr และกรรมวิธีในการขึ้นรูปบล็อกยางปูพื้น ซึ่งผิวด้านบนทำจากวัสดุผสม ยางธรรมชาติผสมยางครัม และส่วนฐานทำจากพลาสติกโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณยางครัมในยางวัลคาไนซ์มากขึ้นส่งผลให้เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปมีค่าลดลงเช่นเดียวกันกับความต้านทานการฉีกขาดและการกระเด้งตัว ในทางตรงกันข้ามกลับพบว่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น จากการวิจัยพบว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปส่วนฐานของบล็อกยางปูพื้นที่ผลิตจากพลาสติกโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เหมาะสมคือ 150°C และเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกส่วนฐานแปรตามความหนาของบล็อกปูพื้น สำหรับการอัดขึ้นรูปยางคอมปาวด์ที่ผสมยางครัม ลงบนส่วนฐานพลาสติก อุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปยางคอมปาวด์คือ 170°C และพลาสติกคือ 130°C จากการทดสอบพบว่าค่าการกระเด้งตัวของบล็อกปูพื้นเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางครัมลดลง ในทางตรงข้ามเมื่อส่วนฐานของบล็อกปูพื้นหนาขึ้น ค่าการกระเด้งตัวของบล็อกปูพื้นลดลง ส่วนต้นทุนด้านวัสดุในการผลิตบล็อกปูพื้นลดลงเมื่อใช้พลาสติกหนาขึ้น และปริมาณยางครัมเพิ่มขึ้น ต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตของบล็อกปูพื้นลดลง เมื่อความหนาของพลาสติกมากขึ้น แต่ต้นทุนด้านพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางครัมเพิ่มขึ้น

อาคม เสงี่ยมวิบูล ได้ทำการพัฒนาบล็อกปูพื้นลวดลายศิลปกรรมอีสาน ซึ่งบล็อกปูพื้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นสำหรับคนอีสาน แต่บล็อกปูพื้นที่ผลิตขึ้นเน้นคุณค่าด้านประโยชน์ใช้สอยเป็นสำคัญยังขาดการให้คุณค่าด้านสุนทรียะ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อพัฒนาลวดลายบล็อกปูพื้นจากศิลปกรรมในอีสาน มีวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือ เพื่อพัฒนาและออกแบบบล็อกปูพื้นต้นแบบจากลวดลายศิลปกรรมเอกลักษณ์ภูมิปัญญาท้องถิ่นอีสาน เพื่อเพิ่มคุณค่าและมูลค่าผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นให้สามารถตอบสนองต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค งานวิจัยจึงได้ออกแบบขั้นตอนกระบวนศึกษาวิจัย มีขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาข้อมูลจากหนังสือ เอกสารข้อมูลจำเพาะของบล็อกปูพื้นเพื่อประกอบการการออกแบบ ข้อมูลภาคสนามแหล่งศิลปกรรมที่เป็นแรงบันดาลใจในการออกแบบ ศึกษาความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้น การพัฒนาลวดลายบล็อกปูพื้นจากศิลปกรรมท้องถิ่นในอีสาน การออกแบบผลิตภัณฑ์ การผลิต และการประเมินต้นแบบด้านคุณภาพและความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากลวดลายศิลปกรรมในอีสาน พบว่าคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นที่ผู้บริโภคต้องการคือ ความสวยงาม รูปร่างแปลกใหม่ เน้นภูมิปัญญาท้องถิ่น และใช้ในการทำทางเดินและตกแต่งสวน ผลการพัฒนาลวดลายจากศิลปกรรมท้องถิ่นในอีสาน การออกแบบลวดลายและรูปทรงโดยยึดตามลวดลายดั้งเดิม (Original Pattern) เป็นต้นแบบสามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของศิลปกรรมท้องถิ่นได้เป็นอย่างดี ลวดลายจากงานศิลปกรรมหมวดงานประติมากรรมและหมวดงานถัก ทอ ย้อม เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นลวดลายบนบล็อกปูพื้นสามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของท้องถิ่นอีสาน การผลิตบล็อกปูพื้นลวดลายจากศิลปกรรมในอีสานด้วยการพัฒนาแม่พิมพ์บล็อกปูพื้น (Moulds) วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำแม่พิมพ์ คือ โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester Resin) เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นและผู้ที่ต้องการผลิตใช้งาน สามารถพัฒนาต่อยอดวิธีการได้ง่ายและสามารถนำไปผลิตได้จริง การประเมินต้นแบบผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากลวดลายศิลปกรรมในอีสานโดยผู้เชี่ยวชาญ ต้นแบบบล็อกปูพื้นจากลวดลายผ้าลายก้ามปู มีความเหมาะสมและมีคุณภาพมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.50 และผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อต้นแบบผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากลวดลายศิลปกรรมในอีสาน มีความสอดคล้องกับผลการประเมินต้นแบบผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นของผู้เชี่ยวชาญซึ่งให้ค่าในระดับที่มากที่สุดเช่นกัน ผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นจากลวดลายศิลปกรรมในอีสานสามารถต่อยอดเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับเศรษฐกิจตนเอง ครอบครัว และชุมชน และเป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 3
สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 ยางรีเคลม ผลิตโดย บริษัท ย่งไทยการยาง จำกัด

3.1.2 กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยบดย่อยยางทำให้ยางนิ่มเร็วขึ้น และเป็นสารกระตุ้น (activator) ผลิตโดย CHEMMIN CORPORATION LTD.

3.1.3 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น ผลิตโดย บริษัท เจ.ที.ซี. อินดัสตรีส์จำกัด

3.1.4 ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine, 6PPD) ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง ผลิตโดย Shandong Sunsine Chemical Co.,Ltd.

3.1.5 เรซิน (Resin) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต ผลิตโดย MC INDUSTRIAL CHEMICAL CO.,LTD.

3.1.6 พอลีเอทิลีน แว็กซ์ (PE-Wax) ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ผลิตโดย SIAM QUALITY INDUSTRIES CO.,LTD

3.1.7 ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอาโซลซัลโฟนาไมด์ (N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfonamide, CBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตโดย SHENYANG SUNNYJOINT CHEMICALS CO.,LTD

3.1.8 ไดเบนโซไทอาซิลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyldisulfide, MBTS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตโดย บริษัท เคมลู้บอินเตอร์เทรด คอร์ปอเรชั่น จำกัด

3.1.9 ซิงค์ไดบิวทิลไดไทโอคาร์บาเมต (Zinc dibuthyldithiocarbamate, ZDBC) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตโดย HEBI UHOO NEW MATERIALS CO.,LTD.

3.1.10 กำมะถัน (Sulfur, S) ทำหน้าที่เป็นสารคงรูป ผลิตโดย บริษัท ส.สามพรานเคมีคอล จำกัด

3.1.11 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม ผลิตโดย SURINT ONYA CHEMICALS (THAILAND) CO.,LTD

3.1.12 น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต ผลิตโดย บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

3.1.13 เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N220 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ผลิตโดย Birla Carbon(Thailand) Public Co.,Ltd.

3.1.14 เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N330 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ผลิตโดย Linyuan Advanced Materials Technology Co.,Ltd.

3.1.15 เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N550 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ผลิตโดย บริษัท ไทย ซัน เคมิคอล จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องชั่งสาร เป็นเครื่องชั่งระบบดิจิตัล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ผลิตโดย บริษัท OHAUS จำกัด

รูปที่ 3.1 เครื่องชั่งสาร

3.2.2 เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ใช้ในการผสมยางเข้ากับสารเคมีและสารตัวเติมต่างๆให้เป็นเนื้อเดียวกัน

รูปที่ 3.2 เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two roll mill)

3.2.3 เครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer) ใช้สำหรับหาเวลาการคงรูปของยางและเวลาสุกของยางก่อนกำหนด

รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบคุณสมบัติการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer)

3.2.4 เครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Mooney Viscometer) ใช้สำหรับหาค่าความหนืดของยางคอมปาวด์

รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความหนือของยาง (Mooney viscometer)

3.2.5 เครื่องอัดเบ้า (Compression Molding Machine) ใช้ในการขึ้นรูปตัวอย่างชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติ

รูปที่ 3.5 เครื่องอัดเบ้า (Compression Molding Machine)

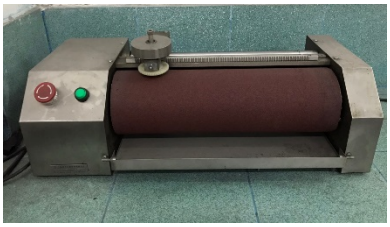
3.2.6 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength Tester) ใช้สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดเมื่อขาด ของตัวอย่างยางคงรูป ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยใช้เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์ แบบ C

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength Tester)

3.2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer Hardness Machine) เป็นเครื่องมือใช้สำหรับวัดความแข็งของยางตัวอย่าง โดยทดสอบแบบ shore A

รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (Durometer Hardness Machine)

3.2.8 เครื่องทดสอบการขัดถู (Abrasion Tester) ใช้สำหรับทดสอบหาปริมาตรสูญเสียของยางตัวอย่าง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5963 – 97a

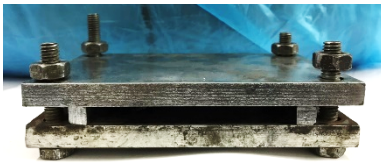


รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบการขัดถู (Abrasion Tester)

3.2.9 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ใช้ในการอบยางในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของยาง

รูปที่ 3.9 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

3.2.10 เครื่องทดสอบความทนต่อการเสียรูปจากการกด (Compression set) เป็นการวัดสมบัติการกดอัดของยางตัวอย่าง



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบความทนต่อการเสียรูปจากการกด (Compression set)

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมยางรีเคลมผสมกับเขม่าดำ

นำยางรีเคลมและสารเคมีแต่ละสูตรดังแสดงในตารางที่ 3.1 ไปบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง เป็นเวลา 20 นาที โดยทำการนวดยาง (Reclaim rubber) เป็นเวลา 1 นาที เติมสารตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (Stearic acid, ZnO) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (6PPD, PE-Wax) และสารช่วยในกระนวนการผลิต (Resin, Aromatic oil) เป็นเวลา 4 นาที เติมสารตัวเติม ($CaCO_3$ และเขม่าดำเกรด N220) เป็นเวลา 13 นาที และสารเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยา (MBTS, ZDBC, CBS) และสารคงรูปใ (Sulfur) เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำการม้วนยาง จำนวน 10 รอบ พักยางอย่างน้อยเป็นเวลา 16 ชั่วโมง ก่อนนำมาทดสอบและขึ้นรูป ทำการทดลองซ้ำโดยศึกษาชนิดของเขม่าดำ (N220, N330, N550) และปริมาณของเขม่าดำ (0, 25, 35, 45 phr) จากนั้นขึ้นรูปยางตัวอย่างด้วยเครื่องอัดเบ้า เพื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล โดยใช้อุณหภูมิ 135°C และใช้เวลาในการขึ้นรูปตามระยะเวลาการคงรูปของแต่ละสูตร

ตารางที่ 3.1 สูตรยางคอมปาวด์ที่มีเขม่าดำชนิดและปริมาณต่างๆ

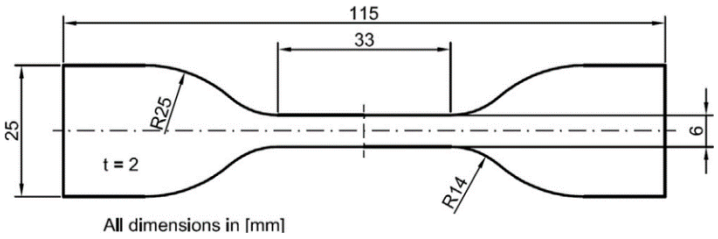
ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)		
	N220	N330	N550
ยางรีเคลม (Reclaim rubber)	100	100	100
Stearic acid	2	2	2
Zinc oxide	5	5	5
6PPD	1.5	1.5	1.5
Resin	5	5	5
PE-Wax	1.5	1.5	1.5
CBS	0.7	0.7	0.7
MBTS	0.5	0.5	0.5
ZDBC	0.3	0.3	0.3
Sulfur	1.5	1.5	1.5
$CaCO_3$	80	80	80
Carbon black	0, 25, 35, 45		
Aromatic oil	5	5	5

3.3.2 การทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์

3.3.2.1 ทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer) ที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อหาระยะเวลาในการคงรูป โดยเครื่องทดสอบจะรายงานผลเป็นค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) ค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) ค่า scorch time (T_{s1}) และ 90% Cure time (T_{90})

3.3.2.2 ทดสอบความหนืดของยาง ด้วยเครื่องทดสอบความหนืดของยาง (Mooney Viscometer) ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 นาที เพื่อหาความหนืดของยาง

3.3.2.3 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile test) โดยตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D412 ด้วยเครื่องตัดชิ้นทดสอบ Die C ดังรูปที่ 3.11 จากนั้นวัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ยความหนาที่วัดได้ แล้วนำไปทดสอบสมบัติการดึง โดยใช้ความเร็วในการดึง 500 (mm/min) บันทึกค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดเมื่อขาด (% Elongation at break)



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412 แบบ Die C

ค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) คือ ค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (หน่วยที่บันทึกได้จากเครื่อง คือ นิวตัน, N) เมื่อนำมาคำนวณต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2) นำสมการที่ 3.1 จะได้ค่าความทนต่อแรงดึงมีหน่วยเป็น N/mm^2 หรือ MPa

$$\text{Tensile strength} = \frac{\text{maximum load}}{A} \qquad (3.1)$$

โดย

Maximum load คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

การยืดเมื่อขาด (Elongation at break) คือ ความสามารถของชิ้นทดสอบที่จะยืดออกได้โดยไม่เกิดการแตกหักเสียหาย จะแสดงเป็นค่าร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ของความยาวเดิม ซึ่งจะเกิดขึ้นทันทีที่มีการขาดของชิ้นทดสอบ การคำนวณดังสมการ 3.2

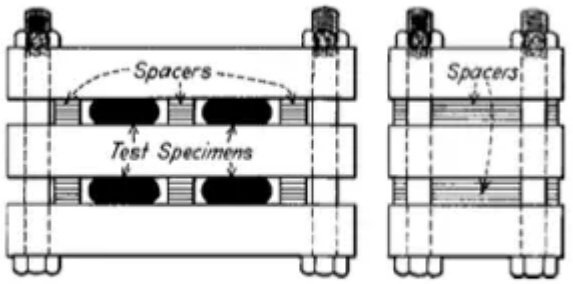
$$\text{Elongation at break} = 100 \times \frac{(L - L_0)}{L_0} \qquad (3.2)$$

โดย

L คือ ระยะยืดชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (mm)

L_0 คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (mm)

3.3.2.4 การทดสอบการเสียรูปจากการกด (Compression set) ทดสอบ Compression set ตามมาตฐาน ASTM D395 Method B โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร ความหนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำยางออกจากแผ่นอัด พักยางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นวัดความหนาที่เปลี่ยนแปลงไป และคำนวณค่า Compression set ดังสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.12 การทดสอบ Compression set

$$\text{Compression set} = \left(\frac{t_0 - t_i}{t_0 - t_n}\right) \times 100 \qquad (3.3)$$

โดย

t_0 คือ ความหนาเดิม (mm)

t_i คือ ความหนาคืนตัว (mm)

t_n คือ ความหนา spacer bar (mm) (9.5±0.02 mm)

3.3.2.5 การทดสอบความแข็ง (Hardness) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งเป็นการวัดความแข็งแบบ shore A และใช้เครื่องวัดความแข็งแบบ shore A ใช้หัวกดยางค้างไว้อย่างน้อย 30 วินาที จากนั้นอ่านค่าความแข็งที่วัดได้

3.3.2.6 การทดสอบความทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5963 โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 16.0 ± 0.2 มิลลิเมตร ความหนา 6 มิลลิเมตร นำชิ้นทดสอบไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการขัดถู (Abrasion Tester) และคำนวณปริมาตรสูญเสียของยางดังสมการที่ 3.4

$$\text{Abrasion loss} = \frac{\Delta m_t \times S_0}{d_t \times S} \qquad (3.4)$$

โดย

Δm_t คือ น้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ (mg)

d_t คือ ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (mg/m^3)

S_0 คือ ค่าคงที่ของการขัดถู (200 mg)

S คือ มวลของยางมาตรฐานที่สูญเสียไปจากการขัดถู 1 รอบ (mg)

3.3.2.7 การเร่งการเสื่อมอายุ (Aging) ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 188 โดยอบยางที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ด้วยตู้อบลมร้อนและนำไปทดสอบค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ตามข้อที่ 3.3.2.3 และทดสอบความแข็ง (Hardness) ตามข้อที่ 3.3.2.5

3.3.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติของยางที่มีชนิดและปริมาณของเขม่าดำแตกต่างกัน

ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่ส่งผลให้ยางรีเคลมมีสมบัติเชิงกลเหมาะสมสำหรับนำไปขึ้นรูปเป็นบล็อกยางปูพื้นโดยเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาชนิดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติของบล็อกยางปูพื้น โดยทำการผสมยางรีเคลมกับสารเคมีและใช้เขม่าดำทำหน้าที่สารเสริมแรง โดยใช้ชนิดและปริมาณของเม่าดำแตกต่างกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมสำหรับเตรียมเป็นยางปูพื้นให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 2378 – 2559

4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อพฤติกรรมการคงรูป

จากการศึกษาการเตรียมยางซึ่งใช้ยางรีเคลมผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยทำการแปรชนิดของเขม่าดำซึ่งใช้ชนิด N220 N330 และ N550 และปริมาณของเขม่าดำเป็น 25 phr 35 phr และ 45 phr แล้วนำไปทดสอบหาลักษณะของการคงรูปของยาง ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อพฤติกรรมการคงรูปของยางรีเคลม

สูตร	M_L(N·m)	M_H(N·m)	ΔM(N·m)	T_{s1} (min)	T_{90} (min)
No CB	0.02	0.24	0.22	3.51	4.54
N220/25	0.08	0.65	0.57	2.33	4.09
N220/35	0.2	0.92	0.72	2.10	3.45
N220/45	0.13	1.07	0.94	1.46	3.51
N330/25	0.09	0.69	0.60	2.34	4.19
N330/35	0.10	0.84	0.74	2.08	3.49
N330/45	0.10	1.02	0.92	1.53	3.58
N550/25	0.06	0.62	0.56	3.05	4.56
N550/35	0.07	0.76	0.69	2.51	4.49
N550/45	0.07	0.87	0.80	2.33	4.51

จากตารางที่ 4.1 การคงรูปของยางที่ทดสอบด้วยเครื่อง MDR เป็นการทดสอบปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างการคงรูปยางที่เป็นปฏิกิริยาทางเคมีโดยเกิดพันธะเคมีเชื่อมขวางทำให้ยางคงรูป ซึ่งการทดลองพบว่าค่า ΔM ของยางที่มีการเติมเขม่าดำจะมีค่ามากกว่ายางที่ไม่มีการเติมเขม่าดำ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของยางสามารถเกี่ยวพันหรือสอดแทรกในโครงสร้างของเขม่าดำหรือเรียก mechanical interlocking จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำได้ดี ซึ่งเขม่าดำมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และเมื่อเติมเขม่าดำชนิดเดียวกันแต่ปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่า ΔM เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำ เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำ

จากการทดลองหาเวลาก่อนการคงรูป (T_{s1}) และเวลาการคงรูป (T_{90}) จะขึ้นกับปริมาณของเขม่าดำ ในกรณีที่ไม่มีการเติมเขม่าดำ เวลาก่อนการคงรูปและเวลาการคงรูปจะมากกว่ายางที่มีการเติมเขม่าดำ แต่เมื่อมีการเติมเขม่าดำที่ปริมาณมากขึ้น เวลาก่อนการคงรูปและเวลาการคงรูปจะลดลงเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของยางกับสารเคมี ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหมากขึ้นภายในโมเลกุลของยาง ซึ่งเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามากกว่า จึงทำให้เวลาก่อนการคงรูปและก่อนการคงรูปสั้นลง

4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความหนืดมูนี่ของยางรีเคลม

ตารางที่ 4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความหนืดมูนี่ของยางรีเคลม

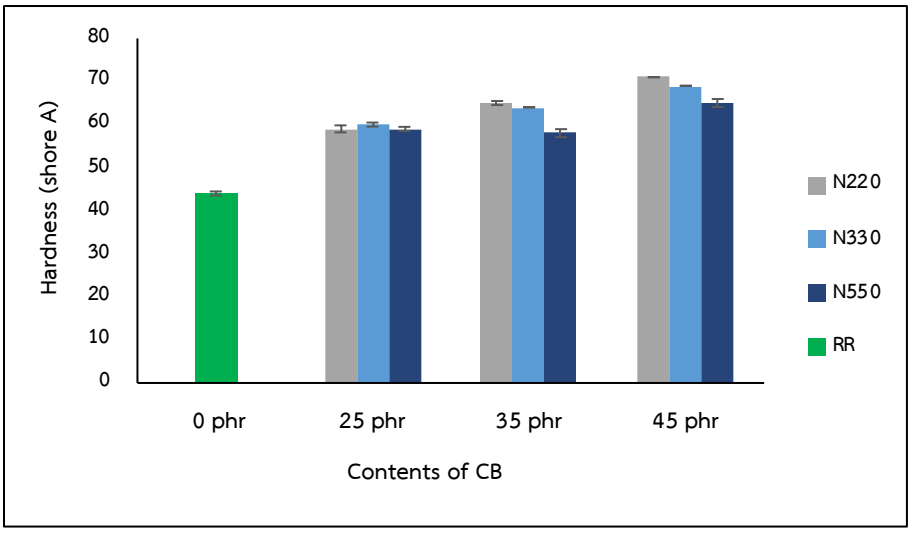
สูตร	MV
No CB	17.02
N220/25	24.48
N220/35	38.40
N220/45	29.40
N330/25	31.20
N330/35	23.81
N330/45	26.32
N550/25	28.31
N550/35	29.43
N550/45	24.46

จากตารางที่ 4.2 พบว่ายางที่ไม่มีการเติมเขม่าดำจะมีความหนืดน้อยกว่ายางที่เติมเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงที่สามารถช่วยเพิ่มความหนืดของยาง และพบว่าที่ปริมาณของเขม่าดำเท่ากัน ค่าความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออนุภาคของเขม่าดำเล็กลง และที่เขม่าดำชนิดเดียวกันแต่ปริมาณเพิ่มขึ้น ที่ 45 phr ค่าความหนืดจะลดลง เนื่องจากเขม่าดำมีปริมาณมากทำให้ไม่สามารถกระจายตัวได้ดีจึงเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ

4.3 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกลของยาง

4.3.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความแข็ง (Hardness properties)

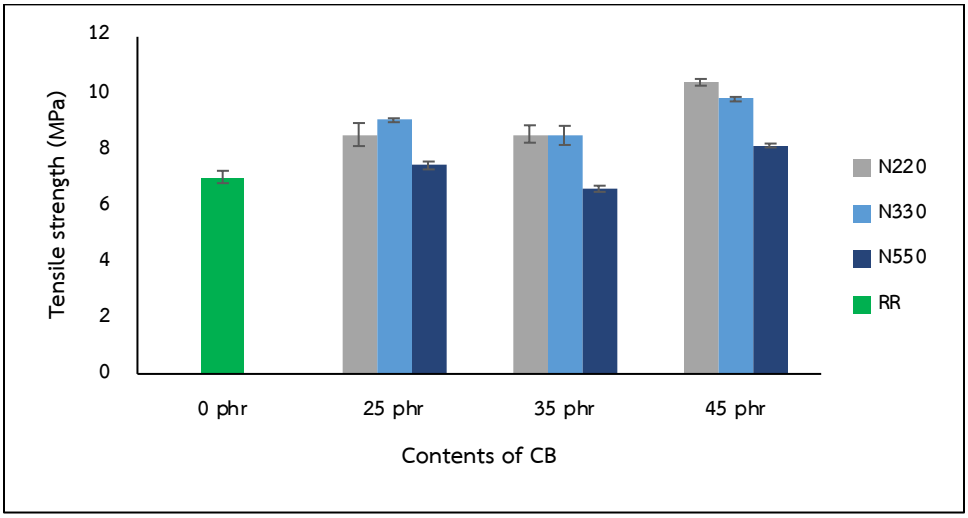
จากรูปที่ 4.1 ยางที่เติมเขม่าดำจะมีความแข็งมากกว่ายางที่ไม่เติมเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำมีสมบัติเป็นสารเสริมแรง ทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ยางที่เติมเขม่าดำมีความแข็งที่มากกว่า และจากการทดลองพบว่าเขม่าดำชนิด N220 มีความแข็งมากกว่าเขม่าดำชนิด N330 และ N550 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดอนุภาคและโครงสร้างของเขม่าดำ N220 มีขนาดเล็กกว่าเขม่าดำชนิด N330 และ N550 ทำให้เกิดอันตรกิริยาและมีการจัดเรียงตัวได้ดีกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างและอนุภาคขนาดใหญ่กว่า และปริมาณของเขม่าดำที่ทำให้ยางมีความแข็งมากที่สุดคือ ที่ 45 phr เนื่องจากปริมาณของเขม่าดำจะแปรผันตรงกับความแข็งของยาง



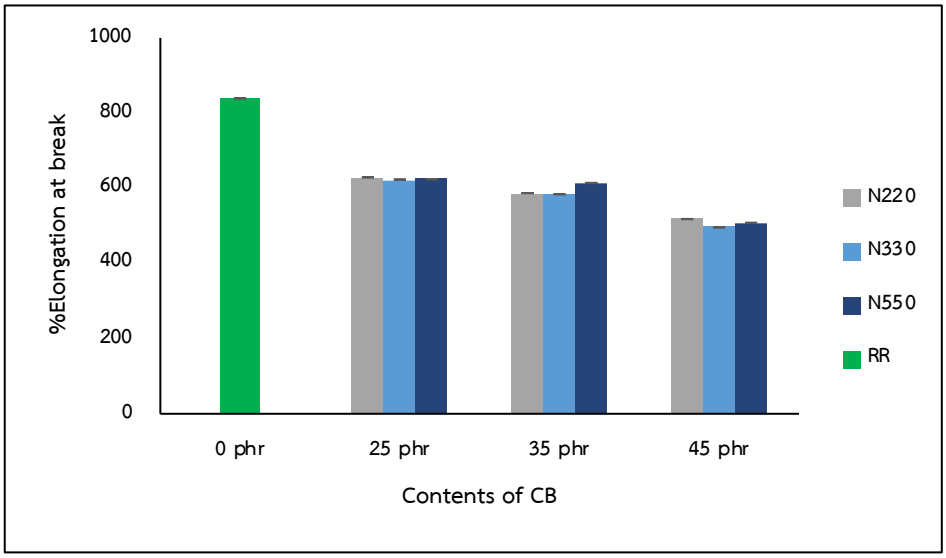
รูปที่ 4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความแข็ง (Hardness properties)

4.3.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Tensile strength และ Elongation at break

จากรูปที่ 4.2 พบว่ายางที่เติมเขม่าดำจะมีค่า Tensile strength สูงกว่ายางที่ไม่เติมเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำเกิดการเชื่อมโยงกับโมเลกุลของยางทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น เขม่าดำชนิด N220 มีค่า Tensile strength สูงกว่าเขม่าดำชนิด N330 และ N550 เนื่องจากเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กจะสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าและเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำ จึงทำให้เขม่าดำชนิด N220 สามารถเสริมแรงได้ดีกว่าเขม่าดำชนิด N330 และ N550 และปริมาณของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นทำให้ยางมีค่า Tensile strength สูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ปริมาณ 45 phr เนื่องจากปริมาณการเชื่อมโยงของพันธะเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า Tensile strength สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า Elongation at break ที่มีค่าลดลง ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Tensile strength

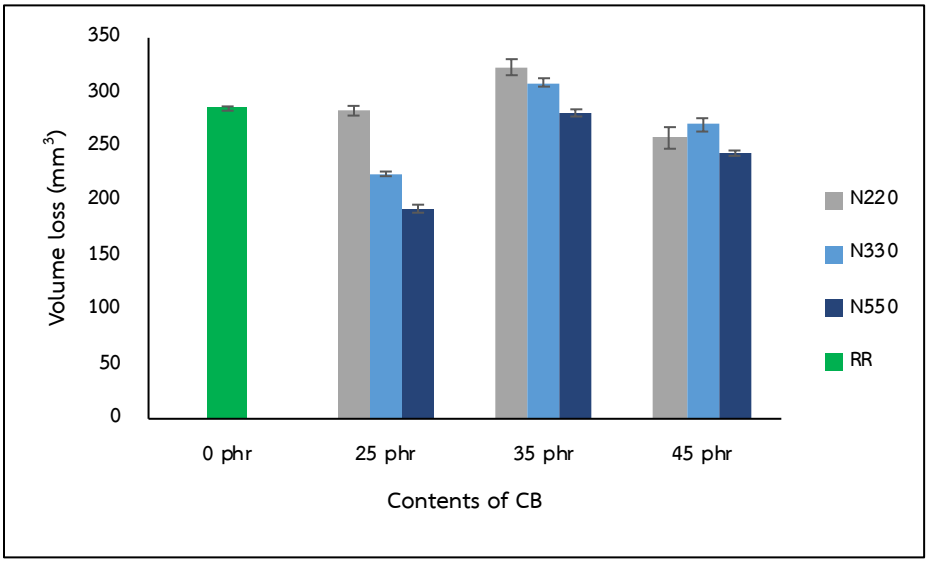


รูปที่ 4.3 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Elongation at break

4.3.3 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเขม่าดำชนิด N220 ที่ปริมาณ 45 phr มีปริมาตรสูญเสียน้อยกว่าเขม่าดำชนิด N220 ที่ปริมาณ 25 phr และ 35 phr ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเขม่าดำชนิด N220 ที่ปริมาณ 45 phr มีความทนต่อการขัดถูมากที่สุด เขม่าดำชนิด N330 ที่ปริมาณ 25 phr มีปริมาตรสูญเสียน้อยกว่าเขม่าดำชนิด N330 ที่ปริมาณ 45 phr และ 35 phr ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเขม่าชนิด N330 ที่ปริมาณ 25 phr มีความทนต่อการขัดถูมากที่สุด และเขม่าดำชนิด N550 ที่ปริมาณ 25 phr มีปริมาตรสูญเสียน้อยกว่าเขม่าดำชนิด N550 ที่ปริมาณ 45 phr และ 35 phr ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเขม่าดำชนิด N550 ที่ปริมาณ 25 phr มีความทนต่อการขัดถูมากที่สุด

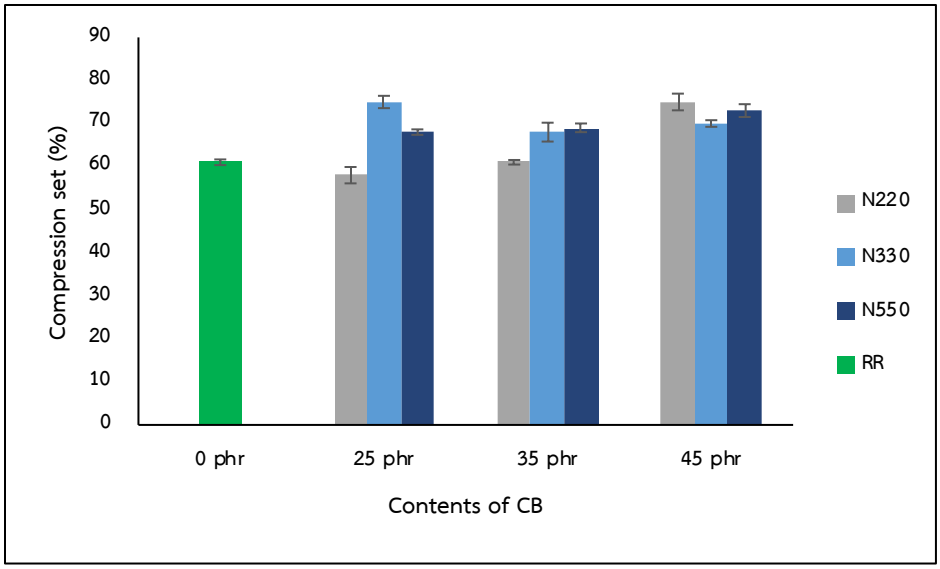
จากข้อมูลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเขม่าดำชนิด N550 ที่ปริมาณ 25 phr มีปริมาตรสูญเสียน้อยที่สุดอาจเกิดจากการแตกตัวได้ดีของเขม่าดำ และเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับเขม่าดำ จึงทำให้ยางมีความทนต่อการขัดถูดีที่สุด



รูปที่ 4.4 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

4.3.4 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่าการเสียรูปจากการกด (Compression set)

จากรูปที่ 4.5 พบว่าหากค่าการเสียรูปจากการกดมีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่ายางนั้นมีความสามารถในการรักษาความยืดหยุ่นได้ดี จึงสามารถคืนตัวได้สูงหลังจากการได้รับแรงกด จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้น ยางรีเคลมมีค่าการเสียรูปจากการกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้นจนทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแข็งตึง เมื่อมีแรงมากระทำ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการต้านแรงที่มากระทำมากขึ้นจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลขาด และจากการทดลองพบว่ายาง รีเคลมที่มีการเติมเขม่าดำชนิด N220 ที่ 25 phr มีค่าการเสียรูปจากการกดต่ำที่สุด

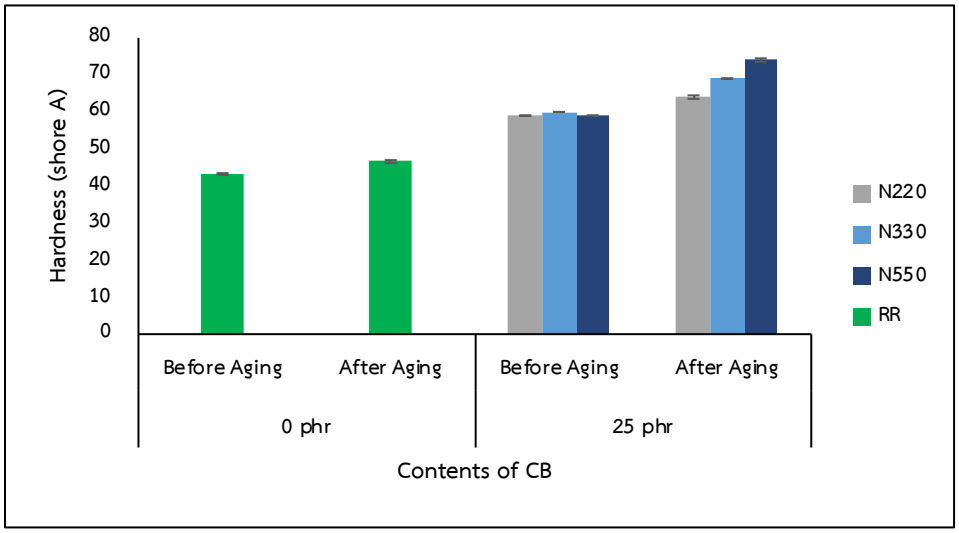


รูปที่ 4.5 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่าการเสียรูปจากการกด (Compression set)

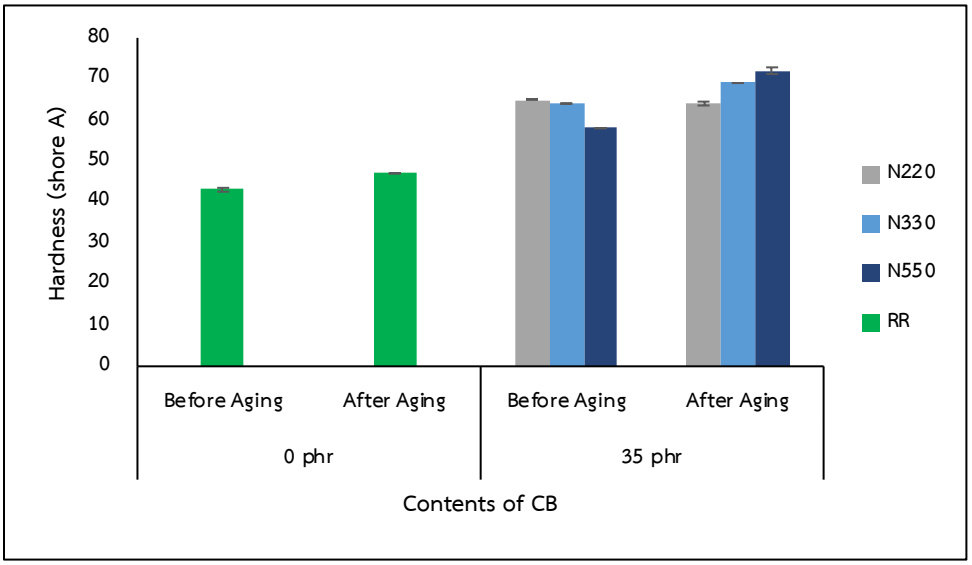
4.4 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

4.4.1 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อความแข็ง (Hardness properties) ของยางรีเคลมก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

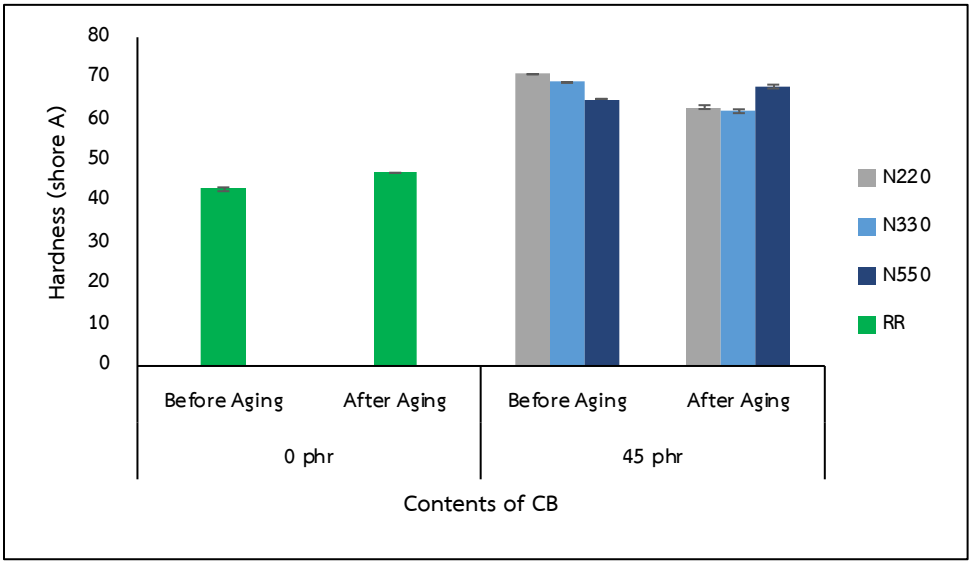
จากรูปที่ 4.6 พบว่าหลังการเร่งการเสื่อมอายุยางจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนทำให้ยางและเขม่าดำเกิดการเชื่อมขวางหลังการคงรูป



รูปที่ 4.6 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 25 phr ต่อความแข็งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ



รูปที่ 4.7 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 35 phr ต่อความแข็งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

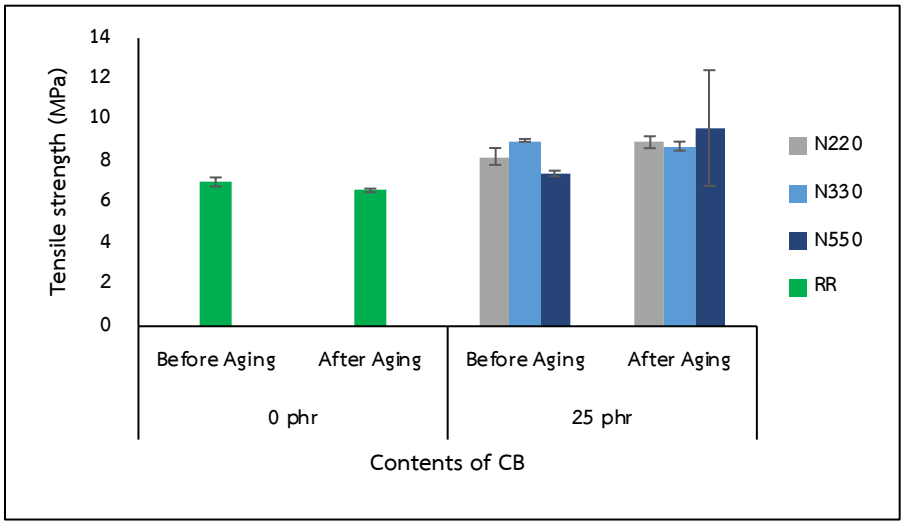


รูปที่ 4.8 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 45 phr ต่อความแข็งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

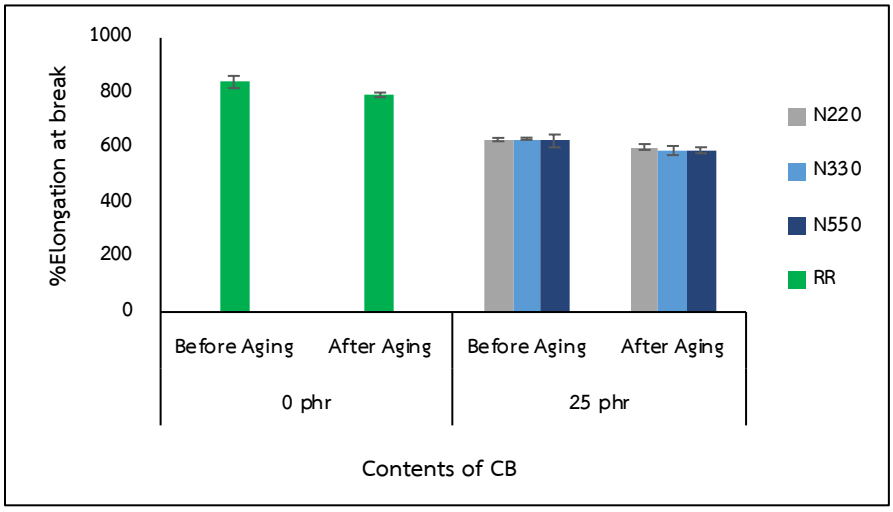
4.4.2 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อค่า Tensile strength และ Elongation at break ของยางรีเคลมก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

ผลของค่า Tensile strength ที่ชนิดและปริมาณของเขม่าดำแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาณของเขม่าดำที่ 45 phr จะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหลังการเร่งการเสื่อมอายุน้อยที่สุด

ผลของค่า Elongation at break ที่ชนิดและปริมาณของเขม่าดำแตกต่างกัน ดังรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณของเขม่าดำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Elongation at break ลดลง และค่า Elongation at break น้อยกว่าก่อนการเร่งการเสื่อมอายุ และจากการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุพบว่ายางจะมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และค่า Tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่า Elongation at break ลดลง เนื่องจากความร้อนทำให้ยางเกิดการเชื่อมขวางต่อเนื่องหลังจากการคงรูป

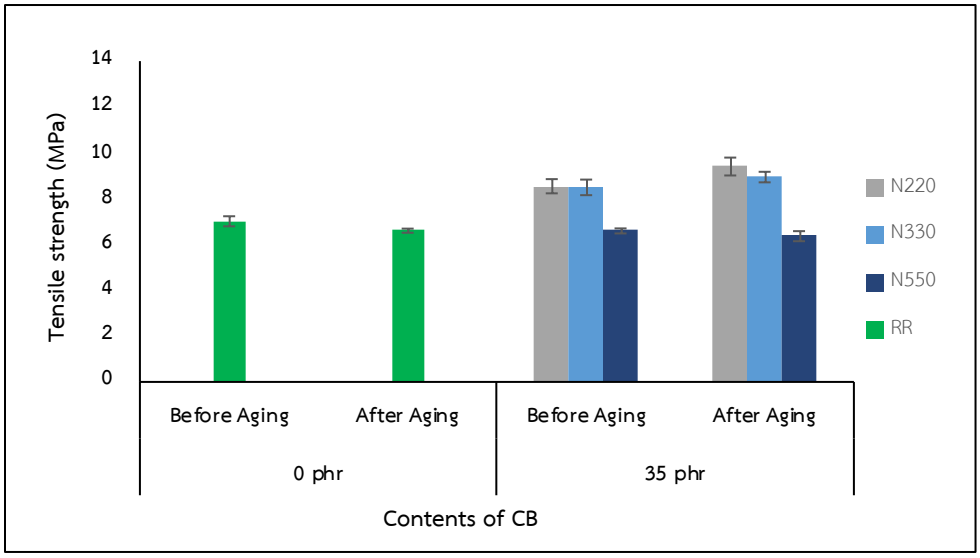


รูปที่ 4.9 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 25 phr ต่อค่า Tensile strength ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

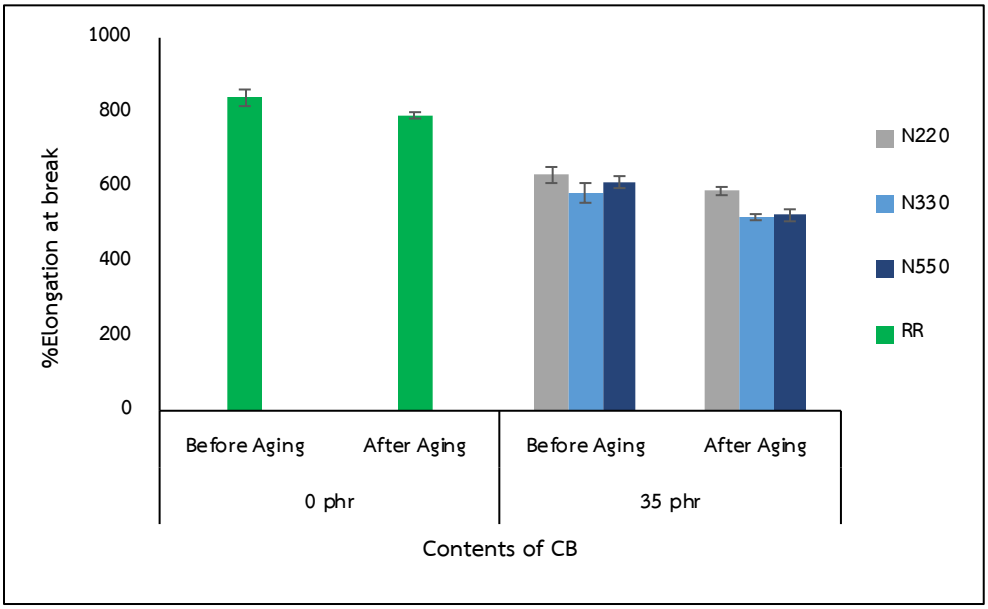


รูปที่ 4.10 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 25 phr ต่อค่า Elongation at break

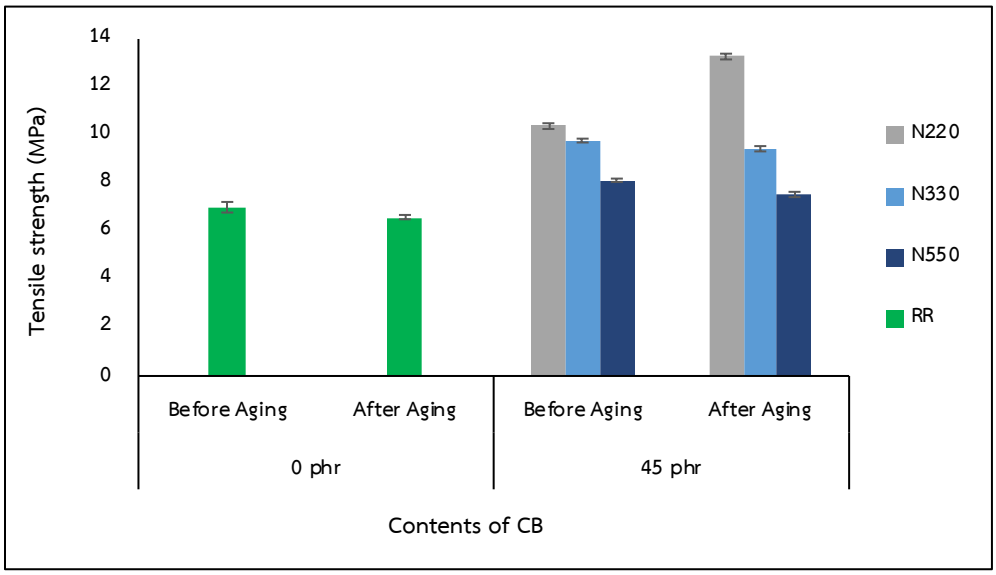
ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ



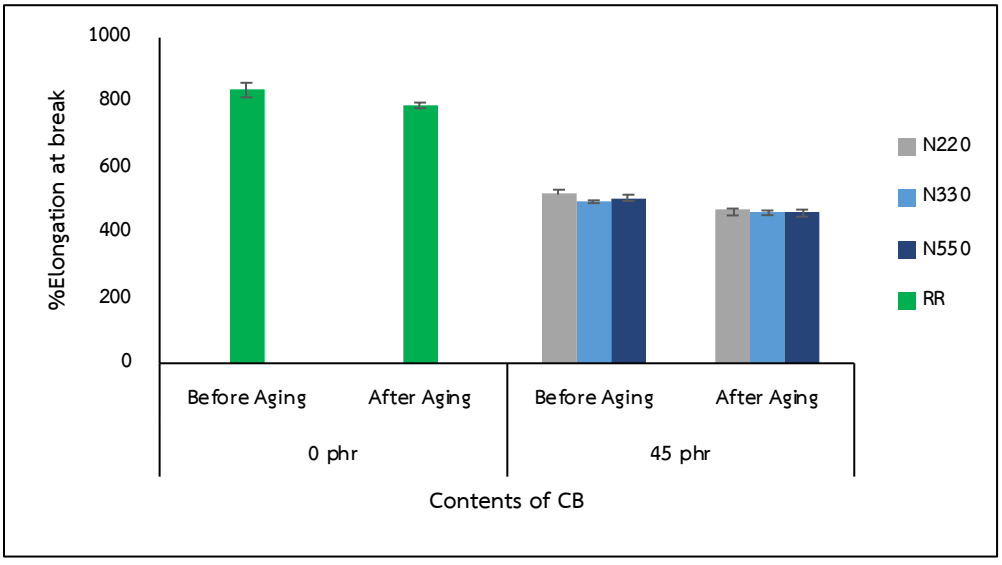
รูปที่ 4.11 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 35 phr ต่อค่า Tensile strength ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ



รูปที่ 4.12 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 35 phr ต่อค่า Elongation at break ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ



รูปที่ 4.13 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 45 phr ต่อค่า Tensile strength ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ



รูปที่ 4.14 ผลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำ ที่ 45 phr ต่อค่า Elongation at break ก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุ

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเขม่าดำชนิด N330 ที่ 25 phr และเขม่าดำชนิด N550 ที่ 45 phr เป็นชนิดและปริมาณที่ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม บล็อกยางปูพื้น มาตรฐานเลขที่ มอก.2378-2559 มากที่สุด โดยมีความแข็งอยู่ที่ 61 shore A และ 64 shore A ตามลำดับ มีค่า Tensile strength อยู่ที่ 9.03 MPa และ 8.14 MPa ตามลำดับ มีค่า Elongation at break อยู่ที่ 623% และ 508% ตามลำดับ มีปริมาตรสูญเสียจากการทดสอบความทนต่อการขัดถูอยู่ที่ 225 mm^3 และ 244 mm^3 ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์การคืนตัวหลังการกดอัดอยู่ที่ 75% และ 73% ตามลำดับ และหลังการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุพบว่ายางมีความแข็งอยู่ที่ 64 shore A และ 68 shore A ตามลำดับ ซึ่งยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนทำให้ยางเกิดการเชื่อมขวางต่อเนื่อง หลังจากการคงรูป มีค่า Tensile strength อยู่ที่ 8.75 MPa และ 8 MPa ตามลำดับ และมีค่า Elongation at break อยู่ที่ 589% และ 463% ตามลำดับ ซึ่งมีค่า Tensile strength และมีค่า Elongation at break ลดลงเนื่องจากมีการเชื่อมขวางหลังการคงรูปเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่ายางที่ใช้เขม่าชนิด N330 ที่ 25 phr และเขม่าดำชนิด N550 ที่ 45 phr เป็นสารเสริมแรง เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นบล็อกยางปูพื้น

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมที่มีชนิดและปริมาณของเขม่าดำแตกต่างกันเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

สูตรยาง / การทดสอบ		Standard	N0	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
Before Aging	Hardness (shore A)	65±5	44	58	66	71	61	64	68	59	58	64
	Tensile (MPa)	≥6	7.01	8.52	8.45	10.38	9.03	8.36	9.78	7.43	6.59	8.14
	Elongation at break (%)	≥200	839	629	587	518	623	584	496	624	614	508
	Abrasion (mm^3)	≤250	285	283	326	258	225	309	270	193	281	244
	Compression set (%)	-	61	58	61	70	75	68	70	68	69	73
After Aging	Hardness (shore A)	เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±5	47	64	69	74	64	69	72	63	62	68
	Tensile (MPa)	เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±25	6.61	8.94	9.39	10.27	8.75	8.94	9.44	7.56	6.36	8
	Elongation at break (%)	เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±50	792	602	546	469	589	519	462	560	524	463

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของเขม่าดำต่อสมบัติของยางรีเคลม พบว่า การเติมเขม่าดำทำให้เวลาในการไหลและเวลาในการคงรูปของยางลดลง ขณะที่ค่าความหนืดของยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางและเขม่าดำเกิดอันตรกิริยากันได้ดี นอกจากนี้พบว่าเขม่าดำยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมทั้งก่อนและหลังการเร่งการเสื่อมอายุให้ดีขึ้น เช่น ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง ความทนต่อการขัดถู เป็นต้น โดยสมบัติเชิงกลของยางรีเคลมขึ้นอยู่กับชนิดของเขม่าดำ ซึ่งเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็ก พื้นที่ผิวมาก จะสามารถเสริมแรงได้ดี นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของยางรีเคลมยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเขม่าดำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการกระจายตัวในเมทริกซ์ยาง และจากการเปรียบเทียบยางรีเคลมที่ผสมเขม่าดำกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม บล็อกยางปูพื้น พบว่ายางรีเคลมที่มีเขม่าดำชนิด N330 ที่ 25 phr และเขม่าดำชนิด N550 ที่ 45 phr เหมาะสมสำหรับเตรียมเป็นบล็อกยางปูพื้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดสอบสมบัติของยางรีเคลมก่อนนำมารีวัลคาไนซ์เพิ่มเติม เช่น การบวมตัว ความหนืด

5.2.2 ทดสอบสมบัติของยางรีเคลมผสมกับเขม่าดำ เช่น ความคงทนต่อสภาพลมฟ้าอากาศโดยวิธีเร่งภาวะ ทดสอบความทนต่อโอโซน SEM การบวมตัว และสมบัติเชิงพลวัติ

บรรณานุกรม

ชิตสุปรีย์ กตาธิการกุล และคณะ. (2557). สมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมผลเขม่าดำ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 10(3), 46-47.

ชินรัตน์ ลาภพูลธนะอนันท์. (2554). ยางรีเคลม: การเปลี่ยนขยะยางล้อเก่าให้กลายเป็นวัสดุที่มีค่า.[2]

ณัฐพร มโนอิ่ม, และ เนตรชนก พันธุ. การศึกษาอิทธิพลของขนาดและปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยาง HNBR. คณะวิศวกรรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณัฐพล ไพโรจน์. (2551). ศักยภาพการใช้ยางธรรมชาติรีไซเคิลและพลาสติกทำบล็อกยางปูพื้น. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พิพัฒน์ ไทยเจริญ, พัชณิตา วาทะกุล, และ ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ. (2551). กระบวนการเชิงกลร่วมเคมีสำหรับยางรีเคลม.[3]

พงษ์ธร แซ่อุย. (2547). ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). ปทุมธานี.

พงษ์ธร แซ่อุย. (2548). สารเคมียาง.ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). ปทุมธานี.

ลียานา บินมะยะโกะ. (2560). สมบัติเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ เบลนด์ยางรีเคลมและพอลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

วราภรณ์ ขจรไชยกุล. (2552). ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 14-15.

ศุภชัย แก้วจัง. (2552). การพัฒนาบล็อกยางปูพื้นที่ทำจากยางธรรมชาติและ EPDM เหลือทิ้ง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สถาบันพลาสติก. (2557). เทคโนโลยีการรีไซเคิลยาง: ยางดีวัลคาไนซ์.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมร่วมกับสถาบันพลาสติก. (2563). รายงานสภาวะอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราของไทย.[1]

อาคม เสงี่ยมวิบูล. (2560). การพัฒนาบล็อกยางปูพื้นลวดลายศิลปกรรมอีสาน. คณะศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

โอบเอื้อ อิ่มวิทยา. (2543). ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ASTM D 412-80. (1982). Test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomer-tension. Annual book of ASTM standards. Easton. (37), 140-153.

Barbosa, R., Nunesa, T.A., Ambrósio, D.J., (2017). "Devulcanizetion of Natural Rubber in Composites with Distinct Crosslink Densities by Twin-screw Extruder," Materials Research. 20(2), 77-83.

Hong, C. K., Kim, H., Ryu, C., Nah, C., Huh, Y., & Kaang, S. (2007). "Effects of particle size and structure of carbon blacks on the abrasion of filled elastomer compounds," Journal of Materials Science. 42(20), 8391–8399.

ภาคผนวก

ประวัติย่อผู้วิจัย

1. **ชื่อ-สกุล** นางสาวนิศารัตน์ เจือสนิท

   รหัสนิสิต 602091018

   วันเดือนปี เกิด 14 กันยายน 2542

   ที่อยู่ปัจจุบัน 319/7 หมู่ 1 ต.ยามู อ.ยะหริ่ง จ.ปัตตานี 94150

   ข้อมูลติดต่อ nanamnisa@gmail.com

   ประวัติการศึกษา

   ประถมศึกษา โรงเรียนชุมชนบ้านกะทูนเหนือ จ.นครศรีธรรมราช

   มัธยมศึกษา โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จ.ปัตตานี

   อุดมศึกษา มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

2. **ชื่อ-สกุล** นางสาวรวิภา ทองศรี

   รหัสนิสิต 602091019

   วันเดือนปี เกิด 15 มิถุนายน 2541

   ที่อยู่ปัจจุบัน 40/67 หมู่ 11 ซ.23/5 ต.บางแม่นาง อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี 11140

   ข้อมูลติดต่อ luktanravipha@gmail.com

   ประวัติการศึกษา

   ประถมศึกษา โรงเรียนบางคูลัด จ.นนทบุรี

   มัธยมศึกษา โรงเรียนบางบัวทอง จ.นนทบุรี

   อุดมศึกษา มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง