

การพัฒนาสูตรยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติทำแม่พิมพ์ยาง
สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

DEVELOPMENT OF NR COMPOUNDS AS RUBBER MOLDS
FOR JEWELRY INDUSTRY



สหกิจศึกษาเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การพัฒนาสูตรยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติทำแม่พิมพ์ยาง
สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

DEVELOPMENT OF NR COMPOUNDS AS RUBBER MOLDS
FOR JEWELRY INDUSTRY



นางสาวณัฐภรณ์
นางสาวธัญดา
นางสาวธิดา

จีระพันธ์
นิธิเตชาเมธ
วงศ์กัทลีคาม

สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อใดๆ จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

DEVELOPMENT OF NR COMPOUNDS AS RUBBER MOLDS
FOR JEWELRY INDUSTRY



MISS NATTHAPORN GEEYAPHAN
MISS THIYADA NITHITECHAMET
MISS THIDA WONGKATTHALEEKHAM

COOPERATIVE STUDY SUMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆที่ปรากฏในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา การพัฒนาสูตรยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติทำแม่พิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
 Development of NR Compounds as Rubber Molds for Jewelry Industry

ชื่อนักศึกษา นางสาวณัฐภรณ์ จิยะพันธ์ รหัสนักศึกษา 54050169
 นางสาวธัญญาดา นิธิเตชาเมธ รหัสนักศึกษา 54050183
 นางสาวธิดา วงศ์กัทลีคาม รหัสนักศึกษา 54050184

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
 ภาควิชา เคมี
 ปีการศึกษา 2557
 อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน กรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อสหกิจศึกษา	การพัฒนาสูตรยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติทำแม่พิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณัฐฎาภรณ์	จีระพันธ์	รหัสนักศึกษา 54050169
	นางสาวธัญญาดา	นิธิเตชาเมธ	รหัสนักศึกษา 54050183
	นางสาวธิดา	วงศ์กัทลีคาม	รหัสนักศึกษา 54050184
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศไทยที่สร้างรายได้ในการส่งออกให้แก่ประเทศเป็นจำนวนมาก โดยอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนั้นมีการใช้ยางคอมพาวด์ (Rubber compounds) ในการทำแม่พิมพ์ยาง (Rubber mold) ในการผลิตจำนวนมาก ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าแม่พิมพ์ยางนี้จากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสูตรแม่พิมพ์ยาง นอกจากจะลดต้นทุนแล้ว แต่ยังสามารถเพิ่มสมบัติของแม่พิมพ์ยางได้ด้วย โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยางคอมพาวด์ ได้แก่ ระบบสารเชื่อมโยง (เปรียบเทียบระหว่างสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์และสารเชื่อมโยงกำมะถันแบบ EV (Efficient vulcanization, EV), ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (สารตัวเติมกลุ่มดินขาว ทัลคัม ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต) โดยใช้ยางธรรมชาติชนิดยางแท่ง 5L ทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง, สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา จากการศึกษาพบว่า ระบบสารเชื่อมโยงกำมะถันแบบ EV มีสมบัติที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับระบบสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ จากการเปรียบเทียบชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณ 50 phr พบว่า ยางที่ใช้สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติโดยรวมดีที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (จาก 50 phr เป็น 70 phr) ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) และเวลาเชื่อมโยง (Cure time) เพิ่มขึ้น แต่สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้วมีค่าลดลง เนื่องมาจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomeration) และการบดย่อยยาง (Mastication) เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) พบว่า พื้นผิวของยางคอมพาวด์นั้นมีความเรียบเนียน จากการใช้แบบสอบถามเพื่อสำรวจความพึงพอใจการใช้งานแม่พิมพ์ยางในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับแม่พิมพ์ยางทางการค้า พบว่า ผู้ประกอบการให้ความพึงพอใจในยางสูตรที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต (Calflex-C ที่ 70 phr) ดังนั้นการพัฒนาสูตรแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับที่ให้สมบัติโดยรวมเป็นที่น่าพึงพอใจ โดยมีต้นทุนในการผลิตแม่พิมพ์ยางที่ต่ำ (ประมาณ 111 บาทต่อ 1 กิโลกรัม) และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : แคลเพล็กซ์-ซี แม่พิมพ์ยาง ระบบสารเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ กลุ่มก้อน

Title	Development of NR Compounds as Rubber Molds for Jewelry Industry		
Students	Miss Natthaporn Geeyaphan	Student ID	54050169
	Miss Thiyada Nithitechamet	Student ID	54050183
	Miss Thida Wongkatthaleekham	Student ID	54050184
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud		

Abstract

Jewelry and small decorating replicas industries have been ones of crucial industries in Thailand in terms of making most of revenues of Thailand export products. Those industries have been using "rubber compounds" to make "rubber molds" for mass production. High quality expensive rubber compounds for rubber molds have been imported resulting in high production cost. In this work, formula for jewelry rubber molds was developed not only for lowering the cost, but also improving rubber mold qualities. Factors affecting rubber compound properties were studied, such as, curing systems type (peroxide vs efficient vulcanization (EV) sulfur), types and loadings of fillers (clay, talcum, silica and CaCO₃). NR STR-5L was used as the based rubber. Compounds were mixed by using a two-roll-mill and tested for their properties, e.g., cure characteristics, mechanical properties and morphology. It was found that the sulfur cured in EV system showed much improved rubber properties as compared to peroxide. By comparing fillers at 50 phr loading, CaCO₃-filled rubbers had overall good properties. As the filler loadings were increased (50 phr to 70 phr), scorch time and cure time were increased but physical and mechanical properties of the rubber vulcanizates were decreased due to agglomeration and mastication effect. By using optical microscope, morphological of rubber compounds were revealed to be smooth surface. By using questionnaires to survey the satisfaction of the rubber molds from this work compared with the commercial one, it was revealed that jewelry manufacturers seemed to have more satisfaction of the CaCO₃-filled compounds (Calflex-C at 70 phr). In conclusion, the formula of the molding rubber compounds for jewelry with overall satisfactory properties was achieved. Cost of rubber mold was low (about 111.1baht/kg) with high potentials for commercial uses.

Keywords : Calflex-C™, Rubber mold, Efficient vulcanization, Agglomeration

กิตติกรรมประกาศ

ที่สหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณในความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจิต ที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้ทุนและกำลังใจ พร้อมทั้งช่วยเหลือและดูแลเอาใจใส่อย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำปรึกษาและแก้ไขสหกิจศึกษาให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท เอส.เค.พอลิเมอร์ จำกัด ที่ให้โอกาสและความกรุณาอนุเคราะห์สถานที่สารเคมี เครื่องมืออุปกรณ์ และทุนที่ใช้ในสหกิจศึกษา ตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณชยุต สุวรรณพิมลกุล กรรมการผู้จัดการ ที่ให้การสนับสนุน ให้สหกิจศึกษานี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณจรรยารัตน์ ธีรภักษ์พันธ์ ผู้ช่วยกรรมการผู้จัดการ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาและการสนับสนุน ตลอดจนติดต่อประสานงานผู้ประกอบการในการทดลองใช้ตัวอย่างยางคอมพาวด์จริงในระดับอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณ คุณพรสุดา บ้านนบ วิศวกรวิจัยสูตร ที่ให้คำปรึกษาแก่สหกิจศึกษา

ขอขอบคุณ คุณนิรมล แซ่หนุ่น เจ้าหน้าที่จัดซื้อ ที่ช่วยหาสารเคมีและตัวอย่างสารที่ใช้ในสหกิจศึกษา

ขอขอบคุณ คุณสุธาทิพย์ เปรมปราชญ์ชัยนัต ผู้จัดการส่วนประกัน คุณทวี ขจัดภัย พนักงานแล็บ คุณรักษัธนากร คำแก้ว พนักงานแล็บ คุณสมชาย ทองสวัสดิ์ เจ้าหน้าที่ประกันคุณภาพ และคุณสายันต์ คำมุงคุณ เจ้าหน้าที่ประกันคุณภาพ ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือการใช้เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในสหกิจศึกษานี้

ขอขอบคุณ คุณณภัชชญา รองเย็น เจ้าหน้าที่ควบคุมเอกสารและข้อมูล และคุณทวีชัย เจริญตา เจ้าหน้าที่บริการหลังการขาย ที่คอยช่วยเหลือและดูแลทุกอย่าง ในระหว่างการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณ คุณรุ่งพิทักษ์ มุลศาสตร์ พนักงานผสมยางทดลอง และคุณพิทักษ์ วงษ์ประโคน พนักงานผสมยาง ที่คอยอำนวยความสะดวกในการผสมยางในสหกิจศึกษา

ขอขอบคุณ คุณณัฐพล เจริญกิจจาธร เจ้าหน้าที่วิศวกรออกแบบกระบวนการ ที่คอยช่วยอำนวยความสะดวกในสหกิจศึกษา

ขอขอบคุณ คุณธนศักดิ์ ทิพย์วงษา พนักงานขับรถที่คอยรับ-ส่ง และช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ขณะปฏิบัติงานเสมอมา

ขอขอบคุณ บริษัท ชันจิวเวลรี่ จำกัด ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทดลองใช้ตัวอย่างยางคอมพาวด์จริงในระดับอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนสหกิจศึกษาขอขอบคุณ ตนเอง และผู้ร่วมทำสหกิจศึกษา ที่คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ แก้ไขปัญหา ร่วมทุกข์ ร่วมสุข และเป็นกัลยามิตรที่ดีต่อกันเสมอมา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจในการทำสหกิจศึกษาจนสำเร็จลุล่วง รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

นางสาวณัฐภรณ์	จียะพันธ์
นางสาวธัญดา	นิธิเตชาเมธ
นางสาวธิดา	วงศ์กัทลีคาม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)	5
2.1.1 รูปแบบการใช้งานยางธรรมชาติ	6
2.1.1.1 น้ำยาง (Latex)	6
2.1.1.2 ยางแห้ง	6
2.1.2 ยางแท่ง (Technically Specified rubber, TSR หรือ Block rubber)	7
2.2 สารเคมีสำหรับยาง	8
2.2.1 สารเชื่อมโยง	8
2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization)	9
2.2.1.2 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization)	12
2.2.2 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators)	20
2.2.3 สารเสริมการเชื่อมโยง (co-agent)	20
2.2.4 สารตัวเติม (Fillers)	21
2.2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)	21
2.2.4.2 ดินขาว (Clay)	23
2.2.4.3 ซิลิกา (Silica)	25
2.2.4.4 ทัลคัม (Talcum)	26
2.2.5 สารช่วยกระบวนการผลิต	27
2.2.5.1 เพปไทเซอร์ (Peptizers)	27
2.2.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agent)	27
2.2.7 สารให้สี	28
2.2.8 น้ำมันช่วยผสม (Processing oil)	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การทดสอบยาง.....	30
2.3.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยง (curemeters).....	30
2.3.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer)	33
2.3.3 เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester)	33
2.3.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile tester).....	34
2.4 แม่พิมพ์ยางที่ใช้ทำเครื่องประดับ (Jewelry rubber mold)	36
2.4.1 ขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ยาง.....	36
2.4.2 แม่พิมพ์ยางที่ใช้ขึ้นรูปเครื่องประดับทางการค้าที่ใช้ในปัจจุบัน	38
2.4.2.1 แม่พิมพ์ยางซิลิโคน.....	39
2.4.2.2 แม่พิมพ์ยาง RTV	40
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
2.5.1 สรุปการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	45
3.1 แผนการดำเนินการ.....	46
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	46
3.3 วิธีการทดลอง	52
3.3.1 การเตรียมยางผสมสูตรสำหรับการศึกษาระบบสารเชื่อมโยง	52
3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตรสำหรับการศึกษาผลของชนิดสารตัวเติม ที่ปริมาณ 50 phr.....	52
3.3.3 การเตรียมยางผสมสูตรสำหรับการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม ที่ปริมาณ 70 phr.....	54
3.4 การศึกษาสมบัติของยางคอมพาวด์.....	55
3.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test).....	55
3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength).....	56
3.4.3 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์.....	56
3.4.4 การทดสอบสมบัติการยืดถาวร (Tension set).....	57
3.4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	57
3.5 ทดสอบการใช้งานจริง.....	58
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	59
4.1 ศึกษาผลของระบบสารเชื่อมโยง	60
4.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์.....	60
4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแม่พิมพ์ยาง.....	61
4.2 การศึกษาผลของชนิดสารตัวเติม.....	66
4.2.1 ลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เมื่อใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน ในปริมาณ 50 phr.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแม่พิมพ์ยาง.....	69
4.3 การศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม.....	74
4.3.1 ลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เมื่อใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 70 phr.....	74
4.3.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแม่พิมพ์ยาง.....	75
4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	81
4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองการใช้งานจริง.....	84
4.5.1 การทดลองการใช้งานจริงครั้งแรก จากการใช้สารตัวเติม 6 สูตร ในปริมาณ 50 phr.....	84
4.5.2 สารตัวเติม 2 สูตร ในปริมาณ 70 phr จากการปรับปรุงสูตรและความพึงพอใจ จากการใช้งานจริงครั้งแรก.....	86
4.5.3 สรุปสูตรที่เหมาะสมของแม่พิมพ์ยาง.....	88
4.6 การวิเคราะห์ต้นทุน.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	98
ภาคผนวก ข แบบสอบถามงานวิจัย.....	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติของไทยไปยังประเทศต่างๆ ปี 2550-2557.....	1
1.2 ปริมาณการผลิตและการใช้ภายในประเทศไทย 2552-2557	1
1.3 มูลค่าการส่งออกของเครื่องประดับอัญมณีไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2558	3
2.1 การเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้ในระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน	15
2.2 สภาวะการวัลคาไนเซชันจากสีของแม่พิมพ์ยาง No Shrink Pink®	38
2.3 สมบัติแม่พิมพ์ยาง Castaldo®	39
2.4 สมบัติแม่พิมพ์ยางซิลิโคน	40
2.5 สมบัติแม่พิมพ์ยาง RTV	41
2.6 การแก้ไขปัญหาของแม่พิมพ์ยาง Castaldo®	42
3.1 สมบัติบางประการของ STR 5L ที่ใช้ในงานวิจัย	47
3.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃).....	48
3.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของดินขาว (Clay).....	49
3.4 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของทัลคัม (Talcum).....	50
3.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของซิลิกา (Silica).....	51
3.6 งามผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1	52
3.7 งามผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 2	53
3.8 งามผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 3	54
4.1 สมบัติบางประการของยางจากต่างประเทศ (Castaldo gold label®)	59
4.2 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย	60
4.3 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร	61
4.4 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย	67
4.5 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร	68
4.6 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย	74
4.7 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร	75
4.8 สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตเครื่องประดับ	84
4.9 รูปแบบสอบถามจากการใช้งานจริงครั้งแรก.....	85
4.10 สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตเครื่องประดับ	86
4.11 การเปรียบเทียบความพึงพอใจในสมบัติต่างๆ จากการใช้งานจริง	87
4.12 การเปรียบเทียบการทดสอบความคล้าของโลหะเงินและแผ่นทองแดง	88
4.13 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมในงานวิจัยกับแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์	89
4.14 ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์	90
4.15 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ยางในอุตสาหกรรม.....	90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ	2
1.2 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางที่ใช้งานจริง.....	2
2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ	5
2.2 การเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ.....	5
2.3 กลไกการเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์.....	11
2.4 กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถัน เมื่อไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....	14
2.5 กราฟแสดงเวลาเริ่มเชื่อมโยงและอัตราเร็วการเชื่อมโยงเปรียบเทียบสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ชนิดต่างๆ และการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงร่วมกัน (Combination).....	16
2.6 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides).....	17
2.7 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มไทเอโซล (Thiazole)	17
2.8 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มกวานิดีน (Guanidines).....	18
2.9 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไทยแรมโมโนและไดซัลไฟด์ (Thiuram mono and disulfides)	18
2.10 กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถันแบบมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง	20
2.11 โครงสร้างสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent, SR 350)	21
2.12 โครงสร้างของซิลิเกตแบบ 2:1 ฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicates).....	24
2.13 โครงสร้าง Paraffinic oil	30
2.14 อนุพันธ์ของ Cyclohexane หรือ decaling	30
2.15 อนุพันธ์ของ Naphthalene, Debenzothiophene, Cabazole	30
2.16 กราฟแสดงการเชื่อมโยง (Cure curve).....	31
2.17 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (MDR)	32
2.18 จานหมุนโลหะในเครื่องวัดความหนืดหมุนนี้.....	33
2.19 เครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์.....	34
2.20 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)	35
2.21 กราฟความเค้น - ความเครียด (Stress - strain curve) ของการดึงตัวอย่าง.....	36
2.22 แผนผังขั้นตอนการขึ้นรูปในการทำแม่พิมพ์ยางเครื่องประดับ.....	38
3.1 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน JIS K 6251.....	55
3.2 ชิ้นงานความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน JIS K 6252	56
3.3 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A ตามมาตรฐาน JIS K 6253.....	57
3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง รุ่น VT300	57
4.1 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบเชื่อมโยงกำมะถัน ปริมาณ 0.5 phr และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 2.4 phr	61
4.2 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน	62
4.3 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยง ต่างกัน.....	63
4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน	64
4.6 กราฟแสดงค่ามอดุลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน	64
4.7 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน	65
4.8 กราฟแสดงค่าการยึดตัวถาวรของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารเชื่อมโยงต่างกัน	65
4.9 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกัมมะถันของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้สารตัวเติม ในปริมาณ 50 phr	68
4.10 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิด สารตัวเติมต่างกัน (50 phr)	69
4.11 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดสารตัวเติมต่างกัน (50 phr)	70
4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr).....	71
4.13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติม ต่างกัน (50 phr)	71
4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิด เมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr).....	72
4.15 กราฟแสดงค่ามอดุลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr).....	72
4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr)	73
4.17 กราฟแสดงค่าการยึดตัวถาวรของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr).....	74
4.18 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกัมมะถันของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้สารตัวเติม ในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 70 phr.....	75
4.19 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ สารตัวเติมต่างกัน	76
4.20 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ สารตัวเติมต่างกัน	77
4.21 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน	77
4.22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของ สารตัวเติมต่างกัน	78
4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน	78
4.24 กราฟแสดงค่ามอดุลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน	79
4.25 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน	80
4.26 กราฟแสดงค่าการยึดตัวถาวรของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน.....	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 สัณฐานวิทยาของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมที่แตกต่างกัน ในปริมาณ 50 phr ที่กำลังขยาย 47 เท่า	82
4.28 สัณฐานวิทยาของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมที่แตกต่างกัน ในปริมาณ 50 phr ที่กำลังขยาย 47 เท่า	83
4.29 สัณฐานวิทยาของยางทางการค้า	83
4.30 แม่พิมพ์ยางสำหรับ 6 สูตร ในการใช้งานจริง	86
4.31 แม่พิมพ์ยางสำหรับ 2 สูตร ในการใช้งานจริง	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

CBS	=	N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide
CRI	=	Cure Rate Index
DPG	=	Diphenylguanidine
DPTT	=	Dipentamethylenethiuram
EV	=	Efficient vulcanization
M _L	=	Minimum torque
M _H	=	Maximum torque
NR	=	Natural rubber
phr	=	Parts per hundred of rubber
S	=	Sulfur
STR	=	Standard Thai Rubber
TBBS	=	N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide
t _{s2}	=	Scorch time
t _{c90}	=	Cure time



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทยที่ผ่านมานั้น เน้นการพัฒนาภาคเกษตรกรรมเป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตอาหารราคาถูกเพื่อเลี้ยงประชากร และเป็นแหล่งวัตถุดิบให้แก่อุตสาหกรรม ภายในประเทศทั้งยังเป็นสินค้าส่งออกที่นำรายได้เข้าประเทศเป็นจำนวนมาก แม้ว่าในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศมากขึ้น แต่ประชากรของประเทศส่วนใหญ่ยังคงมีรายได้หลักมาจากการทำการเกษตร สินค้าเกษตรที่สร้างรายได้เป็นจำนวนมากอย่างหนึ่งคือ ยางพารา (Natural rubber, NR) ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและผู้ส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่ง และเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางเป็นอันดับที่เก้าของโลก รายได้จากการส่งออกยางธรรมชาติทั้งในรูปของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์มากกว่า 350,000 ล้านบาทต่อปี [1] แต่ถึงอย่างไรปริมาณการใช้ยังน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการส่งออกของยาง ดังนั้นเพื่อรักษาและเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมยางไทยนั้น จึงควรมีการนำยางดิบธรรมชาติมาผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยางมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติของไทยไปยังประเทศต่างๆปี 2550-2557 [2]

ปี พ.ศ.	ญี่ปุ่น	จีน	สหรัฐอเมริกา	อื่นๆ	รวม
2550	405,599	827,369	213,080	430,659	2,703,762
2551	394,742	824,833	219,986	433,830	2,675,283
2552	256,984	1,160,339	156,069	293,820	2,726,193
2553	346,302	1,128,553	177,859	330,510	2,866,447
2554	333,669	1,274,188	205,410	383,953	2,952,381
2555	269,418	1,630,322	172,577	334,809	3,121,332
2556	281,091	2,075,776	145,638	352,064	3,664,941
2557	256,578	2,142,199	146,794	399,325	3,770,649

ตารางที่ 1.2 ปริมาณการผลิต และการใช้ยางภายในประเทศไทย 2552-2557 [2]

ปี พ.ศ.	ปริมาณการผลิต	ใช้ในประเทศ	สต็อก
2552	3,164,379	399,415	293,659
2553	3,252,135	458,637	227,252
2554	3,569,033	486,745	361,557
2555	3,778,010	505,052	516,675
2556	4,170,428	520,628	502,855
2557	4,323,975	541,003	516,756

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก โดยมูลค่าเพิ่มของอุตสาหกรรมนั้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในขั้นตอนการขัดและเจียรระไนอัญมณีตลอดจนขั้นตอนการทำเครื่องประดับ สินค้าหลักในอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าการส่งออกอยู่ในระดับสูง ได้แก่ เครื่องประดับ ซึ่งเครื่องประดับแท้ของไทยได้รับการยอมรับจากลูกค้าต่างประเทศ ทั้งในด้านฝีมือการผลิต การออกแบบ และการสร้างมูลค่าผลิตภัณฑ์เครื่องประดับแท้ที่มีมูลค่าในการส่งออก ได้แก่ เครื่องประดับทองหรือเครื่องประดับเพชรฝังด้วยพลอยสีเนื้อแข็ง ซึ่งแรงงานฝีมือของไทยมีศักยภาพสูง อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมดังกล่าวของไทย วัตถุดิบที่สำคัญสำหรับเครื่องประดับกลับต้องมีการนำเข้าแทบทั้งสิ้น ทั้งทองคำ ทองคำขาว โลหะเงิน และเพชรตลอดจนพลอยสี นอกจากวัตถุดิบแล้วไทยยังต้องการพึ่งพาเครื่องจักรโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและเทคโนโลยีระดับสูงจากต่างประเทศ [3] จากสาเหตุนี้เองจึงควรพัฒนาแม่พิมพ์ยาง (Rubber mold) สำหรับเครื่องประดับของไทยจากการใช้วัตถุดิบในประเทศให้มีประสิทธิภาพและสมบัติได้ทัดเทียมกับต่างประเทศ เพื่อขยายช่องทางการตลาดและลดต้นทุนได้มากยิ่งขึ้น

แม่พิมพ์ยาง คือ ยางผสมสูตร (Rubber compound) ที่ใช้เป็นแม่แบบในการหล่อแว็กซ์ (Wax) เพื่อใช้ในการทำแบบหล่อโลหะเครื่องประดับแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางที่ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.3 มูลค่าการส่งออกของเครื่องประดับอัญมณีไทยระหว่างปี พ.ศ. 2555-2558 [4]

สินค้า	มูลค่า (ล้านบาท)			
	2555	2556	2557	2558
เครื่องประดับแท้	116,443.35	112,725.86	123,695.40	31,125.09
เพชร	46,157.81	50,693.37	59,021.64	15,133.13
พลอยสี	18,936.25	22,911.24	29,412.64	10,566.47

*2558 : ข้อมูลถึงเดือนมีนาคม

การผลิตสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับนั้นต้องใช้แม่พิมพ์สำหรับการขึ้นรูปเครื่องประดับต่างๆ ด้านอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ในประเทศไทยขาดดุลการค้าในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์มาโดยตลอดและมูลค่าการนำเข้าแม่พิมพ์ของไทยมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และคาดว่าจะมีแนวโน้มการนำเข้าเพิ่มขึ้นการที่ไทยมีมูลค่าการนำเข้าแม่พิมพ์มากเนื่องจากโรงงานที่เป็นกิจการร่วมทุนกับต่างประเทศ มีกลุ่มตลาดส่วนใหญ่เป็นต่างประเทศซึ่งมีความต้องการสินค้าที่มีคุณภาพสูง จึงทำให้มีการนำเข้าแม่พิมพ์ที่มีคุณภาพและความเที่ยงตรงสูงจากต่างประเทศเข้ามาใช้ในการผลิตสินค้าเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าอย่างคอมพิวเตอร์ในการทำเครื่องประดับโลหะที่มีราคาสูงจากต่างประเทศเช่น Castaldo®[5]

ปัจจุบันแม่พิมพ์ที่มีการผลิตในเมืองไทยยังไม่สามารถทดแทนแม่พิมพ์ของต่างประเทศได้เนื่องจาก

- เมื่อนำมาใช้งานแล้วตัวต้นแบบโลหะนั้นมีสีดำล้าไม่แวววาว
- การคืนตัวของแม่พิมพ์ยางต่ำหรือค่าการยืดถาวร (Tension set) มากทำให้แม่พิมพ์ยางปิดไม่สนิท
- ความละเอียดของเนื้อหรือความเนียนยังไม่เทียบเท่าของแม่พิมพ์ยางต่างประเทศ
- มีอายุการใช้งานสั้น หรือจำนวนรอบของการใช้งานแม่พิมพ์ยางต่ำ
- มีกลิ่นไม่พึงปรารถนา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.[6] เพื่อศึกษาพัฒนาวิจัยสูตรแม่พิมพ์ยางเครื่องประดับจากยางธรรมชาติให้มีสมบัติที่ดี ใกล้เคียงแม่พิมพ์ยางเชิงพาณิชย์จากต่างประเทศ มีต้นทุนต่ำและสามารถใช้งานได้จริงได้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

พัฒนาสูตรยางคอมพิวเตอร์จากยางธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์ขึ้นรูปเครื่องประดับที่มีสมบัติที่ดี มีต้นทุนต่ำ และความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลโดยตรงต่อสมบัติและต้นทุนการผลิต ได้แก่ ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม และผลของระบบสารเชื่อมโยง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมตัวอย่างสูตรยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติ (NR) ในการทำแม่พิมพ์ยางสำหรับเครื่องประดับ
3. ศึกษาผลของการใช้สารเชื่อมโยงระหว่าง กำมะถัน (Sulfur) และ เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ที่ปริมาณ 0.5 และ 2.4 phr ตามลำดับ
4. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณการใช้สารตัวเติมที่ 50 และ 70 phr ได้แก่ กลุ่มของ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) ดินขาว (Clay) ทัลคัม (Talcum) และ ซิลิกา (Silica)
5. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างยางผสมสูตร ได้แก่
 - ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)
 - ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)
 - สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)
 - สัณฐานวิทยา (Morphology)
6. วิเคราะห์ข้อมูลจากการใช้งานจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำแม่พิมพ์ยางที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับต่างประเทศ ต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถนำไปผลิตในอุตสาหกรรมได้ มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์
2. สามารถเพิ่มช่องทางการตลาดให้ในประเทศ เพื่อเพิ่มรายได้และลดต้นทุนในการผลิต
3. เพิ่มมูลค่ายางธรรมชาติ เพิ่มการใช้ยางธรรมชาติในประเทศ ส่งเสริมอุตสาหกรรมยางคอมพาวด์และอุตสาหกรรมอัญมณีในประเทศไทย

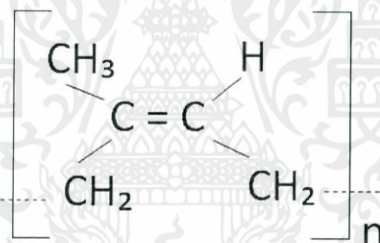
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

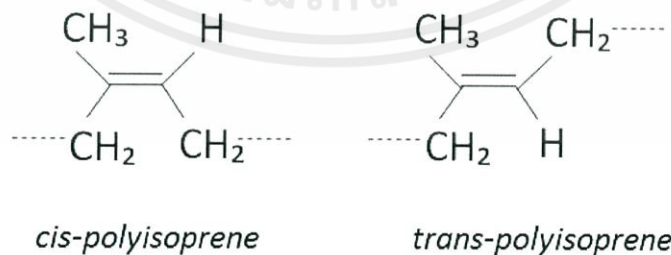
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [6]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีชื่อทางเคมีคือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือมี Isoprene (C_5H_8)_n โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15 - 20,000 ดังรูปที่ 2.1 ยางที่ได้จากธรรมชาติมีทั้งแบบ cis และ trans ดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากส่วนประกอบทางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วดังนั้นจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่นเบนซีน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallization) ได้การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้นแต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิมในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีนั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (Tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ [7]



รูปที่ 2.2 การเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งห้ามการก๊อปปี้หรือการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนแ่ยมและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

1. การมีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
2. มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถันได้ดี แต่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกับออกซิเจนและโอโซน จึงมีสาเหตุการเสื่อมของยางธรรมชาติ
3. มีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาและยืดหยุ่นได้ง่ายทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพความยืดหยุ่นได้ดี และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้
4. โครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อยืดจึงมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ทำให้มีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (Green strength) สูงและความเหนียวติดกัน (Tack) ดี
5. มีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องนำยางไปบด (Mastication) เพื่อให้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

2.1.1 รูปแบบการใช้งานยางธรรมชาติ [6]

2.1.1.1 น้ำยาง (Latex)

เนื่องจากน้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีปริมาณน้ำมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสดจนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งขึ้นจาก 30% เป็น 60% โดยน้ำหนัก เรียกว่าน้ำยางข้น (Concentrated latex)

2.1.1.2 ยางแห้ง

ยางแห้งได้จากการนำน้ำยางที่กรีตได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติกกรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟิวริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำจากนั้นทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรายางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ยางแผ่น และยางแท่ง

ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจาก

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมากจึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงยางอนามัย ถุงมือยาง ยางรัดของ เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (Heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น
3. ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน งามที่ใช้จึงต้องมีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

2.1.2 ยางแท่ง (Technically Specified Rubber, TSR หรือ Block rubber) [9]

เนื่องจากยางแผ่นและยางเครฟมีการจัดชั้นด้วยสายตาให้ผลที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้อุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบในการผลิตแทน ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ การจัดชั้นของยางแท่งจะพิจารณาจากปริมาณของสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยางเป็นสำคัญ นอกจากนั้นก็อาจพิจารณาตัวแปรอื่นๆร่วมด้วย เช่น ปริมาณซีเล้าดัชนีความอ่อนตัว ฯลฯ ปัจจุบันประเทศไทยมีมาตรฐานยางเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ซึ่งแต่เดิมเรียกว่า Thai Tested Rubber (TTR) ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตขึ้นมาโดยอาศัยหลักการคร่าวๆดังนี้คือ เริ่มต้มน้ำนำยางมาผลิตเป็นก้อนเล็กๆ (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 - 3 มม.) เพื่อให้ง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกออกไปด้วยน้ำและง่ายต่อการทำให้แห้งในขั้นตอนถัดไป หลังจากอบยางให้แห้งด้วยอากาศแล้วจะนำยางแท่งที่เป็นก้อนเล็กๆ เหล่านี้ไปอัดให้เป็นแท่งขนาดมาตรฐาน $330 \times 670 \times 170$ มม³ ที่มีน้ำหนักประมาณ 33.33 กิโลกรัม

การจัดชั้นของยางแท่ง [9]

วิธีดั้งเดิมที่ใช้ในการจัดชั้นของยางแท่งใช้วิธีการตรวจด้วยสายตา (Visual grading) ซึ่งต้องอาศัยทักษะความชำนาญและประสบการณ์สูง ทำให้ผู้ที่จัดชั้นยางเกิดความลังเลในการแยกชั้นยางในบางครั้ง หรือผู้ที่มีประสบการณ์ในการจัดชั้นยางไม่นานนักอาจคัดแยกชั้นยางผิดพลาดได้ สำหรับการผลิตยางแท่ง ซึ่งเป็นรูปแบบใหม่ของยางแท่งได้ปรับปรุงวิธีการจัดชั้นยาง โดยการตรวจสอบสมบัติที่จำเป็นของยางตามวิธีมาตรฐานสากล (Technically grading) ผู้ผลิตยางแท่งต้องปฏิบัติตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ตามองค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (International Organization for Standardization, ISO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมบัติยางแห้ง

1. ปริมาณสิ่งสกปรก (Dirt content) เป็นปริมาณสารที่ได้จากการกรองด้วยตัวกรองที่มีแผ่นตะแกรงกรอง ขนาดรูตะแกรง 325 เมช หรือ 44 ไมครอน ซึ่งสารที่ได้จากการกรองนั้นประกอบด้วยสารแปลกปลอมอื่นๆ เช่น เปลือกไม้ดินใบไม้ ปริมาณและชนิดของสิ่งแปลกปลอมมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปยาง เพราะถ้ามีปริมาณสิ่งสกปรกมากจะมีผลกระทบต่อกระบวนการแปรรูปและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2. ปริมาณเถ้า (Ash content) ในยางธรรมชาติ ประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์พวกคาร์บอเนต ออกไซด์และฟอสเฟตของโพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม โซเดียม และแร่ธาตุอื่นๆ นอกจากนี้เถ้าอาจเป็นพวกซิลิกา หรือซิลิเกตที่มีอยู่ในยางเองหรือปะปนมาจากข้างนอก ปริมาณเถ้าเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในยางดิบ และช่วยบ่งชี้ว่ามีการเติมสารตัวเติมลงไปช่วยเพิ่มน้ำหนักยางหรือไม่

3. ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen content) โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโปรตีน ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจึงเป็นตัวบ่งชี้ว่าในยางดิบมีโปรตีนอยู่มากน้อยเพียงใด

4. ปริมาณสิ่งระเหย (Volatile matter content) โดยส่วนใหญ่เป็นความชื้นที่มีอยู่ในยาง ถ้ามีปริมาณความชื้นสูงจะทำให้ยางเกิดราได้ง่าย มีกลิ่นเหม็น และเกิดปัญหาหว่านกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยทำให้ยางลื่นขัดผสมกับสารเคมีอื่นได้ยาก

5. ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity Retention Index, PRI) แสดงถึงความต้านทานของยางดิบต่อการแตกหักของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูง หรือ ต่อการออกซิเดชัน ยางที่มีดัชนีความอ่อนตัวสูงแสดงว่ามีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุลสูง

6. ความหนืด (Mooney viscosity) เป็นสมบัติที่ระบุคุณภาพด้านการนำยางไปใช้ยางที่มีความหนืดสูงจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งยางมีความแข็งมากเมื่อนำไปใช้ต้องใช้เวลานานในการบดยางให้ نرم หรือ ให้มีความหนืดลดลงเพื่อผสมสารเคมีเข้าไปในยางได้ง่ายขึ้น

7. สี (Color) เป็นสมบัติสำคัญของยางแห้งที่ผลิตจากน้ำยาง เมื่อเปรียบเทียบกับสีของตัวอย่างกับสีมาตรฐาน ต้องไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้เพื่อประโยชน์ในการนำยางไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส หรือ มีสีต่างๆ

2.2 สารเคมีสำหรับยาง

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ การใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางสามารถเร่งได้โดยการใช้ความร้อน ยางที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเชื่อมโยง เรียกว่า ยางดิบหรือยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเชื่อมโยงแล้ว เรียกว่า ยางคงรูปหรือยางเชื่อมโยง (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber)

2.2.1 สารเชื่อมโยง [10, 11]

สารทำใหยางคงรูป หรือสารเชื่อมโยง ที่นิยมใช้ ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) และสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) ระหว่างโมเลกุลยางเพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกิริยานี้เรียกว่า การทำใหยางสุก หรือวัลคาไนเซชัน

วัลคาไนเซชัน หรือการเชื่อมโยง เป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดอย่างหนึ่งของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่างๆ ของยางไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้าไม่ผ่านการทำให้ยางสุก เพราะยางไม่แข็งตัว ไม่คงรูป เหนียวติด (Sticky) ไม่สามารถรับแรงหรือทำให้เปลี่ยนรูปร่างได้ง่าย

สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents) ได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ส่วนสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activator) ผสมเข้ากับยาง แล้วให้อุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นรูปร่าง ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลยางแล้วเปลี่ยนโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติมีเสถียรภาพของรูปร่าง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อมโยงทำให้สมบัติเปลี่ยนไปกล่าวคือ

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีเซต (Set) หรือการเปลี่ยนขนาดถาวรเมื่อได้รับแรงลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติดน้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่ออุณหภูมิ แสง และการใช้งานนานขึ้น

2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization)

การเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ เริ่มมีใช้ตั้งแต่ต้น ค.ศ. 1950 เกิดการเชื่อมโยงโดยสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) วิธีการเชื่อมโยงนี้มีข้อเด่นเหนือการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันคือ

- สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้โดยเฉพาะยางอิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPM หรือ EPR) และยางซิลิโคน (Q)
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีการเปลี่ยนรูปถาวร หรือเซต (Permanent set) น้อยกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีสมบัติการยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า
- สามารถใช้เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือสีขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร ผลิตภัณฑ์ที่มีการเปลี่ยนสีเนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อี...

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bond) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อน และแรงกระทำมากกว่าเมื่อเทียบกับพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลฟิดิก และพอลิซัลฟิดิก (C-S bond และ S-S bond) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม วัฏจักรการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการคือ

- ในการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงปรารถนาของสารที่ปลดปล่อยออกมา เช่น อะซิโตนฟีโนน (Acetophenone) ในระหว่างการเชื่อมโยง และในผลิตภัณฑ์ยางยกเว้นเปอร์ออกไซด์บางชนิด เช่น Luperox®101
- เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้และเก็บรักษา สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ ในอย่างมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมี เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน (Oil) และสารแอนต้ออกซิแดนต์ (Antioxidants) ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจน ในการเชื่อมโยงยาง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cure) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydro peroxide) และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือยังเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) สลายตัวเนื่องจากความร้อนนั่นเอง
- ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) เกิดปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ เมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดเป็นอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) ที่เสถียร เกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้นไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR) มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้ได้ในการเชื่อมโยง เช่น ไดเอซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacylperoxide) และ เปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy esters) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่
 - ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP)
 - ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-t-butyl peroxide; DBP)
 - ไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(t-butyl-peroxy hexane)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) ซึ่งมีจำหน่ายทั้งในรูปผง ของแข็ง และของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90 - 99% เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงมีจำหน่ายในรูปของผสมกับสารตัวกลางเฉื่อยบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 40 - 50% และใช้ในการผสมพร้อมสารเพิ่มเนื้อ ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์

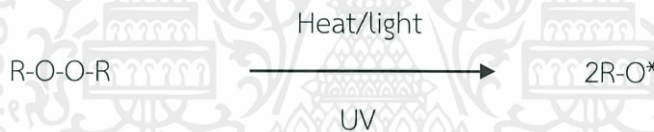
(DBP) นิยมน้อยกว่า เนื่องจากกลายเป็นไอง่ายขณะใช้งาน ส่วนไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน นิยมใช้เชื่อมโยงที่อุณหภูมิสูง 180°C เนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า และไม่มีกลิ่นเหม็นของสารอะซิโตน

ในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูงเกิน 40°C เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งความร้อน และไฟฟ้าสถิต เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายแต่ดับไฟยาก

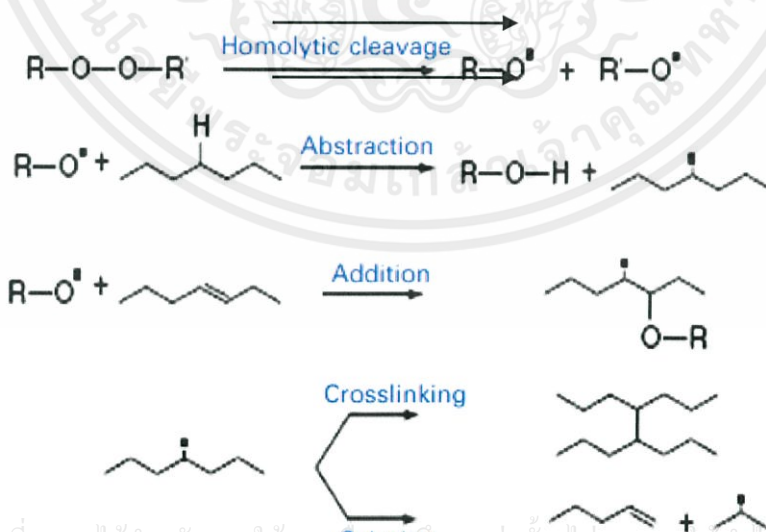
กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มต้นจากปฏิกิริยาโฮโมไลติกดีคอมโพสิชัน (Homolytic decomposition) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวเนื่องจากความร้อน แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระอัลคอกซี (Alkoxy radicals; RO[•]) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.3 ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงอย่างไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ (Polymer radicals) จากนั้นเกิดการรวมกันของอนุมูลอิสระที่อยู่ต่างสายโซ่ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์



ขั้นตอนที่ 2 การเกิดการเชื่อมโยง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 กลไกการเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [12]

นอกจากอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาง่าย เช่น ไฮโดรเจนชนิดอัลไลค (Allylic hydrogen) เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ เช่นเดียวกับในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่อิ่มตัวการรวมกันของอนุมูลอิสระที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

เนื่องจากเปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา การใส่สารเคมีบางชนิด เช่น สารหล่อลื่น หรือน้ำมันและสารแอนตี้ออกซิแดนต์ อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระในขณะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเป็นผลให้เกิด “ปรากฏการณ์เจือจางการเชื่อมโยง” (Dilute crosslink effect) ได้รับความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าความเป็นจริง นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการใส่สารเติมแต่งที่เป็นกรด เช่น สารตัวเติมซิลิกา (Silica) หรือ เขม่าดำ (Carbon black) ที่เป็นกรด เนื่องจากกรดสามารถเร่งให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระ (Nonradical-generating decomposition) ทำให้เกิดการสูญเสียของสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์เช่นเดียวกับสารเติมแต่งอื่น เช่น แอนตี้ออกซิแดนต์ อาจหยุดปฏิกิริยาหรือเปลี่ยนแปลงอนุมูลอิสระระหว่างเกิดปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ เป็นผลให้ไม่เกิดพันธะเชื่อมโยงหรือเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงน้อย

ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเปอร์ออกไซด์ในยาง จำนวนของหมู่ฟังก์ชัน และไฮโดรเจนของโครงสร้างยางที่สามารถถูกจับด้วยอนุมูลอิสระ ปกติการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ปริมาณไม่เกิน 2.5 phr ที่อุณหภูมิเชื่อมโยง 150-230°C การใช้อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาอัน้อยลงประมาณ 2.5 เท่าทุก 10°C ที่เพิ่มขึ้น แต่จะเสี่ยงกับการเสื่อมสภาพของยาง และต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้สารเชื่อมโยงปริมาณมาก จะทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงนานมากเกินไป (Over cure) ทำให้สมบัติบางประการลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เป็นต้น

2.2.1.2 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) [6]

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงในปริมาณที่เหมาะสม) และยางคงรูปที่ได้ก็มีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้วยเหตุผลนี้ ระบบคงรูปด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการคงรูปยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ยางไอโซพรีน (IR) ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางไนไตรล์บิวทาไดอีน (NBR) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันมีข้อจำกัดหลักคือ ไม่สามารถใช้ในการคงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล (เช่น ยางซิลิโคนหรือยางเอทิลีนโพรพิลีน (EPM)) ทั้งนี้เนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไปทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้นด้วยเหตุนี้ อัตราเร็วของการคงรูปด้วยกำมะถันจึงขึ้นอยู่กับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลยางกำมะถันที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. กำมะถัน ромบิก (Rhombic) เป็นกำมะถันชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่มีกำมะถันอยู่ 8 อะตอม (S_8) สามารถตกผลึกได้ (Crystalline) เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ได้ในระดับหนึ่ง บางครั้งจึงเรียกกำมะถันชนิดนี้ว่ากำมะถันละลายได้ (Soluble sulfur) ระดับความสามารถในการละลายของกำมะถันชนิดนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการบลูม (Bloom) ได้ตัวอย่างเช่น กำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในยางธรรมชาติได้ประมาณ 1 phr ที่อุณหภูมิห้องและประมาณ 5 phr ที่อุณหภูมิ 75°C หากเติมกำมะถันลง

ไปในยางธรรมชาติ 3 phr กำมะถันทั้งหมดจะละลายเข้าไปในยางในระหว่างกระบวนการผสม (เพราะยางจะมีอุณหภูมิสูงมากในระหว่างกระบวนการผสม) แต่เมื่อยางคอมพาวด์เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง กำมะถันส่วนที่ไม่ละลายได้อีก 2 phr จะเคลื่อนตัวมาที่บริเวณพื้นผิวอย่างช้าๆ และตกผลึกเกิดเป็นคราบสีเหลืองอ่อนอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของยางคอมพาวด์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “กำมะถันบลูม” การบลูม ดังกล่าวจะทำให้สมบัติความเหนียวติดกันของยางคอมพาวด์เสียไป ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทที่ต้องอาศัยการประกอบหลายชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ในกรณีนี้จำเป็นต้องแก้ไขด้วยการนำตัวทำละลายที่เหมาะสมไปเช็ดเพื่อกำจัดกำมะถันส่วนที่บลูมออกมานี้ทิ้ง

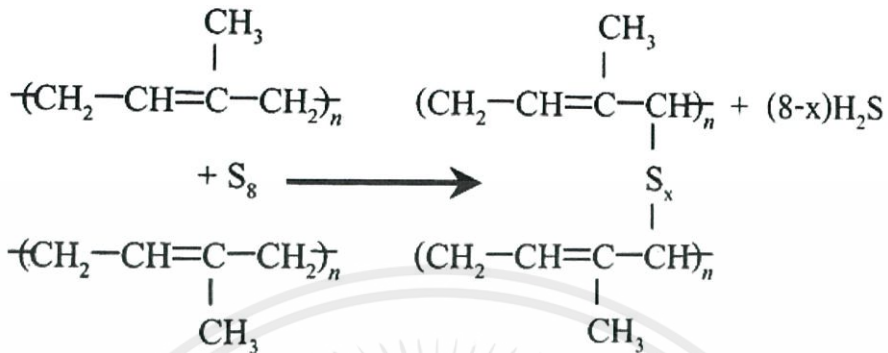
นอกจากนี้ การบลูมของกำมะถัน (Sulfur bloom) ยังพบได้ในยางคงรูปที่เกิดปฏิกิริยาการคงรูปไม่สมบูรณ์ หรือในยางคงรูปที่มีการใส่กำมะถันมากเกินไป ทำให้มีกำมะถันส่วนเกินที่ไม่เกิดปฏิกิริยาอยู่ค่อนข้างมาก แม้ว่าการบลูมของกำมะถันจะไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างคงรูป แต่การบลูมดังกล่าว ก่อให้เกิดผลเสียในแง่ของความสวยงามของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม วิศวกรตระหนักไว้ว่า การบลูมที่เกิดขึ้นในยางทั้งหมดไม่ใช่การบลูมของกำมะถัน เพราะสารเคมีอื่นๆ โดยเฉพาะสารเคมีในกลุ่มสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถทำให้เกิดการบลูมได้เช่นกัน

2. กำมะถันอสัณฐาน (Amorphous) กำมะถันอสัณฐานเกิดจากอะตอมของกำมะถันจำนวนมากมาเรียงต่อกัน จึงมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีคล้ายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (ประมาณ 100,000 - 300,000) เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้ไม่ละลายในยางและในตัวทำละลายส่วนใหญ่ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กำมะถันที่ไม่ละลาย (Insoluble sulfur) กำมะถันชนิดนี้นิยมใช้ในการป้องกันการบลูมของกำมะถันมาที่พื้นผิวของยางคอมพาวด์ ทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อรถยนต์ อย่างไรก็ตามถ้าอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการผลิตสูงเกิน 99 - 105°C กำมะถันอสัณฐานจะเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นกำมะถันรอมบิก ดังนั้นในการใช้กำมะถันอสัณฐานจึงต้องควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการผสมให้ดี เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกำมะถันอสัณฐานเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง ไม่เช่นนั้นปัญหาเรื่องการบลูมจะยังคงอยู่นอกจากนี้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างสามารถเร่งให้กำมะถันอสัณฐานเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีไปเป็นกำมะถันรอมบิกได้เร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นในการเตรียมยางสูตรเข้มข้น (Masterbatch) ของกำมะถันไม่ควรเติมสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างลงไป และในระหว่างการเก็บรักษาไม่ควรนำกำมะถันชนิดนี้ไปวางใกล้กับสารเคมีที่สามารถปล่อยเอมีนอิสระออกมาได้ เช่น ไตโทโอโดมอโฟลีน (Dithiodimorpholine, DTDM) หรือสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (Sulfenamide) เพราะไอระเหยของเอมีนและสารที่มีฤทธิ์เป็นด่างอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากสารเคมีเหล่านี้จะทำให้กำมะถันชนิดนี้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นกำมะถันรอมบิกได้อย่างรวดเร็วแม้ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงอย่างด้วยกำมะถัน

กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงอย่างด้วยกำมะถัน เมื่อไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



ยางก่อนการวัลคาไนซ์

ยางหลังการวัลคาไนซ์

รูปที่ 2.4 กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงอย่างด้วยกำมะถัน เมื่อไม่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง [6]

การที่กำมะถันเกิดปฏิกิริยาแล้วได้โครงสร้างเป็นวงหรือไซคลิก (Cyclic) และโครงสร้างห้อย (Dangling) เกิดการเชื่อมโยงด้านเดียว นับเป็นการเชื่อมโยงที่ไม่มีประสิทธิภาพ เพราะโครงสร้างที่เกิดไม่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง โครงสร้างเหล่านี้เป็นกำมะถันที่มากเกินไป (Excessive sulfur) ส่งผลให้ยางที่มีโครงสร้างเหล่านี้มากจะมีสมบัติบางประการต่ำ เช่นเดียวกับยางที่มีพันธะเชื่อมโยง Polysulfidic เช่น สมบัติเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน (Poor aging properties) เกิดการเปลี่ยนขนาดอย่างฉวาว (Set) มาก ฯลฯ

ปกติการเชื่อมโยงที่ต้องการเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลยางมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ยางคือ การมีพันธะเชื่อมโยง 1 พันธะในทุกๆ 200 หน่วยโครงสร้างมอนอเมอร์ของยาง (Monomer units) หรือยางมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (Molecular weight between vulcanization) หรือความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ซึ่งจะสัมพันธ์กับจำนวนพันธะเชื่อมโยงในหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ยางที่เกิดพันธะเชื่อมโยงมาก มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง จะมีองศาการเชื่อมโยงสูง และมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง (M_c) น้อย

การจำแนกประเภทการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

1. ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV)

ระบบการเชื่อมโยงนี้เป็นระบบที่ใช้ทั่วไป โดยใช้กำมะถันปริมาณมากและใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงปริมาณน้อย ส่งผลให้เกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอมหรือพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkage) เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมของกำมะถัน (S-S bond) เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง (พันธะ S-S มีพลังงานพันธะ 49 kcal/mol) สามารถถูกทำลายได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนหรือได้รับแรง อาจเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (Rearrange) และเปลี่ยนโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยง

(เช่น Polysulfidic linkages ถูกทำลายและเกิดการเชื่อมโยงใหม่แบบ Monosulfidic linkages) เป็นผลให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยพันธะ Polysulfidic จะมีสมบัติบางประการไม่ดี เช่น

- สมบัติเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน
- อาจเกิดการ “บวม” ของกำมะถัน
- เกิดการเปลี่ยนขนาดถาวร (Permanent set) เมื่อได้รับแรง
- ใช้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) นาน เพื่อให้ได้ปริมาณการเชื่อมโยงที่ต้องการ เนื่องจากใช้กำมะถันปริมาณมาก

2. ระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV)

การเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพคือ การเกิดพันธะเชื่อมโยงแบบกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือพันธะเชื่อมโยงโมโนซัลฟิดิก เนื่องจากใช้กำมะถันปริมาณน้อย ใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงปริมาณมาก หรือใช้สารเร่งชนิดให้กำมะถัน (Sulfur-donor accelerators) เช่น เทตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuramdisulfide, TMTD) ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบกำมะถันอะตอมเดี่ยวจำนวนมาก Yang ที่เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะชนิดนี้จะมีสมบัติที่ดี สมบัติไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะใช้งานเป็นเวลานาน (Good aging properties) มีการเปลี่ยนขนาดหรือรูปร่างถาวรต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ทั้งนี้เนื่องจากพันธะระหว่างกำมะถันกับคาร์บอน (S-C bond) ของการเชื่อมโยงแบบ Monosulfidic เป็นพันธะที่แข็งแรง มีความเสถียรสูง (พันธะ C-S มีพลังงานพันธะ 66 kcal/mol) ถูกทำลายยากกว่าพันธะระหว่างอะตอมของกำมะถันซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำกว่า อย่างไรก็ตามระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (EV) จะมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าเนื่องจากจะใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงซึ่งมีราคาแพงในปริมาณมากกว่า

3. ระบบการเชื่อมโยงแบบมีกึ่งมีประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization, Semi-EV)

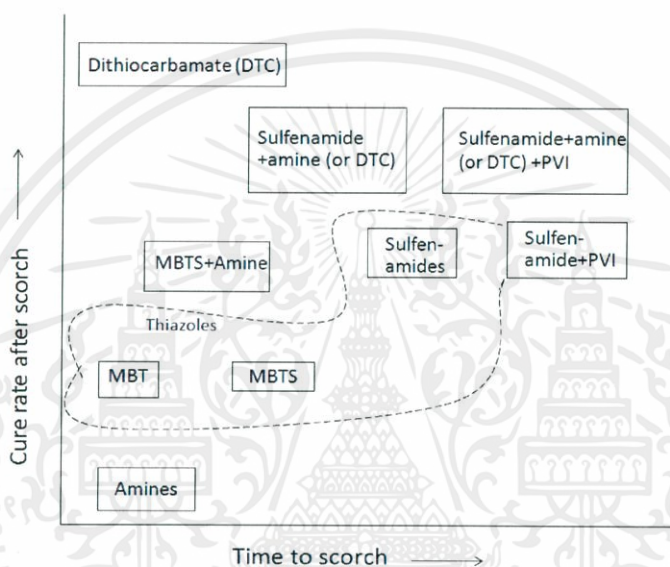
ระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอยู่ระหว่างทั้งสองระบบคือ CV และ EV ทำให้ได้ยางที่มีสมบัติหลังการเชื่อมโยงและต้นทุนการผลิตอยู่ระหว่างกลางของสองระบบแรก

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบปริมาณกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้ในระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน [6]

ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารเร่ง (phr)	ชนิดของพันธะเชื่อมโยง
แบบดั้งเดิมหรือซีวี (CV)	1.5-3.5	0.4-1.0	พอลิซัลฟิดิก
แบบกึ่งมีประสิทธิภาพหรือเซมิอีวี (Semi-EV)	0.5-1.5	1.0-2.5	พอลิซัลฟิดิกผสมกับโมโนซัลฟิดิก
แบบมีประสิทธิภาพหรืออีวี (EV)	0-0.5	2.5-6.0	โมโนซัลฟิดิก

ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยระบบการเชื่อมโยงกำมะถัน [6]

การใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงหลักคือ “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าเป็น “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators) หรือคิกเกอร์ (Kickers) สารเร่งปฏิกิริยา-เชื่อมโยงทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงแต่ละชนิดรวมกัน (เช่น $1+1 = 3$) ตัวอย่างของ Scorch time และ Cure rate ของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดต่างๆรวมทั้งการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงเวลาเริ่มเชื่อมโยงและอัตราเร็วการเชื่อมโยงเปรียบเทียบสารเร่งปฏิกิริยา-เชื่อมโยงชนิดต่างๆ และการใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงร่วมกัน (Combination) [6]

มาตรฐาน ASTM ได้แบ่งสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงเป็น 6 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)

กลุ่มที่ 2 ไทเอโซล (Thiazoles)

กลุ่มที่ 3 กัวนิดีน (Guanidines)

กลุ่มที่ 4 ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbates)

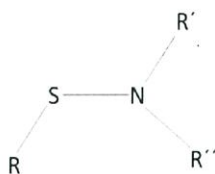
กลุ่มที่ 5 ไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)

กลุ่มที่ 6 ไทยูแรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ทั้งนี้ยังมีอีกสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกสองกลุ่มที่ไม่ได้รวมอยู่ด้วย เนื่องจากมีปริมาณการใช้ที่น้อยและมีความเป็นพิษ (Toxicity) ได้แก่ อัลดีไฮด์เอมีน (Aldehyde amines) และ ไทโอยูเรีย (Thioureas)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides) [13]

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดดีเลย์แอ็กชัน (Delayed action accelerators) หรือ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่เริ่มเกิดการเชื่อมโยงช้าเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ทำให้มีเวลาเพียงพอในการเชื่อมโยงนิยมใช้กับยางที่ต้องการใช้เวลาผสมหรือขึ้นรูปนาน เนื่องจากหมู่อัลคิล (R) ในโครงสร้างเป็นหมู่ใหญ่ (Bulky) ให้โปรตอน (H^+) ช่วยหน่วงให้จุดเริ่มการเชื่อมโยงช้า ให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ชนาน ซัลเฟนาไมด์ชนิดที่นิยม ได้แก่

- CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide)
- TBBS (N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide)

โดย TBBS ให้ Scorch time นานกว่า CBS ทำให้มีความปลอดภัยในการขึ้นรูปอย่างมากว่า ไม่เกิดการเชื่อมโยงก่อนเวลา นอกจากนี้ TBBS ยังให้ยางที่มีความแข็งแรงมากกว่า CBS อีกด้วย

2. ไทเอโซล (Thiazole)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มไทเอโซล (Thiazole) [14]

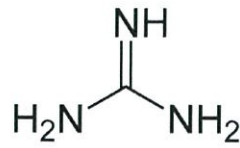
ทั้งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไทเอโซลเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากให้ Scorch time และ Cure time ที่หลากหลาย ไทเอโซลที่นิยม ได้แก่

- MBT (2-Mercaptobenzothiazole)
- MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide)

ทั้ง MBT และ MBTS เกิดปัญหา Scorchtime ก่อนการขึ้นรูปสมบูรณ์ จึงนิยมใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดอื่นหรือเป็นสารเร่งทุติยภูมิ เช่น DPG (Diphenylguanidine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กัวนิติน (Guanidines)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกลุ่มกัวนิติน (Guanidines) [15]

ปัจจุบันไม่นิยมใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงซ้ำ นิยมใช้เป็นสารเร่ง-ทุติยภูมิ ใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดอื่น กัวนิตินที่นิยมใช้ ได้แก่

- DPG (Diphenylguanidine)
- DOTG (Dio-o-tolylguanidine)

อาจใช้กัวนิตินเพียงอย่างเดียวในกรณีที่เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่หรือหนาที่อุณหภูมิไม่สูงเป็นเวลานาน เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ ปกตินิยมใช้สารเร่งกัวนิตินกับสารเร่งปฏิกิริยาจำพวกไทโอโซลและซัลเฟนาไมด์ อัตราส่วนที่นิยมใช้ ได้แก่ DPG 0.25 ส่วนต่อไทโอโซลหรือซัลเฟนาไมด์ 1 ส่วน เนื่องจากกัวนิตินไม่เสถียร อาจเกิดการเลอะสี (Stain) จึงไม่นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ยางสีธรรมชาติหรือสีขาว

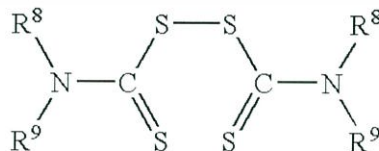
4. ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbates)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดนี้ถูกเรียกว่าเป็น สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดเร็วยิ่งยวด (Ultra-accelerators) เนื่องจากเป็นสารเร่งที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วให้ Scorch time สั้น ชนิดที่นิยม ได้แก่

- ZMDC (Zinc dimethyldithiocarbamate)
- ZDEC (Zinc diethyldithiocarbamate)

สารเร่งไดไทโอคาร์บาเมตเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่รวดเร็วมาก ไม่นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงแบบเดี่ยว ยกเว้นการผลิตที่อุณหภูมิต่ำ เช่น การเคลือบยางบนผ้าใบที่อุณหภูมิไม่สูง ปกตินิยมใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไทโอโซลหรือซัลเฟนาไมด์เพื่อปรับอัตราเร็วการเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดนี้มีเสถียรภาพสูง ไม่เลอะสี (Stian) และใช้ได้กับยางทุกชนิด

5. ไทยูแรม โมโนและไดซัลไฟด์ (Thiuram mono-and disulfides)



เอกสาร **รูปที่ 2.9** โครงสร้างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไทยูแรมโมโนและไดซัลไฟด์ (Thiuram mono and disulfides) [16] นี้เป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดนี้จัดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงยิ่งยวด เช่นเดียวกับไทโอคาร์บาเมต ชนิดที่นิยม ได้แก่

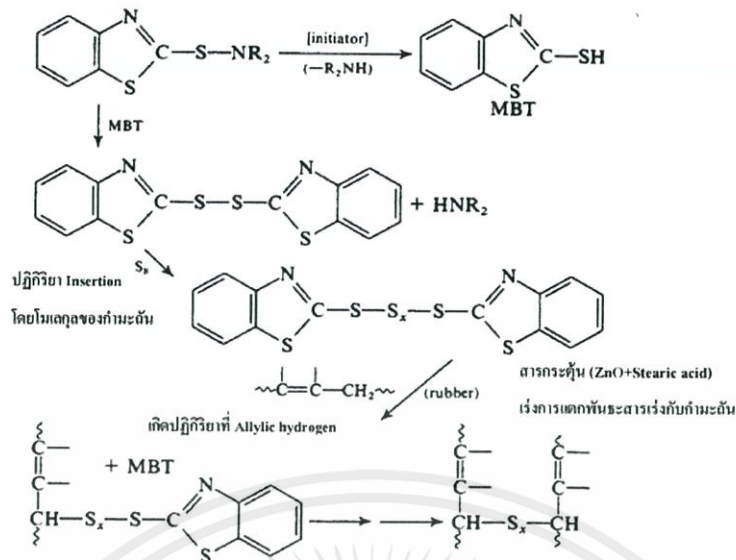
- TMTD (Tetramethylthiuramdisulfide)
- TETD (Tetrathylthiuramdisulfide)
- TMTM (Tetramethylthiurammonosulfide)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง TMTD ว่องไวต่อปฏิกิริยามากที่สุด รองลงมาคือ TETD และ TMTM ตามลำดับ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดนี้มีประโยชน์มาก กรณีทำการเชื่อมโยงโดยไม่ใช้กำมะถันหรือใช้ปริมาณน้อย (Low or no sulfur curing, sulfurless curing) เนื่องจากสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไทูแรมซัลไฟด์จัดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดที่ให้กำมะถัน (Sulfur-doner accelerators) กล่าวคือ สามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วให้อะตอมของกำมะถันเกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือโมโนซัลฟิดิก ได้ยังเชื่อมโยงที่มีสมบัติที่ดี โดยปกติแล้วนิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไทูแรมซัลไฟด์เป็นสารเร่งทุติยภูมิ ใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไทเอโซลหรือซัลเฟนาไมด์ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงชนิดนี้ไม่เลอะสี เช่นเดียวกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงไดไทโอคาร์บาเมต จึงสามารถใช้ได้กับยางสีอ่อนหรือสีขาวโดยไม่เปรอะเปื้อน

กลไกการเกิดพันธะเชื่อมโยงของกำมะถันแบบมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงและสารกระตุ้น [6]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถันร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (ใช้ตัวย่อว่า Ac=Accelerator) และสารกระตุ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 เริ่มแรกสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกัน (ได้ Ac-Ac) จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยาแทรกตัว (Insertion) ของส่วนของโมเลกุลกำมะถัน (Sulfurfragment S_x) (จากวงแหวนกำมะถัน S_8 แตกตัวไป S_x คงเหลือ S_{8-x} ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา) จากนั้นโมเลกุลสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงพร้อมส่วนของกำมะถัน (Ac- S_x -Ac) หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่มีกำมะถัน (Sulfur-modified Accelerator) จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลไลลิกไฮโดรเจน (Allylic hydrogens) ของสายโซ่โมเลกุลของยางซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เองที่สารกระตุ้นจะช่วยเร่งปฏิกิริยาโดยไอออนของซิงค์ (Zn^{2+}) จากซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งละลายในยางอันเกิดจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic acid) จะไปกระตุ้นการแตกออกของพันธะระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับกำมะถัน (Ac-S bond) ทำให้ได้สายโซ่ของยางที่มีกำมะถันพร้อมสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงติดที่ตำแหน่ง Allylic (Rubber- S_x -Ac) จากนั้นกลไกปฏิกิริยาเกิดซ้ำจากการแตกของพันธะระหว่างสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับกำมะถัน (Ac-S bond) ที่อีกข้างหนึ่ง เกิดปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลอื่นๆ ของยาง ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงด้วยกำมะถันในที่สุด ทั้งนี้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงเมื่อหลุดออกจะสามารถเกิดปฏิกิริยาใหม่กับกำมะถันต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 กลไกปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน แบบมีสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (แสดงตัวอย่างโดย MBT = 2-Mercaptobenzothiazole) [6]

2.2.2 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) [6,9]

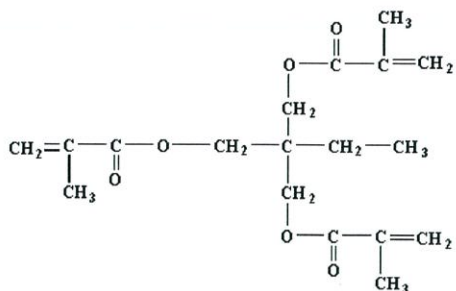
สารกระตุ้นการเชื่อมโยง คือสารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาควบรูป เพราะสารเคมีกลุ่มนี้จะเข้ากระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น

สารกระตุ้นการเชื่อมโยงที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบันได้แก่ “ซิงค์ออกไซด์” ร่วมกับ “กรดสเตียริก” เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงานสามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็น “ซิงค์สเตียเรต” ซึ่งสามารถละลายได้ในยางและช่วยเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ion) ในรูปที่ละลายได้ในยาง

ลักษณะที่สำคัญของสารกระตุ้นการเชื่อมโยงคือ ความเป็นด่าง (Alkaline) นอกจากการใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยงแล้ว อาจใช้ซิงค์ออกไซด์ของลิเทียม (Li₂O) แมกนีเซียม (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amines) ส่วนประกอบของสารกระตุ้นการเชื่อมโยงนอกจาก ZnO คือ กรดไขมัน (Fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12 - 18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก (เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต) กรดลอริก (เกิดเป็น Zinc laurate) นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงแล้ว กรดสเตียริกยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยาง ทำให้ความหนืดยางลดลง

2.2.3 สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) [10]

โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่รวมกัน มีความว่องไวสูงต่ออนุมูลอิสระ เป็นส่วนที่ช่วยทำให้การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น Co-agent ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มของเมเลอิมิด (Melimid) และอัลลิลิก การเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์นั้นอาจเกิดได้ไม่สมบูรณ์ จำเป็นต้องมี Co-agent เป็นสารที่ทำหน้าที่เพิ่มอัตราเร็วและเสริมประสิทธิภาพร่วมในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ ตัวอย่างโครงสร้างสารเสริมการเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent, SR 350) [17]

ประโยชน์เมื่อใช้สารเสริมการเชื่อมโยง

- สามารถใช้กับยางชนิดที่อิมตัวและไม่อิมตัว
- มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง
- การยุบตัวเนื่องจากแรงกดอัดต่ำ
- ความสามารถในการดึงตัวสูง
- ไม่เกิดการเลอะสี
- ยางที่ได้จะมีค่าความแข็งมอดุลัส และความแข็งแรงดึงสูงมาก

2.2.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม หมายถึง องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตหรือเพื่อลดต้นทุน เป็นต้น สารตัวเติมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกตามประสิทธิภาพของการเสริมแรงได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing fillers) เช่น เขม่าดำ ซิลิกา เป็นต้น และสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงหรือเรียกว่าสารตัวเติมเฉื่อย (Non reinforcing หรือ Inert fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ ทัลคัม เป็นต้น

สารตัวเติมมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง เพราะสมบัติของยางจะขึ้นกับปริมาณและชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิว โครงสร้างของสารตัวเติม และอันตรกิริยาของสารตัวเติมกับยาง

2.2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) [6, 11, 18]

สูตรทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนตคือ CaCO_3 มีสมบัติเฉพาะที่ไม่เป็นพิษ มีความขาว (Whiteness) และความสว่าง (Brightness) สูงจึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวเติม และตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี พลาสติก พีวีซี และยางแคลเซียมคาร์บอเนตมีความเสียดทานต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้ และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัด คือ มีความหนาแน่นสูง ไม่ทนกรด ไม่สามารถใช้ผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสกับกรด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ มักจับตัวเป็นก้อนจึงนิยมใช้สารช่วยกระจายตัว เช่น กรดสเตียริก เคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว นอกจากนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง หรือเสริมแรงเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ใช้ในยางแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทคือ

- Ground limestone
- Whiting หรือ Ground chalk
- Precipitated calcium carbonate หรือ Precipitated whiting
- Treated calcium carbonate หรือ Treated whiting

1. Ground limestone เป็นสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผงมีสีขาวหม่น ใช้ผสมในกรณีที่ต้องการให้ยางมีราคาถูก การใส่ปริมาณมากจะทำให้ความแข็งแรงของยางเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

2. Whiting หรือ Ground chalk เป็นผงสีขาวมีขนาดอนุภาคต่างๆ กันเฉลี่ยประมาณ 1000 – 10,000 Å ใช้กับการผลิตของราคาถูกทำให้ยางแข็งพอควรและการกระดอนค่อนข้างดีเมื่อใช้สารนี้ในปริมาณมาก แต่ให้ยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงและทนต่อแรงฉีกขาดต่ำ ใช้ในปริมาณปานกลางรูปผลิตภัณฑ์ที่ต้องการใช้เข้าพิมพ์และจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ประเภทท่อเรียบขึ้น

3. Precipitated calcium carbonate หรือ Precipitated Whiting ใช้เป็นสารช่วยเสริมความแข็งแรงได้บ้าง สามารถใช้ได้ปริมาณมากเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาถูกผลิตของที่ใช้กับงานเครื่องกล

4. Treated calcium carbonate หรือ Treated Whiting เป็นสารตัวเติมที่ได้จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาเคลือบด้วยกรดสเตียริกในปริมาณ 0.8 – 3% ทำให้สารตัวเติมนี้ผสมเข้าไปในยางได้ง่ายขึ้น และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอัดยางผ่านตาย และการรีดเรียบ (Calender) มีผิวเรียบเป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงได้บ้าง ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีราคาปานกลาง มีความกระดอนสูง มีความต้านทานต่อแรงดึงดี

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติ มาบด เช่น หินปูน (Limestone) ที่มีความขาวและความบริสุทธิ์สูง หินอ่อน (Marble) ที่เกิดจากหินปูนแปรสภาพด้วยความร้อนและความดันทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ชอล์ก (Chalk) ซึ่งเป็นหินปูนเนื้อร่วน ละเอียดและแร่แคลไซต์ (Calcite) เป็นต้น การลดขนาด (Size reduction) และการคัดขนาด (Classification) ถือเป็นขั้นตอนสำคัญของการแต่งแร่ในการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ตามที่ตลาดต้องการ ผลิตภัณฑ์แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ แบ่งประเภทได้ดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์แบบ Dry product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติโดยตรงมีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาด 1 - 147 ไมครอน

2. ผลิตภัณฑ์แบบ Coated product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลิตภัณฑ์แบบ Dry product ขนาดอนุภาค 1 - 15 ไมครอน มาเคลือบผิวอนุภาคเพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่นผิวอนุภาคเปียกได้ง่ายขึ้น อนุภาคแพร่กระจายดีขึ้น ดูดซึมน้ำมันลดลง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3. ผลิตภัณฑ์แบบ Calcium carbonate compound เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผสมกันอยู่ในรูปของแข็งระหว่างอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตบดจากธรรมชาติ ขนาด 20 - 45 ไมครอน ร้อยละ 75 - 80 กับเม็ดพลาสติกร้อยละ 20 - 25 ผลิตภัณฑ์มีลักษณะทรงกลมขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

4. ผลิตภัณฑ์แบบ Slurry product เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผลิตภัณฑ์แบบ Dry product ขนาดอนุภาค 1 - 20 ไมครอน เข้าสู่กระบวนการลอยแร่ (Flotation) เพื่อแยกมลทินต่างๆออกไป ได้แก่ซิลิกาและเหล็กออกไซด์ ทำให้สัดส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจึงนำไปบดแบบเปียกเพื่อประหยัดพลังงาน ซึ่งสามารถบดได้ละเอียดถึง 0.3 ไมครอนและได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบ Slurry นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ

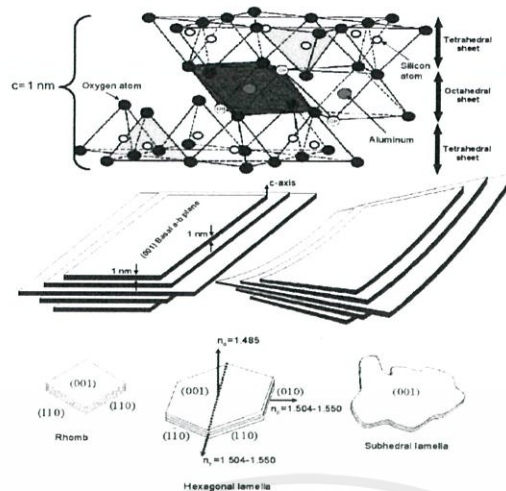
แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (Precipitated calcium carbonate) เป็นการนำแคลเซียมคาร์บอเนตบดจากธรรมชาติมาทำการตกผลึกใหม่ให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตบริสุทธิ์ที่มีคุณภาพสูง มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กขนาด 0.3-1ไมครอน เกิดจากการตกผลึกรูปร่างของผลึกอาจแตกต่างกันตามวิธีผลิต ผงแคลเซียมคาร์บอเนตมีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส เสถียรในอากาศและไม่ละลายน้ำ ซึ่งสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น กระบวนการโซลเวย์ (Solvay) รีคาร์บอเนชัน (Recarbonation) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ตัวอย่างการผลิตโดยกระบวนการรีคาร์บอเนชันซึ่งเป็นวิธีที่สำคัญและง่ายที่สุด สามารถแสดงได้ดังสมการ



กระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcinations) ของหินปูน (Limestone) ที่ประมาณ 900°C เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ให้ได้สารละลายสีขาวคล้ายน้ำนมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนที่สามเป็นปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน โดยการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บุดผ่านสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในถังปฏิกรณ์ที่เรียกว่า คาร์บอเนเตอร์ (Carbonator) การละลายแล้วตกตะกอนใหม่ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคขนาดเล็กช่วยเสริมแรง เมื่อใช้เป็นสารตัวเติมของพอลิเมอร์ แต่มีราคาแพง

2.2.4.2 ดินขาว (Clay) [19]

ดินขาว (Clay) เป็นสารเสริมแรงขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ประกอบไปด้วยชั้นซิลิเกต (Layered silicates) ซึ่งถูกใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับวัสดุนาโนคอมโพสิต จะมีลักษณะเป็นแบบ 2:1 ฟิโลซิลิเกต (Phyllosilicates) ดังรูปที่ 2.12 ผลึกจะประกอบด้วยโครงร่างผลึกสองชั้น ซึ่งส่วนกลางของชั้นออกทระฮีดรอลเป็นอลูมินา หรือแมกนีเซียม และมีชั้นของซิลิเกตเทหระฮีดรอล 2 ชั้นประกบอยู่ภายนอก โดยมีออกซิเจนไอออนของออกทระฮีดรอลเป็นตัวเชื่อมกับชั้นของเทหระฮีดรอล ชั้นเคลย์จะมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร และขนาดด้านข้างของชั้นเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงจาก 30 นาโนเมตร ถึงหลายไมโครเมตร และจะมากขึ้นตามลักษณะของชนิดซิลิเกต ชั้นของซิลิเกตเหล่านี้จัดเรียงเป็นกองซ้อนกัน โดยระหว่างชั้นของซิลิเกตจะถูกยึดด้วยแรงแรงแวนเดอร์วาล การแทนที่ของธาตุภายในชั้น เช่น Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+} หรือ Fe^{2+} หรือถูกแทนที่โดย Li^+ ทำให้เกิดประจุลบขึ้น ซึ่งจะถูกทำให้สมดุลประจุโดยธาตุประจุบวกของหมู่ 1 และ 2 แทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกต เนื่องจากแรงซึ่งทำให้ชั้นของซิลิเกตสามารถรวมตัวกันได้นั้นเป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นจึงสามารถแทรกโมเลกุลเล็กเข้าไประหว่างชั้นได้ง่าย เพื่อทำให้ไฮโดรฟิลิกไฟโลซิลิเกตมีความเป็นออสโมติกมากขึ้น โดยธาตุประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นดินขาว



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของชั้นซิลิเกตแบบ 2:1 ฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicates) [20]

ดินขาวมีกระบวนการผลิตหลายหลายวิธีและสามารถแบ่งออกได้หลายเกรด ดังนี้

1. ดินขาวชนิดลอยลม (Air floated kaolin)

ดินขาวที่ขุดได้จากเหมืองจะถูกบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดลูกกลิ้ง (Roller mill) โดยมีการเป่าลมขึ้นเพื่อแยกขนาดก้อนดินขนาดใหญ่และสิ่งสกปรกจะถูกตะแกรงแยกออก ส่วนอนุภาคดินขาวขนาดเล็กจะถูกเป่าให้ลอยตัวสูงในอากาศและแยกตัวตามขนาด ดินขาวชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด แต่มีปริมาณสิ่งเจือปน (Impurities) มาก สีไม่ขาว ขนาดเล็ก และพื้นที่ผิวสูง ดินขาวเกรดนี้จึงนิยมใช้กับอุตสาหกรรมยาง

2. ดินขาวชนิดล้างน้ำ

ดินขาวที่มีคุณภาพสูง มีความขาว และนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ ผลิตโดยการนำดินขาวที่ขุดมาผสมน้ำและสารช่วยกระจาย (Dispersing agent หรือ Dispersants) เช่น พอลิอะคริเลต (Polyacrylates) หรือโซเดียมเมทาฟอสเฟต (Sodium metaphosphates) ทำให้เกิดเป็นของเหลวข้น (Slurry) จากนั้นจะทำการกรองเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ เช่น ไมกา (Mica) หวาย และสิ่งเจือปนขนาดใหญ่ แล้วทำการแยกขนาดโดยใช้เทคนิคเซนติฟิว (Centrifugation) หมุนวนด้วยความเร็วสูงและแยกส่วนตามขนาด จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำให้ดินขาวมีความขาวและสว่างขึ้นโดยใช้สารฟอกสี (Bleaching agent) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกหรือสิ่งเจือปนโดยเฉพาะที่ผิวของอนุภาค อาจใช้เครื่องแยกแม่เหล็ก (Magnetic separators) เพื่อกำจัดโลหะ เช่น ไทเทเนียมหรือออกไซด์ของโลหะบางชนิดที่มีสี ต่อไปเป็นขั้นตอนกำจัดน้ำทำให้ดินขาวแห้งด้วยเตาอบชนิดต่างๆ เช่น Rotary vacuum filters, Rotary belt dryers หรือ Spray dryers ให้มีความชื้นไม่เกิน 1%

3. ดินขาวชนิดแคลไซน์ (Calcined kaolin)

โครงสร้างของดินขาวซึ่งมีโมเลกุลของน้ำอยู่ในโครงสร้าง (Hydrous kaolin) สามารถปรับปรุงได้โดยการให้ความร้อน เพื่อให้เกิดแคลไซน์ชัน (Calcinations) เพื่อให้ความร้อนที่ประมาณ 600°C จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน (Dehydroxylation) เกิดเป็นโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ที่เรียกว่า เมต้าเคาโอลิน (Meta kaolin) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 980°C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นดินขาวชนิดแคลไซน์ที่สมบูรณ์ ดินขาวชนิดแคลไซน์จะมีสมบัติเป็นฉนวนที่

ดีเยี่ยมเนื่องจากไม่มีโมเลกุลน้ำซึ่งนำไฟฟ้าในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังเพิ่มสมบัติทางแสง (Optical properties) ความต้านทานการเสียดทาน (Abrasion resistance) และเพิ่มความเฉื่อยให้กับพื้นผิว ดินขาวชนิดนี้นิยมใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับการผลิตวัสดุฉนวนไฟฟ้า เช่น สายไฟ และสายเคเบิลไฟฟ้า

4. ดินขาวชนิดดีลามิเนต (Delaminated kaolin)

เนื่องจากโครงสร้างผลึกของดินขาวมีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมซ้อนกัน แต่ละชั้นยึดติดกันด้วยแรงหุติยภูมิ เช่น พันธะไฮโดรเจนและแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ การให้แรงเฉือนสูงสามารถทำให้ชั้นหรือแผ่น (Platelets) ของดินขาวแยกออกจากกัน ได้เป็นแผ่นสารตัวเติมที่มีความยาวต่อความกว้างหรือ Aspect ratio สูง เป็นดินขาวที่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง เพิ่มมอดูลัสและสมบัติด้านการซึมผ่าน (Barrier properties)

5. ดินขาวชนิดปรับปรุงพื้นผิว (Surface treated kaolin)

ดินขาวทุกชนิดที่ได้กล่าวมาแล้วสามารถปรับปรุงพื้นผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเพื่อเพิ่มสมบัติการยึดติดเกาะกับพอลิเมอร์ เช่น เคลือบสารคู่ควบ (Coupling agents) จำนวนไซเลน (Silanes) ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เช่น อะมิโน (Amino) ไวนิล (Vinyl) เมอร์แคปโต (Mercapto) ฯลฯ ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อกันระหว่างยางและสารตัวเติม ดินขาวชนิดนี้จะมีการยึดเกาะที่ดีกับยาง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวยังช่วยทำให้ดินขาวเปลี่ยนสภาพจากความชอบน้ำหรือไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) กลายเป็นสารตัวเติมชนิดไม่ชอบน้ำหรือไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ซึ่งเข้ากับยางส่วนมากที่ไม่มีขั้วได้ดี

2.2.4.3 ซิลิกา (Silica) [6, 10]

ซิลิกา (Silica) คือ สารตัวเติมที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการเสริมแรงให้กับยาง แม้เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำ ซิลิกามีราคาแพงกว่า แต่เนื่องจากสีของซิลิกาเป็นสีขาวจึงสามารถใช้ในการผลิตยางที่มีสีสนที่น่านใจมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆที่ไม่ใช่เขม่าดำ ซิลิกาถือเป็นสารตัวเติมที่มีความสามารถในการเสริมแรงมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของความสามารถในการทนต่อการขีดถูและความต้านทานต่อการฉีกขาด อีกทั้งซิลิกายังมีความสามารถในการช่วยลดความร้อน (Heat built-up) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน โดยที่ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาจะขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของซิลิกา โดยทั่วไปซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางจะมีลักษณะโครงสร้างแบบออสัญฐาน

ซิลิกาจะประกอบด้วย ซิลิกอนและออกซิเจน จัดตัวอยู่ในรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) มีขนาดอนุภาคประมาณ 1 - 30 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 20 - 300 ตารางเมตรต่อกรัม โดยที่พื้นที่ผิวของซิลิกามีหมู่ซิลานอล (Silanols) ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อโมเลกุลน้ำที่มาเกาะบนพื้นผิวแล้ว ความเป็นกรดของซิลิกายังถูกกำหนดโดยหมู่ไฮดรอกซี (Hydroxy) ที่อยู่บนพื้นผิวอีกด้วย

ซิลิกาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ซิลิกาบด (Ground mineral silica) มีขนาดของอนุภาคหยาบไม่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้ยางมีราคาถูกใช้เป็นสารตัวเติมราคาถูกในยางทนความร้อนสารตัวเติมชนิดนี้ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเวลาการวัลคาไนซ์และจะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ไปรุ่งแสง

- ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ในรูปผลึกควอร์ตไซต์ (Quartzite) ซึ่งเป็นสินแร่ที่พบเป็นอันดับสอง ได้จากการขุดจากเหมืองแล้วทำการบดล้างและแยกขนาด (ด้วยตะแกรงร่อนหรือลมเป่า) ซิลิกาชนิดนี้มีสิ่งเจือปนสูงมีพื้นผิวที่แตกหักขรุขระและมีของแผลมคม ทำให้มีสมบัติความเสียดทานสูง

- ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) บางครั้งอาจเรียกว่าคริสเตอร์ไลน์ควอร์ตซ์ (Cystalline quartz) หรือซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) สามารถผลิตได้ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับซิลิกาชนิดผลึก แต่จะได้อนุภาคที่มีพื้นผิวเรียบ มีขอบอนุภาคมนกลม ซิลิกาชนิดนี้บดง่ายสามารถใช้ผลิตซิลิกาขนาดเล็กมาก (Untrafine silica)

- ซิลิกาไดอะตอมเมเชียส (Diatomaceous silica) ผลิตจากไดอะโตไมต์ (Diatomite) ซึ่งเป็นหินอ่อนคล้ายขอร์คที่เกิดจากซากกระดูกฟอสซิลเรียกว่า ไดอะตอม (Diatom) สามารถผลิตได้จากการบดหินและแยกขนาดด้วยลมหมุน (Cyclone)

2. ซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากการตกตะกอน (Precipitated silica) ซิลิกาชนิดนี้เป็นสารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางที่นิยมใช้มากที่สุด ทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงต่อการฉีกขาด และต่อการสึกหรอ และทำให้ยางแข็งขึ้น ปกติมักใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาซติกที่ต้องการลักษณะโปร่งแสงและมีสีสวย

3. ซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากการเผาไหม้ (Furnace หรือ combustion หรือ fume silica) ซิลิกาประเภทนี้มีฤทธิ์เป็นกรดและมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เสริมความแข็งแรงได้ดีมากทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงต่อการฉีกขาดและต่อการสึกหรอ ซิลิกาประเภทนี้มีราคาแพงมากมักจะใช้เพิ่มวัสดุประสงค์พิเศษกับยางซิลิโคนเท่านั้น

ตัวอย่างชนิดสารตัวเติมในกลุ่มซิลิกา ได้แก่ Sipernat® 820A ชื่อทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นอนุภาคของอลูมิเนียมซิลิเกต ประกอบด้วย 9.5% อลูมิเนียม จาก Al_2O_3 และ 8% โซเดียม จาก Na_2O มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมันปานกลางและมีความขาวสูง ในอุตสาหกรรมเคมีทั่วไปใช้ปรับปรุงความสามารถในการไหล แนะนำให้ใช้ทดแทนเม็ดสีสีขาวใน Emulsion paint และใช้เป็นสารตัวเติมในหมึกพิมพ์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวเติมพิเศษสำหรับงานกราฟิก เพื่อกระดาษที่เรียบ ขาวสว่างเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต

2.2.4.4 ทัลคัม (Talcum) [6]

แป้งทัลคัม หรือที่รู้จักในนาม “แป้งทอล์ค” (Talc) มีโครงสร้างเคมีคือ “ไฮเดรต-แมกนีเซียมซิลิเกต” (Hydrated magnesium silicate, $Mg_3[Si_4O_{10}(OH)_2]$) เป็นสารตัวเติมเฉื่อยสีขาวถึงสีเขียวยาง มักใช้เป็นสารป้องกันการติด (Antitack agent) ของก้อนยางไม่ให้ติดกับวัสดุอื่นหรือติดกันเองในระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวเติมแบบเสริมแรงในพลาสติกเป็นสินแร่ที่ไม่แข็ง (Soft mineral) เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ คล้ายดินขาว แต่มีแรงยึดระหว่างชั้นต่ำ จึงเกิดการหลุดออกของชั้น (Delamination) ได้ง่ายเมื่อได้รับแรง ทำให้มีสมบัติหล่อลื่นและไม่แข็ง อนุภาคมีความยาวต่อความกว้าง สูงประมาณ 5 - 20 มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง มีอนุภาคประมาณ 5 - 8 ไมครอน เมื่อเทียบกับสารตัวเติมอนินทรีย์ตัวเติมชนิดอื่น ทัลคัมมีพื้นผิวที่มีความไม่ชอบน้ำหรือสมบัติไฮโดรโฟบิกสูงสุด เนื่องจากความสมดุลของโครงสร้างที่มีขั้วและความเป็นกลางของประจุในชั้นโครงสร้าง ซึ่งสมบัตินี้เป็นข้อดีเมื่อใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว

ต่างๆ เมื่อผสมในยางจะช่วยลดต้นทุนการผลิต เพิ่มสมบัติการเป็นฉนวน (Insulating properties), ลดสมบัติการซึมผ่าน (Permeability) ของอากาศและของเหลว เพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง

ตัวอย่างชนิดสารตัวเติมในกลุ่มทลคัม ได้แก่

- Mistron[®] CB (Imerys talc) ทลคัมที่มีความบริสุทธิ์สูงที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮโดรเจนไซไดรอกไซด์ทั้งระบบซัลเฟอร์และเปอร์ออกไซด์ ช่วยปรับปรุงมอดูลัส และการยุบตัวถาวร (Compression set) ซึ่ง Mistron[®] CB ประกอบด้วย Microcrystallinity และ อนุภาคของ Mistron[®] Vapor R กับ Silane coupling ที่ทำให้ค่ามอดูลัสสูงสุดและลด Compression set ส่งผลให้ความหนืดลดลง เพิ่ม Extrusion rate และปริมาณ นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงการไหลของยางที่ยังไม่เชื่อมโยง โครงสร้างที่เป็นแผ่นของ Mistron[®] CB ทำให้มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของอากาศและน้ำ (Barrier properties)

- Mistron[®] Vapor R เป็นแผ่น มีความบริสุทธิ์สูง ใช้กับยางเทอร์โมเซต, งานเคลือบ (Coating) และ สารยึดติด (Adhesive) ช่วยให้การเสริมแรงมีความสมบูรณ์ ถ้าหากมีการไหลของคอมพาวด์ต่ำ ปรับปรุงอัตราการไหลและปริมาณการดันผ่านเกลียวอัด (Extrusion) ช่วยลดการบวมตัวของหัวตาย นอกจากนี้ยังปรับปรุงการต้านทานการบวมตัว รวมถึงการบ่มยางในระยะเวลาสั้น (Aging property) โครงสร้างที่เป็นแผ่นที่มีความชอบน้ำ ทำให้มีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของอากาศและน้ำ และต้านทานการกัดกร่อน

2.2.5 สารช่วยกระบวนการผลิต [21]

สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือความเป็นเนื้อเดียว (Homogeneity) ทำให้อัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติจะใช้สารช่วยกระบวนการผลิตในปริมาณน้อยไม่เกิน 5 phr

2.2.5.1 เพปไทเซอร์ (Peptizers)

เพปไทเซอร์ (Peptizers) ทำหน้าที่ในการช่วยเร่งการลดขนาดของสายโซ่ (Chain scission) ของยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใส่เพื่อลดเวลาการบดย่อย โดยเฉพาะยางดิบที่แข็งเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณเพปไทเซอร์ที่ใช้ประมาณ 1 - 3 phr ตัวอย่างของเพปไทเซอร์ ได้แก่ กรดซัลโฟนิค (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรโรไทโอฟินอล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

2.2.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agent) [11]

ช่วงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง เกิดการเสื่อมสภาพขึ้นเรื่อยๆ การเสื่อมสภาพของยางเกิดเนื่องจากโมเลกุลของยางถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยออกซิเจน และหรือโอโซน การเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่ในธรรมชาติมีแสงแดด ความร้อน และความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตช่วงที่มีการอบยาง ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจเกิดการ

เปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็ง และสูญเสียความแข็งซึ่งกระบวนการเสื่อมสภาพของยาง สามารถแบ่งออกเป็น 6 แบบ ได้แก่

- เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน (Self aging)
- เสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของโลหะเป็นตัวเร่ง
- เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat aging)
- เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light aging)
- เสื่อมสภาพเนื่องจากการพับไปมา (Flex aging)
- เสื่อมสภาพเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric aging)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้นไปจากเดิม จำเป็นต้องมีสารป้องกันการเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนต์ (Antioxidant) หรือสารแอนตี้โอโซนแนนต์ซึ่งสารทั้งสองชนิดทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางนานขึ้น

สารแอนติออกซิแดนต์

สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนติออกซิแดนต์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. สารแอนติออกซิแดนต์ชนิดตกสี (Stain antioxidant) สารแอนติออกซิแดนต์ชนิดตกสีเป็นสารประกอบเอมีน หรืออนุพันธ์ของเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำหรือตกสี นิยมใช้ยางที่มีสีดำ สารแอนติออกซิแดนต์ชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

- Ketone - amine condensate
- Aldehyde - amine condensate
- Secondary aromatic amine

2. สารแอนติออกซิแดนต์ชนิดไม่ตกสี (Non-staining antioxidant) สารแอนติออกซิแดนต์ชนิดไม่ตกสีเป็นสารแอนติออกซิแดนต์ที่เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางทั่วไปที่ไม่มีสีดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีตก และไม่เปลี่ยนสียาง สารแอนติออกซิแดนต์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

- Substituted phenol สมบัติการเป็นแอนติออกซิแดนต์ไม่ดี
- Phenolic-aldehyde มีความทนทานต่อความร้อนปานกลาง
- Phenol-aldehyde condensate เป็นสารที่มีสมบัติเท่ากับชนิดเอมีน คือ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทนทานต่อความร้อน ทนทานต่อการหักงอ และไม่เปลี่ยนสียาง
- Hydroquinone derivative เป็นสารแอนติออกซิแดนต์ที่อ่อนสำหรับยางที่คงรูปแล้ว เหมาะจะใช้กับยางที่ไม่คงรูปและขาว โดยการป้องกันไม่ให้ผิวยางที่คงรูปแห้งจนติดกันไม่ได้ เมื่อนำไปประกอบกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.2.7 สารให้สี [9]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ก็ตาม การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางบริษัท ยางอุตสาหกรรม จำกัด ถือว่าผิดกฎหมาย

สารให้สี คือ สาร หรือผงสี ทำให้เกิดสีต่างๆ เพื่อความสวยงามจึงจำเป็นต้องมีการใส่สารที่ทำให้เกิดสีลงไปในยาง ผลิตภัณฑ์ยางประเภทสีต่างๆ ควรจะใส่สาร Non-staining antioxidant สีที่ใส่ลงไปในยางควรจะมีลักษณะดังนี้

1. เป็นสีที่มีประสิทธิภาพ
2. ทนทานต่อแสง
3. ทนทานต่อความร้อน
4. ไม่ตกสี
5. ไม่เป็นพิษ
6. มีราคาถูก
7. ไม่มีผลต่ออายุของยางและอัตราความเร็วในการทำให้ยางคงรูป

สารที่ทำให้เกิดสีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

1. **สีอินทรีย์** เป็นสีที่มีคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วม เช่น ธาตุไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), กำมะถัน (S), คลอรีน (Cl) และ โบรมีน (Br) เป็นต้น สีอินทรีย์ทุกชนิดจะต้องมีธาตุคาร์บอนอยู่ด้วยเสมอ กล่าวได้ว่า สีอินทรีย์คือ สารประกอบของคาร์บอน อาจเกิดอยู่ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์จากสารอินทรีย์ด้วยกัน เป็นสีค่อนข้างมีประสิทธิภาพดี คือ ใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยประมาณ 1 phr จะให้สีที่เห็นชัดสีสดสวยแต่มีราคาแพง สีอินทรีย์บางตัวจะเปลี่ยนสีหรือสีจางลงได้ง่ายถ้าถูกแสงนานๆ หรือถูกสารเคมีและสีไม่ทนทานต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง สีอินทรีย์นี้เมื่อนำไปใช้อาจจะใช้ในรูปของผงหรือในรูปของส่วนผสมของยางกับสารเคมี (Masterbatch)

2. **สีอนินทรีย์** เป็นสีที่มีสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ สีอนินทรีย์ประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ จำนวนมากเช่น กำมะถัน (S), ออกซิเจน (O), คลอรีน (Cl), โซเดียม (Na), แมกนีเซียม (Mg), อะลูมิเนียม (Al) และ คาร์บอน (C) เป็นต้น เป็นสีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าพวกสีอินทรีย์ราคาค่อนข้างถูก แต่ต้องการปริมาณมากประมาณ 5 - 10 phr สีค่อนข้างทึบไม่ใสแต่มีความคงตัวอยู่นานสีไม่จางและยังทนได้ที่อุณหภูมิสูงๆ ตัวอย่างของสีอนินทรีย์ ได้แก่

2.1) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) เป็นสารที่ให้สีขาวผลิตได้จากการสกัดจากแร่ในธรรมชาติแล้วทำให้ตกตะกอนอยู่ในรูปผงมี 2 แบบคือ

- Rutile ให้สีขาวดีที่สุดและสีมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง
- Anatase ให้สีขาวออกน้ำเงิน

2.2) ลิโทโปน (Lithopone) มีประสิทธิภาพอ่อนกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ต้องใช้ในปริมาณมากประมาณ 25 - 40 phr เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสีขาว

2.3) เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) ส่วนใหญ่เป็น Ferric oxide ทำให้เกิดสีตั้งแต่สีแดงแก่จนกระทั่งสีส้มและสีเหลืองมีราคาค่อนข้างถูก

2.4) Ultramarine blue เป็นสารสีน้ำเงินที่ใช้กันทั่วไปเป็นสารที่มีความทนทานต่อความร้อน แสง ดินฟ้าอากาศ แต่ไวในการทำปฏิกิริยากับกรดต้องใช้ในปริมาณมาก ถ้านำผลิตภัณฑ์ที่ใช้สีชนิดนี้ไปผ่านไอน้ำสีจะจางลง

2.5) โครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide) สีชนิดนี้ให้สีเขียวค่อนข้างทึบและมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ความคงตัวที่อุณหภูมิสูง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8 น้ำมันช่วยผสม (Processing oil) [22]

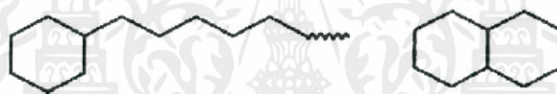
น้ำมันช่วยผสมจะช่วยปรับความหนืดยางให้ลดลงทำให้ยางไหลง่ายขึ้น ประหยัดพลังงานในการผลิตเพิ่มสมบัติความเหนียวติดของยางคอมพาวด์ สามารถเติมสารเติมแต่งได้มากขึ้น และกระจายตัวดีขึ้นลดค่า Tg และการยึดตัวดีขึ้น น้ำมันจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ อะโรมาติก (Aromatic) แนฟทานิก (Naphthenic) และพาราฟิน (Paraffinic) ซึ่งจะมียอดประกอบและสมบัติแตกต่างกันดังนี้

1. น้ำมันพาราฟิน (Paraffinicoil) สัดส่วนไฮโดรคาร์บอนของน้ำมัน Paraffinic มีมากกว่า 55 % ทำให้ทนทานต่อมลภาวะ ทนต่อความร้อน และสีมีความเสถียร แสดงดังรูปที่ 2.13



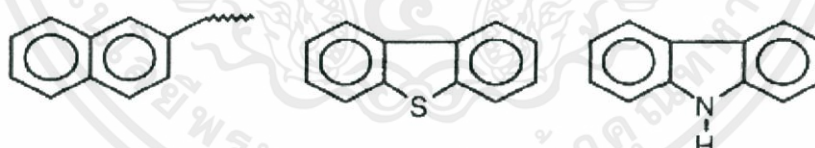
รูปที่ 2.13 โครงสร้าง Paraffinic oil

2. น้ำมันแนฟทานิก (Naphthenic oil) เป็นน้ำมันที่มีการเปลี่ยนสีซึ่งเกิดจากรังสียูวีและความร้อนน้อยและมียอดประกอบส่วนใหญ่เป็นวงแหวนแนฟทานิกอิ่มตัว แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 อนุพันธ์ของ Cyclohexane หรือ decalin [22]

3. น้ำมันอะโรมาติก (Aromaticoil) เป็นน้ำมันที่มีส่วนผสมที่ไม่อิ่มตัวหรือมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกอยู่มาก แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 อนุพันธ์ของ Naphthalene, Dibenzothiophene, Carbazole ตามลำดับ [22]

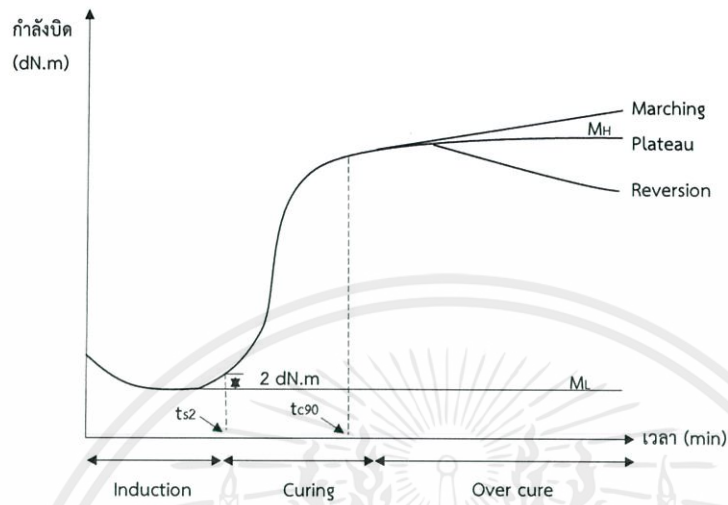
2.3 การทดสอบยาง

2.3.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeters) [6, 23-25]

การทดสอบสมบัติการเชื่อมโยงยาง สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยงของยาง (Curemeters of rubber compounds) 2 ชนิด คือ

1. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometer, ODR) เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จึงเป็นเครื่องมือทดสอบการเชื่อมโยงที่เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้ในการหาสถานะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานของเครื่อง ODR คือ การตรวจวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลง

รูปร่างของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงบิด (Torque) ของจานวงกลมรูปโคน (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ในตัวอย่างยาง ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ โดยผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่า กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงการเชื่อมโยง (Cure curve) [6]

เมื่อ

M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

M_{90} = ค่าแรงบิดที่ 90% ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9(M_{HF} - M_L) \quad (2.4)$$

t_{s2} = เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช(Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้เชื่อมโยงจนแรงบิดเพิ่ม 2 หน่วยแรงบิด (kgf.cm) เทียบกับค่าแรงต่ำสุด

t_{c90} = เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90% (Optimum cure time)

$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100/(t_{c90} - t_{s2}) \quad (2.5)$$

จากกราฟจะเห็นว่าลักษณะการคงรูปของยางสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ คือ

- 1). ช่วงเริ่มต้น (Induction) เมื่อตัวอย่างยางได้รับความร้อน ยางจะอ่อนตัวลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรกๆ ของการทดสอบ จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสมดุล ความหนืดของยางจะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่ ณ จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มการคงรูป ค่าความหนืดต่ำสุดนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป ใช้สัญลักษณ์ M_L

2). ช่วงการคงรูป (Curing) หลังจากที่ยางมีค่าความหนืดต่ำสุด ความหนืดของยางจะเริ่มสูงขึ้นเนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเริ่มเกิดความคงรูป (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มคงรูปเรียกว่า ระยะเวลาสกอร์ชและใช้สัญลักษณ์เป็น t_{s2}

- เนื่องจากระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ ดังนั้น ระยะเวลาสกอร์ชจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต
- เมื่อการทดสอบดำเนินไป ค่าแรงบิดจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับการคงรูปจนกระทั่งถึงจุดที่การคงรูป (Crosslink) เกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า M_H ซึ่งค่าแรงบิดสูงสุดนี้จะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงหรือค่ามอดุลัสเฉือนของยางคงรูป ณ อุณหภูมิของการทดสอบ
- ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่บ่งชี้ลักษณะของการคงรูป คือ ระยะเวลาของการคงรูป (Curing time) ส่วนใหญ่นิยมใช้ t_{c90} ซึ่งหมายถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูปไปร้อยละ 90 ซึ่งเวลา t_{c90} นี้เป็นเวลาคงสภาพที่เหมาะสม (Optimize curing time)

3). ช่วงของการคงสภาพที่มากเกินไป (Over cure) เมื่อปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์แล้วแต่ยังดำเนินการทดสอบต่อไป หากแรงบิดยังคงที่เรียกว่าเกิด Plateau แต่หากแรงบิดยังเพิ่มขึ้นอีก จะเรียกว่าเกิดการ Marching และหากแรงบิดลดลงหรือเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนจะเรียกว่าเกิด Reversion

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (Rotorless curemeters) บางครั้งอาจเรียกว่า Moving die rheometer, MDR เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็วเนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้สามารถทดสอบการเชื่อมโยงได้เร็วกว่า นอกจากนั้นเครื่องชนิดนี้ ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน



รูปที่ 2.17 เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (MDR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

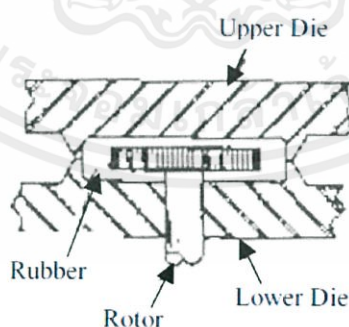
2.3.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) [6, 26]

เครื่องวัดความหนืดมูนนี่เป็นเครื่องมือทดสอบสมบัติการไหล หรือความหนืดของยาง ทั้งยางดิบและยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ผสมสารเติมแต่งแล้ว สามารถใช้ประโยชน์จากการทดสอบในหลายลักษณะ คือ หาค่าความหนืดมูนนี่ เพื่อทดสอบมาตรฐานของยาง หรือเพื่อควบคุมคุณภาพ เครื่องมือประกอบด้วยมอเตอร์สำหรับขับจานหมุน (Rotor) หมุนอยู่ในห้องใส่ยาง (Die cavity) ด้วยความเร็ว 2 ± 0.02 รอบต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิและความดันตามที่กำหนด การหมุนของจานโลหะที่มียางหุ้มอยู่จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้น เครื่องจะมีระบบวัดแรงบิดนี้และเปลี่ยนให้เป็นหน่วยความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) โดยกำหนดให้แรงบิด 8.30 ± 0.02 นิวตันเมตร (Nm) มีค่าเท่ากับความหนืดมูนนี่ 100 ± 0.5 หน่วยมูนนี่

จานหมุนจะมีลักษณะผิวเป็นร่อง เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสและแรงเสียดทาน เป็นการป้องกันการเลื่อนไถลระหว่างจานโลหะกับยางตัวอย่าง การหาค่าความหนืดมูนนี่ใช้จานหมุน 2 ขนาด คือ

1. จานหมุนขนาดใหญ่ (Large rotor, L) ใช้สำหรับการทดสอบยางทั่วไป
2. จานหมุนขนาดเล็ก (Small rotor, S) ใช้ทดสอบยางที่มีความแข็งมาก

ยางที่ทำการทดสอบความหนืดมูนนี่สามารถเตรียมชิ้นงานได้จากการรีดด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งเป็นแผ่นหนาประมาณ 1 เซนติเมตร วางชิ้นงานทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที แล้วตัดชิ้นงานทดสอบเป็น 2 แผ่น ให้มีขนาดใหญ่กว่าจานหมุน (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4.5 – 5.0 เซนติเมตร) นำชิ้นงานทดสอบวางประกบด้านบนและด้านล่างของจานหมุน แล้วใช้แผ่นพลาสติกบางรองเพื่อป้องกันไม่ให้ยางติดผนังห้องทดลอง ยางภายในห้องทดลองจะได้รับความร้อนช่วงแรกตามเวลาที่กำหนด (Preheat time) ใช้เวลา 1 นาที ก่อนเริ่มเดินเครื่อง ค่าความหนืดมูนนี่เมื่อเวลาผ่านไปตามเวลาที่กำหนด นิยมอ่านค่าเมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที หรือ 8 นาที ขึ้นกับชนิดของยาง



รูปที่ 2.18 จานหมุนโลหะในเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ [27]

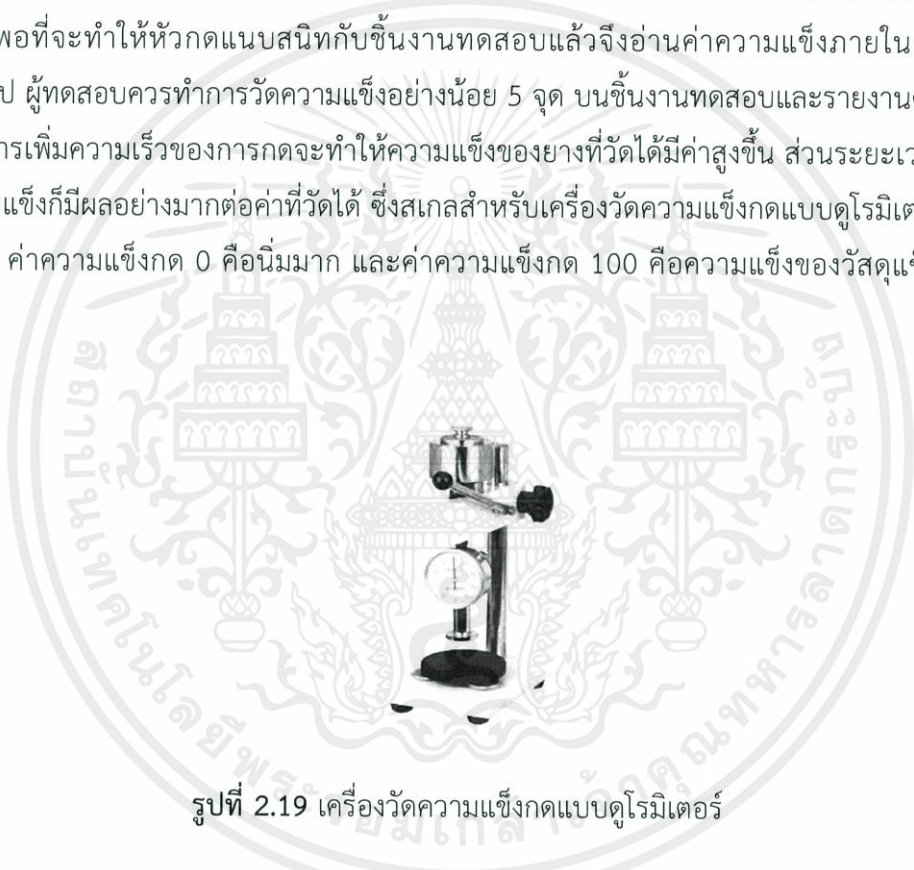
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2.3.3 เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) [9, 25]

ความแข็งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของยางซึ่งมักจะใช้ร่วมกับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ในการกำหนดคุณภาพของยาง ความแข็งเป็นการวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างเฉพาะที่พื้นผิวเท่านั้น หลักการพื้นฐานของการวัดความแข็งคือ นำหัวกดไปกดลงบนชิ้นงานทดสอบภายใต้

สภาวะที่กำหนด ความลึกของการทะลุทะลวงของหัวกด จะสะท้อนถึงค่าความแข็งของยางเพราะยางที่มีความแข็งสูง จะมีความลึกของการทะลุทะลวงต่ำ

เครื่องมือที่นิยมใช้วัดความแข็งกดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมี 2 แบบ คือ คือ ดูโรมิเตอร์ (Durometer) เช่น ดูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์เอ (Type A or Shore durometer) ซึ่งใช้สำหรับพอลิเมอร์อ่อนนิ่ม เช่น ยางที่มีความแข็งไม่เกิน 90 ถ้าวัสดุมีความแข็งกดเกิน 90 จะใช้ดูโรมิเตอร์ชนิด D หรือชอร์ D (Type D or Shore D durometer) ซึ่งรูปร่างของหัวกดจะแตกต่างกันไป ตามมาตรฐาน JIS K 6253 ได้กำหนดไว้ว่า ชิ้นงานทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร และชิ้นงานทดสอบควรมีขนาดทางด้านข้างที่สูงเพียงพอที่ทำให้ผู้ทดสอบสามารถวัดความแข็งของยางในบริเวณที่ห่างจากขอบอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร การกดหัวกดต้องทำอย่างรวดเร็วและต้องออกแรงกดให้มากพอที่จะทำให้หัวกดแนบสนิทกับชิ้นงานทดสอบแล้วจึงอ่านค่าความแข็งภายใน 5 วินาทีโดยทั่วไป ผู้ทดสอบควรทำการวัดความแข็งอย่างน้อย 5 จุด บนชิ้นงานทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้ การเพิ่มความเร็วของการกดจะทำให้ความแข็งของยางที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น ส่วนระยะเวลาที่อ่านค่าความแข็งก็มีผลอย่างมากต่อค่าที่วัดได้ ซึ่งสเกลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ คือ 0 ถึง 100 ค่าความแข็งกด 0 คือนิ่มมาก และค่าความแข็งกด 100 คือความแข็งของวัสดุแข็งมากไม่ยุบตัว



รูปที่ 2.19 เครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์

2.3.4 เครื่องการทดสอบแรงดึง (Tensile tester) [27]

สมบัติการต้านทานต่อแรงดึงนิยมใช้ในการควบคุมคุณภาพของยาง สำหรับการทดสอบจะประกอบไปด้วย ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) และมอดุลัส (Modulus) สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงสามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นงานทดสอบจนขาดด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์โดยนำแผ่นยางเชื่อมโยง มาตัดเป็นเอกสารรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ำใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM)

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูง (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง (T}_S\text{)} = F_m/S \quad (2.6)$$

เมื่อ F_m = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)
 S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

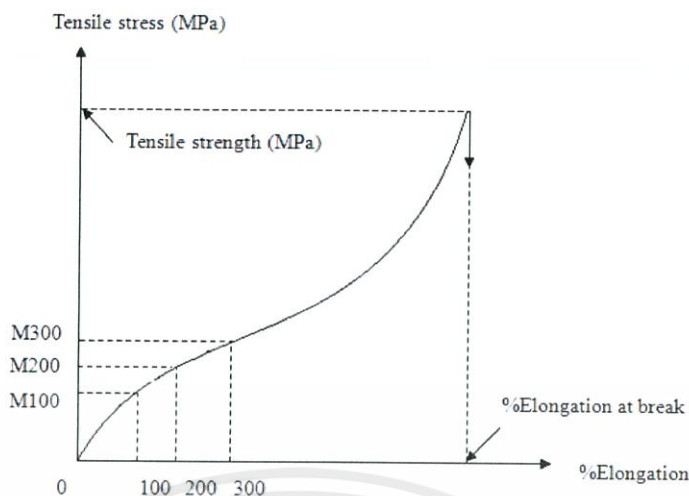
- เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (E}_b\text{)} = \frac{(L_1-L_0)}{L_0} \times 100 \quad (2.7)$$

เมื่อ L_1 = ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)
 L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

- ค่ามอดุลัสของยาง (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์ความเครียดหนึ่งๆ เช่น M100 คือ ความเค้นที่ 100% ดึงยึดดังรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 กราฟความเค้น - ความเครียด (Stress - strain curve) ของการดึงตัวอย่าง [6]

2.4 แม่พิมพ์ยางที่ใช้ทำเครื่องประดับ (Jewelry rubber mold)

การทำต้นแบบเครื่องประดับ เป็นกระบวนการหนึ่งของวิธีการทำเครื่องประดับ ที่ทำให้กระบวนการผลิตเครื่องประดับอัตโนมัติมีความสะดวกและรวดเร็วมากขึ้น ใช้ในกรณีที่เครื่องประดับนั้นผลิตเป็นจำนวนมากและเป็นเครื่องประดับที่มีรูปทรงเหมือนกัน ซึ่งในอดีตนั้นการทำเครื่องประดับแต่ละชิ้นใช้วิธีการขึ้นฝีมือ ซึ่งจะได้งานครั้งละชิ้นและใช้เวลาในการผลิตยาวนาน หากมีความต้องการที่จะได้เครื่องประดับในลักษณะเดียวกัน จะต้องขึ้นฝีมือใหม่อีกครั้งซึ่งบางครั้งคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ อาจจะไม่เหมือนกับชิ้นงานเดิม และในปัจจุบันจึงมีการทำต้นแบบขึ้นเพื่อลดเวลาในการผลิต และได้งานที่มีคุณภาพเหมือนกันในปริมาณงานที่มากขึ้น การทำต้นแบบเป็นการสร้างต้นแบบเพียง 1 ชิ้น โดยใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงานมาทำต้นแบบเพื่อที่จะนำไปทำแม่พิมพ์ต่อไป และแม่พิมพ์นี้สามารถเก็บไว้ได้ เมื่อเวลาต้องการงานในลักษณะเดียวกันสามารถนำแม่พิมพ์นั้นไปผลิตเป็นชิ้นงานได้ทันที จึงถือว่าการทำต้นแบบเป็นการช่วยประหยัดเวลา และลดต้นทุนในการผลิตได้มาก

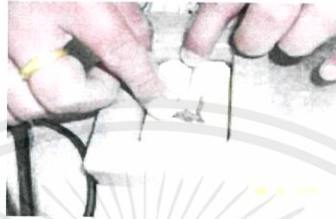
แม่พิมพ์ยางที่ทำขึ้นเพื่อใช้ผลิตเครื่องประดับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม คือ แบบพิมพ์ตัด เนื่องด้วยมีสมบัติที่สามารถเก็บรายละเอียดของเครื่องประดับที่มีความซับซ้อนได้อย่างดี โดยส่วนมากจะนิยมใช้แบบพิมพ์ตัดที่ทำจากยางธรรมชาติมากกว่าแบบพิมพ์ตัดจากซิลิโคน เนื่องจากราคาถูกกว่า ซึ่งสมบัติของแม่พิมพ์ยางควรมีอายุการใช้งานนาน มีความยืดหยุ่นสูง มีเนื้อละเอียด เมื่อนำไปขึ้นรูปเครื่องประดับสามารถใช้มีดกรีดต้นแบบออกได้ง่าย ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างแม่พิมพ์ยางกับต้นแบบที่มีส่วนประกอบเป็นโลหะผสม และไม่เกิดการหดตัว

2.4.1 ขั้นตอนในการทำแม่พิมพ์ยาง [28]

1. ใช้แบบยางที่ใช้ในทางการค้าในรูปของแผ่น ที่มีความหนาประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร

2. นำต้นแบบ (Master) ของเครื่องประดับ ซึ่งเป็นพวกโลหะ มาวางระหว่างแผ่นยางที่เป็นแผ่นประกบต้นแบบได้ ถ้าต้นแบบมีรูปร่างลวดลายละเอียด การวางแผ่นยางจะต้องใช้ความประณีตมาก อาจต้องมีการสอดหรือฝังยางเข้าไปในลวดลายของต้นแบบ หรือทำการวางแผ่นยางซ้อนทับให้เต็มบล็อกโลหะ

3. นำส่วนประกอบบล็อกโลหะบรรจุยาง อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด (Press) ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 40 - 50 นาที
4. นำบล็อกโลหะออกจากเครื่องอัด นำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง แล้วแกะยางออกจากบล็อกโลหะ
5. นำยางออกจากบล็อกโลหะ แล้วผ่าแบบยางออกด้วยมีดที่มีความคมมีลักษณะคล้ายมีดที่ใช้ในงานผ้าตัด เพื่อแกะเอาต้นแบบยางออก โดยผ่าจากด้านบนไปยังส่วนด้านล่างของยางจะได้พิมพ์ยางสำหรับหล่อเครื่องประดับต่อไปดังแผนผังรูปที่ 2.22



ต้นแบบ (Master)-โลหะต่างๆ (แหวน, ต่างหู, จี้ และเข็มกลัดเสื้อ)



จัดวางประกบด้วยยางคอมพาวด์ และวางลงบล็อกที่ใช้ในการขึ้นรูป



อัดขึ้นรูปให้ความร้อนด้วยเครื่องอัด 150°C เป็นเวลา 40-50 นาทีและแช่น้ำเย็น
ผ่ายาง และแกะเอาต้นแบบออก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แผนผังขั้นตอนการขึ้นรูปในการทำแม่พิมพ์ยางเครื่องประดับ

2.4.2 แม่พิมพ์ยางที่ใช้ขึ้นรูปเครื่องประดับทางการค้าที่ใช้ในปัจจุบัน

แม่พิมพ์ยางที่ใช้ขึ้นรูปเครื่องประดับในทางการค้า เช่น แม่พิมพ์ยาง Castaldo® มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ และมีหลายเกรดในทางการค้า ซึ่งแม่พิมพ์ยาง Castaldo® นั้นมีการนำยางธรรมชาติ ยางซิลิโคน และยาง RTV (Room temperature vulcanizing) มาใช้ในการทำแม่พิมพ์ยางสำหรับขึ้นรูปอัญมณีและเครื่องประดับในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น

- Castaldo Gold Label® ใช้ยางธรรมชาติที่มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้มีความนิ่มและยืดหยุ่นดีดองได้ง่าย อายุการใช้งานนาน ทำให้ลดต้นทุนการผลิต มักใช้กับงานที่ต้องการรายละเอียดสูง

- Castaldo White Label® ใช้ยางธรรมชาติที่บริสุทธิ์มากขึ้น ทำให้มีความนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น เป็นยางคอมพาวด์สีเหลืองอ่อน ไม่มีกลิ่น เนื้อเนียนละเอียด และเก็บรักษาได้ 1 ปี ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 21°C

- Castaldo Titanium Label® มีความแข็งแรงสูง ทำให้ทนต่อแรงดันสูงได้ ไม่เกิดการบิดเบี้ยวเมื่อทำการฉีดแว็กซ์ (Wax) ที่แรงดันสูง และทำให้ใช้ปริมาณแว็กซ์น้อย แม่แบบแว็กซ์ที่ออกมาเกิดการหดตัวน้อย และเก็บรายละเอียดได้ดี

- No Shrink Pink® ออกแบบมาเพื่อใช้งานร่วมกับ Gold Label® และ White Label® ได้ สามารถสังเกตสภาวะการวัลคาไนเซชันจากสีของแม่พิมพ์ยางได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะการวัลคาไนเซชันจากสีของแม่พิมพ์ยาง No Shrink Pink® [5]

สี	ความหมาย
Hot Raspberry Pink	วัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำเกินไป
Medium Pink/Typical Eraser Pink	วัลคาไนเซชันเหมาะสม
Tan Color Outside	วัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิสูงเกินไป
Tan Color Inside	วัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิสูงมากเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติแม่พิมพ์ยาง Castaldo® [5]

สมบัติ	Gold Label®	White Label®	No Shrink Pink®	Titanium Label®
ความแข็งกด	37.3	42.1	43.2	49.3
อุณหภูมิวัลคาไนเซชัน	152°C	152°C	หลากหลาย	152°C
การหดตัว	2.1%	2.3%	0.0%	1.4%
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	706	688	728	620
ความแข็งแรงดึงยืด	แข็งมาก 2,475 psi 13.9 MPa	แข็งมาก 2,215 psi 15.3 MPa	แข็ง 1,116 psi 7.7 MPa	แข็งมาก 2,376 psi 116.4 MPa
ความแข็งแรงฉีกขาด	134 lb./in. 23.4 MPa	137 lb./in. 24 MPa	81 lb./in. 14.2 MPa	271 lb./in. 47.5 MPa
การใช้งานแม่พิมพ์ยาง	แข็งแรง ยืดหยุ่น	แข็งแรง คงรูป	แข็งแรง ไม่เกิดการหดตัว	แข็งแรง คงรูปมาก
สี	แทน	แทน	ชมพู	เทา

2.4.2.1 แม่พิมพ์ยางซิลิโคน

- Castaldo Gelato™ มีความแข็งแรงสูง กรีดได้ง่าย ช่วยเพิ่มความเงาให้กับแว็กซ์ และง่ายต่อการแกะตัวแบบเครื่องประดับออกมา

- Castaldo Econo-Sil® สามารถใช้ อุณหภูมิได้สูงถึง 350°C และสามารถใช้ได้ทั้งสองแบบคือ

- 1) สำหรับการฉีดแว็กซ์ (Wax) เนื้อแว็กซ์ จะไม่ไหลย้อย เนื้อยางมีความแข็ง และคงความยืดหยุ่น
- 2) สำหรับใช้หล่อโลหะที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ได้ทั้งตะกั่ว ดีบุก สังกะสี และอัลลอยด์หลอมที่อุณหภูมิต่ำ สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น ตุ๊กตาทหาร ชิ้นส่วนเครื่องจักรและเครื่องประดับ เป็นต้น

- Castaldo Super Stretch™ มีความคงรูปและยืดหยุ่นสูง

- Castaldo VLT® ใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำมาก เพียง 71°C อัตราในการผลิตสูง และไม่เสี่ยงต่อการถูกทำลายโดยความร้อนและความดัน สามารถได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเพียง 30 นาที และสามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ประเภท พลาสติก เรซินได้โดยตรง และตัวแบบแว็กซ์ที่ได้จะมีความแวว-วาว ปลอดภัยจากแม่พิมพ์ยางง่าย และง่ายต่อการกรีด มีการหดตัวเพียง 1.4 %

- Castaldo Rapido™ ใช้เวลาวัลคาไนเซชันเพียง 15 นาทีและ Cure ที่อุณหภูมิ 93°C และได้ต้นแบบแว็กซ์ออกมาแวววาว กรีดง่าย ปลอดภัย ปลอดภัยจากแม่พิมพ์ยางง่าย

ตารางที่ 2.4 สมบัติแม่พิมพ์ยางซิลิโคน [5]

สมบัติ	Gelato™	Econo-Sil®	VLT®	Rapido™	Super Stretch™
ความแข็งกด	38-40	48-50	38-40	38-40	28
อุณหภูมิวัลคาไนเซชัน	165 -176°C	165-176°C	71° -82°C	93°C	165°-176 °C
การหดตัว	2.3%	<1.1%	<0.1%	<0.1%	<1.3%
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	667	555	614	614	900
ความแข็งแรงดึงยึด	1,204 psi 8.3 MPa	897 psi 6.2 MPa	1,289 psi 8.9 MPa	1,289 psi 8.9 MPa	1,109 psi 7.7 MPa
ความแข็งแรงฉีกขาด	121 lb./in. 21.2 MPa	111 lb./in. 19.4 MPa	104 lb./in. 18.2 MPa	104 lb./in. 18.2 MPa	110 lb./in. 19.2 MPa
การใช้งานแม่พิมพ์ยาง	แข็งแรงสูง มาก ใช้ในงานทั่วไป	ราคาถูกละเอียด ทนความดัน	อุณหภูมิต่ำ ทำโมเดล	ความแข็งแรงสูงใช้ ในงานทั่วไป	ยืดหยุ่น กรีดยากมาก ใช้ทำแกน
สี	เลมอนพีช	แดงอิฐ	ฟ้าน้ำทะเล	ดาวเรือง	ม่วง

2.4.2.2 แม่พิมพ์ยาง RTV

- Castaldo Liqua Cast® ไม่เกิดการหดตัวจากการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ไม่ต้องใช้ความร้อนและความดัน ที่เป็นสาเหตุของการหดตัว ใหล่ง่าย ผสมได้ง่าย และง่ายต่อการกำจัดฟองอากาศ ราคาถูก มีความแข็งแรง ความเหนียว และสามารถเก็บได้นาน

- Castaldo Long-Life อายุการใช้งานนาน ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ ไม่เสียรูปร่าง ถึงแม้จะเก็บไว้ในระยะเวลาที่นานมีความแข็งแรง เหนียว และต้านทานต่อแรงฉีกขาดสูง แม่พิมพ์ที่ได้มีความเงางาม ซึ่งจะทำให้แว็กซ์มีความเงา

- Castaldo Liqua Glass™ ไม่เกิดการหดตัว สามารถใช้ผสมกับยางซิลิโคนได้ง่าย ราคาถูก สีเหมือนแก้ว มีความบาง และกรีดยาก สามารถมองเห็นแว็กซ์ ขณะทำการฉีดเข้าแม่พิมพ์ได้ ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ในการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิห้อง

- Castaldo Liqua Fast ICE® (RTV silicone jewelry molding rubber) ใช้เวลา 60- 90 นาที ในการวัลคาไนเซชัน และเวลาเชื่อมโยงจะสั้นลงเหลือเพียง 30 นาที เมื่อให้ความร้อนเพียง 50°C มีสีฟ้าใส ไม่เกิดการหดตัว คงรูปถาวร มีความแข็งแรง เหนียว ต้านทานต่อแรงดึง มีอายุการใช้งาน 18 เดือน

- Castaldo Quick-Sil® (RTV silicone jewelry molding rubber) มีความแข็งแรง ไม่เกิดการหดตัว มีความเหนียว อายุการใช้งานนาน ไม่ต้องใช้ความร้อนในการวัลคาไนเซชัน และใช้

เวลาเพียงแค่ 15 นาที ในการวัลคาร์ไนเซชัน ไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นก่อนการฉีดแว็กซ์ สามารถใช้กับโลหะผสมดีบุก และโลหะที่อุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 2.5 สมบัติแม่พิมพ์ยาง RTV [5]

สมบัติ	Liqua Cast®	Liqua Cast® Long-Life	Liqua Glass™	Liqua Fast ICE®	Quick-Sil®
ความแข็งกด	40	45	50	40	40
ความหนืด	ต่ำมาก 4,000 cps	ต่ำมาก 2,000 cps	ต่ำมาก 1,200 cps	ต่ำ 8,500 cps	ต่ำ 8,500 cps
อุณหภูมิวัลคาร์ไนเซชัน	21°C	21°C	21°C	21°C	21°C
เวลาในการวัลคาร์ไนเซชัน	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	16 ชั่วโมง	60-90 นาที	15 นาที
เวลาในการวัลคาร์ไนเซชันที่สั้นลง ที่ 65°C	90 นาที	90 นาที	90 นาที	30 นาที	<15 นาที
การหดตัว	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
ความถ่วงจำเพาะ	1.39	1.02	1.00	1.12	1.32
เปอร์เซ็นต์การยึดฉนวน จุดขาด	897	1,135	750	370	550
ความแข็งแรงดึงยึด	648 psi 4.5 MPa	408 psi 2.8 MPa	360 psi 2.1 MPa	508 psi 3.5 MPa	660 psi 4.1 MPa
ความแข็งแรงฉีกขาด	81 lb./in. 14.2 MPa	82 lb./in. 14.3 MPa	74lb./in. 12.9 MPa	108 lb./in. 18.9 MPa	115 lb./in. 20.MPa
สี	ชมพู	เหลือง	ฟ้าน้ำทะเลใส	ฟ้าใส	เขียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 การแก้ไขปัญหาของแม่พิมพ์ยาง Castaldo® [5]

ปัญหา	สาเหตุ	แนวทางการแก้ไข
เหนียวและนุ่มเกินไป	เวลาและอุณหภูมิของการวัลคาไนเซชันไม่เหมาะสม	อุณหภูมิและเวลาในการวัลคาไนเซชัน และปรับให้เหมาะสม
เนื้อแม่พิมพ์ยางมีความแข็ง ทำให้ผิวแม่พิมพ์ไม่เรียบแบน	ใช้เวลา, อุณหภูมิและความดันในการวัลคาไนเซชันสูงไป	ลดความดัน, เวลา และอุณหภูมิในการวัลคาไนเซชัน
แม่พิมพ์ยางโค้งงอ	วัลคาไนเซชัน ก่อนการให้ความดัน	ปิด Mold frame ให้แน่น
แม่พิมพ์เกิดการแยกชั้น	การปนเปื้อนของสารเคมี เช่น น้ำมัน ทัลคัม เป็นต้น	ทำความสะอาดให้ดีก่อนทำการกดอัด
เกิดฟองอากาศบริเวณพื้นผิว	เกิดจากยางไม่เต็ม Mold frame	เติมยางให้เต็ม Mold frame
แม่พิมพ์ยางที่ได้มีความแข็งและเหนียว	เกิดจากการเก็บยางที่อุณหภูมิต่ำเกินไป	อุ่นยางที่อุณหภูมิ 38°C
แม่พิมพ์ยางเกิดการหดตัวอย่างรุนแรง	อุณหภูมิในการวัลคาไนเซชันสูงไป	ตรวจสอบการตั้งค่าอุณหภูมิ หรือทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 143°C โดยเพิ่มเวลาเป็น 2 เท่า

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุภิญญา โคตรมา [10] ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติทำแม่พิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยทำการออกสูตรและบดยางผสมยางแท่ง STR 5L กับสารเคมีต่างๆ โดยทำการศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยง คือเปอร์ออกไซด์ที่ 1.2, 2.4 และ 3.6 phr ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง คือ ฟินิลีนไดเมลเลอิมิด (N,N'-phnylenedimaleimide, SR-525®) ที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 phr ชนิดและปริมาณสารตัวเติมคือแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ผลปรากฏว่าปริมาณเปอร์ออกไซด์ 2.4 phr มีส่วนช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลอย่างสมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยาง ที่มีปริมาณเปอร์ออกไซด์ 2.4 phr ให้ค่าที่ใกล้เคียงยางที่ใช้ในทางการค้ามากที่สุด และพบว่าค่าความหนืดมูนีของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่าที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า ความแข็งแรงดึงของยางที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 40 - 50 phr จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับยางทางการค้า เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าเฉลี่ยประมาณ 600 และเมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลในการเพิ่มของปริมาณ Co-agent พบว่า การเพิ่มปริมาณ Co-agent เพียงอย่างเดียวไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ได้แต่จะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง Peroxide และ Co-agent ซึ่งในงานวิจัยนี้ ปริมาณ Co-agent 1

และ 2 phr เท่านั้นที่ให้ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ค่ามอดูลัสและความแข็งกดใกล้เคียงกับทางการค้า และจากแบบสอบถามสูตรที่ใช้สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr ได้รับความพึงพอใจสูงสุด โดยผู้ใช้งานจริงให้เหตุผลว่ามีความนิ่มและเนื้ออย่างมีความละเอียด มีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ในขณะที่กรีตแบบพิมพ์โลหะออกมาจากยางคอมพาวด์ที่คงรูปแล้วนั้น ไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวน กรีดออกได้โดยง่าย สามารถเก็บรายละเอียดตลอดอายุของชิ้นงานได้ดี

ศักดิ์ชัย สมเชื้อ และคณะ [29] ศึกษาพฤติกรรมการไหลของยางธรรมชาติที่ใช้สารเติมแต่งคือ ซิลิกาและดินขาว จากการศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณอัตราส่วนของสารตัวเติมแบบผสมระหว่างดินขาวและซิลิกา (Hybrid filler) ด้วยเครื่องคาปิ-ลารีรีโอมิเตอร์ (Capillary rheometer) พบว่า ซิลิกาปริมาณ 40 phr สามารถเพิ่มความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน การต้านทานแรงดึงและการบวมตัวได้มากที่สุด ค่าความเค้นเฉือน ความหนืดเฉือน ความหนืดยืดดึง การต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นในสารตัวเติมแบบผสม ซึ่งสารตัวเติมแบบผสมระหว่างดินขาวและซิลิกาจะมีจุดสมดุลที่ปริมาณซิลิกาต่อดินขาวเท่ากับ 20 phr : 20 phr เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติการไหลและการบวมตัวของสารตัวเติมแบบผสมเทียบกับ สารตัวเติมแบบเดี่ยวพบว่าสารตัวเติมแบบผสม มีสมบัติการไหลแบบดีดและการบวมตัวที่ดีกว่า

ชัชวาล กันทะลา และคณะ [28] ได้ศึกษาอิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยาง NR กับยาง NBR โดยใช้สารช่วยประสานยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0 ถึง 7 phr ในงานวิจัยนี้ใช้ยาง NR กับยาง NBR ที่สัดส่วน 20 : 80 ผลการทดลองพบว่า การเติมสารช่วยประสานยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ทำให้ค่าความหนืดของยางผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของสารช่วยประสานยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ อย่างไรก็ตามพบว่าการเติมสารช่วยประสานไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวเวลาในการเชื่อมโยงและค่าความแตกต่างแรงบิด แต่ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้นโดยการเติมสารช่วยประสาน 5 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสม

ประภัสร์ ถิ่นฐาน และศุภณัฐ แสนทวีสุข [31] ได้ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมเคลย์ชนิด Perkalite ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีของวัสดุเชิงประกอบเคลย์ยางพาราโดยทำการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางพาราโดยทำการผสมยางธรรมชาติกับ Perkalite ในปริมาณ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและความทนทานต่อน้ำมันเบนซินและอะซิโตน ผลจากการทดลองพบว่าภาพรวมของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วยนาโนเคลย์ Perkalite ที่ปริมาณ 3 phr ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีดีขึ้นมากที่สุดซึ่งค่า Tensile strength, Elongation at break และ Modulus ของชิ้นงานที่ประกอบด้วยเคลย์ 3 phr ให้ค่ามากที่สุดโดยทำการยืนยันผลที่เกิดขึ้นด้วยการนำชิ้นงานที่ถูกดึงขาดมาถ่ายภาพพื้นผิวด้วย SEM เพื่อดูลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณ Perkalite ที่เติมลงในยาง 3 phr มีพื้นผิวที่ราบเรียบที่สุดหมายถึงชิ้นงานมีลักษณะการกระจายตัวของเคลย์ที่ดีทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมีชิ้นงานที่ประกอบด้วยเคลย์ 3 phr มีการเปลี่ยนแปลงขนาดและน้ำหนักน้อยที่สุดเมื่อแช่

ชิ้นงานในน้ำมันเบนซิน แต่การทดลองความทนทานต่อสารเคมีโดยใช้อะซิโตนการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณการเติม Perkalite

วราภรณ์ ขจรไชยกูล และวิภา เศรษฐนิษฐ์ [28] ศึกษาลักษณะการคงรูปและชนิดของสารตัวเติมของยางแท่งผสมสารเคมีทำแม่พิมพ์ในงานเครื่องประดับ โดยทำการออกสูตรและบดผสมยางแท่ง TTR 5L กับสารเคมีต่างๆ โดยทำการศึกษาชนิดของสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยงของยางหลังจากนั้นทดลองให้บริษัทผู้ผลิตเครื่องประดับทดลองใช้ ผลปรากฏว่า สารตัวเติมที่มีความเหมาะสมคือ แคลเซียมคาร์บอเนต และระบบการคงรูปเป็นระบบ EV โดยมีปริมาณกำมะถัน 0.05 phr สารตัวเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง MBTS 2.0 phr DTDM 1.5 phr โดยผู้ผลิตเครื่องประดับมีความพอใจในผลการใช้งานซึ่งมีความใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ยางที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ประมาณ 40 บาทต่อ 1 กิโลกรัม (คำนวณที่ราคาของ TTR 5L กิโลกรัมละ 30 บาท) ซึ่งถ้ารวมค่าใช้จ่ายในการผลิตหีบห่อยังต่ำกว่าราคาแม่พิมพ์ยางที่นำเข้ามาจากต่างประเทศเป็นอย่างมาก นั่นคือแม่พิมพ์ยางที่ทดลองผลิตราคาประมาณไม่เกิน 100 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ในขณะที่นำเข้ามาจากต่างประเทศประมาณ 200 - 400 บาทต่อ 1 กิโลกรัม

2.5.1 สรุปการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ปริมาณสารเชื่อมโยง 2.4 phr, สารเสริมการเชื่อมโยง 1 phr และแคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr มีความพึงพอใจสูงสุดโดยผู้ใช้งานจริง สำหรับยางคอมพาวด์ทำแม่พิมพ์ยางอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
- ซิลิกาปริมาณ 40 phr สามารถเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว การต้านทานแรงดึงและการบวมตัวได้มากที่สุดและสารตัวเติมแบบผสมระหว่างดินขาวและซิลิกาจะมีจุดสมดุลที่ปริมาณซิลิกาต่อดินขาวเท่ากับ 20 phr : 20 phr เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการไหลและการบวมตัวของสารตัวเติมแบบผสมเทียบกับสารตัวแบบเดี่ยวพบว่า สารตัวเติมแบบผสมมีสมบัติการไหลแบบดีดและการบวมตัวที่ดีกว่า
- วัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วยเคลย์ชนิด Perkalite ที่ปริมาณ 3 phr ให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางเคมีดีชิ้นมากที่สุด ซึ่งค่า Tensile strength, Elongation at break และ Modulus ให้ค่ามากที่สุดและให้พื้นผิวชิ้นงานที่ราบเรียบที่สุด
- การเติมสารช่วยประสานไม่ส่งผลต่อเวลาการไหลเวลาคงรูปและค่าความแตกต่างแรงบิดของยางผสมระหว่าง NR และ NBR ส่วนหลังบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เวลา 168 ชั่วโมง ค่ามอดูลัสและความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่ความทนแรงดึงสูงสุดและความแข็งแรงแรงฉีกขาดมีค่าลดลง
- สารตัวเติมที่เหมาะสม คือ แคลเซียมคาร์บอเนตและระบบการเชื่อมโยงเป็นระบบ EV ที่ปริมาณกำมะถัน 0.05 phr สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง MBTH 2.0 phr และ DTDM 1.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสูตรยางเพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์ยาง ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ โดยจะทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งทำการทดลองคิดหาสูตรยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ แบ่งประเด็นศึกษาเป็น 4 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาผลระบบสารเชื่อมโยงที่มีผลต่อสมบัติของแม่พิมพ์ยาง

- เปอร์ออกไซด์ (Peroxide, Luperox[®]101)
- กำมะถัน (Sulfur) ในการเชื่อมโยงแบบ EV

ตอนที่ 2 การศึกษาผลชนิดของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติของแม่พิมพ์ยาง

1. สารตัวเติมกลุ่มดินขาว ได้แก่ China clay, Nano clay, Nucap[®] W290 และ Clay Iceberg[®]
2. สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่ 2Q, 4Q, 4QC, Nano CaCO₃ ,และ Calflex-C[™]
3. สารตัวเติมกลุ่มทัลคัม ได้แก่ Talcum 1250, Mistron[®] CB และ Mistron[®] Vapor R
4. สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ได้แก่ Sipernat[®] 820A

การทดสอบสมบัติของยางเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับ ช่วงตอนที่ 1 และ 2 มีดังนี้

1. การทดสอบการเชื่อมโยงตามมาตรฐาน ASTM D2084
2. การทดสอบความหนืดมูนนี่ ASTM D1646
3. การทดสอบสมบัติเชิงกล
 - การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile tests) ตามมาตรฐาน JIS K 6251
 - การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน JIS K 6252
 - การทดสอบความแข็งกด (Hardness) ตามมาตรฐาน JIS K 6253
 - การทดสอบสมบัติการยืดถาวร (Tension set) ตามมาตรฐาน JIS K 6262
4. การศึกษาสัญญาณวิทยา
 - ศึกษาลักษณะความเรียบของพื้นผิวยางคอมพาวด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมที่ 50 และ 70 phr ที่มีต่อสมบัติของแม่พิมพ์ยาง

ตอนที่ 4 การศึกษาการใช้งานจริง และ การวิเคราะห์ต้นทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. ยางธรรมชาติชนิด เอสทีอาร์ 5 แอล (STR 5L) บริษัท Thai Hua rubber จำกัด
สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.1
2. ซิงค์ออกไซด์ ชนิด White seal เกรดการค้า บริษัท ส.สามพราน เคมีคอล จำกัด
3. กรดสเตียริก เกรดการค้า บริษัท P.T. Cisadane Raya Chemical จำกัด
4. สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.2
 - 4.1 2Q grade บริษัท Quality Mineral จำกัด
 - 4.2 4Q grade บริษัท Quality Mineral จำกัด
 - 4.3 4QC grade บริษัท Quality Mineral จำกัด
 - 4.4 Calflex-C™ บริษัท New-Lime จำกัด
 - 4.5 Nano CaCO_3 บริษัท Shandong Haize Nanomaterials จำกัด
5. สารตัวเติมกลุ่มดินขาวสมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.3
 - 5.1 Clay Iceberg® บริษัท Behn Meyer Chemical (T) จำกัด
 - 5.2 China clay บริษัท เอ็นพีเคมีคอล จำกัด
 - 5.3 นาโนเคลย์ บริษัท Behn Meyer Chemical (T) จำกัด
 - 5.4 Nucap® W290 บริษัท Kamin Performance Minerals จำกัด
6. สารตัวเติมกลุ่มทัลคัม สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.4
 - 6.1 Mistron® CB บริษัท Imerys Talc America จำกัด
 - 6.2 Mistron® Vapor R บริษัท Imerys Talc America จำกัด
 - 6.3 Talcum 1250 บริษัท Allied Chemicals&Minerals จำกัด
7. สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.5
 - 7.1 Sipernet 820A บริษัท Evonok Industries จำกัด
8. สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent, SR 350) บริษัท MDR International จำกัด
9. แอนติออกซิแดนต์ (4-,5 -methylmercaptobenzimidazole, Vulkanox MMB)
Commercial grade บริษัท Cosmos Chemicals, TMQ บริษัท SGS จำกัด และ PE
Wax บริษัท Honeywell จำกัด
10. น้ำมันพาราฟิน (Paraphenic oil) เกรดการค้า บริษัท APOLLO (THAILAND)
จำกัด
11. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ชนิด Rutile เกรดการค้า บริษัท DuPont Chemical
จำกัด
12. เปอร์ออกไซด์ (Peroxide, Luperox® 101) บริษัท Silicone Technology จำกัด
13. กำมะถัน (Sulfur) บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
14. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide และ
N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide บริษัท SGS จำกัด
15. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง Diphenylguanidine บริษัท Monflex Tpeltd จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่ปฏิบัติงานในตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ STR 5L ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	0.006
ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	0.17
ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)	0.36
ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	0.29
ความอ่อนตัวเริ่มแรก (P_0) (min)	38.0
ดัชนีความอ่อนตัว (PRI) (min)	89.5
ความหนืด [ML 1+4(100°C)]	67.7
สี (Lovibond Scale)	2.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากการทดลองห้องปฏิบัติการยางแท่ง สถาบันวิจัยยาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต

สมบัติบางประการ	สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต				
	2Q	4Q	4QC	Nano CaCO ₃	Calflex- C™
ความขาว (%)	>98	>98	>97	>94	>95
การดูดความชื้น (%)	<0.2	<0.2	<0.2	N/A	<1
ความถ่วงจำเพาะ	2.7	2.7	2.7	2.7	2.4-2.6
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (g/ml)	N/A	N/A	N/A	N/A	0.40-0.60
ความหนาแน่นรวม (cc/g)	0.56	0.56	0.90	0.35	1.30-1.50
pH	9.00±0.20	9.00±0.20	9.00±0.20	N/A	8.00-9.00
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	N/A	N/A	N/A	>20	25-35
อุณหภูมิสลายตัว (°C)	825	825	825	N/A	825
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	1339	1339	1339	N/A	1339
การละลายในตัวทำละลาย (%)	น้ำ 0.001	น้ำ 0.001	น้ำ 0.001	N/A	น้ำ 0.001
ปริมาณที่ค้างบนร่ง (%)	N/A	N/A	N/A	N/A	<1.0 (150µm)
เคลือบผิวด้วย	N/A	N/A	N/A	N/A	กรดไขมัน

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีของดินขาว

สมบัติบางประการ	สารตัวเติมกลุ่มดินขาว (Clay)			
	China clay	Clay Iceberg®	Nucap®W29	Nano clay
ความขาว (%)	N/A	N/A	>91	>94
การดูดความชื้น (%)	<1	N/A	<1.5	N/A
ความถ่วงจำเพาะ	2.6	2.2-2.6	2.6	N/A
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (g/ml)	N/A	N/A	N/A	N/A
ความหนาแน่นรวม (cc/g)	N/A	N/A	2.6	2.6
pH	5.0-7.0	4.0-6.3	6.0	6.0-8.5
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	N/A	N/A	22	N/A
อุณหภูมิสลายตัว (°C)	N/A	N/A	N/A	N/A
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	N/A	>1700	N/A	3900
การละลายในตัวทำละลาย	ไม่ละลายน้ำ	น้ำ	ไม่ละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ
ปริมาณที่ค้างบนร่ง (%)	<0.1 (325 mesh)	N/A	0.005 (325 mesh)	N/A
เคลือบผิวด้วย	N/A	N/A	N/A	N/A

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของทัลคัม

สมบัติบางประการ	สารตัวเติมกลุ่มทัลคัม		
	Talcum 1250	Mistron [®] CB	Mistron [®] Vapor R
ความขาว (%)	>96	87	85-86
การดูดความชื้น (%)	<0.2	<0.5	<0.5
ความถ่วงจำเพาะ	2.8	2.8	2.8
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (g/ml)	N/A	N/A	N/A
ความหนาแน่นรวม (cc/g)	N/A	2.0	2.7-2.8
pH	8	9.0-9.5	9.0-9.5
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	N/A	13.4	N/A
อุณหภูมิสลายตัว (°C)	N/A	>1000	>1000
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	N/A	>1300	1300
การละลายในตัวทำละลาย	ไม่ละลายน้ำ	ละลายในกรดไฮโดรฟลูออริก	ละลายในกรดไฮโดรฟลูออริก
ปริมาณที่ค้ำบนร่ง (%)	แทบจะไม่พบ	<2 (325 mesh)	N/A
เคลือบผิวด้วย	N/A	ซิลิโคน	N/A

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของซิลิกา

สมบัติบางประการ	สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา
	Sipernat® 820A
ความขาว (%)	N/A
การดูดความชื้น (%)	N/A
ความถ่วงจำเพาะ	N/A
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (g/ml)	N/A
ความหนาแน่นรวม (cc/g)	2.1
pH	9.6-10.6
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	85
อุณหภูมิสลายตัว (°C)	N/A
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	1700
การละลายในตัวทำละลาย	ไม่ละลายน้ำ
ปริมาณที่ค้ำบนแรง (%)	<0.2 (45µm)
เคลือบผิวด้วย	N/A

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

อุปกรณ์

1. เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น R11-3FF บริษัท Kodaira Seisakusho จำกัด
2. เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Compression molding machine) บริษัท ชัยเจริญการช่าง จำกัด
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMR-201 บริษัท Gibitre จำกัด
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving die rheometer) รุ่น MDR 2000 บริษัท Monsanto จำกัด
5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) จำกัด
 - รุ่น 5565 บริษัท Instron จำกัด (สำหรับการทดสอบความแข็งแรงดึง)
 - รุ่น LS 500 บริษัท Lloyd Instrument จำกัด (สำหรับการทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด)

6. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) ชนิด Shore A รุ่น 917 บริษัท Shore Instrument & MFG จำกัด
7. เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ รุ่น EW-120SG บริษัท Mirage Trading จำกัด
8. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้ความดันลม (Compressed-air cutting machine) รุ่น SDAP-100-N บริษัท Dumbbell จำกัด
9. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) รุ่น VT300 บริษัท Better Science Instrument จำกัด

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมยางผสมสูตรสำหรับการศึกษาระบบสารเชื่อมโยง
ตารางที่ 3.6 ยางผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1

องค์ประกอบ	ศึกษาระบบสารเชื่อมโยง	
	Sulfur	Peroxide
NR STR 5L	100	100
Stearic acid	2	2
ZnO	5	5
TiO ₂	3	3
Nano CaCO ₃ *	50	50
4QC*	50	50
Paraffinic oil	5	5
Antioxidant	1	1
Sulfur	0.5	-
CBS	1.5	-
DPG	0.5	-
Peroxide	-	2.4
Co-agent	-	1

หมายเหตุ (*) ปัจจัยที่ศึกษา

3.3.2 การเตรียมยางผสมสูตรสำหรับการศึกษาผลของชนิดสารตัวเติมที่ปริมาณ 50 phr งานวิจัยนี้ได้ศึกษาชนิดสารตัวเติม ทั้งหมด 13 ชนิด ได้แก่ China clay, Nano clay, Nucap® W290, Clay Iceberg®, 2Q, 4Q, 4QC, Nano CaCO₃, Calflex-C™, Talcum 1250, Mistron® CB, Mistron® Vapor R และ Sipernat® 820A โดยทำการออกสูตรยางดังตารางที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ซึ่งในหนังสือการศึกษาเล่มนี้ ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ยางผสมสูตรที่ใช้ในการวิจัย ตอนที่ 2

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง; phr)
Natural Rubber (NR)	100
Antioxidants	2
Fillers*	50
Paraffinic oil**	15, 20, 25
TiO ₂	3
ZnO	3
Stearic acid	1
สีเหลือง	15
DPTT	0.8
CBS	1.5
DPG	0.5
S	0.5

หมายเหตุ (*) ปัจจัยที่ศึกษา

(**) ปริมาณ Paraffinic oil เปลี่ยนไปตามชนิดของสารตัวเติม (Fillers)

โดยสารตัวเติม 2Q, 4Q, 4QC และ China clay ใช้ 15 phr

Calflex-C™, Talc 1250 และ Sipernat® 820A 20 phr

Nano Clay, Nucap® W290, Clay Iceberg®, Nano CaCO₃, Mistron® CB และ Mistron®

Vapor R ใช้ 25 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมยางผสมสูตรสำหรับการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมที่ 70 phr

ตารางที่ 3.8 ยางผสมสูตรที่ใช้ในงานวิจัย ตอนที่ 3

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยละของยาง; phr)
Natural Rubber (NR)	100
Peptizer	0.3
Antioxidants	2
Calflex-C™ หรือ 2Q*	70
Paraffinic oil	25
TiO ₂	3
ZnO	3
Stearic acid	1
White factice	10
สีเหลือง	15
DPTT	0.8
TBBS	1.5
DPG	0.5
S	0.5

หมายเหตุ (*) ปัจจัยที่ศึกษา

1. ตัดยางและซังสารเคมีต่างๆ ตามตารางตั้งแต่ตารางที่ 3.6 - 3.8 โดยเพิ่มน้ำหนักเพื่อให้ได้ยางผสมสูตรตาม อัตราส่วนที่ต้องการ

2. ทำการผสมยางสูตรเริ่มจากการนำยางธรรมชาติมาทำการบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งจนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้ง จากนั้นกรีดพับยาง (Cut and fold) จนกระทั่งยางนิ่มใช้เวลาประมาณ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 70°C (สำหรับตารางที่ 3.8 เพิ่มการใส่เพปไทเซอร์)

3. จากนั้นค่อยๆ เติม Stearic acid, ZnO และ TiO₂ ลงไประหว่างลูกกลิ้ง จากนั้นเติมสีเหลืองแล้วทำการบดผสมด้วยการกรีดและพับยาง เพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใช้เวลาประมาณ 2 นาที

4. เติมสารตัวเติม ประมาณ 2 ใน 3 ของทั้งหมด เมื่อผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงใส่ที่เหลือลงไป จากนั้นใส่น้ำมันพาราฟิน ใช้เวลาประมาณ 3 นาที

5. เติม Antioxidant ใช้เวลาประมาณ 1 นาที แล้วรีดยางออกให้เป็นแผ่นหนา

6. ตัดแผ่นยางคอมพาวด์ที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 50.8*50.8 มม² ความหนาประมาณ 1.02 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น เพื่อนำไปวัดหาค่าความหนืดมูนนี้โดยใช้เครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์ใช้งานหมุนขนาดใหญ่ (L) อุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100°C เวลาในการทดสอบ 4 นาที โดยหาค่าความหนืด ML 1+4(100°C) ของยางคอมพาวด์ก่อนการเชื่อมโยง

7. เติมสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์พร้อม Co-agent หรือเติมสารเชื่อมโยงกำมะถัน (Sulfur) พร้อมสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงลงไปในยาง (สำหรับตารางที่ 3.7 และ 3.8 ใช้เพียงการเชื่อมโยงกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง) ทำการบดผสมต่อไปจนยางมีความอ่อนตัวและสารเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ใช้เวลา 5 นาที สำหรับการทำขั้นตอนนี้ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยางคอมพาวด์

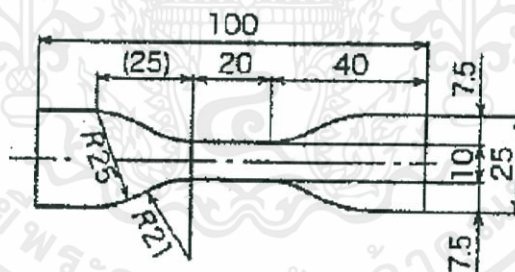
8. ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร แล้วกรีดพืดยางออกจากลูกกลิ้ง ระวังอย่าให้ยางเกิดการพับติดกัน

9. ตัดแผ่นยางคอมพาวด์เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 50.8×50.8 มม² มีความหนาประมาณ 1.02 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบเวลาเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบงานสั้นไร้งานหมุนที่อุณหภูมิ 150°C เพื่อหาเวลาก่อนการเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (t_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (t_{c90})

3.4 การศึกษาสมบัติของยางคอมพาวด์

3.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน JIS K 6251 [32] โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างยางที่คงรูปแล้วมาตัดให้ได้เป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ลักษณะเป็น Die C ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 20 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 ใช้ Load cell ขนาด 500 N อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาทีหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัสที่ 100% (M 100) และเปอร์เซ็นต์การยืดจนจุดขาด (%Elongation at break)



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน JIS K 6251 [32]

การคำนวณผล

- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่ได้รับเมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง (TS)} = F_m/S \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ F_m = แรงที่ใช้ในการดึงจุดสูงสุด (N)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (ม²) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เปอร์เซ็นต์การยืดจนจุดขาด (%Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดจนจุดขาด (E}_b\text{)} = [(L_1 - L_0) / L_0] * 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ L_1 = ความยาวสุดท้ายจนจุดขาดของชิ้นงาน (mm)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm)

3.4.2 การทดสอบความแข็งแรงการฉีกขาด (Tear strength)

เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) ตามมาตรฐาน JIS K 6252 [33] โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างที่คงรูปแล้วมาตัดให้ได้เป็นที่มีลักษณะ Die C แสดงดังรูปที่ 3.2 ใช้ Load cell ขนาด 500 N อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงการฉีกขาด



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานความแข็งแรงการฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน JIS K 6252 [33]

การคำนวณผล

$$\text{ความแข็งแรงการฉีกขาด (T}_R\text{)} = F/t \quad (3.3)$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (kN)

T = ความหนาของชิ้นงาน (m)

3.4.3 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์

เครื่องดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์เอ (Shore A durometer) ตามมาตรฐาน JIS K 6253 [34] ที่อุณหภูมิห้องแสดงดังรูปที่ 3.3 ตามมาตรฐานการทดสอบ โดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น โดยมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร ทำการวางซ้อนกันบนแท่งทดสอบ จากนั้นโยกคานล่างเพื่อให้ชิ้นงานสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 5 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ชนิดซอร์ A ตามมาตรฐาน JIS K 6253 [34]

3.4.4 การทดสอบสมบัติการยืดถาวร (Tension set)

เตรียมชิ้นตัวอย่างเป็นรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน JIS K 6262 [35] ทำเครื่องหมายไว้บนชิ้นตัวอย่าง โดยขีดเป็นเส้นให้ห่างกัน 20 เซนติเมตร จากนั้นยืดติดชิ้นตัวอย่างไว้กับที่จับชิ้นตัวอย่างของเครื่องทดสอบสมบัติการดึงยึดชิ้นตัวอย่างด้วยความเร็ว 200 mm/min ให้มีความเครียด 100% และรักษาความเครียดนี้ไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นปล่อยชิ้นตัวอย่างให้กลับมาที่ระยะเดิมด้วยความเร็ว 100 mm/min (ภายในเวลา 30 วินาที) และเอาชิ้นตัวอย่างออกจากเครื่องทดสอบ วางชิ้นตัวอย่างไว้ 10 นาที ก่อนที่จะทำการวัดระยะของเครื่องหมายที่ทำไว้บนชิ้นตัวอย่าง บันทึกค่าที่วัดได้ เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความยาวชิ้นตัวอย่างหรือค่าการยืดถาวร ตามสูตรการคำนวณดังนี้

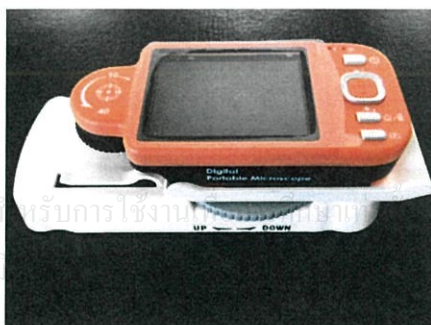
$$E = [(L - L_0) / L_0] * 100$$

(3.4)

เมื่อ E = ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความยาว (%Tension set)
 L = เป็นระยะห่างของเครื่องหมายหลังการยืด
 L₀ = เป็นระยะห่างของเครื่องหมายก่อนการยืด

3.4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)

เตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการนำตัวอย่างยางที่เชื่อมโยงแล้ว มาตัดเป็นแผ่นบาง เพื่อให้เห็นลักษณะของพื้นผิวทางด้านในได้อย่างชัดเจน ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง รุ่น VT300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ทดสอบการใช้งานจริง

ทำการทดสอบโดยใช้ความร่วมมือจากผู้ประกอบการ (บริษัท ชุ่น จิวเวลรี่ จำกัด) โดยเปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า ตามลำดับขั้นตอนการใช้งานจริงดังนี้

1. นำยางคอมพาวด์ หรือยางผสมสูตรที่ได้รีดเป็นแผ่นให้มีความหนา 2 - 3 มิลลิเมตร
2. นำต้นแบบเครื่องประดับวางโดยมีแผ่นยางคอมพาวด์ตัดเป็นแผ่นประกบวางลงในบล็อกที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปให้เต็มบล็อก
3. อัดขึ้นรูปยาง อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 25 นาที
4. นำบล็อกแม่พิมพ์แช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง
5. ทำการกรีดต้นแบบโลหะออกจากแม่พิมพ์ยางและให้ผู้ประกอบการตอบแบบสอบถามรวบรวมข้อมูลที่ได้และสรุปผลการใช้งานจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพัฒนาแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เพื่อให้มีสมบัติเทียบเท่ากับแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ต่างประเทศ รวมถึงมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ ผลการทดสอบสมบัติแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ต่างประเทศเป็นไปตามตารางที่ 4.1 โดยใช้สมบัติเหล่านี้ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ (Bench mark) เพื่อพัฒนาสูตรในงานวิจัยนี้

หลังจากการออกสูตรยางและศึกษาปัจจัยต่างๆแล้วจึงทำการทดสอบ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่

- ระบบสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent type)
- ชนิดสารตัวเติม (Filler type)
- ปริมาณสารตัวเติม (Filler loading)
- การใช้งานจริง
- การวิเคราะห์ต้นทุน

ตารางที่ 4.1 สมบัติบางประการของยางจากต่างประเทศ (Castaldo Gold Label[®])

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C)) ¹	48.0
เวลาเชื่อมโยง (นาที)	
- เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) ¹	6.3
- เวลาการเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) ¹	11.1
ความแข็งแรงดึง (MPa) ¹	14.1
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%) ¹	830.8
มอดุลัสที่ 100% (MPa) ²	0.6
ความแข็งแรงฉีกขาด (KN/m) ²	21.8
ความแข็งกด (Shore A) ¹	36.0
การยืดตัวถาวร ¹	3.0
ความถ่วงจำเพาะ ²	1.3

หมายเหตุ ¹ข้อมูลจากห้องทดสอบปฏิบัติการส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง

²ข้อมูลจากห้องทดสอบปฏิบัติการบริษัท เอส.เค. พอลิเมอร์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การศึกษาผลของระบบสารเชื่อมโยง

กระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนยางดิบให้เป็นยางสุกที่สามารถคงรูปได้ มีความยืดหยุ่น (Elastic) สามารถคืนตัวกลับรูปร่างเดิมได้ โดยใช้สารเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันของโมเลกุลยาง ระบบสารเชื่อมโยงที่ต่างกันส่งผลให้สมบัติของยางต่างกัน รวมทั้งเวลาเชื่อมโยง และกลิ่นขณะใช้งาน สารเชื่อมโยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ (Luperox[®]101) ปริมาณ 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง (AGISYN 2817) ปริมาณ 1 phr และสารเชื่อมโยงกำมะถัน ปริมาณ 0.5 phr สารเร่ง-ปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (CBS และ DPG) ปริมาณ 1.5 และ 0.5 phr ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับสารตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 50 phr ความหมายสูตรต่างๆ นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	ความหมาย
สูตรที่ 1 : P ₁ Ca ₁ -50	สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ 2.4 phr นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr
สูตรที่ 2 : P ₁ Ca ₂ -50	สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ 2.4 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (4QC) 50 phr
สูตรที่ 3 : S ₁ Ca ₁ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr
สูตรที่ 4 : S ₁ Ca ₂ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (4QC) 50 phr

4.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์

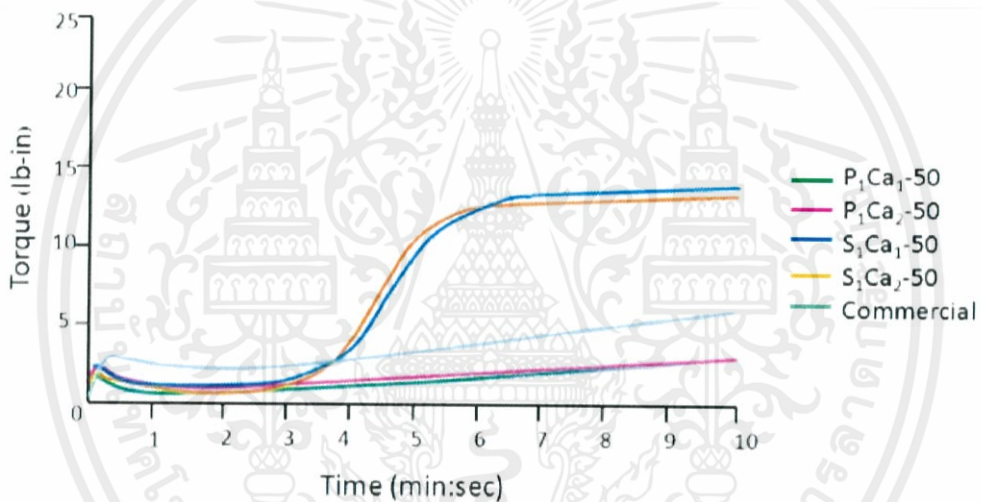
ในการทดสอบยางนั้น จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการที่ยางจะเกิดการเชื่อมโยงสมบูรณ์ เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเวลาที่จะเกิดการเชื่อมโยงกับแม่พิมพ์ยางที่ใช้ในทางการค้า ซึ่งต้องทำการหาเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยง หรือเวลาสกอร์ช (t_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (t_{c90}) ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (MDR) จากการทดสอบพบว่า สารเชื่อมโยงกำมะถัน สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วกว่าสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการเชื่อมโยงกำมะถันที่ใช้เป็นระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (EV) ซึ่งระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันปริมาณน้อย ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมาก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือพันธะเชื่อมโยงโมโนซัลฟิดิกจำนวนมาก ส่งผลให้เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลา สกอร์ช (t_{s2}) สั้นและเวลาเชื่อมโยง (Cure time) เร็วกว่าระบบการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เพราะเปอร์ออกไซด์ที่ใช้มีครึ่งชีวิตยาว จึงทำให้เปอร์ออกไซด์นั้นแตกตัวช้า ว่องไวต่ำ หรือมีเสถียรภาพสูง ส่งผลให้อัตราเร็วการเชื่อมโยงต่ำ และเวลาเริ่มเชื่อมโยงช้า (Scorch time ยาว)

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้มีเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงช้ากว่า แสดงถึงยางมีเวลาในการไหลได้มากกว่าก่อนเกิดการเชื่อมโยง และมีเวลาการเชื่อมโยงที่เร็วกว่า ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตสั้นกว่า สามารถขึ้นรูปแม่พิมพ์ยางได้จำนวนมาก แต่สำหรับยางที่ใช้ในทางการค้ามีเวลาเชื่อมโยงเร็วกว่า แสดงถึงยางมีเวลาในการไหลได้น้อยก่อนเกิดการเชื่อมโยง และมีเวลาในการเชื่อมโยงที่ช้ากว่า ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตนานกว่า สามารถขึ้นรูปแม่พิมพ์ยางได้จำนวนน้อย อย่างไรก็ตามไม่มีรายละเอียดของระบบสาร

เชื่อมโยงของทางการค้า เป็นเพียงการเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 4.3 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร

สูตรยางคอมพาวด์	t_{s2} (min:sec)	t_{c90} (min:sec)	CRI (min ⁻¹)	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)
สูตรที่ 1 : P ₁ Ca ₁ -50	7.52	9.10	63.3	1.00	1.75
สูตรที่ 2 : P ₁ Ca ₂ -50	7.54	9.09	64.5	1.45	1.75
สูตรที่ 3 : S ₁ Ca ₁ -50	3.49	5.11	61.7	1.00	13.75
สูตรที่ 4 : S ₁ Ca ₂ -50	3.22	6.11	34.6	1.00	13.50
Commercial grade	4.21	11.07	14.6	0.92	4.83



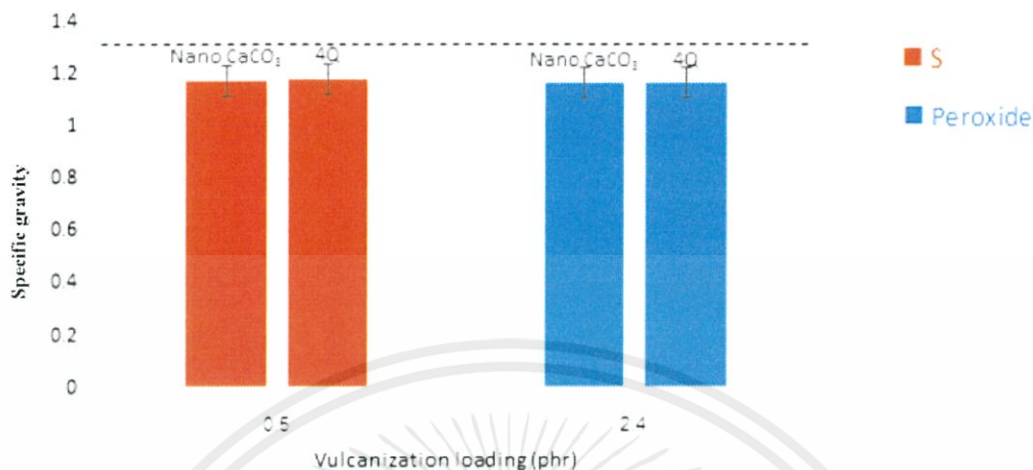
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบเชื่อมโยงกำมะถัน ปริมาณ 0.5 phr และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 2.4 phr

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแม่พิมพ์ยาง

ในการทดสอบผลของระบบสารเชื่อมโยงกำมะถัน ที่ปริมาณ 0.5 phr และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ที่ปริมาณ 2.4 phr ต่อสมบัติทางกายภาพของยาง เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ แสดงดังรูปที่ 4.2

จากการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวด์พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์และสารเชื่อมโยงกำมะถัน มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเชื่อมโยงทั้งสองระบบใช้สารตัวเติมในปริมาณเท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม (Rule of Mixture) [36] กล่าวคือสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเท่ากับปริมาณของสารแต่ละองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ความถ่วงจำเพาะของยางที่ใช้สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์และสารเชื่อมโยงกำมะถันมีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้าเล็กน้อย ส่งผลให้ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้มีน้ำหนักที่เบากว่า มีราคาต่อปริมาตรถูกกว่าหากใช้สารในปริมาณที่

เท่ากัน

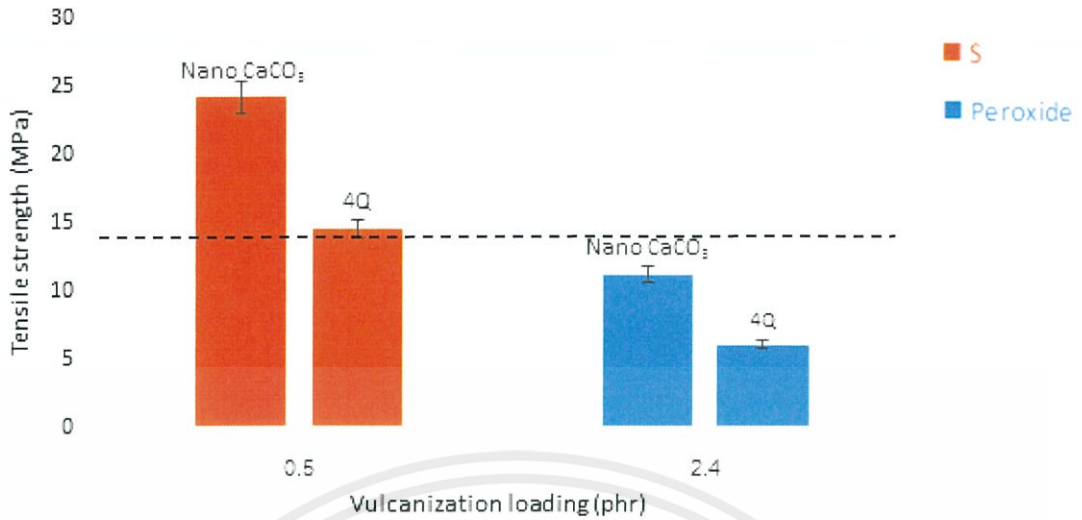


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

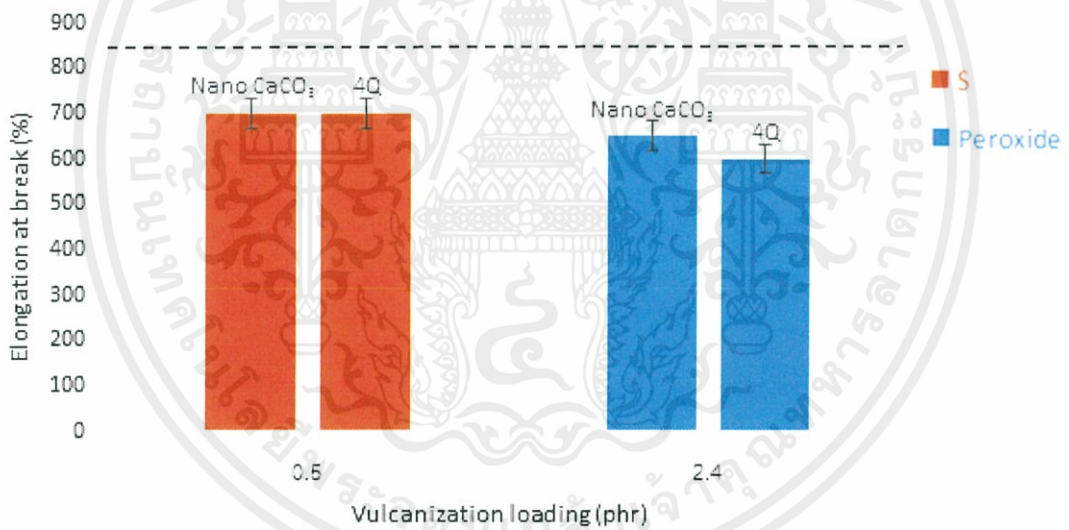
จากการทดสอบความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด พบว่า เมื่อใช้สารเชื่อมโยงกำมะถันเป็นสารเชื่อมโยงในยางจะมีค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดมีค่ามากกว่ายางที่ใช้สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงกำมะถันที่เกิดขึ้นเป็นพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือโมโนซัลไฟด์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากให้พันธะเชื่อมโยงจำนวนมาก นอกจากนี้พันธะเชื่อมโยงที่เกิดเป็นพันธะระหว่างคาร์บอนและกำมะถัน (C-S bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงมากทำให้มีสมบัติความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดที่ดีส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดี แต่สำหรับการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์นั้น ถึงแม้ว่าจะเกิดการเชื่อมด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนและคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะที่สูงกว่า แต่มีข้อจำกัดในด้านความว่องไวต่อปฏิกิริยาต่อสารเคมีบางชนิด เช่น สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน (Oils) ทำให้ได้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่ใช้สารเชื่อมโยงกำมะถันมีค่าสูงกว่า เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวจำนวนมากจึงทำให้มีความแข็งแรง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลที่ดี และสำหรับสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์มีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านความว่องไวต่อปฏิกิริยา ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของทั้งสองระบบมีค่าที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

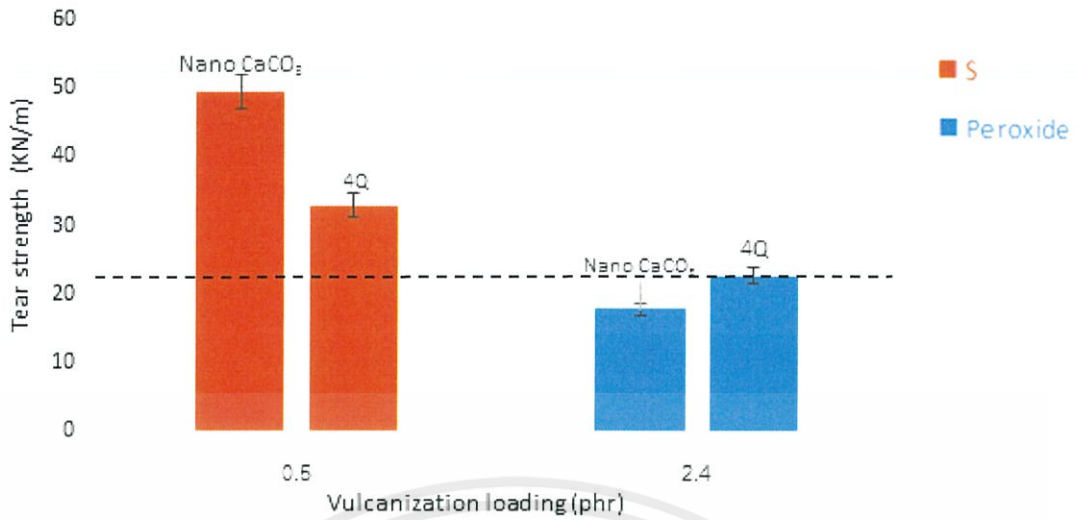


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

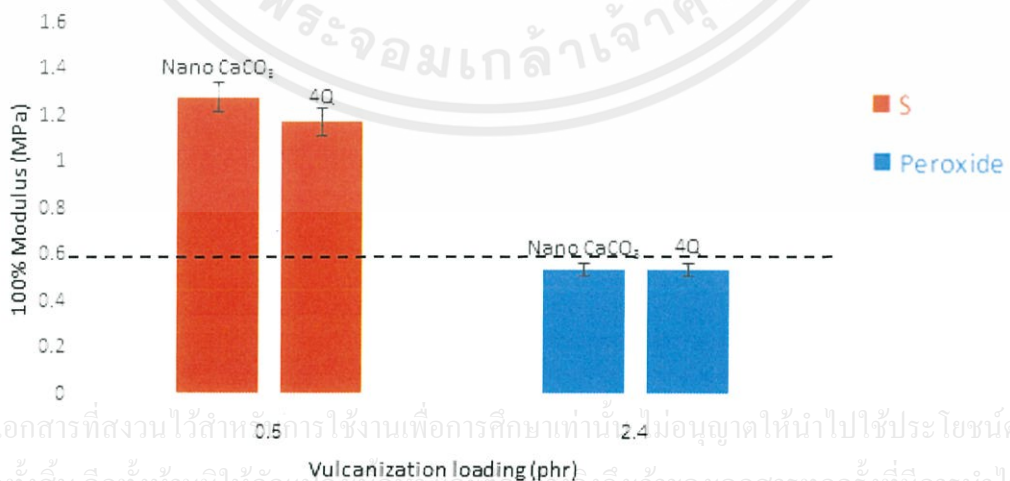
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบมอดุลัสที่ 100% (M100) และความแข็งกด (Hardness) เมื่อใช้สารเชื่อมโยงกำมะถัน และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ จากผลที่แสดงในกราฟที่ 4.6 - 4.7 พบว่า ค่ามอดุลัสและความแข็งกดของยางที่ใช้สารเชื่อมโยงกำมะถัน มีค่าสูงกว่ายางที่ใช้สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดพันธะการเชื่อมโยงที่หนาแน่น ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้อย่างจำกัด เพราะเกิดโครงสร้างร่างแห (Tight network) เป็นผลให้ค่ามอดุลัสและความแข็งกดมีค่ามาก

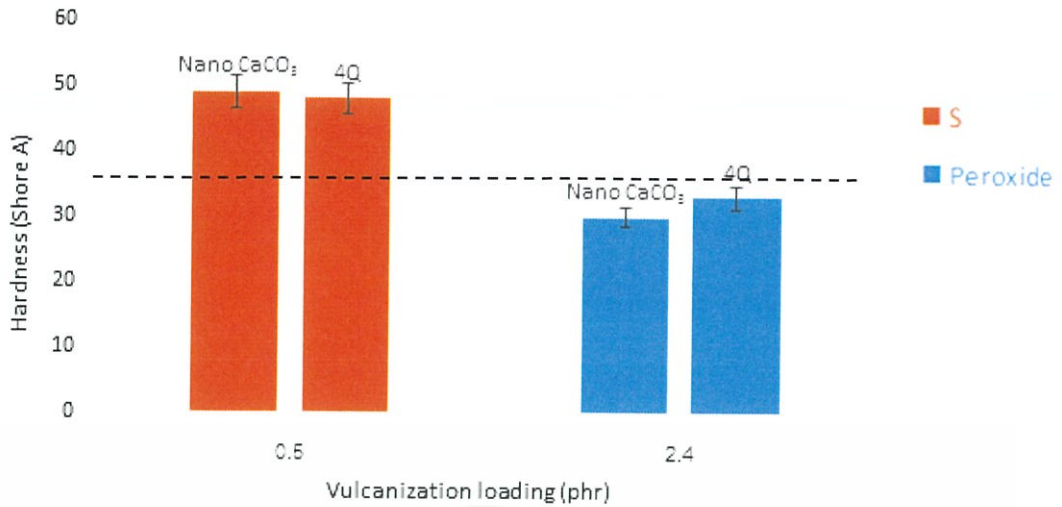
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า มอดุลัสที่ 100% และความแข็งกดของยางที่ใช้สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์มีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากสารประกอบเปอร์ออกไซด์นั้นมีข้อจำกัดในด้านความว่องต่อปฏิกิริยาต่อสารเคมี จึงมีผลต่อพันธะการเชื่อมโยงยาง และส่งผลให้ยางคอมพาวด์นั้นนิ่มกว่าเล็กน้อย ส่วนยางที่ใช้สารเชื่อมโยงกำมะถัน มีค่ามอดุลัสและความแข็งกดสูงกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากการเชื่อมโยงจำนวนมากของพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยว จึงส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความแข็งมากกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 2.4 ม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

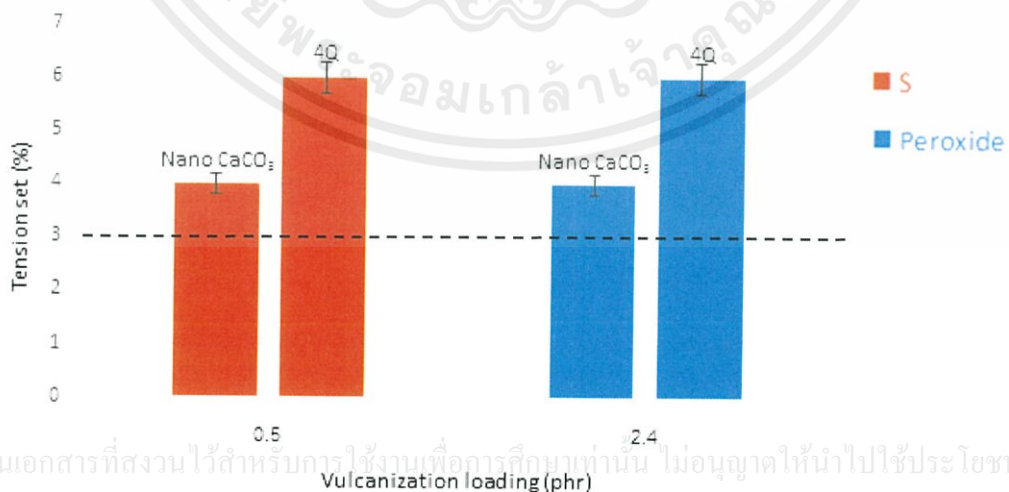
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่ามอดุลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความแข็งกดยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ระบบสารเชื่อมโยงต่างกัน
เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบสมบัติการยืดถาวร (Tension set) พบว่า ยางคอมพาวด์ที่ใช้ระบบสารเชื่อมโยงกำมะถัน และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ มีค่าการยืดตัวถาวรเท่ากัน เมื่อใช้สารตัวเติมชนิดเดียวกัน จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่า สารตัวเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อใช้สารเชื่อมโยงกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ มีค่าการยืดตัวถาวรที่ต่ำกว่าสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 4Q เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กกว่าสามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างยางทำให้เกิดเป็นยางบาวด์ (Bound rubber) คือยางที่ติดกับอนุภาคของสารตัวเติม ซึ่งส่งผลต่อการยืดตัวเมื่อได้รับแรง ทำให้การยืดตัวถาวรมีน้อย

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าการยืดถาวรของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารเชื่อมโยงกำมะถัน และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์มีค่ามากกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากยางคอมพาวด์ในงานวิจัยนี้ใช้สารตัวเติมในปริมาณมาก เพื่อลดต้นทุนในการผลิตส่งผลให้สัดส่วนของยางน้อยลง จึงทำให้ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้เกิดการเสีรูปมากกว่าเมื่อได้รับแรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือทั้งหมัดมิได้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการยืดตัวถาวรของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารเชื่อมโยงต่างกัน
เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

จากการศึกษาการทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ (Luperox® 101) และสารเชื่อมโยงกำมะถัน ในการเชื่อมโยงแบบอีวี (EV) พบว่า สมบัติเชิงกลของยางที่ทำการเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงกำมะถัน มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ มีเวลาเชื่อมโยงที่เร็วกว่า มีประสิทธิภาพกว่า ช่วยเพิ่มอัตราการผลิตและ ลดค่าใช้จ่ายพลังงาน จึงเป็นเหตุให้งานวิจัยนี้เลือกใช้การเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงกำมะถันเป็นหลัก เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

4.2 การศึกษาผลของชนิดสารตัวเติม

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เพื่อให้แม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมขึ้นมีสมบัติเทียบเท่ากับแม่พิมพ์ยางที่ใช้ในทางการค้า (Castaldo Gold Label®) นอกเหนือจากสมบัติเชิงกลที่ดีแล้ว เนื้อยางควรมีความละเอียดเพื่อให้เกิดการลอกสายหรือการลอกแบบจากตัวต้นแบบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากเนื้อของแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมขึ้นไม่มีความละเอียดมากพอ อาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเครื่องประดับได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาหาชนิดของสารตัวเติมที่เหมาะสมกับการผลิตแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ โดยงานวิจัยนี้เลือกศึกษาสารตัวเติม 4 ประเภท คือ

1. สารตัวเติมกลุ่มดินขาว ได้แก่ China clay, Nano clay, Nucap® W290, Clay Iceberg®
2. สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ได้แก่ 2Q, 4Q, 4QC, Nano CaCO₃, Calflex-C™
3. สารตัวเติมกลุ่มทัลคัม ได้แก่ Talcum 1250, Mistron® CB, Mistron® Vapor R
4. สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ได้แก่ Sipernat® 820A

รวมถึงใช้สารเชื่อมโยงกำมะถัน ในระบบการเชื่อมโยงอีวี (EV) ที่ปริมาณ 0.5 phr สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ได้แก่ DPTT, CBS และ DPG ที่ปริมาณ 0.8, 1.5 และ 0.5 phr ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เมื่อใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกันในปริมาณ 50 phr

ตารางที่ 4.4 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

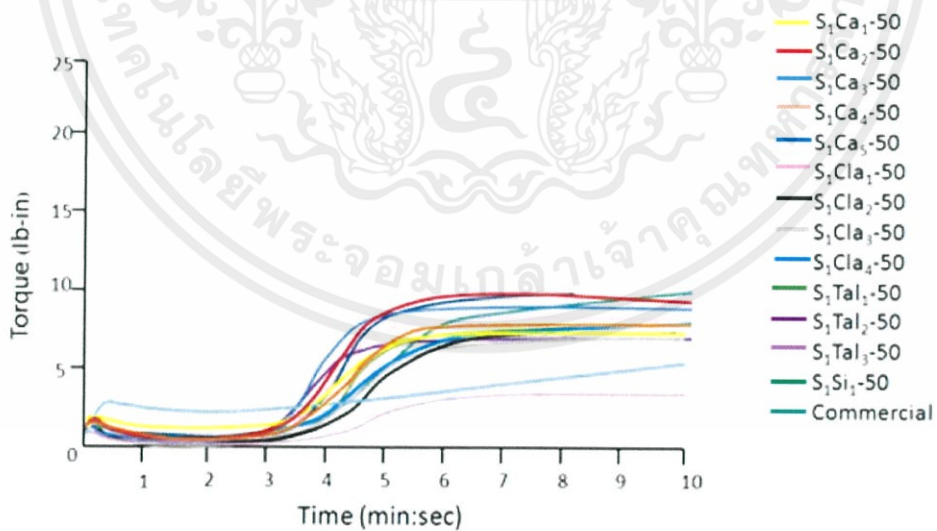
สูตร	ความหมาย
สูตรที่ 1 : S ₁ Ca ₁ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr
สูตรที่ 2 : S ₁ Ca ₂ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (4QC) 50 phr
สูตรที่ 3 : S ₁ Ca ₃ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (2Q) 50 phr
สูตรที่ 4 : S ₁ Ca ₄ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (Calflex-C™) 50 phr
สูตรที่ 5 : S ₁ Ca ₅ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (4Q) 50 phr
สูตรที่ 6 : S ₁ Cl ₁ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (China clay) 50 phr
สูตรที่ 7 : S ₁ Cl ₂ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (Clay Iceberg®) 50 phr
สูตรที่ 8 : S ₁ Cl ₃ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (Nucap® W290) 50 phr
สูตรที่ 9 : S ₁ Cl ₄ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (Nano clay) 50 phr
สูตรที่ 10 : S ₁ Tal ₁ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ทัลคัม (Talcum 1250) 50 phr
สูตรที่ 11 : S ₁ Tal ₂ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ทัลคัม (Mistron® CB) 50 phr
สูตรที่ 12 : S ₁ Tal ₃ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ทัลคัม (Mistron® Vapor R) 50 phr
สูตรที่ 13 : S ₁ Si ₁ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ซิลิกา (Sipernat® 820A) 50 phr

เมื่อทำการเชื่อมโยงยางคอมพาวด์ผสมสารเชื่อมโยงกำมะถัน และนำไปเปรียบเทียบเวลาการเชื่อมโยงกับแม่พิมพ์ยางที่ใช้ในทางการค้า ซึ่งต้องทำการหาเวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (t_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (t_{c90}) ด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน จากการทดสอบพบว่า สารเชื่อมโยงกำมะถันสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เร็วกว่าสารเชื่อมโยงที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากการเชื่อมโยงกำมะถันที่ใช้เป็นระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (EV) ซึ่งระบบนี้ใช้ปริมาณกำมะถันปริมาณน้อย ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมาก ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือพันธะเชื่อมโยงโมโนซัลฟิดิก จำนวนมาก ส่งผลให้เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ชสั้นและเวลาเชื่อมโยงเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามไม่มีรายละเอียดของสารเชื่อมโยงของทางการค้า เป็นเพียงการเปรียบเทียบค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร

สูตรยางคอมพาวด์	t_{s2} (min:sec)	t_{c90} (min:sec)	CRI (min ⁻¹)	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)
สูตรที่ 1 : S ₁ Ca ₁ -50	3.58	5.25	59.9	1.00	6.75
สูตรที่ 2 : S ₁ Ca ₂ -50	3.49	5.30	55.3	1.00	9.25
สูตรที่ 3 : S ₁ Ca ₃ -50	3.32	4.50	84.7	1.00	9.00
สูตรที่ 4 : S ₁ Ca ₄ -50	3.45	5.15	58.8	1.00	7.75
สูตรที่ 5 : S ₁ Ca ₅ -50	3.52	5.44	52.1	0.75	9.25
สูตรที่ 6 : S ₁ Cl ₁ -50	3.52	5.29	56.5	1.00	8.25
สูตรที่ 7 : S ₁ Cl ₂ -50	4.28	6.31	49.3	1.00	7.00
สูตรที่ 8 : S ₁ Cl ₃ -50	4.2	5.55	74.1	1.00	5.75
สูตรที่ 9 : S ₁ Cl ₄ -50	4.12	5.55	68.9	1.00	7.00
สูตรที่ 10 : S ₁ Tal ₁ -50	4.38	6.30	52.1	1.00	6.00
สูตรที่ 11 : S ₁ Tal ₂ -50	3.25	5.11	53.8	1.00	7.25
สูตรที่ 12 : S ₁ Tal ₃ -50	4.51	6.32	55.2	1.00	4.50
สูตรที่ 13 : S ₁ Si ₁ -50	3.28	4.43	86.9	1.75	9.50
Commercial grade	4.21	11.07	14.6	0.92	4.83

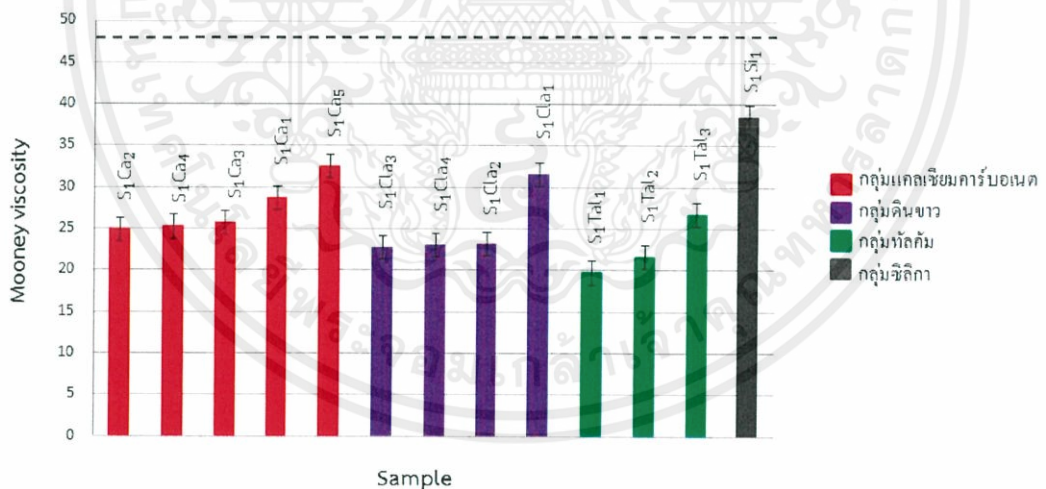


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้สารตัวเติม
 ในปริมาณ 50 phr

4.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแม่พิมพ์ยาง

ค่าความหนืดมูนนี่เป็นค่าแสดงการไหลได้ของยาง ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจค่าความหนืดมูนนี่ที่ต่ำ เนื่องจากค่าความหนืดมูนนี่ที่ต่ำนั้น แสดงถึงความสามารถในการไหลของยางไปตามรายละเอียดที่ซับซ้อนของแม่พิมพ์โลหะได้ดี เพื่อให้ได้รายละเอียดของแม่พิมพ์ที่สมบูรณ์ ดังนั้นจากการศึกษาค่าความหนืดมูนนี่ แสดงดังกราฟที่ 4.10 พบว่า ยางคอมพาวด์ที่มีความหนืดมูนนี่ต่ำที่สุดในสารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตคือ ชนิด 4QC กลุ่มดินขาวคือ Nucap® W290 กลุ่มทัลคัมคือ Talcum 1250 และกลุ่มซิลิกาคือ Sipernat® 820A เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนนี่ของสารตัวเติมในแต่ละกลุ่มทั้งหมด พบว่าสารตัวเติมในกลุ่มซิลิกานั้นมีค่าความหนืดมูนนี่สูงสุด เพราะขนาดอนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็กถึง 0.01 - 0.03 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าสารตัวเติมกลุ่มอื่นๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก จึงเกิดการยึดเกาะกับยางได้ดีกว่า เนื่องจากสามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างยางได้ง่ายทำให้เกิดเป็นยางบาวด์ (Bound rubber) คือยางที่ติดกับอนุภาคของสารตัวเติม จึงส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ของสารตัวเติมซิลิกานั้นสูงที่สุด

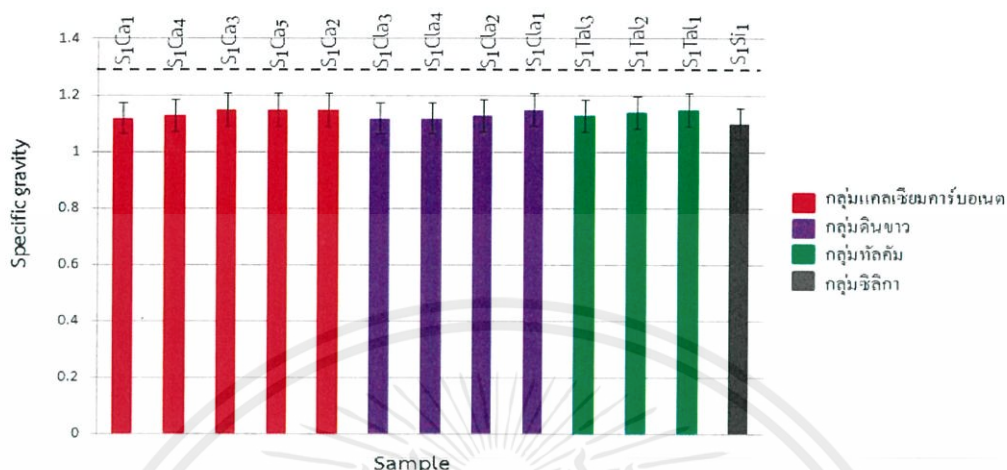
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ความหนืดมูนนี่ของยางที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่ม แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ทัลคัม และซิลิกา ที่ปริมาณ 50 phr นั้นมีค่าความหนืดมูนนี่ที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า คาดว่ามาจากสารตัวเติมที่ใช้ในยางคอมพาวด์สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เกรดของสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าทางการค้า จึงทำให้ความหนืดมูนนี่นั้นต่ำกว่าและส่งผลให้การไหลของยางนั้นไหลได้ดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามไม่มีรายละเอียดของสารตัวเติมของทางการค้าเป็นเพียงการเปรียบเทียบความสามารถในการไหลของยางเท่านั้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

จากการศึกษาความถ่วงจำเพาะ แสดงดังกราฟที่ 4.11 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมเท่ากัน ความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวด์มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของสารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ทัลคัม และซิลิกา มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.7, 2.6, 2.8 และ 2.3 - 2.6 ตามตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้ยางคอมพาวด์มีค่าความถ่วงจำเพาะไม่ต่างกันมากนัก

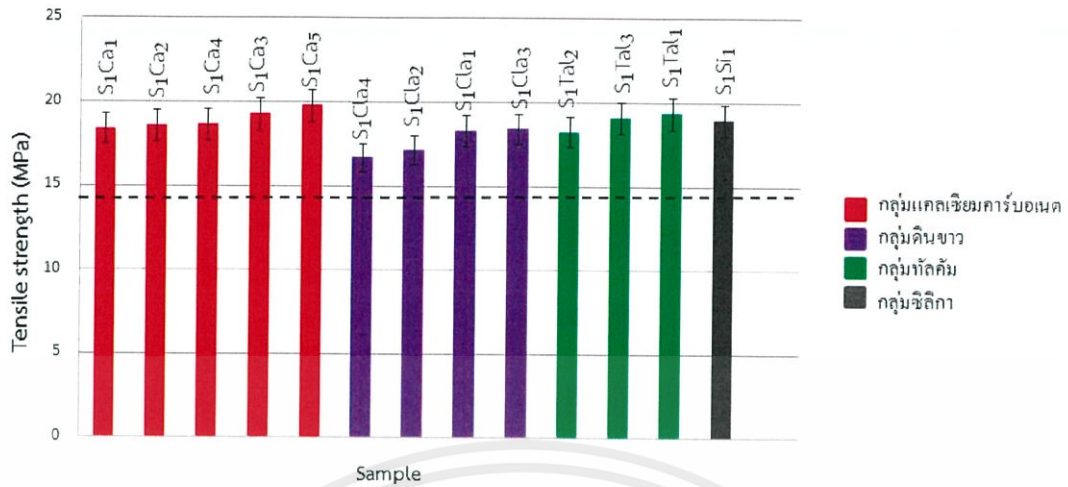
เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ความถ่วงจำเพาะของยางที่ใช้สารตัวเติมทุกกลุ่มมีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า



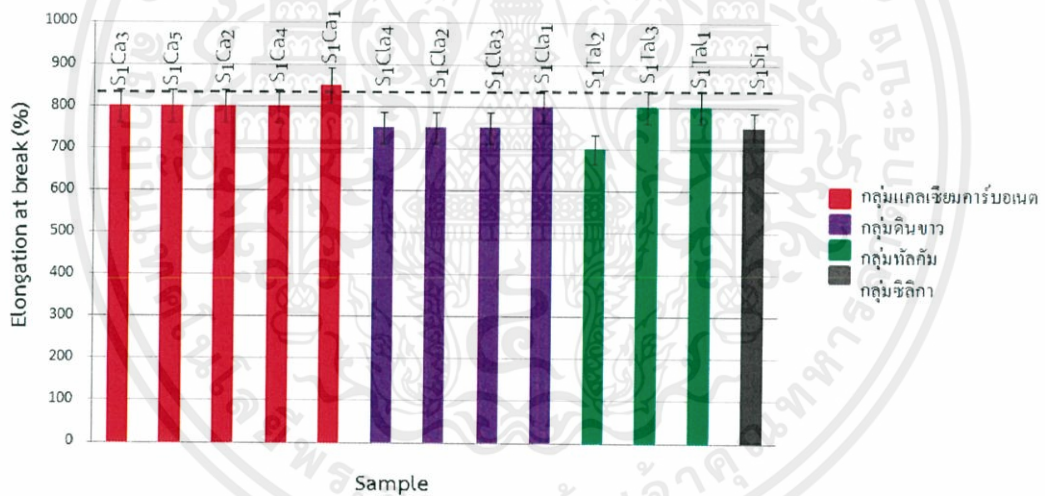
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

จากการศึกษาความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด แสดงดังรูปที่ 4.12 - 4.14 พบว่า ยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ซัลเฟอร์ และซิลิกา มีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ในแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากกลุ่มสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และซัลเฟอร์ เป็นกลุ่มสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ยกเว้นกลุ่มสารตัวเติมซิลิกาที่เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการใส่สารคู่ควบจึงทำให้ยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมกลุ่มซิลิกานั้นมีค่าที่ไม่แตกต่างจากกลุ่มสารตัวเติมชนิดที่ไม่เสริมแรง และสำหรับค่าความแข็งแรงฉีกขาดนั้นพบว่า ยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และซัลเฟอร์ มีแนวโน้มที่ใกล้เคียง เนื่องจากเป็นสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง เป็นสารตัวเติมที่มีอนุภาคค่อนข้างใหญ่และเกิดอันตรกิริยากับยางต่ำ ยกเว้นสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา เป็นสารตัวเติมกลุ่มเสริมแรงซึ่งให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาดที่สูงมากที่สุด ซึ่งสูงกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมกลุ่มอื่น ถึงแม้ว่าซิลิกานั้นไม่ได้ใส่สารคู่ควบ แต่เนื่องด้วยสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงจึงทำให้มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดที่โดดเด่น อีกทั้งขนาดอนุภาคของซิลิกานั้นมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากกว่าสารตัวเติมกลุ่มอื่น และบางบริเวณอาจเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับยางได้ดี จึงสามารถเสริมแรงให้แก่ยางได้ดีกว่าสารตัวเติมกลุ่มอื่น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ส่งผลให้ความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าที่สูง

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่ใช้สารตัวเติมทุกกลุ่มมีค่าสูงกว่ายางที่ใช้ในทางการค้าส่วนเปอร์เซ็นต์การยืดออกสาร ณ จุดขาด ของสารตัวเติมทุกกลุ่มนั้น มีแนวโน้มที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

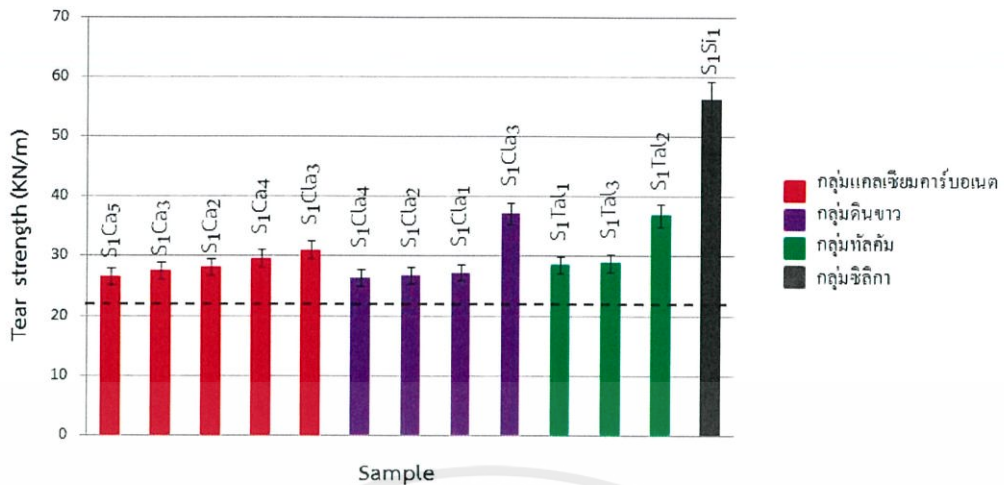


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

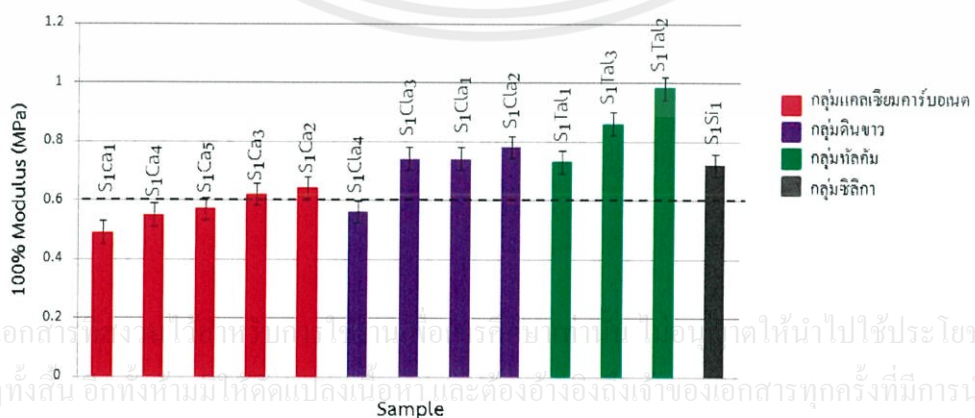
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิด เมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบมอดูลัสที่ 100% (M100) จากผลที่แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า ยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำที่สุดและสารตัวเติมในกลุ่มทัลคัมมีค่าสูงสุด ส่วนสารตัวเติมในกลุ่มดินขาวและซิลิกา มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เป็นผลเนื่องจากกลุ่มสินแร่แต่ละกลุ่มนั้นมีความแข็งแรงของสินแร่ที่ไม่เท่ากัน โดยสารตัวเติมในกลุ่มซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และทัลคัมมีค่าความแข็งแรงเท่ากับ 6-7, 3, 2.5 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งไม่เป็นไปตามกฎของการผสม คาดว่าเกิดจากตำหนิ (Defect) ของชิ้นงานยางคอมพาวด์ที่นำไปทดสอบ เนื่องจากแรงดึงนั้นขึ้นอยู่กับตำหนิของชิ้นงานจึงส่งผลให้มอดูลัสที่ 100% นั้นไม่เป็นไปตามทฤษฎีกล่าวคือ สมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเท่ากับปริมาณของสารแต่ละองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้ามากกว่าสารตัวเติมในกลุ่มอื่นๆ คาดว่าเกิดจากการใช้สารตัวเติมที่มีค่าความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกันเป็นผลให้ค่ามอดูลัสที่ 100% นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับสารตัวเติมของทางการค้าเป็นเพียงการเปรียบเทียบความแข็งแรงของยางคอมพาวด์เท่านั้น

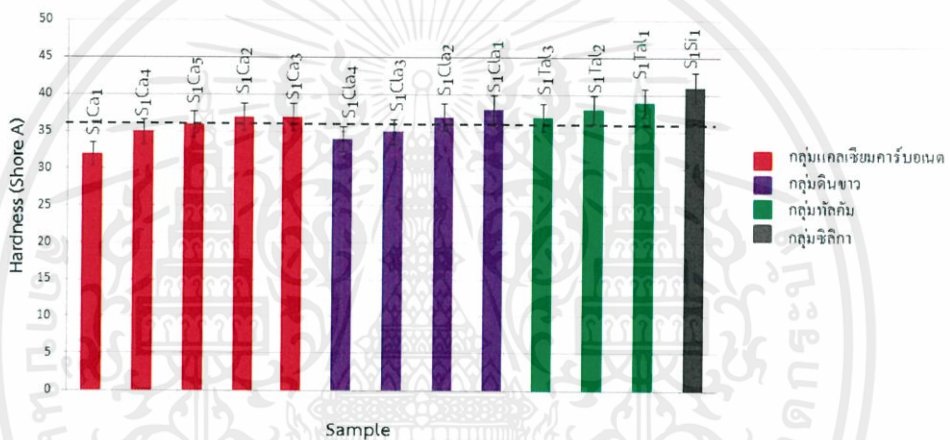


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่ามอดูลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่ามอดูลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบความแข็งกตจากผลที่แสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ความแข็งกตมีค่าแตกต่างกันเป็นผลเนื่องจากกลุ่มสินแร่แต่ละกลุ่มนั้นมีความแข็งของสินแร่ที่ไม่เท่ากัน โดยยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา มีค่าสูงที่สุดเนื่องมาจากค่า Mohs hardness สูงถึง 6 - 7 ส่วนสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว มีค่ารองลงมา เท่ากับ 3, 2.5 ตามลำดับ ส่วนทลคัมมีค่า Mohs hardness เท่ากับ 1 แต่ให้ความแข็งกตที่ใกล้เคียงกับสารตัวเติมกลุ่มดินขาว ซึ่งไม่เป็นไปตามกฎของการผสม คาดว่าเกรตของทลคัมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขนาดของอนุภาคที่ใกล้เคียงกับสารตัวเติมกลุ่มดินขาว แต่อย่างไรก็ตามไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับสารตัวเติมของทางการค้าเป็นเพียงการเปรียบเทียบความแข็งของยางคอมพาวด์เท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าความแข็งกตของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมทุกกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

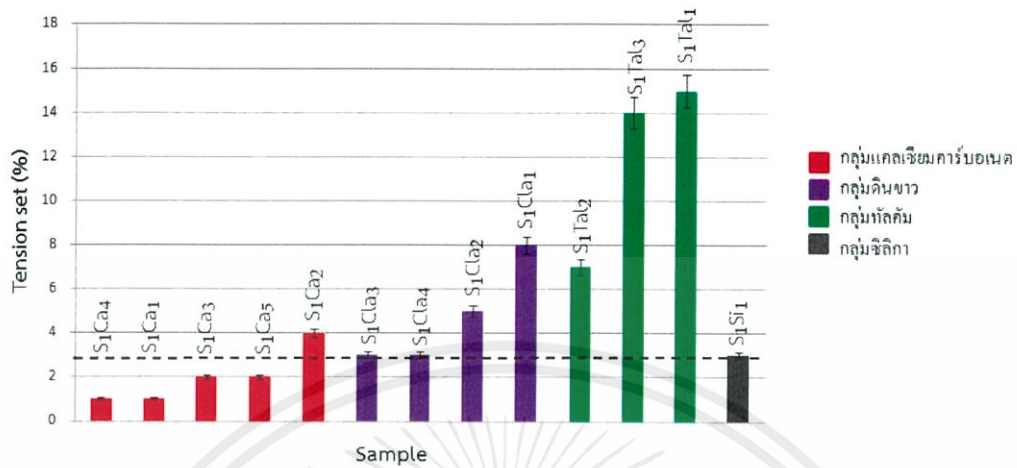


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งกตของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบสมบัติการยึดถาวรพบว่า ยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมในแต่ละกลุ่มนั้นมีค่าการยึดถาวรที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมในกลุ่มทลคัมมีค่าสูงกว่าสารตัวเติมกลุ่มอื่น เนื่องจากทลคัมนั้นมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ มีแรงยึดระหว่างชั้นต่ำ [6] จึงสามารถเกิดการหลุดออกของชั้น (Delamination) ได้ง่ายเมื่อได้รับแรง จึงเป็นผลให้ค่าการยึดถาวรนั้นสูงที่สุด รองลงมาเป็นยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มดินขาว เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นชั้นเหมือนกันกับทลคัม แต่มีแรงยึดระหว่างชั้นสูงกว่า [19] เป็นผลให้ค่าการยึดถาวรต่ำกว่า ส่วนยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าการยึดถาวรต่ำสุด และยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมซิลิกามีการยึดถาวรไม่ต่างกับยางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากซิลิกานั้นมีขนาดเล็กทำให้เกิดเป็นยางออกคลูด์ (Occluded rubber) ได้มาก นอกจากนี้กลุ่มสินแร่ยังมีความสามารถในการดูดสารเคมีที่ไม่เท่ากัน คาดว่าทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้สมบัติการยึดถาวรนั้นแตกต่างกันดังผลที่แสดงในรูปที่ 4.17

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าการยึดถาวรของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นมีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้ามากกว่ายางคอม-

พาวด์ที่ใช้สารตัวเติมกลุ่มอื่น ส่งผลให้ยางคอมพาวด์เสียรูปถาวรน้อยกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการยืดถาวรของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมต่างกัน (50 phr) เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้แต่ละชนิด เมื่อใช้สารตัวเติมต่างกันพบว่า สารตัวเติมที่มีสมบัติโดดเด่นทั้งในด้านทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลเมื่อเทียบกับยางทางการค้าแล้ว นั่นคือ สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีราคาถูกกว่า และมี Tension set ที่ต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำการเลือก CaCO_3 ทำการศึกษาในตอนต่อไป

4.3 การศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม

จากการศึกษาชนิดของสารตัวเติม ทำให้ได้สารตัวเติมที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ยางที่ใช้ในทางการค้า รวมถึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ แต่ยังคงขาดสมบัติบางประการ อย่างเช่น ความเนียนของผิวยาง ความนิ่มจึงได้ทำการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมและการบดย่อยยาง โดยทำการศึกษาสารตัวเติมที่ปริมาณ 70 phr โดยงานวิจัยนี้เลือกศึกษาสารตัวเติมที่อยู่ในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต 2 ตัวได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ และ 2Q

4.3.1 ลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกัมมะถัน เมื่อใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 70 phr

ตารางที่ 4.6 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

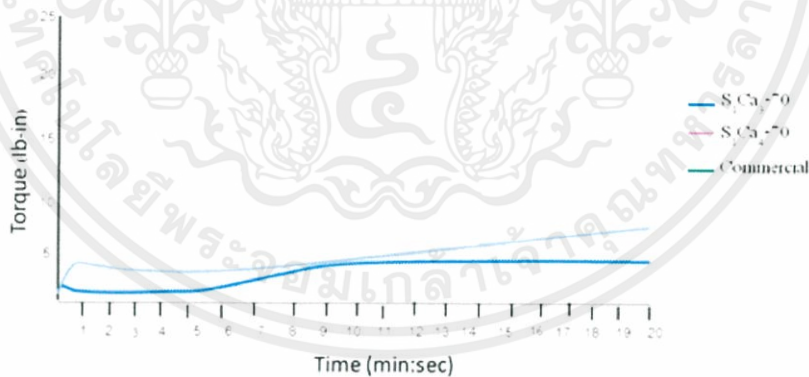
สูตร	ความหมาย
สูตรที่ 3 : S_1Ca_3-70	สารเชื่อมโยงกัมมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (2Q) 70 phr
สูตรที่ 4 : S_1Ca_4-70	สารเชื่อมโยงกัมมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (Calflex-C™) 70 phr

เมื่อทำการเชื่อมโยงยางคอมพาวด์ด้วยสารเชื่อมโยงกำมะถัน แล้วทำการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตเป็น 70 phr และเปลี่ยนสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงในกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides) ซึ่งสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงชนิดนี้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงชนิดดีเลย์แอ็กชัน (Delayed-action accelerators) ทำให้มีเวลาเพียงพอในการเชื่อมโยง และด้วยจากโครงสร้างของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงนั้นมีหมู่อัลคิล ในโครงสร้างเป็นหมู่ใหญ่ ให้โปรตอน (H^+) จึงช่วยช่วยให้จุดเริ่มการเชื่อมโยงอย่างช้า ให้เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยง หรือเวลาสกอร์ช (t_{s2}) นานขึ้น ส่งผลให้ยางสามารถมีเวลาในการเคลื่อนที่หรือไหลได้นานขึ้น

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเวลาการเชื่อมโยงกับแม่พิมพ์ยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงช้าลง ส่งผลให้เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (t_{s2}) ยาวและเวลาเชื่อมโยงนานขึ้น แต่มีค่าใกล้เคียงกับทางการค้ามากที่สุด

ตารางที่ 4.7 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร

สูตรยางคอมพาวด์	t_{s2} (min:sec)	t_{c90} (min:sec)	CRI (min^{-1})	M_L (lb.in)	M_H (lb.in)
สูตรที่ 3 : S_1Ca_3-70	6.56	10.00	29.1	1.00	3.25
สูตรที่ 4 : S_1Ca_4-70	7.02	10.35	30.0	1.50	1.25
Commercial grade	4.21	11.07	14.6	0.92	4.83



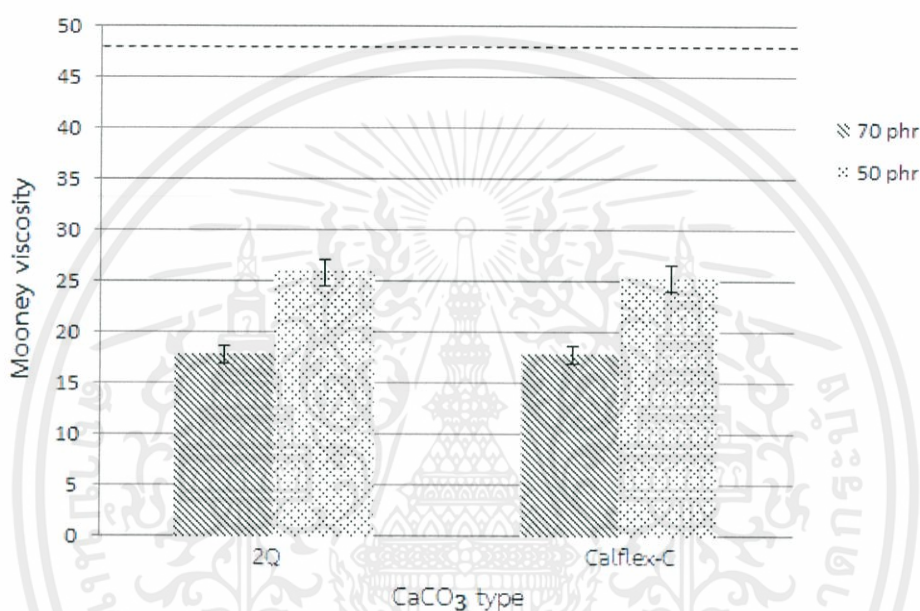
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 70 phr

4.3.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแม่พิมพ์ยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารจากการเปรียบเทียบเมื่อเพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-CTM และ 2Q ที่ส่งผลต่อความหนืดมูนนี่แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า ค่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มต่ำลง เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว การเพิ่มสารตัวเติมจะส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมกับโมเลกุลยางมากขึ้น แต่งานวิจัยนี้ได้เพิ่ม

น้ำมัน และ White factice นอกจากนี้ยังทำการบดย่อยยาง จึงทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดมูนนี้ลดลง ยางไหลได้มากขึ้น เนื่องจากสารช่วยกระบวนการผลิตนี้แทรกตัวอยู่ระหว่าง สายโซ่ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้ได้แม่พิมพ์ยางที่ยืดหยุ่นดีขึ้น นิ่มตัวขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ได้เนื้อยางที่มีความเนียนเพิ่มขึ้น เพื่อถ่ายทอดการกรีด

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าความหนืดมูนนี้ของยางที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™ และ 2Q ที่ปริมาณ 70 phr มีค่าต่ำกว่ากับยางที่ใช้ในทางการค้า เป็นผลเนื่องมาจากยางคอมพาวด์ในงานวิจัยได้ทำการเพิ่มน้ำมัน และ White factice พร้อมทั้งการบดย่อยยาง จึงส่งผลให้มีความสามารถในการไหลของยางได้มากกว่า

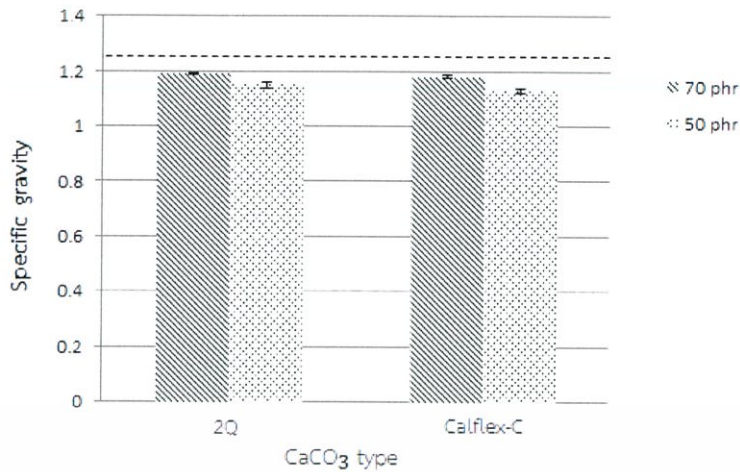


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี้ (ML 1+4(100°C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

จากการศึกษาความถ่วงจำเพาะแสดงดังกราฟที่ 4.20 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ และ 2Q จาก 50 phr เป็น 70 phr ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม กล่าวคือสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเท่ากับปริมาณของสารแต่ละองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณที่ 70 phr ที่เท่ากันพบว่า ยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 2Q มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติม Calflex-C™ เล็กน้อย เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของ 2Q มีค่าเท่ากับ 2.7 ซึ่งเป็นค่าที่มากกว่า Calflex-C™ ที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.4 - 2.6

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™ และ 2Q ที่ปริมาณ 70 phr มีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

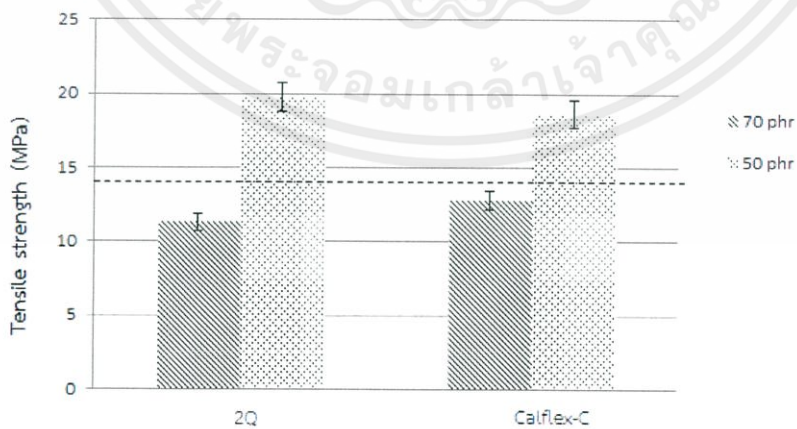
เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

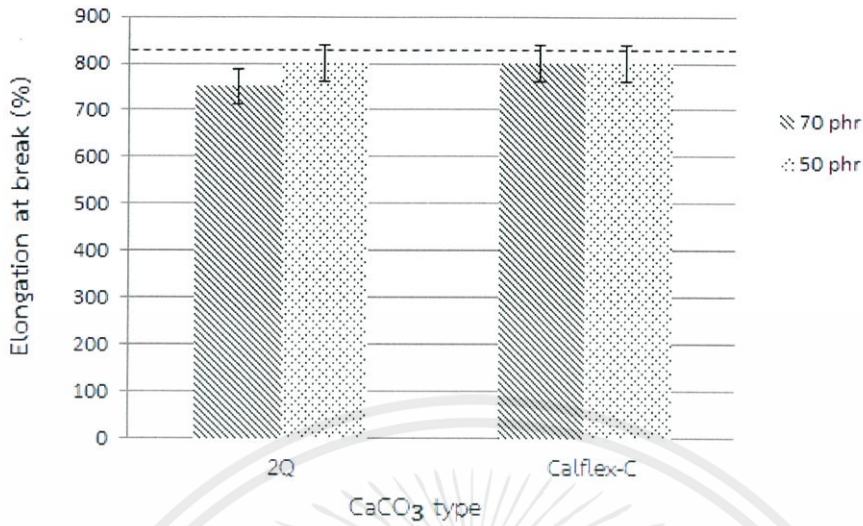
จากการศึกษาความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด แสดงดังรูปที่ 4.21 - 4.23 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ และ 2Q พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เป็นผลเนื่องจากที่ปริมาณ 70 phr นั้น ได้ทำการบดย่อยยาง ซึ่งทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลยางให้สั้นลง นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมนั้นไม่สม่ำเสมอและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) อีกทั้งสารช่วยกระบวนการผลิตอย่าง White factice และ Oil ที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ให้อย่างยืดหยุ่นดีขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมปริมาณ 70 phr มีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มสูงกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

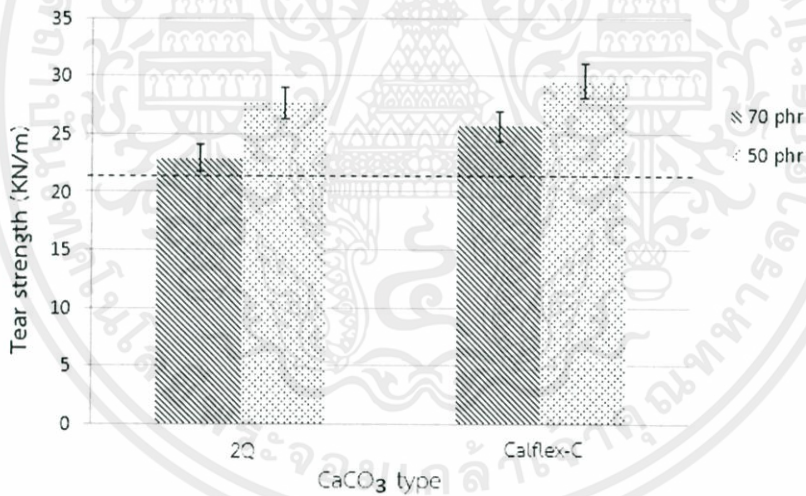


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

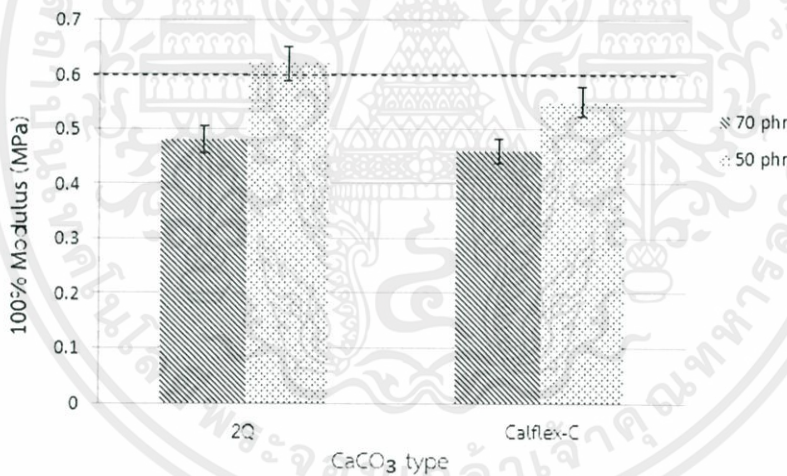


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

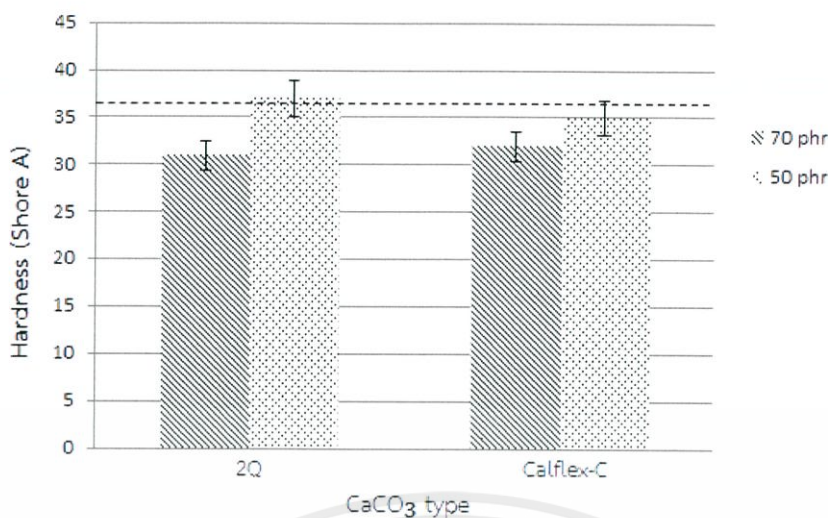
การทดสอบมอดุลัสที่ 100% และความแข็งกด จากผลที่แสดงในรูปที่ 4.24 - 4.25 เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ และ 2Q พบว่า มอดุลัสที่ 100% และความแข็งกดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งปกตินั้นควรมีค่าแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ตามกฎของการผสม แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ ที่ปริมาณสารตัวเติม 70 phr ได้เพิ่ม Peptizer, น้ำมันและ White factice อีกทั้งยังทำการบดย่อยยาง จึงทำให้ยางคอมพาวด์มีค่ามอดุลัส และความแข็งกดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสารช่วยกระบวนการผลิตนี้แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้มากขึ้น และจากการบดย่อยยาง ทำให้สายโซ่สั้นลง ซึ่งระหว่างการผลิตนั้น ออกซิเจนในบรรยากาศเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยางที่ขาดออกจากกันไม่ใหรวมตัวกันได้แม้พิมพ์ยางจึงยืดหยุ่นดีขึ้น นิ่มตัวขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ได้เนื้อยางที่มีความเนียนเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่ามอดุลัสที่ 100% และความแข็งกดของยางที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™ และ 2Q ที่ปริมาณ 70 phr มีแนวโน้มที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากในงานวิจัยได้ทำการบดย่อยยาง และเพิ่มสารช่วยกระบวนการผลิต จึงส่งผลให้ยางคอมพาวด์ในงานวิจัยนี้ มีความนิ่มและยืดหยุ่นมากกว่ายางคอมพาวด์ของทางการค้า



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่ามอดุลัส 100% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

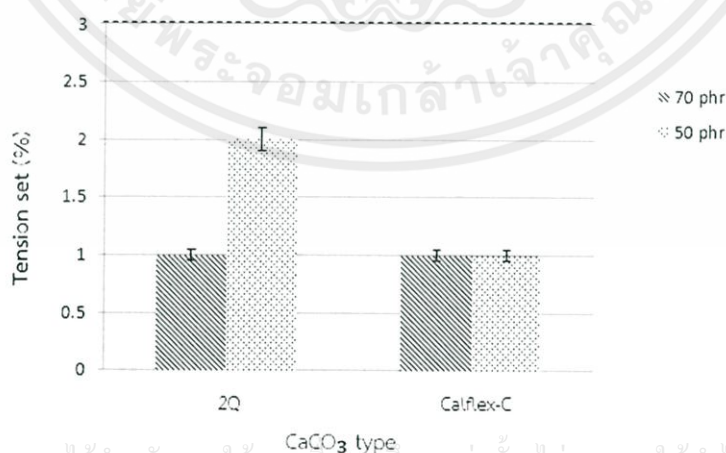
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน
เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบสมบัติการยืดถาวร พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ และ 2Q พบว่า ค่าสมบัติการยืดถาวรมีค่าลดลง แสดงถึงการคืนตัวกลับของยางได้มาก คาดว่าแคลเซียมคาร์บอเนตในงานวิจัยนั้น มีการเคลือบสารช่วยกระจายตัว ทำให้มีการยึดเกาะกับยางได้ดี อีกทั้งใช้ระบบสารเชื่อมโยงก้ำมะถันแบบ EV ซึ่งเกิดพันธะเชื่อมโยงก้ำมะถันอะตอมเดี่ยวจำนวนมาก มีความแข็งแรงของพันธะสูง เมื่อได้รับแรงจึงเกิดการเสียสภาพถาวรน้อย เพราะฉะนั้นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตจึงส่งผลให้ยางคอมพาวด์เกิดการยืดเกาะกับอนุภาคที่มากขึ้น จึงช่วยให้ยางคอมพาวด์คืนตัวได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าสมบัติการยืดถาวรของยางที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™ และ 2Q ที่ปริมาณ 70 phr มีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าการยืดถาวรของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณของสารตัวเติมต่างกัน
เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

4.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา

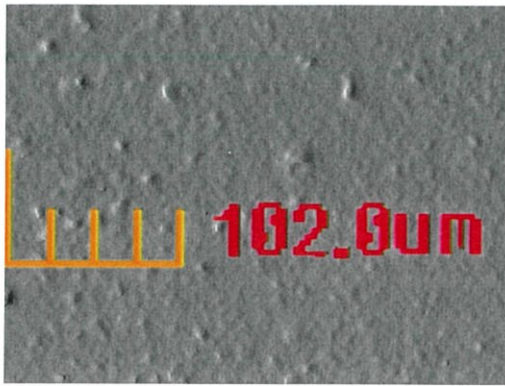
การวิจัยนี้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยา โดยทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เนื่องจากคณะผู้จัดทำต้องการให้เห็นภาพถึงความเรียบเนียนในระดับการใช้งานจริง ในด้านความง่ายต่อการกรีดเพื่อเอาต้นแบบโลหะออก ว่าแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้นั้น มีพื้นผิวที่เรียบเนียนมากกว่าที่ใช้ในทางการค้า และเพื่อให้ผู้ประกอบการได้เห็นภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งได้ทำการศึกษาสารตัวเติม 8 ชนิด ที่ปริมาณ 50 phr และ 70 phr โดยที่ปริมาณ 50 phr ได้ศึกษาสารตัวเติม 6 ชนิด คือ 2Q, Calflex-C™, China clay, Clay Iceberg®, Nucap® W290, Sipernat® 820A ส่วนที่ปริมาณ 70 phr ได้ศึกษาสารตัวเติม 2 ชนิดที่ได้พัฒนาจาก 6 ชนิด ได้แก่ 2Q และ Calflex-C™ ซึ่งจากการศึกษาได้ผลดังนี้

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางที่มีปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 2Q และ Calflex-C™ ที่ปริมาณ 50 phr พบว่า ลักษณะพื้นผิวของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 2Q ดังรูปที่ 4.27 (a) มีลักษณะพื้นผิวของยางคอมพาวด์ที่มีความขรุขระเล็กน้อย และจากรูปที่ 4.27 (b) แสดงยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ พบว่า พื้นผิวมีลักษณะเรียบเนียน เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดี และง่ายต่อการกรีด

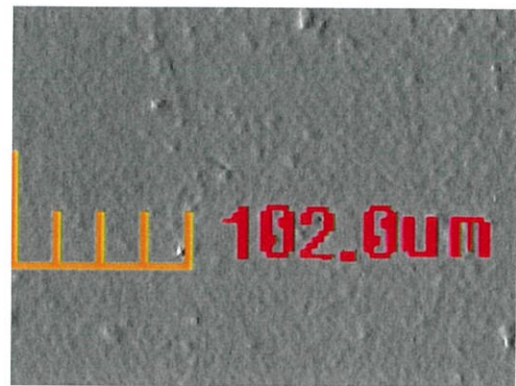
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางคอมพาวด์ที่มีปริมาณสารตัวเติมดินขาวชนิด China clay, Clay Iceberg® และ Nucap® W290 ที่ปริมาณ 50 phr พบว่า ลักษณะพื้นผิวของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติม Clay Iceberg® และ Nucap® W290 (รูปที่ 4.27 (c) และ รูปที่ 4.27 (d) ตามลำดับ) บางบริเวณมีลักษณะความขรุขระของพื้นผิวยางคอมพาวด์เล็กน้อย ส่วนลักษณะพื้นผิวของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติม ดินขาวชนิด China clay จากรูปที่ 4.27 (e) พบว่า มีความขรุขระของผิวยางคอมพาวด์มากกว่าผิวยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติม Clay Iceberg® และ Nucap® W290 โดยเกิดเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ที่มีบริเวณพื้นผิว

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางที่มีปริมาณสารตัวเติมซิลิกาชนิด Sipernat® 280A ที่ปริมาณ 50 phr แสดงดังรูปที่ 4.27 (f) พบว่า พื้นผิวของยางคอมพาวด์มีความเรียบเนียนสม่ำเสมอ เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมซิลิกานั้นมีขนาดเล็ก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลบางสมบัติมากกว่ายางคอมพาวด์ชนิดอื่น

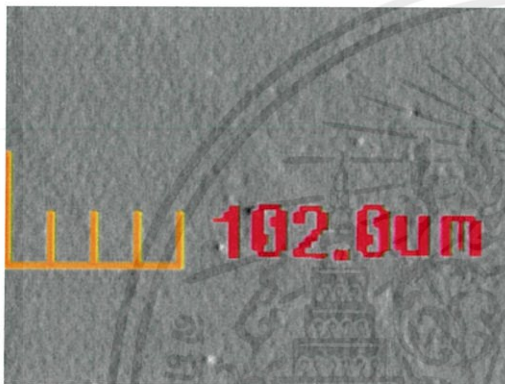
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



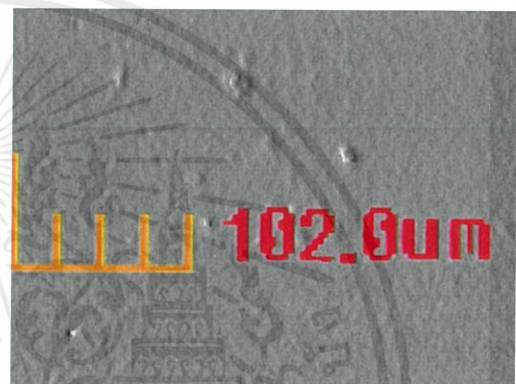
a) 2Q



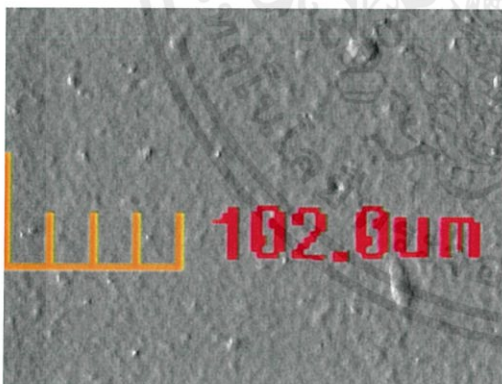
b) Calflex-C™



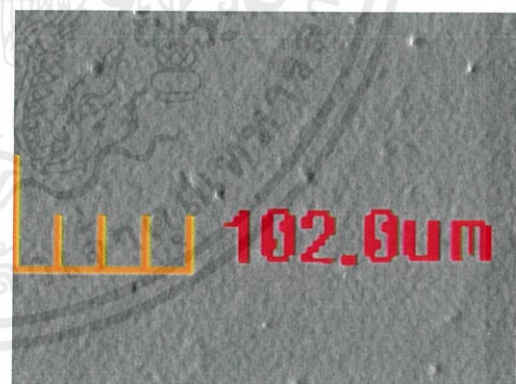
c) Clay Iceberg®



d) Nucap® W290



e) China clay



f) Sipernat® 820A

รูปที่ 4.27 สัณฐานวิทยาของยางคอมพาวด์เมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมที่แตกต่างกัน ในปริมาณ 50 phr ที่กำลังขยาย 47 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางคอมพาวด์ที่มีปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 2Q และ Calflex-C™ ที่ปริมาณ 70 phr พบว่า ลักษณะพื้นผิวของยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติม-แคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 2Q และ Calflex-C™ จากรูปที่ 4.28 (a) และ (b) ตามลำดับ มีลักษณะพื้นผิวที่มีความเรียบเนียนขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม และเมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้งสองจะเห็นได้ว่ายางคอมพาวด์ที่เติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด Calflex-C™ จะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเนียนมากกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิด 2Q เล็กน้อย เนื่องจากมีอนุภาคที่เล็กกว่า ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงฉีกขาดที่สูงกว่า จึงเป็นผลดีต่อการใช้งานด้านการกรีดเพื่อเอาต้นแบบโลหะออก

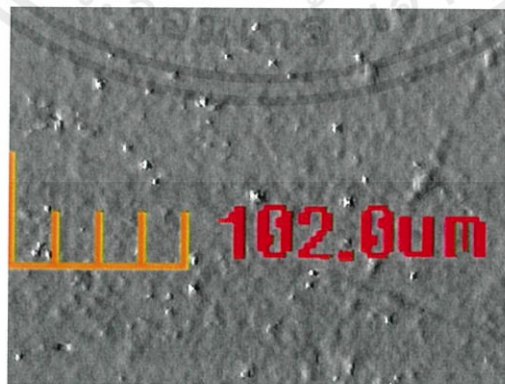
เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยากับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้าดังรูปที่ 4.29 พบว่า ยางคอมพาวด์ในงานวิจัยทั้ง 8 สูตร นั้นมีลักษณะพื้นผิวที่มีความเรียบเนียนมากกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลบางสมบัติของยางคอมพาวด์ที่ได้จากการวิจัยนั้น มีสมบัติที่ดีกว่ายางคอมพาวด์ทางการค้า



a) 2Q

b) Calflex-C™

รูปที่ 4.28 สัณฐานวิทยาของยางคอมพาวด์ เมื่อใช้ชนิดของสารตัวเติมที่แตกต่างกันไปปริมาณ 70 phr ที่กำลังขยาย 47 เท่า



รูปที่ 4.29 สัณฐานวิทยาของยางทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะสิ่งนี้ไปและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองใช้งานจริง

นอกเหนือจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมแล้ว การทดลองการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมและผู้ประกอบการจะต้องมีความเหมาะสมเช่นเดียวกัน โดยผู้ทำการวิจัยได้นำยางคอมพาวด์ไปทดลองใช้งานจริงในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์อัญมณีและเครื่องประดับ โดยทำการทดลองการใช้งานจริงทั้งหมด 8 สูตร

4.5.1 การทดลองใช้งานจริงครั้งแรก จากการใช้สารตัวเติม 6 สูตร ในปริมาณ 50 phr

สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ทดลองใช้งานจริงแสดงดังตารางที่ 4.8 ทำการทดลองใช้งานจริงสูตรละ 3 ซ้ำ การทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงจากแบบสอบถาม (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.8 สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตเครื่องประดับ

สูตรยาง	ความหมาย
สูตรที่ 1 : S ₁ Ca ₃ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (2Q) 50 phr
สูตรที่ 2 : S ₁ Ca ₄ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (Calflex-C™) 50 phr
สูตรที่ 3 : S ₁ Cl _{a1} -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (China clay) 50 phr
สูตรที่ 4 : S ₁ Cl _{a2} -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (Clay Iceberg®) 50 phr
สูตรที่ 5 : S ₁ Cl _{a3} -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ดินขาว (Nucap® W290) 50 phr
สูตรที่ 6 : S ₁ Si ₁ -50	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ซิลิกา (Sipernat® 820A) 50 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการใช้งานจริงจากแบบสอบถาม สามารถสรุปแบบสอบถามจากการใช้งานครั้งแรกได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สรุปแบบสอบถามจากการใช้งานจริงครั้งแรก

สมบัติ สูตร	ความเรียบ/ หยาบของ แม่พิมพ์ยาง	ความนิ่ม/แข็งและ ยืดหยุ่นของ แม่พิมพ์ยาง	ความมันเงา ของเนื้อยาง ด้านในเมื่อทำ การกรีต	ความเรียบของผิว แว็กซ์ (Wax)
สูตรที่ 1	เนื้อยางมีความ เรียบเนียน	มีความนิ่มและ ยืดหยุ่นดี	ไม่มีความมันเงา	มีความเรียบเนียน
สูตรที่ 2	เนื้อยางมีความ เรียบเนียน	มีความนิ่มและ ยืดหยุ่นดี	มีความมันเงา	มีความเรียบเนียน
สูตรที่ 3	เนื้อยางมีความ หยาบ	แข็งจนเกินไป	ไม่มีความมันเงา	มีความเรียบเนียน
สูตรที่ 4	เนื้อยางมีความ หยาบ	แข็งเล็กน้อย	ไม่มีความมันเงา	มีความเรียบเนียน
สูตรที่ 5	เนื้อยางมีความ หยาบ	แข็งจนเกินไป แต่มีความยืดหยุ่น ใกล้เคียงกับสูตรที่ 1	ไม่มีความมันเงา	มีความเรียบเนียน
สูตรที่ 6	เนื้อยางมีความ หยาบ	เนื้อยางมีความ ยืดหยุ่น	ไม่มีความมันเงา	มีความเรียบเนียน

จากการใช้การจริงจากผู้ประกอบการ สามารถสรุปได้ว่าจากทั้ง 6 สูตรนั้น ผู้ประกอบการมีความพึงพอใจสูตรที่ 1 และ 2 มากที่สุดซึ่งเป็นสูตรที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต โดยพึงพอใจในด้านของเนื้อยางที่มีความนิ่ม ยืดหยุ่น ซึ่งในสูตรที่ 2 นั้นมีความมันเงาคลายกับยางซิลิโคน ไม่มีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ และทั้งสองสูตรเมื่อทำการฉีควั๊กซ์ ผิวแว็กซ์นั้นมีความเรียบเนียน แต่ยังมีสมบัติบางประการที่ทั้ง 2 สูตรนั้นยังขาดเมื่อเทียบกับยางที่ใช้ในทางการค้าแล้ว คือ ความเรียบเนียนของเนื้อยาง และความแข็งซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการกรีต ดังนั้นแล้ว งานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงทั้ง 2 สูตร จากความพึงพอใจของผู้ประกอบการ โดยทำการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม, สารช่วยในกระบวนการผลิต และทำการบดย่อยยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แม่พิมพ์อย่างสำหรับ 6 สูตร ในการใช้งานจริง

4.5.2 สารตัวเติม 2 สูตร ในปริมาณ 70 phr จากการปรับปรุงสูตรและความพึงพอใจจากการใช้งานจริงครั้งแรก

สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ทดลองใช้งานจริงแสดงดังตารางที่ 4.9 ทำการทดลองใช้งานจริงสูตรละ 3 ชั่วโมง การทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงจากแบบสอบถาม (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.10 สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตเครื่องประดับ

สูตรยาง	ความหมาย
สูตรที่ 1 : S_1Ca_3	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (2Q) 70 phr
สูตรที่ 2 : S_1Ca_4	สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต (Calflex-C™) 70 phr

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการใช้งานจริงจากแบบสอบถาม สามารถสรุปแบบสอบถามจากการปรับปรุงสูตรและความพึงพอใจจากการใช้งานจริงครั้งแรก เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 สูตร และทางการค้า สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบความพึงพอใจในสมบัติด้านต่างๆ จากการใช้งานจริง

สมบัติ	ความพึงพอใจจากการใช้งานจริง		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
ความแข็งของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป	2	2	1
ความละเอียดของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป	2	3	3
ความมันเงาของเนื้อยางหลังการกรีต	1	3	2
ความยืดหยุ่นของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป	3	2	1
กลิ่นฉุนของยางคอมพาวด์	1	1	3
ความสามารถในการขาดง่ายของเนื้อยางขณะกรีตเอาต้นแบบโลหะออก	1	3	2
จำนวนรอบในการฉีดยก (Wax) 100 - 250 ครั้ง	230	230	230

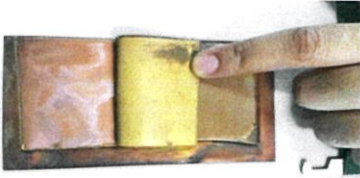

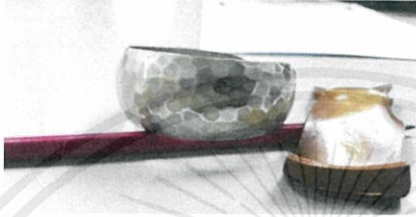

หมายเหตุ ระดับ 3 มากที่สุด
2 ปานกลาง
1 น้อยที่สุด

จากการใช้งานจริงของผู้ประกอบการ สามารถเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 พบว่า มีความพึงพอใจสูตรที่ 2 มากกว่าสูตรที่ 1 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียม-คาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™ โดยพึงพอใจในด้านความละเอียดของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป ความมันเงาของเนื้อยางหลังการกรีต ความสามารถในการขาดของเนื้อยางขณะกรีตเอาต้นแบบโลหะออกดังรูปที่ 4.37 และต้นแบบโลหะไม่คล้ำดังตารางที่ 4.12

เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่ 2 กับยางที่ใช้ในทางการค้าแล้ว ผู้ประกอบการมีความพึงพอใจความสามารถในการใช้งานระดับใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบการทดสอบความคล้ำของโลหะเงินและแผ่นทองแดง

โลหะที่ใช้ทดสอบ	สูตรที่ 1 และ สูตรที่ 2	Commercial grade
ทองแดง		
เงิน		



รูปที่ 4.31 แม่พิมพ์ยาง 2 สูตรในการใช้งานจริง

4.5.3 สรุปสูตรที่เหมาะสมของแม่พิมพ์ยาง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา มูลค่าของต้นทุน รวมทั้งการใช้งานจริงในโรงงานผลิตอัญมณี และเครื่องประดับแล้วนั้น สามารถสรุปสูตรยางที่มีความเหมาะสมในการผลิตแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ มีดังนี้

- สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr ในระบบการเชื่อมโยงแบบ EV
- สารตัวเติมที่เหมาะสมคือ แคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™
- ปริมาณสารตัวเติม 70 phr

หลังจากนั้นอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 25 นาที ซึ่งสมบัติของยางคอมพาวด์ที่ใช้เอกสารทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับที่ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4.13 นี้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมในงานวิจัยกับแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

สมบัติของแม่พิมพ์ยาง	แม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ต่างประเทศ (1)	แม่พิมพ์ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ (2)	ค่าสมบัติ (2) เทียบกับ ค่าสมบัติ (1)
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C)) เวลาเชื่อมโยง (นาที่)	48	17.8	ดีกว่า
- เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2} , min:sec)	4.2	6.6	ดีกว่า
- เวลาการเชื่อมโยง (t_{c90} , min:sec)	11.1	10.0	ดีกว่า
ความแข็งแรงดึง (MPa)	14.1	12.8	ด้อยกว่า
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	831	800	ด้อยกว่า
มอดุลัสที่ 100% (MPa)	0.6	0.5	ดีกว่า
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	16.9	25.7	ดีกว่า
ความแข็งกด (Shore A)	36	32	ดีกว่า
การยึดตัวถาวร	3.0	1.0	ดีกว่า
ความถ่วงจำเพาะ	1.3	1.2	ด้อยกว่า

จากการเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมพาวด์จากงานวิจัยนี้ เทียบกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันพบว่า ยางคอมพาวด์จากงานวิจัยนี้ มีสมบัติบางประการที่ดีกว่า เช่น การยึดตัวถาวรต่ำกว่า ทำให้ยางเกิดการเสียรูปน้อย มอดุลัส 100% และความแข็งแรงกด มีค่าน้อยกว่าซึ่งเป็นผลทำให้ยางนั้นมีความนิ่ม ยืดหยุ่นมากกว่า ความหนืดมูนนี่ต่ำกว่าซึ่งแสดงถึงการไหลของยางที่ง่ายกว่าหรือดีกว่า ทำให้ยางสามารถเก็บรายละเอียดของต้นแบบโลหะได้มาก เวลาที่ยางเริ่มเชื่อมโยงมากกว่าแสดงถึงเวลาในการไหลได้มากกว่าก่อนเกิดการเชื่อมโยง และนอกจากนี้ยังมีเวลาการเชื่อมโยงที่เร็วกว่า ส่งผลให้การขึ้นรูปยางคอมพาวด์นั้นใช้เวลาที่สั้น

4.6 การวิเคราะห์ต้นทุน

นอกจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแล้ว มูลค่าของต้นทุนนั้นมีความสำคัญต่อการผลิตแม่พิมพ์ยางต่างประเทศเช่นเดียวกันพบว่า จากมูลค่าต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์แสดงดังตารางที่ 4.14 และยางคอมพาวด์ที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงคือ ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ STR 5L สารเชื่อมโยง 0.5 phr สารตัวเติมที่ใช้คือ กลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 70 phr โดยวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบของยางคอมพาวด์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 4.14 ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ราคาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ยางคอมพาวด์

รายการ	ปริมาณที่ใช้ (g)	ราคาต่อหน่วย ¹ (บาท/kg)	เป็นเงิน (บาท)
1.ยางธรรมชาติ	800	62.0	49.6
2.Peptor 3s	2.4	230.0	2.6
3.TMQ	8.0	85.0	0.7
4.MMB	8.0	170.0	1.4
5.แคลเซียมคาร์บอเนต	560.0	39.0	21.8
6.น้ำมันพาราฟิน	200.0	20.0	4.0
7.ซิงค์ออกไซด์(ทรานก)	24.0	135.0	3.2
8. กรดสเตียริก	8.0	33.0	0.3
9. ไทเทเนียมไดออกไซด์	24.0	150.0	3.6
10.White factice	80.0	230.0	18.4
11.สีเหลือง	120.0	450.0	50.4
12.สารเร่งการเชื่อมโยง			
- DPTT	6.4	391.0	2.5
- TBBS	12.0	150.0	1.8
- DPG	4.0	180.0	0.7
13. กำมะถัน	4	15.5	0.1
รวมต้นทุนวัตถุดิบที่มีน้ำหนัก 1 kg			89.5

หมายเหตุ: ¹เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนพฤษภาคม 2558

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแม่พิมพ์ยางในอุตสาหกรรม

รายการ	ปริมาณที่ใช้ (หน่วย)	ราคาต่อหน่วย ^a (บาท/หน่วย)	เป็นเงิน (บาท)
1.วัตถุดิบ	1 kg	89.5	89.5
2.ค่าจ้างผลิต ^b	1 kg	12 บาท/kg	21.6
รวมต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ^c			111.1

หมายเหตุ ^aเป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนพฤษภาคม 2558

^bคิดจากค่าแรง, ค่าไฟฟ้า, ค่าเสื่อมของเครื่องจักร

^cราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต และค่าขนส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์เพื่อใช้เป็นแม่พิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับดังตารางที่ 4.15 พบว่า ปริมาณต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม ใช้ต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 90 บาท และเมื่อรวมต้นทุนวัตถุดิบกับค่าจ้างผลิต จะใช้ต้นทุนการผลิตทั้งหมดประมาณ 111 บาท ซึ่งนับว่าเป็นต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์โดยทั่วไป ที่มีราคาปลีกประมาณ 500 บาทต่อกิโลกรัม (ราคา ณ เดือน พฤษภาคม 2558) ซึ่งกล่าวได้ว่า การผลิตยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อสมบัติยางคอมพาวด์เพื่อพัฒนาแม่พิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยทำการศึกษาระบบสารเชื่อมโยง ชนิดสารตัวเติม และปริมาณสารตัวเติม จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา การใช้งานจริง ตลอดจนวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาสารระบบสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 2.4 phr และกำมะถันระบบ EV ที่ปริมาณ 0.5 phr ที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโยงยางคอมพาวด์ โดยพิจารณาลักษณะการเชื่อมโยงพบว่า ยางที่เชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงกำมะถันมีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) เวลาเชื่อมโยงยาง (t_{c90}) เร็วกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ และยางที่ใช้ในทางการค้า นอกจากนี้ยังไม่มีกลิ่นเหม็นของกำมะถัน และไม่ทำให้ต้นแบบโลหะคล้ำ ซึ่งปกตินั้นความคล้ำของต้นแบบโลหะเกิดจากกำมะถัน เมื่อกำมะถันสัมผัสกับต้นแบบโลหะจะทำปฏิกิริยาเกิดเป็น ซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver sulfide) เคลือบที่ผิวของต้นแบบโลหะ จึงทำให้ต้นแบบเกิดความคล้ำ แต่ด้วยงานวิจัยนี้ใช้กำมะถันปริมาณน้อย สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมาก จึงทำให้ต้นแบบโลหะนั้นไม่เกิดความคล้ำ เนื่องจากสารเชื่อมโยงกำมะถันนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจนหมด

2. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์และกำมะถันระบบ EV พบว่า ยางที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน มีค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัส (M100) และความแข็งกด ที่สูงกว่ายางที่เชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์และยางที่ใช้ในทางการค้า

3. จากการศึกษาผลของชนิดสารตัวเติมทั้ง 4 กลุ่ม คือ กลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต กลุ่มดินขาว กลุ่มทัลคัม และกลุ่มซิลิกาที่ 50 phr โดยใช้สารเชื่อมโยงกำมะถันแบบ EV ที่มีความเหมาะสมต่อสมบัติของยางคอมพาวด์ โดยพิจารณาลักษณะการเชื่อมโยง พบว่า ยางที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 4 กลุ่ม มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยงยาง (t_{c90}) เร็วกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

4. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้สารตัวเติมทั้ง 4 กลุ่ม คือ กลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนต กลุ่มดินขาว กลุ่มทัลคัม และกลุ่มซิลิกามีสมบัติบางประการที่ดีกว่าทางการค้า เช่น ความเหนียว ความถ่วงจำเพาะ ความแข็งแรงดึง และการยืดตัวถาวร ซึ่งจากสารตัวเติมทั้ง 4 กลุ่มนี้ สารตัวเติมในกลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

5. จากการศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด 2Q และ Calflex-C™ ที่ 70 phr โดยพิจารณาลักษณะการเชื่อมโยง พบว่า มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s2}) ช้ากว่า และเวลาเชื่อมโยงยาง (t_{c90}) เร็วกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

6. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางที่ใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด 2Q และ Calflex-C™ ที่ปริมาณ 50 และ 70 phr พบว่า ยางที่ใช้สารตัวเติมที่ปริมาณ 70 phr มีค่าความเหนียว ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัส (M100) ความแข็งกด และการยืดถาวรต่ำกว่ายางที่ใช้สารตัวเติมที่ปริมาณ 50 phr และมีสมบัติบางประการที่ดีกว่าทางการค้า ได้แก่ ความเหนียว ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัส (M100) ความแข็งกด และการยืด

ถาวร

7. จากการศึกษาสัณฐานวิทยาในการดูความเรียบเนียนพื้นผิวในระดับใช้งานจริงของยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมปริมาณ 50 และ 70 phr พบว่า พื้นผิวของยางคอมพาวด์มีความเรียบเนียนมากกว่าที่ใช้ในทางการค้า

8. จากการศึกษาการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ พบว่า ผู้ประกอบการมีความพึงพอใจสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ชนิด Calflex-C™ ที่ปริมาณ 70 phr มากที่สุด โดยพึงพอใจในด้านของเนื้อยางที่มีความนิ่ม ยืดหยุ่น มีความละเอียดของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูปดี มีความมันเงาของเนื้อยางหลังการกรีต มีความสามารถในการขาดของเนื้อยางขณะกรีตเอาต้นแบบโลหะออกง่าย ต้นแบบโลหะไม่คล้ำ และเมื่อทำการฉีดแว็กซ์ ผิวแว็กซ์นั้นมีความเรียบเนียน

9. จากการวิเคราะห์ต้นทุน การผลิตยางคอมพาวด์ ที่ประกอบด้วย ยางธรรมชาติ STR 5L สารเชื่อมโยงกำมะถัน 0.5 phr สารตัวเติมที่ใช้คือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calflex-C™) 70 phr มีต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 111 บาทต่อยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสมบัติอื่นๆ ของยางคอมพาวด์ รวมทั้งระยะเวลาการเก็บรักษา เช่น อายุการเก็บ (Shelf-life) และการแข็งตัวเนื่องจากการเก็บ (Storage hardening)

2. พัฒนาสูตรยางคอมพาวด์ที่พัฒนาเพื่อใช้ทำแม่พิมพ์สูตรอื่นๆ ที่มีสมบัติพิเศษ เช่น สามารถทนแรงดันการฉีดได้มากโดยไม่มีการไหลออกของแว็กซ์ แม่พิมพ์ยางที่มีการเปลี่ยนสีซึ่งบ่งระดับการเชื่อมโยง ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] หน่วยวิจัยยางและเทคโนโลยี. 2556. เทคโนโลยีใหม่เพื่อการตัดแปรรยางธรรมชาติ. [Online]. Available : <http://www.sc.mahidol.ac.th/tha/research/rubber.htm>.
- [2] กรมวิชาการเกษตร. 2557. ปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติของไทยไปยังประเทศต่างๆ. สลิตียางไทยสถาบันวิจัยยาง. [Online]. Available : <http://www.rubberthai.com>.
- [3] กมลลักษณ์ โตสกุล 2528. “อัญมณีและเครื่องประดับ.” กรุงเทพฯ : ส่วนวารสารเศรษฐกิจ ธนาคารกรุงเทพ จำกัด. เอกสารอัดสำเนา.
- [4] สุดาทิพย์ สายทอง. 2552. “การวิเคราะห์สถานการณ์การตลาดของธุรกิจ.” หน้า 6-7. ใน แผนธุรกิจ Jewelry Rubber Compound. กรุงเทพฯ : คณะบริหารธุรกิจ สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรม มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [5] Castaldo® 2015. jewelry mold rubber. [Online]. Available : <http://www.castaldo.com>.
- [6] อธิพิณ แจ้งชัด. 2551. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] บริษัท เอ็ม เอส ซี พี อาร์ สอง 2558. สมบัติยางธรรมชาติ. [Online]. Available : <http://www.thaitechno.net/vip/page-detail.php?id=268&uid=39426>.
- [8] Wikipedia. 2015. Isoprene. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Isoprene>
- [9] วิภาวี พัฒนกุล. 2554. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. [Online]. Available : <http://www.rubberthai.com/book/file/98.pdf>
- [10] สุภิญญา โคตรมา. 2553. “การใช้ยางคอมพาวด์ทำแม่พิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [12] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2555. “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.” วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 : 14-17
- [13] Wikipedia. 2015. Sulfenamides. [online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfenamides>.
- [14] Wikipedia. 2015. Thiazole. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Thiazole>.
- [15] Wikipedia. 2015. Guanidines. [Online]. Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Guanidines>.
- [16] Wikipedia. 2015. Thiuram disulfides. [online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Thiuram_disulfide.

- [17] Sartomer arkema group. 2015. **Sartomer 350**. [Online]. Available : <http://americas.sattomer.com/techlitdetail.asp?plid=1&sgid=4&prid=SR350>.
- [18] ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. 2557. **แคลเซียมคาร์บอเนต**. [Online]. Available : <http://thaipolychemicals.blogspot.com>.
- [19] ชาร์ฟ บารู. 2553. “การศึกษาผลของอาร์กาโนเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลพฤติกรรมการเกิดผลึกและสัณฐานวิทยา ของเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์ที่เตรียมจากไดนามิกวัลคาไนเซชันของยางธรรมชาติ.” ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [20] Yalcin, B. and Cakmak, M. 2004. “The role of plasticizer on the exfoliation and dispersion and fracture Behavior of clay particles in PVC matrix: a comprehensive morphological.” *Polymer*. Vol. 45 : 6623-6638.
- [21] สุขุม ชันเงิน และจีระโรจน์ จีระรัตน์บรรพต. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางเมื่อใช้ยางรีเคลมเป็นสารตัวเติม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [22] Suchiva, K 2010. **Introduction to process oils**. [Slide]. Bangkok. : The slide centre.
- [23] ปิติภัทร สีนาม และวันชัย แก้วอาสา. 2555. “การปรับปรุงคุณสมบัติของธรรมชาติเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมยาง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [24] เต็มสุข แดงหอม สิริรัตน์ พานิช กฤษณา ปิวสาร จุฑาทิพย์ นิลคูหา วงศ์ลี ทองดอนง่า และณรงค์ศักดิ์ เจริญศิริ. 2547. **เคมีพอลิเมอร์**. [Online]. Available : http://Sci.buu.ac.th/~chemistry/thanida/polymer_chemistry/image_files.Staffer.html.
- [25] อีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุดิ. 2544. “ผลกระทบของการใช้สารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2545. **คู่มือเทคโนโลยียาง**. กรุงเทพฯ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [27] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย และชาคริต สิริสิงห. 2550. **ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ**. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [28] วราภรณ์ ขจรไชยกูล และวิภา เศวตกนิษฐ. 2537. **การใช้ยางแห้งผสมสารเคมีทำแม่พิมพ์ในงานเครื่องประดับ**. ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ สถาบันวิจัยยาง.
- [29] ศักดิ์ชัย สมเชื้อ, ระพีพันธ์ แดงตันกี และสายัณห์ สุวรรณจินดา. 2555. “การศึกษาสมบัติการไหลของยางธรรมชาติผสมกับสารเติมแต่งสองชนิดของเคลย์และซิลิกา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็น
ไม่ว่ากรณีใด

- [30] ก้นทะลา, เอกชัย วิมลมาลา, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และชาคริต สิริสิงห. 2550. อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหลพความหนาแน่นของพันธะข้าม และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับพิเศษ. ปีที่ 30 ฉบับที่ 4 : 681-691.
- [31] ประภัทร ถิ่นฐาน และศุภณัฐ แสนทวีสุข. 2556. “วัสดุเชิงประกอบนาโนเคลย์-ยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [32] JIS K 6251. 2004. **Tensile test.** Rubber, Vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties.
- [33] JIS K 6252. 2007. **Tear strength.** Rubber, Vulcanized or thermoplastic – Determination of tear strength.
- [34] JIS K 6253. 1997. **Hardness.** Hardness testing methods for rubber, Vulcanized or thermoplastic.
- [35] JIS K 6262. 1997. **Tension set.** Permanent set testing method for rubber, Vulcanized or thermoplastic.
- [36] Mark, J.E., Erman, B. and Eirich, F.R. 1994. “Science and Techology of Rubber.” 2nd Ed. New York : Academic Press.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และ 100% มอดุลัส (M100)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	100% มอดุลัส (MPa)
P ₁ Ca ₁ -50	11.2	650	0.55
P ₁ Ca ₂ -50	6.0	600	0.54
S ₁ Ca ₁ -50*	24.2	700	1.28
S ₁ Ca ₂ -50*	19.5	700	1.18
S ₁ Ca ₁ -50**	18.4	850	0.5
S ₁ Ca ₂ -50**	19.8	800	0.57
S ₁ Ca ₃ -50	19.3	800	0.62
S ₁ Ca ₄ -50	18.7	800	0.55
S ₁ Ca ₅ -50	19.8	800	0.57
S ₁ Cl ₁ -50	18.3	800	0.74
S ₁ Cl ₂ -50	17.1	750	0.78
S ₁ Cl ₃ -50	18.4	750	0.74
S ₁ Cl ₄ -50	16.7	750	0.56
S ₁ Tal ₁ -50	19.3	800	0.95
S ₁ Tal ₂ -50	18.3	700	0.98
S ₁ Tal ₃ -50	19.1	800	0.87
S ₁ Si ₁ -50	18.9	750	0.73
S ₁ Ca ₃ -70	11.3	750	0.48
S ₁ Ca ₄ -70	12.8	800	0.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการพิมพ์ซ้ำหรือการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความแข็งกด (Hardness) การยืดถาวร (Tension set) และ ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

สูตร	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	ความแข็งกด (Shore A)	การยืดถาวร (%)	ความถ่วงจำเพาะ
P ₁ Ca ₁ -50	22.7	30	4	1.6
P ₁ Ca ₂ -50	17.8	33	6	1.16
S ₁ Ca ₁ -50*	49.5	49	4	1.17
S ₁ Ca ₂ -50*	32.9	48	6	1.18
S ₁ Ca ₁ -50**	31.1	32	1	1.62
S ₁ Ca ₂ -50**	26.6	36	2	1.15
S ₁ Ca ₃ -50	27.6	37	2	1.15
S ₁ Ca ₄ -50	29.7	35	1	1.13
S ₁ Ca ₅ -50	26.6	36	2	1.15
S ₁ Cl ₁ -50	27.3	38	8	1.15
S ₁ Cl ₂ -50	26.8	37	5	1.13
S ₁ Cl ₃ -50	37.2	35	3	1.12
S ₁ Cl ₄ -50	26.4	34	3	1.12
S ₁ Ta ₁ -50	28.5	39	15	1.15
S ₁ Ta ₂ -50	36.9	38	7	1.14
S ₁ Ta ₃ -50	28.9	37	14	1.13
S ₁ Si ₁ -50	56.4	41	3	1.1
S ₁ Ca ₃ -70	22.9	31	1	1.12
S ₁ Ca ₄ -70	25.7	32	1	1.12

หมายเหตุ (*) ค่าผลการทดลองจากตอนที่ 1

(**) ค่าผลการทดลองจากตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แบบสอบถามงานวิจัย

ข้อมูลประกอบการทำสหกิจศึกษาเรื่องการพัฒนาสูตรยางคอมพาวด์จากยางธรรมชาติทำแม่พิมพ์ยาง (Rubber mold) สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

คำชี้แจง: ให้ผู้ทดลองใช้ยางคอมพาวด์เขียน “ตัวเลข” ในช่องที่ท่านพึงพอใจในสมบัติของยางคอมพาวด์

สูตรยางที่ใช้ทดสอบ

สมบัติในการใช้งาน	ความพึงพอใจในสมบัติการใช้งาน		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
1.ความแข็งของเนื้อยางก่อนอัดขึ้นรูป			
2.ความยืดหยุ่นของเนื้อยางก่อนอัดขึ้นรูป			
3.ความแข็งของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป			
4.ยางเหนียวติดเข้าพิมพ์			
5.หลังอัดขึ้นรูปแม่แบบโลหะมีความคล้ำ			
6.ความละเอียดของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป			
7.ความมันเงาของเนื้อยางหลังการกรีต			
8.ความมันเงาของต้นแบบแว็กซ์ (Wax) หลังการฉีดแว็กซ์			
9.ความยืดหยุ่นของเนื้อยางหลังอัดขึ้นรูป			
10.กลิ่นฉุนของยางคอมพาวด์			
11.ความสามารถในการขจัดง่ายของเนื้อยางขณะกรีตเอาต้นแบบโลหะออก			
12.จำนวนรอบในการฉีดต้นแบบแว็กซ์			
13.สีคล้ำของเนื้อยางที่สัมผัสกับโลหะต้นแบบ			
14.ความสามารถในการยึดหดของเนื้อยางขณะกรีตเอาต้นแบบโลหะออก			
15. จำนวนรอบในการฉีดต้นแบบแว็กซ์ 100-250 ครั้ง			

โดยที่ระดับ : 3 มากที่สุด 2 ปานกลาง 1 น้อยที่สุด

ท่านคิดว่าควรมีการปรับปรุงยางคอมพาวด์ชนิดนี้อย่างไรบ้าง.....

.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้