

การใช้ยางคอมพาวด์ทำแบบพิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

MOLDING RUBBER COMPOUNDS FOR JEWELRY INDUSTRY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีหัตถกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-014-016

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้งานคอมพิวเตอร์ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

MOLDING RUBBER COMPOUNDS FOR JEWELRY INDUSTRY



ตงหมี.....
เลขทะเบียน..... 110520
วัน,เดือน,ปี..... -4 110. 2553

b..... 1225๗1๔๒
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2553

KMITL-2010-SC-M-014-013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOLDING RUBBER COMPOUNDS FOR JEWELRY INDUSTRY



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2010
KMITL-2010-SC-M-014-013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การใช้อย่างคอมพิวเตอร์ทำแบบพิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
Molding Rubber Compounds for Jewelry Industry
นักศึกษา นางสาวสุกัญญา โคตรมา
รหัสประจำตัว 50067904
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิทย์	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ์	
ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 26 มีนาคม พ.ศ. 2553 เวลา 09.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คณฉวี ธีระบริพัทธ์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 14 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 53

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจต.

วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

วันที่ 26 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2553

เอกสารนี้มอบให้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ยางคอมพาวด์ทำแบบพิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
นักศึกษา	นางสาวสุกัญญา โคตรมา
รหัสประจำตัว	50067904
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับขนาดเล็ก จะมีการใช้ยางคอมพาวด์หรือยางผสมสูตรในการทำแบบพิมพ์ยาง (Rubber mold) เพื่อหล่อตัวเรือนขี้ผึ้ง (Mold wax) สำหรับการผลิตเครื่องประดับจำนวนมาก ส่วนใหญ่ใช้ยางคอมพาวด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพง ทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูงจึงมีการศึกษาทำแบบพิมพ์ยาง จากยางธรรมชาติเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มปริมาณการใช้ยางภายในประเทศ งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาสูตรยางที่เหมาะสม ในการผลิตแบบพิมพ์ยาง ในการขึ้นรูปเครื่องประดับสำหรับอุตสาหกรรม ซึ่งเตรียมจากยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเกรด SL โดยใช้ระบบการกรองเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เป็นสารเชื่อมโยง ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ สมบัติการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของยางคอมพาวด์ ได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) ชนิดและปริมาณสารตัวเติม (Filler) แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา จากการทดลองพบว่าปริมาณที่เหมาะสมของสารเชื่อมโยง และสารเสริมการเชื่อมโยงคือ 2.4 phr และ 1 phr ตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (10-50 phr) พบว่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางจะเพิ่มสูงขึ้น ยางสูตรที่เติมซิลิกาสมาบัติเชิงกล จะสูงกว่ายางสูตรที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อศึกษาลักษณะ ทางสัณฐานวิทยา ด้วยเทคนิค SEM พบว่าเกิดการกระจายตัวของวัฏภาคดีจากการใช้แบบสอบถามเพื่อสำรวจ ความพึงพอใจ การใช้งาน ยางคอมพาวด์ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า พบว่ายางสูตรที่เติม แคลเซียมคาร์บอเนต (50 phr) ผู้ประกอบการให้ความพึงพอใจใน การทดลองใช้งานจริง โดยให้เปอร์เซ็นต์ ความพึงพอใจใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า ซึ่งมีต้นทุนในการผลิต ยางคอมพาวด์ประมาณ 110 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ดังนั้นสูตรยางคอมพาวด์ทำแบบพิมพ์ยางสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ สามารถใช้งานได้จริง และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Molding Rubber Compounds for Jewelry Industry
Student	Miss Supinya Khotma
Student ID.	50067904
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2010
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud

ABSTRACT

In jewelry and small decorating replicas industries, “rubber compounds” have been used to make “rubber molds” to mold wax replicas for mass production. In Thailand, expensive rubber compounds have been imported resulting in high production cost and less business competition. Therefore, domestic NR rubber compounds for jewelry industries are needed for lowering the cost and increasing the domestic NR consumption. In this work, formulation for jewelry rubber molds was studied by using STR-5L rubber with peroxide curing agent. The compounds were mixed by using a two-roll mill and tested for their properties, e.g., cure characteristics, mechanical properties, morphology, physical properties, and cost-analysis. Several factors affecting the compound properties were studied, such as, peroxide loading, co-agent loading, types and loading of fillers (silica and CaCO_3). It was found that optimum loadings of peroxide and co-agent were 2.4 phr and 1 phr, respectively. As the filler loading was increased (10-50 phr), physical and mechanical properties of the rubber vulcanizates were improved. The silica-filled rubbers showed higher mechanical properties than the CaCO_3 -filled rubbers. By using SEM, morphology of the compounds was revealed with good dispersion. By using questionnaires to survey the satisfaction of the compounds from this work compared with the commercial one, it was revealed that jewelry manufacturers seemed to have more satisfaction in the CaCO_3 -filled compound (50 phr) compared to others. In conclusion, the formula of the molding rubber compounds for jewelry with overall satisfactory properties was achieved. The cost of rubber compounds was about 110 bath/kg.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ และ ดร.นุชนาฏ ฌ ระนอง ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ สารเคมี และอนุเคราะห์การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณชยุต สุวรรณพิมพ์กุล กรรมการผู้จัดการ คุณสุดาทิพย์ สายทอง ผู้จัดการแผนกวิจัยสูตร คุณวาทีณี ภาคอารีย์ วิศวกรปรับปรุงคุณภาพ บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด คุณธนพล กอสุราษฎร์ ผู้จัดการทั่วไป บริษัท ไทยรับเทค จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางและสารเคมีต่างๆ ตลอดจนติดต่อประสานงานผู้ประกอบการในการทดลองใช้ตัวอย่างยางคอมพาวด์จริงในระดับอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณชนิษฐา หนูมัน สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope และขอขอบคุณบริษัท สุรินทร์-ออมย่า จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนต

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว น้องชาย และคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อน นักศึกษาปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

สุกัญญา โทครมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	5
2.1.1 ยางแท่ง (Technically Specified Rubber, TSR หรือ Block Rubber).....	6
2.1.2 การทดสอบสมบัติยางแท่ง.....	6
2.2 สารเติมแต่ง (Additives).....	9
2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent).....	9
2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Vulcanization).....	9
2.2.2 สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent).....	12
2.2.3 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activator).....	15
2.2.4 สารตัวเติม (Filler).....	15
2.2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate).....	15
2.2.4.2 ซิลิกา (Silica).....	17
2.2.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agent).....	20
2.2.6 สารคู่ควบ (Coupling agent).....	21
2.2.7 น้ำมันช่วยผสม (Processing oil).....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.8 สารให้สี (Colorants).....	22
2.3 การทดสอบยาง.....	22
2.3.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeter)	22
2.3.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)	24
2.3.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness Test)	26
2.3.4 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	26
2.4 แม่พิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ (Jewelry Molding Rubber).....	28
2.4.1 ขั้นตอนในการทำแม่พิมพ์ยาง.....	29
2.4.2 แม่พิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับทางการค้าที่ใช้ในปัจจุบัน.....	31
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	36
3.1 แผนการดำเนินการ.....	36
3.2 สารเคมีและอุปกรณ์.....	37
3.3 วิธีการทดลอง.....	40
3.3.1 การศึกษาเบื้องต้น.....	40
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	40
3.3.3 การบดผสมยางและสารเคมี.....	41
3.4 การทดสอบยางผสมสูตร.....	44
3.4.1 การทดสอบความหนืดมูนนี่.....	44
3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร.....	44
3.4.3 การทดสอบแรงดึง.....	44
3.4.4 การทดสอบความแข็งแรงการฉีกขาด.....	45
3.4.5 การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์.....	46
3.4.6 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ.....	46
3.4.7 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด.....	47
3.4.8 สัณฐานวิทยา.....	48
3.4.9 การทดสอบการใช้งานจริง.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.10 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	49
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	50
4.1 การศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมโยง	51
4.1.1 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ของยาง.....	51
4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมยาง.....	53
4.2 การศึกษาผลของปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง.....	59
4.2.1 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ของยาง.....	60
4.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมยาง.....	62
4.3 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม.....	68
4.3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมยาง.....	68
4.3.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	74
4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองใช้งานจริง.....	77
4.5 สรุปสูตรที่เหมาะสมในการใช้งานจริงและสมบัติของแบบพิมพ์ยาง.....	79
4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 ข้อเสนอแนะ.....	84
เอกสารอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก ก อุณหภูมิการสลายตัวของยางคอมพาวด์ในทางการค้า.....	89
ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	90
ภาคผนวก ค แบบสอบถามงานวิจัย.....	93
ภาคผนวก ง สูตรการคำนวณ.....	95
ภาคผนวก จ นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการผลิต การส่งออก และการใช้ภายในประเทศไทย ปี 2550-2552.....	1
1.2 อันดับของยางพาราและอัญมณีในรายการสินค้าส่งออกที่สำคัญของไทยปี 2550-2552.....	2
2.1 มาตรฐานของยางเอสทีอาร์ (STR) ชนิดต่างๆ.....	8
2.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ.....	17
2.3 สมบัติบางประการของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ.....	18
2.4 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ.....	20
2.5 สมบัติบางประการของยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ Castaldo®	31
2.6 ขนาดและเวลาในการขึ้นรูปยางที่อุณหภูมิ 152 °C.....	32
3.1 สมบัติบางประการของ STR 5L ที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; CaCO ₃) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.3 สมบัติบางประการของซิลิกา (Silica) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.4 สมบัติบางประการของสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ.....	43
4.1 สมบัติบางประการของยางที่ใช้ในทางการค้า.....	50
4.2 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
4.3 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร.....	52
4.4 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	60
4.5 ค่า t_{s2} , t_{c90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร.....	61
4.6 สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตเครื่องประดับ.....	77
4.7 สรุปผลแบบสอบถามความพึงพอใจ.....	78
4.8 การเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางคอมพาวด์ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่ผลิตได้ และยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า.....	80
4.9 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตยางคอมพาวด์.....	81
4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรม.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยาง	3
2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติที่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนไอโซพรีนเป็นหน่วยซ้ำๆกัน.....	5
2.2 กลไกการเชื่อมโยงด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์.....	11
2.3 โครงสร้างของ Co-agent บางชนิด.....	13
2.4 กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent ชนิด Type I.....	13
2.5 กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent ชนิด Type II.....	14
2.6 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve).....	23
2.7 งานหมุนโลหะในเครื่องวัดความหนืดมุนนี้.....	25
2.8 ลักษณะและรูปร่างของหัวกดชนิดต่างๆ.....	26
2.9 หลักการทำงานของเครื่อง SEM.....	28
2.10 ขั้นตอนการทำแม่พิมพ์ยางที่ใช้ในการทำเครื่องประดับ.....	30
3.1 แผนผังการบดผสมและการเตรียมขึ้นทดสอบ.....	40
3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปคัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 412.....	44
3.3 ชิ้นงานความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624.....	45
3.4 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ชนิดซอร์ A.....	46
3.5 เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ.....	47
3.6 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด.....	48
3.7 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	48
4.1 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ เปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	52
4.2 กราฟแสดงค่าความหนืดมุนนี้ (ML1+4(100 °C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ เปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	53
4.3 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ ต่างกัน.....	54
4.4 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	55
4.5 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน...	55
4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน.....	56
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับ สมบัติเชิงกลบางประการของยาง.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกัน.....	56
4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงคคของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงต่างกัน.....	58
4.10 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงคคของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ เปอร์ออกไซด์ ต่างกัน.....	59
4.11 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อม โยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยง ต่างกัน.....	61
4.12 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี้ (ML1+4(100 °C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสาร เสริมการเชื่อม โยงต่างกัน.....	62
4.13 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ใช้ปริมาณสารเสริมการ เชื่อม โยงต่างกัน.....	63
4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงคิงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยง ต่างกัน.....	64
4.15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการ เชื่อม โยงต่างกัน.....	64
4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยง ต่างกัน.....	65
4.17 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยง ต่างกัน.....	66
4.18 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงคคของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยงต่างกัน.....	66
4.19 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงคคของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการ เชื่อม โยงต่างกัน.....	67
4.20 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี้ (ML1+4(100 °C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริม การเชื่อม โยงต่างกัน.....	69
4.21 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ใช้ปริมาณสารเสริมการ เชื่อม โยงต่างกัน.....	70
4.22 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงคิงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยง ต่างกัน.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน.....	71
4.24 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน.....	72
4.25 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน.....	73
4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน.....	73
4.27 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณตัวเติมต่างกัน.....	74
4.28 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO ₃) ต่างกัน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	75
4.29 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ปริมาณของซิลิกา (Silica) ต่างกัน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	76
4.30 แสดงลักษณะแบบพิมพ์อย่างในการใช้งานจริง.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบที่สวยงามและใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยเพื่อให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพตามความต้องการของตลาดและสามารถแข่งขันได้ในตลาดต่างประเทศ

แม้ว่าผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมเครื่องประดับไทยส่วนใหญ่เป็นผู้ผลิตเครื่องประดับแท้ แต่ก็ยังมีผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมเครื่องประดับเทียมอยู่เป็นจำนวนมากไม่น้อยเช่นกัน เพราะเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้เงินลงทุนไม่มากนัก วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่เป็นโลหะผสมจำพวกเงิน ทองเหลือง ทองแดง ตะกั่ว สแตนเลส ฯลฯ และอาจนำมาประดับด้วยอัญมณีสังเคราะห์ หรืออัญมณีเลียนแบบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีระดับเทคโนโลยีไม่ซับซ้อน และแรงงานที่ใช้ในการผลิตเป็นแรงงานที่ฝีมือไม่สูงนัก ทั้งนี้อุตสาหกรรมเครื่องประดับเทียมส่วนใหญ่เป็นการผลิตเพื่อรองรับความต้องการของตลาดภายในประเทศเฉพาะอย่างยิ่งตลาดระดับล่างที่ต้องการสินค้าราคาไม่แพง [2]

ตารางที่ 1.2 อันดับของยางพาราและอัญมณีในรายการสินค้าส่งออกที่สำคัญของไทยปี 2550-2552 [3]

หน่วย : ล้านบาท

รายการ	อันดับ	2550	อันดับ	2551	อันดับ	2552
ยางพารา	4	194,338	5	223,628	2	108,031
อัญมณีและเครื่องประดับ	5	185,194	3	274,093	11	301,042

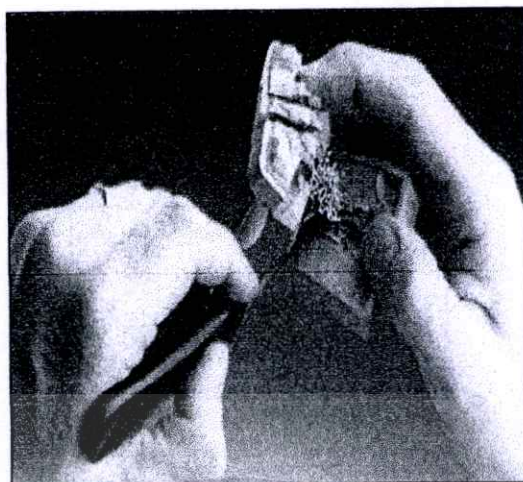
ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร

2552 : แสดงผลถึงเดือนตุลาคม

ในกระบวนการผลิตสินค้าประเภทอัญมณีและเครื่องประดับ ต้องใช้แบบพิมพ์สำหรับการขึ้นรูปเครื่องประดับต่างๆ ตัวอย่างแบบพิมพ์ที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1 แบบพิมพ์บางส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ ยางพารา และยางซิลิโคน [4]

แบบพิมพ์ยางพารา หากเก็บรักษาอย่างถูกวิธี ห่างจากความร้อนและแสงสว่าง จะสามารถใช้งานได้นานกว่า 10 ปี โดยที่แบบพิมพ์จะคงรูปทรงเดิม

แบบพิมพ์ยางซิลิโคน เป็นวัสดุที่มีราคาสูง อายุการใช้งานมากกว่าแบบพิมพ์ยางพารา มีความยืดหยุ่นสูง เหมาะสำหรับเครื่องประดับที่มีรูปแบบซับซ้อนและไม่ติดกับวัสดุที่นำมาหล่อ จึงช่วยประหยัดเวลา นอกจากนี้ยังทนสารเคมีและล้างได้ดี



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างแบบพิมพ์ยาง [5]

ในปัจจุบันแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับที่ขายในท้องตลาดคุณภาพดีน้อยกว่าแบบพิมพ์จากต่างประเทศ ซึ่งผู้ประกอบการส่วนใหญ่ยังคงใช้อย่างที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาประมาณ 400-500 บาทต่อกิโลกรัม ปีหนึ่งๆประเทศไทยต้องนำเข้ายางประเภทนี้เป็นมูลค่าหลายสิบล้านบาท เป็นที่ทราบกันว่าประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางดิบธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก จึงได้มีการศึกษาและวิจัยสูตรยางแบบพิมพ์เครื่องประดับจากยางธรรมชาติขึ้นเพื่อสามารถนำไปผลิตในอุตสาหกรรมจำหน่าย โดยมีต้นทุนต่ำ ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสินค้าที่นำเข้าจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับที่มีประสิทธิภาพสูง มีต้นทุนการผลิตต่ำ มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์
2. เพื่อศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลโดยตรงต่อสมบัติและต้นทุนการผลิต ได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมโยง ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ เช่น สมบัติการเชื่อมโยง ลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ศักยภาพวิทยาและและการใช้งานจริง
2. ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) และสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารตัวเติม (Filler) 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) และซิลิกา (Silica)
4. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับที่มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตต่ำ มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์
2. สามารถผลิตแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับเพื่อใช้เองในประเทศ ลดการนำเข้าสินค้าประเภทนี้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ
3. สามารถใช้ความรู้ที่ได้ในการศึกษาปรับปรุงสูตรยางคอมพาวด์ในประเทศ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

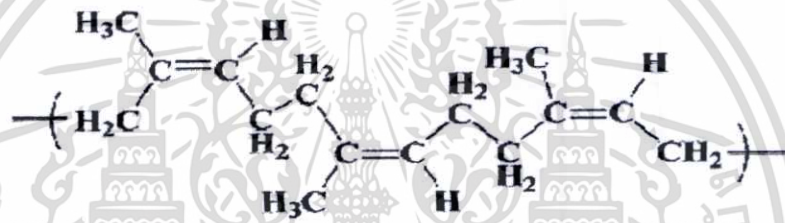


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [6]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ยาว ประกอบด้วย 2 ชาติ คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน ที่มีหน่วยซ้ำๆกัน คือ ไอโซพรีน (C_5H_8) แสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Havea Brasiliensis* จัดเป็นอิลาสโตเมอร์ซึ่งมีสมบัติยืดหยุ่น โดยจะยืดตัวออกเมื่อได้รับแรง และสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมเมื่อปล่อยแรงกระทำ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติที่ประกอบด้วยสาร ไฮโดรคาร์บอน ไอโซพรีนเป็นหน่วยซ้ำๆกัน

การที่ยางเป็นที่นิยมใช้ และมีการประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายและกว้างขวาง เนื่องจากยางมีสมบัติที่เด่นคือ

1. มีสมบัติการยืดหด (Elastic) และยืดหยุ่น (Flexible)
2. มีความเหนียว (Tough) และแข็งแรง
3. มีการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่ำ
4. สามารถรับแรงดึงหรือแรงกดอัดได้สูง
5. สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างมากเมื่อได้รับแรง และกลับสู่รูปร่างเดิมได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อปล่อยแรง

ผลิตภัณฑ์ยางชนิดต่างๆประกอบด้วยส่วนผสม (Compound formula) ที่แตกต่างกันไป เช่น สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) สารเร่งการเชื่อมโยง (Accelerators) สารกระตุ้น (Activators) สารตัวเติม (Filler) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ฯลฯ ดังนั้นชนิดและปริมาณของสารเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง นอกจากนี้ วิธีและสภาวะการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เช่น อุณหภูมิและเวลาในการขึ้นรูป มีความสำคัญและมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติ ต้องแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปอื่นๆ ที่เหมาะสมเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา ซึ่งมี 2 แบบ คือ

1. ยางแห้ง (Dry rubber) ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoke sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheet, ADS) ยางเครพ (Crepe rubber) และ ยางแท่ง (Block rubber)

2. น้ำยางข้น (Concentrated latex)

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ ยางแท่งเอสทีอาร์ (STR 5L) เป็นวัตถุดิบหลัก

2.1.1 ยางแท่ง (Technically Specified Rubber, TSR หรือ Block Rubber) [7, 8]

ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตโดยมีวิธีการระบุคุณภาพมาตรฐาน เพื่อปรับปรุงรูปแบบของการผลิตยางธรรมชาติ ครอบคลุมการผลัดกลึง ปรับปรุงวิธีการหีบห่อให้ทันสมัยเหมาะสมกับการขนส่งและการใช้งาน และมีวิธีการตรวจสอบสมบัติที่จำเป็นของยางตามวิธีมาตรฐานสากล (Technically grading) และจัดชั้นของยางโดยวิธีการในห้องปฏิบัติการ

ประเทศมาเลเซียได้ริเริ่มการผลิตยางแท่งเมื่อประมาณ ปี พ.ศ. 2508 สำหรับประเทศไทยเริ่มผลิตยางแท่งมาตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2511 โดยใช้ชื่อยางแท่งว่า Thai Tested Rubber, TTR ต่อมาในปี พ.ศ. 2539 ได้มีการปรับปรุงการกำหนดขีดจำกัดและจำนวนชั้นยาง รวมทั้งเรียกชื่อใหม่ว่า Standard Thai Rubber, STR

การเรียกชื่อยางแท่งของแต่ละประเทศ จะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น

SMR - Standard Malaysian Rubber

SIR - Standard Indonesian Rubber

ยางแท่งถูกผลิตมาจากวัตถุดิบที่เป็นน้ำยางสด และ ยางแห้งที่จับตัวแล้ว หลักการสำคัญของวิธีการผลิตยางแท่ง คือ การตัดข่อยก้อนยางให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ อย่างรวดเร็ว การล้างยางด้วยน้ำสะอาด การอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เป่าลมเย็นหรือปล่อยให้เย็นตัวประมาณ 60 °C แล้วจึงอัดให้เป็นก้อนหรือแท่งสี่เหลี่ยมหน้าหนักแท่งละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 33 x 670 x 170 มิลลิเมตร ห่อด้วยพลาสติกพอลิเอทิลีน บรรจุใส่ถังเพื่อจำหน่ายต่อไป

2.1.2 การทดสอบสมบัติยางแท่ง [6, 7, 8]

ก่อนนำตัวอย่างที่สุ่มมาไปทดสอบ บดตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บดตัวอย่าง 6 ครั้ง แล้วนำมาทดสอบสมบัติต่อไปนี้

1. ปริมาณสิ่งสกปรก (Dirt content) เป็นประมาณสารที่ได้จากการกรองด้วยตัวกรองที่มีตะแกรงกรอง ขนาดรูตะแกรง 325 เมช หรือ 44 ไมครอน ซึ่งสารที่ได้จากการกรองนั้นประกอบด้วยสารแปลกปลอมอื่นๆ เช่น เปลือกไม้ ดิน ใบไม้

ปริมาณและสิ่งแปลกปลอมมีความสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปยาง เพราะถ้ามีปริมาณสิ่งแปลกปลอมมาก จะมีผลต่อกระบวนการแปรรูป และคุณภาพผลิตภัณฑ์

2. ปริมาณเถ้า (Ash content) ในยางธรรมชาติ ประกอบด้วยเกลืออนินทรีย์ ฟอสเฟตของโปแตสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียมและธาตุอื่นๆ นอกจากนี้อาจเป็น ซิลิกา หรือ ซิลิเกตในยาง รวมทั้งสารที่เกิดจากการปะปนจากภายนอก ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในยางดิบ และช่วยบ่งชี้ว่ามีการเติมสารตัวเติมลงไปช่วยเพิ่มน้ำหนักยางหรือไม่

3. ปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen content) โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปโปรตีน ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจึงเป็นตัวบ่งชี้ว่าในยางดิบมีโปรตีนอยู่มากน้อยเพียงใด

4. ปริมาณสิ่งระเหย (Volatile matter content) โดยส่วนใหญ่เป็นความชื้นที่มีอยู่ในยาง ถ้ามีปริมาณความชื้นสูงจะทำให้ยางเกิดราได้ง่าย มีกลิ่นเหม็น และเกิดปัญหาระหว่างกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยทำให้ยางติดกับผสมกับสารเคมีอื่น ได้ยาก

5. ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity retention index, PRI) แสดงถึงความต้านทานของยางดิบต่อการแตกหักของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูง หรือต่อการออกซิเดชัน ยางที่มีดัชนีความอ่อนตัวสูง แสดงว่ามีความต้านทานต่อการแตกหักของโมเลกุลสูง

6. ความหนืด (Mooney viscosity) เป็นสมบัติที่ต้องระบุคุณภาพด้านการนำยางไปใช้ ยางที่มีความหนืดสูง จะมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งยางมีความแข็งมาก เมื่อนำไปใช้ต้องใช้เวลาในการบดขยี้ให้ نرم หรือให้มีความหนืดน้อยลง เพื่อผสมสารเคมีเข้าไปในยาง ได้ง่ายขึ้น

7. สี (Color) เป็นสมบัติสำคัญของยางแท่งที่ผลิตจากน้ำยาง เมื่อเปรียบเทียบกับสีของตัวอย่างกับสีมาตรฐาน ต้องไม่เกินขีดจำกัดที่กำหนดไว้ เพื่อประโยชน์ในการนำยางไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส หรือมีสีต่างๆ

การกำหนดสมบัติและมาตรฐานของยางธรรมชาติเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากสะดวกต่อผู้ใช้งาน สามารถควบคุมสมบัติบางประการของยางธรรมชาติได้ ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติคงที่ ตัวอย่างการกำหนดมาตรฐานยางไทยหรือเอสทีอาร์ สามารถแสดง ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานของยางเอสทีอาร์ (STR) ชนิดต่างๆ [7]

Parameter	STR	STR	STR 5	STR 5	STR	STR	STR	STR
	XL	5L		CV	10	10 CV	20	20 CV
ปริมาณสิ่งสกปรก (% โดยน้ำหนัก)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (% โดยน้ำหนัก)	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย (% โดยน้ำหนัก)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ความอ่อนตัวเริ่มแรก (P ₀) (min)	35	35	30	-	30	-	30	-
ดัชนีความอ่อนตัว (PRI) (min)	60	60	60	60	50	50	40	40
สี (Lovibond Scale) (max)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืด [ML 1+4(100°C)]	-	-	-	*	-	*	-	*
สัญลักษณ์สี	ฟ้า	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	ขาว บนพื้น เขียว อ่อน	น้ำตาล	ขาว บนพื้น น้ำตาล	แดง	ขาว บนพื้น แดง

หมายเหตุ * สำหรับ STR 5 CV กำหนดไม่เกิน 70(+7,-5), 60(+7,-5) และ (+7,-5) สำหรับ STR 10 CV กำหนดไม่เกิน 60(+7,-5) และ STR 20 CV กำหนดไม่เกิน 65(+7,-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารเติมแต่ง (Additives)

สารเติมแต่ง คือ สารเคมีที่ใส่ลงในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของยาง (Property Enhancement) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น

2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)

ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้ยางซึ่งเป็นวัสดุอ่อน นุ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่มีเสถียรภาพทางรูปร่าง กลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพทางรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ชนิดคือ

1. กำมะถัน (Sulfur)
2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor)
3. สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)
4. ซีลีเนียม (Selenium) เทลลูเรียม (Tellurium)
5. สารอื่นๆ โลหะออกไซด์, ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) เป็นต้น

2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) [6,9]

สารเปอร์ออกไซด์สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงในยางได้ และมีความสำคัญมากสำหรับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล เช่น ยางซิลิโคน ยางอีพ็อกซี ยางยูรีเทน และยางอีวีเอ ในขณะที่ยวกันเปอร์ออกไซด์สามารถใช้กับยางพวกไดอีน (Diene) เช่น ยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และ ยางไนไตรล์ ทำให้ยางเหล่านี้สามารถทนต่อความร้อนได้ดี

วิธีการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อเด่นเหนือการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน คือ

1. สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubber) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated-rubber) นิยมใช้โดยเฉพาะกับยางอิ่มตัวที่ไม่มีฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPM) และยางซิลิโคน (Q)
2. ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties)
3. ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวรหรือเซต (Set) น้อยกว่า
4. ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature flexibility) ดีกว่า

5. สามารถใช้เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีธรรมชาติ ขาวใส หรือขาวขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร มีการเปลี่ยนแปลงสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV light discoloration) น้อยกว่า

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง จึงมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลฟิดิก และพอลิซัลฟิดิก (C-S bonds และ S-S bonds ตามลำดับ) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการ คือ

1. ในการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์จะเกิดกลิ่นเหม็นของสารที่ปลดปล่อยออกมา เช่น สารอะซิโตนิน (Acetofenone) ในระหว่างการเชื่อมโยงและในผลิตภัณฑ์ยาง
2. เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องเพิ่มความระมัดระวังในการใช้และการเก็บรักษา
3. สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งบางชนิดในยางมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมียาง เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน (Oils) สารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidants) เป็นต้น
4. ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยงยาง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในบรรยากาศทำให้เกิดหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคืออาจเกิดการเสียสภาพ สลายตัวเนื่องจากความร้อนนั่นเอง
5. ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) เกิดปฏิกิริยาเสียสภาพ (Degradation) เมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสามารถเกิดเป็นอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้น ที่ไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR)

มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้ในการเชื่อมโยงยางเช่น ไดอะซิล เปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxides) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy ester) เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่

- ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)
- ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-*t*-butyl peroxide, DBP)
- ไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(*t*-butyl-peroxy)hexane)

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (DCP) มีจำหน่าย

ทั้งในรูปแบบของแข็งและของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90-99% เนื่องจากเปอร์ออกไซด์มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นกับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเปอร์ออกไซด์ในยาง จำนวนของหมู่ฟังก์ชัน และไฮโดรเจนของโครงสร้างยางที่สามารถถูกจับด้วยอนุมูลอิสระ ปกติในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ในปริมาณ ไม่เกิน 2.5 phr (ส่วนในร้อยส่วนของยาง) ที่อุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ 150-230 °C การใช้อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาที่ลดลงประมาณ 2.5 เท่าทุก 10 °C ที่เพิ่มขึ้น แต่จะเสี่ยงกับการเสียสภาพของยางและต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้สารเชื่อมโยงยางมากเกินไป จะทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากเกินไป (Over-cure) ทำให้สมบัติบางประการลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ เปอร์ออกไซด์ (Peroxide, HC15Ay[®]) เป็นสารเชื่อมโยงยาง เนื่องจากก่อนที่จะได้มาเป็นแบบพิมพ์ยางในงานเครื่องประดับนั้น ผู้ใช้งานจะต้องกรีดเอาโลหะต้นแบบออกจากแบบพิมพ์ยาง ซึ่งการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ของสารอะซิโตนที่โชนออกมาด้วย จึงเลือกใช้เปอร์ออกไซด์ชนิดนี้ซึ่งเป็นชนิดไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ในการวิจัย

2.2.2 สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) [9, 10, 11]

โมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่รวมกัน มีความว่องไวสูงต่ออนุมูลอิสระ จะเป็นส่วนที่ช่วยทำให้การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น Co-agent ส่วนใหญ่จะอยู่ในกลุ่มของ เมลลาอิมิด (Maleimide) และ อัลลิลิก (Allylic) การเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์นั้นอาจเกิดได้ไม่สมบูรณ์ จำเป็นต้องมี Co-agent เป็นสารที่ทำหน้าที่เพิ่มอัตราเร็วและเสริมประสิทธิภาพร่วมในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ [11]

ประเภทของ Co-agents

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเปอร์ออกไซด์ ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาแบบเติม (Addition reaction) และ ปฏิกิริยาการจับไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction reaction) ได้ 2 ประเภท โครงสร้างแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.3

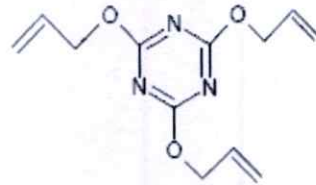
- Type I เกิดปฏิกิริยาได้ทั้งปฏิกิริยาแบบเติม และปฏิกิริยาการจับไฮโดรเจน มีมวลโมเลกุลต่ำ จะเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ หรือตำแหน่งที่มีความว่องไว จะทำให้เวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time) เกิดเร็ว Co-agent กลุ่มนี้ ได้แก่ อะคริเลต (Acrylate), เมทาคริเลต (Methacrylate), เกลือของซิงค์ (Zinc salt)

- Type II เกิดปฏิกิริยาแบบเติม ได้เพียงอย่างเดียว สามารถใช้ได้กับยางที่มีขั้วต่ำ เข้ากันได้กับยางหลายประเภท Co-agent ในกลุ่มนี้ไม่ทำให้อัตราการเชื่อมโยง ในเปอร์ออกไซด์เร็วขึ้น แต่จะทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงสมบูรณ์เท่านั้น ซึ่งได้แก่ ไซยานูเรต (Cyanurate), ไอโซไซยานูเรต (Isocyanurate)

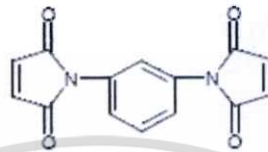
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1,2-polybutadiene (1,2-BR)



Triallylcyanurate (TAC)

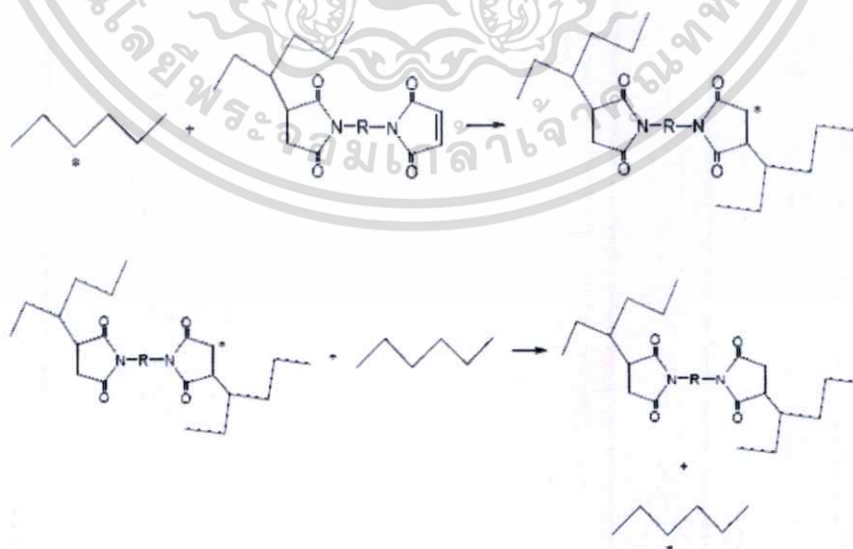


N,N'-m-phenylenedimaleimide (BMI-MP)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Co-agents บางชนิด [12]

กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent

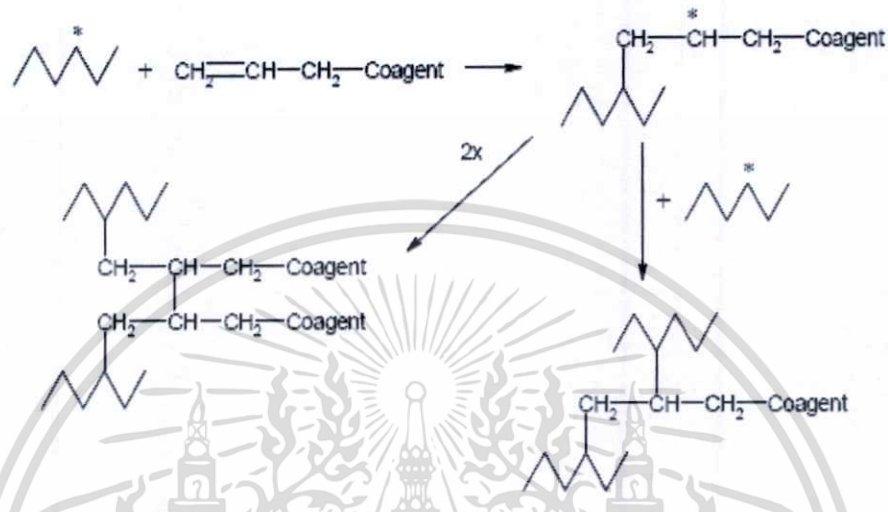
กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent ชนิด Type I ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในขณะที่เกิดการเชื่อมโยง แสดงดังรูปที่ 2.4 อนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ รวมตัว Co-agent เกิดการเคลื่อนย้ายสายโซ่ และรวมตัวกับอนุมูลอิสระ เกิดการเชื่อมโยงกับพันธะคู่ในยาง นอกจากนี้อนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาอย่างเช่นเดียวกับการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์



รูปที่ 2.4 กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent ชนิด Type I [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent ชนิด Type II สามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่ที่เกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระอย่างรวดเร็ว (Polymer radicals หรือ Macro radicals) เกิดการตัดสายโซ่ (Chain scission) และเกิดการเคลื่อนย้ายสายโซ่ จากนั้นจึงจะเกิดการรวมตัวเกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกันกับ Co-agent ชนิด Type I แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการเชื่อมโยงด้วย Co-agent ชนิด Type II [13]

ประโยชน์เมื่อใช้สารเสริมการเชื่อมโยง

- สามารถใช้กับยางชนิดที่อิมตัวและไม่อิมตัว
- มีเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stability) สูง
- การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) ต่ำ
- ความสามารถในการกระเดิงตัว (Resilience) สูง
- ไม่เกิดการเลอะสี (Discoloration)
- ยางคงรูปที่ได้จะมีค่าความแข็ง (Hardness) โมดูลัส (Modulus) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) สูงมาก
- ทำหน้าที่เป็น พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เพิ่มความนิ่มให้กับยางและยังช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

ข้อเสีย

- ค่าใช้จ่ายสูง
- พื้นผิวของยางคอมพาวด์อาจเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activator)

สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้น หรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) ดังนั้นอาจเรียกสารนี้ว่าสารกระตุ้นสารเร่ง (Accelerator activators) ลักษณะสำคัญของตัวกระตุ้นคือมีความเป็นด่าง (Alkaline) นอกจากใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวกระตุ้นแล้ว อาจใช้ ลิเทียม (Li₂O) แมกนีเซียม (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amine) โดยปกติในอุตสาหกรรมใช้ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) 2-5 phr ตัวกระตุ้นร่วมกับ ZnO อีกชนิดคือ กรดไขมัน (Fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) กรดลอริก เกิดเป็นซิงค์ลอริเอต (Zinc laurate) โดยปกติใช้กรดสเตียริกในอุตสาหกรรมยางประมาณ 1-3 phr นอกจากสเตียริกทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการเชื่อมโยงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็น สารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยางทำให้ความหนืดของยางลดลง

2.2.4 สารตัวเติม (Filler) [6]

สารตัวเติม ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อหรือลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต และสารตัวเติมบางชนิดนอกจากใช้ลดต้นทุนแล้วยังเพิ่มความแข็งแรงหรือเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง เช่น เขม่าดำ (Carbon Black, CB) ซิลิกา (Silica)

วัตถุประสงค์ของการใส่สารตัวเติม

1. เพื่อลดต้นทุน
2. เพื่อปรับสมบัติทางกายภาพของยาง
3. เพื่อช่วยกระบวนการผลิต
4. เพื่อลดการบวมตัวของยางในน้ำมัน
5. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

2.2.4.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) [6]

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO₃) เป็นสารตัวเติมสีขาวที่ได้จากธรรมชาติ เกิดจากการสะสมตะกอนเป็นเวลานาน เช่น ซากเปลือกหอยต่างๆ เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกโลกที่มีมากชนิดหนึ่ง แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อที่นิยมใส่ผสมพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น พลาสติก ยาง สี สิ่งทอ กาว พรม ฯลฯ เนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติเสียดทาน (Abrasion) ต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้ และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดคือมีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 2.72 g/cm³) ไม่ทนกรด ไม่สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสกับกรด เนื่องจากจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการปฏิกิริยากับกรด แคลเซียมคาร์บอเนต

เป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ มักจับตัวเป็นก้อนจึงนิยมใช้สารช่วยกระจายตัว เช่น กรดสเตียริก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Stearic acid) เคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว นอกจากนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพ การเสริมแรง (Non-reinforcing filler) หรือเสริมแรงเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว

แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเตรียมได้จากการบดแห้ง (Dry grinding) บดเปียก (Wet grinding) และการตกตะกอน (Precipitation) การบดแห้งมีกระบวนการที่ผลิตง่าย โดยการให้แรงบดให้แตก (Crushing) ทำให้เป็นผง (Pulverizing) และแยกขนาดโดยการใช้ลมเป่า แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดแห้งมีความบริสุทธิ์ต่ำและมีขนาดใหญ่ (ขนาดมากกว่า 12 ไมครอน) กระบวนการบดแบบเปียกทำการชะล้างสิ่งเจือปนที่มีสี และแยกขนาดโดยการหมุนปั่นความเร็วสูง จะได้แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กกว่า และมีความบริสุทธิ์สูงกว่า

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน (Precipitated CaCO₃) สามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น กระบวนการโซลเวย์ (Solvay) รีคาร์บอนเนชัน (Recarbonation) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ตัวอย่างการผลิตโดยกระบวนการรีคาร์บอนเนชันซึ่งเป็นวิธีที่สำคัญและง่ายที่สุด สามารถแสดงได้ดังสมการ



กระบวนการผลิตเริ่มต้นด้วยปฏิกิริยาแคลซิเนชัน (Calcination) ของหินปูน (Limestone) ที่ประมาณ 900 °C เพื่อให้ได้แคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ให้ได้สารละลายสีขาวคัลายน้ำนมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนที่สามเป็นปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน โดยการให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปูดผ่านสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในถังปฏิกรณ์ที่เรียกว่าคาร์บอนเตออร์ (Carbonator) การละลายแล้วตกตะกอนใหม่ทำให้ได้แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์สูง อนุภาคขนาดเล็กช่วยเสริมแรง เมื่อใช้เป็นสารตัวเติมของพอลิเมอร์ แต่มีราคาแพง

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบด (ธรรมชาติ) มีปริมาณ CaCO₃ ประมาณ 94% ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอนมีปริมาณ CaCO₃ มากกว่า 98% แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์มีขั้ว สามารถเข้าได้ดีกับยางที่มีขั้วมากกว่ายางที่ไม่มีขั้วและอาจจับตัวเป็นก้อนไม่กระจายตัวในยางเช่นเดียวกับสารตัวเติมอนินทรีย์ชนิดอื่น ดังนั้นการเคลือบสารบางประเภท เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) หรือชันสน (Rosin) เพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางสมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดต่างๆ [6]

สมบัติ	Ground		Precipitated
	Fine	Coarse	
Average particle size (microns)	3-14	17	0.07
Density (g/cm ³)	2.71	2.71	2.55-2.65
Surface area, BET N ₂ (m ² /g)	0.9-2.2	-	11-26
Oil absorption, ASTM D-281	5-21	5-6	28-58
Mohs hardness	2.5-3	3	2.5-3

2.2.4.2 ซิลิกา (Silica) [6]

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่นๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางเช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat buildup) เพิ่มความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง เป็นต้น ในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) เช่น สารประกอบไฮเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัสดุ ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากทั้งธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาชี้กับหลายปัจจัยได้แก่

- ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำใน โครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น pH, องค์ประกอบทางเคมี, การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) เป็นต้น

ซิลิกาสามารถแบ่งได้หลายชนิด ดังนี้

1. ซิลิกาจากธรรมชาติหรือซิลิกาชนิดบด (Ground Silica)

ซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติ โดยการขุดจากเหมืองแล้วทำการบดให้มีขนาดเล็ก เป็นผลึกโดยธรรมชาติ ซิลิกาชนิดบดนิยมนำมาใช้เพื่อลดต้นทุน เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยเพิ่มสมบัติการทนความร้อน (Heat resistance) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชนิดคือ

- ซิลิกาผลึก (Crystalline silica) คือซิลิกอนไดออกไซด์ในรูปผลึกควอร์ตซ์ไซด์ (Quartzite) ซึ่งเป็นสินแร่ที่พบมากเป็นอันดับสอง ได้จากการขุดจากเหมืองแล้วทำการบดล้างบด และแยกขนาด (ด้วยตะแกรงร่อนหรือลมเป่า) ซิลิกาชนิดนี้มีสิ่งเจือปนสูง มีพื้นผิวที่แตกหัก

ขรุขระและมีขอบแหลมคม ทำให้มีสมบัติความเสียดทานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) บางครั้งอาจเรียกว่าคริปโตคริสเตอไลน์ควอर्टซ์ (Cryptocrystalline quartz) หรือซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) สามารถผลิตได้ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับซิลิกาชนิดผลึก แต่จะได้อนุภาคที่มีพื้นผิวเรียบ มีขอบอนุภาคมนกลม ซิลิกาชนิดนี้บดง่าย สามารถใช้ผลิตซิลิกานาโนขนาดเล็กมาก (Ultrafine silica)

- ซิลิกาไดอะตอมเมเชียส (Diatomaceous silica) ผลิตจากไดอะตอมไมต์ (Diatomite) ซึ่งเป็นหินอ่อนคล้ายซอล์คที่เกิดจากซากกระดูกฟอสซิลเรียกว่าไดอะตอม (Diatoms) สามารถผลิตได้จากการบดหินและแยกขนาดด้วยลมหมุน (Cyclone)

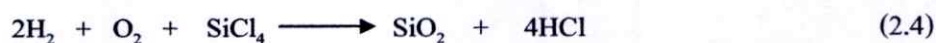
ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของซิลิกาจากธรรมชาติชนิดต่างๆ [6]

สมบัติ	Crystalline	Microcrystalline	Diatomaceous
Average particle size (microns)	1.98-8.8	2.1-8.2	3-8
Density (g/cm ³)	2.65	2.05	-
Surface area, BET N ₂ (m ² /g)	0.54-2.06	3.6-6	-
Oil absorption, ASTM D-281	24.1-36.2	26-30	105-135
Mohs hardness	6.5-7	6.5-7	6.5-7

2. ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ (Synthetic silica)

ซิลิกาชนิดสังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็ก สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชนิด คือ ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) และซิลิกาชนิดเจล (Gel silica)

- ซิลิกาชนิดไอ (Fumed silica) หรือ ซิลิกาชนิดไพโรเจนิค (Pyrogenic silica) เตรียมได้จากปฏิกิริยาเคมีในสภาวะเป็นไอที่อุณหภูมิสูง เกิดจากซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon tetrachloride, SiCl₄) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในตะเกียงเผาของไฮโดรเจนและออกซิเจน คิวหรือไอของผลิตภัณฑ์จะควบแน่นกลายเป็นก้อนซิลิกานาโนขนาดเล็กมาก (ประมาณ 20 nm) ดัดที่ลูกกลิ้งหมุน สรุปลงเป็นสมการเคมีดังนี้



อนุภาคซิลิกาชนิดนี้จะเกิดการหลอมรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก (Aggregates) และอาจเกิดการรวมกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Agglomerates) ขนาดและพื้นที่ผิวของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยา จากนั้นเป็นการแยกขนาดโดยลมหมุน (Cyclone)

หรือตะแกรงร่อน กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ตกค้างจากปฏิกิริยาอาจดูดซับติดที่ผิวของอนุภาค เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถกำจัดออกได้ด้วยการผ่านอากาศร้อนชื้น (Humid hot-air) ซิลิกาชนิดนี้มีความบริสุทธิ์หรือปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) สูงมากกว่า 99 % มีปริมาณความชื้น 1-2 % และมีขนาดอนุภาคเล็กมาก จึงมีประสิทธิภาพการเสริมแรงสูง

- ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในสถานะของเหลวซึ่งต้นทุนการผลิตต่ำกว่าในสถานะไอ ซิลิกาชนิดนี้ได้จากการตกตะกอนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) หรือ ของผสมของกรดเกลือกับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ดังสมการ



สมบัติของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จากหลายปัจจัยเช่น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราส่วนการใส่สารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกรองล้างทำความสะอาด ทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดที่ต้องการ ซิลิกาชนิดนี้มีความบริสุทธิ์หรือปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) น้อยกว่า 94 % มีปริมาณความชื้นสูง ประมาณ 3-9 %

- ซิลิกาชนิดเจล (Gel silica) การตกตะกอนซิลิกาในสถานะกรดเป็นเวลานานจะได้สารไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือ เจลซิลิกา (Silica gel) ที่เป็นโครงสร้างของอนุภาคคอลลอยด์ของซิลิกาต่อกันคล้ายร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) จากนั้นจะทำการชะล้าง ทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดเล็ก ขั้นตอนการทำให้แห้งมีความสำคัญ ถ้าทำให้แห้งอย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการยุบตัวของโครงสร้างจะได้ แอโรเจล (Aerogel) แต่ถ้าทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดออกช้าๆ ทำให้เกิดการยุบตัวของ โครงสร้างจะเรียกว่า ซีโรเจล (Xerogel)

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของซิลิกาจากการสังเคราะห์ชนิดต่างๆ [6]

สมบัติ	Fumed	Precipitated	Gel
Primary particle size (microns)	0.007-0.04	0.01-0.30	-
Average particle size (microns)	0.8	8-10	4-8
Density (g/cm ³)	2.2	2.2	2.2
Surface area, BET N ₂ (m ² /g)	50-400	60-300	100-800
Oil absorption, ASTM D-281	150-250	160-200	150-250
Mohs hardness	6.5-7	6.5-7	6.5-7
% Moisture	< 1.5	6.0	5.0
Silanol groups (no./nm ²)	2.4	1.5-1.0	4-10

2.2.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agent) [6, 9]

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสภาพ (Degradation) เกิดเนื่องจากโมเลกุลของถูกทำให้เปลี่ยนแปลงโดยสิ่งเร้าต่างๆ โดยเฉพาะ ออกซิเจน (O₂) และ โอโซน (O₃) นอกจากนี้ปฏิกิริยาเสื่อมสภาพของยางจะถูกร่งให้เกิดเร็วขึ้นเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ความร้อน แสง ความไม่บริสุทธิ์ของ โลหะ การเสื่อมสภาพของยางแบ่งเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ ดังนี้

- เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน
- เสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของ โลหะที่เป็นตัวเร่ง
- เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน
- เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง
- เสื่อมสภาพเนื่องจากหักงอไปมา
- เสื่อมสภาพเนื่องจากบรรยากาศ

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการผสมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เพื่อป้องกันการเสี่ยสภาพและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจนหรือสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Antioxidant) และ สารป้องกันการเสื่อมสภาพจากโอโซนหรือสารแอนตี้ออกซิแนนท์ (Antiozonant)

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Antioxidant) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. สารแอนตี้ออกซิแดนท์ ชนิดตกสี (Staining antioxidant) เป็นสารประกอบเอมีน (Amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีนเป็นพวกอะโรมาติกเอมีน จึงทำให้ยางมีสีคล้ำ และตกสี (Stain) นิยมใช้กับยางที่มีสีดำน

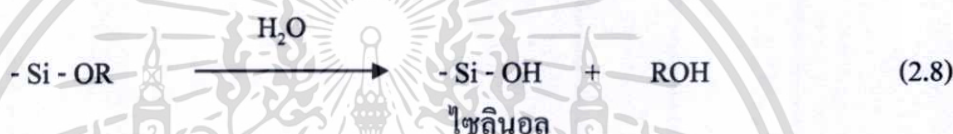
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารแอนติออกซิแดนท์ ชนิดไม่เป็นสี (Nonstaining antioxidant) เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล นิยมใช้กันอย่างทั่วไปที่ไม่มีสีและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอันสวยงาม

2.2.6 สารคู่ควบ (Coupling Agent) [9]

สารคู่ควบ (Coupling Agent) เป็นตัวช่วยยึกระหว่างสารตัวเดิมกับยางให้ยึดกันได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ดีขึ้น เช่น ไซเลน (Silane) ผลของไซเลนทำให้มอดูลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอ การเปลี่ยนรูปถาวรของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเดิมดีขึ้นมาก

ไซเลนเป็นสารที่มีสูตรทั่วไปเป็น $R'-Si-(OR)_3-R'$ เป็นกรุปอะมิโนเมอร์แคปโต ไวนิลอีพอกซี หรือ Methacryloxy เป็นต้น $-OR$ เป็นกรุป Alkoxy ในการใช้งาน Alkoxy จะถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็น ไซลินอล



ไซลินอลจะไปเกาะกับสารตัวเดิมชนิดอนินทรีย์ เช่น ผิวนอกซิลิกา เคลย์ (Clay) หรือโลหะออกไซด์ เป็นต้น ส่วนอีกด้านหนึ่งคือ R' จะไปทำปฏิกิริยากับยาง ดังนั้น ไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือประสานให้ยางกับสารตัวเดิมอนินทรีย์มาเกาะกัน วิธีใช้ไซเลนทำโดยผสม สารตัวเดิมก็ได้เช่น γ -Aminopropyltrimethoxy Silane ($H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)_3$), β -Mercaptoethyltriethoxy Silane ($HSC_2H_4Si(OC_2H_5)_3$)

2.2.7 น้ำมันช่วยผสม (Processing oil) [6]

น้ำมันช่วยผสมจะช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่ง ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน น้ำมันจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆคือ อะโรมาติก (Aromatic) แนฟทานิก (Naphthanic) และพาราฟิน (Paraffinic) การเลือกน้ำมันเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าน้ำมันไม่สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี น้ำมันจะไปอยู่ที่ผิวของของผสมทำให้สมบัติทางกายภาพที่ต้องการลดลง

จุดแอนิลิน (Aniline point) เป็นการวัดความเป็นอะโรมาติก (Aromaticity) ของน้ำมัน โดยเป็นจุดที่น้ำมันสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวในแอนิลินได้ ดังนั้นจุดแอนิลินต่ำแสดงว่ามีปริมาณอะโรมาติกมาก ซึ่งน้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นวง (Cyclic carbon structure) สูงแต่จะแตกต่างกันที่ปริมาณวงที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวดังนี้

1. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) หมายถึงน้ำมันมีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกไม่อิ่มตัว มีความคล้ำ ความหนืดสูง
2. น้ำมันแนฟทาติก (Naphthanic oil) หมายถึงน้ำมันมีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนแนฟทาติกอิ่มตัว มีความหนืดปานกลาง
3. น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) หมายถึงน้ำมันมีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว อาจมีโซ่กิ่งบ้าง มีความหนืดบ้าง

2.2.8 สารให้สี (Colorants) [6]

ผลิตภัณฑ์บางชนิดต้องการให้มีสีเพื่อความสวยงาม จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารที่ทำให้เกิดสีลงไป สีที่เติมลงไปควรมีประสิทธิภาพ ทนทานแสงแดด ความร้อน ไม่ตกสี ไม่เป็นพิษ ราคาไม่แพง ไม่มีผลต่ออายุของยาง และอัตราเร็วที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยง สารให้สีสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ สีอินทรีย์ และ สีอนินทรีย์

1. สีอินทรีย์ (Organic colorant) เป็นสีที่มีประสิทธิภาพดี ใช้ในปริมาณเล็กน้อยประมาณ 1 phr ให้สีสด สวยงาม แต่มีราคาแพง สีอินทรีย์บางชนิดเปลี่ยนสีหรือสีจางลงได้เมื่อสัมผัสกับแสงนาน หรือสัมผัสกับสารเคมี และไม่ทนต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง อาจใช้สีอินทรีย์ในรูปของผงสี หรือในรูปของส่วนผสมของยางกับสารเคมี หรือมาสเตอร์แบทช์ (Masterbatch)
2. สีอนินทรีย์ (Inorganic colorant) เป็นสีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าสีอินทรีย์ ราคาถูก ต้องใช้ในปริมาณมาก 5-10 phr สีค่อนข้างทึบไม่ใส แต่มีความคงตัวอยู่นาน สีนึกไม่จาง และทนอุณหภูมิ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2), ลิโธพอน (Lithopone)

2.3 การทดสอบยาง

2.3.1 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeters) [6, 14]

เครื่องวัดการเชื่อมโยงยางเป็นเครื่องมือที่ใช้หาสถานะของการเชื่อมโยง เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

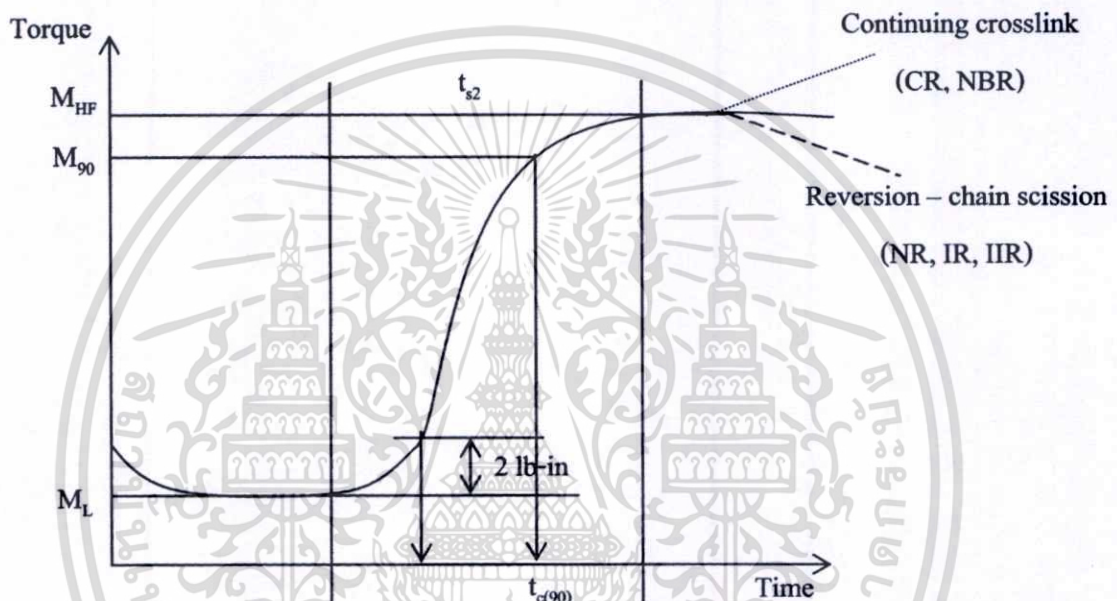
1. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer, ODR) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเชื่อมโยงได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการทดสอบยาง เพื่อใช้หาสถานะและเวลาที่เหมาะสมในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานของเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่นคือ ตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดแรงบิดหรือทอร์ค (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ในตัวอย่างที่มุ่มลงที่ เนื่องจากการทดสอบที่อุณหภูมิสูง จึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดเนื่องจากความหนืด ดังนั้นการเพิ่มแรงบิดของตัวอย่างยางที่เกิดการเชื่อมโยงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่า กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.6

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving Die Rheometer, MDR) เป็นเครื่องมือวัดการเชื่อมโยงที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็วเนื่องจากชิ้นทดสอบเล็กและบางกว่า ข้อมูลที่ได้ถูกต้องแม่นยำกว่า เพราะความผิดพลาดซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานของงานหมุนต่ำกว่าเครื่องมือวัดการเชื่อมโยงแบบงานสั้นและให้ข้อมูลมากกว่า เช่น มอดุลัสการสูญเสีย (Loss modulus, E'') อัตราการเชื่อมโยงและมุมเฟส (Phase angle)



รูปที่ 2.6 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) [14]

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่างๆในกราฟการเชื่อมโยงดังนี้

- M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
 M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
 M_{90} = ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อมโยง สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9(M_{HF} - M_L) \quad (2.9)$$

t_{s2} = เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว (lb-in) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L)

t_{90} = เวลาเชื่อมโยง คือเวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90 % (M_{90}) นิยามเท่ากับเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมโยงยาง (Optimum cure time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CRI = ดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ

$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100 / (t_{C(90)} - t_{S2}) \quad (2.10)$$

กราฟการเชื่อมโยงสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 (Delay phase) เมื่อให้แรงบิด ยางจะนิ่มเล็กน้อยเนื่องจากการจัดเรียงตัวของ สายโซ่โมเลกุลยางตามแนวแรง หรือเกิดปรากฏการณ์การนิ่มเนื่องจากแรงเฉือน (Shear thinning effect) เป็นผลให้ค่าแรงบิดมีค่าต่ำลงเล็กน้อยและคงที่ ค่าแรงบิดที่ต่ำที่สุดนี้นิยามเท่ากับ M_L (Minimum torque) ช่วงนี้คือช่วงเวลาที่สามารถขึ้นรูปได้ (Processing time) ผลึกภัณฑ์ยางได้

ช่วงที่ 2 (Curing phase) เมื่อเวลานานเพียงพอ สารเชื่อมโยงได้แก่ กำมะถัน (Sulfur), เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงกับยางจากสายโซ่ตรงเป็นร่างแหสามมิติ ทำให้ค่าแรงบิดมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและคงที่ ช่วงนี้จะให้ข้อมูลอัตราเร็วของการเชื่อมโยง

ช่วงที่ 3 (Overcure phase) สามารถให้ข้อมูลการเสื่อมสภาพ (Degradation) ของยางได้ ถ้ายังทำการทดลองต่อไป เส้นกราฟจะเป็นไปได้ใน 3 ลักษณะ คือ

1. เส้นกราฟคงที่ เรียก Flat cure หรือ Plateau cure เป็นการแสดงสถานะ การคงรูปที่ปฏิกิริยาสมบูรณ์แล้ว หลังจากนั้นสมบัติของยางจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงว่ายางมีองศาการเชื่อมโยงคงที่ (Degree of crosslinking)
2. เส้นกราฟสูงขึ้น เรียก Marching เป็นการแสดงสถานะ การคงรูปที่ปฏิกิริยายังไม่เกิดการสิ้นสุด ค่ามอดุลัสของยางเพิ่มขึ้น แสดงว่ายางมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบางชนิดเกิดการเชื่อมสลายแบบเกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) ยางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ได้แก่ ยางครอโรพรีน (CR) ยางไนไตรล์ (NBR)
3. เส้นกราฟลดลง เรียก Reversion เป็นการแสดงสถานะ การคงรูปที่ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์แล้ว หลังจากนั้นสมบัติของยางจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เกิดการเชื่อมสลายแบบเกิดการขาดของสายโซ่ยาง (Chain scission) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบนี้ได้แก่ ยางธรรมชาติ (NR) ยางไอโซพรีน (IR) ยางบิวทิล (IIR)

2.3.2 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) [6, 14]

เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ของยางแบบ Mooney viscosity ใช้วัดหาค่าความหนืดของยางดิบและยางผสมสูตร เพื่อทดสอบมาตรฐาน หรือ เพื่อควบคุมคุณภาพ หลักการทำงาน คือ งานหมุนโลหะ (Rotor) หมุนด้วยความเร็วคงที่ที่อยู่ในชั้นยาง จะเกิดแรงเฉือนขึ้น แล้ววัดค่าแรงเฉือนดังกล่าว

เครื่องมือประกอบด้วยมอเตอร์สำหรับขับงานหมุน (Rotor) หมุนอยู่ในห้องใส่ยาง (Die cavity)

ด้วยความเร็ว 2 ± 0.02 รอบต่ออนาที ภายใต้อุณหภูมิและความดันตามที่กำหนดไว้ การหมุนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

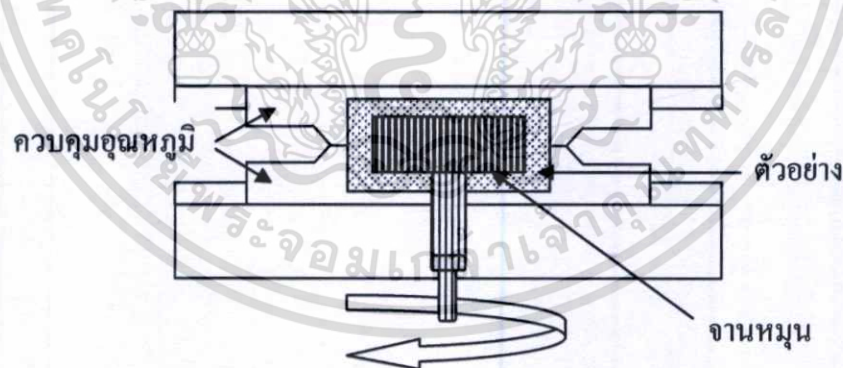
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จานโลหะ ที่มียางหุ้มอยู่จะทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ขึ้น แรงบิดนี้เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างยางกับจานหมุนภายในห้องใส่ยางเท่านั้น แรงบิดจะขับสปริงให้เกิดการเคลื่อนที่ ซึ่งมีไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดขนาดการเคลื่อนที่ดังกล่าวให้ออกมาเป็นหน่วยที่เรียกว่า ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity, MV) โดยกำหนดให้แรงบิดขนาด 8.30 ± 0.02 นิวตัน-เมตร (N-m) เทียบเท่ากับค่าความหนืด 100 หน่วยมูนนี่ องค์กรประกอบของเครื่องวัดความหนืดมูนนี่แสดง ดังรูปที่ 2.7

จานหมุน (Rotor) มีลักษณะผิวเป็นร่อง เพิ่มผิวสัมผัสและแรงเสียดทานเพื่อป้องกันการเลื่อนไถลระหว่างจานหมุนกับยาง โดยทั่วไปการหาค่าความหนืดมูนนี่ใช้จานหมุน 2 ขนาดคือ

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

ยางที่ทำการทดสอบหาค่าความหนืดมูนนี่ สามารถเตรียมขึ้นทดสอบได้จากการรีดด้วยเครื่องบดผสม สองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ให้เป็นแผ่นมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ทั้งตัวอย่างไว้อย่างน้อย 30 นาที จากนั้นตัดขึ้นทดสอบเป็น 2 แผ่นให้มีขนาดใหญ่กว่า จานหมุน (เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4.5-5 เซนติเมตร) นำขึ้นทดสอบมาประกบด้านบนและล่างของ จานหมุน ใช้แผ่นเซลโลเฟนหรือพลาสติกบางประมาณ 0.25 มิลลิเมตร รองเพื่อป้องกันไม่ให้ยางติดผนังของห้องทดสอบ ยางภายในห้องทดลองจะได้รับความร้อนช่วงแรกตามเวลาที่กำหนด (Preheat time) ใช้เวลา 1 นาที ก่อนเริ่มเดินเครื่อง ค่าความหนืดมูนนี่เมื่อเวลาผ่านไปตามเวลาที่กำหนด นิยมอ่านค่าเมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที หรือ 8 นาที ขึ้นกับชนิดของยาง

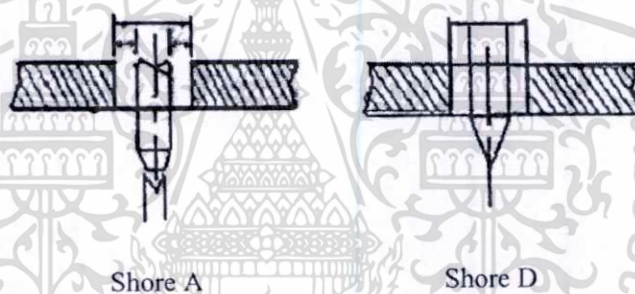


รูปที่ 2.7 จานหมุนโลหะในเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ [14]

2.3.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness Test) [6]

1. ความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness)

เครื่องมือที่นิยมใช้วัดความแข็งกดอีกชนิดหนึ่งคือ คูโรมิเตอร์ (Durometer) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 มีขนาดเล็ก สะดวกในการใช้งาน นิยมใช้และเป็นที่แพร่หลายทั่วโลก มักใช้แรงสปริงในการกด (Spring-loaded durometer) สเตลสำหรับเครื่องวัดความแข็งกดแบบ คูโรมิเตอร์คือ 0 ถึง 100 ค่าความแข็งกด 0 คือความแข็งของของเหลว และค่าความกด 100 คือความแข็งของวัสดุแข็งมาก ไม่ยุบตัว เช่น กระจก คูโรมิเตอร์ชนิด A หรือชอร์ A (Type A or Shore A durometer) ใช้วัดพอลิเมอร์ อ่อนนุ่ม เช่นยางใช้วัดวัสดุที่มีความแข็งไม่เกิน 90 ถ้าวัสดุมีความแข็งไม่เกิน 90 ถ้าวัสดุมีความแข็งกดเกิน 90 จะใช้คูโรมิเตอร์ชนิด D หรือชอร์ D (Type D or Shore D durometer) ซึ่งรูปร่างของหัวกดจะแตกต่างกันไป แสดงดังรูปที่ 2.8 ค่าความแข็งกดอ่านจากค่าเฉลี่ยหรือค่ากลาง ขึ้นกับมาตรฐานนั้นๆ หลังจากกดเป็นเวลา 15 วินาทีหรือ 30 วินาที ยางที่ใช้ในการทดสอบ มีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.8 ลักษณะและรูปร่างของหัวกดชนิดต่างๆ [15]

2. ความแข็งกดสากล (International Hardness)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1415 ทดสอบโดยการกดหัวกดลงบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ด้วยแรงเริ่มต้นเพียงเล็กน้อย ส่วนแรงที่ใช้กดเป็นน้ำหนักโดยตรงไม่ใช่สปริง นิยมใช้เวลาในการกด 30 วินาที ซึ่งปกติแล้วระยะที่จมลงในชิ้นทดสอบจะถูกเปลี่ยนเป็นระดับความแข็งของยางแบบสากล (International Rubber Hardness Degrees, IRHD) ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 ซึ่งมีความหมายคล้ายกับความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์

2.3.4 สัณฐานวิทยา (Morphology) [16, 17]

Scanning electron microscope (SEM) เป็นการตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดจะถูกร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณภาพ แสดงดังรูปที่ 2.9

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างจะมีสัญญาณที่เกิดขึ้น 3 สัญญาณ คือ

1. การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (Backscattered electron, BSE) เป็นผลมาจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในลำอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างที่มีประจุบวก แล้วกระเจิงออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีพลังงานสูง

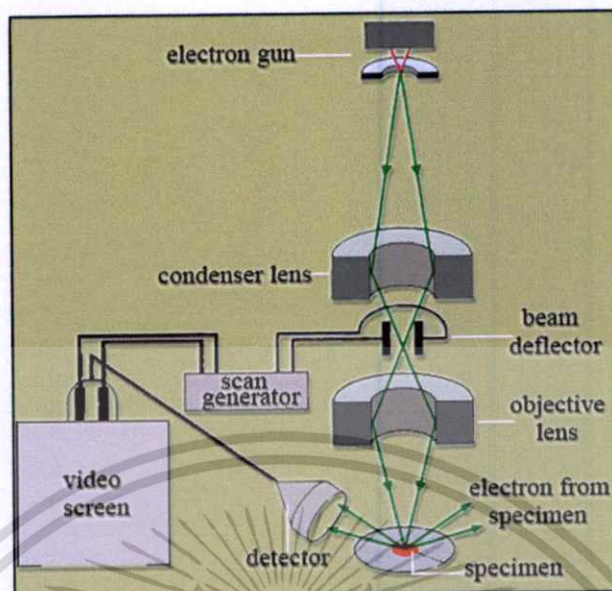
2. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron, SE) เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่อยู่วงใน (Inner shell) ของอะตอมตัวอย่าง อิเล็กตรอนชนิดนี้จะคายออกมาจากตัวอย่างและมีพลังงานต่ำ

3. รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เกิดจากการขาดหายไปของอิเล็กตรอนในวงในของอะตอมตัวอย่าง หลุดหายไป ทำให้อะตอมที่อยู่วงนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่แล้วคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปแบบริงส์เอ็กซ์

สัญญาณทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือตรวจวัด (Detector) ที่ใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นหลอดทั้งสแตนด์ที่ถูกทำให้ร้อน (Heated tungsten filament) หรืออาจใช้เลินทานัมเฮกซะโบไรด์ (Lanthanum hexaboride, LaB₆)
2. เลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) ใช้เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ
3. ขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดที่ละตำแหน่งจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งภาพ
4. เครื่องตรวจวัด (Detector) ใช้ตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจวัด เช่น Secondary electron detector จะใช้ได้หลายชนิดสัญญาณที่เป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยเรียกสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นว่า Secondary electron detector (SEI)
5. จอแสดงภาพ (Cathode ray tube) จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงภาพที่ได้จากเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของเครื่อง SEM [17]

2.4 แบบพิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ (Jewelry Molding Rubber)

การผลิตเครื่องประดับนั้น ต้องมีการทำต้นแบบของเครื่องประดับเพื่อใช้ในการทำแบบพิมพ์ของเครื่องประดับชนิดนั้น ซึ่งการทำต้นแบบนี้เป็นการพัฒนาขั้นตอนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งขั้นตอนการทำต้นแบบนี้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของเครื่องประดับ ต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดจริงของเครื่องประดับ และเมื่อได้ต้นแบบมาแล้วสามารถนำต้นแบบชนิดนั้นไปใช้ทำแบบพิมพ์ได้อีกเป็นจำนวนมาก โดยไม่จำเป็นต้องขึ้นฝีมือใหม่ ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการผลิตได้เป็นอย่างมากหลังจากนั้นนำต้นแบบมาทำเป็นแบบพิมพ์ยาง (Jewelry Molding Rubber) ขึ้นมา เพื่อที่จะเข้าสู่กระบวนการหล่อตัวเรือนเครื่องประดับต่อไป

สมบัติของแบบพิมพ์ยางนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสามารถเก็บรายละเอียดของต้นแบบได้เป็นอย่างดี แบบพิมพ์ยางที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ผลิตเครื่องประดับมี 2 แบบ [18] ได้แก่

1. แบบพิมพ์บล็อก เป็นแบบพิมพ์ยางที่เมื่อผ่านการอบร้อนแล้วสามารถฉีกแบบพิมพ์ออกเป็น 2 ส่วนได้ทันทีโดยไม่ต้องผ่า เนื่องจากมีเดือยแทรกอยู่ระหว่างแบบพิมพ์ การฉีกแบบพิมพ์แทนการผ่าจึงทำให้แบบพิมพ์ประเภทนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า แบบพิมพ์ฉีก แบบพิมพ์ฉีกมีข้อเสียตรงที่ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ทำแบบพิมพ์สำหรับเครื่องประดับที่มีความซับซ้อนและมีรายละเอียดมาก

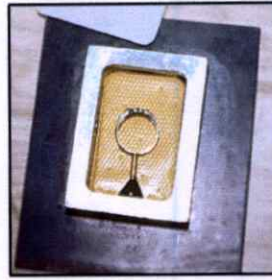
2. แบบพิมพ์ตัด เป็นแบบพิมพ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ด้วยสมบัติที่สามารถเก็บรายละเอียดของเครื่องประดับที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี โดยส่วนมากจะนิยมใช้แบบพิมพ์ตัดที่ทำจากยางธรรมชาติมากกว่าแบบพิมพ์ตัดจากซิลิโคนเนื่องจากราคาถูกกว่า ซึ่งสมบัติที่ดีของแบบพิมพ์ยางควรมีดังนี้ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

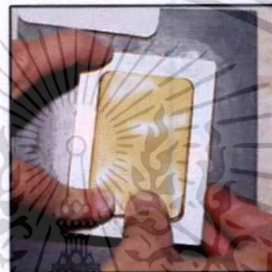
- มีอายุการใช้งานนาน ไม่เกิดการคงรูปก่อนที่จะนำไปใช้
- มีความยืดหยุ่นสูง
- มีเนื้อละเอียด เมื่อนำไปอัดขึ้นรูปเครื่องประดับ สามารถใช้มีดกรีดต้นแบบออกได้ง่าย
- สนิ่และเนื้อแบบพิมพ์ยางไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
- ไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างแบบพิมพ์ยางกับต้นแบบที่มีส่วนประกอบเป็นโลหะผสม
- เกิดการหดตัวน้อย

2.4.1 ขั้นตอนในการทำแบบพิมพ์ยาง [4, 19, 20, 21]

1. ใช้แบบพิมพ์ยางที่ใช้ในทางการค้ามีลักษณะเป็นแผ่นความหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร
2. นำต้นแบบ (Master) ของเครื่องประดับซึ่งเป็นโลหะเนื้อผสมต่างๆ มาวางระหว่างแผ่นยางประกบแผ่นยางให้รอบต้นแบบ ในการวางแผ่นยางนั้นต้องอาศัยความประณีต เพื่อที่แผ่นยางจะสามารถเก็บรายละเอียดที่สลับซับซ้อนของต้นแบบได้ แล้วจึงวางแผ่นยางซ้อนทับกันจนเต็มบล็อกโลหะ
3. นำส่วนประกอบบล็อกโลหะบรรจุยาง อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด (Press) ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 40-50 นาที
4. นำบล็อกโลหะออกจากเครื่องอัด แขน้ำที่อุณหภูมิห้อง และแกะยางออกจากบล็อก
5. เมื่อได้ยางออกจากบล็อก นำไปผ่านแบบพิมพ์ยางออก ต้องอาศัยมีดที่มีความคมเช่นเดียวกับมีดใช้ในการผ่าตัด โดยผ่ายางออกจากด้านบนไปยังส่วนด้านล่างของยางจนกระทั่งไปถึงต้นแบบแกะเอาต้นแบบออกจากยาง จะได้แบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการหล่อเครื่องประดับต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.10



ต้นแบบ (Master) – โลหะ ต่างๆ
(แหวน, ต่างหู, จี้, เข็มกลัดเล็ก ๆ ฯลฯ)



วางประกบด้วยยางคอมพาวด์และวางลงบล็อกที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป
ให้ความร้อนด้วยเครื่องอัด 150°C เป็นเวลา 40-50 นาที
แช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง



ใช้มีดกรีดยางเอาต้นแบบออก



รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการทำแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการทำเครื่องประดับ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 แบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับทางการค้าที่ใช้ในปัจจุบัน

Castaldo® White Label, Castaldo® Gold Label, No Shrink Pink® [20]

สมบัติของ Castaldo® Gold Label

- เป็นยางคอมพาวด์สีเหลืองอ่อน
- ไม่มีกลิ่น
- มีเนื้อเนียน ละเอียด
- เก็บรักษาได้ 1 ปีที่อุณหภูมิต่ำกว่า 21 องศาเซลเซียส
- ราคาของ Castaldo® Gold Label ประมาณ 500 บาทต่อ 1 กิโลกรัม (พ.ค. 2553)

คำแนะนำในการใช้งานของ Castaldo® Gold Label

- ก่อนการทำงานควรทำความสะอาดแบบพิมพ์โลหะ และตัวดินแบบ ด้วยการล้างน้ำ หรือ เช็ดด้วยแอม โมเนีย
- ก่อนการใช้งานควรตั้งแบบพิมพ์ยางไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- ไม่ควร ใช้ผ้าหรือสาลีเช็ดทำความสะอาดแบบพิมพ์โลหะก่อนการทำงาน
- ไม่ควร ใช้มือสัมผัสกับแบบพิมพ์ยางโดยตรง

เมื่อนำแบบพิมพ์ยางที่ใช้ในการค้า คือ Castaldo® Gold Label ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ให้ผลแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติบางประการของยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ Castaldo®

Test Name	ค่าที่ได้	Test Method
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100°C))	48	ASTM D 1646
เวลาเชื่อม โยง (นาที)		ASTM D 2084
- เวลาที่ย่างเริ่มเชื่อม โยง (Scorch time, t_{50})	4.21	
- เวลาการเชื่อม โยง (Cure time, t_{90})	11.07	
ความแข็งแรงดึง (MPa)	14.05	ASTM D 412
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	830.8	ASTM D 412
มอดุลัสที่ 300% (MPa)	1.15	ASTM D 412
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	16.86	ASTM D 624
ความแข็งกด (Shore A)	35.9	ASTM D 2214
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 hr (%)	4.87	ASTM D 395
ความถ่วงจำเพาะ	1.26	

หมายเหตุ ข้อมูลจากการทดสอบห้องปฏิบัติการส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะการขึ้นรูป

ตารางที่ 2.6 ขนาดและเวลาในการขึ้นรูปยางที่อุณหภูมิ 152 °C [20]

ความหนา		จำนวนยาง (ชิ้น)	เวลา (นาที)
นิ้ว	มิลลิเมตร		
1/2	13	4	30
5/8	16	5	37
3/4	19	6	45
1	25	8	60
1 1/4	32	10	75
1 1/2	38	12	75

การเก็บรักษา

- ควรเก็บในที่แห้งและเย็นอุณหภูมิต่ำกว่า 21 °C
- หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับความชื้น และแสงแดด

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วารกรณ์ ขจรไชยกุล และคณะ [21] ศึกษาลักษณะการคงรูป (Cure characteristic) และชนิดของสารตัวเติม ของยางแห้งผสมสารเคมีทำแม่พิมพ์ในงานเครื่องประดับ โดยทำการออกสูตรและบดผสมยางแห้ง TTR 5L กับสารเคมีต่างๆ โดยทำการศึกษาชนิดของสารตัวเติม ระบบการคงรูปของยาง หลังจากนั้นทดลองให้บริษัทผู้ผลิตเครื่องประดับทดลองใช้ ผลปรากฏว่าสารตัวเติมที่มีความเหมาะสมคือ แคลเซียมคาร์บอเนต และระบบการคงรูปเป็นระบบ EV (Efficient vulcanization) โดยมีปริมาณกำมะถัน 0.25 phr สารตัวเร่ง MBTS 2.0 phr DTDM 1.5 phr โดยผู้ผลิตเครื่องประดับมีความพอใจในผลการใช้งานซึ่งมีความใกล้เคียงกับแบบพิมพ์ยางที่นำเข้าจากต่างประเทศ ราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ประมาณ 40 บาทต่อ 1 กิโลกรัม (คำนวณที่ราคาของทีอาร์ 5 แอล กิโลกรัมละ 30 บาท) ซึ่งถ้ารวมค่าใช้จ่ายในการผลิตหีบห่อก็ยังคงต่ำกว่าราคาของแบบพิมพ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศเป็นอย่างมาก นั่นคือแบบพิมพ์ที่ทดลองผลิตราคาประมาณไม่เกิน 100 บาทต่อ 1 กิโลกรัม ในขณะที่นำเข้าจากต่างประเทศประมาณ 200-400 บาทต่อ 1 กิโลกรัม

Ejolle E. E และ Saeed A.F. [22] ศึกษากระบวนการเชื่อมโยงวิธีการต่างๆ ได้แก่ระบบการด้วยกำมะถัน โดยใช้ 2 รูปแบบ คือระบบการเชื่อมโยงแบบมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization, EV) ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV), การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) และการเชื่อมโยงด้วยไดูรีเทน (Diurethane) ที่มีผลต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Compression set) ของยางธรรมชาติ อุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมโยง 140, 160, 180 °C พบว่าระบบการเชื่อมโยงแบบ EV และ การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ ระบบการเชื่อมโยงแบบ CV และ การเชื่อมโยงด้วยไคยูรีเทน ทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อมโยง เนื่องจาก ระบบการเชื่อมโยงแบบ EV เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบก้ำมะถันอะตอมเดี่ยวหรือพันธะเชื่อมโยงโมโนซัลฟิดิก (C-S bond) เป็นพันธะที่มีความแข็งแรง เช่นเดียวกับการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bond) มีพลังงานพันธะสูง มีเสถียรภาพทางความร้อนและแรงกระทำ จึงมีผลต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำ

Poh B.T. และ Ng C.C. [23] ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อเวลาก่อนการเชื่อมโยง (Scorch time) และดัชนีการเชื่อมโยง (Cure rate index) ของยางธรรมชาติโดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ศึกษาไซเลน 2 ชนิด คือ γ -Mercaptopropyltrimethoxysilane(A-189) และ Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfide (Si-69) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 110-160 °C พบว่าที่อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า 120 °C เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ A-189 ส่งผลให้เวลาก่อนการเชื่อมโยงลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากหมู่ thiol จะเพิ่มอัตราในการเชื่อมโยง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Si-69 ส่งผลให้เวลาก่อนการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเกาะเกาะของหมู่ triethoxysilylpropyl ซึ่งหน่วงการเชื่อมโยงให้ช้าลง และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเวลาก่อนการเชื่อม โยงจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซเลน เนื่องจากพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นสูงกว่าพลังงานกระตุ้นในการเชื่อม โยง

พิชญ บัญญวล และคณะ [24] ศึกษาการใช้ผงหินปูน (CaCO_3) เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางพารา ด้วยการนำหินปูนบดละเอียดมาผสมในยาง STR 5L โดยหินปูนที่ใช้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.5, 2, 4 และ 10 ไมครอน และผสมผงหินปูนปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการศึกษาพบว่ายางผสมหินปูนมีค่าความแข็งแรงกดค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูน ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึงลดลง ยกเว้นยางที่ผสมหินปูนขนาด 0.5ไมครอน ซึ่งมีความละเอียดที่สุด และสมบัติเชิงกล ให้ค่าที่สูงกว่าหินปูนขนาดอนุภาค 2, 4 และ 10 ไมครอน

Ansarifar A. และ คณะ [25] ศึกษาผลของสารคู่ควบที่มีผลต่อยางบาวด์ (Bound rubber) และสมบัติของยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV) สารคู่ควบที่ใช้คือ Bis(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulfide หรือ TESPT ระบบการเชื่อมโยงแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization, CV) ในการเติม TESPT เป็นการป้องกัน ซิลิกาไม่ให้รบกวนกลไกปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยก้ำมะถัน พบว่าค่าความแข็งแรงกด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ ยึดขาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีค่าที่เหมาะสม เมื่อเติม TESPT 7 phr และผลต่อยางบาวด์จะมีปริมาณยางบาวด์มากที่สุด เมื่อเติม TESPT 5 phr แต่พบว่าซิลิกามีการกระจายตัวไม่ดีมากนักในยาง

Ansarifar A. และ คณะ [26] ศึกษาการใช้สารคู่ควบเปรียบเทียบกับสารกระตุ้นร่วมกับ สารตัวเร่ง ที่มีผลต่อสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ ในระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน สารคู่ควบที่ใช้คือ Bis(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulfide หรือ TESPT สารกระตุ้นร่วมกับ สารตัวเร่ง คือ CBS ร่วมกับ ZnO โดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง สารคู่ควบจะเคลือบผิวของ ซิลิกาเพื่อป้องกันรวมตัวของซิลิกา ทำให้อนุภาคของซิลิกาไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อน มีการกระจายดีในยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกา 10 phr ที่เติม CBS 7 phr จะเกิดการยึดติดระหว่างอนุภาคซิลิกาและยางธรรมชาติดีที่สุด ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกา 30, 60 phr ที่เติม CBS 4 phr ความหนาแน่น ในการเชื่อมโยงมากที่สุด

Yang R. และ คณะ [27] ศึกษาผลต่อสารคู่ควบที่มีต่อแรงกระทำพื้นผิวของสารตัวเติมอนินทรีย์ สารคู่ควบนั้นนอกจากจะช่วยให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวได้ดีในเมตริกซ์ ยังสามารถปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุผสมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยได้มีการศึกษาด้วยวิธีไพโรไลซิส แก๊สโครมาโทกราฟี (Pyrolysis Gas Chromatography, PGC) และ ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) พบว่า การดูดซับทางเคมีของสารคู่ควบ เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาและอุณหภูมิมากขึ้น แต่จะค่อยๆคงที่ เมื่อถึงจุดหนึ่ง พบว่า PGC เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพ สำหรับการวิเคราะห์ และศึกษาแรงดึงดูระหว่างสารคู่ควบ และ สารตัวเติม

Yu C. O. และ Zhong Z. Y. [28] ศึกษาผลการปรับปรุงผิวของซิลิกาที่มีต่อการเสริมประสิทธิภาพของยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และยางไนไตรล์ โดยทำปฏิกิริยาเมทิลเลชัน (Methylation) ในการปรับปรุงผิวของซิลิกา พบว่าซิลิกาที่มีการปรับปรุงผิวสามารถกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับยางธรรมชาติและ ยางเอสปีอาร์ได้ดีขึ้น ในทางตรงข้ามการปรับปรุงผิวของซิลิกามีผลน้อยมากต่อการเสริมแรงในยางไนไตรล์เนื่องจากซิลิกากระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกันกับยางไนไตรล์ได้ไม่ดี

Byers J. T [29] ศึกษาการใช้ซิลิกาและสารคู่ควบในการทำยางล้อรถโดยสาร เนื่องจากที่ผิวของซิลิกาสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงทำให้ซิลิกากระจายตัวในยางได้ไม่ดี ทำให้ผสมเข้ากับยางได้ยาก จึงมีการใช้สารคู่ควบเพื่อทำให้การผสมซิลิกาทำได้ง่ายขึ้นและสามารถลดความต้านทานต่อการหมุน (Rolling resistance) ได้เป็นอย่างดีซึ่งทำให้เป็นการประหยัดเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Choi S. S. [30] ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บยาง อูณหภูมิและสารคู่ควบที่มีผลต่อยางบาวด์ (Bound rubber) ใน ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) ผสมซิลิกา พบว่าค่ายางบาวด์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บยาง เพิ่มขึ้นยกเว้นในกรณีที่ไม่มีการเติมสารคู่ควบลงในยาง ค่ายางบาวด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มสารคู่ควบ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสารตัวเดิมของยาง โดยเกิดผ่านสารคู่ควบ นอกจากนี้ยังพบว่าค่ายางบาวด์เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการเก็บที่เพิ่มขึ้นด้วยและพบว่าค่ายางบาวด์เพิ่มขึ้นทำให้สารประกอบยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

Kuginsland H. D. และ คณะ [31] ศึกษายางผสมระหว่าง ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) และ ยางพอลิบิวตะไดอีน (Polybutadiene rubber, BR) ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมพบว่า ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวต่างกันจะมีความแข็งแรงของพันธะเชื่อม โยงต่างกัน โดยซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีพันธะเชื่อม โยงระหว่าง โมเลกุลของสารตัวเติมแข็งแรงกว่าซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพันธะไฮโดรเจน การใช้สารคู่ควบในสารประกอบยางเพื่อช่วยเชื่อมต่อระหว่าง โมเลกุลของยางและอนุภาคของซิลิกาพบว่าโครงสร้างของสารคู่ควบที่ต่างกันจะมีผลต่อสมบัติการเสริมแรงต่างกัน สารคู่ควบที่มีหมู่ฟังก์ชันเพียงหมู่เดียว เช่น PTES, PETES, OTES, HDTES ซึ่งสารพวกนี้จัดเป็นอัลคิลไฮเลน

Sirisinha C. และ คณะ [32] ศึกษาผลของกรดสเตียริกและสารแอนติออกซิแดนท์ กลุ่มสารประกอบเอมีนที่มีต่อยางสังเคราะห์พอลิไอโซพรีน โดยเชื่อม โยงด้วยเปอร์ออกไซด์ พบว่ากรดสเตียริก มีผลในการช่วยการบดผสมให้ง่ายยิ่งขึ้นแต่ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงพลวัต ส่วนในการใช้สารประกอบเอมีนมีผลต่อความหนาแน่นในการเชื่อม โยงส่งผลต่อสมบัติเชิงพลวัต เสถียรภาพทางความร้อน และแรงเฉือนที่สูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตรยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทดลองออกสูตรยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ แบ่งประเด็นศึกษาเป็น 6 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารเชื่อมโซ่ (Vulcanizing agent) ในการเตรียมยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ 0.3, 0.6, 0.9 phr

ตอนที่ 2 การศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารเสริมการเชื่อมโซ่ (Co-agent) ในการเตรียมยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ 0.5, 1, 1.5, 2 phr

ตอนที่ 3 การศึกษาชนิดของสารตัวเติม (Filler) ปริมาณ 10, 20, 30, 40, 50 phr

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3)

2. ซิลิกา (Silica)

ตอนที่ 4 ทดสอบสมบัติของยางที่ใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับ

1. การทดสอบการเชื่อมโซ่ตามมาตรฐาน ASTM D 2084

2. การทดสอบความหนืดมูนนี่ ASTM 1646

3. การทดสอบสมบัติเชิงกล

- การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 412

- การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 624

- การทดสอบความแข็งกด (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240

- การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D 395-89

4. การศึกษาสัณฐานวิทยา

- ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

ตอนที่ 5 ศึกษาการใช้งานจริง

ตอนที่ 6 วิเคราะห์ต้นทุน

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. ยางธรรมชาติชนิด เอสทีอาร์ 5 แอด (STR 5L) บริษัท Chalong Latex Industry

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
ดี (Lovibond Scale)	2.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากการทดสอบห้องปฏิบัติการช่างแห่ง สถาบันวิจัยยาง

2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ชนิด White seal Commercial grade บริษัท Univenture
3. กรดสเตียริก (Stearic acid) Rubber grade บริษัท P.T. Cisadane Raya Chemical
4. แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) Coated grade บริษัท Komesho Sekkai Kogyo คุณลักษณะแคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมยางตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 3.2

5. ซิลิกา (Silica) ชนิดตกตะกอน Precipitated Hsil[®] 233S บริษัท Tokuyama Siam Silica คุณลักษณะของซิลิกามากตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แสดงได้ดังตารางที่ 3.3

6. Polyethylene glycol (PEG 4000) เกรดการค้า บริษัท Condea

7. สารคู่ควบ (Coupling agent), Bis(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulfide Si-69[®]

8. สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent), N,N'-m,phenylenedimaleimide (Saret[®] SR-525)

บริษัท Sartomer สมบัติบางประการแสดงได้ ดังตารางที่ 3.4

9. แอนติออกซิแดนท์(4,5-methylmercaptobenzimidazole, Vulkanox[®] MB2) Commercial grade บริษัท Lanxess Deutschland GmbH

10. น้ำมันพาราฟิน (Paraphenic Oil) Commercial grade บริษัท Union Link

11. ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ชนิด Rutile Commercial grade บริษัท DuPont Chemical

12. เปอร์ออกไซด์ (Peroxide, HC15Ay[®]) ความเข้มข้น 25% บริษัท Silicone Technology

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามมาตรฐานเลขที่ มอก.402-2532 [33]

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
แคลเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	98
ความชื้น ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่เกิน	0.4
เหล็ก มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	250
ทองแดง มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	15
แมงกานีส มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	100
ความเป็นด่าง (คิดเป็น Na_2CO_3) ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่เกิน	0.03
สารที่ไม่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่เกิน	1.5
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่เกิน	43.0 ถึง 44.5
ปริมาณที่ค้างบนร่ง ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่เกิน	
- ร่ง 125 ไมโครเมตร	0.005
- ร่ง 45 ไมโครเมตร	0.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากการสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของซิลิกา ตามมาตรฐานเลขที่ มอก.1070-2547 [34]

คุณลักษณะ	เกณฑ์กำหนด
ซิลิคอน ไดออกไซด์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	97
ความชื้น ร้อยละ โดยน้ำหนัก ไม่เกิน	8
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง	3.5 ถึง 6.0
ความเป็นกรด-ด่าง เมื่อทำเป็นสารแขวนลอยในน้ำ (aqueous suspension) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	5.2 ถึง 7.5
ทองแดง มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	8
แมงกานีส มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	8
พื้นที่ผิวจำเพาะ ตารางเมตรต่อกรัม	110 ถึง 240
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	
- ผง	0.1 ถึง 0.3
- เม็ด	0.2 ถึง 0.4

หมายเหตุ ข้อมูลจากการสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	Saret® SR-525
สูตรโมเลกุล	$C_{14}H_8N_2O_4$
น้ำหนักโมเลกุล	268.23
ความถ่วงจำเพาะ	1.44
จุดหลอมเหลว	198-204 °C
ลักษณะ	ผง
สี	เหลือง – น้ำตาล

หมายเหตุ ข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ของสาร (Material Safety Data Sheet) ของ บริษัทผู้ผลิต

อุปกรณ์

1. เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น R11-3FF บริษัท Kodaira Seisakusho
2. เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Compression Molding Machine) บริษัท ชัยเจริญการช่าง
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscometer) รุ่น SMR-201 บริษัท Gibitree
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้อานหมุน (Moving Die Rheometer) รุ่น MDR 2000 บริษัท Monsanto
5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM)
 - รุ่น 5565 บริษัท Instron (สำหรับการทดสอบความแข็งแรงดึง)
 - รุ่น LS 500 บริษัท Lloyd Instrument (สำหรับการทดสอบความแข็งแรงกด)
6. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer Hardness Tester) ชนิด Shore A รุ่น 917 บริษัท Shore Instrument & MFG
7. เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ รุ่น EW-120SG บริษัท Mirage Trading
8. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้ความดันลม (Compressed-Air Cutting Machine) รุ่น SDAP-100-N บริษัท Dumbbell
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น XL 30 CP บริษัท Phillips

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

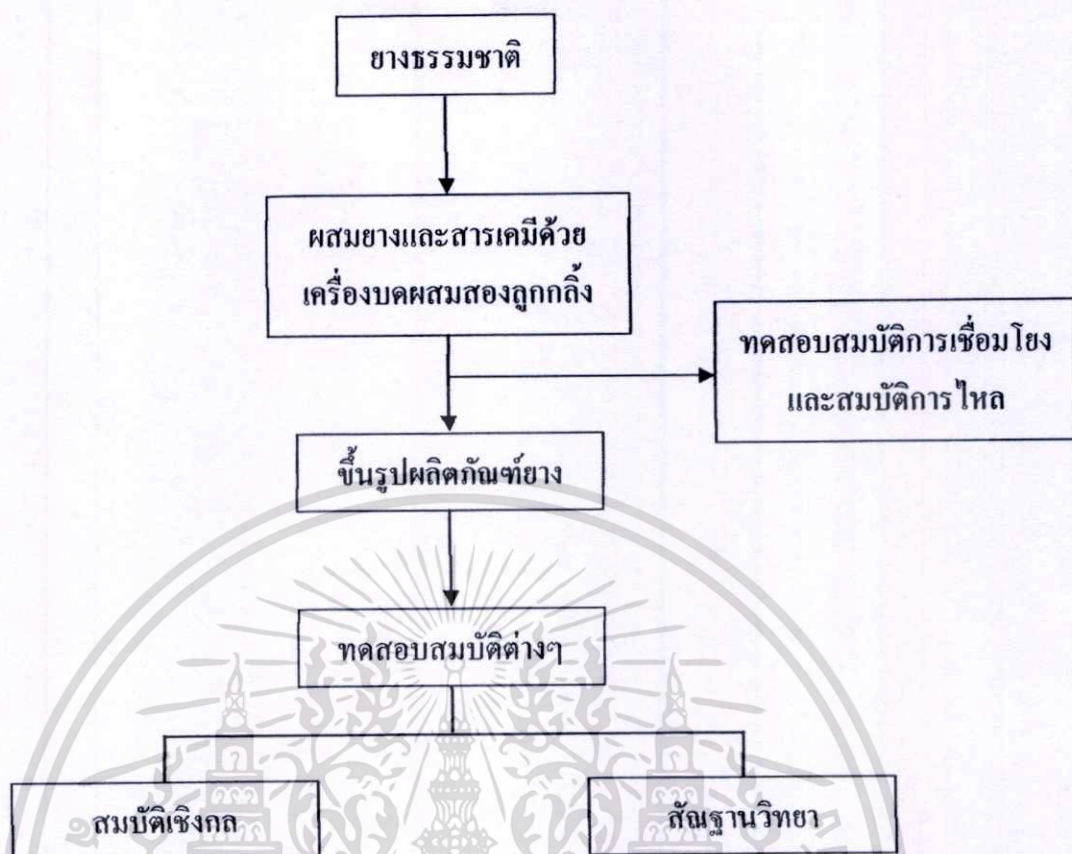
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาเบื้องต้น

ในการศึกษาเบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า (ยางคอมพาวด์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ) ด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis, TGA เพื่อศึกษาถึงชนิดและองค์ประกอบของยางคอมพาวด์ แสดงดังภาคผนวก ก พบว่าเป็นยางธรรมชาติเพียงชนิดเดียว 57.8 % สารระเหย 8.97% สารเติมแต่งอื่นๆ 33.24 % หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคอมพาวด์ แสดงดังตารางที่ 2.5 เพื่อที่จะนำมาเป็นตัวเปรียบเทียบกับจากคอมพาวด์จากงานวิจัย

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

1. ทำการบดยางแท่ง STR 5L กับสารเคมีต่างๆ ตามสูตรที่กำหนด ด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C
 2. ทดสอบสมบัติการไหล (Rheology) ได้แก่ การวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และทดสอบสมบัติการเชื่อมโยง (Cure characteristic)
 3. อัดขึ้นรูปยางผสมสูตร (Compression molding rubber) ตามชิ้นงานแต่ละการทดสอบ โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) ความดัน 2000 psi ที่อุณหภูมิ 160 °C
 4. ทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้
 - การทดสอบสมบัติเชิงกล
 - การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
 - การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)
 - การทดสอบความแข็งกด (Hardness)
 - การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)
 - สัณฐานวิทยา (Morphology)
 - ศึกษาพื้นผิว รูปร่างและขนาดของยางธรรมชาติกับสารเติมแต่ง
- ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบสามารถสรุปเป็นแผนผัง แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการบดผสมและการเตรียมขั้นทดสอบ

3.3.3 การบดผสมยางและสารเคมี

ซึ่งยางและสารเคมีตามสูตรที่กำหนด ตามตารางที่ 3.5

สูตร 1 (CaCO_3)

1. ทำการบดยางด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิประมาณ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนยางพันลูกกลิ้งและมีผิวเรียบสม่ำเสมอ ทำการกรีดพับยาง (Cut and fold) จนยางนิ่ม พร้อมใส่สีลงไปเพื่อให้เกิดการกระจายตัวในยาง ใช้เวลาประมาณ 5 นาที
2. เติม Stearic acid, ZnO , และ TiO_2 ระหว่างลูกกลิ้ง กรีดพับยาง เพื่อให้เกิดการกระจาย ตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ใช้เวลาประมาณ 2 นาที
3. เติม CaCO_3 ประมาณ 2 ใน 3 ของทั้งหมดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึง ใส่ที่เหลือลงไปพร้อมกับน้ำมันพาราฟิน ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
4. เติม Vulkanox[®] MB2 และ เติม Co-agent ใช้เวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ใช้เวลาประมาณ 1 นาที รีดยางให้เป็นแผ่น ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร 2 (Silica)

1. ทำการบดขางด้วยเครื่องผสมขางแบบสองลูกกึ่ง ที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C จนขางพันลูกกึ่งและมีผิวเรียบสม่ำเสมอ ทำการกรีดพับขาง (Cut and fold) จนขางน่ม พร้อมใส่สีลงไปเพื่อให้เกิดการกระจายตัวในขาง ใช้เวลาประมาณ 5 นาที
2. เติม Silica, PEG 4000, Si-69[®] 2 ใน 3 ของทั้งหมดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จึงใส่ที่เหลือลงไปพร้อมกับน้ำมันพาราฟินเพื่อให้ขางต่อการผสม แล้วจึง เติม Stearic acid ระหว่างลูกกึ่งกรีดพับขาง เพื่อให้เกิดการกระจาย ใช้เวลาประมาณ 15 นาที
3. เติม ZnO, TiO₂, Vulkanox[®] MB2 กรีดพับขาง เพื่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในขาง ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
4. เติม Co-agent ใช้ผสมเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ใช้เวลาประมาณ 1 นาที ริดขางให้เป็นแผ่น ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนทำการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

องค์ประกอบ	phr					
	ศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยง	ศึกษาปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง	ศึกษาปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง	ศึกษาปริมาณสารตัวเติม	ศึกษาปริมาณสารตัวเติม	ศึกษาปริมาณสารตัวเติม
NR 5L	100	100	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
Antioxidant MB2	1	1	1	1	1	1
Paraffinic oil	5	5	5	5	5	5
Co-agent	1	0.5, 1, 1.5, 2.0	0.5, 1, 1.5, 2.0	0.5, 1, 1.5, 2.0	1	1
CaCO ₃	30	30	30	30	10, 20, 30, 40, 50,	-
Silica	-	-	-	30	-	10, 20, 30, 40, 50
TiO ₂	10	10	10	10	10	10
Peroxide (25 % active)	1.2, 2.4, 3.6	1.2, 2.4, 3.6	2.4	2.4	2.4	2.4

หมายเหตุ : ปริมาณของ PEG 4000 คิดเป็น 6% ของปริมาณซีลิกา, ปริมาณของ Coupling agent คิดเป็น 2% ของปริมาณซีลิกา

3.4 การทดสอบยางผสมสูตร

สมบัติของยางผสมสูตร ทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

3.4.1 การทดสอบความหนืดมูนี (Mooney viscosity)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1646 [35]

การหาค่าความหนืด (Mooney viscosity) ใช้จานหมุนขนาดใหญ่ (L) ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยชิ้นงานมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-5 เซนติเมตร เวลาในการทดสอบ 4 นาที [ML 1+4(100°C)]

3.4.2 เวลาเชื่อมโยงของยางผสมสูตร (Cure time)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2084 [36]

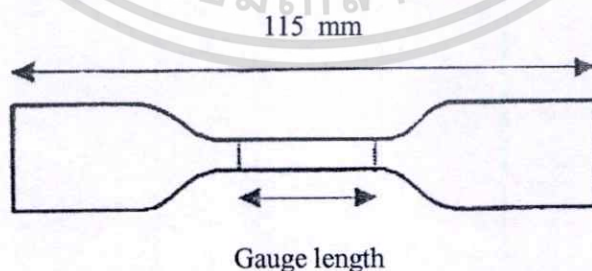
ตัดชิ้นยางผสมสูตรมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร ทดสอบด้วย เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometer, ODR) ที่อุณหภูมิ 160 °C จานสั่นหมุนทำมุม ±3 องศา หาเวลา สกอร์ช (t_{90}) และเวลาการเชื่อมโยง (t_{99}) ของยางแต่ละสูตร

3.4.3 การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [37]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ นำยางที่คงรูปแล้วมาตัดให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ลักษณะเป็น Die C ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) โดยใช้ Load cell ขนาด 500 N อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) มอดุลัสที่ 300% (M 300) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)



รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 412 [35]

การคำนวณผล

ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

$$TS = F/A \quad (3.1)$$

เมื่อ	TS	คือ	ความแข็งแรงดึง (MPa)
	F	คือ	แรงที่ใช้ในการดึงสูงสุดเกิดที่จุดขาด (N)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (m ²)

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

$$\%Eb = [(l-l_0)/l_0] \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ	%Eb	คือ	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)
	l	คือ	ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ (mm)
	l ₀	คือ	ความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm)

3.4.4 การทดสอบความแข็งแรงการฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 624 [38]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ นำยางที่คงรูปแล้วมาตัดให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะ Die C แสดงดังรูปที่ 3.3

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) โดยใช้ Load cell ขนาด 500 N อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หากค่าความแข็งแรงฉีกขาด



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 [36]

การคำนวณผล

$$Ts = F/d \quad (3.3)$$

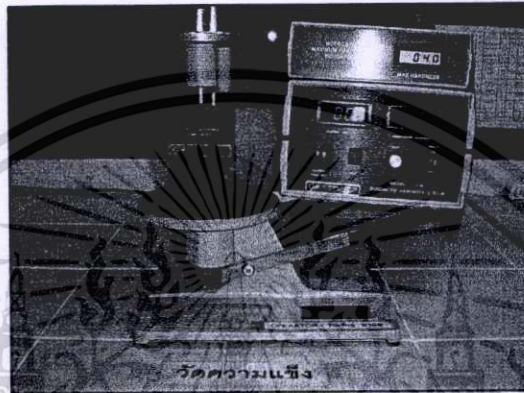
เมื่อ	Ts	คือ	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
	F	คือ	แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (kN)
	d	คือ	ความหนาของชิ้นงาน (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [39]

วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A (Shore A durometer) ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานล่างเพื่อให้ชิ้นงานสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 15 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัดเครื่อง



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A

3.4.6 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อม โยงแล้วให้ได้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ ดังรูปที่ 3.5 โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบในอากาศและในน้ำเครื่องจะคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะให้อัตโนมัติ โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ

การคำนวณผล

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{W}{(W - W_1)} \quad (3.5)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ
 W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการหาค่าโดยประมาณ จะได้ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับความหนาแน่น



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความถ่วงจำเพาะ

3.4.7 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 395 [40]

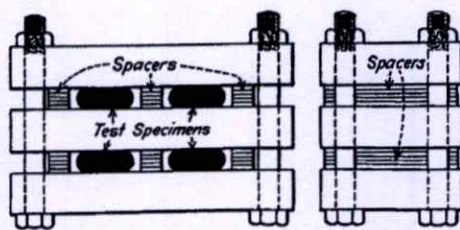
เตรียมชิ้นงานทดสอบขงครรูปมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ความหนา 12.5 ± 0.5 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 มิลลิเมตร วัดความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ แล้วนำมาวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการอัด (Compression device) ที่มีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) ในแต่ละข้างเป็นตัวกำหนดระยะในการอัด แสดงดังรูปที่ 3.6 ทำการอัดชิ้นงานทดสอบให้มีความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกั้น ซึ่งความหนาจะลดลงจากความหนาเดิม 25% จากนั้นนำอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการอัดที่มีชิ้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำชิ้นทดสอบมาวัดความหนา

การคำนวณผล

$$C_B = \frac{[(t_0 - t_n) / (t_0 - t_i)] \times 100}{C_B} \quad (3.6)$$

เมื่อ	C_B	คือ	การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (%)
	t_0	คือ	ความหนาของชิ้นงานทดสอบเริ่มต้น (มิลลิเมตร)
	t_i	คือ	ความหนาของชิ้นงานทดสอบหลังอัด (มิลลิเมตร)
	t_n	คือ	ความหนาของแท่งเหล็กกั้น (มิลลิเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด [38]

3.4.8 สัณฐานวิทยา (Morphology)

เตรียมชิ้นทดสอบโดยนำตัวอย่างยางที่เชื่อมโยงแล้วแช่ในโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที จากนั้นหักชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของยางได้ชัดเจน ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) แสดงดังรูปที่ 3.7 เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่างและขนาด รวมทั้งการยึดเกาะกันของยางธรรมชาติกับสารเติมแต่งที่มีผลต่อสมบัติแบบพิมพ์ยาง



รูปที่ 3.7 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.4.9 ทดสอบการใช้งานจริง

การทดลองใช้งานจริงได้ขอความร่วมมือจากผู้ประกอบการ 1 บริษัทให้ทดลองใช้ยางคอมพาวด์จากการวิจัยทั้งหมด 10 สูตร โดยจะเปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า ตามลำดับขั้นตอนการใช้งานจริงดังนี้

1. นำยางคอมพาวด์หรือยางผสมสูตรที่ได้รีดเป็นแผ่นให้มีความหนา 2-3 มิลลิเมตร
2. นำต้นแบบเครื่องประดับวางโดยมีแผ่นยางคอมพาวด์ตัดเป็นแผ่นประกบ วางลงในบล็อกที่

ใช้ในการอัดขึ้นรูปให้เต็มบล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อัดขึ้นรูปยาง อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 40-50 นาที
4. นำบล็อกแบบพิมพ์ แชน้ำที่อุณหภูมิห้อง
5. ทำการกรี๊ดแม่แบบออกจากแบบพิมพ์ยาง

(หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการใช้งานจริง เพื่อเป็นการศึกษาเปรียบเทียบยางแต่ละสูตรกับยางที่ใช้ทางการค้า) และให้ผู้ประกอบการตอบแบบสอบถาม (ภาคผนวก ค) รวมทั้งหมด 30 ชุด รวบรวมข้อมูลที่ได้และสรุปผลการใช้งานจริง

3.4.10 วิเคราะห์ต้นทุน

นำสูตรที่ผู้ประกอบการพึงพอใจ และให้ผลการทดสอบที่เหมาะสมที่สุด (จากข้อ 3.4.9) มาวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำแบบพิมพ์ยางจากยางคอมพาวด์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติบางประการกับยางที่ใช้ในทางการค้า (ยางที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ) ผลการทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

โดยทำการออกสูตรยางและศึกษาปัจจัยต่างๆ จากนั้นจึงทำการทดสอบ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัมฐานวิทยา ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่

- ปริมาณสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent loading)
- ปริมาณสารเสริมการเชื่อม โยง (Co-agent loading)
- ปริมาณสารตัวเติม (Filler loading)
- การใช้งานจริง
- การวิเคราะห์ต้นทุน

ตารางที่ 4.1 สมบัติบางประการของยางที่ใช้ในทางการค้า

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100°C))	48
เวลาเชื่อม โยง (นาที)	
- เวลาที่ย่างเริ่มเชื่อม โยง (Scorch time, t_{s2})	4.21
- เวลาการเชื่อม โยง (Cure time, t_{90})	11.07
ความแข็งแรงดึง (MPa)	14.05
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	830.8
มอดุลัสที่ 300% (MPa)	1.15
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	16.86
ความแข็งกด (Shore A)	35.9
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 hr (%)	4.87
ความถ่วงจำเพาะ	1.26

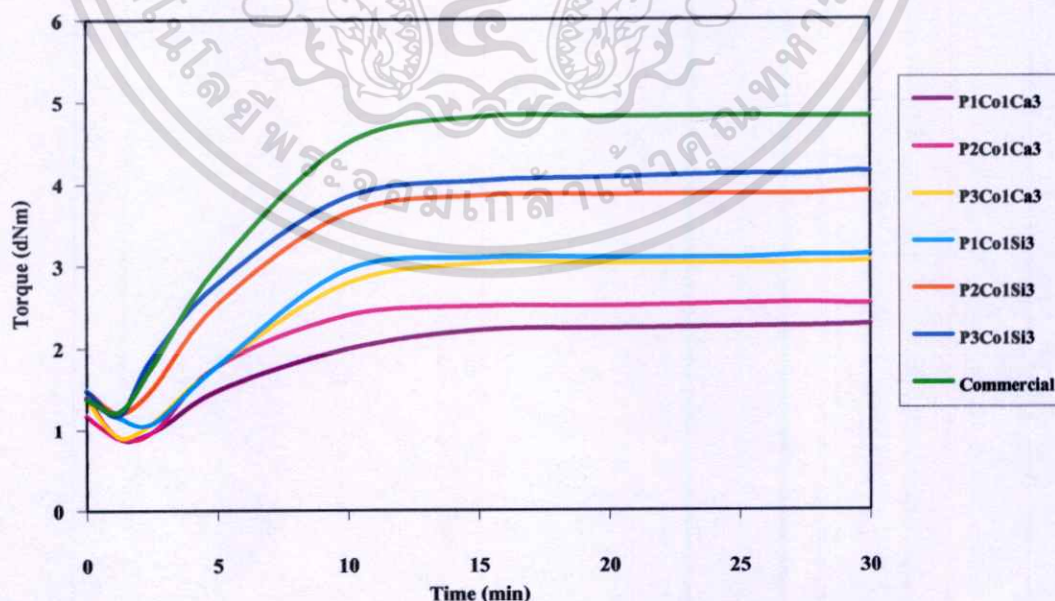
หมายเหตุ ข้อมูลจากการทดสอบห้องปฏิบัติการส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง

ให้เกิดอัตราเร็วในการเชื่อมโยงเร็วกว่าเปอร์ออกไซด์ปริมาณอื่นๆ และเมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์ ค่าแรงบิดสูงสุด (Torque, M_H) มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลยาง เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D-Network) ที่หนาแน่นขึ้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณสารเชื่อมโยง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า เวลาสกอร์ช ยางที่ใช้ในทางการค้าจะใช้เวลานานกว่า แต่เวลาการเชื่อมโยงเร็วกว่า และ CRI สูงกว่า ซึ่งการเชื่อมโยงเกิดอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า แสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า t_{2} , t_{90} , CRI, M_L และ M_H ของยางแต่ละสูตร

สูตรยางคอมพาวด์	t_2 (min)	t_{90} (min)	CRI	M_L (dNm)	M_H (dNm)
สูตร P ₁ Co ₂ Ca ₃	2.25	20.08	5.61	0.90	2.25
สูตร P ₂ Co ₂ Ca ₃	2.23	13.07	9.23	0.90	2.41
สูตร P ₃ Co ₂ Ca ₃	1.71	22.13	4.90	0.92	3.05
สูตร P ₁ Co ₂ Si ₃	1.79	19.88	5.53	1.18	3.09
สูตร P ₂ Co ₂ Si ₃	2.51	12.29	10.22	1.23	3.87
สูตร P ₃ Co ₂ Si ₃	1.42	19.50	5.53	1.10	4.10
Commercial	4.21	11.07	14.58	0.92	4.83



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ เปอร์ออกไซด์ต่างกัน

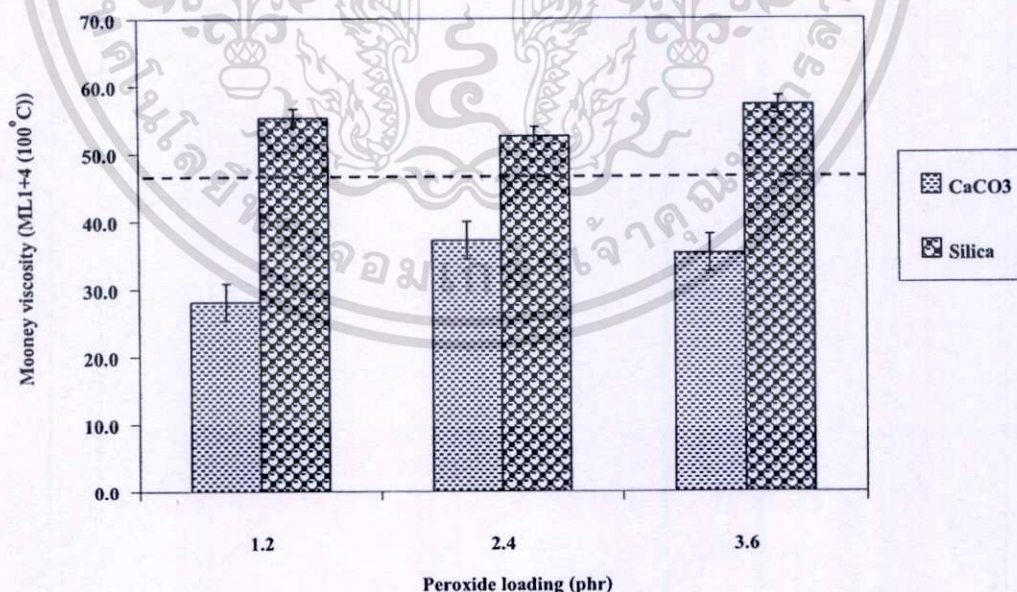
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแบบพิมพ์ยาง

ในการทดสอบผลของปริมาณเปอร์ออกไซด์ 1.2, 2.4 และ 3.6 phr ต่อสมบัติทางกายภาพของยางได้แก่ ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และ ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เปรียบเทียบกับยางที่ใช้ในทางการค้า แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

จากการศึกษาค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ พบว่าการเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์ไม่ส่งผลต่อ ค่าความหนืดมูนนี่ เนื่องจากการหาค่าความหนืดของยางคอมพาวด์ซึ่งยังไม่เกิดการเชื่อมโยงปริมาณของเปอร์ออกไซด์ 1.2, 2.4 และ 3.6 phr เป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางคอมพาวด์ทั้งหมด จึงไม่ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ต่างกัน เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน พบว่าซิลิกาจะให้ความหนืดมูนนี่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากขนาดอนุภาคของซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) สูงกว่า สามารถเกิดอันตรกิริยาได้มากกว่า และค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

จากการศึกษาค่าความถ่วงจำเพาะของยางคอมพาวด์ เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์นั้นเป็นการเพิ่มเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของยางทั้งหมด ค่าความถ่วงจำเพาะจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับค่าความหนืดมูนนี่ และค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

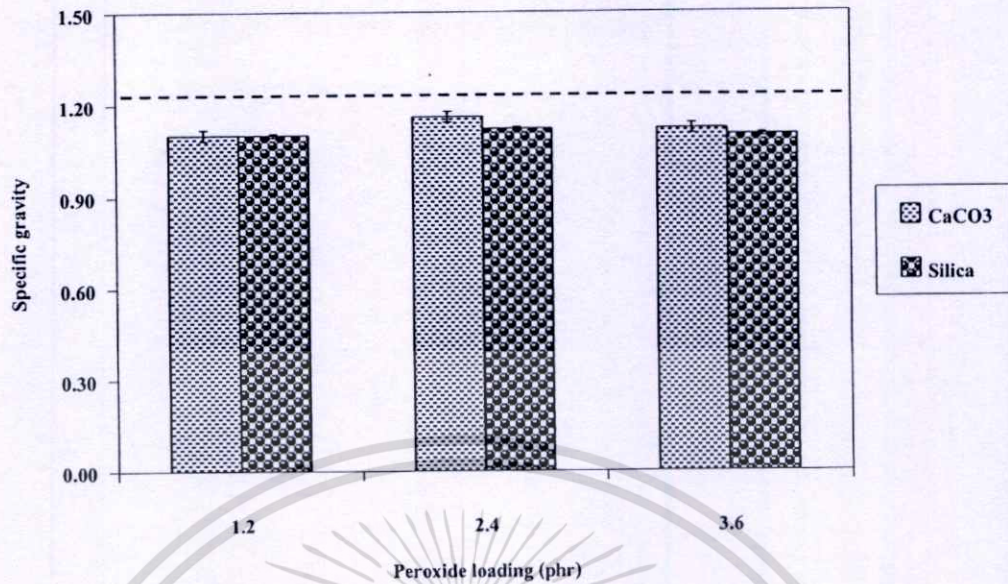


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100 °C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ

เปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

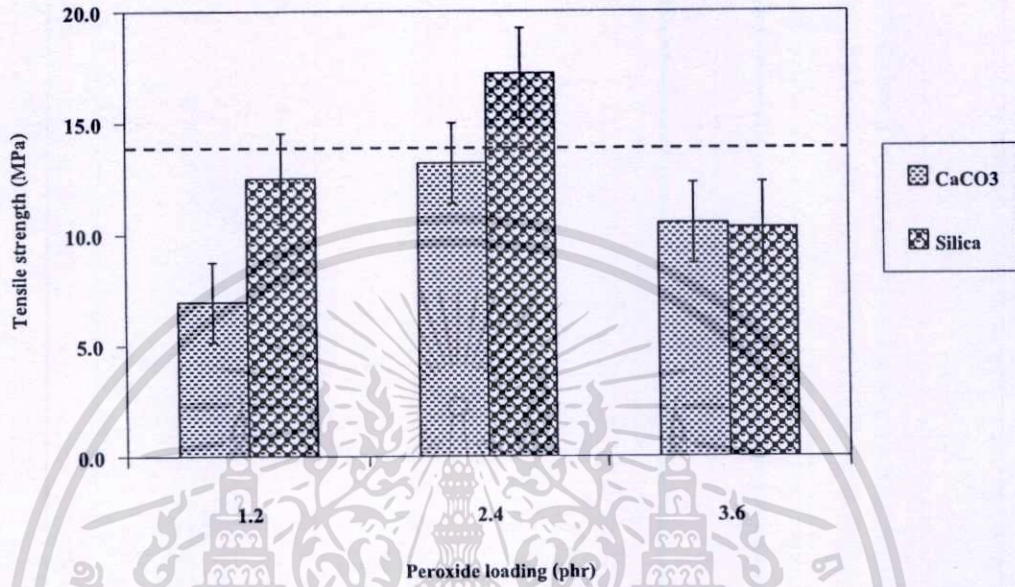


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความดั่งจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

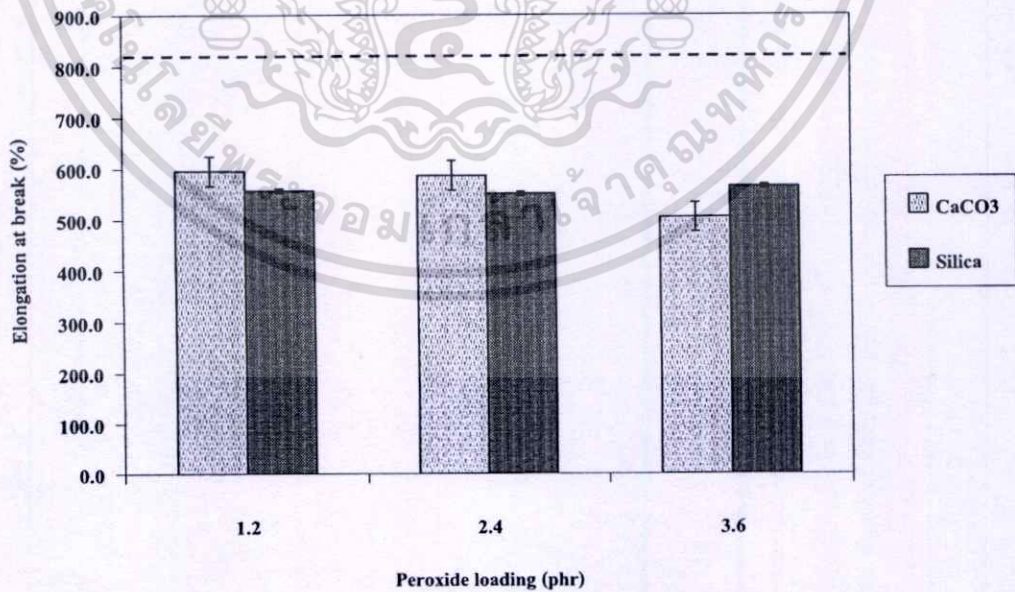
การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์ จากผลที่แสดงในรูป 4.4-4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นค่าที่ได้จะเริ่มลดลง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ สมบัติเชิงกลบางประการที่เกิดจากการแตกหัก (Fracture properties) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณ เปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D-Network) ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density, ρ_c) ของยางเพิ่มขึ้น ทำให้สมบัติเหล่านี้จึงมีค่าสูงสุดจนถึงจุดสูงสุดที่ค่าหนึ่ง (Optimum point) จากนั้นค่าที่ได้จะลดลง เนื่องจากความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูงมากขึ้นสายโซ่เคลื่อนที่อย่างจำกัด ไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุต่ำลงและแตกหักได้ง่ายขึ้น [6] ตามทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน พบว่าซิลิกาจะให้ค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าขนาดอนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก จึงเสริมแรงให้แก่ยางได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้าพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตและยางที่เติมซิลิกา ที่มีปริมาณเปอร์ออกไซด์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 phr ให้ค่าที่ใกล้เคียงอย่างที่ใช้ในทางการค้ามากที่สุด ยกเว้น เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด ที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 600 % ซึ่งยังห่างจากเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดอย่างที่ใช้ในทางการค้า ที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 830 %

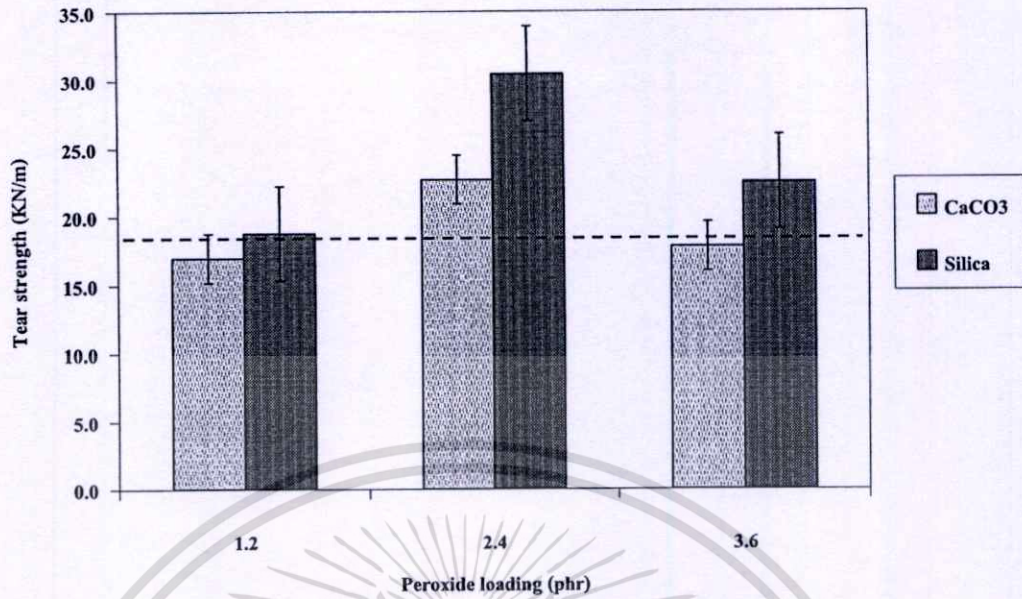


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

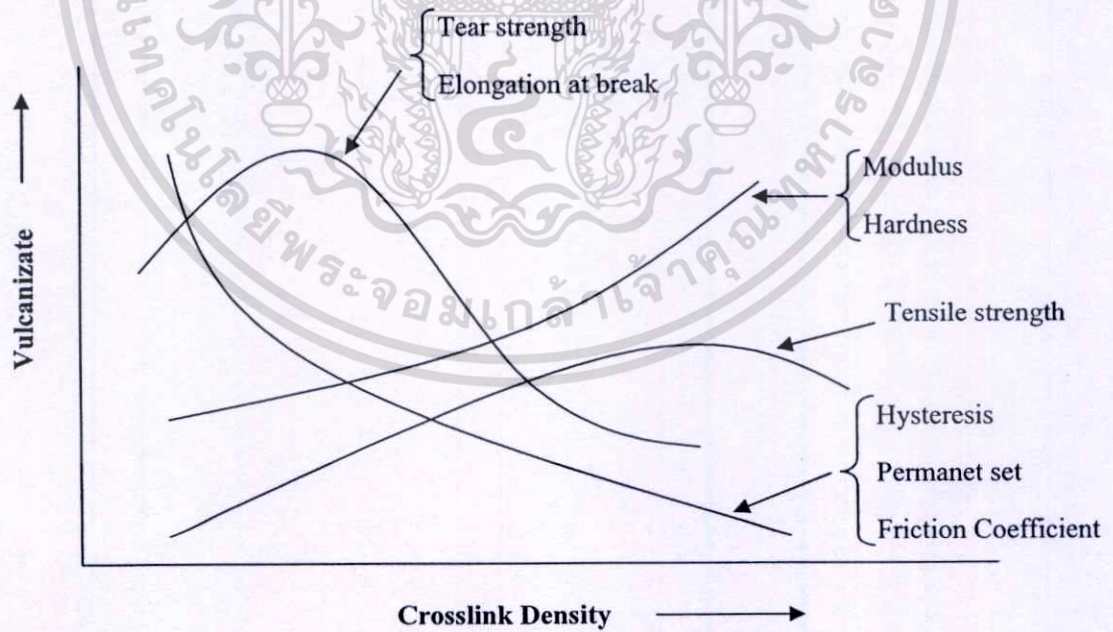


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

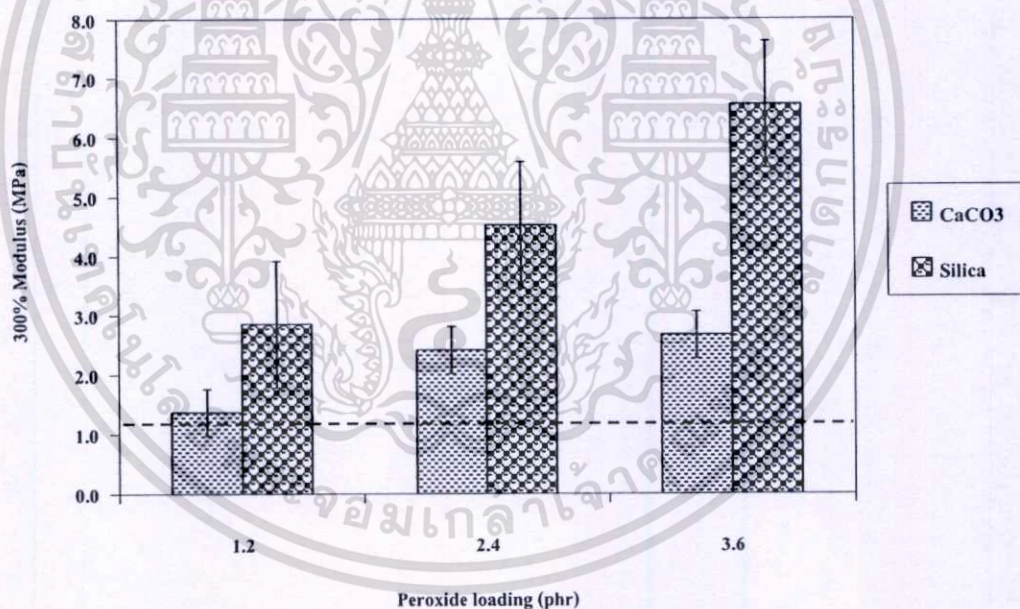


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง กับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [6]

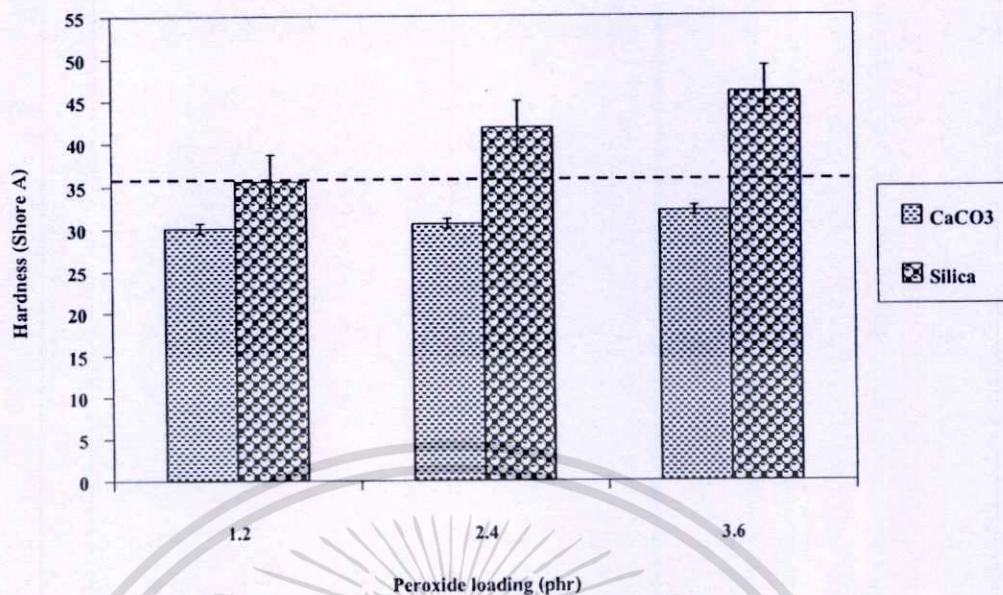
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบมอดุลัสที่ 300% (M 300) และความแข็งกด (Hardness) เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์ จากผลที่แสดงในรูป 4.8-4.9 พบว่าค่ามอดุลัสและความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องจาก เมื่อปริมาณเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น พันธะการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนไหว อย่างจำกัด เพราะเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น (Tight network) เป็นผลทำให้ค่ามอดุลัสและความแข็งกดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากันซิลิกามีค่ามอดุลัส และความแข็งกด สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็ก และมีความแข็ง (Mohs hardness) ที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจึงส่งผลให้ยางมีความแข็งมากกว่า เป็นผลทำให้ค่ามอดุลัส และความแข็งกดสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่ามอดุลัสที่ 300% ของยาง ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา มีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า ค่าความแข็งกดยางที่เติมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า ส่วนยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า



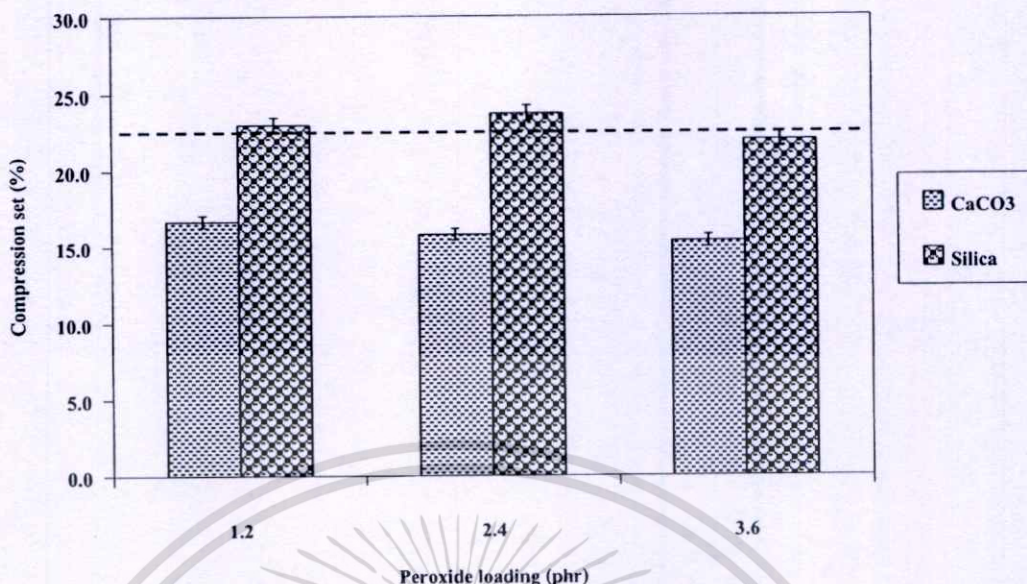
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน
เส้นประ (-----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) ที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 22 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์ จากผลที่แสดงในรูป 4.10 พบว่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) จะแปรผกผันกับความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจึงแสดงว่า ยางเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารเชื่อมโยงที่เท่ากัน ซิลิกามีการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า โครงสร้างของซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็ก และมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก จึงส่งผลให้ยางมีการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางที่เติมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า และยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตยังมีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการคืนตัวได้สูง ยางมีความนุ่มกว่ายางที่เติมซิลิกาจึงส่งผลให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำกว่า



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณเปอร์ออกไซด์ต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางสูตรต่างๆกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่ายางชนิดที่ใช้ ซิลิกาเป็นสารตัวเติม มีสมบัติใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า มากกว่ายางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ยกเว้น ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่ยางทุกสูตรยังต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

เมื่อศึกษาผลของปริมาณเปอร์ออกไซด์ ที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์เครื่องประดับ พบว่า ปริมาณเปอร์ออกไซด์ 2.4 phr จะให้เวลาการเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) ที่สั้นที่สุด และสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ได้ กล่าวคือ ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ให้ผลการทดสอบที่สูงกว่า เปอร์ออกไซด์ปริมาณอื่นๆ เนื่องจากปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม มีส่วนช่วยทำให้เกิดการเชื่อมโยงในโมเลกุลอย่างสมบูรณ์ แต่ปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้มอดูลัสสูงขึ้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดและความต้านทานต่อการฉีกขาดจะลดลง [10] ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เปอร์ออกไซด์ในปริมาณ 2.4 phr เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆต่อไป

4.2 การศึกษาผลของปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง

งานวิจัยนี้เลือกใช้ยางธรรมชาติ (STR 5L) บดผสมกับสารเคมีต่างๆ การศึกษาผลของสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) ได้เลือกใช้ ฟินิลินไดเมลลิอิมิด (N,N'-m,phenylenedimaleimide, SR525[®]) ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม เมลลิอิมิด (Melaimide) ในปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 phr โดยใช้

เปอร์ออกไซด์ 2.4 phr สามารถอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความหมายของสูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	ความหมาย
สูตร $P_2Co_1Ca_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 0.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr
สูตร $P_2Co_2Ca_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr
สูตร $P_2Co_3Ca_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 1.5 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr
สูตร $P_2Co_4Ca_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 2 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr
สูตร $P_2Co_1Si_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 0.5 phr ซิลิกา 30 phr
สูตร $P_2Co_2Si_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 1 phr ซิลิกา 30 phr
สูตร $P_2Co_3Si_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 1.5 phr ซิลิกา 30 phr
สูตร $P_2Co_4Si_3$	สารเชื่อมโยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง 2 phr ซิลิกา 30 phr
Commercial	ยางที่ใช้ในทางการค้า

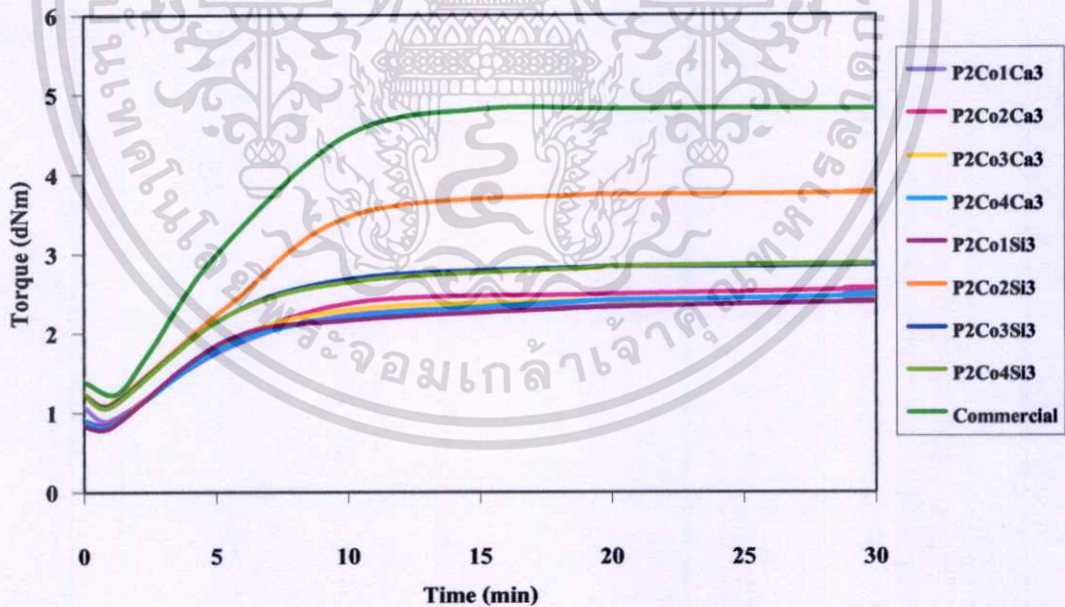
4.2.1 ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ของยางคอมพาวด์

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อใช้ปริมาณของ Co-agent มากขึ้น เวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) จะมีแนวโน้มลดลง ที่เห็นได้ชัดคือปริมาณ Co-agent 2 phr โดยจะสอดคล้องกับดัชนีอัตราเร็วการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุด (Torque, M_H) มีค่าใกล้เคียงกันยกเว้น สูตร $P_2Co_2Si_3$ แสดงดังตารางที่ 4.5 การใช้ Co-agent ร่วมกับเปอร์ออกไซด์นั้นจะเป็นตัวเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยงและอัตราเร็วของการเชื่อมโยง โดยโครงสร้างโมเลกุลที่สำคัญคือโมเลกุลของยางต้องมีอัลลิลิกไฮโดรเจนอะตอม (Allylic hydrogen atoms) ส่วนโมเลกุลของสารเสริมการเชื่อมโยงต้องมีหมู่รับโปรตอน (Proton acceptor) และหมู่รับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) โดยจะต้องมีการจัดเรียงโมเลกุลอย่างเหมาะสม ดังกลไกของปฏิกิริยาที่ได้กล่าวในบทที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมโยงกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าเวลาสกอร์ชของยางทุกสูตรมีระยะเวลาที่สั้นกว่า แต่เวลาการเชื่อมโยงจะใช้เวลานานกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า CRI ยางที่ใช้ในทางการค้าจะให้อัตราเร็วในการเชื่อมโยงและค่าแรงบิดสูงสุด สูงกว่ายางทุกสูตรเช่นกัน

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

สูตรยางคอมพาวด์	t_{s2} (min)	t_{c90} (min)	CRI	M_L (dNm)	M_H (dNm)
สูตร P ₂ Co ₁ Ca ₃	2.13	20.92	5.32	0.91	2.29
สูตร P ₂ Co ₂ Ca ₃	2.23	13.07	9.23	0.90	2.41
สูตร P ₂ Co ₃ Ca ₃	1.92	17.13	6.57	0.91	2.29
สูตร P ₂ Co ₄ Ca ₃	1.96	13.79	8.45	0.91	2.29
สูตร P ₂ Co ₁ Si ₃	2.17	22.42	4.94	0.71	2.85
สูตร P ₂ Co ₂ Si ₃	2.51	12.29	10.22	1.23	3.87
สูตร P ₂ Co ₃ Si ₃	1.79	18.13	6.12	1.23	2.85
สูตร P ₂ Co ₄ Si ₃	1.88	16.79	6.71	1.23	2.85
Commercial	4.21	11.07	14.58	0.92	4.83



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงลักษณะการเชื่อมโยงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน

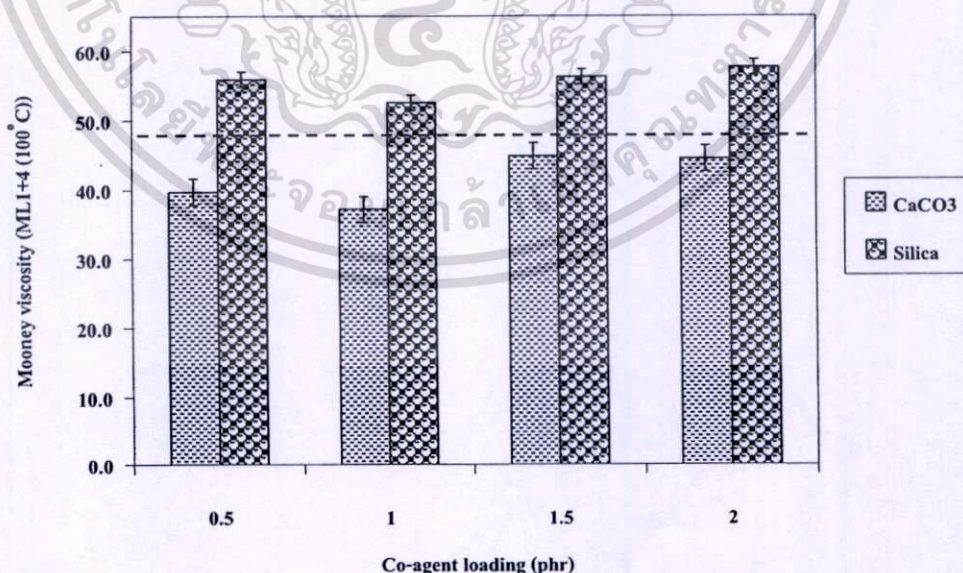
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแบบพิมพ์ยาง

จากการทดสอบผลของสารเสริมการเชื่อมโยงในปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 phr ต่อสมบัติทางกายภาพของยางเปรียบเทียบกับยางที่ใช้ในทางการค้า ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) เมื่อเพิ่มปริมาณ Co-agent 0.5, 1, 1.5 และ 2 phr แสดงผลในรูปที่ 4.12 พบว่าค่าความหนืดมูนนี่มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งในการบดผสมยางที่ใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความหนืดมูนนี่ เช่น ความสม่ำเสมอของผู้บดผสม อุณหภูมิการบด ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้ง ปริมาณ Co-agent ที่เติมลงไปจึงไม่ส่งผลให้ความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณ Co-agent เท่ากัน ชนิดของสารตัวเติมที่ต่างกันจึงจะส่งผลให้ได้ค่าความหนืดมูนนี่ต่างกัน ซึ่งซิลิกาจะให้ค่าความหนืดมูนนี่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ของยางที่เติมซิลิกาจะมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้าทุกสูตร แต่ยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีเพียงสูตรที่ใช้ปริมาณ Co-agent 1.5 และ 2 phr ที่ใกล้เคียงยางที่ใช้ในทางการค้า

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เมื่อเพิ่มปริมาณ Co-agent จากผลที่แสดงในรูป 4.13 พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของยางไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับกับความหนืดมูนนี่เมื่อเพิ่มปริมาณเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นการเพิ่มในปริมาณเพียงเล็กน้อยต่อปริมาณของยางทั้งหมด ทั้งซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของยางทุกสูตรนั้นมีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

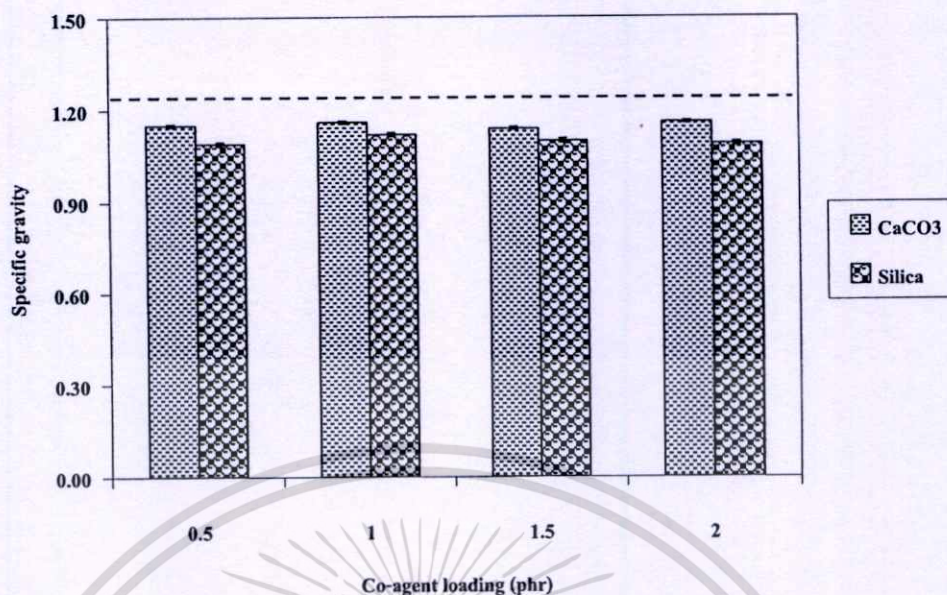


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100 °C)) ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสาร

เสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

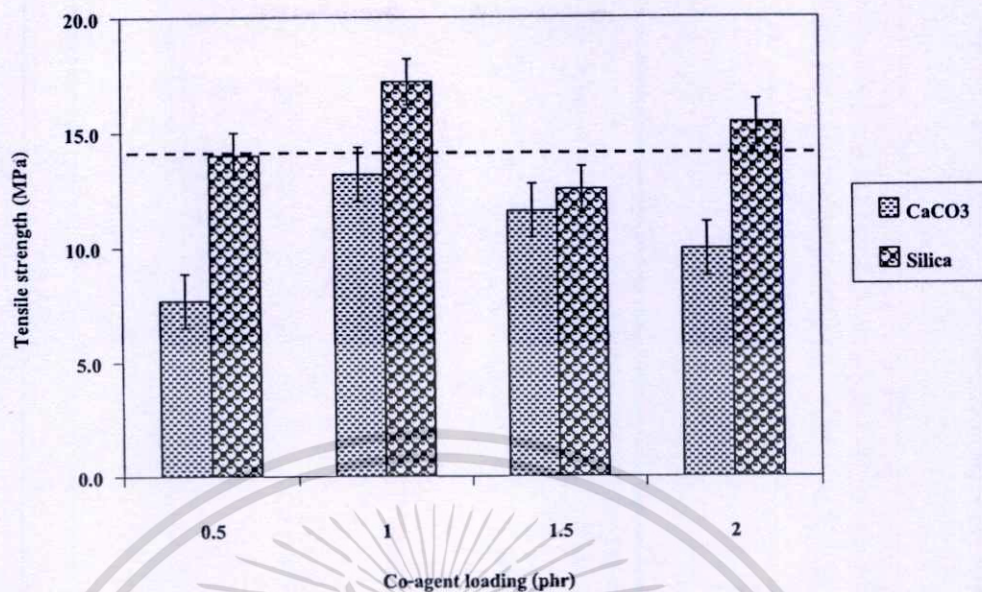


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

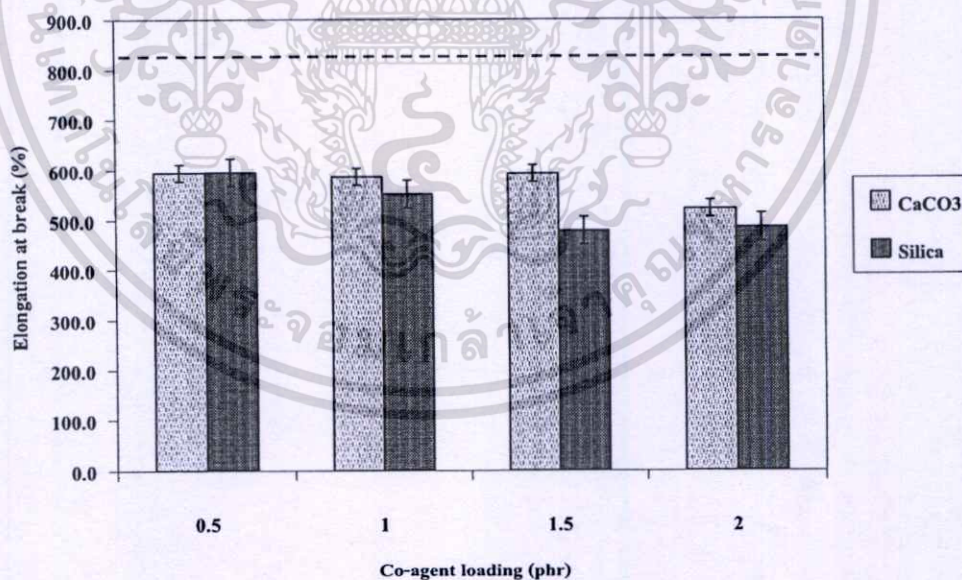
การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) เมื่อเพิ่มปริมาณ Co-agent จากผลที่แสดงในรูป 4.14 - 4.16 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หลังจากนั้นค่าที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงเป็นผลเนื่องจาก Co-agent ซึ่งเป็นตัวเสริมประสิทธิภาพการเชื่อมโยงให้กับเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ ค่าที่ได้จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่หลังจากที่เพิ่มปริมาณ Co-agent มากขึ้น โมเลกุลของยางที่เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์นั้นจะมีความแข็งแรงสูงสุดซึ่งเรียกว่า “จุดเกิดเจล” (Gel point) โมเลกุลยางเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D-Network) สมบูรณ์ ที่หลังจุดสูงสุด การเคลื่อนไหวแบบอิสระนั้นเกิดขึ้นได้ยาก เกิดการเคลื่อนที่อย่างจำกัด จึงทำให้ค่าที่ได้นั้นเริ่มลดลง [6] และเมื่อปริมาณ Co-agent ที่เท่ากัน ซิลิกาจะให้ผลทดสอบที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของยางที่เติมซิลิกาจะใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า ส่วนยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีแค่เพียงยางสูตรที่ใช้ Co-agent 1 และ 2 phr เท่านั้นที่ใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ยางทุกสูตรยังต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้าโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 600% ส่วนยางที่ใช้ในทางการค้ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 830% ในส่วนของค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางทุกสูตรให้ผลใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

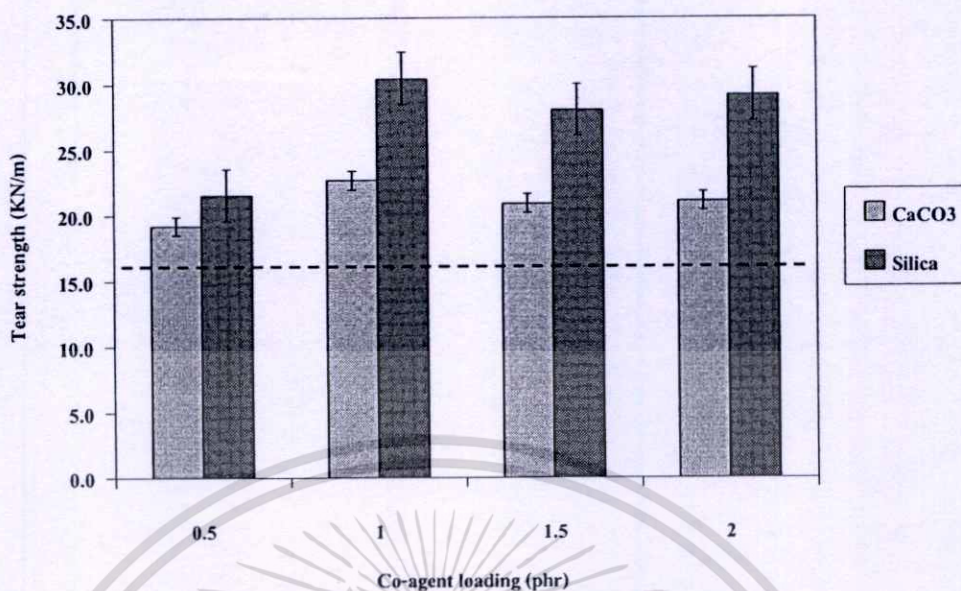


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

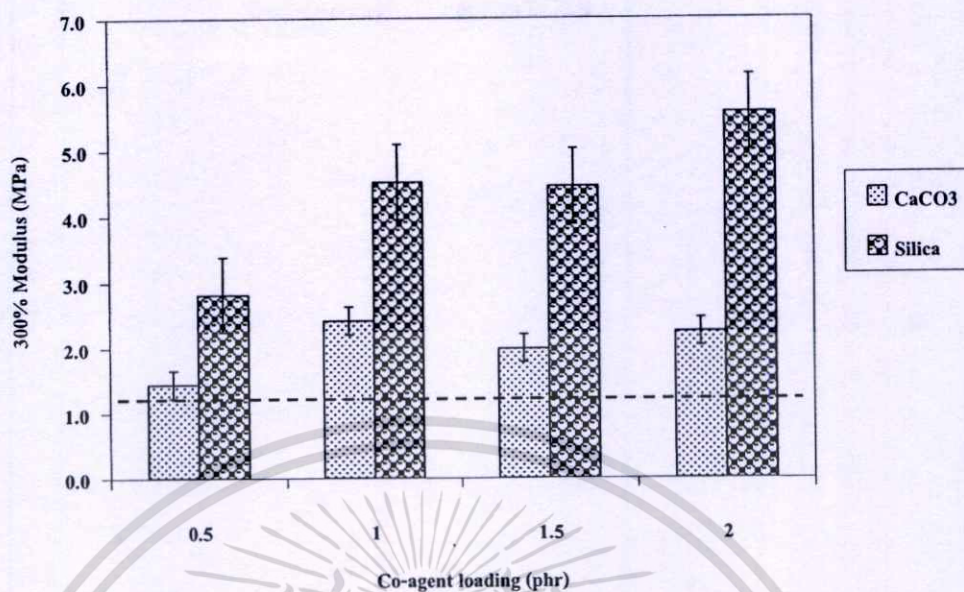
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



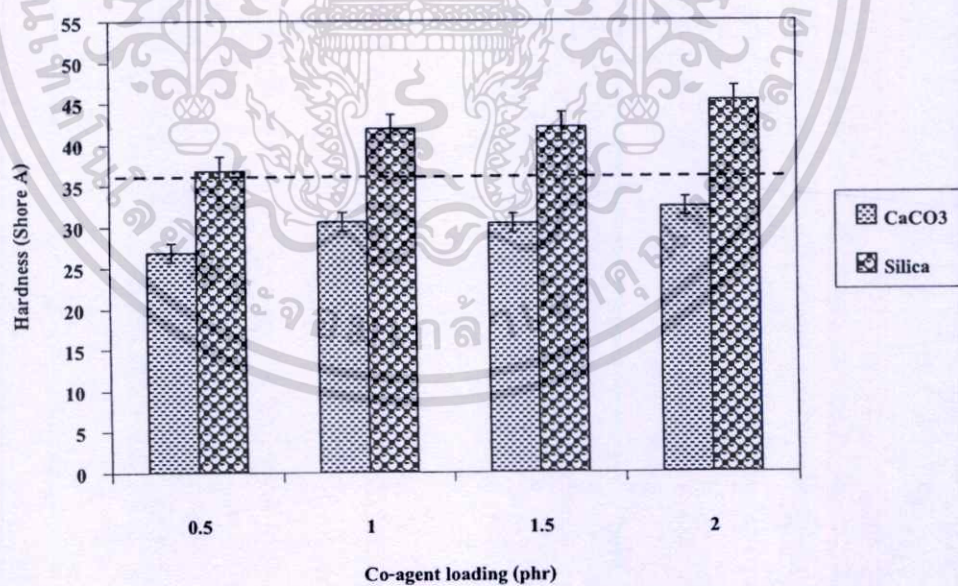
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบมอดูลัสที่ 300% (M 300) และความแข็งแรงกด (Hardness) เมื่อเพิ่มปริมาณ Co-agent จากผลที่แสดงในรูป 4.17- 4.18 พบว่าค่ามอดูลัสที่ 300% และ ค่าความแข็งแรงกดของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากปริมาณ Co-agent ที่เพิ่มขึ้นจะเสริมประสิทธิภาพ การเชื่อมโยงส่งผลให้หนาแน่นของการเชื่อมโยงยางเพิ่มขึ้น ความแข็งของยางก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อปริมาณ Co-agent ที่เท่ากัน ซิลิกาจะให้ผลทดสอบสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นผลเนื่องจากขนาดอนุภาคของ ซิลิกามีขนาดเล็ก ความแข็ง (Mohs hardness) ประมาณ 6.5-7 มีความแข็งสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีค่าความแข็ง ประมาณ 3 จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงกดของซิลิกาสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต [6]

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตและยางที่เติมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับยางจากต่างประเทศ ส่วนค่าความแข็งแรงกดของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่าต่ำกว่ายางจากต่างประเทศ ยางที่เติมซิลิกามีค่าใกล้เคียงยางที่ใช้ในทางการค้า



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

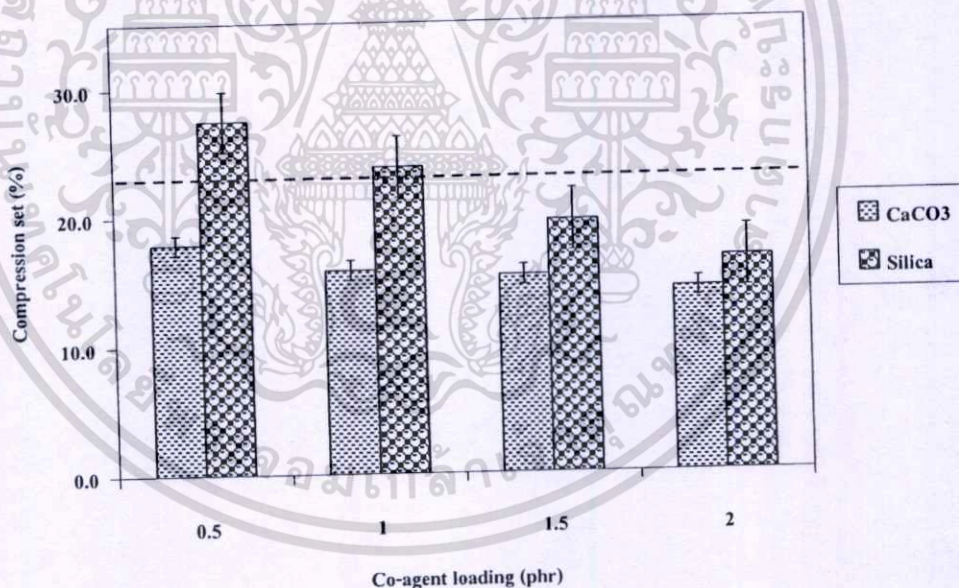


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) ที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 22 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มปริมาณ Co-agent จากผลที่แสดงในรูป 4.19 พบว่าค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการที่เพิ่มปริมาณ Co-agent ซึ่งทำหน้าที่คล้ายตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ให้กับเปอร์ออกไซด์ ทำให้อนุมูลอิสระแตกตัวได้ดีขึ้น เกิดการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลทำให้โครงสร้างร่างแหสามมิติของยางสมบูรณ์ขึ้น เป็นผลให้เกิดการคงรูปถาวรได้น้อยลง เนื่องจากสายโซ่มีพันธะการเชื่อมโยงที่จะดึงโครงสร้างให้กลับเป็นรูปร่างเดิมดีขึ้น การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจึงมีค่าลดลง ตามทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อปริมาณ Co-agent เท่ากันการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของซิลิกาจะสูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนตอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) เกิดช่องว่างภายในยาง ทำให้มีความสามารถในการคืนตัวสูงกว่า เป็นผลทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าซิลิกา

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่าที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า ยางที่เติมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า ยกเว้นปริมาณ Co-agent 1.5 และ 2 phr



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลโดยรวมทั้งหมดของยางสูตรต่างๆกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่ายางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา มีสมบัติใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า ยกเว้นค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่ยางทุกสูตรยังต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของปริมาณ Co-agent ที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์เครื่องประดับ พบว่าการเพิ่มปริมาณของ Co-agent เพียงอย่างเดียวไม่สามารถเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ได้แต่ จะขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างเปอร์ออกไซด์ ซึ่งปริมาณ Co-agent 1 phr จะให้เวลาการเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90}) ที่สั้นที่สุด เป็นอัตราส่วนระหว่างเปอร์ออกไซด์และ Co-agent 2.4 ต่อ 1 และส่งผลโดยตรงต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงกดที่มีค่าลดลง ซึ่งแปรผกผันกับความหนาแน่นการเชื่อมโยง ดังนั้นจึงใช้ปริมาณของ Co-agent 1 phr เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆต่อไป

4.3 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม

ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมยางคอมพาวด์เพื่อทำแบบพิมพ์ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ นอกเหนือจากเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลที่ดีแล้ว เนื้อยางที่มีความละเอียดยังมีความสำคัญต่อการใช้งาน เนื่องจากการใช้งานต้องลอกลายหรือลอกแบบจากตัวต้นแบบโลหะ เพื่อที่จะนำไปผลิตเป็นชิ้นงานเครื่องประดับต่อไป หากยางคอมพาวด์ที่เตรียมนั้นเนื้อยางไม่ละเอียด อาจเป็นผลเสียในขั้นตอนการผลิต สำคัญในการเตรียม ดังนั้นจึงทำการศึกษานิดและปริมาณของสารตัวเติม เพื่อให้ได้ยางคอมพาวด์ที่มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดี พร้อมทั้งมีความเหมาะสมกับการใช้งานซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาสารตัวเติม 2 ชนิด ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเกลือบสเตียริก และซิลิกาชนิดตกตะกอน ในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr และใช้สารเชื่อมโยงปริมาณ 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) 1.0 phr

4.3.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลในการเตรียมแบบพิมพ์ยาง

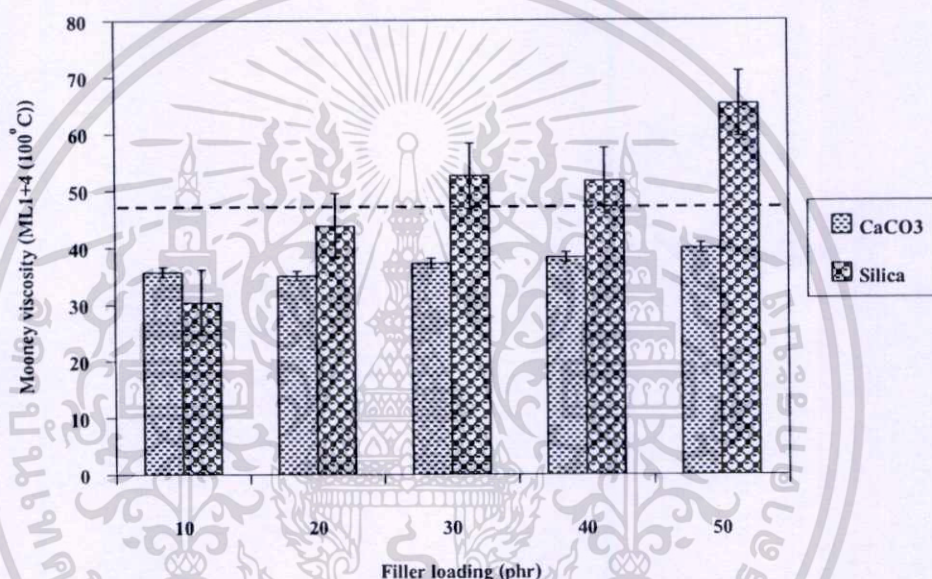
จากการศึกษาเปรียบเทียบเมื่อเพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา ที่ส่งผลต่อความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เกิดการขัดเกาะกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมกับโมเลกุลยางมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดการเคลื่อนไหวยางของสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้ความหนืดมูนนี่เพิ่มขึ้น ตามสมการของกัธ-โกลด์ (Guth-Gold Equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่ของยางที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมใดๆที่ใส่ลงในยาง [42] ดังสมการที่ 4.1 เมื่อปริมาณของสารตัวเติมเท่ากันซิลิกาจะให้ค่าความหนืดมูนนี่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เล็กน้อยเป็นผลเนื่องจากขนาดอนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมากเกิดการขัดเกาะกับยางได้ดีกว่า

$$\eta_r = \eta_u(1 + 1.25\phi + 14.1\phi^2) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ η_f คือ ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filled compound)
 η_u คือ ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (Unfilled compound)
 ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง (Volume fraction of filler)

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าความหนืดมูนนี่ของยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า ส่วนยางที่เติมซิลิกานั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตั้งแต่ 30 phr ความหนืดมูนนี่จึงมีค่าที่ใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

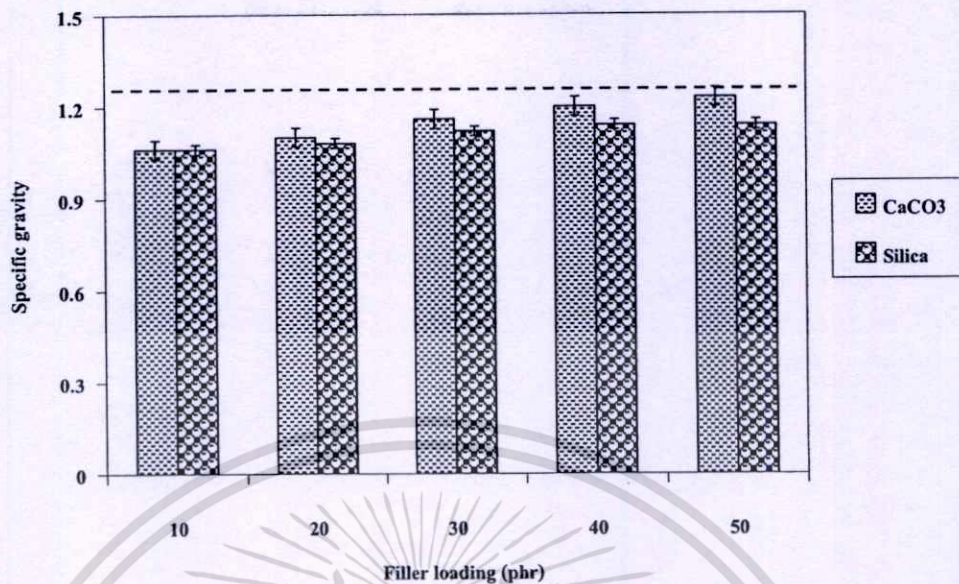


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100 °C))ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น จากผลที่แสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าความถ่วงจำเพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุผสมมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของผสม(Rule of Mixture) กล่าวคือสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเท่ากับปริมาณของ สารแต่ละองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้น [42] เมื่อปริมาณสารตัวเติมเท่ากัน ความถ่วงจำเพาะของแคลเซียมคาร์บอเนตจะสูงกว่าซิลิกา เป็นผลเนื่องแคลเซียมคาร์บอเนตมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าซิลิกา ในปริมาณที่เท่ากันจึงส่งผลให้ยางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงกว่ายางที่เติมซิลิกา

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของยางที่มีซิลิกาปริมาณ 30 phr ขึ้นไปจึงจะมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

เอกสารนี้เขียนขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

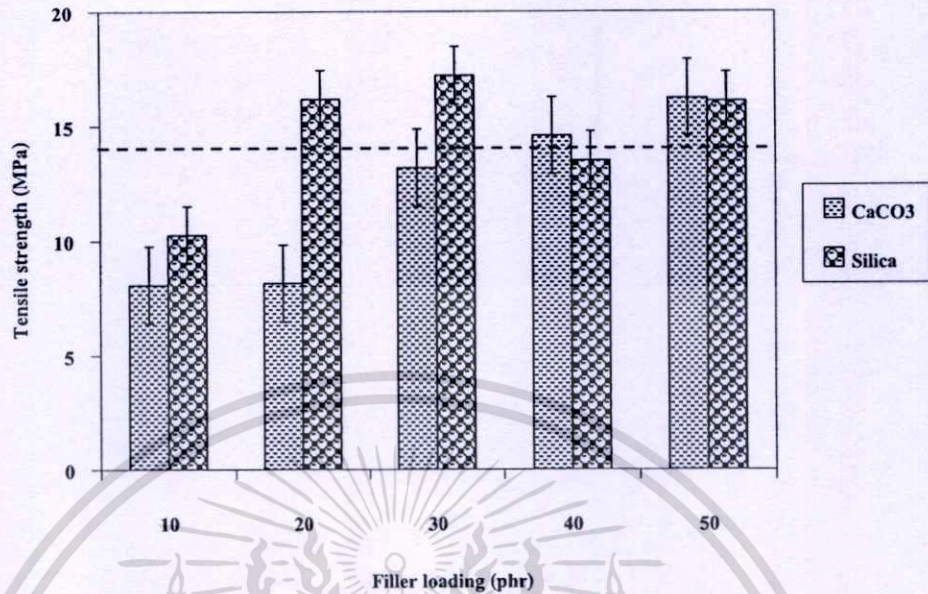


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าความถ่วงจำเพาะของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

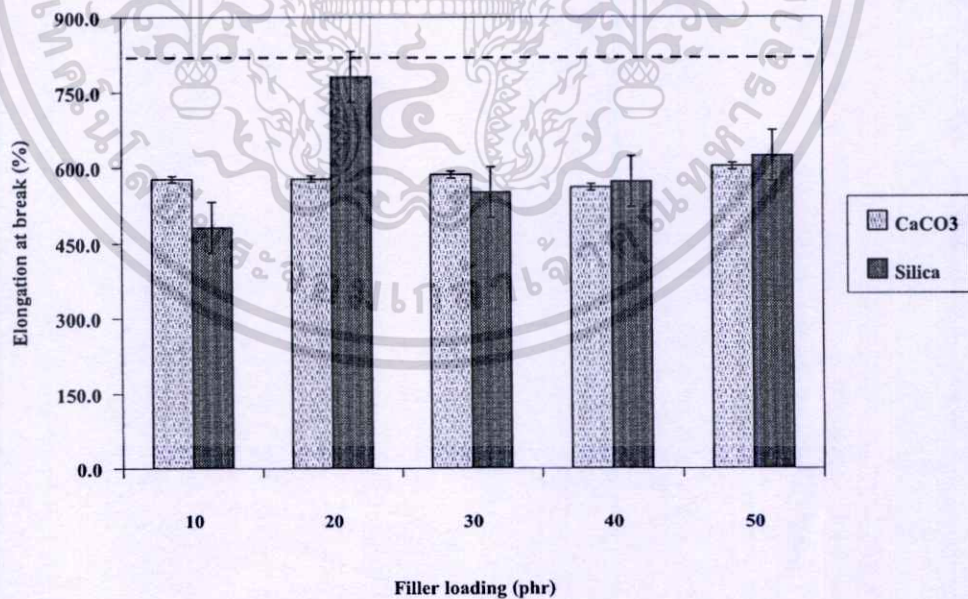
การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และ ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม จากผลที่แสดงในรูป 4.22 - 4.24 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจนถึงจุดๆหนึ่ง สมบัติดังกล่าวของยางจะเริ่มลดลงเล็กน้อย เป็นผลเนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม อนุภาคของยางจะแทรกอยู่ระหว่างโครงสร้างของสารตัวเติมหรือยึดเกาะระหว่างพื้นผิวทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากเกินไปกระจายตัวอาจเกิดได้ไม่ดี เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) ทำให้ความแข็งแรงดึง เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และ ความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของสารตัวเติมเท่ากัน พบว่าซิลิกาซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็ก กระจายแรงได้ดี ส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการเสริมแรง (Reinforcing effect) [6] จึงเป็นผลให้ค่าที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าความแข็งแรงดึงของยางที่มีปริมาณซิลิกา 20-50 phr และปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 40-50 phr จึงจะมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ยางทุกสูตรมีค่าเฉลี่ยประมาณ 600% ยกเว้นยางที่เติมซิลิกาปริมาณ 20 phr ค่าเฉลี่ยประมาณ 780% ยังให้ค่าที่ต่ำกว่ายางที่ใช้ในทางการค้า โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 830% ความแข็งแรงฉีกขาดยางทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

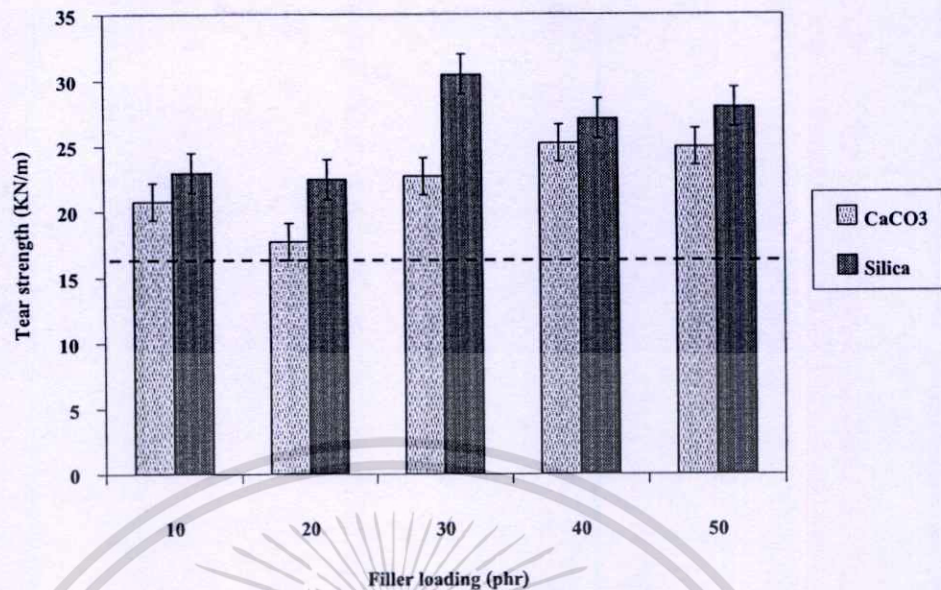


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

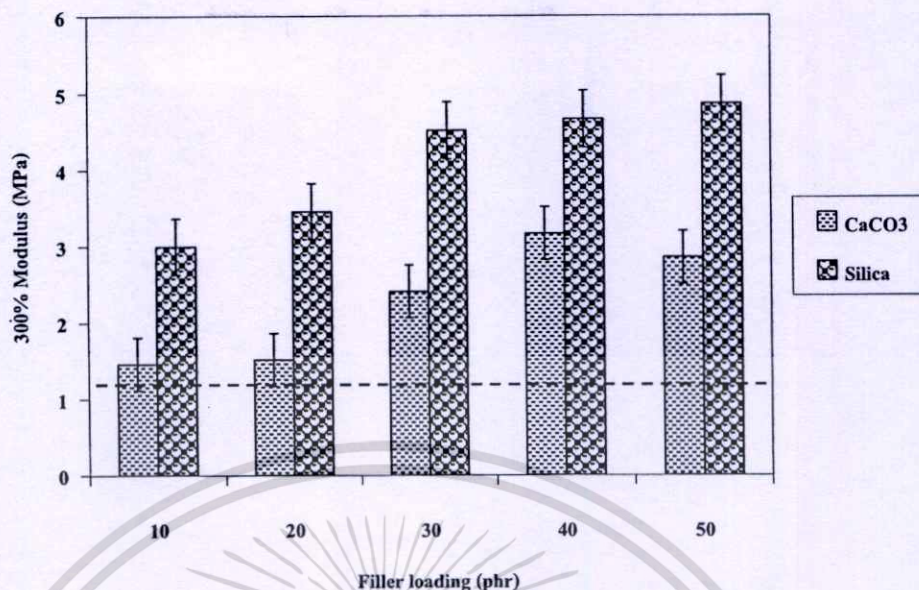
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



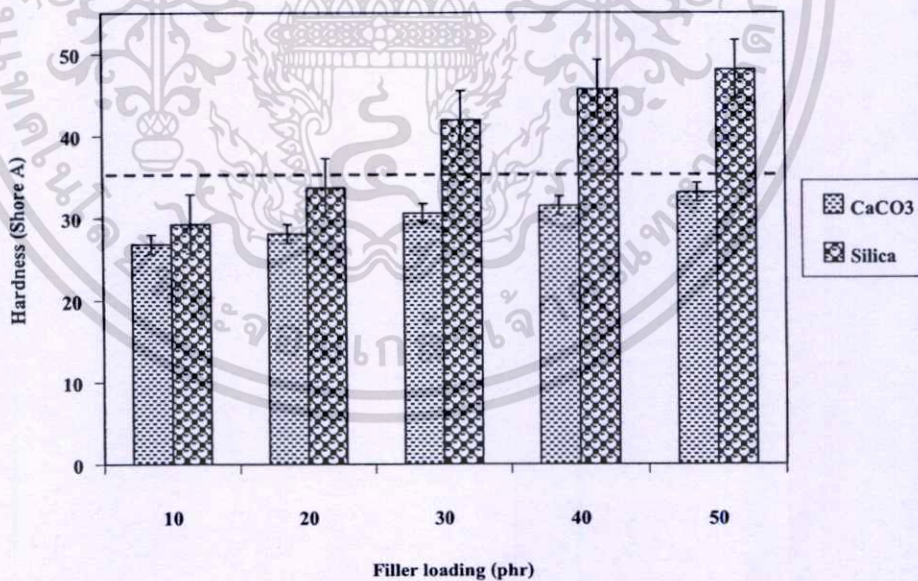
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณ สารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

การทดสอบมอดุลัสที่ 300% (M 300) ความแข็งกด (Hardness) และการยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น จากผลที่แสดงในรูป 4.25 - 4.27 พบว่าค่ามอดุลัสและค่าความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม อนุภาคของสารตัวเติมจะเข้าไปแทรกใน โมเลกุลของยาง เกิดเป็นยางบาวด์ (Bound rubber) ซึ่งทำให้วัสดุมีความแข็งเพิ่มขึ้น เกิดอันตรกิริยากับยางมากขึ้น สมบัติการเปลี่ยนรูปร่างหรือเกิดการคืนตัวของยางได้น้อยลง [42] เป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcement) มีพื้นที่ผิว (Surface area) สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อปริมาณสารตัวเติมเท่ากัน จึงเป็นผลให้ค่าการทดสอบ ของซิลิกาให้ค่าที่สูงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต [10]

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับยางที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่ามอดุลัสที่ 300% ยางที่เติมซิลิกาปริมาณ 20-50 phr จึงมีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า การยุบตัวเนื่องจากแรงกดมีเพียงยางที่เติมซิลิกาเท่านั้นที่มีค่าใกล้เคียงกับยางที่ใช้ในทางการค้า

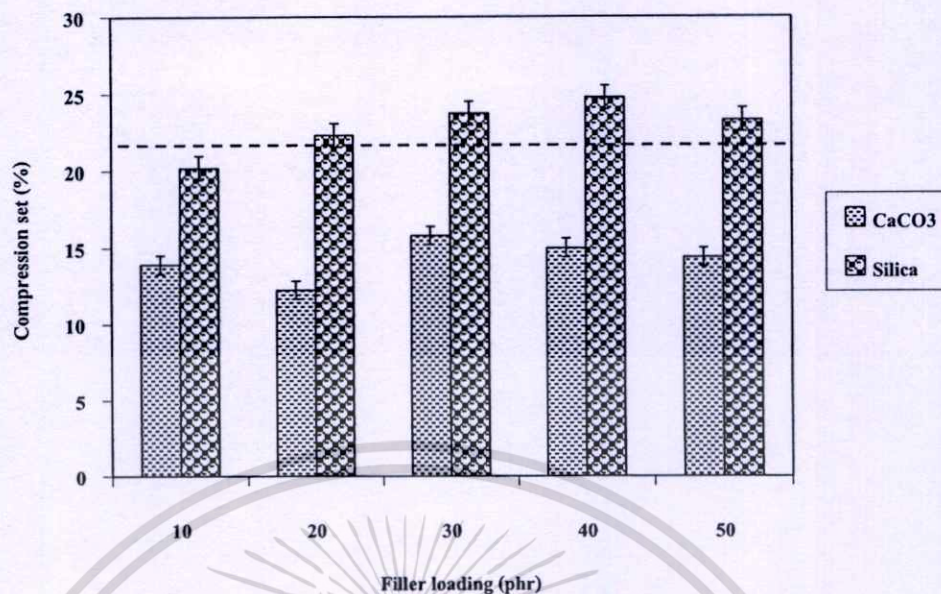


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 300% ของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมต่างกัน เส้นประ (---) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงกดของยางแต่ละชนิดเมื่อใช้ปริมาณตัวเติมต่างกัน เส้นประ (----) แสดงค่าของแบบพิมพ์ยางในทางการค้า

4.3.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

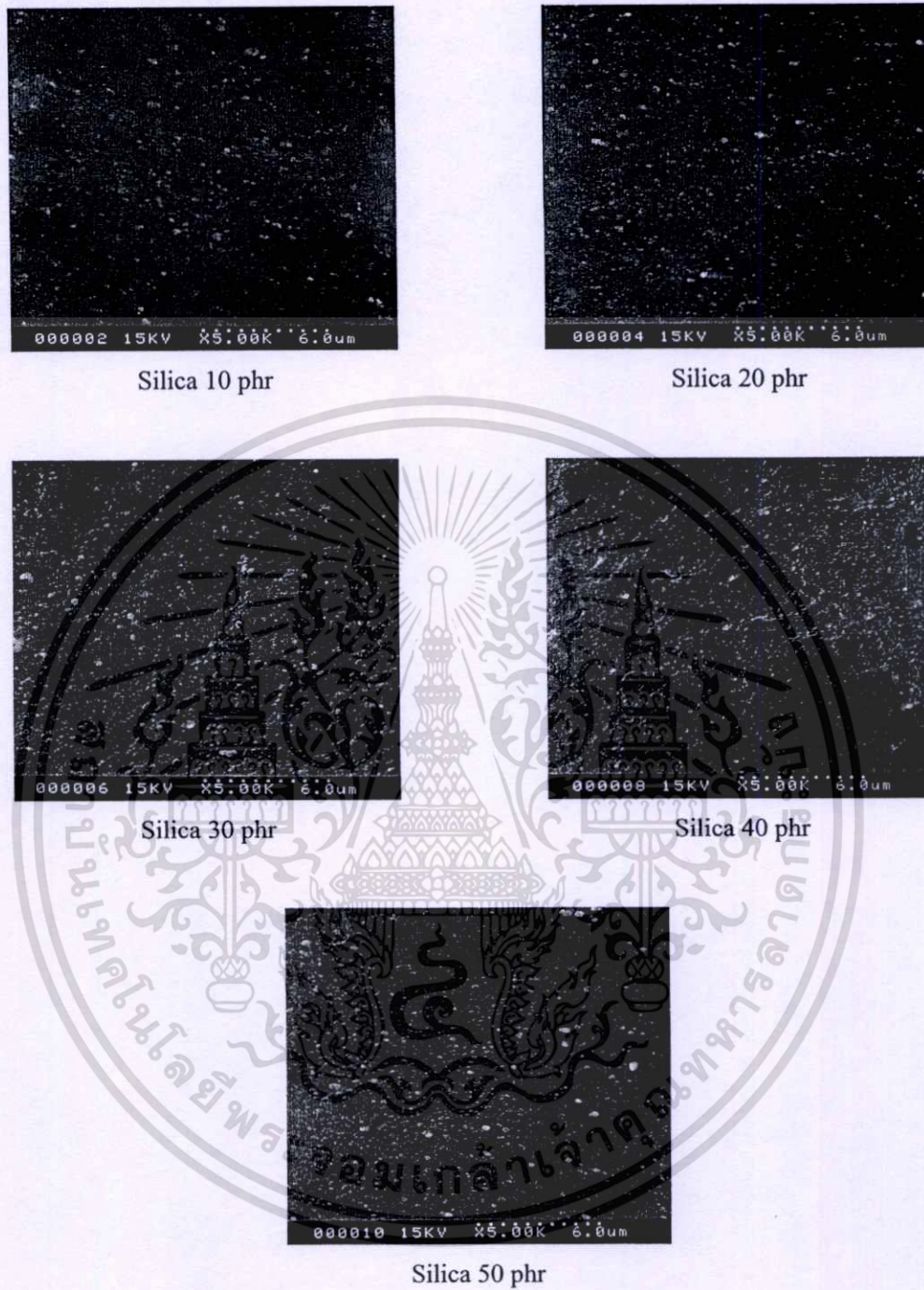
การวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติม ทั้ง 2 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา ที่มีปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ในการเตรียมยางคอมพาวด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง ที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 10, 20, 30, 40, 50 phr จากผลที่แสดงในรูป 4.28 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นบริเวณพื้นผิวของยางคอมพาวด์ และจากรูปที่ 4.29 แสดงสัณฐานวิทยาของยาง เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา แต่เนื่องจากซิลิกามีความเป็นขั้วสูง เข้ากับยางที่ไม่มีขั้วได้ยาก จึงต้องมีการเติมสารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา [10] ทำให้การกระจายตัวของซิลิกาดีขึ้น ไม่ก่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากอนุภาคของซิลิกามีขนาดเล็กกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต จึงทำให้สมบัติเชิงกลแข็งแรงกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

CaCO₃ 10 phrCaCO₃ 20 phrCaCO₃ 30 phrCaCO₃ 40 phrCaCO₃ 50 phr

รูปที่ 4.28 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO₃) ต่างกัน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อใช้ปริมาณของซิลิกา (Silica) ต่างกัน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองใช้งานจริง

องค์ประกอบของยางและสารเคมีที่เหมาะสม เพื่อผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ นอกเหนือจากมีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในการใช้งาน พร้อมทั้งสามารถใช้งานได้จริงในระดับอุตสาหกรรม และผู้ประกอบการมีความพึงพอใจในการใช้งาน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่นำเข้ามาจากประเทศผู้ทำการวิจัยจึงได้นำยางคอมพาวด์ไปทดลองใช้งานจริงในอุตสาหกรรมผลิตอัญมณีและเครื่องประดับ โดยทำการทดลองใช้งานจริงทั้งหมด 10 สูตร ซึ่งจะแบ่งสารตัวเดิมเป็น 2 ชนิด คือแคลเซียมคาร์บอเนต และ ซิลิกา ในปริมาณ 10, 20, 30, 40, 50 phr สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้ทดลองใช้งานจริง แสดงดังตารางที่ 4.6 ทำการทดลองใช้งานจริงสูตรละ 3 ซ้ำทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงจากแบบสอบถาม (ภาคผนวก ก) แบบสอบถามที่ใช้ทั้งหมดแสดงได้ทั้งหมด 30 ชุด

ตารางที่ 4.6 สูตรยางคอมพาวด์ที่ใช้งานจริงในโรงงานผลิตเครื่องประดับ

สูตรยาง	ความหมาย
สูตร 1 : $P_2Co_2Ca_1$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr
สูตร 2 : $P_2Co_2Ca_2$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 20 phr
สูตร 3 : $P_2Co_2Ca_3$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 30 phr
สูตร 4 : $P_2Co_2Ca_4$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 40 phr
สูตร 5 : $P_2Co_2Ca_5$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr แคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr
สูตร 6 : $P_2Co_2Si_1$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr ซิลิกา 10 phr
สูตร 7 : $P_2Co_2Si_2$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr ซิลิกา 20 phr
สูตร 8 : $P_2Co_2Si_3$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr ซิลิกา 30 phr
สูตร 9 : $P_2Co_2Si_4$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr ซิลิกา 40 phr
สูตร 10 : $P_2Co_2Si_5$	สารเชื่อม โยง 2.4 phr สารเสริมการเชื่อม โยง 1 phr ซิลิกา 50 phr

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการใช้งานจริงจากแบบสอบถาม โดยแบบสอบถามทั้ง 3 คอนนั้นเก็บรวบรวมผลจริง (ตารางที่ ค-1) นำมาคิดคะแนนรวมเป็นอัตราส่วนละ 35 : 35 : 30 สามารถสรุปแบบสอบถามได้ ดังตารางที่ 4.7 พบว่าความพึงพอใจเมื่อทดลองใช้ยางสูตรที่ใช้สารตัวเดิม แคลเซียมคาร์บอเนตข้อมูลที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 56-73 % ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ที่สูงกว่ายางสูตรที่ใช้สารตัวเดิมซิลิกา ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 50-59 % โดยลักษณะทางกายภาพจะให้เปอร์เซ็นต์ที่เท่ากันทุกสูตร ประสิทธิภาพการใช้งาน และความพึงพอใจโดยรวม สูตรที่ 5 จะมีความพึงพอใจสูงสุดผลรวม

เอกสารนี้ 73% โดยผู้ใช้งานจริงให้เหตุผลว่าสูตรที่ 5 มีความนุ่มและเนียน มีความละเอียด มีความยืดหยุ่น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ในขณะที่กรี๊ดแบบพิมพ์โลหะออกมาจากยางคอมพาวด์ที่คงรูปแล้วนั้น ไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวน กรี๊ดออกได้โดยง่าย สามารถเก็บรายละเอียดลวดลายของชิ้นงานได้ดี ในส่วนของ สูตรที่ 6-10 นั้นสารตัวเติมเป็นซิลิกา เนื้อของยางคอมพาวด์จะให้เนื้อยางที่หยาบ หลังจากอัดขึ้นรูปแล้วนั้น กรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออกจะกรี๊ดออกได้ยาก เนื่องจากซิลิกามีความแข็งแรงสูง ถึงแม้ว่าสมบัติเชิงกลที่ได้ทดสอบไปแล้วนั้น จะให้สมบัติเชิงกลดีกว่า ยางคอมพาวด์ชนิดอื่นๆ แต่การใช้งานจริงนั้นต้องคำนึงถึงความพึงพอใจของผู้ใช้งานจริงเช่นเดียวกัน สามารถแสดงรูปขณะใช้งานจริง ดังรูปที่ 4.30

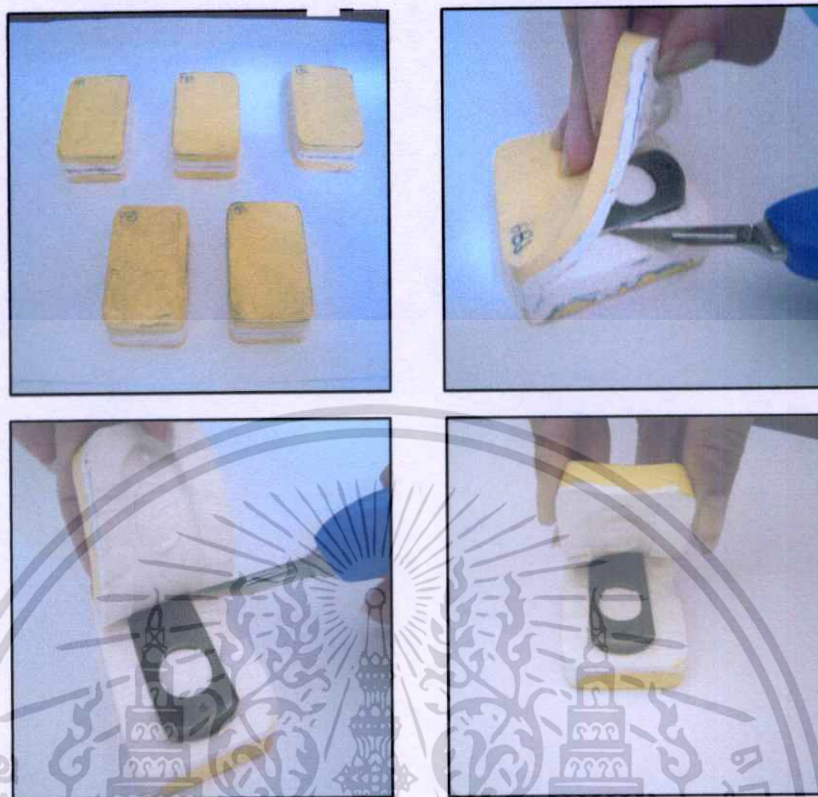
ตารางที่ 4.7 สรุปผลแบบสอบถามความพึงพอใจ

สูตร	ตอนที่ 1 ^a (35 %)	ตอนที่ 2 ^b (35 %)	ตอนที่ 3 ^c (30 %)	ผลรวม (100 %)
1	29.75	11.67	15.00	56.42
2	29.75	12.83	15.00	57.58
3	29.75	16.33	22.50	68.58
4	29.75	19.25	22.50	71.50
5	29.75	21.58	22.50	73.83
6	29.75	14.58	15.00	59.33
7	29.75	12.25	15.00	57.00
8	29.75	13.42	15.00	58.17
9	29.75	14.00	7.5	51.25
10	29.75	13.42	7.5	50.67

หมายเหตุ : ^aลักษณะทางกายภาพ ความพึงพอใจก่อนการใช้งาน

^bประสิทธิภาพในการใช้งาน

^cความพึงพอใจโดยรวม



รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะแบบพิมพ์ในการใช้งานจริง

4.5 สรุปสูตรที่เหมาะสมของแบบพิมพ์ยาง

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา รวมทั้งการใช้งานจริง ในโรงงานผลิตเครื่องประดับแล้วนั้น สามารถสรุปสูตรยางที่มีความเหมาะสมในการผลิต ขางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่ประกอบด้วย

- ปริมาณสารเชื่อมโยง (เปอร์ออกไซด์) 2.4 phr
- ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง (ฟีนีลีนไดเมทลาอิมิด) 1 phr
- สารตัวเติมที่เหมาะสมคือแคลเซียมคาร์บอเนต
- ปริมาณสารตัวเติม 50 phr

หลังจากนั้นอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งสมบัติของขางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแบบพิมพ์สำหรับ อุตสาหกรรมเครื่องประดับที่ผลิตได้ แสดงดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบระหว่างสมบัติของยางคอมพาวด์ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรม
เครื่องประดับที่ผลิตได้ และยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า

สมบัติของแบบพิมพ์ยาง	ยางคอมพาวด์ ที่ใช้ในทางการค้า	ผลที่ได้จาก งานวิจัยนี้	ผลต่าง (%)
ความหนืดมูนนี่ (ML I+4 (100°C))	48	39.9	-16.9
ความแข็งแรงดึง (MPa)	14.1	16.2	+15.3
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (MPa)	830.8	602.8	-27.4
มอดุลัสที่ 300% (MPa)	1.2	2.9	+152.2
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	16.9	24.9	+47.7
ความแข็งกด (Shore A)	35.9	33.1	-7.8
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 hr (%)	23.1	14.4	-37.7
ความถ่วงจำเพาะ	1.26	1.23	-2.38

หมายเหตุ เครื่องหมายบวก (+) หมายถึง ยางคอมพาวด์จากงานวิจัยมีค่าที่สูงกว่าหรือดีกว่า
ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า

เครื่องหมายลบ (-) หมายถึง ยางคอมพาวด์จากงานวิจัยมีค่าที่ต่ำกว่าหรือแย่กว่า
ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้า

จากการเปรียบเทียบสมบัติของยางคอมพาวด์จากงานวิจัยนี้ เทียบกับยางคอมพาวด์ที่ใช้
ในทางการค้า (ยางนำเข้าจากต่างประเทศ) ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน พบว่า ยางคอมพาวด์
จากงานวิจัยนี้ มีสมบัติบางประการที่ดีกว่า เช่น ความแข็งแรงดึง (สูงกว่า 15.3 %), ความแข็งแรง
ฉีกขาด (สูงกว่า 47.7 %), การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 hr (น้อยกว่าหรือดีกว่า 37.7 %),
อย่างไรก็ดีสมบัติบางประการที่ยังต้องการ การปรับปรุง เช่น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (น้อยกว่า
27.4 %), มอดุลัสที่ 300% (แข็งแรงกว่า 152.2 %)

4.6 การวิเคราะห์ต้นทุน

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะเลือกใช้ยางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแบบพิมพ์ยางที่มีสมบัติเชิงกล
สมบัติทางกายภาพ และที่เหมาะสมกับการใช้งานคือ ยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้จาก ยางธรรมชาติ
NR 5L สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) 1 phr
สารตัวเติม (Filler) ที่ใช้คือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO₃) 50 phr โดยวิเคราะห์
ต้นทุนวัตถุดิบของยางคอมพาวด์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางคอมพาวด์

รายการ	ปริมาณที่ใช้ (g)	ราคาต่อหน่วย ¹ (บาท/kg)	เป็นเงิน (บาท)
1. ยางธรรมชาติ (NR 5L)	552.5	68	37.57
2. ซิงค์ออกไซด์	27.6	150	4.14
3. กรดสเตียริก	11.1	40	0.44
4. Antioxidant	5.5	400	2.21
5. น้ำมันพาราฟิน	45.9	2.1	0.10
6. Co-agent	5.5	1400	7.74
7. แคลเซียมคาร์บอเนต	276.3	36	9.95
8. ไทเทเนียมไดออกไซด์	55.3	125	6.91
9. สีเหลือง no.333	6.6	450	2.98
10. สีแดง no.112	0.5	450	0.22
11. เพอร์ออกไซด์	13.3	2000	26.52
รวมต้นทุนวัตถุดิบที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			98.78

หมายเหตุ : ¹เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือน มกราคม 2553

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่ใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรม

รายการ	ปริมาณที่ใช้ (หน่วย)	ราคาต่อหน่วย ¹ (บาท/หน่วย)	เป็นเงิน (บาท)
1. วัตถุดิบ	1 kg	98.78	98.78
2. ค่าจ้างผลิต ²	1 kg	12 บาท/kg	12
รวมต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ³			110.78

หมายเหตุ : ¹เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือน มกราคม 2553

²คิดจากค่าแรง, ค่าไฟฟ้า, ค่าเสื่อมของเครื่องจักร

³ราคานี้ไม่รวมต้นทุนของเครื่องจักรการผลิต และค่าขนส่ง

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณต้นทุนการผลิตยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม ใช้ต้นทุนประมาณ
205 บาท ซึ่งนับว่าต้นทุนการผลิตต่ำ เมื่อเทียบกับยางคอมพาวด์ทำแบบพิมพ์ยางทางการค้าที่ใช้กัน

โดยทั่วไป ที่มีราคาขายปลีกประมาณ 400-500 บาทต่อกิโลกรัม (ราคา ณ เดือน พฤษภาคม 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งกล่าวได้ว่า การผลิตยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ในงานวิจัยนี้ มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยทำการศึกษาปริมาณสารเชื่อมโยง ปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม จากนั้นทำการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา การใช้งานจริง ตลอดจนวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาผลปริมาณสารเชื่อมโยง (เปอร์ออกไซด์) ที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ โดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล พบว่า เปอร์ออกไซด์ปริมาณ 2.4 phr จะเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์
2. การศึกษาผลของปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) ที่เหมาะสมต่อการเสริมการเชื่อมโยงของยางคอมพาวด์ โดยพิจารณาจากลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล พบว่า Co-agent ปริมาณ 1 phr เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมต่อเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารเสริมการเชื่อมโยงซึ่งทำหน้าที่คล้ายตัวเร่งปฏิกิริยาให้กับเปอร์ออกไซด์ จึงเป็นตัวเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยงและอัตราเร็วของการเชื่อมโยง ทำให้ระยะเวลาการเชื่อมโยงของยางสั้นลง
3. การศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเสริมตัวเติม (Filler) ที่มีความเหมาะสมต่อสมบัติของยางคอมพาวด์ โดยพิจารณาจาก สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และการใช้งานจริง เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบสมบัติต่างๆของยางที่เติมซิลิกา 50 phr ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดีกว่ายางที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณ 50 phr พบว่าผู้ประกอบการที่ได้ทดลองใช้งานจริง จะให้ความพึงพอใจกับยางที่เตรียมจากแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 50 phr มากกว่า
4. การผลิตยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติ NR 5L สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) 1 phr สารตัวเติม (Filler) ที่ใช้เตรียมคือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) 50 phr เป็นสูตรที่มีความเหมาะสมเพื่อใช้ทำแบบพิมพ์ยาง เพราะนอกเหนือจากสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่ใช้ในทางการค้าแล้วนั้น เมื่อได้ทดลองใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับความร่วมมือจากผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยทดลองใช้งานยางคอมพาวด์ในงานวิจัย ทั้งหมด 10 สูตร จากแบบสอบถามพบว่าสูตรยางดังกล่าวไปแล้วนั้น มีความพึงพอใจสูงสุด คิดเป็น 73% เมื่อเทียบกับยางคอมพาวด์ทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การวิเคราะห์ต้นทุน การผลิตยางคอมพาวด์ ที่ประกอบด้วย ยางธรรมชาติ NR 5L สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) 2.4 phr สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent) 1 phr สารตัวเติม (Filler) ที่ใช้คือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) 50 phr ซึ่งเป็นสูตรที่เหมาะสมและมีสมบัติที่ดี มีต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 99 บาทต่อยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม และเมื่อรวมทั้งค่าจ้างในการผลิต มีต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 110 บาทต่อยางคอมพาวด์ 1 กิโลกรัม

ดังนั้นยางคอมพาวด์เพื่อใช้ทำแบบพิมพ์ยางในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้จริง ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

5.1 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของสารเติมแต่ง (Additive) ชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของยาง และเพิ่มอายุในการเก็บรักษา เช่น สารหน่วง (Retarder) เป็นต้น
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เช่น แคลไซน์เคลย์ (Calcined clay) เป็นต้น
3. ศึกษาสมบัติของยางคอมพาวด์ต่อการเก็บรักษาได้แก่ (Shelf-life) และ การแข็งตัวเนื่องจากการเก็บ (Storage hardening)

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมวิชาการเกษตร. มิถุนายน 2552. “ผลผลิตยางธรรมชาติของไทย.” สถิติยางไทย สถาบันวิจัยยาง [Online].Available : [http:// www.rubberthai.go.th](http://www.rubberthai.go.th).
- [2] สถาบันอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน). 2551. “ภาวะธุรกิจอุตสาหกรรมเครื่องประดับไทยปี 2550.” ศูนย์ข้อมูลอัญมณีและเครื่องประดับ. [Online].Available : <http://www.git.or.th>.
- [3] กระทรวงพาณิชย์. ตุลาคม 2552 “สินค้าส่งออกสำคัญของไทย.” Thailand Trading Report ระบบรายงานข้อมูลการค้าระหว่างประเทศของไทย. [Online].Available : <http://www2.ops3.moc.go.th/export>.
- [4] สถาบันอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน). 2551. “การทำต้นแบบเครื่องประดับ.” ศูนย์ข้อมูลอัญมณีและเครื่องประดับ. [Online].Available : <http://www.git.or.th>.
- [5] F. E. Knight Inc. Castaldo Corp. 2008. “Mold Making - Guide to Solving Common Mold Making Problems.” [Online].Available : <http://www.castaldo.com>.
- [6] อธิพิณ แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. มกราคม 2551
- [7] วิภาวี พัฒนกุล. “เอกสารประกอบการบรรยายการฝึกอบรมหลักสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางแห้ง.” ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. มิถุนายน 2549
- [8] เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังษี. “การผลิตยางธรรมชาติ.” ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี. กรกฎาคม 2541.
- [9] พรพรรณ นิธิอุทัย. “สารเคมีสำหรับยาง.” ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี. ธันวาคม 2528.
- [10] พงษ์ธร แซ่อูย. “สารเคมียาง.” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). เมษายน. 2547
- [11] P.R. Dluzneski. “Journal Rubber Chem Technol.” Vol 74. 2001. pp 451.
- [12] P. Kovacic and R.W. Hein. “Journal American Chemistry Society.” Vol 81. 1958. pp1190.
- [13] W.C. Endstra, Kautsch. Gummi Kunstst. Vol 43. 1990. pp790.
- [14] กรมวิชาการเกษตร. “คู่มือเทคโนโลยียาง.” วราภรณ์ ขจรไชยกูล และ นุชนาฏ ฅ ระนอง. สถาบันวิจัยยาง. 2545.
- [15] คณะอาจารย์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. “การทดสอบยางและผลิตภัณฑ์ยาง.” ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี 2534.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] ชลลดา ฤตวิรุพห์. “เอกสารประกอบการสอนวิชา โครงสร้าง สมบัติ และการวิเคราะห์พอลิเมอร์.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. มิถุนายน 2550
- [17] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. “Scanning Electron Microscopy (SEM).” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เมษายน 2553
- [18] สถาบันอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์กรมมหาชน). 2551. “การหล่อตัวเรือนเครื่องประดับ”. ศูนย์ข้อมูลอัญมณีและเครื่องประดับ. [Online].Available : <http://www.git.or.th>.
- [19] F. E. Knight Inc. Castaldo Corp. 2008. “Mold Cutting Pictorial Menu Photos courtesy of Brian McCullars.” [Online].Available : http://www.castaldo.com/cut_series/cut_menu.html.
- [20] F. E. Knight Inc. Castaldo Corp. 2008. “Fact Sheet and Technical Bulletin” [Online].Available : http://www.castaldo.com/english/usinprod/u_techpage/tech001.html
- [21] วราภรณ์ ขจรไชยกูล และ วิภา เสวตกนิษฐ์. “การใช้ยางแห้งผสมสารเคมีทำแม่พิมพ์ในงานเครื่องประดับ.” ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ สถาบันวิจัยยาง. 2537
- [22] Ejolle E. E and Saeed A.F. “Chemical Kinetics of Vulcanisation and Compression Set .” *European Polymer Journal*. Vol 37. 2001. pp. 329-334.
- [23] Poh B.T. and Ng C.C. “Effect of Silane Coupling Agents on the Mooney Scorch Time of Silica-filled Natural Rubber Compound.” *European Polymer Journal*. Vol 34. 1998. pp. 975-979.
- [24] พิษณุ บุญนวล, ธนพล พรหมย้อย และ เล็ก สีคง “การศึกษาการใช้ผงหินปูนเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลยางพารา.” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเหมืองแร่ วัสดุ และปิโตรเลียม. ครั้งที่ 7. 1-3 ธันวาคม 2547. โรงแรมโลตัสปางสวนแก้ว. เชียงใหม่. หน้า 7-32 ถึง 7-37.
- [25] Ansarifar A., Lim H.P., and Nijhawan R. “Assessment of the Effect of a Bifunction Organosilane on the Bound Rubber and Properties of Some Natural Rubber Compounds.” *International Journal Adhesion & Adhesives*. Vol 24. 2004. pp. 9-22.
- [26] Ansarifar A., Azhar A., Ibrahim N., Shiah S.F., and Law J.M.D. “The Use of a Silanised Silica filler to Reinforce and Crosslink Natural Rubber.” *International Journal Adhesion & Adhesives*. Vol 25. 2005. pp. 77-86.
- [27] Yang R., Liu Y. Wang K., and Yu J. “Characterization of Surface Interaction of Inorganic Fillers with Silane Coupling Agent.” *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol 70. 2003. pp. 413-425.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] Yu C. O. and Zhong Z. Y. "Effect of Alkylation of Silica Filler on Rubber Reinforcement." **Rubber Chemistry Technology**. Vol 67. 1994. pp. 834-844.
- [29] Byers J.T. "Filler for Balancing Passenger Tire Tread Properties." **Rubber Chemistry Technology**. Vol 75. 2002. pp. 527-547.
- [30] Choi S. S. "Influence of Storage Time and Temperature and Silane Coupling Agent on Bound Rubber Formation in Filled Styrene-Butadiene Rubber Compound." **Polymer Testing**. Vol 21. 2002. pp. 201-208
- [31] Kuginsland H. D., Frohlich J. and Wehmeier A. "Influence of Different Silane on the Reinforcement of Silica-filled Rubber Compound." **Rubber Chemistry Technology**. Vol 75. 2002. pp. 563-579.
- [32] Sirisinha C., Phoowakeereewiwat S., Saeoui P. "Cure and Dynamic Mechanical Properties in Peroxide-cured Isoprene Rubber : Effect of Stearic acid and Amine-based Antioxidant." **European Polymer Journal**. Vol 40. 2004. pp. 1779-1785.
- [33] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.402-2532) "แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมยาง." สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม., 2532.
- [34] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1070-2547) "ซิลิโคนไดออกไซด์สำหรับอุตสาหกรรมยาง." สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม., 2547.
- [35] ASTM D 1646 Committee on standard "Standard Test Methods for Rubber Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer)." Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1994.
- [36] ASTM D 2084 Committee on standard "Standard Test Methods for Rubber Property – Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter." Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [37] ASTM D 412 Committee on standard "Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension." Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [38] ASTM D 624 Committee on standard "Standard Test Methods for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers." Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1991.
- [39] ASTM D 2240 Committee on standard "Standard Test Methods for Rubber Property – Durometer Hardnes." Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

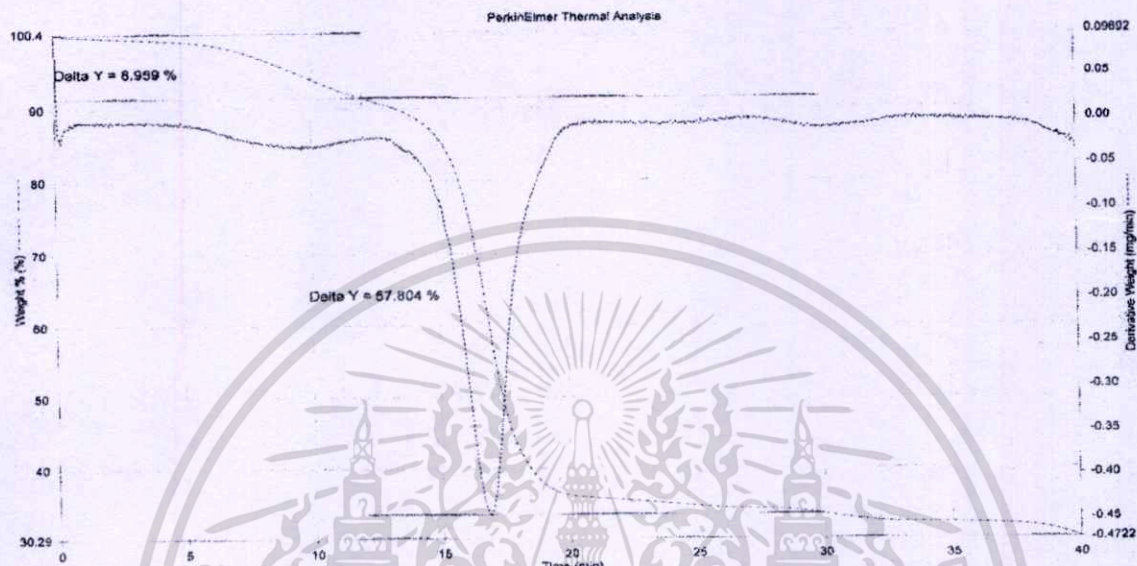
- [40] ASTM D 395 Committee on standard "Standard Test Methods for Rubber Property – Compression Set." Philadelphia : American Society for Testing and Meterial., 1989.
- [41] บุญธรรม นิธิอุทัย, พรพรรณ นิธิอุทัย และปรีชา ป็องภัย. "สารเคมียางและเทคโนโลยีการออกสูตรูยาง" คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี. ธันวาคม 2530.
- [42] Mark J.E., Erman B. and Eirich F.R. "Science and Technology of Rubber." 2nd Ed. New York : Academic Press, Inc. 1994.



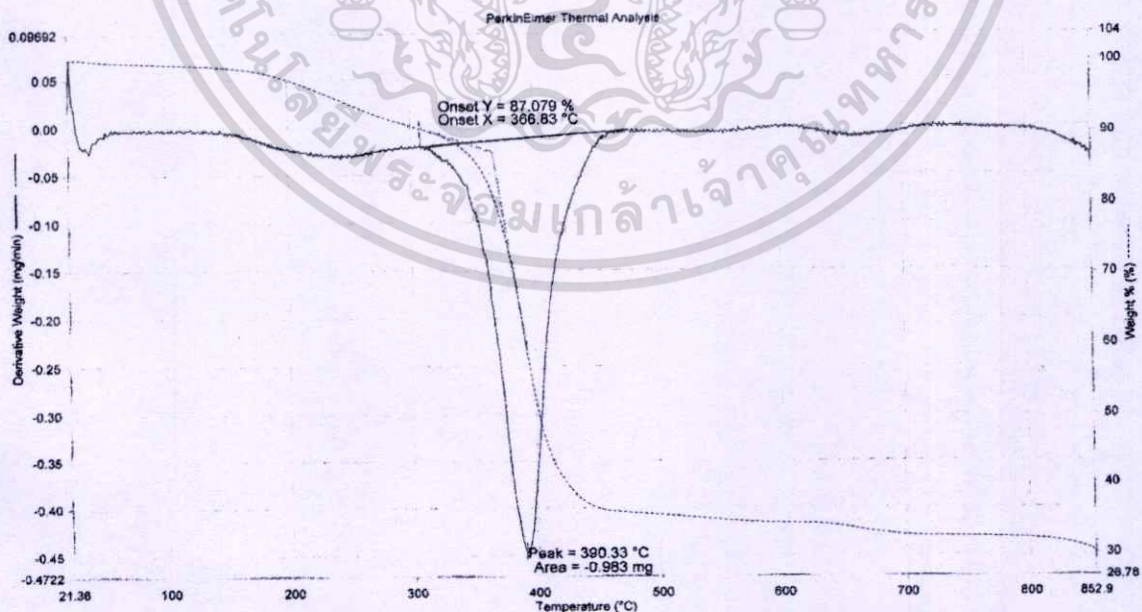
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

อุณหภูมิการสลายตัวของยางคอมพาวด์ในทางการค้า



รูปที่ ก-1 TGA thermogram ของยางคอมพาวด์ในทางการค้า



รูปที่ ก-2 TGA derivative thermogram ของยางคอมพาวด์ในทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)
300% มอดุลัส (M 300) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) (%)	300% มอดุลัส (M 300) (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)
P ₁ Co ₂ Ca ₃	7.0 ± 1.5	595.3 ± 57.6	1.4 ± 0.1	17.0 ± 2.2
P ₂ Co ₂ Ca ₃	13.2 ± 0.6	586.3 ± 18.5	2.4 ± 0.1	22.7 ± 4.2
P ₃ Co ₂ Ca ₃	10.5 ± 0.4	504.4 ± 3.7	2.7 ± 0.1	17.8 ± 3.2
P ₁ Co ₂ Si ₃	12.5 ± 1.5	557.5 ± 38.5	2.9 ± 0.2	18.8 ± 1.7
P ₂ Co ₂ Si ₃	17.2 ± 0.7	551.3 ± 14.6	4.5 ± 0.1	30.5 ± 0.9
P ₃ Co ₂ Si ₃	10.3 ± 1.8	565.1 ± 24.5	6.6 ± 0.3	22.5 ± 3.8
P ₂ Co ₁ Ca ₃	7.7 ± 0.2	593.9 ± 16.8	1.4 ± 0.1	19.2 ± 1.6
P ₂ Co ₂ Ca ₃	13.2 ± 0.9	586.3 ± 18.0	2.4 ± 0.1	22.7 ± 4.2
P ₂ Co ₃ Ca ₃	11.6 ± 1.6	592.9 ± 71.8	2.0 ± 0.2	20.9 ± 2.5
P ₂ Co ₄ Ca ₃	9.9 ± 1.4	522.4 ± 15.3	2.2 ± 0.1	21.1 ± 1.2
P ₂ Co ₁ Si ₃	14.0 ± 0.4	595.2 ± 3.2	2.8 ± 0.1	21.6 ± 2.2
P ₂ Co ₂ Si ₃	17.2 ± 0.7	551.3 ± 14.6	4.5 ± 0.1	30.5 ± 0.9
P ₂ Co ₃ Si ₃	12.6 ± 1.9	478.5 ± 31.2	4.5 ± 0.1	28.1 ± 1.5
P ₂ Co ₄ Si ₃	15.5 ± 0.7	485.0 ± 6.4	5.6 ± 0.3	29.2 ± 0.5
P ₂ Co ₂ Ca ₁	8.08 ± 1.2	577.2 ± 22.7	1.5 ± 0.1	20.8 ± 3.0
P ₂ Co ₂ Ca ₂	8.15 ± 1.3	577.9 ± 42.0	1.5 ± 0.1	17.7 ± 2.6
P ₂ Co ₂ Ca ₃	13.2 ± 0.9	586.3 ± 18.0	2.4 ± 0.1	22.7 ± 4.2
P ₂ Co ₂ Ca ₄	14.6 ± 1.5	561.2 ± 17.3	3.2 ± 0.0	25.2 ± 1.8
P ₂ Co ₂ Ca ₅	16.2 ± 0.7	602.8 ± 22.3	2.9 ± 0.1	24.9 ± 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) 300% มอดุลัส (M 300) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) (%)	300% มอดุลัส (M 300) (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) (kN/m)
P ₂ Co ₂ Si ₁	10.3 ± 2.3	481.3 ± 49.3	3.0 ± 0.2	23.0 ± 2.0
P ₂ Co ₂ Si ₂	16.2 ± 2.4	781.1 ± 48.5	3.5 ± 0.3	22.5 ± 4.2
P ₂ Co ₂ Si ₃	17.2 ± 0.7	551.3 ± 14.6	4.5 ± 0.4	30.5 ± 0.9
P ₂ Co ₂ Si ₄	13.51 ± 0.5	572.9 ± 18.4	4.7 ± 0.5	27.1 ± 1.6
P ₂ Co ₂ Si ₅	16.11 ± 0.4	624.2 ± 28.7	4.9 ± 0.4	28.0 ± 0.8

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-2 ความแข็งกด (Hardness) การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

สูตร	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) (%)
P ₁ Co ₂ Ca ₃	30.1 ± 1.9	16.7 ± 1.9
P ₂ Co ₂ Ca ₃	30.6 ± 1.7	15.8 ± 1.0
P ₃ Co ₂ Ca ₃	32.1 ± 1.3	15.4 ± 3.5
P ₁ Co ₂ Si ₃	35.6 ± 3.1	23.0 ± 4.4
P ₂ Co ₂ Si ₃	41.9 ± 1.7	23.8 ± 0.4
P ₃ Co ₂ Si ₃	46.1 ± 2.5	22.0 ± 2.3
P ₂ Co ₁ Ca ₃	26.9 ± 0.9	17.9 ± 1.2
P ₂ Co ₂ Ca ₃	30.6 ± 1.7	15.8 ± 1.0
P ₂ Co ₃ Ca ₃	30.4 ± 0.3	15.3 ± 3.3
P ₂ Co ₄ Ca ₃	32.4 ± 0.6	14.2 ± 0.7
P ₂ Co ₁ Si ₃	36.8 ± 0.3	27.4 ± 0.7
P ₂ Co ₂ Si ₃	41.9 ± 1.7	23.8 ± 0.4
P ₂ Co ₃ Si ₃	42.1 ± 1.1	19.5 ± 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ความแข็งกด (Hardness) การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set)

สูตร	ความแข็งกด (Hardness) (Shore A)	การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) (%)
$P_2Co_4Si_3$	45.3 ± 0.7	16.6 ± 0.6
$P_2Co_2Ca_1$	26.8 ± 0.4	13.9 ± 0.7
$P_2Co_2Ca_2$	28.1 ± 1.6	12.2 ± 0.5
$P_2Co_2Ca_3$	30.6 ± 0.7	15.8 ± 0.6
$P_2Co_2Ca_4$	31.5 ± 0.5	15.0 ± 1.1
$P_2Co_2Ca_5$	33.1 ± 0.1	14.4 ± 0.3
$P_2Co_2Si_1$	29.3 ± 0.5	20.2 ± 1.2
$P_2Co_2Si_2$	33.7 ± 0.8	22.3 ± 0.9
$P_2Co_2Si_3$	41.9 ± 1.7	23.8 ± 0.4
$P_2Co_2Si_4$	45.7 ± 2.2	24.8 ± 0.8
$P_2Co_2Si_5$	48.1 ± 0.8	23.3 ± 0.2

หมายเหตุ : ในตารางแสดง ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ค

แบบสอบถามงานวิจัย

แบบสอบถามความพึงพอใจ

ข้อมูลประกอบการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การใช้อย่างคอมพิวเตอร์ทำแบบพิมพ์สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
 กำชี้แจง : ให้ผู้ทดลองใช้อย่างคอมพิวเตอร์ขีดเครื่องหมาย ✓ ในช่องที่ท่านพึงพอใจมากที่สุด

สูตรยงที่ใช้ทดสอบ_-----

ตอนที่ 1 ลักษณะทางกายภาพ ความพึงพอใจก่อนการใช้งาน	พอใจ มาก	พอใจ	เฉยๆ	ปรับ ปรุง	ไม่พอใจ
1. ความละเอียดของเนื้องานก่อนอัดขึ้นรูป					
2. ความยืดหยุ่นของเนื้องานก่อนอัดขึ้นรูป					
3. ความแข็งของเนื้องานก่อนอัดขึ้นรูป					
4. สีของยางคอมพิวเตอร์					
5. กลิ่นของยางคอมพิวเตอร์					

โดยที่ พอใจมากแทน : 4 คะแนน พอใจแทน : 3 คะแนน, เฉยๆแทน : 2 คะแนน, ปรับปรุงแทน : 1 คะแนน, ไม่พอใจ : ไม่น่าจะแนะนำคิด

ตอนที่ 2 ประสิทธิภาพในการใช้งาน	พอใจ มาก	พอใจ	เฉยๆ	ปรับ ปรุง	ไม่พอใจ
1. กลิ่นของยางขณะเปิดออกจากเป่าพิมพ์					
2. ครื่นของยางขณะเปิดออกจากเป่าพิมพ์					
3. ยางเหนียวติดเป่าพิมพ์					
4. ความละเอียดของเนื้องานในขณะกรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออก					
5. ความยืดหยุ่นของเนื้องานในขณะกรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออก					
6. ความแข็งของเนื้องานขณะกรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออก					
7. ความสามารถในการยึดเหนี่ยวของเนื้องานขณะกรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออก					
8. ความสามารถในการขาดของเนื้องานขณะกรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออก					
9. กลิ่นของยางขณะกรี๊ดเอาต้นแบบโลหะออก					
10. สีของเนื้องานที่สัมผัสกับโลหะต้นแบบ					
11. สีของโลหะต้นแบบ					

โดยที่ พอใจมากแทน : 4 คะแนน พอใจแทน : 3 คะแนน, เฉยๆแทน : 2 คะแนน, ปรับปรุงแทน : 1 คะแนน, ไม่พอใจ : ไม่น่าจะแนะนำคิด

ตอนที่ 3 ความพึงพอใจโดยรวม	เป็นไปได้ อย่างยิ่ง	เป็นไปได้	เป็นไปได้ ต้อง ปรับปรุง	เป็นไปได้ ไม่ได้	ไม่พอใจ
1. ความเป็นไปได้ในการใช้อย่างคอมพิวเตอร์ชนิดนี้ในอุตสาหกรรมจริง					

โดยที่ เป็นไปได้อย่างยิ่งแทน : 4 คะแนน เป็นไปได้แทน : 3 คะแนน, เป็นไปได้น้อยต้องปรับปรุงแทน : 2 คะแนน, เป็นไปไม่ได้แทน : 1 คะแนน, ไม่พอใจ : ไม่น่าจะแนะนำคิด

ท่านคิดว่าควรมีการปรับปรุงยางคอมพิวเตอร์ชนิดนี้อย่างไรบ้าง-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 สรุปคะแนนแบบสอบถาม

แบบสอบถาม	สูตร (คะแนน)										
	คะแนนเต็ม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ตอนที่ 1 ลักษณะทาง กายภาพ ความพึง พอใจก่อนการใช้ งาน	20	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
ตอนที่ 2 ประสิทธิภาพใน การใช้งาน	60	20	22	28	33	37	25	21	23	24	23
ตอนที่ 3 ความพึงพอใจ โดยรวม	4	2	2	3	3	3	2	2	2	1	1
ผลรวม	84	39	41	48	53	57	44	40	42	42	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การคำนวณสูตร

การคำนวณค่าความหนืดตามสมการของกัทซ์-โกลด์ (Guth-Gold Equation)

$$\eta_r = \eta_u(1+1.25\phi+14.1\phi^2)$$

เมื่อ η_r คือ ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filled compound)

η_u คือ ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (Unfilled compound)

ϕ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง (Volume fraction of filler)

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนืดตามสมการของกัทซ์-โกลด์

เมื่อ ปริมาณของสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในยางคอมพาวด์สูตร P2Co2Ca1 10 กรัม
ในยาง 100 กรัม (100 phr)

ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (η_u) = 22.7 (ML 1+4 (100°C))

สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติม จาก $\rho = m/V$ g/cm^3

$$V = m/\rho \quad \text{g}/(\text{g/cm}^3)$$

$$= 10/2.7 = 3.70 \quad \text{cm}^3$$

สัดส่วนโดยปริมาตรของยาง จาก $\rho = m/V$ g/cm^3

$$V = m/\rho \quad \text{g}/(\text{g/cm}^3)$$

$$= 100/0.9 = 111.11 \quad \text{cm}^3$$

สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง = $3.70 / (3.70 + 111.11)$

$$= 0.03$$

$$\eta_r = \eta_u(1+1.25\phi+14.1\phi^2)$$

$$= 22.7(1+1.25(0.03)+14.1(0.03)^2)$$

$$= 23.84$$

ดังนั้น ความหนืดของยางผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr มีค่าเท่ากับ 23.34 (ML 1+4 (100°C))

ภาคผนวก จ

นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย [6, 7, 13]

1. ยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) หมายถึง ยางดิบที่ผสมสารเติมแต่ง (Additive) ต่างๆ เช่น สารเชื่อมโยง สารเสริมการเชื่อมโยง สารตัวเติม ฯลฯ
2. การเชื่อมโยงยาง (Rubber Vulcanization) หมายถึง กระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ บางครั้งอาจเรียกว่าการทำให้ยางสุก (Curing) หรือทำให้ยางคงรูป
3. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) หมายถึง สารที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง
4. สารเสริมการเชื่อมโยง (Co-agent, Co-curing agent) หมายถึง สารที่ทำหน้าที่เพิ่มอัตราเร็วและเสริมประสิทธิภาพร่วมในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง
5. สารตัวเติม (Filler) หมายถึง สารเคมีที่ใส่ลงในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของยาง (Property Enhancement) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น
6. ยางแท่ง (Block rubber) หมายถึง ผลิตภัณฑ์จากน้ำยางสด และยางแห้งที่จับตัวแล้ว ตัดย่อยก้อนยางให้เป็นเม็ดเล็กๆ ล้างยางด้วยน้ำสะอาด อบให้แห้งแล้ว ปล่อยให้เย็นตัว จึงอัดให้เป็นก้อนหรือแท่งสี่เหลี่ยมหน้าหนาแท่งละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 33 x 670 x 170 มิลลิเมตร โดยมีการควบคุมคุณภาพ
7. การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set) หมายถึง ความสามารถในการคืนตัวของยางหลังจากถูกอัดไว้ตามระยะเวลาและสภาวะที่กำหนด โดยทั่วไปการรายงานค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดจะรายงานในหน่วยร้อยละซึ่งบอกให้ทราบถึงปริมาณร้อยละซึ่งขึ้นทดสอบยางขนาดมาตรฐานไม่สามารถคืนสู่รูปเดิม (ความหนา) หลังปล่อยจากแรงอัด
8. phr (part per hundred of rubber) หมายถึง ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน

ประวัติ

นางสาวสุกัญญา โครตมา เกิดเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม 2523 ที่จังหวัดชัยภูมิ

การศึกษา สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ-สวนดุสิต ปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต เมื่อปีการศึกษา 2550 สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การทำงาน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ปฏิบัติการ กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้