



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเตรียมยางธรรมชาติเหลวและการนำไปใช้

Preparation of Liquid natural Rubber and its applications

โดย พศ. ดร. ชลดา เสวิธ และคณะ

พฤษภาคม 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การเตรียมยางธรรมชาติเหลวและการนำไปใช้

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ผศ. ดร. ชลดา	เลวิส คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
นางสาวศุภรัตน์	หนูมา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
นางสาววิรัชลักษณ์	พัทบุรี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

กลุ่มโครงการวิจัยขนาดเล็กวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ-มอ.(7)

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุยางในการเตรียมอุปกรณ์สื่อสารการสอนทางการแพทย์ เช่น หุ่นคนหรือผู้ป่วย อวัยวะเทียมต่างๆ เพื่อใช้เป็นหุ่นในการฝึกนักศึกษาผู้ป่วยของนักศึกษาแพทย์ พยาบาล เช่น การฝึกหัดฉีดยา การเย็บแผล การสวนปัสสาวะ และ การปั๊มหัวใจ เป็นต้น ซึ่งวัสดุยางที่ใช้มักจะเป็นยางซิลิโคนเหลวซึ่ง เป็นยางสังเคราะห์ที่มีความนิ่ม ไม่เหนียวจนเกินไป หล่อให้เป็นอวัยวะรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย แต่เป็นวัสดุที่มี ราคาแพง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการนำยางธรรมชาติเหลวซึ่งมีราคาถูกและเป็นวัตถุดิบใน ประเทศ มาใช้ทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่น่าจะดีที่สุดงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลว จากยางแห้งและน้ำยางข้น และการเตรียมน้ำยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เพื่อนำไปทำผิวหนังเทียม ที่ใช้เพื่อใช้ในการสอนทางการแพทย์ การวิจัยพบว่า การเตรียมยางเหลวจากยางแห้งใช้วิธีทางกลและ วิธีทางความร้อน ร่วมกับการใช้สารเคมีช่วยตัดสายโมเลกุลของยาง พบว่าต้องใช้ความร้อนสปีนเคิลเพื่อช่วย ให้อย่างเหลวคอมปาวด์หล่อบนแผ่นกระจก การวัดคาไรซ์ยางใช้เวลานาน และยางยังคงมีลักษณะเหนียว เย็นไม่เหมาะต่อการทำผิวหนังเทียม การเตรียมยางเหลวจากน้ำยางธรรมชาติ ทำโดยการทำปฏิกิริยากับ ฟีนิลไฮโดรควิโนนในระบบที่มีออกซิเจน แยกยางเหลวออกมา เมื่อใช้ 10% ฟีนิลไฮโดรควิโนน 30 กรัม ต่อน้ำ ยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง ยางมีน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืด 39,900 และความหนืด 390,000 cP คอมปาวด์ยางเหลวที่ได้กับสารเติมแต่งยางในถังผสม ยางเหลวคอมปาวด์มีความหนืด 67,040 cP นำ มาหล่อเป็นมือด้วยเบ้าปูนปาสเตอร์ พบว่ายางหลังการวัดคาไรซ์มีความทนแรงดึง ความต้านทานต่อการ ฉีกขาด และความแข็งต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง การเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทำ โดยการนำน้ำยางข้นมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 50-55°C เมื่อนำน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยความหนืดประมาณ 68,000 ผสม กับสารเติมแต่งยาง พบว่าสามารถออกสูตรยางให้ได้แผ่นยางวัดคาไรซ์ที่มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม กับการใช้งานนำไปกรีดและเย็บได้ รวมทั้งสามารถหล่อผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมได้ด้วยเบ้าปูนปาสเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนในการวิจัย และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายเทคนิคประจำภาควิชากายวิภาค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวจากยางแห้งและน้ำยางข้น และการเตรียมน้ำยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เพื่อนำไปทำผิวหนังเทียมที่ใช้เป็นสื่อการสอนทางการแพทย์

การเตรียมยางเหลวจากยางแห้งใช้วิธีการดีพอลิเมอร์ไรซ์โมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยวิธีทางกลและวิธีทางความร้อน ร่วมกับการใช้สารเคมีช่วยตัดสายโมเลกุลของยาง ศึกษาผลของเวลาที่บดยางด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง และอุณหภูมิและเวลาที่ให้ความร้อนกับยาง ต่อความหนืดของน้ำยางและน้ำหนักโมเลกุลพบว่ายางที่บดเป็นเวลา 30 นาที แล้วให้ความร้อนที่ 210°C เป็นเวลา 10 นาที และผสมกับน้ำมันสปีนเดิล 300 phr สามารถหล่อบนแผ่นกระจกที่อุณหภูมิห้องได้ ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์มีค่าประมาณ 155,000-350,000 cP หลังการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่ายางที่ได้มีลักษณะเหนียวเยิ้ม

การเตรียมยางเหลวจากน้ำยางธรรมชาติ ทำได้โดยการทำปฏิกิริยากับฟีนิลไฮโดรราซีนในระบบที่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ $50-55^{\circ}\text{C}$ แยกยางเหลวออกมา แล้วทำให้แห้งด้วยอากาศร้อน พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติขึ้นกับปริมาณฟีนิลไฮโดรราซีนและเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่อควบคุมอุณหภูมิและมีออกซิเจนมากเกินไป เมื่อใช้ 10% ฟีนิลไฮโดรราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง ยางมีน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืด 39,900 และความหนืด 390,000 cP คอมปาวด์ยางเหลวที่ได้กับสารเติมแต่งยางในถังผสม ยางเหลวคอมปาวด์มีความหนืด 67,040 cP นำมาหล่อเป็นมือด้วยเบ้าปูนปาสเตอร์ พบว่ายางหลังการวัลคาไนซ์มีความทนแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็งต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง แต่มีความสามารถยืดจนขาดใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์

การเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยการนำน้ำยางข้นมาทำปฏิกิริยากับ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ $50-55^{\circ}\text{C}$ ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อน้ำหนักโมเลกุลของยาง ทำการผสมน้ำยางกับสารเติมแต่งยางที่ปริมาณต่างๆ พบว่ายางที่ใช้ซึ่งคือออกไซด์ 5 phr, แคลเซียมคาร์บอเนต 20 phr และน้ำมันสปีนเดิล 7.5 phr ให้แผ่นยางมีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน การหล่อผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมด้วยเบ้าปูนปาสเตอร์ ได้ยางที่มีสมบัติดีกว่าการจุ่มแบบ heat sensitive ระบบ zinc amine

Abstract

This study involved preparation of liquid natural rubber and low molecular weight natural rubber latex for artificial arm skin in medical practice.

The liquid natural rubber was prepared by mechanical and thermal depolymerization method accompany with a chemical peptizer. The effect of masticating times by two roll mill and pyrolysis temperatures and times in a hot air oven on mooney viscosity and molecular weight ($\overline{M}_v$) were investigated. It was found that the liquid natural rubber masticated for 30 minutes further heating at 210°C for 10 minutes mixed with 300 phr spindle oil was able to cast in a glass sheeted mold at room temperature. The viscosity of the liquid rubber compound was about 155,000-350,000 cP. After vulcanizing at 100°C for 48 hours, the sticky uncure compound was observed.

The liquid natural rubber latex was prepared by oxidative degradation using the phenylhydrazine/oxygen system at $50\text{-}55^{\circ}\text{C}$. The resulting latex was coagulated followed by dried up with hot air oven. It was found that molecular weight of natural rubber was dependent on amount of phenylhydrazine and reaction time at a controlled temperature and excess oxygen. At 30 g of 10% phenylhydrazine per 100 g of latex and 9 hours reaction time, the molecular weight and viscosity of liquid natural rubber were 39,900 and 390,000 cP respectively. The resultant liquid natural rubber and rubber additives were compounded in a mixing tank. A compounded liquid rubber with viscosity of 67,040 cP was used for casting on a plaster hand mold. It was found that the resultant rubber vulcanized showed low tensile strength, tear resistant and hardness, but good elongation at break compared with the commercial artificial arm skin.

Preparation of low molecular weight natural rubber latex was also studied by reacting with hydrogen peroxide and potassium peroxide at $50\text{-}55^{\circ}\text{C}$. The effect of reaction times on molecular weight was investigated. The resultant latex was compounded with varied rubber additives. It was found that the rubber vulcanized sheets with 5 phr ZnO, 20 phr CaCO_3 and 7.5 phr spindle oil showed good physical properties for this application. Casting of latex compounded on plaster hand mold showed better appearance than dipping with heat sensitive zinc ammine system.

Keywords : liquid natural rubber, low molecular weight natural rubber, artificial skin

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	a
กิตติกรรมประกาศ	b
บทคัดย่อ	c-d
สารบัญ	e-g
สารบัญตาราง	h-k
สารบัญรูป	l-p
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎี	3
2.1.1 สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	3
2.1.2 การลดน้ำหนักโมเลกุลในยางธรรมชาติ	3
2.1.3 การเตรียมยางธรรมชาติเหลวโดยวิธีทางเคมี	6
2.1.4 ประโยชน์ของยางธรรมชาติเหลว	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1 สารเคมี	14
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	17
3.3 วิธีการทดลอง	
3.3.1 การลดน้ำหนักโมเลกุลยางโดยการบดขยี้ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง	18
3.3.2 การหาความหนืดของยางด้วยเครื่อง Mooney Viscometer	19
3.3.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยวิธีวัดความหนืดของสารละลายยาง	20
3.3.4 การคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ	22
3.3.5 การเตรียมยางเหลวจากยางแท่ง STR 5L	
และการคอมปาวด์ยางกับสารเคมี	23

3.3.6 การเตรียมยางเหลวจากน้ำยางข้น	26
3.3.7 การคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น	27
3.3.8 การเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	30
3.3.9 การคอมปาวด์น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสมบัติของยางวัลคาไนซ์	33
3.4 การทดสอบสมบัติของยางหลังการวัลคาไนซ์	38
3.4.1 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง	38
3.4.2 การทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน	38
3.4.3 การทดสอบความต้านทานต่อการขีดข่วน	39
3.4.4 การวัดความแข็งของยางแบบ IRHD	39
3.5 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียม	40
3.5 .1 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมจากยางเหลว	40
3.5 .2 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมจากน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	42
3.5.2.1 ศึกษาการหล่อน้ำยางโดยใช้น้ำยางที่พรีวัลคาไนซ์	42
3.5.2 .2 ศึกษาการหล่อน้ำยางโดยวิธี heat sensitive	
ระบบ Zinc ammine complex	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 การลดน้ำหนักโมเลกุลยางแท่ง STR 5L โดยการบดยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง	44
4.1.1 ความหนืดมูนนีและน้ำหนักโมเลกุลของยางภายหลังการบด	44
4.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของยางที่ผ่านการให้ความร้อน	
เพื่อนำไปใช้เตรียมยางเหลวคอมปาวด์จากยางแท่ง	47
4.2 การคอมปาวด์ยางเหลวจากยางแท่ง	55
4.2.1 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L	
เพื่อนำไปใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียม	55
4.2.2 การเตรียมแผ่นยางเหลวจากยางแท่ง STR 5L และการวัลคาไนซ์	
ยางเหลว เพื่อนำไปใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียม	60
4.3 ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวจากน้ำยางข้นและสมบัติทางกายภาพ	
ของแผ่นยางเหลวหลังการวัลคาไนซ์	62
4.4 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางเหลวกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	82
4. 5 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมจากยางเหลวคอมปาวด์โดยการหล่อจากแบบพิมพ์	86
4.6 การเตรียมและสมบัติของ น้ำยางธรรมชาติน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	88

4.6.1 การลดน้ำหนักโมเลกุลน้ำยางขึ้น โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	88
4.6.2 การเปลี่ยนแปลง ค่า pH และ ความหนืดของน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำคอมปาวด์ ที่ระยะเวลาใน การเก็บรักษาต่างๆ	89
4.6.3 การผสมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับสารเคมีและการวัลคาไนซ์	90
4.6.4 ผลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยาลดน้ำหนักโมเลกุลน้ำยางต่อ สมบัติการทนทานแรงดึงของ แผ่นยางวัลคาไนซ์	91
4.6.5 การออกสูตรน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และ สมบัติของยางวัลคาไนซ์	93
4.7 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียม	109
4.7.1 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีการจุ่มน้ำยางแบบ Heat sensitive ระบบ Zinc ammine	109
4.7.2 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยวิธีการหล่อด้วยเบ้าปูนพลาสติก	111
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	113
5.2 ข้อเสนอแนะ	116
เอกสารอ้างอิง	117

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลของปริมาณฟีนิลไฮดราซีนต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติเหลว	8
3.1 สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่า Relative, Specific และ Inherent viscosities	22
3.2 สูตรยางที่ใช้ในการเตรียมยางเหลวคอมปาวด์จากยาง STR5L	23
3.3 การคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ Silica, China Clay เป็นสารตัวเติมและไม่ใช้สารตัวเติม	28
3.4 การคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ปริมาณของสารตัวเติม คือ ซิลิกาที่แตกต่างกัน คือ 5, 10 และ 20 phr	29
3.5 ค่าคงที่ตัวคูณ เพื่อให้ได้ความหนืดของของเหลว	32
3.6 ลักษณะต่างๆ ของยางที่ระดับการวัลคาไนซ์ต่างกัน	32
3.7 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรระยะเวลาทำปฏิกิริยา	35
3.8 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรปริมาณ ZnO	36
3.9 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรปริมาณ CaCO_3	37
3.10 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรปริมาณ น้ำมันสปีนเดิล	37
4.1 ความหนืดมูนิและน้ำหนักโมเลกุลของยางภายหลังการบด	44
4.2 ค่า Intrinsic Viscosity ($[\eta]$) และน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดของยาง STR 5L ที่บดที่เวลาต่างๆ โดยไม่ใช้ peptizer และใช้ MBTS และ plast 8 เป็น peptizer	45
4.3 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยางที่เติม MBTS และทำการบดด้วยเวลา 20 , 30 นาที โดยนำไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ	47
4.4 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที	49
4.5 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+MBTS ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที	50
4.6 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+PLast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที	52
4.7 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L, STR 5L+MBTS, STR 5L+Plast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยใช้เวลาในการอบ 10 นาที	53
4.8 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L (ที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน)	55

4.9 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L+MBTS	56
4.10 เปรียบเทียบความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L และ STR 5L+MBTS	57
4.11 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งที่บดยาง 30 นาทีก่อนทำการคอมปาวด์ ทั้งชนิดที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C 10 นาที และไม่ได้ให้ความร้อน	58
4.12 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางเหลวที่เตรียมโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง	62
4.13 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น (ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง) เมื่อใช้เคลย์และซิลิกาเป็นสารตัวเติม	63
4.14 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น (ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง) หลังการวัลคาไนซ์ (อบที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง)	64
4.15 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของ LNR ที่เตรียมโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50-55°C ที่เวลาต่างๆ กัน	64
4.16 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่ 50-55 °C เป็นเวลา 9 และ 12 ชั่วโมง	65
4.17 %Modulus ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	66
4.18 ความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	67
4.19 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	68
4.20 ความยืดจนขาด (Elongation at break) ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	70
4.21 ความทนแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	71
4.22 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	72

4.23 เปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม และ 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 12 และ 9 ชั่วโมง	74
4.24 ความหนืดของยางเหลวและยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม และ 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม	75
4.25 %Modulus ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิล ไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	76
4.26 ความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัมทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	76
4.27 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C	77
4.28 ความสามารถยืดจนขาด ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C	78
4.29 ความทนแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C	80
4.30 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิล ไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C	81
4.31 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	82
4.32 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยางที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ	88
4.33 ค่า pH และความหนืดของ น้ำยางนำหนักโมเลกุลต่ำและน้ำยางนำหนักโมเลกุลต่ำ คอมปาวด์ ตามระยะเวลาการเก็บ	89
4.34 เวลาที่อบแผ่นยางสุกที่อุณหภูมิต่างๆ	90
4.35 สมบัติด้านการทนต่อแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่างๆ	93
4.36 Tensile strength ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ หลังบ่มเร่ง ที่ 70 °C เป็นเวลา 7วัน	96
4.37 ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความแข็ง ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณZnO ต่างๆ	97

4.38 สมบัติด้านการทนต่อแรงดึงขนาดของแผ่นยางวัลคาไนซ์เตรียมจาก น้ำยางลดน้ำหนักโมเลกุลที่ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ	99
4.39 Tensile strength ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ หลัง บ่มแรงที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน	101
4.40 ความต้านทานต่อการฉีกขาด ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ	102
4.41 สมบัติด้านการทนต่อแรงดึงขนาดของแผ่นยางวัลคาไนซ์เตรียมจาก น้ำยางลดน้ำหนักโมเลกุลที่ ปริมาณน้ำมันสปีนเคิล ต่างๆ	104
4.42 Tensile strength ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณน้ำมันสปีนเคิลต่างๆ หลัง บ่มแรงที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน	106
4.43 ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความแข็ง ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณน้ำมันสปีนเคิลต่างๆ	107
4.44 ผลการขึ้นรูปด้วยการจุ่มน้ำยางแบบ Heat sensitive ระบบ Zinc ammine ต่อความหนาของยางที่ได้	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการบดยางในบรรยากาศออกซิเจนและก๊าซเฉื่อย	4
2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	5
2.3 กลไกการตัดสายโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยหมู่ฟีนิลไฮดราซีนและออกซิเจน	7
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีน 12×10^{-4} โมล / กรัมของเนื้อยางแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส	8
3.1 การบดยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง	19
3.2 เครื่องวัดความหนืดนัมของยาง (Mooney Viscometer)	20
3.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยวิธีวัดความหนืดของสารละลายยาง	21
3.4 การผสมยางกับสารเคมีด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง	24
3.5 ลักษณะของยางเหลวเมื่อเริ่มผสมกับน้ำมันสปินเดิล	24
3.6 ลักษณะของยางเหลวเมื่อผสมกับน้ำมันสปินเดิล 300 phr	25
3.7 การหล่อยางเหลวบนแผ่นกระจก	25
3.8 การเตรียมน้ำยางเหลวจากน้ำยางข้น	27
3.9 การคอมปาวด์ยางเหลวโดยการกวนด้วยใบพัด	28
3.10 ลักษณะของยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น แล้วหล่อบนแผ่นกระจก และนำไปอบจนสุกแล้ว	29
3.11 การเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	30
3.12 ชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์ ตาม ASTM D416	39
3.13 ชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดตาม ASTM D624-91	39
3.14 ยางเหลวคอมปาวด์	40
3.15 แบบพิมพ์มือเทียม	40
3.16 แบบพิมพ์มือเทียมที่เทยางเหลวคอมปาวด์ลงไปแล้ว	41
3.17 แบบพิมพ์มือเทียมที่ใส่ยางคอมปาวด์ลงไปเพื่อนำไปอบวัลคาไนซ์	41
3.18 ผลึกภัณฑ์มือเทียมหลังจากนำไปอบเพื่อวัลคาไนซ์ที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง	42
3.19 เบ้ามือที่ใช้ในการจุ่มน้ำยางคอมปาวด์	43
3.20 ผลึกภัณฑ์ตัวอย่างทางการค้า	43

4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของยางและเวลาที่บดยาง	45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของยางและเวลาที่บดยาง	46
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของยางและอุณหภูมิที่อบยาง	48
4.4	น้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L อบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที	49
4.5	น้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+MBTS ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที	51
4.6	น้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+Plast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที	52
4.7	ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L, STR 5L+MBTS, STR 5L+Plast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยใช้เวลาในการอบ 10 นาที	54
4.8	ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L โดยบดยางก่อนคอมปาวด์ ที่เวลาต่างกัน	55
4.9	ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L+MBTS โดยบดยางก่อนที่เวลาต่างกัน	56
4.10	ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L, STR 5L+MBTS โดยบดยางก่อนที่เวลาต่างกัน และวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer	57
4.11	ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งที่บดยาง 30 นาที ก่อนทำการคอมปาวด์ทั้งชนิดที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C 10 นาที และไม่ได้ให้ความร้อน	59
4.12	ยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง หลังการอบที่ 100°C 48 ชั่วโมง	60
4.13	ยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งโดยใช้น้ำมันสปีนเดิล 200 phr และสารตัวเติม 75 phr หลังจากอบที่ 100°C 48 ชั่วโมง	61
4.14	ลักษณะของยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น	62
4.15	ลักษณะของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น หลังการอบที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง	63
4.16	300%Modulus ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 10 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	66
4.17	ความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 10 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	68
4.18	ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 10 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	69

4.19 Elongation @ break ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 10 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	70
4.20 เปอร์เซ็นการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 10 phr หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน	72
4.21 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 10 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	73
4.22 ความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	77
4.23 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน 5 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	78
4.24 Elongation at break ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	79
4.25 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน	80
4.26 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C	81
4.27 สมบัติด้านความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นหลังการวัลคาไนซ์ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	83
4.28 สมบัติด้านความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมยางเหลวจากน้ำยางข้น หลังการวัลคาไนซ์เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	84
4.29 Elongation at break ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมยางเหลวจากน้ำยางข้นหลังการวัลคาไนซ์เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	85
4.30 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมยางเหลวจากน้ำยางข้นหลังการวัลคาไนซ์เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	85
4.31 ผลิตภัณฑ์มือเทียมที่ได้จากการหล่อเบ้า	86
4.32 แผ่นยางวัลคาไนซ์อบที่ 70 °C	91
4.33 แผ่นยางวัลคาไนซ์อบที่ 100 °C	91
4.34 300 % Modulusของแผ่นยางเตรียมจากน้ำยางคอมปาวด์ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ	

เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	92
4.35 ความทนทานต่อแรงดึงจนขาดของแผ่นยางวัลคาไนซ์เตรียมจากน้ำยางลดน้ำหนักโมเลกุลที่ ระยะเวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	92
4.36 % Modulus ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ เปรียบเทียบกับ ผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	94
4.37 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจนขาด ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	95
4.38 Elongation at break ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	95
4.39 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ	96
4.40 ความต้านทานต่อการฉีกขาด ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	97
4.41 ค่าความแข็ง (shore A) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ ZnO ต่างๆ	98
4.42 % Modulus ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ แคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	99
4.43 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจนขาด ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	100
4.44 Elongation at break ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	100
4.45 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ	101
4.46 ความต้านทานต่อการฉีกขาด ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	102
4.47 ค่าความแข็ง (shore A) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ CaCO_3 ต่างๆ	103
4.48 % Modulus ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ น้ำมันสปีนเดิลต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	104
4.49 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ น้ำมันสปีนเดิล ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	105
4.50 Elongation at break ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณ น้ำมันสปีนเดิล ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	105

4.51	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อแรงดึงของแผ่นยางวัลคาไนซ์ ที่ปริมาณน้ำมันสปีนเคิลต่างๆ	107
4.52	ความต้านทานต่อการฉีกขาด ของแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ปริมาณน้ำมันสปีนเคิล ต่างๆ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	108
4.53	ค่าความแข็ง (shore A) ของแผ่นยางวัลคาไนซ์เตรียมจากสูตรน้ำยางคอมปาวด์ แปรปริมาณน้ำมันสปีนเคิล	108
4.54	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจุ่ม	110
4.55	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหล่อด้วยเบ้าปูนพลาสติกอร์	111

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ยางเหลวมียุหลายชนิด ทั้งที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ วิธีการเตรียมก็เช่นเดียวกันสามารถเตรียมได้หลายวิธี ยางธรรมชาติเหลวสามารถเตรียมได้ 2 วิธีหลักคือการเตรียมโดยวิธีทางเคมี และวิธีทางเชิงกล การใช้งานหลากหลาย เช่น plasticizer อุตสาหกรรมสี กาว ยางกันกระแทก ทำแบบพิมพ์ ทำยางอีโพนันต์ เป็นต้น (1-5) ปัจจุบันมีการใช้วัสดุยางในการเตรียมอุปกรณ์สื่อการสอนทางการแพทย์ เช่น หุ่นคนหรือผู้ป่วย อวัยวะเทียมต่างๆ เพื่อใช้เป็นหุ่นในการฝึกนักศึกษาผู้ป่วยของนักศึกษาแพทย์ พยาบาล เช่น การฝึกหัดฉีดยา การเย็บแผล การสวนปัสสาวะ และ การปั๊มหัวใจ เป็นต้น ซึ่งวัสดุยางที่ใช้มักจะเป็นยางซิลิโคนเหลวซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีความนิ่ม ไม่เหนียวจนเกินไป (6,7) หล่อให้เป็นอวัยวะรูปร่างต่างๆได้ง่าย แต่เป็นวัสดุที่มีราคาแพง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการนำยางธรรมชาติเหลวซึ่งมีราคาถูกและเป็นวัตถุดิบในประเทศ มาใช้ทดแทนจึงเป็นทางเลือกที่น่าจะดีที่สุด ความพยายามที่จะนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นอวัยวะเทียมได้มีมาก่อนหน้านี้แล้ว (8-10) สำหรับผิวหนังแขนเทียมหรือผิวหนังแขนเทียมที่ใช้เป็นสื่อการสอนฝึกหัดฉีดยาหรือเย็บแผล หรืออวัยวะเทียมสื่อการสอนได้มีการวิจัยมาบ้างแล้วแต่เป็นการเตรียมในรูปฟองน้ำ (11) ซึ่งยังมีข้อด้อยในส่วนของผิวที่มีลักษณะและสมบัติแต่ยังไม่ใกล้เคียงกับผิวหนังจริง การฉีดยา การฝึกกรีด การเย็บ อาจจะทำให้ความรู้สึกที่แตกต่าง งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำยางธรรมชาติเหลวมาใช้ประโยชน์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สื่อการสอนทางการแพทย์ และเป็นแนวทางในการทำผลิตภัณฑ์หล่อชนิดอื่นๆ และผลิตภัณฑ์กาว หรือสารช่วยยึดติดประสานต่อไป โดยการวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการทำอวัยวะผิวหนังแขนเทียมก่อน ซึ่งคาดว่าจะได้ผิวหนังแขนเทียมที่มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมจะนำไปใช้ในการประกอบการเรียนการสอนได้ โดยจะต้องมีความนิ่มซึ่งสามารถใช้เข็มฉีดยาเจาะเข้าไปได้ หรือสามารถใช้มีดกรีดได้ใกล้เคียงกับผิวหนังของคนเราจริงๆ ซึ่งจะเป็นการช่วยให้ยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมยางธรรมชาติเหลวและนำยางนำหนักโมเลกุลต่ำและทดสอบสมบัติเพื่อนำไปใช้งานหล่ออวัยวะเทียมสื่อช่วยสอนทางการแพทย์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการเตรียมยางเหลวจากยางแห้งและน้ำยาง และวิธีการเตรียมน้ำยางธรรมชาติน้ำหนักรีดน้ำหนักรีดที่ เหมาะสมในการนำไปทำอวัยวะผิวหนังเทียม
2. ได้แนวทางในการวิจัยและพัฒนาการทำอวัยวะเทียมต่างๆ และขยายต่อการทำกายและสารอวัยวะ ประสานต่อไป

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ลดน้ำหนักรีดน้ำหนักรีดของยางแห้ง (SRT 5L) โดยการบดด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง โดยใช้สารเคมี ช่วยตัดสายโมเลกุล รวมทั้งให้ความร้อนเพื่อกระตุ้นให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของยาง
2. เลือกยางที่บดในเวลาที่เหมาะสม และให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่เหมาะสม มาคอมปาวด์กับสารเติม แต่งยางต่างๆ ด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง เติมน้ำมัน สารตัวเติม ศึกษาสูตรต่างๆ ของยางเหลวที่เหมาะสมต่อ การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียม
3. เตรียมยางธรรมชาติเหลวจากน้ำยางข้น อบให้แห้ง คอมปาวด์กับสารเติมแต่งยางต่างๆ ศึกษา สูตรที่เหมาะสม
4. เตรียมน้ำยางน้ำหนักรีดน้ำหนักรีดและคอมปาวด์โดยศึกษาสูตรที่เหมาะสมที่สามารถนำไปผลิต ผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมให้มีสมบัติตามที่ต้องการ
5. ทดสอบสมบัติทางกายภาพ เพื่อให้ได้สูตรยางที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการผลิตอวัยวะผิวหนัง เทียม (เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในทางการค้า)

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยางธรรมชาติ

น้ำยางสดที่ได้จากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวมีสภาพเป็นคอลลอยด์ สมบัติโดยทั่วไปของน้ำยางสดจะมีความหนาแน่นประมาณ 0.975 – 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า pH ประมาณ 6.5 – 7.0 มีส่วนประกอบคือ [12]

ของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	27 – 48 %
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	25 – 45 %
สารพวกโปรตีน	1 – 1.5 %
สารพวกเรซิน	1 – 2.5 %
จีเอ็ม	สูงถึง 1 %
น้ำตาล	1 %
น้ำ	ส่วนที่เหลือจนครบ 100 %

อนุภาคของยางธรรมชาติที่แขวนลอยอยู่ในชั้นของน้ำ ชั้นในสุดเป็นเนื้อยาง (Rubber) ชั้นถัดมาเป็นฟอสโฟไลปิด (Phospholipid) ชั้นนอกสุดเป็นโปรตีน

การที่น้ำยางมีความเสถียรอยู่ได้ เนื่องจากมีสารที่เป็นโปรตีน หรือสบู่เกาะอยู่ที่ผิวยาง สารเหล่านี้มีประจุลบซึ่งจะผลัดกัน ป้องกันไม่ให้อนุภาคเม็ดยางเข้าใกล้กัน หรือมารวมกัน ค่าความเป็นประจุของโปรตีนจะขึ้นกับความเป็นกรดด่างของตัวกลาง โปรตีนจัดเป็นสารลดความตึงผิว (Surfactant) ชนิด Amphoteric stabiliser ซึ่งภายในโครงสร้างโมเลกุลมีทั้งประจุบวกและลบ ซึ่งสภาวะความเป็นกรด – ด่างที่มีประจุบวกและลบเท่ากันเรียก pH นี้ว่า “ Isoelectric point ”

2.1.2 การลดน้ำหนักโมเลกุลในยางธรรมชาติ

การลดน้ำหนักโมเลกุลหรือการดีโพลีเมอไรซ์ยางธรรมชาติ ที่มีการทำมาแล้วเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การทำยางเหลว ซึ่งจะมีค่าการติด (Adhesive) ที่สูงและมีความว่องไวต่อการเชื่อมโยง (Crosslinking) มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเช่น การทำกาวยาง (Pressure-sensitive adhesive) วัสดุกันรั่วซึม (Sealing material) ยางที่ใช้ในการประสาน และใช้เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ในการปรับปรุงการแปรรูปของยางแห้งในการทำรถยนต์

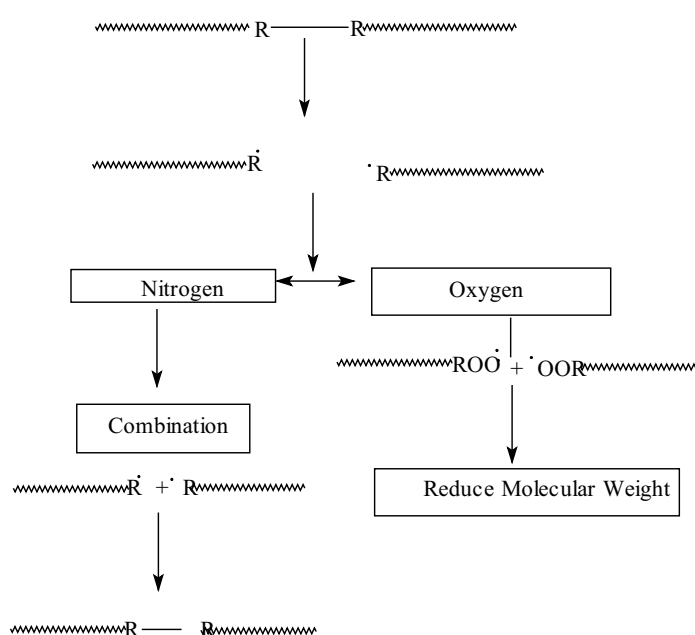
วิธีการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในรูปของยางแห้งหรือน้ำยาง โดยทั่วไปจะใช้สารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) และสารรีดิวซ์ (Reducing agent) สารที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์เป็นพวกอากาศ

ออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ส่วนสารที่ใช้เป็นตัวริ้วคือเป็นพวก Metal nitrite หรือ metal chlorite ซึ่งสารดังกล่าวนอกจากจะเหมาะสมกับยางธรรมชาติแล้วยังเหมาะสมกับน้ำยางอิมัลชันน้ำยางธรรมชาติอีกด้วย

ในการดีโพลีเมอไรซ์ยางธรรมชาติโดยทำในรูปของของเหลว พบว่า จะมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีหรือกลิ่นของยาง รวมทั้งลดการแพ้คันเป็นผลเนื่อง มาจากโปรตีน กระบวนการทำโดยใช้เติมสารประกอบคาร์บอนิล (Carbonyl compound) เพื่อให้เกิด air oxidation แล้วทำให้เกิดสารอนุมูล

โดยทั่วไปการดีโพลีเมอไรซ์ยางธรรมชาติ ทำได้หลายวิธี ดังนี้

(1) การบด (Mastication) เป็นวิธีการเร่งการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยการทำให้สายโซ่ของโมเลกุลยาง ด้วยวิธีทางกลและความร้อน ซึ่งจะใช้เครื่องผสมแบบเปิด (Mixing roller mill) หรือเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) เมื่อโมเลกุลของยางถูกบดโดยงานกลให้ขาดออก หากทำการบดในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยหรือบรรยากาศของไนโตรเจน อนุมูลที่เกิดขึ้นจะจับ ตัวกันใหม่ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลไม่ลดลง แต่ถ้าทำการบดในบรรยากาศของออกซิเจนหรือบดในอากาศ อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นอนุมูลเปอร์ออกซี และ cyclic diperoxide หรือ hydroperoxide ทำให้เกิดการตัดโมเลกุลของยางต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ทำให้ไม่สามารถต่อกันดังเดิมได้ ดังรูป 2.1 ดังนั้น การบดที่มีประสิทธิภาพจึงต้องทำในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่

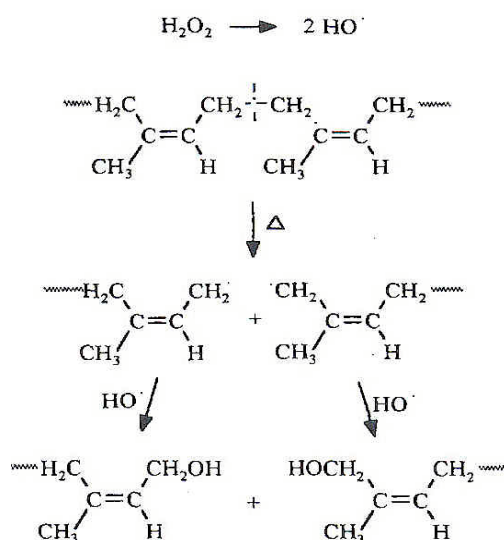


รูปที่ 2.1 กระบวนการบดยางในบรรยากาศออกซิเจนและก๊าซเฉื่อย

การเติมสารย่อยยาง เช่น สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือ ออร์แกนิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้งาสนิ่มขึ้น แม้จะเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย และยังช่วยลดระยะเวลาในการบด ดังนั้นจึงเรียกสารดัง

(3) **Photolysis** เป็นวิธีการทำลายสายโซ่โมเลกุลที่ใช้พลังงานต่ำ เช่น ใช้แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light) วิธีนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆกับการเสียไปของเปอร์ออกไซด์ หรือส่วนของคีโตนที่ปลายสายโซ่ ซึ่งผลจากการทำลายสายโซ่ มีผลทำให้เกิดการทำลายสายโซ่ได้อย่างสมบูรณ์ แต่การที่มีความว่องไวสูง ทำให้การควบคุมน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลยังทำได้ยาก

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวตัดสายโมเลกุลทำให้เกิดการ degradation ของยางธรรมชาติ โดยที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวเป็น hydroxyl radicals ซึ่ง radical นี้จะเข้า interaction กับ พันธะ C-H ได้หม่ปลายเป็น hydroxyl



รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในยางธรรมชาติโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.1.3 การเตรียมน้ำธรรมชาติเหลวโดยวิธีทางเคมี

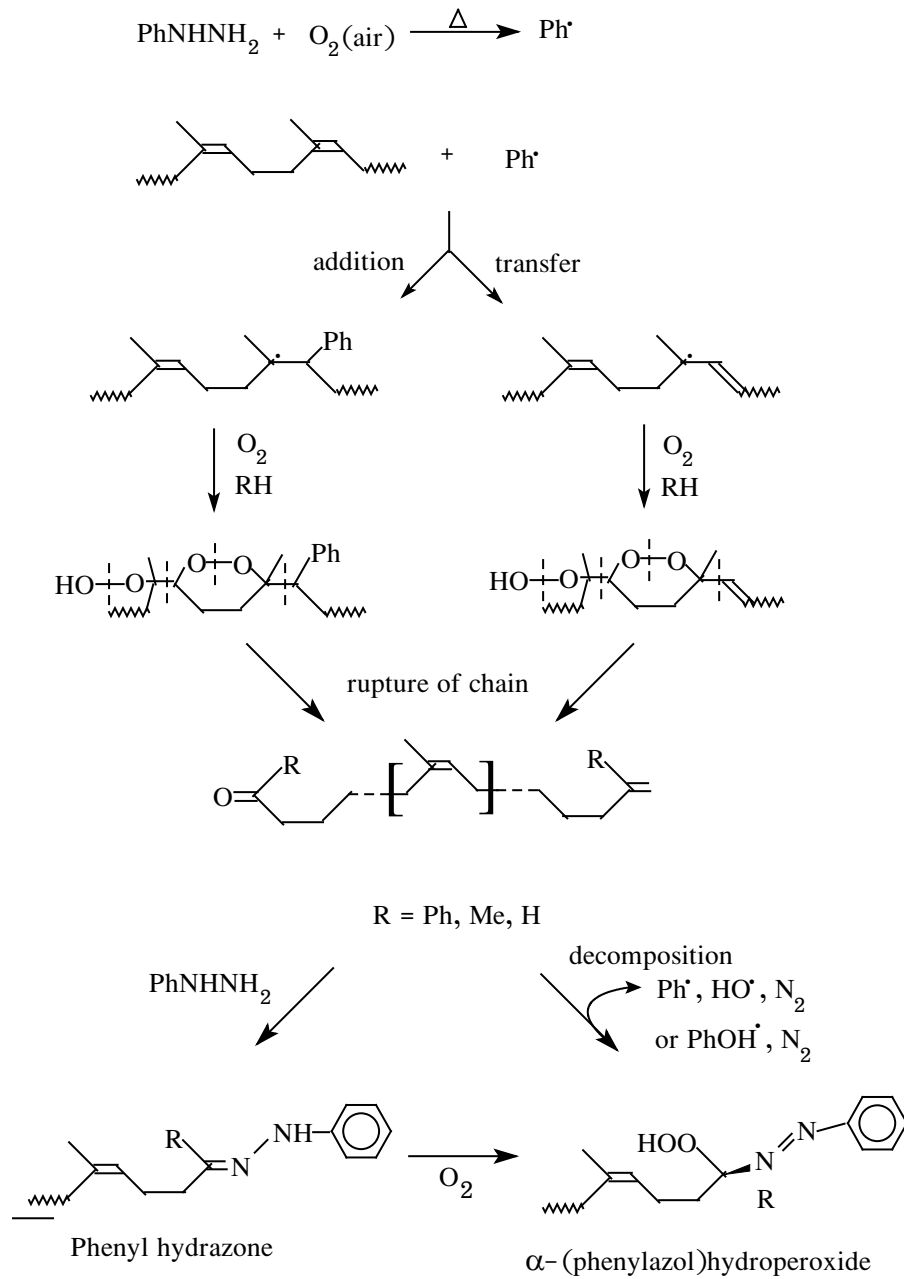
Pautrat และ Marteau แห่งสถาบันวิจัยทางฝรั่งเศสได้พัฒนาการทำน้ำเหลวขึ้นในปี 1974 [1]

ขั้นตอนการผลิตแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน

- (1) การทำให้น้ำยางเสถียร (stabilization) โดยการนำน้ำยางสดมารักษาสภาพด้วยแอมโมเนีย โซดาไฟ และสบู่
- (2) การดีพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำการตัดสายโมเลกุลยางในขณะที่เป็นน้ำยางโดยใช้ฟีนิลไฮโดรควิโนน ไฮโดรคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมการเติมออกซิเจน (จากอากาศ) ทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นอนุมูลที่ไม่เสถียร ทำให้โมเลกุลของยางสั้นลงเรื่อยๆ
- (3) เมื่อโมเลกุลของยางมีขนาดเล็กลงแล้ว ทำให้แยกออกมาจากน้ำ (coagulation) ล้าง แล้วจึงอบให้แห้ง ได้ยางธรรมชาติสีน้ำตาลเข้ม

การเตรียมน้ำธรรมชาติเหลวจากยางธรรมชาติ เป็นกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (ออกซิเจน-ฟีนิลไฮโดรควิโนน) ซึ่งเป็นการดีพอลิเมอร์ไรส์ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงเหลือ 8,000-20,000

กลไกการตัดสายโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วยฟีนิลไฮโดรควิโนน [13] แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของยางธรรมชาติเมื่อใช้ ฟีนิลไฮดราซีนร่วมกับออกซิเจน [13]

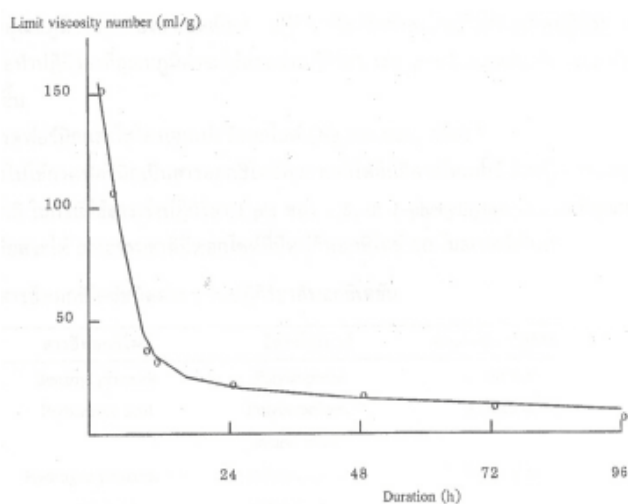
เมื่อปริมาณออกซิเจนมากเกินไป กระบวนการดีพอลิเมอไรเซชัน ขึ้นอยู่กับปริมาณฟีนิลไฮดราซีน [1] ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลของปริมาณฟีนิลไฮดราซีนต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติเหลว

ปริมาณฟีนิลไฮดราซีน (โมลต่อกรัมของเนื้อยางแห้ง)	น้ำหนักโมเลกุล
0.0001	100,000
0.0002	50,000
0.0004	17,000-20,000
0.0006	10,000-12,000
0.0008	9,000
0.0012	8,000

นอกจากนี้เวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติเหลว ดังแสดงในรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระยะเวลาการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีน 12×10^{-4} โมล / กรัมของเนื้อยางแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในรูปของน้ำยาง มีข้อดีคือ จะเกิดปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และระดับน้ำหนักโมเลกุลที่ได้กว้างและสามารถควบคุมได้ กระบวนการสามารถทำได้โดยการปรับ pH ของน้ำยางให้มีค่าที่เหมาะสม โดยใช้สบู่ (Surfactant) ซึ่งใช้ร่วมกับสารออกซิไดซ์และสารรีดิวซ์ เป็นระบบรีดอกซ์ (Redox)

- สารออกซิไดซ์จะเป็นสารพวก Peroxidic compound เช่น Hydrogen peroxide และอนุพันธ์เช่น alkyl , cycloalkyl และ aralkyl hydroperoxide หรือ inorganic peroxy compound เช่น perborate, percarbonates, perchlorate และ persulphate

- สารรีดิวซ์จะเป็นพวก alkali ,alkaline earth, metal nitrite, ammonium nitrite, alkyl nitrite เช่น amyl nitrite, sodium chlorite, potassium chlorite

สาร hydrogen peroxide, sodium chlorite และ potassium chlorite มีข้อดีคือ สามารถละลายน้ำได้ ทำให้กำจัดได้ง่าย ใช้งานง่าย และราคาถูก

- ตัวอย่างของสบู่ non-ionic surfactant เช่น polyethoxylated phenol และ polyethoxylated alcohol ส่วน anionic surfactant เช่น alkyl sulphate หรือ alkyl sulphonate

- ตัวอย่างของสบู่ที่เป็น cationic surfactant เช่น quaternary ammonium salt

ปริมาณของ surfactant ที่ใช้โดยทั่วไปจะใช้น้ำในช่วง 0.1-3.0 phr ของน้ำยาง แต่ทำให้ผลดีจะอยู่ที่ปริมาณ 1.0-2.0 phr

2.1.4 ประโยชน์ของยางธรรมชาติเหลว

(1) การใช้งานในรูปยางที่ยังไม่ cure เป็นพวก plasticizer ช่วยในการแปรรูป เมื่อ cure ยางธรรมชาติจะติดกับโมเลกุลของยางคอมปาวด์ จึงไม่ถูกสกัดออก ช่วยลดเวลาในการบดยาง แต่ทำให้การทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสต่ำลงเล็กน้อย

(2) การใช้งานในลักษณะของยางนึ่ง

- อุตสาหกรรมทำสี ช่วยลดต้นทุนในการทำสี โดยผสมกับอะคริลิกเรซิน และทำให้เกิดการเชื่อมข้ามพันธะโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร

- ยางกันกระแทก ปกติใช้ยางธรรมชาติซึ่งมีการกระเด็นตัวดีเมื่อได้รับแรงกระแทก ถ้าใช้ยางธรรมชาติเหลวแทนยางธรรมชาติสามารถแก้ปัญหานี้ได้ เพราะมีการกระเด็นตัวต่ำกว่ายางธรรมชาติ

- ทำกาว ยางธรรมชาติเหลวมีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 5,000-15,000 มีความสามารถในการติดกันได้ดี ใ้้มากในอุตสาหกรรมรองเท้าและเทปกาว

(3) การใช้งานในลักษณะของแข็ง ในการทำยางอีโพนต์ โดย cure ยางธรรมชาติเหลวด้วยกำมะถัน 35 phr

(4) การใช้งานโดยการเปลี่ยนโครงสร้างของยางธรรมชาติเหลว

โดยการเติมสารเคมีต่างๆ เข้าไปยังสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติเหลว เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เช่น

- การสังเคราะห์ thermoplastic elastomer
- การ epoxidized ยางธรรมชาติเหลว

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brosse *et al* [14] ใช้ระบบรีดอกซ์เพื่อเตรียมยางเหลว โดยสารออกซิไดซ์ที่ใช้ ได้แก่ ออแกนิกเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และออกซิเจนในอากาศ ส่วนสารรีดิวซ์ ได้แก่ อะโรมาติกไฮดราซีน (Aromatic hydrazine) กรดซัลฟานิลิก (Sulphanilic acid) โดยพบว่าหมู่ปลายของยางอาจเป็น ฟีนิลไฮดราโซน (Phenylhydrazone) คาร์บอนิล หรือ ไฮดรอกซิล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบของการเลือกใช้สารยางเหลวที่เตรียมได้มีน้ำหนักโมเลกุลโดยจำนวนระหว่าง 3,000-35,000 และมีค่าการกระจายตัวระหว่าง 1.70-1.97 สารเคมีที่นิยมนำมาเตรียมยางเหลวจะเป็น ฟีนิลไฮดราซีนร่วมกับออกซิเจนในอากาศ โดยกลไกการทำปฏิกิริยากับยาง

มะลิ [9] ศึกษาการเตรียมยางเหลวจากน้ำยางธรรมชาติ ทำโดยนำน้ำยางธรรมชาติมาผสมกับฟีนิลไฮดราซีนไฮโดรคลอไรด์ ให้ความร้อนพร้อมกับให้อากาศและกวนอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา แยกยางเหลวโดยใช้ Methyl ethyl ketone ทำให้แห้งด้วยอากาศร้อน แล้วนำไปหาน้ำหนักโมเลกุล เพื่อศึกษาผลของยางเหลวที่เตรียมได้ เมื่อแปรปริมาณฟีนิลไฮดราซีนเพิ่มขึ้น และเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่พบว่าจุดที่เหมาะสมในการเตรียมยางเหลว คือ ที่ปริมาณฟีนิลไฮดราซีนเข้มข้น 10 % ปริมาณ 60 มล. ต่อน้ำยางขึ้น 100 มล. และใช้เวลา 18 ชั่วโมง จะได้ยางเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 5,000 มีความหนืด 232,000 cp ที่อุณหภูมิห้อง และความถ่วงจำเพาะ 0.935 นำมาคอมปาด์กับสารเคมีต่างๆ เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ และทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น Tensile strength, Elongation at break, Resilience และความแข็ง ให้สมบัติค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่ายางธรรมชาติมาก

การทำผลิตภัณฑ์ได้น้ำยางเหลวคอมปาด์มาหล่อ โดยใช้มือเป็นแบบ ผลปรากฏว่าได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติไม่ค่อยดีนัก คือ ไม่แข็งแรง และมีความยืดหยุ่นน้อย

Derouet และคณะ [15] การใช้ฟอสฟอรัสสำหรับปรับปรุง สมบัติการหน่วงไฟของยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ โดยเข้าไปปรับโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยปฏิกิริยายางธรรมชาติเหลวอีพอกซิไดซ์กับไดบิวทิลฟอสเฟต มีความเป็นไปได้พอลิเมอร์ที่ปรับปรุงทางด้านเคมี : 25% ELNR, 5.2-6.8 %w/w ของฟอสฟอรัส สามารถติดอยู่บนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ ผลผลิตของปฏิกิริยาที่ได้ในบัลก์และโซลูชันกับความต่างของปริมาณอาจจะเนื่องมาจากระดับปริมาณการเชื่อมโยงในผลจากผลผลิตที่ได้การวิเคราะห์ทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงเตรียมโดยสองปฏิกิริยาภายใต้สภาวะเดียวกัน เพื่อพิสูจน์ความสามารถในการเกิดผลผลิตของปฏิกิริยาในบัลก์และโซลูชัน การเข้ากันของฟอสฟอรัสกับ ในยางธรรมชาติเหลวอีพอกซิไดซ์สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ เพิ่มพฤติกรรมด้านการติดไฟของยางวัลคาไนซ์ สังเกตได้ว่าการเพิ่มอัตราการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกล การเติมฟอสฟอรัสสามารถผสมยางธรรมชาติเหลวอีพอกซิไดซ์และไดบิวทิลฟอสเฟตที่อุณหภูมิของการผสมของคอมปาวด์และผลการหน่วงไฟที่ดีพอขึ้นด้วยการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลค่อนข้างดี

Nair และคณะ [16] ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติเหลวที่พอลิเมอร์ไรซ์ด้วยความร้อน เป็นพลาสติกไซเซอรันยางไนไตรล์ ได้มีการศึกษากับการค้นคว้าพิเศษถึงลักษณะการไหล การประเมินค่าเทียบกับการทำ

กับไดบิวทิวทาเลต พลาสติกไซเซอร์ชนิดเอสเทอร์ ปกติใช้กับยางไนไตรล์ การศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ยางธรรมชาติเหลว เป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงความหนืด ช่วยกระบวนการแปรรูปง่ายของคอมปาวด์และเสริมสมบัติในการวัลคาไนซ์อีกด้วย

Tanaka และคณะ [17] รายละเอียดของกระบวนการสำหรับการผลิตของยางธรรมชาติที่ลดน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งเป็นไปได้ที่ปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูง ของยางเหลวลดน้ำหนักโมเลกุลในรูปของยางเหลวและมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่แคบลงและกระบวนการสำหรับการผลิตของยางธรรมชาติลดน้ำหนักโมเลกุลซึ่งเป็นยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปไม่มีสีและกลิ่น และไม่มีอันตรายจากการแพ้โปรตีน กระบวนการตามการศึกษาประกอบด้วย การเติมคาร์บอนิลคอมปาวด์กับน้ำยางธรรมชาติ โดยผลจากการออกซิเดชันของอากาศ ในรูปของเรดิคัลหรือเติมเรดิคัลคอมปาวด์ในน้ำยางธรรมชาติลดโปรตีน และจากนั้นเกิดการออกซิเดชันในอากาศซึ่งอยู่ในรูปของเรดิคัล

Maidunny [18] ศึกษาถึงการเกิด Photodegradation ของยางธรรมชาติภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม โดยการเกิด Photodegradation ของยางดิบในหลายๆ เกรด โดยการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เครื่องจำลองแสงแดดผลิตแสงเท่ากับ 1 kW อัตราการขาดของสายโซ่เป็นฟังก์ชันของการทำยางให้บริสุทธิ์ร่วมกับ Chromophores ซึ่งจะกระตุ้นให้เกิดการขาดของสายโซ่ ซึ่งยางสามารถเสื่อมสภาพได้ภายใต้แหล่งผลิตแสงอาทิตย์ โดยการรวมกันของระบบ sensitizer ที่มีประสิทธิภาพ

Solanky และคณะ [19] ศึกษาการเสื่อมสภาพของน้ำยางธรรมชาติ (Hevea Brasiliensis Latex) โดยการใช้แสงควบคุม กลไกการแยกของสายโซ่ในปฏิกิริยา Photo-oxidative degradation ซึ่งมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวกระตุ้น ในยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการผลิตยางธรรมชาติเหลว การนำยางธรรมชาติมาฉายแสงในสารละลายทูลูอิน (2.5 wt%) ในเครื่องทำให้เกิดแสงที่ 30°C ภายใต้ ออกซิเจนและไนโตรเจนในบรรยากาศ โดยแยกกันกับการให้แสงภายใต้ความดันไอของปรอทที่ 400 W ($\lambda = \pm 290$ nm) โดยมีการคนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีการใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ/หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ ร่วมด้วย การลดลงของ Viscosity-average molecular weight ($\overline{Mw}$) จะถูกวัดโดยการวัดความหนืด การผลิตแสงทำได้โดยใช้ FT-I, H และ CNMR spectroscopies Burfield ได้นำเสนอผลการทดลองโดยแสดงให้เห็นถึงการแยกของสายโซ่ เนื่องจาก Free-radical จากปฏิกิริยาออกซิเดชันมากกว่า การเกิดปฏิกิริยาโดยตรงจาก Hydroxyl radical ที่พันธะ Methylene-Methylene ซึ่งจะใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ/หรืออัลลิลิก ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นตัวริเริ่ม (Photoinitiator) นอกจากนั้นการเติมออกซิเจน (singlet oxygen) ควบคุมกันโดยผ่านทางปฏิกิริยา 'ene' ซึ่งจะผลิตไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ซึ่งไม่สามารถมองข้ามได้

Wonkam และคณะ [20] ศึกษาผลของยางธรรมชาติเหลวอีพอกซีไดซ์ของยางไนไตรล์ผสมกับยางบิวตาไดอิน ยางธรรมชาติเหลวอีพอกซีไดซ์ ประกอบขึ้นเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ทางด้านเคมีจากยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติเหลวอีพอกซีไดซ์เป็นยางที่ความหนืดสูงของมวลโมเลกุลต่ำทั่วไป ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์หรือช่วยในการผสม ระหว่างกระบวนการผสมอย่างพิเศษของยางธรรมชาติ, ยางสไตรีนและยางบิวตา

ได้อื่น ผลของการผสมเข้ากันของพอลิเมอร์นี้แน่นอนกว่าพลาสติกไซเซอร์มาตรฐานในยางไนไตรล์ผสมกับ บิวตะไดอีน ที่ผสมกันซึ่งเคยได้มีการศึกษามา ได้ศึกษาสมบัติทางกลตามที่มีการเก็บรักษาในอากาศและใน น้ำมัน สมบัติทางกลและความต้านทานต่ออายุการใช้งานที่ถูกคงไว้ตามการผสม ยางธรรมชาติเหลวฟ็อก ชิไดซ์ ยางไนไตรล์ผสมกับยางบิวตะไดอีน ตามสูตรที่มีความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ต่ำสุด กระบวนการที่น่าพอใจของยางคอมปาวด์ และการปรับปรุงการใช้งานได้ผลแน่นอนที่สุดที่ 25 % โดยโมลของยางธรรมชาติเหลวฟ็อกชิไดซ์ ที่ความเข้มข้นมากกว่า 15 phr

ขวัญตา [8] ศึกษาการเตรียมยางเหลวจากยางแห้งโดยวิธีทางเชิงกล โดยศึกษาความนึ่มและน้ำหนัก โมเลกุลของยางดิบที่เหมาะสมเพื่อนำไปเตรียมคอมปาวด์ของยางเหลวโดยใช้เครื่องบดยางสามลูกกลิ้ง ซึ่ง เครื่องมือชนิดนี้มีข้อจำกัดในเรื่องความนึ่มของยาง จากการทดลองพบว่ายางที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์ ของยางเหลว คือ ยาง Mooney 6 ในการผสมสารเคมีเข้าไปในยางโดยใช้เครื่องบดยางสามลูกกลิ้งจะผสม สารที่แห้งลงไปก่อน เพื่อให้สารเคมีกระจายได้ดี ส่วนน้ำมันจะใส่หลังสุดเพื่อให้ยางนึ่มและไหลได้

การเตรียมยางเหลวแต่ละสูตรจะคำนึงถึงคุณสมบัติด้านการไหล เพื่อให้ทำผลิตภัณฑ์ให้การหล่อ จากแม่พิมพ์ ดังนั้นปริมาณน้ำมันที่ใช้ ปริมาณสารตัวเติม และชนิดของสารตัวเติมที่ใช้อยู่จึงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติด้านการไหล และชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำ นอกจากนี้ก็ยังศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ 300% Modulus, Tensile strength, %Elongation at break, Tear strength และ Hardness ของยางหลังการวัลคาไนซ์ ด้วย โดยแปรปริมาณน้ำมันที่ใช้ตั้งแต่ 100-200 phr เปรียบเทียบระหว่างไม่มีสารตัวเติม และมีสารตัวเติม คือ เคลย์และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งคงที่ที่ 50 phr แปรปริมาณสารตัวเติมคือ เคลย์และแคลเซียม คาร์บอเนตตั้งแต่ 0-100 phr ปริมาณน้ำมันคงที่ 150 phr แล้วเลือกสูตรที่เหมาะสมคือ ไหลได้บ้างที่อุณหภูมิ ห้องหรือสูงกว่าอุณหภูมิห้องและมีความแข็งแรงพอไปทดลองทำผลิตภัณฑ์

สมบัติทางกายภาพของยางเหลวขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำมัน ปริมาณสารตัวเติมและชนิดของสารตัวเติม ที่ใช้ การเพิ่มปริมาณน้ำมันตั้งแต่ 100-200 phr ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางเหลวทั้งที่ไม่มีสารตัวเติม และมีสารตัวเติมลดลง และสมบัติทางกายภาพของยางเหลวที่มีสารตัวเติมจะสูงกว่าที่ไม่มีสารตัวเติม การ เพิ่มปริมาณสารตัวเติม ตั้งแต่ 0-100 phr ทำให้สมบัติทางกายภาพของยางเหลวเพิ่มขึ้น สารตัวเติมจำพวก เคลย์ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพส่วนใหญ่สูงกว่าสารตัวเติมจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนต แต่คุณสมบัติที่ได้ ก็ยังไม่ค่อยดี สำหรับการนำผลิตภัณฑ์ถึงแม้ว่าคุณสมบัติที่ได้ยังไม่ค่อยดี แต่ผลของการหล่อเป่าอวัยวะ เทียมก็ได้ผลดีพอสมควร

จิตต์ลัดดา และทิพวัลย์ [21] ศึกษาการเกิด Depolymerisation ของยางธรรมชาติที่ทำให้มีความ บริสุทธิ์สูงมาก โดยใช้ปฏิกิริยา Metal-catalysed oxidation ของยางธรรมชาติที่กำจัดโปรตีนออกแล้ว โดย การทดลองนี้ถูกทำให้เป็นที่ยอมรับถึงวิธีการเตรียมยางเหลว โดยการขาดของสายโซ่ของยางธรรมชาติที่ทำให้ มีความบริสุทธิ์มาก โดยใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และการเสื่อมสภาพโดยใช้ความร้อนเป็นตัว กระตุ้น โดยทำการสั่นที่ 65 °C ยางธรรมชาติที่ใช้สำหรับศึกษาจะอยู่ในรูปของน้ำยางสดและในรูปของสาร ละลาย ซึ่งยางในสารละลายโทลูอีนจะมีความไวต่อการเสื่อมสภาพมากกว่ายางที่อยู่ในรูปของน้ำยางสด

ลักษณะโครงสร้างของการเชื่อม สภาพของยางจะศึกษาโดยใช้ FTIR และ การวิเคราะห์ NMR อะซิโตนที่ได้จากยางธรรมชาติที่กำจัดโปรตีนออกแล้ว รวมกับ 1 phr ของ $\text{Co}(\text{acac})_2$ จะมีผลต่อวัสดุสำหรับการเตรียมยางธรรมชาติเหลว โดยการสันที่ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

Dileep และ Avirah [22] มาลิก แอนไฮโดรเป็นสารเคมีเชื่อมต่อเพื่อดีพอลิเมอร์ยางธรรมชาติโดยปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัล ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเหลวที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอนิล ดูได้จาก H-NMR, IR, GPC, และ TGA. ประสิทธิภาพของยางธรรมชาติเหลวที่มีหมู่ปลายเป็นคาร์บอนิลเปรียบเทียบกับพลาสติกไซเซอร์ใน NBR วัลคาไนซ์ พบว่าเป็นไอค้ำและต้านทานต่อน้ำมัน การวัลคาไนซ์แสดงการปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่ออายุการใช้งานเปรียบเทียบกับวัลคาไนซ์ที่ประกอบด้วย พลาสติกไซเซอร์ปกติ

วารุณี [23] ทำการเตรียมยางธรรมชาติฟอกซีไคซ์เหลว ด้วยกระบวนการ oxidative depolymerization โดยนำน้ำยางธรรมชาติฟอกซีไคซ์มาเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ และโพรพานอล (propanol) แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 338 K เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำน้ำยางมาจับตัวด้วยเมธานอล (methanol) และทำให้บริสุทธิ์ด้วยทูโลอินและเมธานอล หลังจากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 303 K เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ภายใต้การลดความดัน ยางธรรมชาติฟอกซีไคซ์เหลวนี้นี้ ($\overline{Mn} \approx 10^4$) มีหมู่ปลายเป็นแอลดีไฮด์ (aldehyde group) และ $\alpha - \beta$ unsaturated carbonyl group ยางนี้สามารถนำไปใช้เป็นตัวกลางขนถ่ายลิเทียมไอออน (Li^+) โดยใช้เป็น solid polymer electrolyte ได้

โสภา [24] ศึกษาการลดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติให้อยู่ในระดับ $4 \times 10^5 - 5 \times 10^5$ เตรียมได้ 2 วิธี คือ การบดยางแห้งด้วยเครื่องผสมยางสองลูกกลิ้ง อุณหภูมิ $30-40^\circ\text{C}$ องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 5 นาที หรือการใช้สารเคมีเติมลงในน้ำยางสด คือ ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.8 phr ร่วมกับโซเดียมไนไตรต์ปริมาณ 0.5 phr หรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1 phr หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.70 phr หรือใช้สารย่อยยางปริมาณ 1 phr และไนโตรเบนซีนปริมาณ 0.62 phr โดยปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ยกเว้นไนโตรเบนซีนใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง และใช้ไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด จากนั้นจับตัวน้ำยางด้วยสารละลายกรดฟอร์มิก 1.5 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 55°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-4 วัน ยางที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลมีความหนืดมูนี้ ML 1+4 (100°C) อยู่ในช่วง 50-60 ความอ่อนตัวอยู่ในช่วง 30-35 ปริมาณเจลอยู่ในช่วง 0-10 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณอัลดีไฮด์อยู่ในช่วง 10.7-20.8 มิลลิโมลต่อกิโลกรัม สมบัติด้านการไหล พลังงานในการผสม และสมบัติทางฟิสิกส์ของยางที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลมีค่าต่ำกว่ายางที่ไม่ได้ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล หลังจากเก็บยางที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลเป็นเวลา 90 วัน พบว่าความหนืดมูนี้ น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ความอ่อนตัว และปริมาณเจลมีแนวโน้มลดลง ส่วนปริมาณอัลดีไฮด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ลดน้ำหนักโมเลกุลจากยางแท่ง

1. ยางแท่ง STR5L ผลิตโดยบริษัท จะนะ น้ำยาง จำกัด
2. ไดเบนโซไทอะซายล์ ไดซัลไฟด์ (Dibenzotiazyl disulphide, MBTS) ใช้เป็นสารช่วยลดขนาดโมเลกุลของยาง STR5L ในการบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง
3. Plast 8 ใช้เป็นสารช่วยลดขนาดโมเลกุลของยาง STR5L ในการบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง มีลักษณะเป็นเม็ดสีน้ำตาล

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการหาน้ำหนักโมเลกุลของยาง

สารละลายเบนซีน (Benzene) สูตรทางเคมี C_6H_6 น้ำหนักโมเลกุล 78.11 เข้มข้น 99.7% มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้สำหรับละลายยางเพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลโดยวิธีการวัดความหนืด ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia Co., Ltd.

3.1.3 สารเคมีที่ใช้เตรียมยางเหลวจากน้ำยางข้น

1. น้ำยางข้น 60%DRC ชนิด HA ผลิตโดยบริษัท จะนะน้ำยาง จำกัด
2. ฟีนิลไฮดราซีน (Phenylhydrazine) สูตรโมเลกุล $C_6H_8N_2$ น้ำหนักโมเลกุล 108.4 m_p 18-20°C มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลือง ใช้สำหรับลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของน้ำยาง ผลิตโดยบริษัท Chemika Co., Ltd.
3. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) สูตรทางเคมี $C_{12}H_{25}NaO_4S$ น้ำหนักโมเลกุล 288.38 มีลักษณะเป็นผงสีขาว ใช้เป็นตัวรักษาความเสถียร (stabilizer) ในน้ำยางข้นที่นำมาลดขนาดโมเลกุล ผลิตโดยบริษัท BioChemika Co., Ltd.
4. เมทานอล (Methanol) มีสูตรทางเคมี CH_3OH น้ำหนักโมเลกุล 32.04 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ใช้สำหรับจับตัวน้ำยางเหลว ผลิตโดยบริษัท Labscan Asia Co., Ltd.

3.1.4 สารเคมีที่ใช้คอมปาวด์ยางเหลว

1. ยางธรรมชาติเหลว (Liquid Natural Rubber) ที่เตรียมจากน้ำยางข้น 60% DRC ชนิด HA โดยใช้ฟีนิลไฮดราซีนเป็นตัวลดน้ำหนักโมเลกุล มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด มีสีน้ำตาลไหม้ ความหนืดประมาณ $150 \times 10^3 - 730 \times 10^4$ cP
2. กำมะถัน (Sulphur) สูตรทางเคมี S_8 เป็นกรดที่ใช้กันในอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) มีสูตรทางเคมี ZnO เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการวัลคาไนซ์ (activator) มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นการวัลคาไนซ์ (activator) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวอมเหลือง เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม
5. วัลคานอกซ์ เอ็มบี (Vulkanox MB) ทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพจากออกซิเจน (antioxidant) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตโดยบริษัท ไบเออร์ไทย จำกัด
6. ซิลิกา (Silica) ใช้เป็นสารตัวเติมที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับยางเหลวคอมปาวด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว เป็นกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรม
7. โพลีเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว ใช้กระตุ้นการวัลคาไนซ์ของซิลิกา
8. โซเดียมไธโอคาบาเมต (Sodium dithiocabamate) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาล
9. แอนคอยด์ (Ancoid) มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน เป็นสารช่วยให้สารอื่นการกระจายตัวสม่ำเสมอในน้ำมันสปีนเดิล
10. น้ำมันสปีนเดิล (Spindle oil) สูตรทางเคมี $C_{18}H_{36}O_2$ มีลักษณะเป็นเหลวสีเหลืองอ่อน จำหน่ายโดยบริษัท เค. เอส. พี. อินเตอร์เคมี จำกัด

3.1.5 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

1. น้ำยางธรรมชาติ 60% ชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia Concentrated Latex) ผลิตโดยบริษัท จะนะน้ำยาง จำกัด
2. SDS มีลักษณะเป็นผงสีขาว เตรียมในรูป 20% น้ำหนักต่อปริมาตร ใช้เป็นตัวรักษาความเสถียรของน้ำยาง
3. 30% Hydrogenperoxide มีลักษณะเป็นของเหลวใส ใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยาในการลดน้ำหนักโมเลกุลของน้ำยาง

4. Potassiumpersulphate สูตรทางเคมี $K_2O_2S_8$ มีลักษณะเป็นผงสีขาว เตรียมในรูปสารละลาย 10% น้ำหนักต่อปริมาตร ใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยาในการลดน้ำหนักโมเลกุลของน้ำยาง ผลิตโดย Carlo Erba
5. สารละลายกรดฟอร์มิก (Formic acid) สูตรทางเคมี H_2COOH ใช้จับตัวน้ำยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุล
6. เบนซีน (Benzene) สูตรทางเคมี C_6H_6 ใช้เป็นตัวทำละลายยาง ผลิตโดยบริษัท Lab-scan Asia Co.,Ltd
7. แอมโมเนียม คลอไรด์ มีความเข้มข้น 28-30 % ใช้เติมลงในน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการคอมปาวด์น้ำยาง

1. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) สูตรทางเคมี ZnO เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีขาว เตรียมในรูป 50% dispersion ใช้สำหรับเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์
2. กำมะถัน (Sulphur) สูตรทางเคมี S_8 เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง เตรียมในรูป 50% dispersion ใช้สำหรับเป็นสารวัลคาไนซ์
3. สารตัวเร่ง Zinc-N-diethyldithiocarbamate (ZDEC) เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีขาว เตรียมในรูป 50% dispersion ใช้สำหรับเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
4. สารตัวเร่ง Sodiumditiosulphate เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นของเหลวใส สีเหลืองน้ำตาล ใช้สำหรับเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์
5. Bentonite clay เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีเทา ใช้เป็นสารป้องกันการตกตะกอนของสารเคมีที่เตรียมเป็น dispersion
6. Anchoid มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน เป็นสารช่วยให้สารที่กำลังบด เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมออยู่ในรูป dispersion
7. สารแอนติออกซิเดชั่น Vulkanok BKF เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล ใช้เป็นสารป้องกันการออกซิเดชั่น
8. แคลเซียมคาร์บอเนต สูตรทางเคมี $(CaCO_3)$ เป็นชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีลักษณะเป็นผงสีขาว เตรียมในรูป 50% dispersion ใช้สำหรับเป็นสารตัวเติมในน้ำยาง
9. น้ำมันสปินเดิล (Spindle oil) ใช้เป็นสารช่วยในการคอมปาวด์น้ำยาง และเพิ่มความนุ่มในผลิตภัณฑ์ เตรียมเป็นคอลลอยด์
10. Sodium methyl cellulose ใช้ในการเตรียมน้ำมันสปินเดิล และช่วยเพิ่มความหนืดในน้ำยาง
11. คลอโรฟอร์ม (Chloroform) สูตรทางเคมี $CHCl_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล ใช้ทดสอบระดับการวัลคาไนซ์ของน้ำยางธรรมชาติที่ผสมสารเคมีแล้ว

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

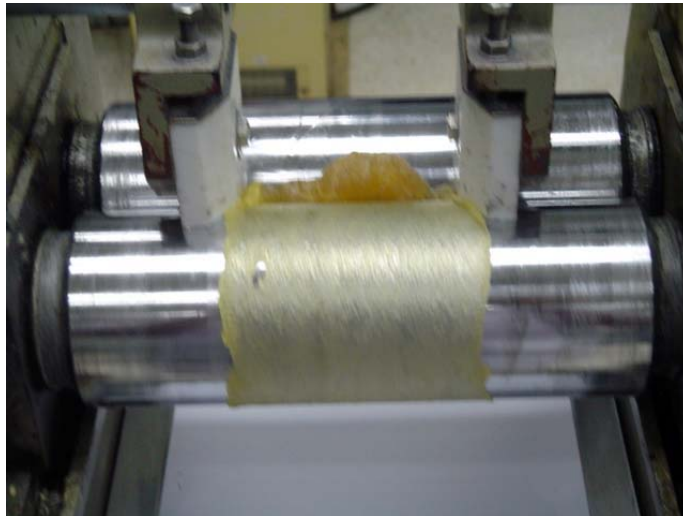
1. เครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว อัตราส่วนระหว่างลูกกลิ้งหน้ากับลูกกลิ้งหลัง 1:1.25 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดยางเพื่อลดขนาดโมเลกุล และใช้ในการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ และน้ำมัน
2. เครื่องบดสารเคมี (Ball mill) ใช้ในการบดผสมสารเคมีให้อยู่ในรูป dispersion ภาชนะในการบดผสมเป็นขวดพลาสติกทรงกระบอกขนาดความจุ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในบรรจุลูกแก้วและสารเคมีปริมาตรรวมประมาณ 75% ของขวด มีฝาที่ปิดสนิทเพื่อป้องกันการรั่วซึม
3. ชุดผสมสารเคมีกับน้ำยาง ใช้กวนผสมสารเคมีกับน้ำยางเพื่อเตรียมน้ำยางคอมปาวด์ประกอบด้วยมอเตอร์มีแกนหมุนติดใบพัดใช้กวนน้ำยางคอมปาวด์ ความเร็วในการผสม 80 รอบต่อนาที ผลิตโดยบริษัท Heidolph R2R 2020
4. ตะแกรงกรองน้ำยาง ใช้กรองน้ำยางที่บ่มแล้วก่อนการนำมาเตรียมขึ้นทดสอบ
5. เครื่องวัด pH (pH meter) ยี่ห้อ Mettler ผลิตโดย Mettler-Toledo Ltd. ประเทศอังกฤษ
6. ตู้อบ (Oven) รุ่น memmert เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการอบยางเพื่อทำให้เกิดการลดขนาดโมเลกุล ใช้อบยางเหลวให้แห้ง และใช้ในการอบเพื่อวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์
7. ตู้อบแบบ Gear Oven รุ่น ESPEC ใช้ในการบ่มเร่งยางด้วยความร้อน (aging) ผลิตโดยบริษัท TABAI ESPEC CORP.
8. เครื่องชั่ง ละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น AB 204-S ผลิตโดยบริษัท Mettler-Toledo (Thailand)
9. เครื่องชั่ง ละเอียด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น PL3002 ผลิตโดยบริษัท Mettler-Toledo (Thailand)
10. Capillary Viscometer แบบ Ubbelohde viscometer ใช้ในการวัดความหนืดของสารละลายยางในเบนซิน เพื่อหาน้ำหนักโมเลกุล
11. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของสารละลายยางไว้ที่ 30 องศาเซลเซียส เพื่อหาความหนืดของสารละลาย และนำไปคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุล
12. Hot plate & stirrer บริษัท Jenway1000 กำลัง 500W ให้ความร้อนสูงสุด 350 °C
13. เครื่องเขย่า (flask shaker SF 1) ใช้สำหรับเขย่าสารละลายยางในเบนซินเพื่อให้ยางละลายในเบนซินได้ดี ผลิตโดยบริษัท STUART SCIENTIFIC Co., Ltd. ประเทศอังกฤษ
14. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml ยี่ห้อ pyrex ใช้ในการเตรียมน้ำยางละลายยางด้วยสารละลายเบนซิน
15. ปิเปตขนาด 25 ml ยี่ห้อ pyrex ใช้ในการเตรียมน้ำยางละลายยางด้วยสารละลายเบนซิน
16. ลูกยาง ใช้ในการเตรียมน้ำยางละลายยาง
17. นาฬิกาจับเวลา
18. กรวยกรอง และ สำลี ใช้ในการกรองสารละลายยางเพื่อหาน้ำหนักโมเลกุล

19. โหลแก้ว ใช้สำหรับเตรียมน้ำยางเหลว โดยผสมสารเคมีกับน้ำยางเพื่อทำปฏิกิริยาลดขนาดโมเลกุล ที่อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส
20. เครื่องกวน รุ่น Heidolph RZD 2020 ใช้ในการกวนน้ำยางเพื่อทำปฏิกิริยาลดขนาดโมเลกุลของยาง และใช้ในการคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมได้สารเคมีต่างๆ และน้ำมัน
21. ปัมลม ใช้เพื่อเป่าอากาศลงในน้ำยางทำให้เกิดปฏิกิริยาลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติได้สมบูรณ์ อย่างควบคุมอุณหภูมิ
22. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในการเตรียมน้ำยางเหลวจากน้ำยางธรรมชาติเหลว
23. ปีกเกอร์ขนาด 1000 mL ใช้ใส่ยางเหลว สารเคมี และและน้ำมัน เพื่อกวนให้เข้ากัน
24. เครื่องวัดความหนืด Brookfield ใช้ในการวัดความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์
25. เครื่องวัดความนิ่มของยาง (Mooney Viscometer) รุ่น MOONEY MV 2000 ใช้สำหรับวัดความหนืดมูนีของยางที่บดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies ประเทศ UK
26. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Universal Tensile Testing Machine) มีโหลดเซลล์ (load cell) เป็นตัวแปลงสัญญาณจากค่าแรงที่วัดได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวเลขแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ มีเอกซ์เทนโซมิเตอร์ (Extensometer) ทำหน้าที่วัดระยะที่เปลี่ยนแปลงขณะทดสอบ ใช้ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที
27. เครื่องวัดความแข็งของยาง (Hardness) แบบ IRHD Type A รุ่น PCT INSTRUMENTS MODEL 408 ผลิตโดยบริษัท PACIFIC TRANSDUCER CORP.

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การลดน้ำหนักโมเลกุลยางโดยการบดยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill)

1. น้ำยางแท่ง STR5L ตัดแบ่งมาประมาณ 300 กรัม บดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) โดยเก็บตัวอย่างที่เวลาบดต่างๆ กัน คือ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ
2. บดยาง STR5L และใช้ MBTS หรือ Plast 8 เป็นตัวช่วยลดขนาดโมเลกุล (Peptizer) โดยผสมยางกับ peptizer ในอัตราส่วน 100:0.2 และเก็บตัวอย่างที่เวลาบดต่างๆ กัน ดังเช่นข้อ 1
3. น้ำยางที่ทำการบดแล้วมาหาค่าความหนืดมูนี โดยใช้ ML(1+4) 100 °C ดังข้อ 3.3.2
4. น้ำยางที่บดแล้วในข้อ 1 และข้อ 2 มาละลายด้วยเบนซีน แล้วนำสารละลายยางไปวัดความหนืดด้วย capillary viscometer และคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของยาง ดังข้อ 3.3.3
5. น้ำยางที่บดแล้วในข้อ 1 และข้อ 2 ที่เวลา 20 และ 30 นาที มาอบที่อุณหภูมิต่างกันดังนี้คือ 150, 170, 190, 210, 230 °C โดยใช้เวลาในการอบ 10 นาที แล้วนำไปละลายด้วยเบนซีน หลังจากนั้นวัดความหนืดด้วย capillary viscometer และคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของยาง ดังข้อ 3.3.3



รูปที่ 3.1 การบดขย้างด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง

3.3.2 การหาความหนืดของยางด้วยเครื่อง Mooney Viscometer

1. ตั้งอุณหภูมิของเครื่อง Mooney Viscometer ให้เป็น 100 °C
2. ตัดยางที่ทำการบดแล้วให้มีความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตร และหนักประมาณ 12.5 กรัม มา 2 ชิ้น
3. นำโรเตอร์ออกจากช่องใส่ยาง นำยางมาประกบด้านบนและด้านล่างของโรเตอร์ รองพลาสติกอีก 1 ชิ้นแล้วใส่กลับเข้าไปในช่องใส่ยาง
4. อุณหภูมิเป็นเวลา 1 นาที แล้วเดินเครื่องให้โรเตอร์หมุนเป็นเวลา 4 นาที บันทึกค่าเวลาที่ 4 นาทีเป็นค่าความหนืดที่วัดได้



รูปที่ 3.2 เครื่องวัดความหนืดของยาง (Mooney Viscometer)

3.3.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยวิธีวัดความหนืดของสารละลายยาง

1. เตรียมสารละลายยางก่อนทำการทดลอง โดยละลายยางให้มีความเข้มข้น 0.5 g/dl ดังนี้
 - 1.1. ชั่งยางมา 250 mg และตัดเป็นชิ้นเล็กๆ
 - 1.2. ละลายด้วยสารละลายเบนซินในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml ที่ตั้งไว้พร้อมกับเขย่าจนยางละลายหมด จะได้สารละลายยางที่มีความเข้มข้น 0.5 g/dl
2. ปิเปตสารละลายยางเข้มข้น 0.5 g/dl มา 25 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 ml อีกขวดหนึ่ง แล้วเติมสารละลายเบนซินจนมีปริมาตรเป็น 50 ml ซึ่งจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.25 g/dl จากนั้นเตรียมสารละลายยางที่มีความเข้มข้น 0.125 g/dl และ 0.063 g/dl โดยวิธีการข้างต้น
3. ล้าง viscometer ด้วยตัวทำละลายเบนซิน 2-3 ครั้ง แล้วหาค่า flow time ของเบนซิน (t_0) ที่อุณหภูมิ 30°C โดย
 - 1.1. ใส่เบนซินลงใน viscometer ประมาณ 25 ml
 - 1.2. แช่ในอ่างแก้วที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30°C เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อปรับอุณหภูมิของสารละลายเบนซิน
 - 1.3. หลังจากนั้นวัด flow time ของสารละลายเบนซิน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย ให้เวลาเฉลี่ยเป็น flow time ของเบนซิน (t_0)

- 4 ใช้สำลึกรองสารละลายยางที่เตรียมไว้ ล้าง viscometer ด้วยสารละลายยาง 1-2 ครั้ง ใส่สารละลายยางลงใน viscometer นำไปแช่ในอ่างที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 นาที แล้ววัดค่า flow time และหาค่าเวลาเฉลี่ย ให้เวลาเฉลี่ยเป็น flow time ของสารละลายยาง (t) โดยใช้สารละลายยางที่มีความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.5 , 0.25 , 0.125 และ 0.063 g/dl
- 5 คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดของยางดังข้อ 3.3.4



รูปที่ 3.3 การหาน้ำหนักโมเลกุลโดยวิธีวัดความหนืดของสารละลายยาง

3.3.4 การคำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ

1. คำนวณ Relative, Specific และ Inherent viscosities

ตารางที่ 3.1 สูตรที่ใช้ในการคำนวณค่า Relative, Specific และ Inherent viscosities

Common Name	Recommended Name	Symbol and Define Equation
Relative viscosity	Viscosity Ratio	$\eta_r = \eta/\eta_0 = t/t_0$
Specific viscosity	-	$\eta_{sp} = \eta_r - 1 = (\eta - \eta_0)/\eta_0$
Reduce viscosity	Viscosity Number	$\eta_{red} = \eta_{sp}/C$
Intrinsic viscosity	Logarithmic viscosity number	$\eta_{inh} = (\ln \eta_r)/C$
Intrinsic viscosity	Limiting viscosity number	$[\eta] = [\eta_{sp}/C]_{C=0} = [(\ln \eta_r)/C]_{C=0}$

2. เขียนกราฟระหว่าง η_{sp}/C กับ C และ $(\ln \eta_r)/C$ กับ C แล้วนำมาหาค่า Intrinsic viscosity จากความชันของกราฟ
3. คำนวณหาน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืด ($\overline{M}_v$) จากสมการ Mark-Houwink-Sakurada Equation [25] คือ

$$[\eta] = KM^a$$

เมื่อ η = Intrinsic viscosity

$$a = 0.74$$

$$K = 1.85 \times 10^{-4}$$

3.3.5 การเตรียมยางเหลวจากยางแท่ง STR 5L และการคอมปาวด์ยางกับสารเคมี

1. นำยางที่บดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง(Two Roll Mill) เป็นเวลา 30 นาที ทั้งที่ใช้ และไม่ใช้ peptizer (อัตราส่วนของยางต่อ peptizer คือ 100: 0.2) มาผสมกับสารเคมีต่างๆ ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ตามสูตรดังตารางที่ 3.2

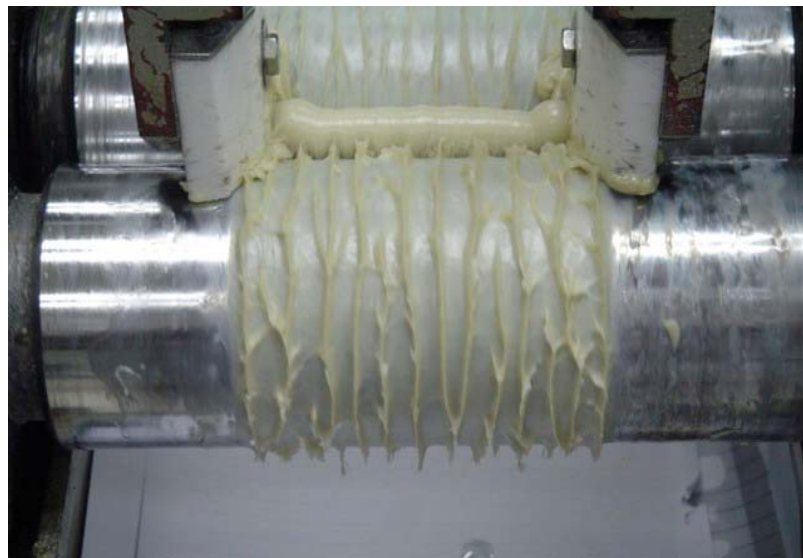
ตารางที่ 3.2 สูตรยางที่ใช้ในการเตรียมยางเหลวคอมปาวด์จากยาง STR5L

สารเคมี	ปริมาณ (phr)					
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5	สูตรที่ 6
STR 5L	100	100	100	100	100	100
MBTS	-	0.2	-	0.2	0.2	-
Plast 8	-	-	-	-	-	0.2
ZnO	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
Vulkanox MB	1	1	1	1	1	1
TMTD	1	1	-	-	-	-
ZDEC	-	-	1	1	1	1
Sulphur	5	5	5	5	5	5
China clay	50	50	50	50	75	75
Spindle oil	300	300	300	300	200	200

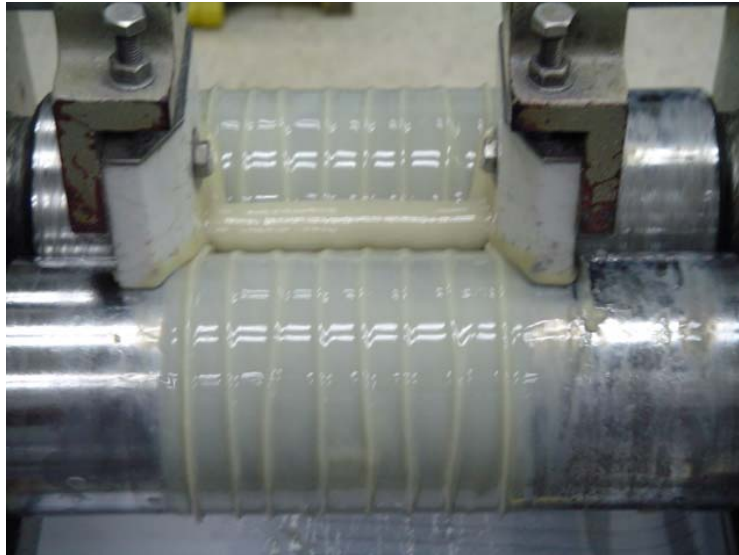
2. บดจนยางเหลวโดยใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงครึ่ง ต่ออย่าง 1 batch
3. นำยางเหลวมาตั้งทิ้งจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้ววัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield
4. นำยางเหลวมาหล่อบนแผ่นกระจก ตั้งทิ้งไว้จนไม่มีฟองอากาศ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. นำยางที่บดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two Roll Mill) เป็นเวลา 30 นาที ทั้งที่ใช้ และไม่ใช้ peptizer เป็นสารช่วยตัดสายโมเลกุล ไปอบที่อุณหภูมิ 210 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาผสมกับสารเคมีต่างๆ ด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งตามสูตรข้างต้น และทำเช่นเดียวกับข้อ 2-4
6. ทดสอบสมบัติทางกายภาพ



รูปที่ 3.4 การผสมยางกับสารเคมีด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 3.5 ลักษณะของยางเหลวเมื่อเริ่มผสมกับน้ำมันสปีนเดิล



รูปที่ 3.6 ลักษณะของยางเหลวเมื่อผสมกับน้ำมันสปีนเคิล 300 phr



รูปที่ 3.7 การหล่อยางเหลวบนแผ่นกระຈก

3.3.6 การเตรียมยางเหลวจากน้ำยางข้น

1. เตรียมยางธรรมชาติเหลวจากน้ำยางข้น 60%DRC ชนิด HA โดยใช้โซเดียม โดเดซิล ซัลเฟตเข้มข้น 20%โดยน้ำหนัก เป็นสตาบิไลเซอร์(stabilizer) และใช้ฟีนิลไฮดราซีนเข้มข้น10%โดยน้ำหนักเป็นตัวลดขนาดโมเลกุล สูตรที่ใช้เตรียมยางเหลว (สูตรเปียก) คือ

สารเคมี	ปริมาณ (ส่วน)
น้ำยางข้น 60%	100
SDS 20% โดยน้ำหนัก	20
ฟีนิลไฮดราซีน10% โดยปริมาตร	60
น้ำกลั่น	50

2. วิธีการเตรียมยางเหลว

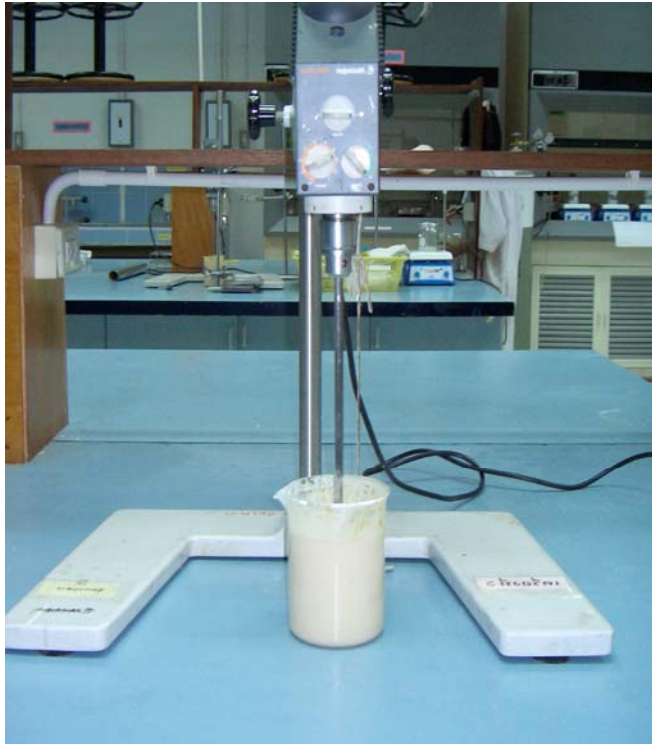
- 2.1 นำน้ำยางข้นมาทำการไล่แอมโมเนียออก โดยกวนด้วยใบพัดในระบบเปิดเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง
- 2.2 นำน้ำยางข้นที่ไล่แอมโมเนียแล้วมาทำให้เสถียรด้วย SDS แล้วกวนให้เข้ากัน
- 2.3 ค่อยๆ เติมฟีนิลไฮดราซีนทีละน้อย กวนให้เข้ากัน และระวังอย่าให้น้ำยางจับตัว
- 2.4 เติมน้ำกลั่นลงในน้ำยางและกวนให้เข้ากัน
- 2.5 นำไปอุ่นในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 50-55°C โดยมีใบพัดกวนน้ำยางและมีอากาศเป่าตลอดเป็นเวลา 9 และ 12 ชั่วโมง
- 2.6 หลังจากนั้นนำน้ำยางที่ทำปฏิกิริยาแล้วมาจับตัวด้วย methanol
- 2.7 แยกเนือยางเหลวออกมา นำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 4 วัน (หรืออบจนยางแห้ง)
- 2.8 น้ำยางเหลวที่เตรียมได้ไปหาน้ำหนักโมเลกุล และนำไปผสมกับสารเคมีต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.8 การเตรียมน้ำยางเหลวจากน้ำยางข้น

3.3.7 การคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น

1. นำน้ำมันสปีนเดิล, ซิงค์ออกไซด์, กรดสเตียริก, ไทโอคาร์บาเมต, ZDBC, กำมะถัน, วัลคานอก เอ็ม บี, ซิลิกา, PEG และ Ancoind มา กวนให้เข้ากันด้วยใบพัด ใช้เวลาในการกวนประมาณ 3 วัน ด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที
2. น้ำมันสปีนเดิลและสารเคมีต่างๆที่กวนผสมเข้ากันดีแล้ว มาผสมกับ LNR และกวนให้เข้ากันโดยใช้ใบพัด ใช้เวลาในการกวนประมาณ 6 ชั่วโมง ด้วยความเร็ว 80 รอบต่อนาที
3. เมื่อยางกับสารเคมีต่างๆ ผสมเข้ากันดีแล้ว น้ำยางคอมปาวด์ที่ได้มาวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield
4. น้ำยางคอมปาวด์ไปหล่อบนแผ่นกระจก ให้หนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และอบที่ 70°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนยางสุก
5. น้ำยางที่ได้ไปทดสอบสมบัติ และทำการขึ้นรูปเป็นอวัยวะผิวหนังแขนเทียม



รูปที่ 3.9 การคอมปาวด์ยางเหลวโดยการกวนด้วยใบพัด

สูตรที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์

ตารางที่ 3.3 การคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ Silica, China Clay เป็นสารตัวเติม และ
ไม่ใช้สารตัวเติม

สารเคมี	ปริมาณ (phr)		
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
LNR	100	100	100
ZnO	5	5	5
Stearic acid	1	1	1
Vulkanox MB	1	1	1
Thiocarbamate	1	1	1
Sulphur	5	5	5
China clay	-	20	-
Silica	-	-	20
Spindle oil	100	100	100

หมายเหตุ : LNR ที่ใช้เตรียมโดย ใช้ปริมาณฟีนิลไฮดราซีน 10 phr และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส โดยมีการเป่าอากาศตลอดเวลาที่เกิดปฏิกิริยา

ตารางที่ 3.4 การคอมปาวด์ยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ปริมาณของสารตัวเติม
คือ ซิลิกาที่แตกต่างกัน คือ 5, 10 และ 20 phr

สารเคมี	ปริมาณ (phr)			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
LNR	100	100	100	100
ZnO	5	5	5	5
Stearic acid	1	1	1	1
Vulkanox MB	1	1	1	1
Thiocarbamate	1	1	1	1
ZDBC	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulphur	5	5	5	5
Silica	-	5	10	20
PEG	-	0.03	0.06	0.12
Spindle oil	100	100	100	100
Ancoind	0.5	0.5	0.5	0.5

หมายเหตุ : LNR ที่ใช้เตรียมโดยใช้ปริมาณฟีนิลไฮดราซีนต่างกัน คือ 5 และ 10 phr และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน คือ 9 และ 12 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วง 50-55 องศาเซลเซียส และมีการเป่าอากาศตลอดเวลาที่เกิดปฏิกิริยา แล้วหล่อบนแผ่นกระจก และนำไปอบจนสุก



รูปที่ 3.10 ลักษณะของยางคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยาง

3.3.8 การเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

การทดลองนี้เป็นการลดน้ำหนักโมเลกุลของยางในรูปน้ำยางตามวิธีของโสภา อิศระ [24] เพื่อที่จะได้น้ำยางที่ได้ ผสมกับสารเติมแต่งต่างๆโดยตรง ดังรายละเอียด คือ

นำน้ำยางชั้นธรรมชาติชนิดแอมโมเนียสูง DRC 60% จำนวน 167 กรัม มากรองด้วยตะแกรงกรอง จากนั้นเติม 20% โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ซึ่งเป็นสารรักษาสภาพน้ำยาง ปริมาณ 40 กรัมคนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที แล้วทิ้งไว้ 20 นาทีเพื่อให้สารรักษาสภาพน้ำยางกระจายตัวไปทั่วบนอนุภาคยาง จากนั้น เติม 30%ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 6.6 กรัมลงไป แล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยาโดยการกวนตลอดเวลา อย่างสม่ำเสมอที่ความเร็ว 60 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นเติม 10% โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ปริมาณ 81 กรัม แล้วปล่อยให้ เกิดปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ต้องการ โดยจะทำการลดน้ำหนักโมเลกุลที่ 6 ชม. 12 ชม. 18 ชม. และ 24 ชม.

เมื่อทำการลดน้ำหนักโมเลกุลครบตามเวลาที่กำหนดนำน้ำยางที่ทำการลดน้ำหนักโมเลกุลแล้วมาจับตัวด้วยกรดฟอร์มิก ริดแผ่นล้างน้ำให้เพียงพอแล้วอบที่อุณหภูมิ 70 °C จากนั้นนำไปหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเครื่อง Capillary Viscometer ตามข้อ 3.3.3 และการคำนวณตามหัวข้อ 3.3.4 และทดสอบสมบัติของน้ำยางดังนี้



รูปที่ 3.11 การเตรียมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.3.8.1 ค่า pH น้ำยาง

นำน้ำยางที่ต้องการทดสอบซึ่งได้แก่ น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำคอมปาวด์ ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 ml จากนั้นนำไปหาค่า pH ด้วย pH meter

3.3.8.2 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำยาง (Total solid content, TSC)

นำจานแก้วที่มีฝาปิดมาซึ่งพร้อมฝาเหนี่ยวน้ำยางตัวอย่างลงไปประมาณ 2.5 ± 0.5 กรัม เปิดฝาแล้วเอียงจานไปมาเพื่อให้ น้ำยางกระจายทั่วจาน อบที่อุณหภูมิ 100 ± 2 °C เวลา 2 ชั่วโมง หรือจนยางใสตั้งให้เย็นใน เดซิเคเตอร์ ซึ่งน้ำหนักรอบข้างเป็นเวลา 15 นาทีทำให้เย็นแล้วชั่ง ผลต่างของน้ำหนักทั้ง 2 ครั้งควรต่างกันไม่เกิน 1 mg

การคำนวณ

$$\% \text{ TSC} = \frac{(C-A) \times 100}{(B-A)}$$

โดยที่ A น้ำหนักจานพร้อมฝา

B น้ำหนักจานพร้อมฝากับน้ำยาง

C น้ำหนักจานพร้อมฝากับยางแห้ง

3.3.8.3 ปริมาณเนื้อยางแห้งทั้งหมดในน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ชั่งตัวอย่างน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำจำนวนประมาณ 10 กรัม (ให้ถูกต้องแน่นอน 5 มิลลิกรัม) ใส่ลงในจานกระเบื้อง แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 20 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันต่อจากนั้น เติมน้ำกรดอะซิติก ลงไปอย่างช้าๆ และคนตลอดเวลาที่ได้เติมน้ำกรดนั้น ทิ้งไว้จนได้สารละลายใสประมาณ 30 นาที จากนั้นล้างก้อนยางที่จับตัวแล้วด้วยน้ำที่กำลัไฮล น้ำยางที่ได้ไปรีด ให้ความหนาที่ได้ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบแห้งที่ 70 ± 2 °C ในเตาอบที่อากาศถ่ายเทได้ เมื่อยางแห้งแล้วจากนั้นนำยางที่แห้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องใน เดซิเคเตอร์ นำไปชั่ง อบต่ออีก 30 นาที ทำให้เย็นและชั่งอีก น้ำหนักควรต่างกันไม่เกิน 5 มิลลิกรัม จากค่าที่ได้ครั้งสุดท้าย

การคำนวณ

$$\% \text{ เนื้อยางแห้ง} = \left(\frac{\text{น้ำหนักเนื้อยางแห้ง}}{\text{น้ำหนักน้ำยางที่ใช้}} \right) \times 100$$

3.3.8.4 ความหนืดของน้ำยาง (Viscosity)

นำน้ำยางตัวอย่าง 500 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 250 ml เลือก spindle ที่ต้องการมาติดกับเครื่องวัดความหนืด Brook field ตรงแกนกลางแล้วจุ่มลงในน้ำยางจนระดับของเหลวอยู่ตรงคอคอดของแกน spindle พอดีกคกซ์ลงขณะที่ค่อยๆเปิดสวิทช์เดินเครื่อง เมื่อมอเตอร์เดินแล้วค่อยๆปล่อยคกซ์ลง ปล่อยให้หน้าปัดหมุนจนเข็มชี้ได้ตำแหน่งคงที่บนหน้าปัด กดคกซ์ให้เข็มชี้ยึดติดกับหน้าปัดหยุดมอเตอร์ อ่านค่าจากหน้าปัดของเครื่อง นำค่าที่อ่านได้คูณกับตัวเลขในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าคงที่ตัวคูณ เพื่อให้ได้ความหนืดของของเหลว (บุญธรรม, 2532)

ความเร็ว (รอบ/นาที)	เลขแกนหมุน						
	RV1	RV2	RV3	RV4	RV5	RV6	RV7
10	10	40	100	200	400	1000	4000
20	5	20	50	100	200	500	2000
50	2	8	20	40	80	200	800
100	1	4	10	20	40	100	400

หมายเหตุ RV=Regular viscosity

ในการทดลองนี้ เลือกใช้สปินเดิล 3 และความเร็ว 100 รอบต่อนาที

3.3.8.5 ระดับของการวัลคาไนซ์ด้วยคลอโรฟอร์ม

นำน้ำยางคอมปาวด์และคลอโรฟอร์มมาอย่างละประมาณ 10 กรัม เท่ๆกัน จากนั้นผสมกันในจานแก้ว กวนจนน้ำยางจับตัวหมด ทิ้งไว้ 2-3 นาที ทดสอบระดับของการวัลคาไนซ์โดยการดึง ซึ่งจัดได้ 4 ระดับดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ลักษณะต่างๆ ของยางที่ระดับการวัลคาไนซ์ต่างกัน

Chloroform Number	ระดับการวัลคาไนซ์	ลักษณะก๊อนยาง
No.1	ไม่เกิดการวัลคาไนซ์	ยางจับตัวเป็นก้อนใหญ่เมื่อดึงค่อนข้างจะเหนียว สามารถดึงออกเป็นเส้นยาวได้
No.2	เกิดการวัลคาไนซ์เล็กน้อย	ยางรวมตัวเป็นก้อน และเหนียวเมื่อดึงจะขาดที่ความยาวสั้น
No.3	เกิดการวัลคาไนซ์ปานกลาง	ก๊อนยางไม่มีความเหนียวอยู่เลยเมื่อดึงจะขาดทันที
No.4	เกิดการวัลคาไนซ์เต็มที่	ยางจะจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆ ไม่รวมกันเป็นก๊อน

3.3.9 การคอมปาวด์น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสมบัติของยางวัลคาไนซ์

3.3.9.1 การผสมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับสารเคมี และการวัลคาไนซ์

3.3.9.1.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับคอมปาวด์น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

1. กำมะถันเตรียมในรูป 50 % dispersion โดยใช้สูตร

ชนิดสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
Sulphur	50.0
Bentonite clay	1.0
Anchoid	1.0
น้ำกลั่น	48.0

บดด้วยเครื่องผสม ball mill เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

2. สารตัวเร่ง ZDEC เตรียมในรูป 50 % dispersion โดยใช้สูตร

ชนิดสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
ZDEC	50.0
Bentonite clay	1.0
Anchoid	1.0
น้ำกลั่น	48.0

บดด้วยเครื่องผสม ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. ซิงค์ออกไซด์ เตรียมในรูป 50 % dispersion โดยใช้สูตร

ชนิดสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
ZnO	50.0
Bentonite clay	1.0
Anchoid	1.0
น้ำกลั่น	48.0

บดด้วยเครื่องผสม ball mill เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

4. สารป้องกันการเสื่อม Vulkanok BKF เตรียมในรูป 50 % dispersion โดยใช้สูตร

ชนิดสารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
Vulkanok BKF	50.0
Bentonite clay	1.0

Anchoid	1.0
น้ำกลั่น	48.0
บดด้วยเครื่องผสม ball mill เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	

5. สารตัวเติม CaCO_3 เตรียมในรูป 50 % dispersion โดยใช้สูตร
- | ชนิดสารเคมี | ปริมาณที่ใช้ (กรัม) |
|-----------------|---------------------|
| CaCO_3 | 50.0 |
| Bentonite clay | 1.0 |
| Anchoid | 1.0 |
| น้ำกลั่น | 48.0 |
- บดด้วยเครื่องผสม ball mill เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

6. การเตรียมน้ำมัน Spindle oils ในรูปอิมัลชัน

ส่วน A	phr
spindle oil	50.0
oleic acid	2.0
ส่วน B	
KOH 10%	10.0
น้ำ	40.0
Sodium carboxymethyl cellulose (CMC)	1.0

การเตรียมน้ำมันสปีนเดิลทำได้โดย การนำ CMC จำนวน 1 กรัม ละลายในน้ำร้อน 40 กรัม จากนั้นเติม 10% KOH ปริมาณ 10 กรัม ผสมให้เข้ากัน โดยหมุนปั่นที่ความเร็ว 500 รอบ/นาที จากนั้นนำส่วนผสมของส่วน A มาเติมลงไปหมุนปั่นต่ออีก 15 นาที

3.3.9.1.2 การคอมปาวด์น้ำยางจากน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

ให้น้ำยางที่ทำการลดน้ำหนักโมเลกุล เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

- หา % DRC
- ปรับค่า pH ให้มีค่า pH 9 ด้วย 10% KOH
- ทำการคอมปาวด์น้ำยางตามสูตรดังตาราง ตามขั้นตอนดังนี้
 - คำนวณหาน้ำหนักน้ำยางและสารเคมีที่ต้องการใช้
 - นำน้ำยางที่กรองแล้วมาทวน 5 นาที

3.3 ใส่สาร 50% sulphur กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที ตามด้วย 50 % ZDEC กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที

3.4 ใส่ spindle oil กวนเป็นเวลา 5 นาที

3.5 ใส่แคลเซียมคาร์บอเนต กวนเป็นเวลา 5 นาที

3.6 ใส่สาร ZnO และ Antioxidant , vulkanok BKF กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที แล้วกวนต่อด้วยเครื่องกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.7 เมื่อครบกำหนด 24 ชั่วโมง นำน้ำยางคอมปาวด์ออกจากเครื่องผสม กรองน้ำยางคอมปาวด์ด้วยตะแกรงกรอง

4. พรีวัลการไนซ์น้ำยาง ที่ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5. หล่อน้ำยางพรีวัลการไนซ์ ลงบนแผ่นกระจกหนาประมาณ 2 มม. อบที่ 50,70 ,80,100 °C

3.3.9.2 การศึกษาผลของเวลาการทำปฏิกิริยาลดน้ำหนักโมเลกุล

ทำการผสมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 12, 18 และที่ 24 ชั่วโมงตามสูตรในตารางที่ 3.7 นำน้ำยางคอมปาวด์แต่ละสูตรเทลงแผ่นกระจกอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อนำไปทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ เปรียบเทียบสมบัติของยางในแต่ละสูตรที่ลดน้ำหนักโมเลกุลที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง และหาสูตรที่เหมาะสมที่สุดซึ่งสมบัติมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ตัวอย่างและนำไปปรับปรุงสูตร โดยแปรปริมาณสารเคมีต่างๆ

ตารางที่ 3.7 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ของน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ทำปฏิกิริยา ที่ระยะเวลาต่างๆ

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)
น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	100.0
50% Sulphur	1.5
50% ZDEC	1.0
50% ZnO	2.0
50% Vulkanok BKF	1.0
50% CaCO ₃	10.0

3.3.9.3 ผลของปริมาณซิงค์ออกไซด์ต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์

ผสมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงตามสูตรในตารางที่ 3.8 โดยใช้ชุดผสมสารเคมี (วิธีการผสมตาม หัวข้อที่ 3.3.9.1.2) นำน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปเทลงบนแผ่นกระจก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ฟองอากาศลอยขึ้น และน้ำยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วน (เมื่อเอียงแผ่นกระจกแล้วน้ำยางไม่ไหล) แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ ซึ่งได้แก่ % Modulus, Tensile strength, % Elongation at break, Tear strength และ Hardness

ตารางที่ 3.8 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรปริมาณ ZnO

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	100	100	100	100
50% Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5
50% ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0
โซเดียมไธโอซัลเฟต	1.0	1.0	1.0	1.0
50% ZnO	3.0	4.0	5.0	6.0
50% Vulkanok BKF	1.0	1.0	1.0	1.0
50% CaCO ₃	20.0	20.0	20.0	20.0
50% spindle oil	5.0	5.0	5.0	5.0

3.3.9.4 ผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์

ผสมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงตามสูตรในตารางที่ 3.9 โดยเลือกใช้ปริมาณ ZnO ที่ 5 phr ในตารางที่ 3.8 มาแปรปริมาณ CaCO₃ และนำน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปเทลงบนแผ่นกระจก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ฟองอากาศลอยขึ้น และน้ำยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วน (เกิดการเจลเล็กน้อย) แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3. 9 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรปริมาณ CaCO_3

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	100	100	100	100
50% Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5
50% ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0
โซเดียมไรโอซัลเฟต	1.0	1.0	1.0	1.0
50% ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0
50% Vulkanok BKF	1.0	1.0	1.0	1.0
50% CaCO_3	0	10.0	20.0	30.0
50% spindle oil	5.0	5.0	5.0	5.0

3.3.9.5 ผลของน้ำมันสปีนเคิลต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์

ผสมน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมงตามสูตรในตารางที่ 3.10 โดยเลือกใช้ปริมาณ CaCO_3 20 phr ตามตารางที่ 3.9 มาแปรปริมาณ น้ำมันสปีนเคิล จากนั้นจึงนำน้ำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปเทลงบนแผ่นกระจก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ฟองอากาศลอยขึ้น และน้ำยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์บางส่วน (เกิดการเจลเล็กน้อย) แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3. 10 สูตรน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในทดลองแปรปริมาณ น้ำมันสปีนเคิล

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)				
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ	100	100	100	100	100
50% Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
50% ZDEC	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
โซเดียมไรโอซัลเฟต	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50% ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
50% Vulkanok BKF	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
50% CaCO_3	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
50% spindle oil	0	2.5	5.0	7.5	10.0

3.4 การทดสอบสมบัติของยางหลังการวัลคาไนซ์

3.4.1 การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

1. ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปคัมเบลล์ (dumbbell shape) ตามมาตรฐาน ASTM D416
2. วัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความหนาที่วัดได้
3. นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบความทนต่อแรงดึง ด้วยเครื่อง LLOYD INSTRUMENT โดยจะวัดค่าต่างๆ ดังนี้

- ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)
- ระยะยืดจนขาด (Elongation at break)
- 100%, 200% และ 300% มอดูลัส (100%, 200% and 300% Modulus)
- %Elongation

การคำนวณ

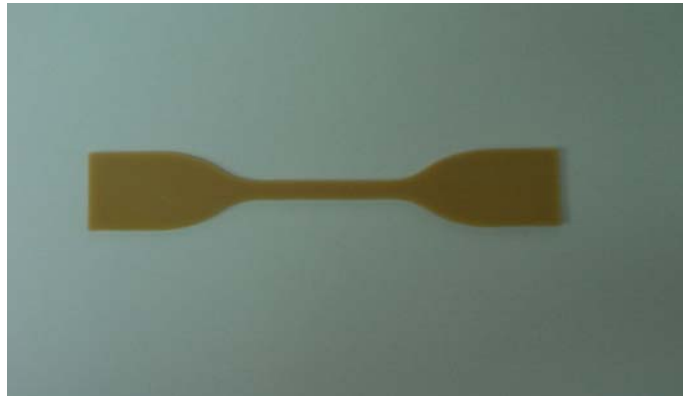
		Tensile Strength (MPa)	=	F/A
เมื่อ	F	คือ แรงที่ใช้ดึงจนขาด (N)		
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm ²)		
		%Elongation	=	100x(L-L₀)/ L₀
เมื่อ	L	คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืด (mm)		
	L ₀	คือ ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนชิ้นทดสอบเดิม (mm)		
		%Modulus (MPa)	=	F/A
เมื่อ	F	คือ แรงที่ใช้ดึงยางที่ระยะยืด 100%, 200% และ 300% จากระยะเดิม (N)		
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm ²)		

3.4.2 การทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน (Thermal Aging Resistance)

1. ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นรูปคัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D416
2. นำชิ้นตัวอย่างไปอบในตู้อบแบบเกียร์ (Gear Oven) โดยใช้อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วัน
3. เมื่อครบ 7 วันแล้ว นำชิ้นตัวอย่างออกจากตู้อบ วางชิ้นตัวอย่างไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง แล้วจึงวัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง
4. นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง LLOYD INSTRUMENT เพื่อวัดค่าความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืดจนขาด 100%, 200% และ 300% มอดูลัส และ %Elongation แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าของชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ทำการบ่มเร่ง

โดยจะคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ตามสูตรดังนี้

$$\% \text{การเปลี่ยนแปลง} = \left[(\text{หลังบ่มเร่ง} - \text{ไม่ได้บ่มเร่ง}) / \text{ไม่ได้บ่มเร่ง} \right] \times 100$$

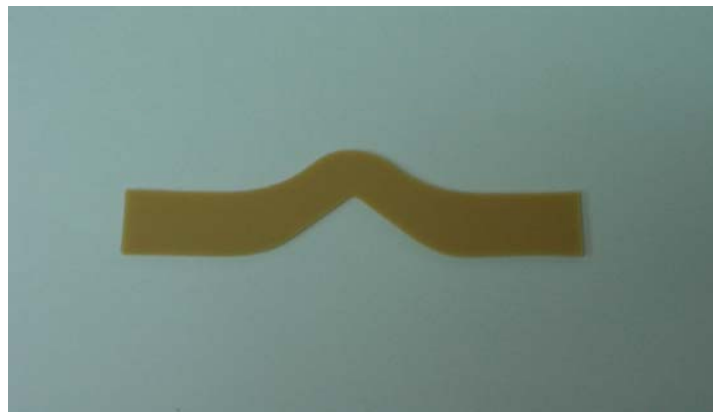


รูปที่ 3.12 ชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์ ตาม ASTM D416

3.4.3 การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear Strength)

1. ตัดชิ้นตัวอย่างเป็นแบบมุมตามมาตรฐาน ASTM D624-91
2. วัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่ง และหาค่าเฉลี่ย
3. นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบด้วยเครื่อง LLOYD INSTRUMENT แล้ววัดค่าแรงที่ดึงจนชิ้นตัวอย่างฉีกขาด และคำนวณหาความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tare Strength) ได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{ความทนต่อการฉีกขาด} = \frac{\text{แรงที่ใช้}}{\text{ความหนาของชิ้นตัวอย่าง}}$$



รูปที่ 3.13 ชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดตาม ASTM D624-91

3.4.5 การวัดความแข็งของยางแบบ IRHD (Shore A)

1. นำชิ้นตัวอย่างมาวางซ้อนกันให้ได้ความหนา 6-8 มิลลิเมตร
2. เมื่อได้ความหนา 6-8 มิลลิเมตร แล้วนำตัวอย่างไปวางบนแท่นโลหะของเครื่องวัดความแข็ง

3. หมุนผิวหนังแขนเครื่องวัดความแข็งให้เข็มกดลงในยางตัวอย่างประมาณ 30 วินาที อ่านค่าความแข็งบนหน้าปัด
4. วัดความแข็ง 3 จุดแล้วหาค่าเฉลี่ย

3.5 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังแขนเทียม

3.5.1 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังแขนเทียมจากยางเหลว

1. นำยางเหลวคอมปาวด์มาเทใส่แบบพิมพ์ผิวหนังแขนเทียม
2. นำแบบพิมพ์สองอันประกบกัน แล้วใช้สายยางรัดเพื่อกันยางเหลวรั่วไหลออกมา
3. นำไปอบเพื่อวัลคาไนซ์ที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง
4. แกะแบบพิมพ์ออก และนำผลิตภัณฑ์ออกจากแบบพิมพ์

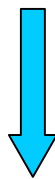


รูปที่ 3.14 ยางเหลวคอม

+



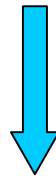
รูปที่ 3.15 แบบพิมพ์ผิวหนัง



นำยางเหลวคอมปาวด์เทลงในแบบพิมพ์ผิวหนังแขนเทียม



รูปที่ 3.16 แบบพิมพ์ผิวหนังแขนเทียมที่เทยางเหลวคอมปาวด์



นำแบบพิมพ์มาประกบกัน



รูปที่ 3.17 แบบพิมพ์ผิวหนังแขนเทียมที่ใส่ยางคอมปาวด์ลงไปเพื่อนำไปอบวัลคาไนซ์



หลังจากสุกแล้วแกะแบบพิมพ์ออก



รูปที่ 3.18 ผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมหลังจากนำไปอบเพื่อวัลคาไนซ์ที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 18 ชั่วโมง

3.5.2 การทำผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมจากน้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

3.5.2.1 ศึกษาการหล่อน้ำยางโดยใช้น้ำยางที่พรีวัลคาไนซ์

การทดลองนี้ได้ใช้น้ำยางน้ำหนักโมเลกุลต่ำคอมปาวด์ในตารางที่ 3.10 สูตรที่ 4 บ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการพรีวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทลงในเบ้าปูนพลาสเตอร์ดังรูปที่ 3.17 ที่อบที่อุณหภูมิ 100°C นำไปอบต่ออีก 30 นาที แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 90 นาทีเพื่อให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ จากนั้นเทน้ำยางออก อบที่อุณหภูมิ 70°C จนเกิดการวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์ เวลา 12 ชั่วโมง

3.5.2.2 ศึกษาการจุ่มน้ำยางโดยวิธี heat sensitive ระบบ Zinc ammine complex

การทดลองนี้ได้ใช้น้ำยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุลแล้ว 24 ชั่วโมง มาเติมแอมโมเนีย เพิ่มอีก 0.7% จากนั้นคอมปาวด์ น้ำยางตามสูตรที่ 4 ในตารางที่ 3.10 บ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำมากรองด้วยตะแกรงแล้วเติมซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 15,18,20,25 phr กวนเป็นเวลา 5 นาที แล้วเติม กลีโอะแอมโมเนียม คลอไรด์ 18 phr กวนเป็นเวลา 5 นาที ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที แล้วควบคุมอุณหภูมิต่อที่ 20°C เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นจุ่มเบ้าที่ร้อน 100°C ลงในน้ำยาง 180 วินาที ยกขึ้นจากนั้นอบต่อที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงจนเกิดการวัลคาไนซ์ และออกจากเบ้าแล้ววัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์



รูปที่ 3.19 เป้าผิวหนังแขนที่ใช้ในการจุ่มน้ำยางคอมปาวด์



รูปที่ 3.20 ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างทางการค้า

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิจารณ์

4.1 การลดน้ำหนักโมเลกุลยางแท่ง STR 5L โดยการบดขย้างด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง

ทำการลดน้ำหนักโมเลกุลยางแท่งเพื่อเตรียมยางเหลวด้วยรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.1

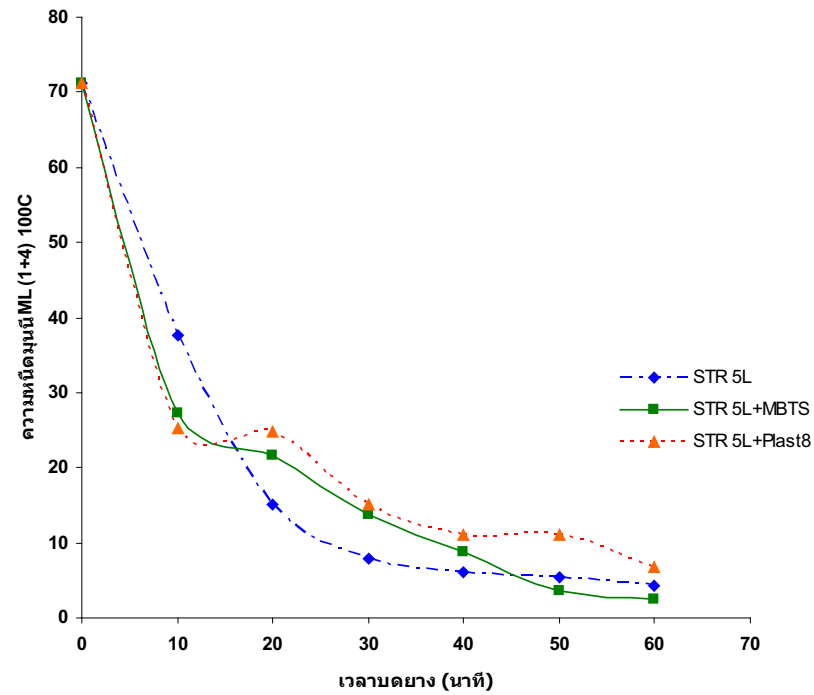
4.1.1 ความหนืดมูนิและน้ำหนักโมเลกุลของยางภายหลังการบด

จากการบดขย้างด้วยเครื่องบดขย้างสองลูกกลิ้งด้วยภาวะต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดมูนิ ML (1+4) 100 °C ของยาง STR 5L บดที่เวลาต่างๆ โดยไม่ใช้ peptizer และใช้ MBTS และ plast 8 เป็น peptizer

เวลาที่บดขย้าง (นาที)	ML (1+4) 100°C		
	STR 5L	STR 5L+MBTS	STR 5L+plast 8
0	71.10	-	-
10	37.63	27.58	25.31
20	15.06	21.58	24.83
30	7.90	13.68	15.09
40	5.98	8.70	11.05
50	5.50	3.70	10.94
60	4.31	2.49	6.70

จากตารางที่ 4.1 นำไปเขียนกราฟระหว่างค่าความหนืดมูนิ ML (1+4) 100 °C กับเวลาที่บดขย้าง ดังรูปที่ 4.1

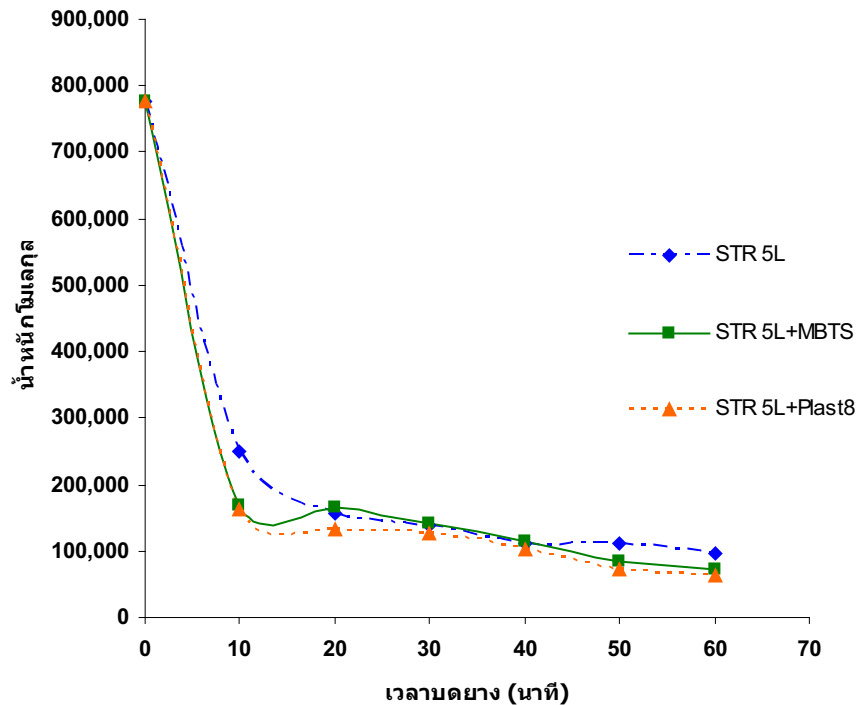


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดอนินทรีย์ของยางและเวลาที่บดยาง

ตารางที่ 4.2 ค่า Intrinsic Viscosity () และน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดของยาง STR 5L ที่บดที่เวลาต่างๆ โดยไม่ใช้ peptizer และใช้ MBTS และ plast 8 เป็น peptizer

เวลาที่บด ยาง (นาที)	STR 5L		STR 5L+MBTS		STR 5L+plast 8	
			$[\eta]$	$\overline{M}_v$	$[\eta]$	$\overline{M}_v$
0	4.23	777,900	-	-	-	-
10	1.83	250,600	1.37	169,400	1.33	162,800
20	1.30	157,800	1.29	165,400	1.14	132,200
30	1.18	138,500	1.19	140,100	1.11	127,500
40	1.01	112,200	1.03	115,200	0.95	103,300
50	1.00	110,700	0.81	83,300	0.76	72,200
60	0.90	96,000	0.73	72,300	0.67	64,400

จากตารางที่ 4.2 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและเวลาที่บดยางได้ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของยางและเวลาที่บดยาง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าเมื่อเวลาในการบดยางเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนืดมูนีที่ ML (1+4) 100°C และน้ำหนักโมเลกุลของยางลดลง โดยในช่วง 20 นาทีแรกความหนืดมูนีจะลดลงอย่างมาก และในช่วง 10 นาทีแรกน้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน หลังจากนั้นความหนืดมูนีและน้ำหนักโมเลกุลของยางจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากในช่วงแรกของการบดโมเลกุลของยางธรรมชาติ ยังมีขนาดยาวอยู่ เมื่อผ่านลูกกลิ้งทำให้เกิดแรงเฉือนสูงเนื่องจากยางยังแข็งอยู่หรือมีความหนืดสูงอยู่ จึงทำให้เกิดการตัดสายโมเลกุลของยางออกจากกัน ทำให้ค่าความหนืดมูนีและน้ำหนักโมเลกุลลดลงอย่างมาก เมื่อบดยางนานขึ้น โมเลกุลของยางเริ่มสั้นลง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นก็น้อยลง และโมเลกุลของยางก็สั้นลงทำให้ยางสามารถผ่านลูกกลิ้งได้ง่ายขึ้น โมเลกุลบางส่วนจึงไม่ถูกตัดขาดออกจากกัน ซึ่งจะเห็นได้จากตารางและกราฟว่าแม้จะใช้เวลาในการบดนานขึ้น แต่น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางก็ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดมูนีและน้ำหนักโมเลกุลของยางแท่ง STR 5L กับ ยาง STR 5L ที่บดโดยใช้ MBTS และ Plast8 เป็นสารเคมีที่ช่วยในการตัดสายโมเลกุลที่เวลาบดต่างๆพบว่า ในช่วง 10 นาทีแรกของการบด ยางที่ใช้ MBTS และ Plast8 ร่วมด้วย ความหนืดมูนีจะลดลงมากกว่ายางที่บดโดยไม่ใช้

สารช่วยตัดสายโมเลกุล แต่เมื่ออบนานขึ้นความหนืดของยางที่บดโดยไม่ใช้สารช่วยตัดสายโมเลกุลกลับลดลงมากกว่าจนถึงนาที่ที่ 40 หลังจากนั้นความหนืดของยางทั้งสามก็จะมีค่าใกล้เคียงกันและลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในส่วนของน้ำหนักโมเลกุลจะเห็นว่าที่เวลาบดต่างๆ ยางทั้งสามจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน

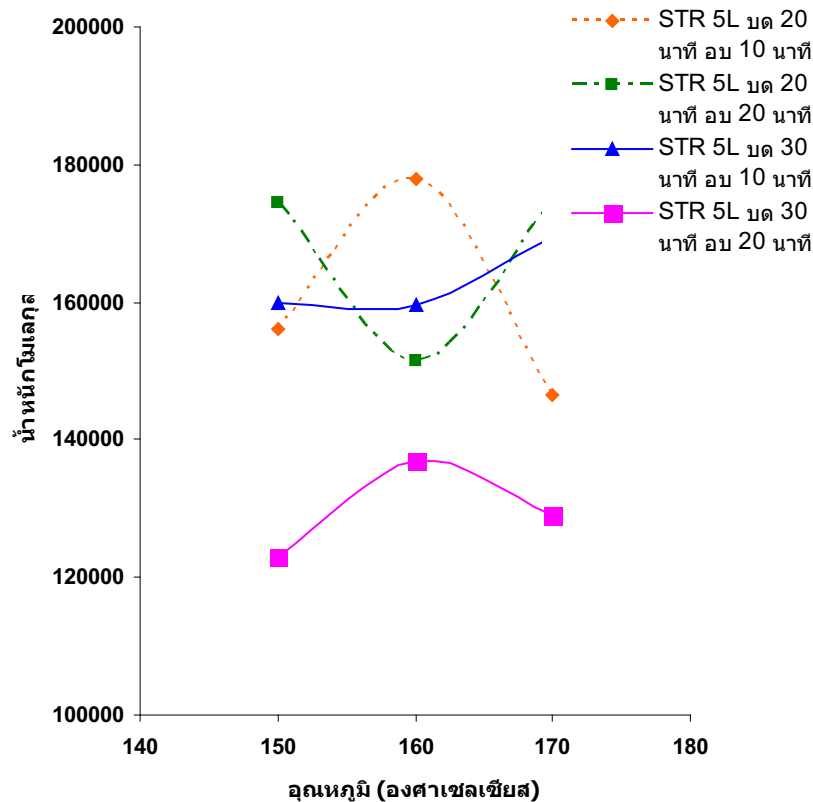
4.1.2 น้ำหนักโมเลกุลของยางที่ผ่านการให้ความร้อน เพื่อนำไปใช้เตรียมยางเหลวคอมปาวด์จากยางแท่ง

หลังจากนำยางที่บดโดยใช้ MBTS เป็นสารช่วยตัดสายโมเลกุลที่นาที่ที่ 20 และ 30 มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150, 160 และ 170 เป็นเวลา 10 และ 20 นาที เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการตัดสายโมเลกุลของยาง แล้วนำมาหาน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดโดยใช้ capillary viscometer ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยางที่เติม MBTS และทำการบดด้วยเวลา 20 , 30 นาที
โดยนำไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่อบ (°C)	เวลาที่อบยาง (นาที)	บด 20 นาที		บด 30 นาที	
		[η]	น้ำหนักโมเลกุล	[η]	น้ำหนักโมเลกุล
150	10	1.29	156,245	1.31	160,000
	20	1.40	174,515	1.07	123,000
160	10	1.42	177,892	1.31	159,528
	20	1.26	151,355	1.17	136,932
170	10	1.23	146,506	1.37	169,480
	20	1.40	174,515	1.12	129,084

จากตารางที่ 4.3 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและอุณหภูมิที่อบยางได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลของยางและอุณหภูมิที่อบยางที่เติม MBTS

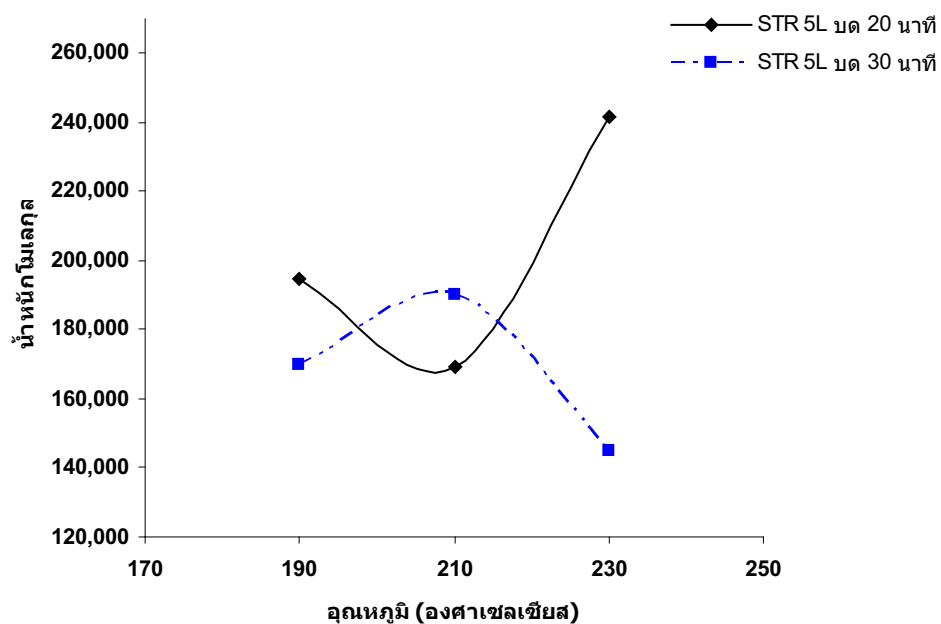
จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของยางมีทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสื่อม (degradation) ในปฏิกิริยาสิ้นสุด (termination) นั้น อาจทำให้เกิดได้ทั้งการทำลายสายโซ่ และการเชื่อมโยงหรือการกลับมารวมตัวกันใหม่ของ radical ที่เกิดขึ้น [26] เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของยางที่อบที่อุณหภูมิเดียวกันที่เวลา 10 และ 20 นาทีพบว่าน้ำหนักโมเลกุลจะต่างกันประมาณ 20,000-37,000 โดยการเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ดังนั้นจึงเลือกที่จะให้ความร้อนกับยางที่เวลา 10 นาที โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น

เมื่อนำยาง STR 5L ที่บดโดยไม่ใช้สารเคมีช่วยในการตัดสายโมเลกุล ที่เวลา 20 และ 30 นาที มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190, 210 และ 230°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาหาน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืด โดยใช้ capillary viscometer ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที

อุณหภูมิที่อบ (°C)	STR 5L บด 20 นาที		STR 5L บด 30 นาที	
	[η]	น้ำหนักโมเลกุล	[η]	น้ำหนักโมเลกุล
190	1.52	195,000	1.38	170,000
210	1.37	169,400	1.48	189,800
230	1.78	241,400	1.22	144,800

จากตารางที่ 4.4 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและอุณหภูมิที่อบยาง ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 น้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L อบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที

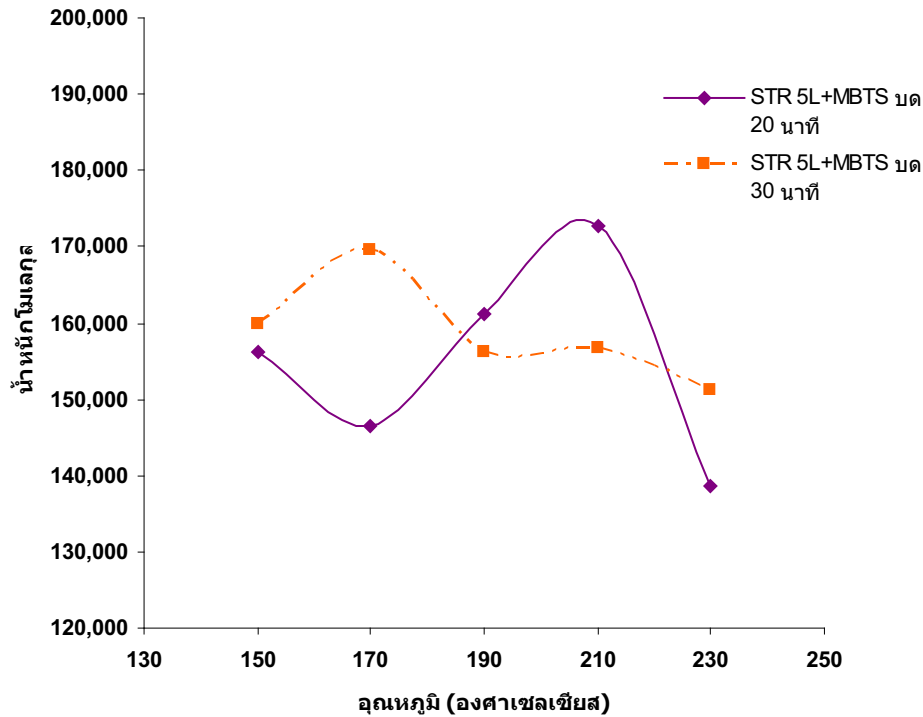
จากรูปที่ 4.4 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L ที่บดที่เวลา 30 นาทีมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนยาง STR 5 L ที่บดที่เวลา 20 นาทีนั้นน้ำหนักโมเลกุลลดลงเมื่อให้ความร้อนที่ 210°C แต่กลับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 230°C อาจเนื่องจากโมเลกุลของยางอาจกลับมารวมตัวกันใหม่ [26] เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่บดที่เวลาเดียวกันที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนพบว่า ยางที่ผ่านการให้ความร้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ายางที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน

เมื่อนำยาง STR 5L ที่บดโดยใช้ MBTS เป็นสารช่วยตัดสายโมเลกุลที่เวลา 20 และ 30 นาที มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150, 170, 190, 210 และ 230°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาหาน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดแล้วนำมาหาน้ำหนักโมเลกุลเชิงความหนืดโดยใช้ capillary viscometer ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+MBTS ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที

อุณหภูมิที่อบ (°C)	STR 5L+MBTS บด 20 นาที		STR 5L+MBTS บด 30 นาที	
	[η]	น้ำหนักโมเลกุล	[η]	น้ำหนักโมเลกุล
150	1.29	156,245	1.31	160,000
170	1.23	146,506	1.37	169,480
190	1.32	161,100	1.29	156,200
210	1.39	172,800	1.29	156,800
230	1.18	138,500	1.26	151,300

จากตารางที่ 4.5 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและอุณหภูมิที่อบยางได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 น้ำหนักรีดของยาง STR 5L+MBTS ที่อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที

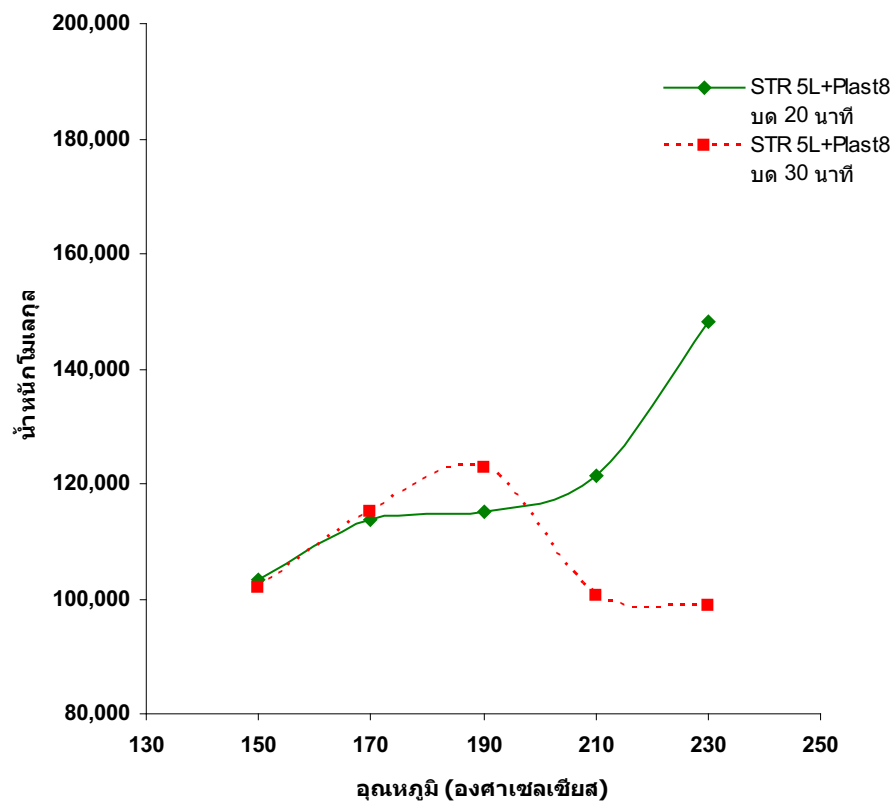
จากรูปที่ 4.5 พบว่า ยางที่บดที่ 20 นาทีน้ำหนักรีดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในตอนแรกและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 230°C น้ำหนักรีดของยางจึงลดลง ส่วนยางที่บดที่ 30 นาทีน้ำหนักรีดของยางมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ลักษณะของยางที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วจะมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และผิวของยางจะเยิ้มมากขึ้นด้วย

เมื่อบดยาง STR 5L โดยใช้ Plast8 ซึ่งเป็น peptizer ที่ใช้กันในทางการค้ามาเป็นสารช่วยตัดสายโมเลกุลของยาง แล้วนำยางที่บดที่เวลา 20 และ 30 นาทีมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150, 170, 190, 210 และ 230°C เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำมาหาน้ำหนักรีดเชิงความหนืดโดยใช้ capillary viscometer ได้ผลดังแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+PLast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที

อุณหภูมิที่อบ (°C)	STR 5L+Plast8 บด 20 นาที		STR 5L+Plast8 บด 30 นาที	
	[η]	น้ำหนักโมเลกุล	[η]	น้ำหนักโมเลกุล
150	0.95	103,300	0.94	101,800
170	1.02	113,700	1.03	115,200
190	1.03	115,200	1.08	122,800
210	1.05	121,300	0.96	100,600
230	1.24	148,100	0.92	98,900

จากตารางที่ 4.6 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและอุณหภูมิที่อบยาง ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 น้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L+Plast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ โดยควบคุมเวลาในการอบ 10 นาที

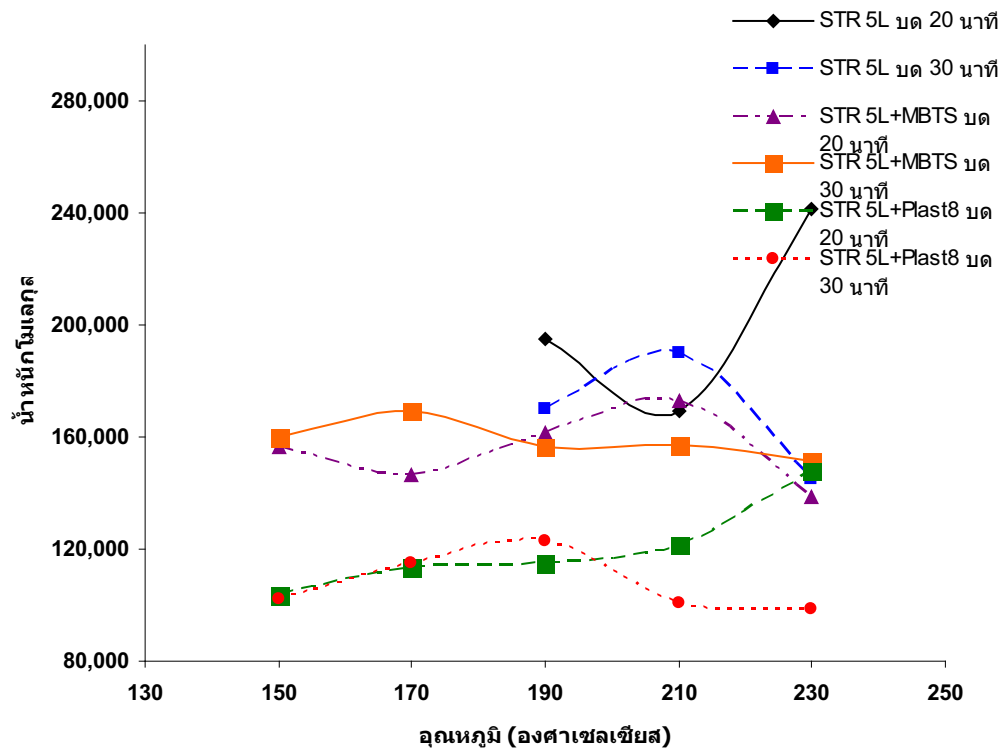
จากรูปที่ 4.6 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางที่บดที่เวลา 20 นาทีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนยางที่บดที่ 30 นาทีน้ำหนักโมเลกุลมีแนวโน้มลดลงถ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 210°C เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่บดที่เวลาเดียวกันที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อนพบว่า ยางที่ผ่านการให้ความร้อนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่ายางที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน หลังจากผ่านการให้ความร้อนยางมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น และมีผิวเยิ้มมากขึ้น โดยยางที่บดโดยใช้ Plast8 เป็นสารเคมีช่วยตัดสายโมเลกุล จะมีสีน้ำตาลเข้มกว่ายางที่ใช้ MBTS และไม่ใช้สารตัดสายโมเลกุล

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L, STR 5L ที่บดโดยใช้ MBTS เป็นสารตัดสายโมเลกุล และ STR 5L ที่บดโดยใช้ Plast8 เป็นสารตัดสายโมเลกุล หลังจากการบดที่ 20 และ 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 10 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L, STR 5L+MBTS, STR 5L+Plast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยใช้เวลาในการอบ 10 นาที

อุณหภูมิที่อบ ($^{\circ}\text{C}$)	STR 5L		STR 5L+MBTS		STR 5L+Plast8	
	บด 20 นาที	บด 30 นาที	บด 20 นาที	บด 30 นาที	บด 20 นาที	บด 30 นาที
150	-	-	156,245	160,000	103,300	101,800
170	-	-	146,506	169,480	113,700	115,200
190	195,000	170,000	161,100	156,200	115,200	122,800
210	169,400	189,800	172,800	156,800	121,300	100,600
230	241,400	144,800	138,500	151,300	148,100	98,900

จากตารางที่ 4.7 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและอุณหภูมิที่อบยาง ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าน้ำหนักโมเลกุลของยาง STR 5L, STR 5L+MBTS, STR 5L+Plast8 ที่อบที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยใช้เวลาในการอบ 10 นาที

จากรูปที่ 4.7 พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางที่บดโดยใช้ Plast8 มีค่าต่ำสุด โดยเฉพาะยางที่บดเป็นเวลา 30 นาทีก่อนนำไปให้ความร้อนมีค่าน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุดเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 210°C

เมื่อเปรียบเทียบยางที่บดที่เวลา 20 นาที กับยางที่บด 30 นาทีหลังการอบที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ยางที่บดที่ 30 นาทีน้ำหนักโมเลกุลมีแนวโน้มที่จะลดลงมากกว่ายางที่บด 20 นาที และการให้ความร้อนกับยางที่อุณหภูมิ 210°C นั้นน้ำหนักโมเลกุลของยางมีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่อุณหภูมิอื่นและใกล้เคียงกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 230°C แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ยางไหม้ได้ จึงเลือกให้ความร้อนกับยางก่อนนำไปทำเป็นยางเหลวที่ 210°C

4.2 การคอมปาวด์ยางเหลวจากยางแห้ง

4.2.1 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแห้ง STR 5L เพื่อนำไปใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียม

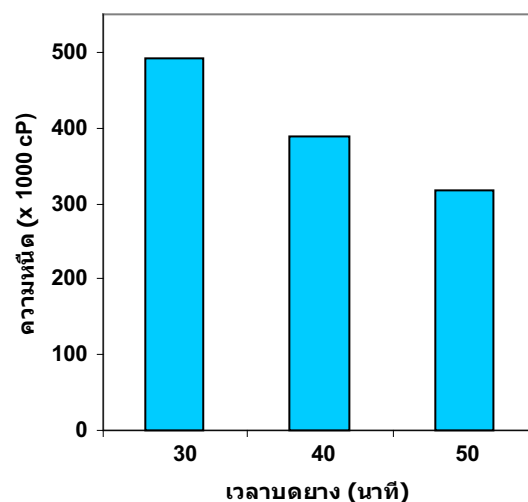
หลังจากบดยางแล้ว นำมาคอมปาวด์กับสารเคมี สารตัวเติม และน้ำมัน วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer ที่อุณหภูมิห้อง ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.5

ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแห้ง STR 5L ที่บดยางโดยไม่ใช้สารช่วยตัดสายโมเลกุล โดยจะบดยางก่อนทำการคอมปาวด์เป็นเวลา 30, 40 และ 50 นาที หลังจากนั้นนำมาคอมปาวด์กับสารเคมีต่างๆ และน้ำมันตามสูตรที่ 3 ในตารางที่ 3.2 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแห้ง STR 5L
(ที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน)

ยางคอมปาวด์	ความหนืด ($\times 10^3$ cP)
STR 5L บดก่อน 30 นาที	493
STR 5L บดก่อน 40 นาที	390
STR 5L บดก่อน 50 นาที	317

จากตารางที่ 4.8 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและเวลาที่บดยางได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแห้ง STR 5L
โดยบดยางก่อนคอมปาวด์ที่เวลาต่างกัน

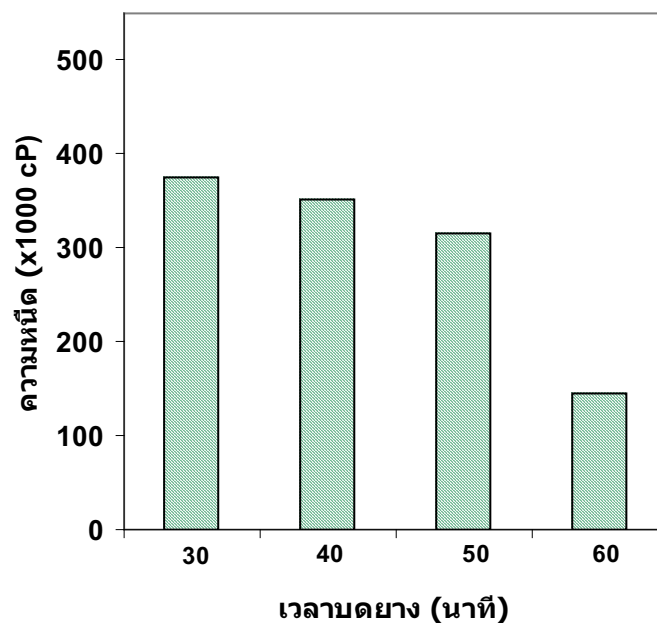
จากรูปที่ 4.8 พบว่าความหนืดของยางเหลวอยู่ในช่วง 300,000-500,000 cP โดยยางที่บดนานขึ้น ก่อนนำมาทำการมาคอมปาวด์จะมีค่าความหนืดลดลง

เมื่อนำยางแท่ง STR 5L ที่บดโดยใช้ MBTS สารช่วยตัดสายโมเลกุลก่อนเป็นเวลา 30, 40, 50 และ 60 นาที แล้วนำมาคอมปาวด์กับสารเคมีต่างๆ และนำมันตามสูตรที่ 4 ในตารางที่ 3.2 และวัดความหนืดด้วย เครื่อง Brookfield Viscometer ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L+MBTS

ยางคอมปาวด์	ความหนืด ($\times 10^3$ cP)
STR 5L+MBTS บดก่อน 30 นาที	375
STR 5L+MBTS บดก่อน 40 นาที	352
STR 5L+MBTS บดก่อน 50 นาที	315
STR 5L+MBTS บดก่อน 60 นาที	146

จากตารางที่ 4.9 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและเวลาที่บดยางได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L+MBTS โดยบดยางก่อนที่เวลาต่างกัน

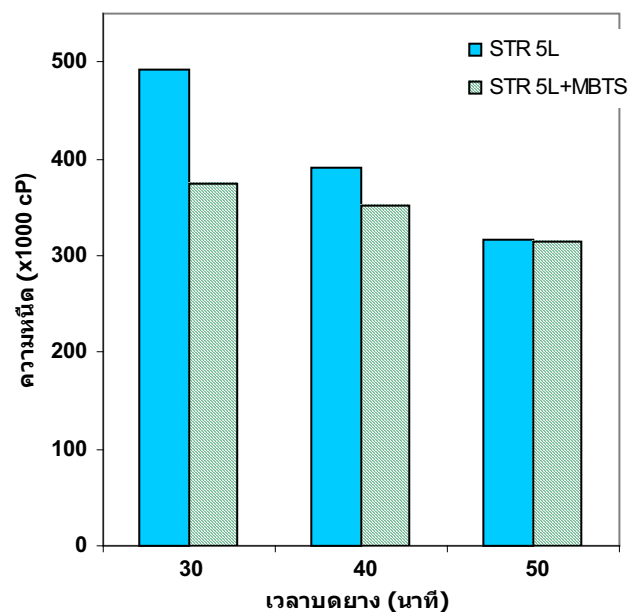
จากรูปที่ 4.9 พบว่าความหนืดของยางเหลวอยู่ในช่วง 146,000-375,000 cP โดยค่าความหนืดของยางจะลดลงตามเวลาบดยางที่นานขึ้นก่อนนำยางมาคอมปาวด์

เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืด ของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L และยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ MBTS เป็นสารตัดสายโมเลกุล ที่เวลาบดยาง 30, 40 และ 50 นาที ก่อนทำการคอมปาวด์กับสารเคมี สารตัวเติม และน้ำมัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L และ STR 5L+MBTS

ยางคอมปาวด์	ความหนืด ($\times 10^3$ cP)	
	STR 5L	STR 5L+MBTS
บดก่อน 30 นาที	493	375
บดก่อน 40 นาที	390	352
บดก่อน 50 นาที	317	315

จากตารางที่ 4.10 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและเวลาที่บดยางได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L, STR 5L+MBTS โดยบดยางก่อนที่เวลาต่างกัน

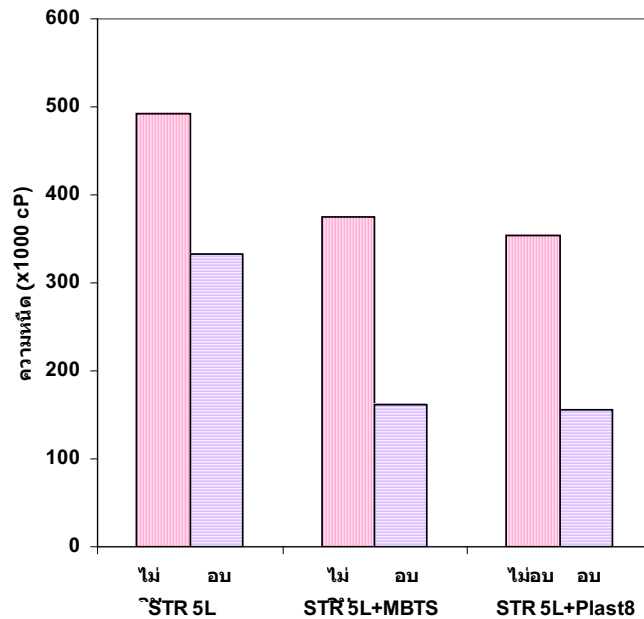
จากรูปที่ 4.10 พบว่ายางเหลวที่เตรียมจากยางแท่งที่ใช้ MBTS เป็นสารตัดสายโมเลกุลจะมีความหนืดน้อยกว่ายางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งที่ไม่ใช้สารตัดสายโมเลกุล อย่างไรก็ตามความหนืดของยางเหลวมีค่าสูงมาก จึงทำให้การหล่อ (casting) บนแผ่นกระจกทำได้ยาก และไม่สามารถนำไปหล่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ผิวหนังเทียมได้

เมื่อเปรียบเทียบความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งที่บด 30 นาที โดยไม่ใช้สารเคมีช่วยตัดสาย และใช้ MBTS และ Plast8 ช่วยตัดสายโมเลกุล ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน และผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 10 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งที่บดยาง 30 นาทีก่อนทำการคอมปาวด์ ทั้งชนิดที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C 10 นาที และไม่ได้ให้ความร้อน

ยางคอมปาวด์	ความหนืด ($\times 10^3$ cP)
STR 5L	493
STR 5L อบที่ 210°C 10 นาที	332
STR 5L+MBTS	375
STR 5L+MBTS อบที่ 210°C 10 นาที	162
STR 5L+ plast 8	354
STR 5L+ plast 8 อบที่ 210°C 10 นาที	155

จากตารางที่ 4.11 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและเวลาที่บดยางได้ดังรูปที่ 4.11

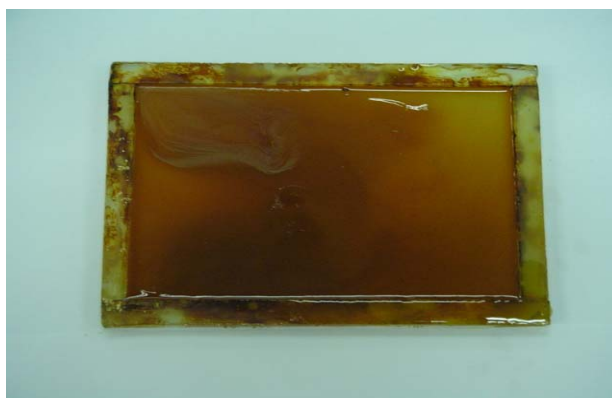


รูปที่ 4.11 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งที่บดยาง 30 นาทีก่อนทำการคอมปาวด์ ทั้งชนิดที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C 10 นาที และไม่ได้ให้ความร้อน

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อนำยางไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 210°C เป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำมาคอมปาวด์กับสารเคมี สารตัวเติม และน้ำมัน จนได้เป็นยางเหลว จะได้ยางเหลวคอมปาวด์ที่มีความหนืดต่ำกว่ายางที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมาก โดยเฉพาะยางที่บดโดยใช้ MBTS และ Plast8 เป็นสารช่วยตัดสายโมเลกุลจะมีความหนืดลดลงมากกว่า 200,000 cP เนื่องจากยางที่ผ่านการให้ความร้อน น้ำหนักโมเลกุลของยางจะน้อยกว่ายางที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน เมื่อนำไปทำเป็นยางเหลวจึงได้ยางเหลวคอมปาวด์ที่มีความหนืดต่ำกว่า

4.2.2 การเตรียมแผ่นยางเหลวจากยางแท่ง STR 5L และการวัลคาไนซ์ยางเหลวเพื่อนำไปใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผิวหนังแขนเทียม

หลังจากนำยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมตามสูตรในตารางที่ 3.2 (สูตรที่ 1-4) ไปหล่อบนแผ่นกระจก และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 และ 120°C เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ได้แผ่นยางเหลวดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่ง หลังการอบที่ 100°C 48 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าหลังการวัลคาไนซ์ยางไม่สุก เนื่องจากใช้น้ำมันสปีนเดิลในปริมาณที่มากเกินไปเพื่อให้ยางสามารถไหลได้ ซึ่งน้ำมันที่ใส่ลงไปจะเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้โมเลกุลของยางอยู่ห่างกันมากขึ้น โอกาสที่โมเลกุลจะเกิดการเชื่อมโยงกันจึงมีน้อยลง [27] ในเวลาและอุณหภูมิที่ทดลองในครั้งนี้

เมื่อทำการคอมปาวด์ยางเหลวตามสูตรในตารางที่ 3.2 (สูตรที่ 5-6) โดยลดปริมาณน้ำมันสปีนเดิลลงจาก 300 phr เป็น 200 phr และเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจาก 50 phr เป็น 75 phr แล้วนำยางเหลวคอมปาวด์มาหล่อบนแผ่นกระจก และนำไปอบที่ 100°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ได้แผ่นยางดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งโดยใช้น้ำมันสปีนเดิล 200 phr และสารตัวเติม 75 phr หลังจากอบที่ 100°C 48 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเมื่อลดปริมาณน้ำมันลง และเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมให้มากขึ้น เมื่อนำไปวัลคาไนซ์ยางเหลวมีโอกาสเกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำมันที่น้อยลงทำให้โมเลกุลของยางอยู่ใกล้กันมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดการเชื่อมโยงกันได้จึงมีมากขึ้นด้วย แต่การลดปริมาณน้ำมันสปีนเคิลลงและเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ยางเหลวคอมปาวด์มีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ยางไหลได้น้อยลง ทำให้ไม่สามารถนำไปหล่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้

การเตรียมยางเหลวจากยางแท่งนั้น การควบคุมให้ยางเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจนสามารถไหลได้ทำได้ยาก ทำให้ต้องใช้น้ำมันในปริมาณมากเพื่อให้ยางสามารถไหลได้ จึงทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงน้อยเมื่อนำไปวัลคาไนซ์ และจะทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพที่ด้อยลงมาก จึงเปลี่ยนมาเตรียมยางธรรมชาติเหลวจากน้ำยางข้นแทน

4.3 ศึกษาการเตรียมยางธรรมชาติเหลวจากน้ำยางข้นและสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางเหลวหลังการวัลคาไนซ์

เตรียมยางธรรมชาติเหลวตามวิธีในข้อ 3.3.6 โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50-55°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง โดยมีการเป่าอากาศและกวนน้ำยางตลอดเวลาที่เกิดปฏิกิริยา ได้ยางธรรมชาติเหลวที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.14 และมีสมบัติดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.14 ลักษณะของยางเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้น

ตารางที่ 4.12 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางเหลวที่เตรียมโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง

ยาง	สมบัติ
ยางเหลวจากน้ำยาง ที่ใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม	$\overline{M}_v$ 18,800
	ความหนืด 528×10^3 cP

หลังจากนั้นนำยางเหลวมาคอมปาวด์กับสารเคมี สารตัวเติม และน้ำมันสปีนเคิล โดยการกวนด้วยใบพัด ตามข้อ 3.3.7 แล้ววัดความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer ได้ผลดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น (ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง) เมื่อใช้เคลย์และซิลิกาเป็นสารตัวเติม

ยางเหลวคอมปาวด์	สมบัติ
ไม่ใช่สารตัวเติม	ความหนืด 30,160 cP
โซนา เคลย์ 20 phr	ความหนืด 37,400 cP
ซิลิกา 20 phr	ความหนืด 58,720 cP

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่ายางธรรมชาติเหลวที่เตรียมจากน้ำยางข้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก ทำให้ยางสามารถไหลได้ และเมื่อนำยางเหลวมาคอมปาวด์กับสารเคมี สารตัวเติม และน้ำมัน แล้ววัดความหนืด จากตารางที่ 4.13 พบว่า ยางเหลวที่คอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นมีความหนืดอยู่ในช่วง 30,160-58,720 cP ซึ่งน้อยกว่ายางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากยางแท่งมาก เมื่อเปรียบเทียบความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์พบว่า ยางคอมปาวด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมมีความหนืดสูงกว่ายางที่ใช้เคลย์ และไม่ใช่สารตัวเติมตามลำดับ

เมื่อนำยางเหลวคอมปาวด์ไปหล่อบนแผ่นกระจกและนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง จนยางสุก จะได้แผ่นยางที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ลักษณะของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น หลังการอบที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง

นำแผ่นยางมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยศึกษา 100%Modulus, 200%Modulus, ความทนแรงดึง, Elongation at break, ความต้านทานการฉีกขาด และความแข็ง ได้ค่าดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น
(ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง) หลังการวัลคาไนซ์ (อบที่ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง)

สมบัติ	ยางคอมปาวด์		
	ไม่ใช้สารตัวเติม	โซนา เคลย์ 20 phr	ซิลิกา 20 phr
100%Modulus (Mpa)	0.0975	0.1043	0.1290
200%Modulus (MPa)	0.1709	0.2319	0.2576
ความทนแรงดึง (MPa) (ก่อนบ่มเร่ง)	0.3492	0.3185	0.3611
ความทนแรงดึง (MPa) (หลังบ่มเร่ง)	-	0.4524	0.4796
Elongation at break (%)	212.1	219.5	220.3
ความต้านทานการฉีกขาด (N/mm)	1.01	1.35	1.47
ความแข็ง (Shore A)	5	6	11

จากตารางที่ 4.14 จะเห็นว่าแผ่นยางมีสมบัติทางกายภาพที่ต่ำมาก โดยยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะมีสมบัติที่ดีกว่ายางที่ใช้เคลย์ และไม่ใช้สารตัวเติม ตามลำดับ

เนื่องจากแผ่นยางคอมปาวด์เหลวที่เตรียมจากยางเหลวที่ใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50-55°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มีสมบัติทางกายภาพที่ต่ำมากจึงลดเวลาการทำปฏิกิริยาลงเป็น 12, 9 และ 6 ชั่วโมง ซึ่งได้ยางเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของยางเหลวที่เตรียมโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม
ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 50-55°C ที่เวลาต่างๆ กัน

ยางเหลว	Mv	ความหนืด (cP)
ทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง	18,800	528 x 10 ³
ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	20,700	671 x 10 ³

ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง	27,800	889×10^3
ทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง	87,200	730×10^4

จากตารางที่ 4.15 จะเห็นว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง น้ำหนักโมเลกุลของยางมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาในการทำปฏิกิริยาจะมีผลต่อการลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้นานขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของยางก็จะลดลง แต่การใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาก็มีจุดอิ่มตัวเช่นกัน (จากงานวิจัยของมะลิ อิทธิฤทธิ์กุล พบว่าหลังจาก 18 ชั่วโมงปฏิกิริยาจะเกิดน้อยมาก) ดังนั้นจะเห็นได้ว่ายางที่เตรียมที่ 9, 12 และ 18 ชั่วโมงมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันและหลังจากทำปฏิกิริยามากกว่า 12 ชั่วโมงน้ำหนักโมเลกุลของยางจะลดลงน้อยมาก จึงเลือกเตรียมยางที่ 9 และ 12 ชั่วโมงไปคอมปาวด์โดยวิธีการกวนด้วยใบพัด และเนื่องจากยางที่เตรียมที่เวลา 6 ชั่วโมงยังมีน้ำหนักโมเลกุลที่ค่อนข้างสูงอยู่เมื่อนำไปคอมปาวด์โดยวิธีการกวนด้วยใบพัด ทำให้ยางผสมเข้ากับน้ำมันและสารเคมีอื่นได้ยาก และยางยังมีความหนืดสูง ไม่สามารถหล่อได้

เมื่อนำยางเหลวที่เตรียมโดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่ 50-55 °C เป็นเวลา 9 และ 12 ชั่วโมง มาคอมปาวด์กับสารเคมี และน้ำมัน โดยแปรปริมาณซิลิกา แล้วนำมาวัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น 100 กรัม ทำปฏิกิริยาที่ 50-55 °C เป็นเวลา 9 และ 12 ชั่วโมง

ยาง	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง
ยางเหลว	671×10^3 cP	889×10^3 cP
ไม่ใช้สารตัวเติม	28,620	32,280 cP
ซิลิกา 5 phr	32,460	36,920 cP
ซิลิกา 10 phr	38,780	48,640 cP
ซิลิกา 20 phr	55,000	76,640 cP

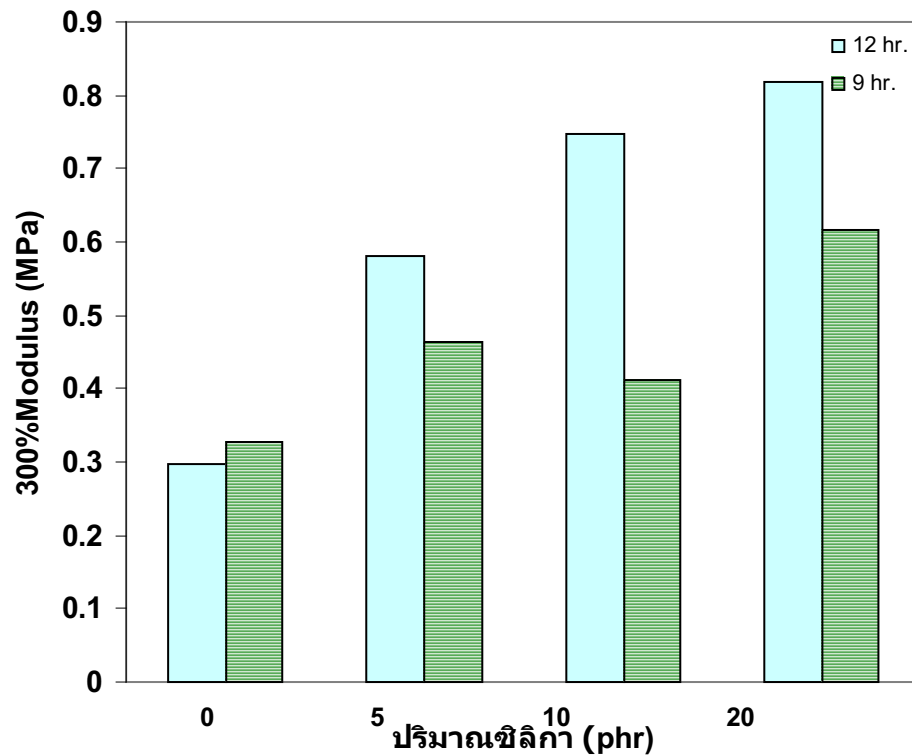
จากตารางที่ 4.16 พบว่ายางเหลวที่ทำการคอมปาวด์แล้วมีความหนืดลดลง และเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นความหนืดของยางเหลวคอมปาวด์ก็จะเพิ่มขึ้น ยางเหลวที่ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมงจะมีความหนืดมากกว่ายางที่ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง แต่ยางทุกสูตรสามารถไหลได้ที่อุณหภูมิห้องและสามารถขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อได้

หลังจากนั้นนำยางเหลวคอมปาวด์ไปหล่อบนแผ่นกระจก และนำไปวัดคาบในสัที่อุณหภูมิ 50°C 6 ชั่วโมง และ 70°C 12 ชั่วโมง ทดสอบสมบัติทางกายภาพได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 %Modulus ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

ปริมาณซิลิกา (phr)	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง			ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง		
	100% Modulus (MPa)	200% Modulus (MPa)	300% Modulus (MPa)	100% Modulus (MPa)	200% Modulus (MPa)	300% Modulus (MPa)
0	0.12	0.19	0.30	0.12	0.22	0.33
5	0.20	0.37	0.58	0.19	0.32	0.46
10	0.24	0.45	0.75	0.14	0.26	0.41
20	0.27	0.51	0.82	0.30	0.40	0.62

จากตารางที่ 4.17 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 300%Modulus และปริมาณซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางเหลวคอมปาวด์ได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 300%Modulus ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ฟีนิลไฮดราซีน

10 phr ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

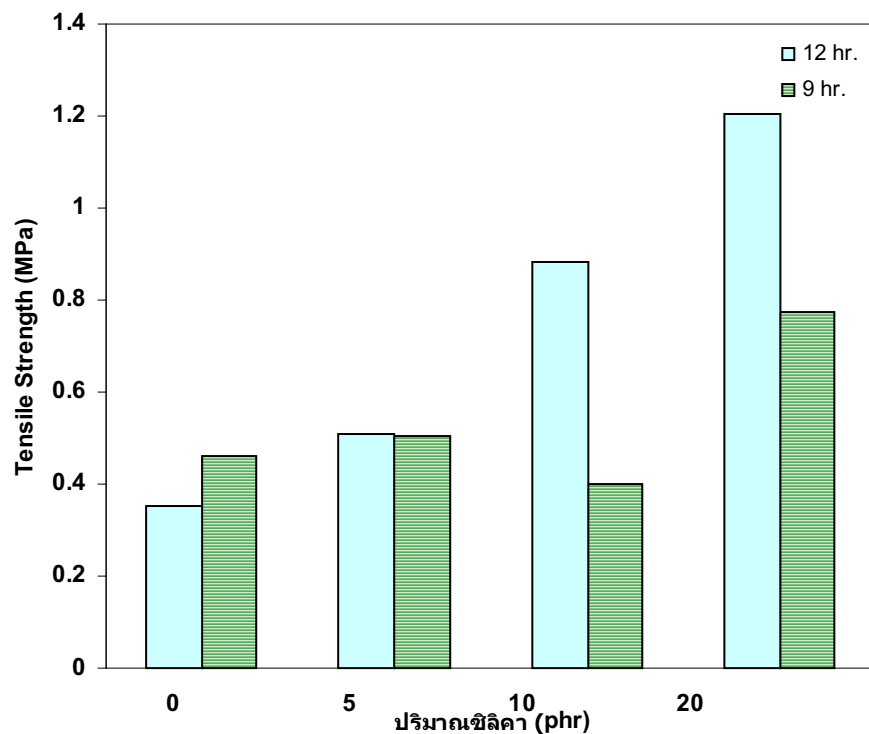
จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าเมื่อไม่ใช้สารตัวเติมค่า 300%Modulus ของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย แต่เมื่อใส่สารตัวเติมทุกปริมาณของสารตัวเติมค่า 300%Modulus ของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่า อาจมาเนื่องจากยางที่ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดต่ำกว่า จึงทำให้การกวนผสมสารเคมีต่างๆ และน้ำมันสปีนเคลือบยางเหลวด้วยใบพัดนั้น สารเคมีสามารถกระจายตัวได้ดีและสม่ำเสมอ แผ่นยางหลังการวัลคาไนซ์จึงมีความแข็งแรงมากกว่า

ตารางที่ 4.18 ความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดรา

ซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

ปริมาณซิลิกา (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)	
	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง
0	0.35	0.46
5	0.51	0.50
10	0.88	0.40
20	1.21	0.77

จากตารางที่ 4.18 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึง และปริมาณซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางเหลวคอมปาวด์ได้ดังรูปที่ 4.17



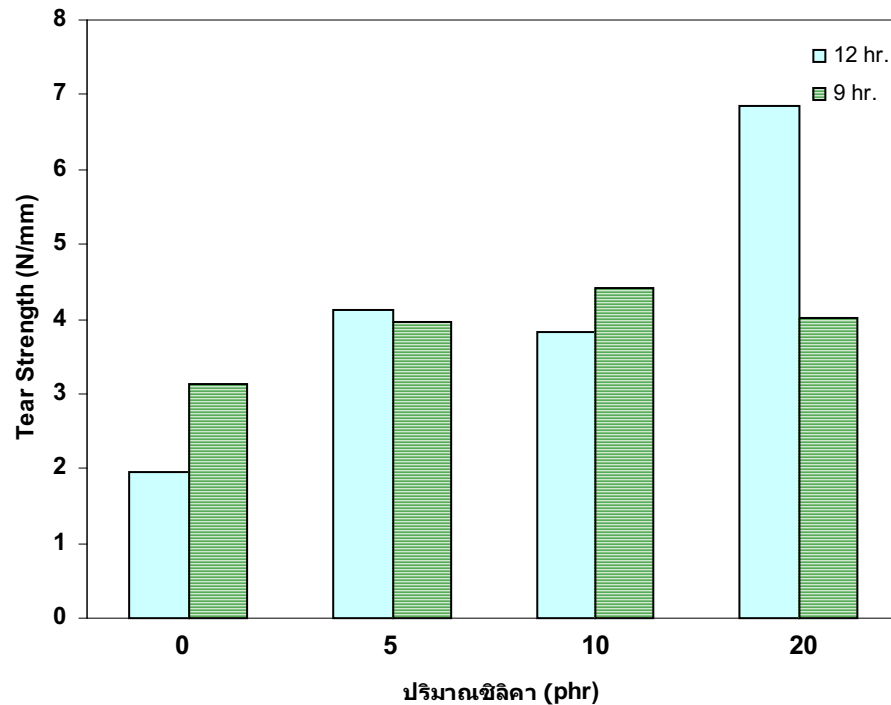
รูปที่ 4.17 ความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มเหมือนกับค่า 300% Modulus คือเมื่อไม่ใช้สารตัวเติมค่าความทนแรงดึงของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่า แต่เมื่อใส่สารตัวเติมทุกปริมาณของสารตัวเติมค่าความทนแรงดึงของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 4.19 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยางข้น ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C

ปริมาณซิลิกา (phr)	ความต้านทานการฉีกขาด (N/mm)	
	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง
0	1.96	3.13
5	4.13	3.96
10	3.82	4.42
20	6.84	4.01

จากตารางที่ 4.19 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการฉีกขาด และ ปริมาณซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางเหลวคอมปาวด์ได้ดังรูปที่ 4.18



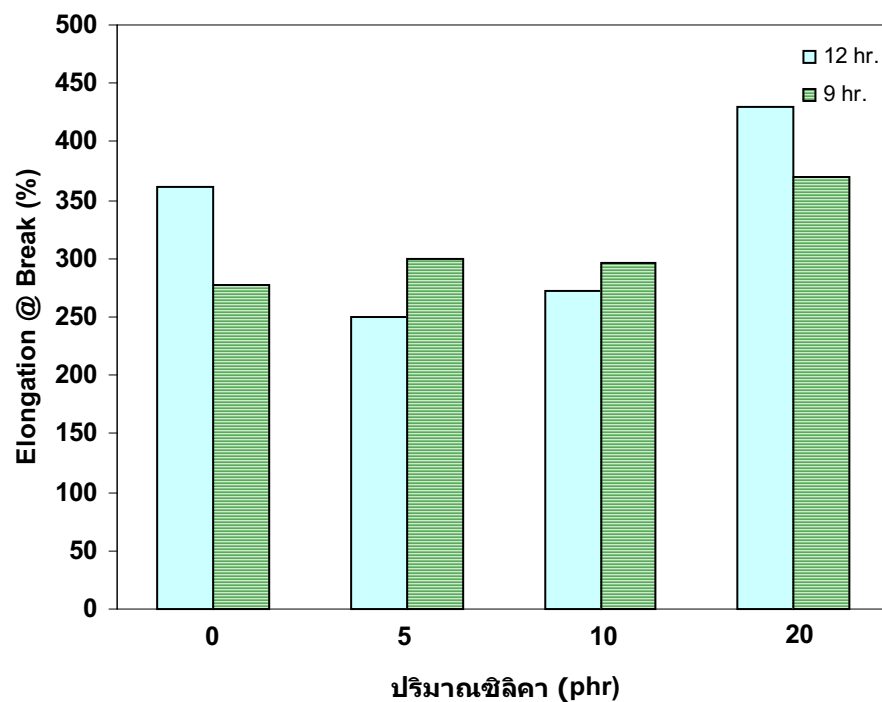
รูปที่ 4.18 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮโดรควิโนน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้สารตัวเติม แต่เมื่อใช้ซิลิกา 20 phr ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่า และเมื่อใช้ซิลิกา 5 และ 10 phr ความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นยางมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.20 ความยืดจนขาด (Elongation at break) ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C

ปริมาณซิลิกา (phr)	Elongation @ break (%)	
	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง
0	361	278
5	250	300
10	273	296
20	430	370

จากตารางที่ 4.20 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยืดจนขาด และปริมาณซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางเหลวคอมปาวด์ได้ดังรูปที่ 4.19



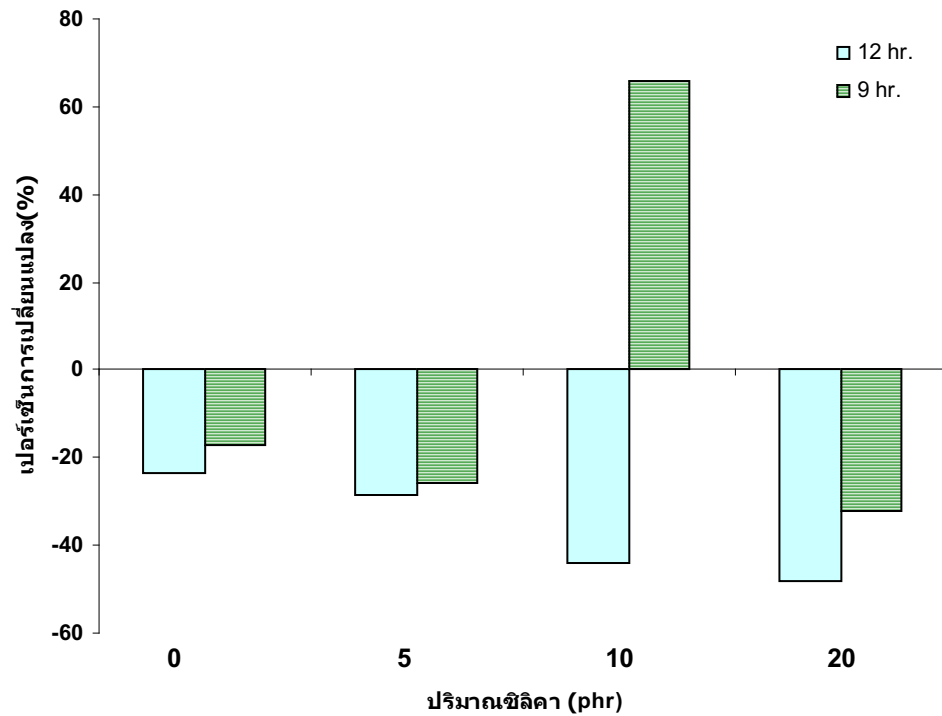
รูปที่ 4.19 Elongation at break ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10% ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50-55°C

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าค่า Elongation at break ของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ใช้สารตัวเติม และใช้ซิลิกา 20 phr และเมื่อใช้ซิลิกา 5 และ 10 Elongation at break ของแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 4.21 ความทนแรงดึงหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน ของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ค่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

ปริมาณ ซิลิกา (phr)	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง			ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง		
	ความทนแรงดึง ก่อนบ่มแรง (MPa)	ความทนแรงดึง หลังบ่มแรง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลง	ความทนแรงดึง ก่อนบ่มแรง (MPa)	ความทนแรงดึง หลังบ่มแรง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลง
0	0.3541	0.4374	23.52	0.4588	0.3807	-17.02
5	0.5100	0.3643	-28.57	0.5045	0.3734	-25.99
10	0.8837	0.4934	-44.17	0.3989	0.6619	65.93
20	1.205	0.6234	-48.27	0.7736	0.5239	-32.28

จากตารางที่ 4.21 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึง และปริมาณซิลิกาที่ใช้เป็นสารตัวเติมในยางเหลวคอมปาวด์ได้ดังรูปที่ 4.20



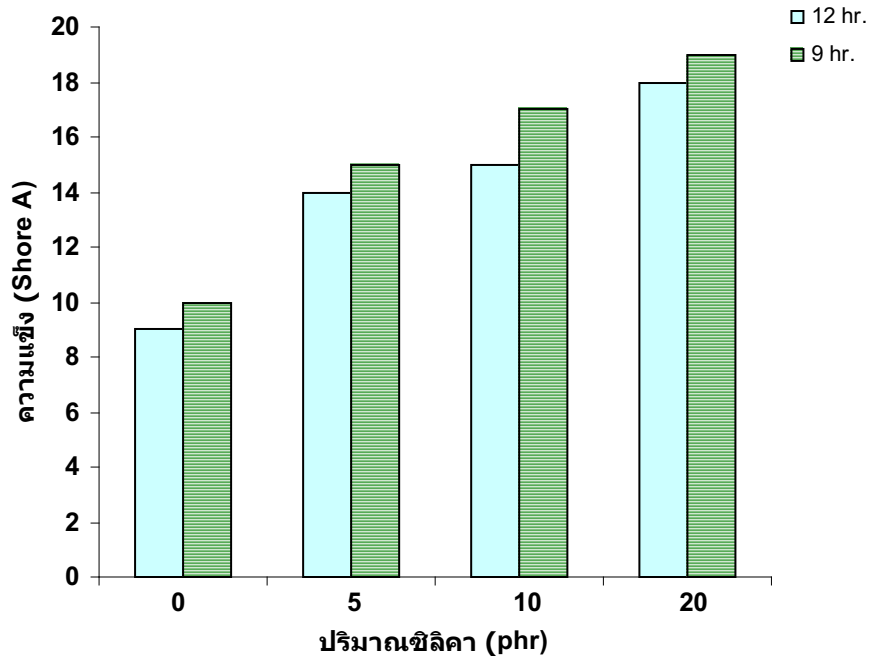
รูปที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้น โดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วัน

จากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าความทนแรงดึงของแผ่นยางหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 7 วันมีค่าลดลง ยกเว้นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง ที่ใช้ซิลิกา 10 phr

ตารางที่ 4.22 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

ปริมาณซิลิกา (phr)	ความแข็ง (Shore A)	
	ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง	ทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมง
0	9	10
5	14	15
10	15	17
20	18	19

จากตารางที่ 4.22 นำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และปริมาณซิลิกาที่ใช้ เป็นสารตัวเติมในยางเหลวคอมปาวด์ได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ความแข็งของแผ่นยางเหลวคอมปาวด์ที่เตรียมจากน้ำยางข้นโดยใช้ 10 %ฟีนิลไฮดราซีน 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม ทำปฏิกิริยา 9 และ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50-55°C

จากรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าแผ่นยางที่เตรียมโดยทำปฏิกิริยา 9 ชั่วโมงมีความแข็งมากกว่าแผ่นยางที่เตรียมจากยางที่ทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง

จะเห็นว่าสมบัติทางกายภาพของแผ่นยางต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับยางทั่วไป การลดเวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้ความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และ Elongation at break ของยางเพิ่มขึ้น การใส่สารตัวเติมทำให้สมบัติของยางดีขึ้น แต่ก็ยังมีค่าต่ำมาก อาจเป็นเพราะยางเหลวมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมากเกินไป คือประมาณ 20,000-27,000 ทำให้ความสามารถในการเชื่อมโยงและเกี่ยวพันกันระหว่างโมเลกุลเกิดได้น้อย โมเลกุลสามารถเลื่อนไถลได้ง่าย นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำมันที่ใช้เพื่อให้ยางสามารถไหลได้ ซึ่งจะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางทำให้โอกาสที่โมเลกุลจะเกิดการเชื่อมโยงกันมีน้อยลง จึงทำให้แผ่นยางหลังการวัลคาไนซ์มีสมบัติไม่แข็งแรง

เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของยางต่ำมาก ฉะนั้นการหล่อผลิตภัณฑ์ผิวหนังแบนเทียม จะทำให้ได้ผิวหนังแบนเทียมที่ไม่แข็งแรง ดึงขาดง่าย จึงเตรียมยางเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นโดยการลดปริมาณฟีนิลไฮดราซีนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลง จากเดิมใช้ 10%ฟีนิลไฮดราซีน 60 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม เป็น 30 กรัม ต่อน้ำยาง 100 กรัม โดยคิดว่าจะได้แผ่นยางเหลวที่มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น