



## รายงานผลการวิจัย

เรื่อง ศักยภาพของน้ำมันสบู่ดำเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในยางวัลคาไนซ์

Potential of Jatropha Oil as Processing Aid in Rubber Vulcanizates

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2559

จำนวน 264,700 บาท

หัวหน้าโครงการ

นางสาววรรรณ เพชรอุไร

ผู้ร่วมโครงการ

นางกาญจนา นาคประสม

ชื่อเรื่อง	งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์
วันที่	11/08/2560

11/08/2560

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ข
สารบัญภาพ	ก
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
กิตติกรรมประกาศ	3
คำนำ	4
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
การตรวจเอกสาร	47
แนวความคิดของงานวิจัย	17
อุปกรณ์และวิธีการ	22
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	43
สรุปผลการวิจัย	78
เอกสารอ้างอิง	81

## สารบัญตาราง

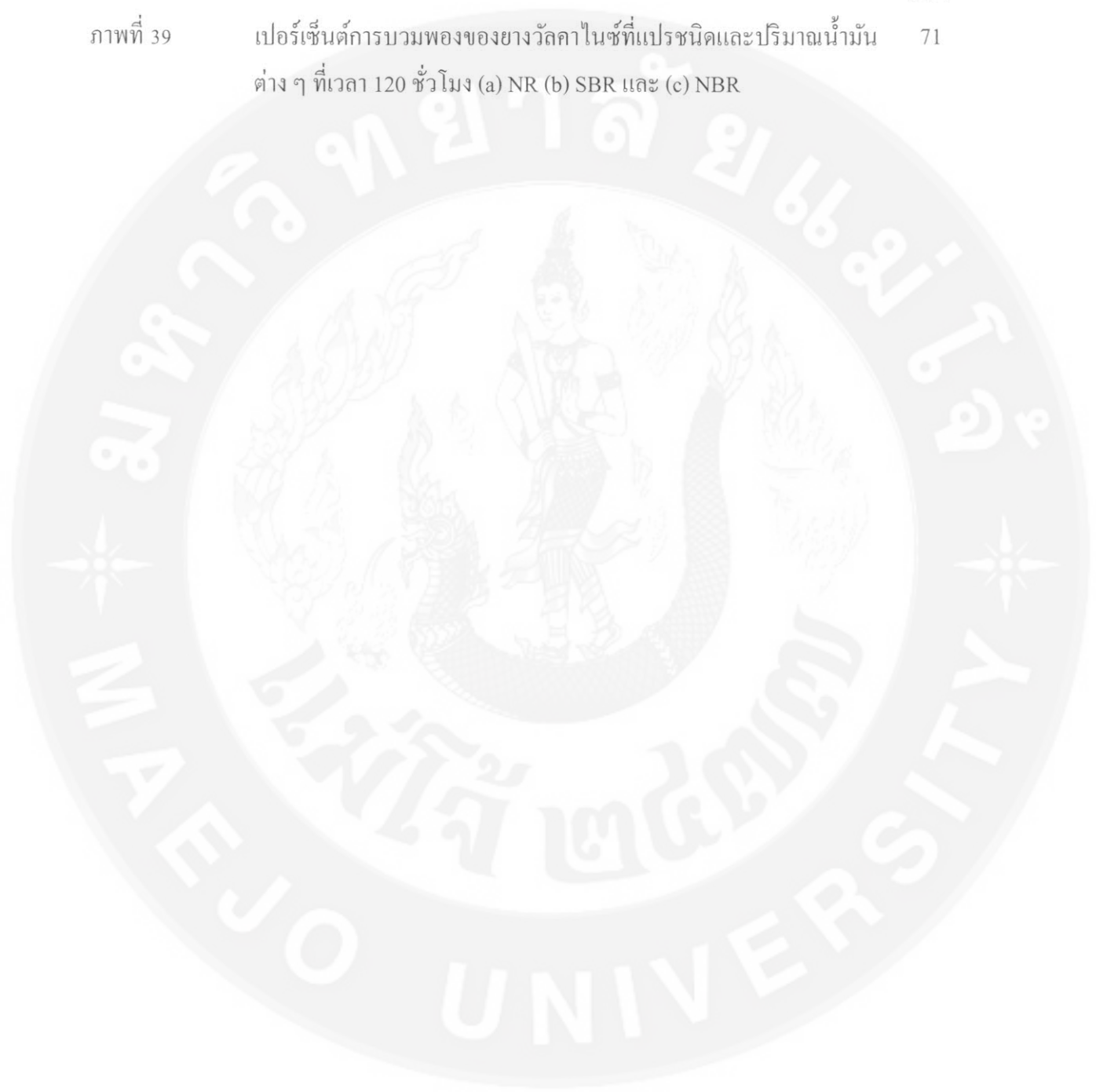
		หน้า
ตารางที่ 1	สมบัติของยาง STR 20	29
ตารางที่ 2	สมบัติของยางสไตรีนบิวตาไดอีน	30
ตารางที่ 3	สมบัติของยางไนไตรล์	30
ตารางที่ 4	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันสนู้ด้า	33
ตารางที่ 5	สมบัติของน้ำมันสนู้ด้า	33
ตารางที่ 6	สภาวะการทดสอบด้วยเทคนิค GC	36
ตารางที่ 7	ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวด์	37
ตารางที่ 8	การจัดลำดับค่าความแข็งจากโปรแกรม Statistic 17.0*	73
ตารางที่ 9	การจัดลำดับค่าปริมาตรการสึกหรอจากโปรแกรม Statistic 17.0*	74
ตารางที่ 10	การจัดลำดับค่าการคืนรูปหลังการกดอัดจากโปรแกรม Statistic 17.0*	75
ตารางที่ 11	การจัดลำดับค่าความทนแรงดึงจากโปรแกรม Statistic 17.0*	76
ตารางที่ 12	การจัดลำดับค่าระยะยืดเมื่อขาดจากโปรแกรม Statistic 17.0*	77

### สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
ภาพที่ 25	ระยะเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	49
ภาพที่ 26	เวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	50
ภาพที่ 27	อัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	51
ภาพที่ 28	ปริมาณยางบาวนด์ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	53
ภาพที่ 29	ความทนแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	55
ภาพที่ 30	มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	56
ภาพที่ 31	มอดูลัสที่ระยะยืด 300 % ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	57
ภาพที่ 32	ระยะยืดเมื่อขาดของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	59
ภาพที่ 33	การกระเดิงตัวของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	61
ภาพที่ 34	ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	63
ภาพที่ 35	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	64
ภาพที่ 36	ปริมาตรการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	66
ภาพที่ 37	การเสียรูปหลังการกดอัดของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	68
ภาพที่ 38	เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 39	เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมัน ต่าง ๆ ที่เวลา 120 ชั่วโมง (a) NR (b) SBR และ (c) NBR	หน้า 71
-----------	---	------------



## ศักยภาพของน้ำมันสบู่ดำเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในยางวัลคาไนซ์

### Potential of Jatropha Oil as Processing Aid in Rubber Vulcanizates

วรวรรณ เพชรอุไร<sup>1</sup> และกาญจนา นาคประสม<sup>2</sup>

Worawan Pechurai<sup>1</sup> and Kanjana Narkprasom<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ไขมันสบู่ดำเปรียบเทียบกับไขมันปิโตรเลียมในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เช่น ยางเอสปีอาร์ และยางไนไตรล์ โดยแปรชนิดและปริมาณน้ำมันที่ 0, 5, 10 และ 15 phr จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดของยางทุกชนิดที่ใช้ไขมันสบู่ดำจะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันปิโตรเลียม โดยค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันทุกชนิด แต่จะให้ผลในทางตรงกันข้ามกับยางไนไตรล์ เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้และเวลาการวัลคาไนซ์ของยางทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมัน โดยไขมันสบู่ดำจะทำให้เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ของยางไนไตรล์เพิ่มขึ้นและทำให้เวลาการวัลคาไนซ์ของยางเอสปีอาร์มีค่าลดลง มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% และความแข็งของยางทุกชนิดมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมัน ในขณะที่ระยะยืดเมื่อขาดมีค่าเพิ่มขึ้น การใช้ไขมันปิโตรเลียมในยางธรรมชาติจะให้ความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าน้ำมันสบู่ดำ ในขณะที่ค่าการกระเด็นตัวของยางทุกชนิดที่ใช้ไขมันต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่าไขมันสบู่ดำสามารถลดการเสีรูปหลังการกดอัด และปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอของยางไนไตรล์ได้ดี จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าไขมันสบู่ดำสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตได้ และสามารถปรับปรุงความทนแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดได้ดีกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

คำสำคัญ: น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันปิโตรเลียม ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ ยางไนไตรล์

### Abstract

In this research, we study the effect of jatropha oil in comparison with petroleum oil in natural rubber (NR) and synthetic rubber (i.e., SBR and NBR). Type and amount of oils were varied at 0, 5, 10 and 15 phr. It was found that the compound with jatropha oil showed lower minimum and maximum torques than that of petroleum oil. These values of NR and SBR compounds also decreased with increasing oil content, whereas it showed the opposite trend for NBR. Scorch time and cure time of the compounds tended to increase as increasing concentrations of oil. Longer scorch time and shorter cure time were observed in NBR and SBR compounds with jatropha oil, respectively. Modulus at 100% and 300% strain, as well as hardness of all vulcanizates decreased with increasing oil content, while elongation at break increased. The vulcanizates with petroleum oil gave higher abrasion resistance than that of jatropha oil, while a similar trend can be observed for rebound resilience. Moreover, it was found that the jatropha oil could be reduced compression set and improved abrasion resistance of NBR vulcanizate. From the results, it concluded that jatropha oil can be used as better alternative processing aid and also improved tensile strength and elongation at break as compared to petroleum oil.

Key words: jatropha oil, petroleum oil, natural rubber, styrene butadiene rubber, nitrile rubber

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ศักยภาพของน้ำมันสบู่ดำเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในยางวัลคาไนซ์ (Potential of Jatropha Oil as Processing Aid in Rubber Vulcanizates) ได้สำเร็จจตุลวง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2559 ผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

วรวรรณ เพชรอุไร

สิงหาคม 2560





## คำนำ

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางมักมีความจำเป็นต้องใช้น้ำมันเป็นส่วนผสมในสูตรเคมียาง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยปรับลดความหนืดของยางคอมพาวนด์ในกระบวนการผสม ทำให้สามารถแปรรูปยางได้ง่ายขึ้น สามารถผสมสารตัวเติมเข้าไปในยางได้เร็วขึ้น ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยให้สามารถเติมสารตัวเติมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่มากขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติบางประการที่ดีขึ้น เช่น ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) และลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำมันในปริมาณที่สูงจะทำให้ความแข็ง (Hardness) และมอดุลัส (Modulus) ของยางวัลคาไนซ์มีค่าลดลง

น้ำมันที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ น้ำมันมิเนอร์ล (Mineral oil) หรือน้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oil) เนื่องจากมีราคาถูกและสามารถเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ อย่างไรก็ตาม น้ำมันเหล่านี้มีปริมาณพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) เป็นส่วนประกอบในปริมาณที่สูง ซึ่งถือเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) โดยเมื่อวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2547 ได้มีเอกสารเผยแพร่จากคณะกรรมการแห่งสุขภาพยุโรป (Council of the European Communities) แจ้งการรับรองข้อเสนอเรื่องการจำกัดการจำหน่ายและการใช้น้ำมันที่มีส่วนประกอบของ PAHs โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2553 จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ในงานวิศวกรรม รวมทั้งผลิตภัณฑ์อื่นๆ หลายชนิดที่ต้องใช้น้ำมันเป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) หรือทำให้ยางนิ่ม (Plasticizer) หรือใช้เพื่อลดต้นทุน (Extender) และส่วนใหญ่นิยมน้ำมันชนิดอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความพยายามที่จะหาน้ำมันชนิดอื่น เช่น น้ำมันจากพืช (Vegetable oil) ซึ่งถือเป็นน้ำมันที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Environmentally friendly) ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradable) ราคาถูก (less costly) และหาได้ง่าย (Readily available) มาใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมที่มี PAHs เป็นองค์ประกอบ (Chandrasekara *et al.*, 2011)

สบู่ดำ (Physic nut or Purging nut) มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Jatropha curcas* L. เป็นพืชในวงศ์ Euphorbiaceae วงศ์เดียวกับยางพารา ละหุ่ง และมันสำปะหลัง มีปลูกอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย เมล็ดสบู่ดำมีปริมาณน้ำมัน 30 - 35% ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตไบโอดีเซลเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล (โคภินาฏ และคณะ, 2551) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากน้ำมันพืชหลายชนิด เช่น น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น จึงทำให้เกิดการแข่งขันด้านราคา และเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำ

ซึ่งประกอบด้วยกรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) กรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มิโตเลอิก (Palmitoleic acid) และมีปริมาณกรดไขมัน (Fatty acid) ที่สูงพอ (Okullo *et al.*, 2012) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำน้ำมันสบู่ดำมาประยุกต์ใช้เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) ในยางคอมพาวนด์ เพื่อทดแทนการใช้ไขมันปิโตรเลียมซึ่งมีองค์ประกอบของสารก่อมะเร็ง โดยงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันสบู่ดำต่อสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำมันปิโตรเลียม และใช้เทคนิค Optimization ในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันสบู่ดำที่เหมาะสม

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันสบู่ดำต่อสมบัติต่างๆ ของยางวัลคาไนซ์
2. เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของน้ำมันสบู่ดำกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์
3. เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันสบู่ดำที่เหมาะสมในยางชนิดต่างๆ

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1. ด้านสิ่งแวดล้อม

น้ำมันสบู่ดำเป็นน้ำมันพืชที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีกรดไขมันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่สูงพอที่จะทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) ซึ่งถือเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของน้ำมันสบู่ดำในอุตสาหกรรมแปรรูปยาง เพื่อทดแทนการใช้ไขมันปิโตรเลียมซึ่งมีองค์ประกอบของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งถือเป็นสารก่อมะเร็ง

## 2. ด้านวิชาการ

(1) ทราบปริมาณน้ำมันสบู่ดำที่เหมาะสมในการใช้เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตทั้งใน  
ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เช่น ยางเอสปีอาร์ และยางไนไตรล์

(2) โครงการมุ่งสร้างงานวิจัยที่นิสิตมีส่วนร่วมในการดำเนินงาน ดังนั้นจึงเป็นการสร้าง  
นิสิตที่มีประสบการณ์ตรงด้านการวิจัยอย่างมีมาตรฐาน

## 3. ด้านอุตสาหกรรม เศรษฐกิจ และพาณิชย์

เป็นการเพิ่มศักยภาพของน้ำมันสบู่ดำในอุตสาหกรรมอื่นนอกเหนือจากการใช้เป็น  
วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างความเข้มแข็งและโอกาสในการ  
แข่งขันทางการตลาดต่อไป

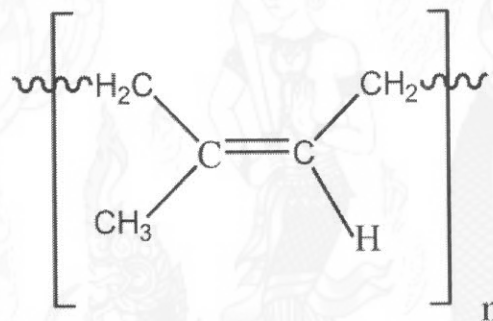
## 4. ด้านสังคมและชุมชน

เป็นการกระตุ้นให้มีการปลูกต้นสบู่ดำมากขึ้น อันก่อให้เกิดการรวมกลุ่มของเกษตรกรซึ่ง  
จะส่งผลต่อคุณภาพชีวิตและความสัมพันธ์อันดีของเกษตรกร ชุมชน และภาครัฐ

## การตรวจเอกสาร

### 1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) (พงษ์ธร, 2548)

ยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้ 2 รูปแบบใหญ่ๆ ได้แก่ น้ำยาง และยางแห้ง โดยยางแห้ง ได้จากการนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด (นิยมใช้กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็ทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยางเพื่อป้องกันเชื้อรา ซึ่งยางแห้งมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ยางแผ่น (Rubber Sheet) ยางเครฟ (Crepe Rubber) และยางแท่ง (Block Rubber) สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (*Cis-1,4-polyisoprene*) กล่าวคือ โมเลกุลของยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีนต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ  $0.93 \text{ g/cm}^3$  ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ) ประมาณ  $-72$  องศาเซลเซียส ยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสถานะ โมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวได้ค่อนข้างเป็นระเบียบ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกดึงยืด ยางจึงสามารถตกผลึก (Crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องมาจากการยึดตัวของยางซึ่งจะทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน และยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น มีความทนแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูสูงขึ้น

## 1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

(1) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง โดยเมื่อแรงกระทำภายนอกหมดไปยางจะสามารถกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (ใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

(2) ความเหนียวติด (Tack) ยางธรรมชาติที่ยังไม่คงรูปมีสมบัติเชื่อมด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ

(3) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงทำให้ยางธรรมชาติแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกดึงยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีความต้านทานแรงดึงสูงมากแม้ไม่ใส่สารตัวเติม ซึ่งสมบัติจะแตกต่างจากยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ที่มักมีค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ จึงไม่สามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้นอกจากจะมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วยเท่านั้น

(4) ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีความต้านทานการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น พบว่ายางธรรมชาติมีความต้านทานการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูงมาก

(5) การเสีชรูปร่างหลังการกดอัด (Compression set) ยางธรรมชาติมีค่า compression set ก่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง แต่ในที่อุณหภูมิต่ำเกินไปยางธรรมชาติจะสูญเสียความยืดหยุ่นทำให้ไม่ทนต่อการกดอัดส่งผลให้ค่า compression set สูง และที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปยางธรรมชาติจะมีค่า compression set สูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อนทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ

(6) การกระเดิงตัว (Rebound resilience) ยางธรรมชาติมีค่าการกระเดิงตัวสูง (ยกเว้นยางบิวทาไดอิน) ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งยางธรรมชาติมีความร้อนสะสมต่ำทำให้ยางธรรมชาติเหมาะกับการผลิตยางรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก สาเหตุที่ไม่ใช่ยางที่มีความร้อนสะสมสูงเพราะอาจจะทำให้ยางระเบิดได้

## 1.2 การใช้งานของยางธรรมชาติ

(1) ยางธรรมชาติมีสมบัติแข็งแรงด้านความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ ยาง ถูยางอนามัย และยางรัดของ เป็นต้น

(2) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนสะสม (Heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (Tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางล้อรถบรรทุก และยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น

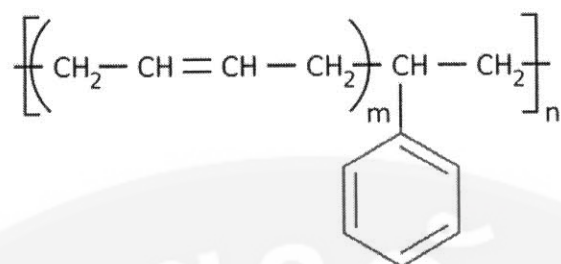
(3) ยางธรรมชาติมีความต้านทานการฉีกขาด (Tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีความต้านทานการฉีกขาดขณะร้อนสูง

## 2. ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber, SR) (พงษ์ธร, 2548)

ยางสังเคราะห์เป็นยางที่มีลักษณะทางเคมีและมีสมบัติที่แตกต่างจากยางธรรมชาติ โดยยางสังเคราะห์มีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างกัน ซึ่งยางสังเคราะห์บางชนิดก็มีใช้เฉพาะในห้องปฏิบัติการและอีกหลายชนิดก็มีใช้ในอุตสาหกรรมเท่านั้น เช่น ในงานวิจัยจะใช้ยางสังเคราะห์ทั้งหมด 2 ชนิด คือ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางไนไตรล์

### 2.1 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene Butadiene Rubber, SBR)

ยาง SBR เป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้มากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม การสังเคราะห์และผลิตยาง SBR ทำได้โดยการเตรียมโคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวทาไดอีนด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ได้เป็นยาง SBR หรือ Buna-S



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสไตรีนบิวทาไดอิน

### ก. สมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวทาไดอิน

(1) ความเหนียวติดกัน (Tack) ของ SBR มีความเหนียวติดกันต่ำ ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ จึงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติที่มีสมบัติการเหนียวติดที่ดีเข้าช่วย

(2) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ของ SBR มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ และความยืดหยุ่นของยางจะลดลงเมื่อปริมาณสไตรีนสูงขึ้น

(3) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากยาง SBR ไม่สามารถดกผลึกได้เมื่อดึงยืด ยางชนิดนี้จึงมีความต้านทานแรงดึงต่ำ แต่การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปจะสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงของยาง SBR ให้สูงใกล้เคียงกับยางธรรมชาติได้

(4) ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) ของ SBR ที่เสริมแรงด้วยสารเสริมแรง เช่น เชม่าดำ จะมีความต้านทานการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย

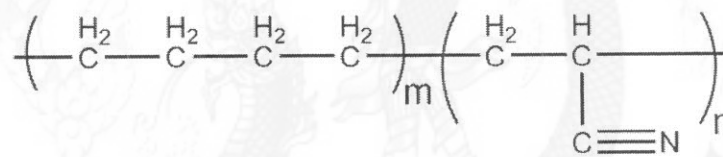
(5) การกระเดิงตัว (Rebound resilience) ของ SBR มีค่าการกระเดิงตัวต่ำกว่ายางธรรมชาติมาก ดังนั้นเมื่อถูกใช้งานแบบพลวัต ยาง SBR จะมีความร้อนสะสมสูงจึงไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตยางล้อรถยนต์ เพราะความร้อนสะสมที่สูงมากอาจทำให้ยางระเบิดได้

## ข. การใช้งานของยางสไตรีนบิวทาไดอีน

ยาง SBR ถูกนำไปใช้ในการผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มไฟฟ้า ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร และใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อของยานพาหนะขนาดเล็กโดยผสมกับยางชนิดอื่น เช่น ยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอีน เป็นต้น

### 2.2 ยางไนไตรด์ (Nitrile rubber, NBR)

ยางไนไตรด์เป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรด์ (Acrylonitrile monomer) และบิวทาไดอีน (Butadiene monomer) ซึ่งจะประกอบไปด้วยปริมาณอะคริโลไนไตรด์ตั้งแต่ 18-51% ซึ่งหมู่อะคริโลไนไตรด์จะทำให้โมเลกุลของยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้มีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่าง ๆ ได้ดี ในขณะที่ส่วนของบิวทาไดอีนที่มีอยู่ในโมเลกุลจะเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นและเป็นตำแหน่งที่โมเลกุลเกิดปฏิกิริยาการคงรูป



ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างทางเคมีของยางไนไตรด์

### ก. สมบัติทั่วไปของยางไนไตรด์

(1) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยาง NBR มีความยืดหยุ่นดีต่อยางธรรมชาติและยาง SBR เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นอะคริโลไนไตรด์ และถ้าปริมาณอะคริโลไนไตรด์สูงขึ้น ความยืดหยุ่นก็จะด้อยลง ดังนั้นถ้าต้องการยาง NBR ที่มีความยืดหยุ่นสูงควรใช้ยางเกรดที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรด์ต่ำ ๆ หรือใช้เขม่าดำเกรดที่อนุภาคใหญ่ เช่น N770 เป็นต้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ยางไนไตรด์ที่มีปริมาณอะคริโลไนไตรด์สูงจะมีความแข็งแรงลดลงอย่างรวดเร็วและมีสมบัติการกระเด็นตัวที่สูงขึ้น

(2) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เนื่องจากยางไนไตรด์ไม่สามารถตกผลึกเมื่อดึงยืดส่งผลให้ยางชนิดนี้มีความต้านทานแรงดึงต่ำ จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย



(3) ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) ของไนไตรล์มีความต้านทานการขัดถูสูง หากในสูตรมีสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย ยางคงรูปที่ได้จะมีความต้านทานการขัดถูที่สูงกว่ายางธรรมชาติและยาง SBR ที่ส่วนผสมเดียวกัน

#### ข. การใช้งาน

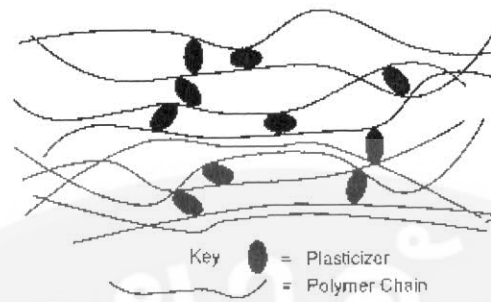
การใช้งานของยางไนไตรล์ส่วนใหญ่จะนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน ทนทานต่อความร้อนและต้านทานการขัดถูได้ดี เช่น ประเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน และยางเคลือบลูกกลิ้ง เป็นต้น

### 3. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) (พงษ์ธร, 2548)

พลาสติไซเซอร์ คือ สารที่ใส่ลงไปในการผลิตเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและเพิ่มความสามารถในการใช้งาน โดยพลาสติไซเซอร์จะไปลดความแข็งของยางและช่วยให้ยางแปรรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์มีชื่อเรียกที่ต่างกันตามปริมาณที่ใส่ เช่น การใส่พลาสติไซเซอร์ในปริมาณที่ไม่เกิน 5 ส่วน จะเรียกว่าเป็น สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aid) ซึ่งเป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปทำอันตรกิริยากับยางได้ง่ายขึ้น หากใช้ในปริมาณ 5-15 ส่วน จะเรียกเป็น สารช่วยให้ยางนิ่ม (Softener) เป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อให้ยางนิ่มทั้งขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์และวัลคาไนซ์แล้ว และหากใช้ในปริมาณที่มากกว่า 15 ส่วน จะเรียกว่า สารลดต้นทุน (Extender) หรือ Oil master batch

#### 3.1 กลไกการพลาสติไซเซชัน (Mechanism of Plasticization)

พอลิเมอร์แต่ละชนิดจะประกอบด้วยหลายสายโซ่โมเลกุล โดยแต่ละโมเลกุลจะเชื่อมต่อกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waal force) โดยที่พลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปไม่ได้เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ แต่พลาสติไซเซอร์จะแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์โดยมีหน้าที่ทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง



ภาพที่ 4 กลไกการทำงานของพลาสติกไซเซอร์

### 3.2 หน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์

(1) เพื่อช่วยในการแปรรูปยาง โดยทั่วไปการนำสารตัวเติมใส่ลงไปในช่วงจะทำให้ยางแข็งขึ้น แปรรูปยาก รวมทั้งทำให้ยางไหลในเบ้าพิมพ์ได้ยาก แต่การใส่พลาสติกไซเซอร์จะทำให้ยางนิ่มขึ้น แปรรูปง่าย และทำให้ยางไหลเข้าเบ้าพิมพ์ได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าใส่ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ยางนิ่มเกินไปส่งผลให้เกิดปัญหาฟองอากาศในขณะแปรรูป

(2) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง ยางที่ใส่พลาสติกไซเซอร์จะนิ่มลง โดยการที่ความแข็งของยางลดลงนี้จะทำให้หุ้มดูลึศเพิ่มขึ้น และมีความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น

(3) เพื่อลดต้นทุน การใส่พลาสติกไซเซอร์ในยางในปริมาณสูงจะช่วยให้ยางสามารถผสมสารเคมีได้มากขึ้น ซึ่งทำให้ลดต้นทุนได้เนื่องจากปริมาณยางลดลง

(4) เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง การใส่พลาสติกไซเซอร์ลงไปในช่วงจะทำให้ยางนิ่มลง ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการผสมและแปรรูปยางรวมทั้งอุณหภูมิในการผสมและแปรรูปยางก็จะลดลง

### 3.3 ประเภทของพลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการทำงาน คือ พลาสติกไซเซอร์ทางเคมี และพลาสติกไซเซอร์ทางกายภาพ

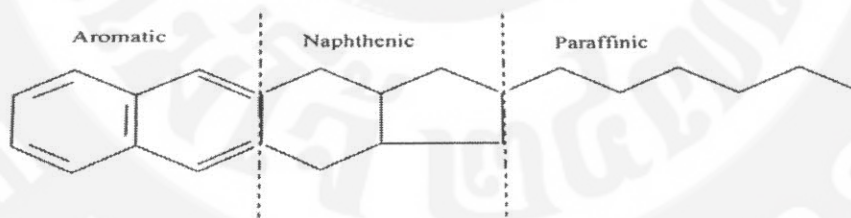
ก. พลาสติกไซเซอร์ทางเคมี (Chemical plasticizer) คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในช่วงในปริมาณที่น้อยจะทำให้ยางนิ่มและลดเวลาการบดยาง ในบางครั้งสารเคมีดังกล่าวอาจเรียกว่า เปปไท

เซอร์ (Peptizer) สารเคมีเหล่านี้เป็นสารรับอนุมูลอิสระและช่วยให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันมีประสิทธิภาพ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ในกระบวนการบดขย้าง (Mastication)

ข. พลาสติไซเซอร์ทางกายภาพ (Physical plasticizer) คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไปข้างแล้วจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลยาง ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจะนิ่ม และแปรรูปได้ง่าย ตัวอย่าง พลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำมันจากปิโตรเลียม น้ำมันพืชต่าง ๆ กรดอินทรีย์ และน้ำมันเอสเทอร์ เป็นต้น

#### 4. น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) หรือน้ำมันมินเนอรัล (Mineral oils) (พงษ์ธร, 2548)

น้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่นิยมใช้เป็นสารหล่อลื่นในอุตสาหกรรมยาง เพราะมีราคาถูก หาได้ง่าย และเข้ากับยางได้หลายชนิด โดยน้ำมันปิโตรเลียมเป็นน้ำมันที่ได้จากการกลั่นของน้ำมันที่ใช้กับรถยนต์และน้ำมันก๊าดออกไปแล้ว โดยน้ำมันชนิดนี้จะมีจุดเดือดสูงและเป็นน้ำมันที่มีขนาดโมเลกุลกว้าง ประมาณ 300 ถึง 600 ในโมเลกุลของน้ำมันปิโตรเลียมจะประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ และมีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจนปะปนเล็กน้อย โดยน้ำมันชนิดนี้จะแบ่งตามโครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนได้ออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ อะโรมาติก แนฟทีนิก และพาราฟินิก ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันปิโตรเลียม

##### 4.1 น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)

เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีน (benzene ring) อย่างน้อย 1 หมู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไป  $C_n H_n$  และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติกอยู่ 65-85%

#### 4.2 น้ำมันแนฟทีนิก (Naphthenic oil)

เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (Alicyclic hydrocarbon) คือ มีโครงสร้างเป็นแบบวงแหวนปิดและพันธะเดี่ยว มีสูตรโครงสร้างทั่วไป  $C_n H_{2n}$  และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติกอยู่ 20-40%

#### 4.3 น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil)

เป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไป  $C_n H_{2n+2}$  และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติกอยู่ 19-30%

### 5. น้ำมันพืช (Vegetable oils) (Wikipedia, 2008)

คือ น้ำมันที่ผลิตได้จากพืชต่างๆ เช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง เมล็ดทานตะวัน ดอกคำฝอย ปาล์ม น้ำมัน มะพร้าว ละหุ่ง และสบู่ดำ เป็นต้น โดยทั่วไปน้ำมันพืชเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) ที่มีความหนืดสูง มีโครงสร้างเป็น  $C_3 H_5$  เชื่อมต่อกับกรดไขมันซึ่งมีองค์ประกอบชนิดต่างๆ กัน และมีปริมาณไขมันต่าง ๆ ทั้งกรดไขมันอิ่มตัว และกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้างถึงร้อยละ 94-96 ของน้ำหนักโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ทำให้น้ำมันพืชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน น้ำมันที่ได้จากพืชสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันที่สามารถบริโภคได้ และน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้

#### 5.1 น้ำมันพืชที่สามารถบริโภคได้ (Edible oils)

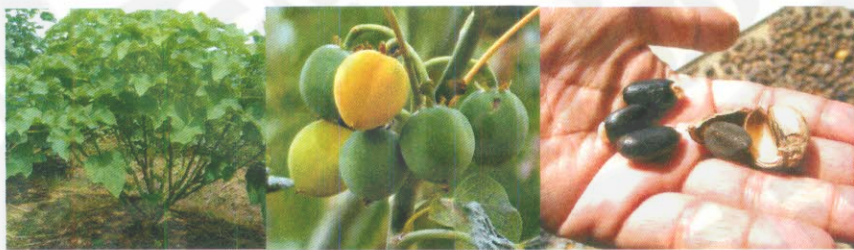
คือ น้ำมันที่ใช้ในการทอด การอบ และการปรุงอาหาร ประเภทอื่น ๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการเตรียมอาหารและเครื่องปรุงอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน เช่น การทำน้ำสลัด โดยทั่วไปน้ำมันชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ถึงแม้ว่าน้ำมันบางชนิดที่มีไขมันอิ่มตัวสูง เช่น น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันปาล์ม ตัวอย่างน้ำมันที่สามารถบริโภคได้ ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันมะพร้าว และน้ำมันมะกอก เป็นต้น

## 5.2 น้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ (Non-edible oils)

คือ น้ำมันที่มีส่วนประกอบที่เป็นพิษ ซึ่งไม่เหมาะสมในการนำมาบริโภค หรือใช้ประกอบอาหารในมนุษย์ โดยน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ มีอยู่ประมาณ 75 ชนิด โดยแบ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากเมล็ด 26 ชนิด คิดเป็น 30 % ของน้ำมันที่บริโภคไม่ได้ทั้งหมด โดยส่วนใหญ่ น้ำมันเหล่านี้มักถูกใช้ทำเป็นไบโอดีเซลทดแทนน้ำมันดีเซลที่นิยมใช้ เนื่องจากน้ำมันเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Renewability) และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradation) อีกด้วย แต่ข้อเสียของน้ำมันชนิดนี้ คือ มีความหนืดสูง ระเหยยาก และมีสารตกค้างของคาร์บอนเป็นจำนวนมาก จึงมีการใช้งานที่ไม่แพร่หลาย ตัวอย่างน้ำมันในกลุ่มนี้ ได้แก่ น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันเมล็ดฝ้าย และน้ำมันเมล็ดคาง เป็นต้น

### 5.2.1 น้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil)

สบู่ดำ (Jatropha) เป็นพืชที่เมล็ดมีพิษนอกเป็นสีดำและน้ำมันที่สกัดออกมาสามารถนำไปทำสบู่ได้ จึงเรียกพืชชนิดนี้ว่า สบู่ดำ ผลของสบู่ดำประกอบด้วย Toxalbumine และยังมี phorbol esters ซึ่งทำให้มีผลต่อระบบทางเดินอาหารและการหายใจ โดยเมล็ดสบู่ดำจัดเป็นสารมีพิษที่เรียกว่า Curcin เมื่อรับประทานจะเกิดอาการท้องเดินเหมือนสลอด สบู่ดำจึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้



(ก) ต้นสบู่ดำ

(ข) ผลสบู่ดำ

(ค) เมล็ดสบู่ดำ

ภาพที่ 6 ส่วนต่างๆ ของต้นสบู่ดำ

### (ก) องค์ประกอบของเมล็ดสบู่ดำ

เมล็ดในของสบู่ดำมีความชื้น เถ้าโปรตีน ไขมัน และเส้นใยในปริมาณที่แตกต่างกันตามแหล่งที่เก็บตัวอย่าง ดังนี้ ความชื้น 3.8 - 7.8% เถ้า 3.8 - 6.4% โปรตีน 20.2 - 28.4% ไขมัน 46.7 - 59.8% และเส้นใย 0.9 - 4.2% ในส่วนของไขมันมีกรดไขมันที่สำคัญ 4 ชนิด คือ กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดโอเลอิก (Oleic acid) และกรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) เช่นเดียวกับน้ำมันปาล์ม โดยกรดปาล์มิติกและสเตียริกมีน้อยเพียง 15.38% และ 6.24% ตามลำดับ ส่วน โอเลอิก และไลโนเลอิก มีค่อนข้างสูง คือ 40.23% และ 36.32% ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณกรดไขมันดังกล่าวอาจแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยขึ้นอยู่กับแหล่งที่ปลูก

### (ข) การสกัดน้ำมันสบู่ดำ

นำ ผลสบู่ดำแห้งที่แก่จากต้นมาแกะทะาะเปลือกออกให้เหลือเฉพาะเมล็ด นำไปล้างน้ำทำความสะอาด ผึ่งลมให้แห้งแล้วทุบเมล็ดให้แตก นำมาตากแดด 30 นาที จากนั้นนำมาเข้าเครื่องสกัดและนำน้ำมันที่ได้มากรองเศษผงออก โดยเมล็ดสบู่ดำ 4 กิโลกรัมสามารถสกัดน้ำมันได้ 1 ลิตร

### แนวความคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการประยุกต์ใช้น้ำมันสบู่ดำซึ่งเป็นน้ำมันพืชที่ไม่สามารถบริโภคได้ (Non-edible vegetable oil) เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาถูก สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น และนิยมใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel) มาประยุกต์ใช้เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) ในการแปรรูปยาง เพื่อทดแทนการใช้น้ำมันปิโตรเลียมซึ่งมีส่วนประกอบของพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งถือเป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic) โดยเน้นศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันสบู่ดำในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำมันปิโตรเลียม เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าและศักยภาพของน้ำมันสบู่ดำในอุตสาหกรรมยาง

มีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้น้ำมันพืชเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในการแปรรูปยางเป็นจำนวนมาก ดังเช่นงานวิจัยต่อไปนี้

Kuriakose and Rajendran (1995) ศึกษาการใช้น้ำมันรำข้าว (Rice-bran oil) ในยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน จากผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำมันรำข้าวในยางเอสปีอาร์ผสมเขม่าดำไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ (Cure characteristics) และ

ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทางฟิสิกส์ที่เทียบเท่ากับยางที่ผสมน้ำมันจากปิโตรเลียม ดังนั้นสรุปได้ว่าสามารถใช้ไขมันรำข้าวแทนการใช้สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) กรดไขมัน (Fatty acid) และแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) ในยางเอสปีอาร์ได้ เนื่องจากน้ำมันรำข้าวมีปริมาณกรดไขมันและฟีนอล (Phenol) ที่สูงพอที่จะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วม (Co-activator) และสารแอนติออกซิแดนซ์ ตามลำดับ

Nandan et al. (1996) ศึกษาการใช้ไขมันเมล็ดฝ้าย (Linseed oil) ในยางไนไตรล์ (NBR) จากผลการทดลองพบว่าการเติมน้ำมันเมล็ดฝ้ายในยางไนไตรล์จะทำให้ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) และอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) มีค่าเพิ่มขึ้น ความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่เติมน้ำมันเมล็ดฝ้ายมีค่าต่ำกว่าความหนืดของยางคอมพาวนด์ที่เติมไดออกทิลพทาเลท (DOP) เล็กน้อย ปริมาณน้ำมันเมล็ดฝ้ายที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2-5 phr นอกจากนี้พบว่าสามารถใช้ไขมันเมล็ดฝ้ายแทนการใช้ DOP ปริมาณ 6 phr และกรดสเตียริก ปริมาณ 2 phr ได้ รวมทั้งสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

Ismail and Anuar (2000) ศึกษาการใช้ไขมันปาล์มเป็นสารกระตุ้น (Activator) ในยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมเขม่าดำ (Carbon black) ผลจากการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์พบว่าเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (Scorch time) และเวลาวัลคาไนซ์ (Cure time) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันปาล์ม สมบัติพลวัต (Dynamic properties) ในรูปของมอดูลัสสะสมสูงสุด (Maximum elastic modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันปาล์ม ในขณะที่มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) และแทนต์เดลตา ( $\tan \delta$ ) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้พบว่าการเกิดรีเวอร์ชัน (Reversion) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันปาล์ม ในขณะที่อายุความล้า (Fatigue life) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Kundu and Kukreja (2002) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันพืชในยางผสมระหว่างธรรมชาติ (NR) กับยางบิวทาไดอีน (BR) ที่ปริมาณ 70/30 โดยผสมเขม่าดำที่ปริมาณ 50 phr จากการทดลองพบว่าผลต่างของค่าแรงบิด (Torque difference) ซึ่งบ่งชี้ถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุลยางมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าแทนต์เดลตา ( $\tan \delta$ ) ความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation at break) และความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาตรการสึกหรอ (Abrasion loss) ความแข็ง (Hardness) และมอดูลัสที่ระยะยืด 300%

มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันพืชจนถึง 3 phr เนื่องจากผลของ Coupling action และการมีน้ำมันเป็นชั้นบางๆ (Monolayer) ปกคลุมอยู่บริเวณอินเตอร์เฟซของเขม่าดำกับยาง แต่เมื่อปริมาณน้ำมันมากกว่า 3 phr จะให้ผลดังกล่าวในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากอิทธิพลของการหล่อลื่นสายโซ่โมเลกุลยาง (Plasticising action) ของน้ำมันพืช แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการกระเดิงตัว (Rebound resilience) และความต้านทานการฉีกขาด (Tear strength) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้น

Chandrasekara *et al.* (2011) ศึกษาการใช้ไขมันพืชอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized vegetable oil) เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aid) และสารกระตุ้น (Activator) ในยางธรรมชาติคอมพาวนด์สูตรดอกยางรถบรรทุก จากการทดลองพบว่าน้ำมันปลั้มอีพอกซิไดซ์ (EPO) มีสมบัติด้านการแปรรูป อันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยาง การกระจายตัวของเขม่าดำ และความต้านทานความร้อนที่ดีกว่าน้ำมันพืชอีพอกซิไดซ์ชนิดอื่น น้ำมันดอกทานตะวันอีพอกซิไดซ์ (ESFO) สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเร่ง (Accelerator) ร่วมกับสารในกลุ่มซัลฟิโนไมด์เพื่อแก้ปัญหาการรีเวอร์ชันในยางได้ น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ (ESBO) EPO และ ESFO สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตได้ดีกว่าน้ำมันอะโรมาติกที่ได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียม จากผลลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติทางฟิสิกส์สรุปได้ว่าน้ำมัน EPO สามารถนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นในยางคอมพาวนด์ได้

อนุวัติ และคณะ (2548) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของการใช้น้ำมันพืช เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปลั้ม น้ำมันเมล็ดขางพารา เป็นพลาสติกไซเซออร์ในยาง STR 5L และ SBR 1502 โดยเปรียบเทียบกับน้ำมันอะโรมาติก ที่ปริมาณตั้งแต่ 0-10 phr พบว่าน้ำมันพืชจะให้ค่าความหนืดมูนิที่น้อยกว่าน้ำมันอะโรมาติก แต่เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้และเวลาวัลคาไนซ์ของยางมากกว่า การใช้น้ำมันอะโรมาติกทั้งในยาง STR 5L และ SBR 1502 ให้ค่าความหนืดมูนิที่สูงกว่าน้ำมันมะพร้าว น้ำมันปลั้ม และน้ำมันเมล็ดขางพารา ตามลำดับ เมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดมูนิของยางคอมพาวนด์ลดลง และทำให้ค่าทอร์กสูงสุด (Maximum torque,  $M_H$ ) และทอร์กต่ำสุด (Minimum torque,  $M_L$ ) ลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยที่น้ำมันแต่ละชนิดจะให้ค่า  $M_H$  ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ และเวลาวัลคาไนซ์ของยางจะมีค่ามากขึ้นตามปริมาณของน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยที่น้ำมันพืชจะมีเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ และเวลาวัลคาไนซ์



ของอย่างมากกว่าการใช้น้ำมันอะโรมาติก และการใช้น้ำมันอะโรมาติกมีผลให้สมบัติความต้านทานต่อการหักงอ ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความสามารถในการยืดจนขาดที่ดีกว่าน้ำมันพีช แต่การใช้น้ำมันพีชมีแนวโน้มให้ความแข็งแรง โมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าน้ำมันอะโรมาติก ส่วนการใช้น้ำมันพีชจะให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความร้อนสะสมที่ใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันอะโรมาติก เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างยาง STR 5L และ SBR 1502 พบว่ายาง SBR 1502 ให้ค่าความหนืดมูนนี้สูงกว่า STR 5L และให้ค่า  $M_H$   $M_L$  เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ และเวลาวัลคาไนซ์ของอย่างมากกว่า STR 5L และสมบัติของยางหลังวัลคาไนซ์ของยาง SBR 1502 ให้ค่าความแข็งแรง ความร้อนสะสม ความต้านทานต่อการสึกหรอ โมดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% สูงกว่า STR 5L แต่ค่าความต้านทานต่อการหักงอ ความต้านทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดจนขาดต่ำกว่า STR 5L

การประยุกต์ใช้น้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil) เป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในการแปรรูปยางมีความเป็นไปได้ แต่ยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย เช่น ปิยวิทย์ และคณะ (2552) ศึกษาอิทธิพลของน้ำมันสบู่ดำต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางผสมระหว่างยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) กับยางธรรมชาติ (NR) ที่มีการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ โดยใช้ยางผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน และทำการแปรปริมาณสารช่วยในกระบวนการผลิต (น้ำมันเมล็ดสบู่ดำหรือน้ำมันพาราฟินิก) ที่ปริมาณ 0-9 phr พบว่าการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิตทั้ง 2 ชนิดลงไปในช่วงคอมพาวด์นั้นส่งผลทำให้การขึ้นรูปสามารถทำได้ง่ายขึ้น เนื่องจากให้ค่าความหนืดและพลังงานที่ใช้ในการผสมที่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณสารช่วยในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลต่าง ๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความแข็งแรง ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ พบว่าเมื่อปริมาณยาง NR ในยางผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ยางผสมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานการฉีกขาดสูงขึ้น จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการเติมน้ำมันสบู่ดำไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางผสม ในขณะที่ Pechurai *et al.* (2014) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณน้ำมันสบู่ดำเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตในยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) โดยใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบกัมมะถันและใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติม พบว่าน้ำมันสบู่ดำไม่ส่งผลกระทบต่อลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์และยางวัลคา

ไนซ์ที่ใช้ น้ำมันสบู่อ้าเป็นสารช่วยกระบวนการผลิตให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion resistance) และการกระเด็นตัว (Rebound resilience) ที่ดีกว่าการใช้ น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)



## อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 1. วัสดุและอุปกรณ์

#### 1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- (1) บีกเกอร์ขนาด 50 ml ใช้สำหรับการทดสอบปริมาณยางบาวนด์และความต้านทานการบวมพองของยางวัลคาไนซ์
- (2) กระจกตวงขนาด 25 ml ใช้สำหรับการตวงปริมาตรของตัวทำละลาย
- (3) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักยางและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์
- (4) เวอร์เนียร์ ใช้สำหรับวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความหนาของยางวัลคาไนซ์
- (5) เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เป็นเครื่องผสมยางระบบเปิดที่ประกอบด้วยลูกกลิ้งสองลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ซึ่งมีอัตราส่วนความเร็วผิวระหว่างลูกกลิ้งหน้าต่อลูกกลิ้งหลัง (Friction ratio) เท่ากับ 1:1.15 มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้งเท่ากับ 20.7 cm ขนาดเส้นรอบวงของลูกกลิ้งเท่ากับ 64 cm และมีความยาวเท่ากับ 46 cm ผลิตโดยบริษัท Yong Fong Machinery รุ่น YFTR-8 แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง

(6) เครื่องอัดเป่า (Compression moulding) เป็นเครื่องอัดระบบไฮดรอลิกประกอบด้วยแผ่นอัดบนและล่าง ขนาดแผ่นอัดกว้าง 420 mm ยาว 420 mm ใช้ในการอัดขึ้นรูปชิ้นตัวอย่าง กระจกอัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.04 cm สามารถตั้งอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 25-200 °C ผลิตโดยบริษัท Oomn Sem-Automatic Moulding Press รุ่น HPC-100(D) แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เครื่องอัดเป่า

(7) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer, MDR) เป็นเครื่องสำหรับทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง สามารถแปรอุณหภูมิและเวลาในการทดสอบได้ ผลิตโดยบริษัท U-Can Dynatex Inc. รุ่น UR-2010 ประเทศไต้หวัน แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบคายเคลื่อนที่

(8) เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile testing machine) เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงกดหรือแรงดึง สามารถรับแรงได้สูงสุด 10 kN ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากค่าแรงที่ได้ผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นค่าแรงดึงหรือแรงกดในหน่วยนิวตัน สามารถตั้งความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ตั้งแต่ 0.01-1,000 mm/min ตามมาตรฐาน ASTM D412 แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง

(9) เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester) เป็นเครื่องวัดความแข็งแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer) ชนิด Shore A ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์ โดยใช้แรงกดจากสปริงยี่ห้อ Bareiss รุ่น Digi Test แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 เครื่องวัดความแข็ง

(10) เครื่องช็อบเพนดูลัม (Schob pendulum) เป็นเครื่องทดสอบการกระเด็นตัวของยางวัลคาไนซ์ โดยการวัดความสูงของการกระดอน (Rebound) ลูกตุ้มช็อบเป็นลูกตุ้มเชิงประกอบ ประกอบด้วยก้านโลหะติดตุ้มน้ำหนัก 200 g ตรงปลาย หัวกระแทกกลมมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 mm ปล่อยจากมุม  $90^\circ$  กระแทกด้วยความเร็ว 2 m/s ด้วยพลังงาน 0.5 J เป็นเครื่องมือทดสอบชนิด Rebound Check รุ่น Rebound Check – Pendolo Schob แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 เครื่องช็อบเพนดูลัม

(11) เครื่องทดสอบความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) เป็นเครื่องมือทดสอบการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ แบบ DIN Abrader ประกอบด้วยแผ่นขัดถู (กระดาษทราย) พันอยู่บนลูกกลิ้ง ครอบกมุนด้วยความเร็วคงที่ 40 รอบ/นาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ยาวประมาณ 500 mm สามารถตั้งระยะการทดสอบได้ 20 และ 40 mm ยี่ห้อ Bareiss แสดงดังภาพที่

13



ภาพที่ 13 เครื่องทดสอบความต้านทานการขัดถู

(12) ชุดอุปกรณ์ทดสอบการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set) เป็นเครื่องมือทดสอบความสามารถของยางวัลคาไนซ์ที่จะรักษาสมบัติความยืดหยุ่นภายใต้ระยะเวลากดที่นาน เครื่องทดสอบประกอบด้วยแผ่นโลหะแบน 3 แผ่น ทำจากโลหะไร้สนิมที่ขัดมัน แผ่นโลหะจะยึดเข้าหากันด้วยสกรู และมีโลหะกั้นระยะ (Spacer) ที่ทำเป็นแท่งคอยกั้นระยะการกดยาง ซึ่งความหนาของโลหะดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความหนาของยางที่ทดสอบ แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ชุดอุปกรณ์ทดสอบการเสีรูปหลังกดอัด

(13) ตู้อบอากาศร้อน (Hot air oven) ใช้สำหรับทดสอบสมบัติการบ่มเร่ง (Aging properties) และการเสีรูปหลังการกดอัด (Compression set) ของยางวัลคาไนซ์ สามารถตั้งอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 10-250 °C มีขนาด 420×420 mm ยี่ห้อ Memmert แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ตู้อบอากาศร้อน (Hot air oven)

(14) เครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของยาง โดยทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างในอากาศและในน้ำ สามารถวัดชั้นทดสอบที่มีน้ำหนัก 0.01-300.00 g รุ่น MD-3005 ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น แสดงดังภาพที่ 16





ภาพที่ 16 เครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter)

(15) เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph, GC) ใช้ในการแยกองค์ประกอบของสารในสารผสมที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ โดยเปลี่ยนสารให้เป็นแก๊สที่อุณหภูมิไม่เกิน  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  แยกผ่านคอลัมน์แต่ละชนิดและมีโปรแกรมของอุณหภูมิโอเวนเป็นตัวควบคุมการแยกชนิดของสาร อุณหภูมิที่ต่างกันจะทำให้เวลาและการแสดงของกราฟต่างกัน ซึ่งอุณหภูมิที่ให้กับโอเวนขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลของสารแต่ละชนิดที่จะนำมาทดสอบ รุ่น Hewlett Packard ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังภาพที่ 17



6850

ภาพที่ 17 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas chromatograph, GC)

### 1.2 ยางและสารเคมี

(1) ยางแท่ง (Standard thai rubber, STR20) เป็นยางธรรมชาติอัดแท่งเกรด STR20 ได้จากการนำเศษยางธรรมชาติ ยางก้อนถ้วย และยางแผ่นดิบมาผ่านการรีดและย่อยเป็นก้อนเล็กๆ เพื่อง่ายต่อการชำระล้างสิ่งสกปรกและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 115-130 °C จากนั้นนำไปอัดให้เป็นแท่งขนาดมาตรฐาน 330\*670\*170 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 35 กิโลกรัม จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี แสดงสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของยาง STR 20 (ยางพารา, 2557)

Properties	Specification Value
ปริมาณสิ่งสกปรก, % ไม่เกิน	0.16
ปริมาณเถ้า, % ไม่เกิน	0.80
ปริมาณไนโตรเจน, % ไม่เกิน	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย, % ไม่เกิน	0.80
ความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po), ไม่ต่ำกว่า	30
ดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI), ไม่ต่ำกว่า	50
ความหนืด (Moony Viscosity), ML(1+4, 100 °C)	80±10

(2) ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) เป็นยางสังเคราะห์อัดแท่งเกรด 1502 ได้จากการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ระหว่างมอนอเมอร์สองชนิด คือ สไตรีนและบิวตาไดอีน จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โฟร์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี แสดงสมบัติดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR)

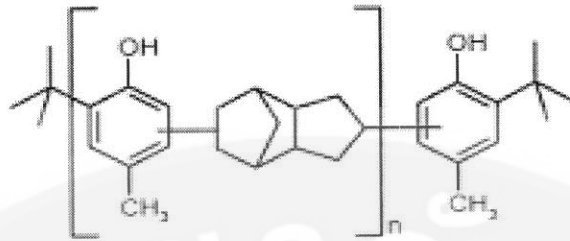
Properties	Unit	Specification Value
Volatile matter content	%	0.3
Ash Content	%	0.2
Soap Content	%	0.1
Organic Acid	%	5.8
Bound Styrene	%	23.5
Mooney Viscosity	ML(1+4, 100 °C)	52

(3) ยางไนไตรล์ (Nitrile rubber, NBR) เป็นยางสังเคราะห์อัดแท่งเกรด DN219 ได้จากการพอลิเมอไรเซชันระหว่างอะคริโลไนไตรล์มอนอเมอร์ (Acrylonitrile monomer) และบิวตาไดอีนมอนอเมอร์ (Butadiene monomer) ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณอะคริโลไนไตรล์ตั้งแต่ 32-35 % จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โพร จำกัด จังหวัดนนทบุรี แสดงสมบัติดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติของยางไนไตรล์ (Nitrile rubber, NBR)

Characteristic	Unit	Specification Value	
		Min	Max
Heat loss	%	-	1.0
Bound Acrylonitrile	%	32.0	35.0
Mooney Viscosity	ML(1+4, 100 °C)	22.0	32.0

(4) Lowinox® CPL มีชื่อทางการค้าว่า Polymeric sterically hindered phenol อยู่ในกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอล (Phenol derivatives) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น 1.04 g/cm<sup>3</sup> ทำหน้าที่เป็นสารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) เต็มลงไปในยางเพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาของออกซิเจนในอากาศกับยาง (ที่มีพันธะคู่) หรือทำให้ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาแตกตัวต่อไปเป็นส่วนที่ไม่เป็นอันตรายต่อการเสื่อมสภาพของยาง ทำให้ยางมีอายุการใช้งานได้ยาวนานขึ้น จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โพร จำกัด จังหวัดนนทบุรี มีสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 18

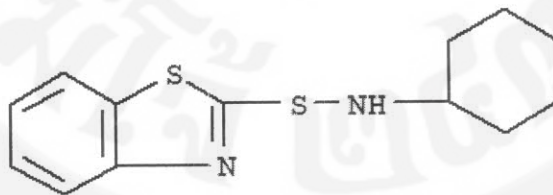


ภาพที่ 18 สูตรโครงสร้างของ Lowinox® CPL

(5) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น มีความหนาแน่น  $3.57 \text{ g/cm}^3$  และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $81.37 \text{ g/mol}$  จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โพร จำกัด จังหวัดนนทบุรี

(6) กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นร่วมกับซิงค์ออกไซด์ เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งมีสูตรเคมี คือ  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$  มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ใน Alcohol และ Ether มีความหนาแน่น  $0.85 \text{ g/cm}^3$  และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ  $284.48 \text{ g/mol}$  จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โพร จำกัด จังหวัดนนทบุรี

(7) *N*-Cyclohexyl-2-Benzothiazyl-Sulfenamide (CBS) เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (Sulfenamide) มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ทรงกระบอกสีขาวเทา จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โพร จำกัด จังหวัดนนทบุรี มีสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 สูตรโครงสร้าง *N*-Cyclohexyl -2-Benzothiazyl-Sulfenamide (CBS)

(8) เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N330 ได้จากการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม มีลักษณะเป็นผงสีดำ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 1-10 นาโนเมตร ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรง เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความทนทานต่อการสึกหรอให้แก่ผลิตภัณฑ์ยาง จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้โพร จำกัด จังหวัดนนทบุรี

(9) น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต และทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers) ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนของเบนซีน (Benzene ring) อย่างน้อย 1 หมู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งมีโครงสร้างทั่วไปคือ  $C_nH_n$  และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติก 65-85% จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้ไฟร์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี

(10) น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิต และทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers) ในการเตรียมยางคอมพาวนด์ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไป  $C_nH_{2n+2}$  และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติก 19-30 % จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้ไฟร์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี

(11) น้ำมันแนฟทีนิก (Naphthenic oil) เป็นน้ำมันปิโตรเลียมที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตในการเตรียมยางคอมพาวนด์ และทำให้ยางนิ่ม (Plasticizers) มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน (Alicyclic hydrocarbon) มีสูตรโครงสร้างทั่วไป  $C_nH_{2n}$  และมีส่วนประกอบที่เป็นอะโรมาติก 20-40 % จัดจำหน่ายโดยบริษัท พีไอ อินดัสทรี จำกัด กรุงเทพมหานคร

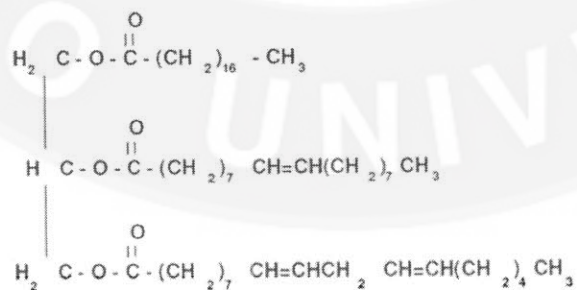
(12) น้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil) เป็นน้ำมันพืชที่ทำหน้าที่เป็นสารช่วยในกระบวนการผลิตในการเตรียมยางคอมพาวนด์ มีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acids) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณ 77.7 % ประกอบด้วยกรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) กรดปาล์มมิทอเลอิก (Palmitoleic acid) กรดอีรูสิค (Erucic acid) และกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acids) ปริมาณ 21.1 % ซึ่งประกอบด้วยกรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดไมริสติก (Myristic acid) กรดเซปตะเดคคาโนอิก (Heptadecanoic acid) กรดเพนตะเดคคาโนอิก (Pentadecanoic acid) กรดอะราคิติก (Arachidic acid) กรดบีฮีนิก (Behenic acid) และกรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) จัดจำหน่ายโดยบริษัท น้ำมันสบู่ดำไทย จำกัด จังหวัดปทุมธานี แสดงองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติดังตารางที่ 4-5 ตามลำดับ และมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 20

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันสบู่ดำ

ชนิดกรดไขมัน	เปอร์เซ็นต์
Myristic acid	0.05
Pentadecanoic acid	0.01
Palmitic acid	14.28
Palmitoleic acid	0.8
Heptadecanoic acid	0.08
Stearic acid	6.30
Oleic acid	40.97
Linoleic acid	35.67
Arachidic acid	0.18
Behenic acid	0.12
Erucic acid	0.023
Lignoceric acid	0.043

ตารางที่ 5 สมบัติของน้ำมันสบู่ดำ

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการทดสอบ	ค่าที่ได้
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D1298	920.6±0.0
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C	cSt	ASTM D445	35.34±0.05
ค่าความเป็นกรด	Mg KOH/g	ASTM D664	49.58±0.93
ค่าไอโอดีน	G Iodine/100g	EN 14111	94.0±0.6



ภาพที่ 20 สูตรโครงสร้างของน้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil)

ที่มา: <http://www.odec.ca> (2559)

(13) กำมะถัน (Sulfur, S) เป็นสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent) ทำหน้าที่เชื่อมโยงโมเลกุลยางทำให้ยางเกิดการคงรูป มีลักษณะเป็นผงของแข็งสีเหลืองที่อุณหภูมิห้อง มีน้ำหนักโมเลกุล 32.07 g/mol มีความถ่วงจำเพาะ 2.07 g/cm<sup>3</sup> และมีจุดหลอมเหลว 112.8-119 °C สูตรเคมีคือ S<sub>8</sub> จัดจำหน่ายโดยบริษัท ลักกี้ไฟร์ จำกัด จังหวัดนนทบุรี

(14) โทลูอีน (Toluene) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) ใช้เป็นตัวทำละลายในการทดสอบความต้านต่อการบวมพองและปริมาณยางบวมน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีกลิ่นเหม็น มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 92.14 g/mol มีความบริสุทธิ์มากกว่า 99% จุดเดือด 110.6 °C และมีความหนาแน่น 0.870 g/cm<sup>3</sup> จัดจำหน่ายโดยบริษัท เชียงใหม่ วิเอเอ็ม จำกัด จังหวัดเชียงใหม่

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 การวิเคราะห์สมบัติน้ำมัน (Oil analysis) (โสภีนาถ และคณะ, 2551)

#### 2.1.1 ค่าไอโอดีน (Iodine value)

ค่าไอโอดีน เป็นค่าที่บ่งบอกความไม่อิ่มตัวของน้ำมันหรือไบโอดีเซล เนื่องจากค่าดังกล่าวสามารถบอกถึงส่วนที่ไม่อิ่มตัว (พันธะคู่) ในน้ำมัน โดยถ้ามีค่าไอโอดีนสูงแสดงว่าน้ำมันชนิดนั้นมีองค์ประกอบของส่วนที่ไม่อิ่มตัวในโครงสร้างสูง โดยทดสอบตามมาตรฐาน EN14111 ด้วยวิธีการไตเตรทโดยการนำน้ำมันสุญุดำมาผสมกับสารที่เป็นสารประกอบแล้วนำสารละลายที่ได้มาไตเตรทกับสารละลายโซเดียมไทรโอซัลเฟต (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 0.1 N แล้วนำปริมาณที่ได้ไปคำนวณหาค่าไอโอดีน

#### 2.1.2 ค่าความเป็นกรด (Acid value)

เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D664 ด้วยวิธีการไตเตรท โดยการนำน้ำมันสุญุดำมาผสมกับแอลกอฮอล์ที่มีค่า pH เป็นกลางแล้วจึงนำไปไตเตรทด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.5 N จนกระทั่งสารผสมเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วนำปริมาณ NaOH ที่ใช้มาคำนวณหาค่าความเป็นกรด

### 2.1.3 ความหนาแน่น (Density)

เป็นค่าที่ระบุคุณสมบัติเบื้องต้นทางกายภาพของน้ำมัน จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1298 ที่อุณหภูมิ 15 °C ทำการวัดโดยใช้อุปกรณ์วัดความถ่วงจำเพาะ โดยเทน้ำมันที่ต้องการทดสอบลงในกระบอกตวงประมาณ 3 ใน 4 ของกระบอกตวง รอให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำมันแล้วทำการกำจัดออก วางกระบอกตวงให้อยู่ในแนวตั้งและรักษาอุณหภูมิของน้ำมันให้คงที่ จากนั้นค่อย ๆ หย่อนอุปกรณ์วัดความถ่วงจำเพาะลงไป แล้วปล่อยให้ลอยอยู่อย่างอิสระ ไม่เกาะติดกับกระบอกตวง จากนั้นทำการอ่านค่าความถ่วงจำเพาะที่ขีดระดับอุปกรณ์วัดความถ่วงจำเพาะ

### 2.1.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดในน้ำมันมีความสำคัญมากเพราะเป็นค่าที่บอกลถึงความสามารถในการต้านทานการไหลของน้ำมัน ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D445 ที่อุณหภูมิ 40 °C ด้วยเครื่องมือวัดความหนืด (Viscometer) โดยใช้หลักการให้ของเหลวไหลผ่านช่องแคบ ๆ ที่ออกแบบและปรับตั้ง (Calibrated) ตามมาตรฐาน แล้วจับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านช่องแคบนั้น แล้วนำเวลาไปคำนวณหาค่าความหนืด

### 2.1.5 ชนิดกรดของไขมัน

นำน้ำมันสุญุดำมาทดสอบชนิดของกรดไขมันด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatograph, GC) โดยมีก๊าซฮีเลียมเป็นตัวพา (Carrier gas) ที่สามารถแยกแยะสารผสมมากกว่าหนึ่งชนิดด้วยคอลัมน์เพื่อให้ได้สารประกอบเดี่ยว ๆ ตามลำดับ ในสภาวะที่เหมาะสม และตรวจวัดสารตัวอย่างด้วย Detector ตามคุณสมบัติเฉพาะทางเคมี โดยจะแสดงผลการทดสอบอัตโนมัติด้วยระบบคอมพิวเตอร์ในลักษณะชนิดและปริมาณของกรดไขมันต่าง ๆ ในรูปเปอร์เซ็นต์พื้นที่เทียบกับสารมาตรฐาน โดยมีสภาวะการทดสอบดังตารางที่ 6



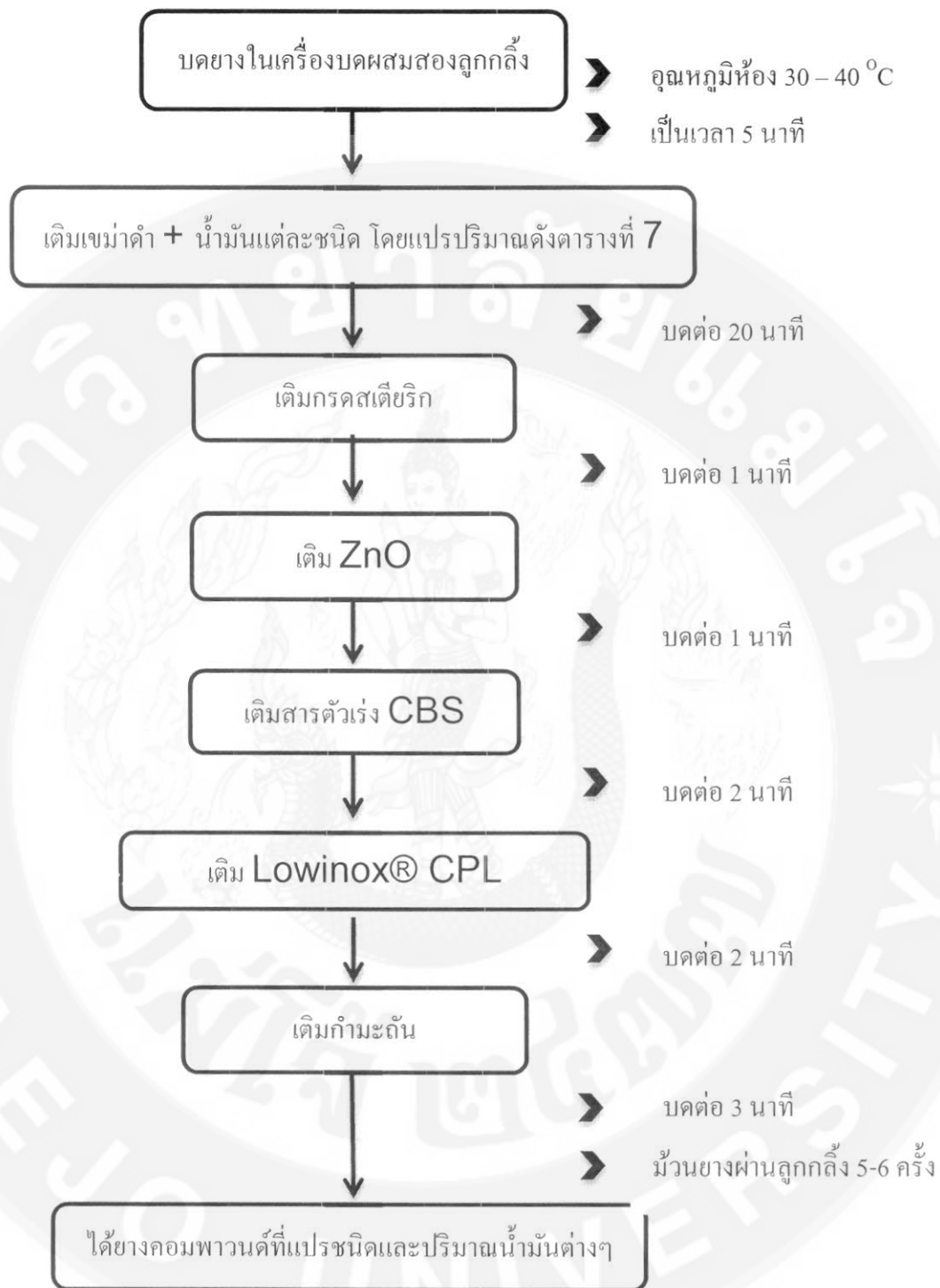
## ตารางที่ 6 สภาวะการทดสอบด้วยเทคนิค GC

Parameter	Unit
Helium flow, Split ratio	1.0 mL/min, 50:1
Hydrogen flow	30 mL/min
Air flow	300 mL/min
Detector temp	300 °C
Inlet temp	290 °C
Initial temperature 210 °C, hold for 12 minutes	
Ramp to 250 °C at 20 °C/min, hold for 8 minutes	
Column: Select Biodiesel for FAME length 30 m., 0.32 mm I.D, film thickness 0.25 µm	

### 2.2 การเตรียมยางคอมพาวนด์

ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวนด์แสดงดังตารางที่ 7 โดยแปรปริมาณน้ำมัน 4 ชนิด คือ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันพาราฟินิก น้ำมันแนฟทีนิก และน้ำมันสบู่ดำ ที่ปริมาณ 0, 5, 10 และ 15 phr และมีขั้นตอนการผสมดังภาพที่ 21





ภาพที่ 21 ขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวนด์

## 2.3 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์

### 2.3.1 การทดสอบปริมาณยางบาวนด์ (Bound rubber)

เตรียมยางคอมพาวนด์เป็นรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm หนา 3 mm ซึ่งนำหน้ายางคอมพาวนด์ก่อนนำไปแช่ในสารละลายโทลูอีนปริมาตร 25 cm<sup>3</sup> เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองและทำให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ซึ่งปริมาณยางบาวนด์ คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของยางที่ไม่ละลายในสารละลายโทลูอีน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$\% \text{ Bound rubber} = \frac{\text{น้ำหนักยางหลังแช่ในโทลูอีน} - \text{น้ำหนักของสารตัวเติม}}{\text{น้ำหนักยางก่อนแช่ในโทลูอีน} - \text{น้ำหนักของสารตัวเติม}} \times 100 \quad \dots(1)$$

### 2.3.2 การศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

นำยางคอมพาวนด์มาทดสอบด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) โดยใช้ชิ้นตัวอย่างยางคอมพาวนด์ขนาดประมาณ 30×30 mm ตั้งอุณหภูมิของเครื่อง MDR ไว้ที่ 150 °C ตั้ง chart range เท่ากับ 50 dN.m และเวลาการทดสอบ 30 นาที เมื่ออุณหภูมิได้ตามกำหนด เริ่มทำการทดสอบเพื่อหา Cure curve หาค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M<sub>L</sub>) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M<sub>H</sub>) ที่เกิดจากแรงเหวี่ยงระหว่างยางและจานโลหะ เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ (Scorch time, T<sub>s1</sub>) เวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time, T<sub>c90</sub>) ซึ่งเป็นเวลาที่ยางมีค่าแรงบิดเท่ากับ M<sub>L</sub>+90(M<sub>H</sub>-M<sub>L</sub>)/100 และอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$\text{Cure Rate Index (CRI)} = \frac{100}{\text{Cure Time} - \text{Scorch Time}} \quad \dots(2)$$

## 2.4 การทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์

นำยางคอมพาวนด์มาทำการขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดเบ้า (Compression moulding) โดยตั้งอุณหภูมิเท่ากับ 150 °C และใช้ระยะเวลาในการอัดเบ้าจาก Cure time (T<sub>c90</sub>) ที่ได้จากเครื่อง MDR หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

### (1) สมบัติแรงดึง (Tensile properties)

นำแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ได้จากการอัดเบ้ามาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412-98a (2000) ขนาดความยาว 115 mm กว้าง 6 mm หนาไม่ต่ำกว่า 1.5-3 mm วัดความหนา 3 ตำแหน่ง และใช้ค่ากลาง (Median) สำหรับคำนวณ นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Tensometer โดยใช้โหลดเซลล์ (Load cell) 1 kN และอัตราเร็วในการดึงยึด 500 mm/min รายงานผลเป็นค่าความทนแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัส (Modulus) และค่าความยืดเมื่อขาด (Elongation at break) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3-5 ตามลำดับ

#### - ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

$$\text{Tensile Strength} = \frac{F_u}{A} \quad \dots(3)$$

เมื่อ  $F_u$  = แรงดึงสูงสุด ณ จุดขาด (N)

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ ( $\text{mm}^2$ )

#### - โมดูลัส (Modulus)

$$\text{Modulus} = \frac{F_m}{A} \quad \dots(4)$$

เมื่อ  $F_m$  = เป็นแรงที่ทำให้ยางยืดออก 100% และ 300% (N)

#### - ค่าระยะยืดเมื่อขาด (Elongation at break)

$$\text{Elongation at break (\%)} = \left( \frac{L-L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad \dots(5)$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวระหว่างขีดบนชิ้นทดสอบเมื่อยืดจนขาด (mm)

$L_0$  = ความยาวระหว่างขีดบนชิ้นทดสอบก่อนทำการยืด (mm)

### (2) การกระเดื่องตัว (Rebound resilience)

ทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53512 โดยนำชิ้นทดสอบตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่ได้จากการอัดเบ้ามาติดตั้งไว้ในเครื่องช็อบเพนดูลัม (Schob pendulum) ปล່อยลูกตุ้ม Pendulum ลงมากระทบชิ้นทดสอบจากมุม  $90^\circ$  ที่ความสูง 25 cm ความเร็ว 2 m/min แล้ววัดมุมกระดอนที่ได้ รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์การกระเดื่องตัวดังสมการที่ 6

$$\text{การกระเดิงตัว (\%)} = (1 - \cos\alpha) \times 100 \quad \dots(6)$$

เมื่อ  $\alpha$  เป็นมุมกระดอน

### (3) ความแข็ง (Hardness)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยใช้เครื่องคูโรมิเตอร์ (Shore durometer) แบบ Shore A ใช้ระบบสปริงเป็นตัวกดเข็มลงไปในยางจนกระทั่งหัวเข็มกดสัมผัสกับผิวของยาง ใช้น้ำหนักกด 10 N ซึ่งทดสอบมีความหนาประมาณ 8-10 mm วัดความแข็ง 3 จุดต่อชิ้นทดสอบ และรายงานผลด้วยค่ากลาง (Median)

### (4) ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยใช้เครื่อง DIN Abrader ชิ้นทดสอบเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm หนาน้อย 6 mm ใช้แรงกด 10 N ระยะทางในการเคลื่อนที่ 40 m รายงานผลเป็นปริมาตรการสึกหรอ ดังสมการที่ 7

$$A = \left( \frac{\Delta m}{\rho} \right) \times \left( \frac{S_0}{S} \right) \quad \dots(7)$$

เมื่อ	A	คือ ปริมาตรการสึกหรอ ( $\text{mm}^3$ )
	$\Delta m$	คือ น้ำหนักที่หายไปของยางตัวอย่าง (mg)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของยางตัวอย่าง ( $\text{g/cm}^3$ )
	$S_0$	คือ Nominal abrasive grade (200 mg)
	S	คือ น้ำหนักที่หายไปของยางมาตรฐานที่ใช้ (mg)

### (5) ความต้านทานการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน (Hot air aging resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยนำชิ้นทดสอบยางวัลคาไนซ์ที่มีความหนาประมาณ 8-10 mm มาวัดความแข็ง 3 จุดต่อชิ้นทดสอบ แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นวางชิ้นทดสอบให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำชิ้นทดสอบมาวัดความแข็งอีกครั้ง รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์ความแข็งที่เปลี่ยนไปดังสมการที่ 8

$$\text{ความแข็งที่เปลี่ยนไป (\%)} = \left( \frac{A-O}{O} \right) \times 100 \quad \dots(8)$$

เมื่อ  $O$  = ความแข็งของยางก่อนบ่มเร่ง (Shore A)

$A$  = ความแข็งของยางหลังบ่มเร่ง (Shore A)

#### (6) การเสีรูปร่างหลังการกดอัด (Compression set)

การทดสอบการเสีรูปร่างหลังการกดอัดจะทำตามมาตรฐาน ASTM D395-03 จะใช้ชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกหนา 1.3 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.9 cm ชิ้นทดสอบจะถูกกดด้วยแผ่นอัดให้ยุบตัวลงไป 25 % ของความหนาเริ่มต้นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 °C หลังจากนั้นจะนำชิ้นทดสอบออกจากแผ่นอัดและตั้งให้คืนตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดความหนาที่ได้ รายงานค่า Compression set เป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ของขนาดการยุบตัวเดิม ดังสมการที่ 9

$$\text{Compression Set (\%)} = \left( \frac{T_0 - T_r}{T_0 - T_s} \right) \times 100 \quad \dots(9)$$

เมื่อ  $T_0$  = ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนอัด (mm)

$T_r$  = ความหนาของชิ้นทดสอบหลังอัด (mm)

$T_s$  = ความหนาของเหล็กคั่น (mm)

#### (7) ความต้านทานต่อตัวทำละลาย (Solvent resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D471-98 โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 cm หนาประมาณ 2 mm จำนวน 3 ชิ้น นำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปแช่ในโทลูอีน (Toluene) ปริมาณ 20 ml ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบขึ้นมาซับให้แห้งชั่งน้ำหนัก ณ เวลาต่าง ๆ รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์การบวมพองดังสมการที่ 10

$$\text{swelling (\%)} = \left( \frac{W_s - W_0}{W_0} \right) \times 100 \quad \dots(10)$$

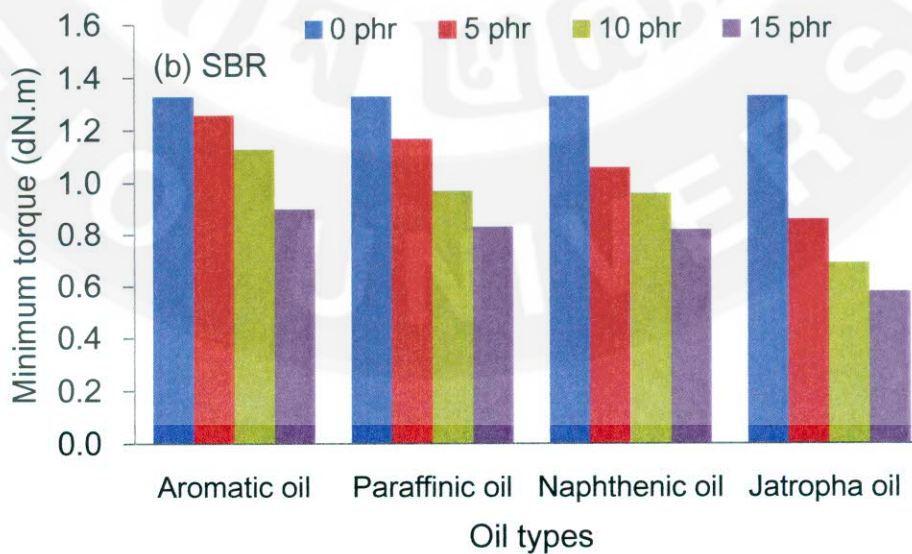
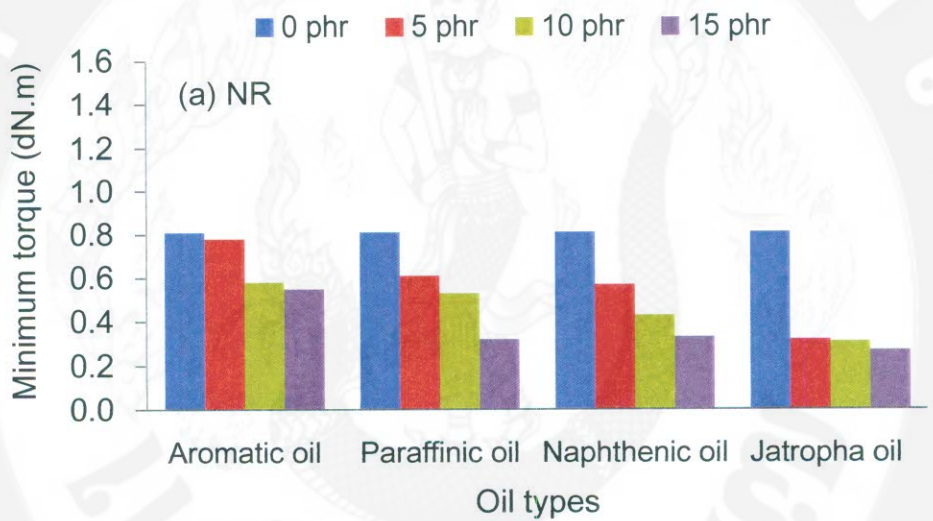
เมื่อ  $W_s$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่ในโทลูอีน (g)

$W_0$  = น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่ในโทลูอีน (g)

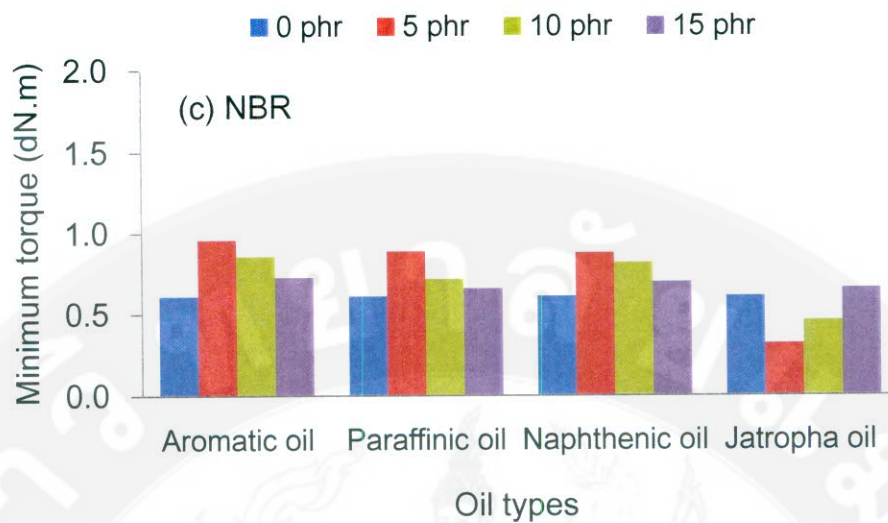
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1. ลักษณะการวัลคาไนซ์ (Cure characteristics)

นำยางคอมพาวนด์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ เช่น น้ำมันสบู่ดำ (Jatropha oil, JO) น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil, AO) น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil, PO) และน้ำมันแนฟทีนิก (Naphthenic oil, NO) ที่ปริมาณ 0, 5, 10 และ 15 phr มาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบดาเยคส์ลอนท์ (MDR) ที่อุณหภูมิ 150 °C ได้ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 22-27





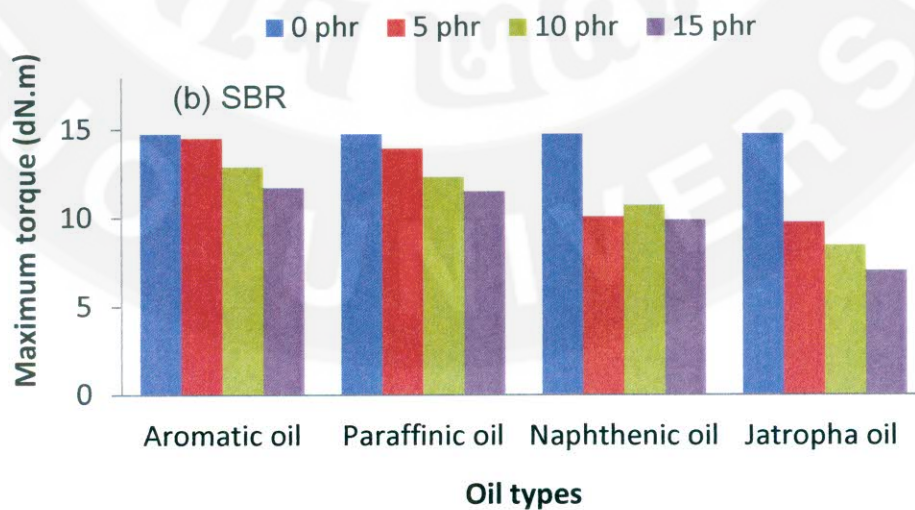
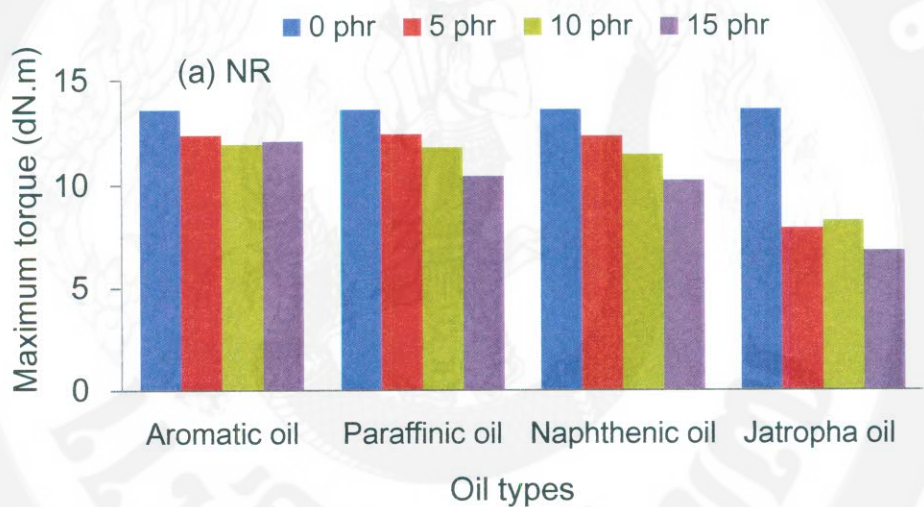


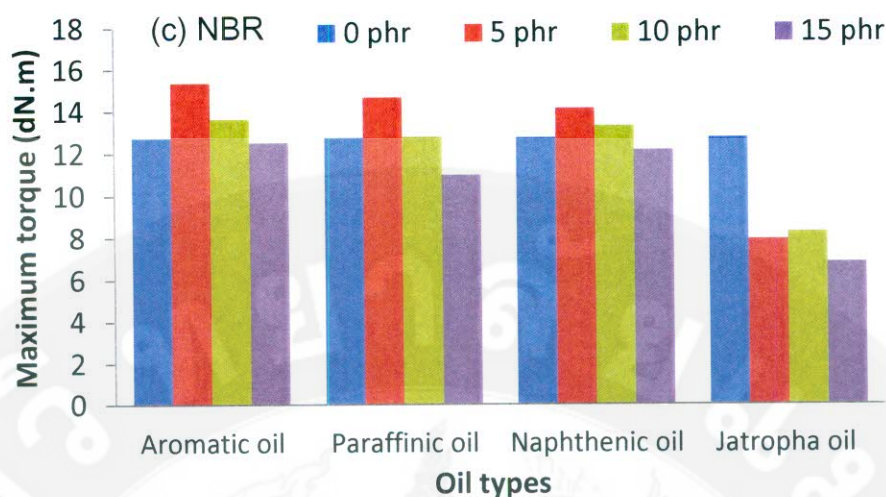
ภาพที่ 22 ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 22 พบว่าการใช้น้ำมันสบู่ดำ (Jatropa oil) ในยางทั้ง 3 ชนิด จะให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าแรงบิดต่ำสุดจะบ่งบอกถึงความนุ่มหรือความหนืดของยางก่อนวัลคาไนซ์ เนื่องจากในน้ำมันสบู่ดำมีเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acids methyl ester) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่อึดตัวจึงสามารถเข้ากันได้ดีกับส่วนที่ไม่อึดตัว (พันธะคู่) ในยาง ในขณะที่เดียวกันน้ำมันสบู่ดำก็เป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งมีความเป็นขี้มากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม จึงทำให้น้ำมันสบู่ดำสามารถเข้ากับยางในไตรล์ ซึ่งเป็นยางที่มีความเป็นขี้ได้เช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ยางทั้ง 3 ชนิดที่ผสมน้ำมันสบู่ดำมีค่า  $M_L$  ต่ำที่สุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำมันสบู่ดำสามารถช่วยลดพลังงานในการแปรรูปยางได้ดีกว่าน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากทำให้ยางมีความหนืดต่ำ สามารถไหลและแปรรูปได้ง่าย

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณน้ำมันในยางชนิดต่าง ๆ พบว่าแรงบิดต่ำสุดของยาง NR และ SBR มีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมันทุกชนิด เนื่องจากน้ำมันสามารถแทรกเข้าไประหว่างโมเลกุลยาง จึงทำหน้าที่เหมือนสารหล่อลื่นระหว่างสายโซ่ (Internal lubricant) ส่งผลให้ความหนืดของยางลดลง ในขณะที่ค่าแรงบิดต่ำสุดของยาง NBR เมื่อใส่น้ำมันชนิดต่าง ๆ จะให้ผลในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ การเติมน้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันแนฟทีนิก และน้ำมันพาราฟีนิก ที่ปริมาณ 5 phr ลงไปในยาง NBR จะทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก

น้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเป็นน้ำมันไม่มีขี้ขี้ไม่สามารถแทรกเข้าไประหว่างโมเลกุลยาง NBR ซึ่งเป็นยางที่มีขี้ขี้ได้ แต่เมื่อปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีแนวโน้มลดลง (แต่ยังสูงกว่ากรณีไม่เติมน้ำมัน) อาจเป็นผลเนื่องจากระยะเวลาการบดขย้าง (Mastication) ในขั้นตอนการบดผสมที่นานขึ้น จึงทำให้สายโซ่โมเลกุลยางถูกตัดขาดกลายเป็นสายโซ่สั้นๆ ค่าความหนืดของยาง NBR จึงลดลงตามปริมาณน้ำมันปิโตรเลียม ในขณะที่การเติมน้ำมันสปูดำในยาง NBR ที่ปริมาณ 5 phr จะให้ค่าแรงบิดต่ำสุดลดลง เนื่องจากความเข้ากันได้ดีของยาง NBR กับน้ำมันสปูดำที่ปริมาณต่ำ ๆ แต่เมื่อปริมาณน้ำมันสปูดำมากขึ้นจะทำให้ค่าแรงบิดต่ำสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเขม่าดำมีการแตกตัวและกระจายตัวในยางลดลงจึงทำให้ยาง NBR มีความหนืดเพิ่มขึ้น ( $M_L$  สูง)

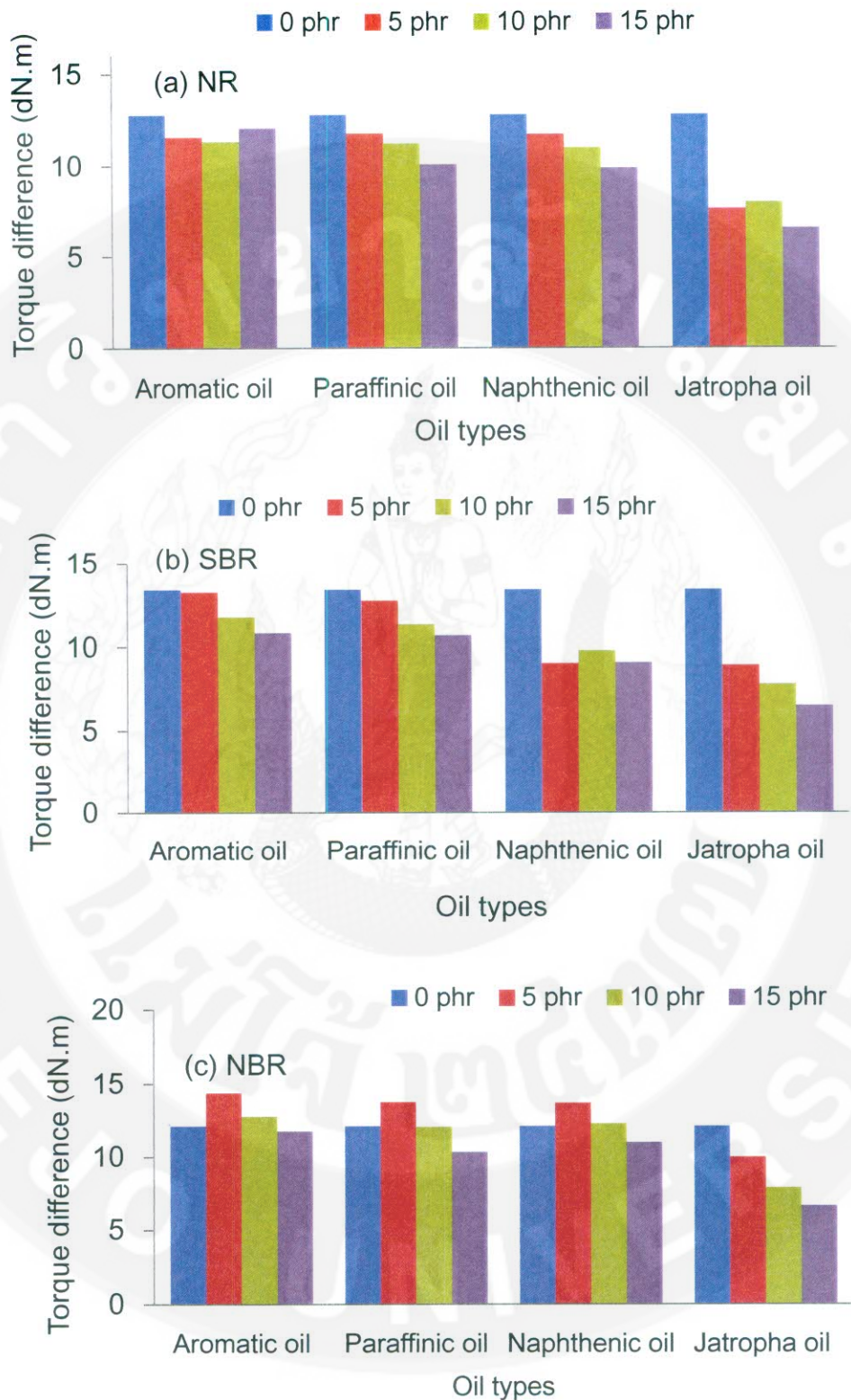




ภาพที่ 23 ค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR

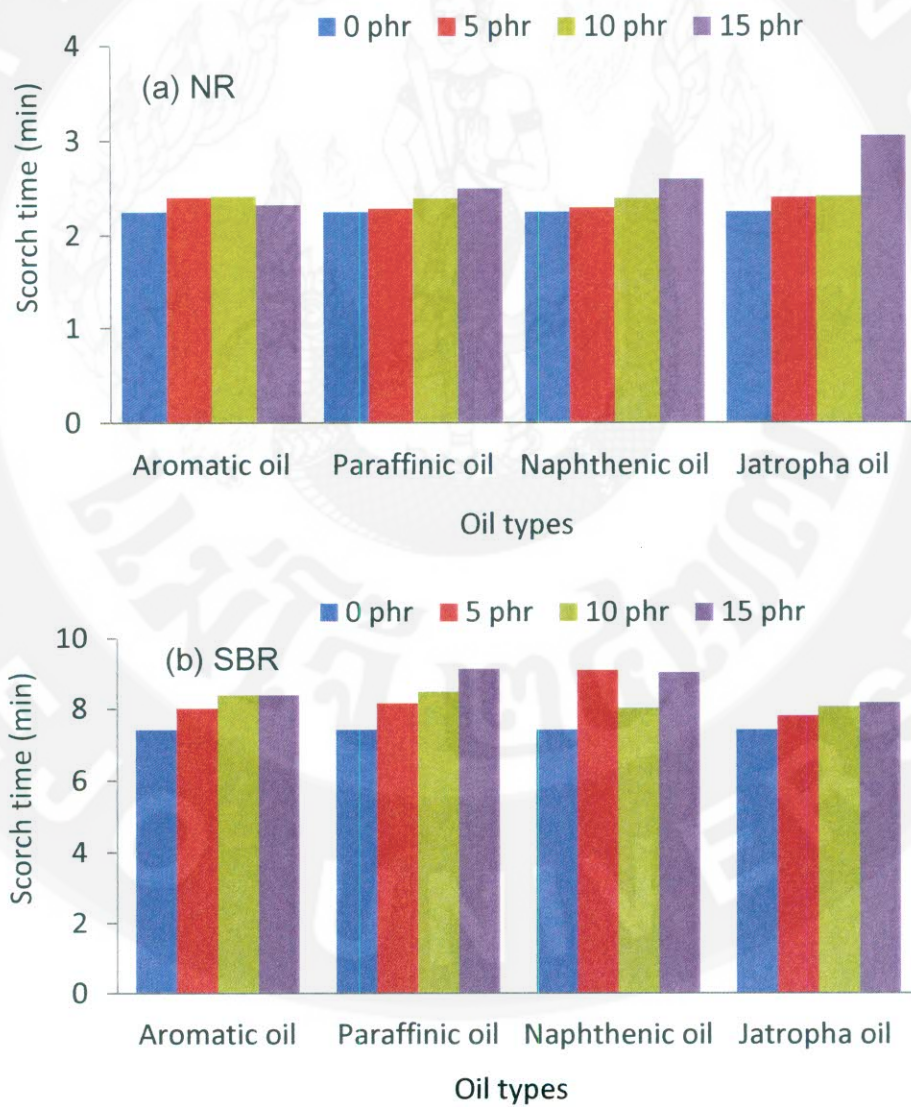
จากภาพที่ 23 พบว่าแรงบิดสูงสุดของยาง NR และ SBR ที่เติมน้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าแรงบิดสูงสุดบ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ แสดงให้เห็นว่ายาง NR และ SBR มีค่าความแข็งแรงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันมากขึ้น เป็นผลเนื่องจากน้ำมันที่เติมลงไปนั้นทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) และเป็นสารเพิ่มความอ่อนตัว (Plasticizer) โดยเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น พลังงานหมุนรอบพันธะลดลง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของยางมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าแรงบิดสูงสุดของยางไนไตรล์ที่ผสมน้ำมันปิโตรเลียมทั้ง 3 ชนิด มีค่า  $M_H$  เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันที่ 5 phr อาจเป็นผลเนื่องจากในกรณีนี้ น้ำมันปิโตรเลียมทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant) ซึ่งจะอยู่ที่พื้นผิวยาง จึงไม่รบกวนการเชื่อมโยงโมเลกุล ทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมมากขึ้นกลับส่งผลให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าลดลง

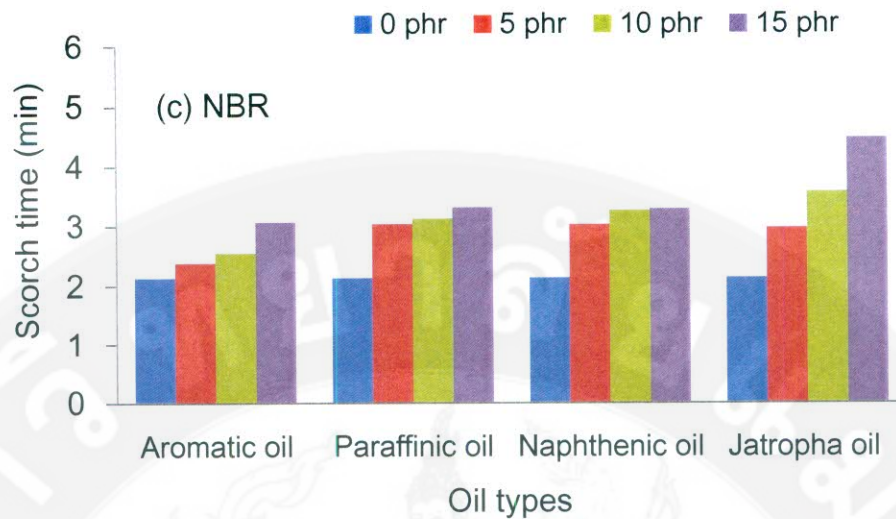
เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของชนิดน้ำมันต่อค่าแรงบิดสูงสุดในยางชนิดต่าง ๆ พบว่าน้ำมันสนูดำจะให้ค่าแรงบิดสูงสุดน้อยกว่าน้ำมันปิโตรเลียม แสดงให้เห็นว่าน้ำมันสนูดำสามารถเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางได้ดี (สอดคล้องกับภาพที่ 22) โมเลกุลยางอยู่ห่างกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง จึงทำให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลต่างของค่าแรงบิด (Torque difference) ในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ผลต่างของค่าแรงบิด (Torque difference) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR

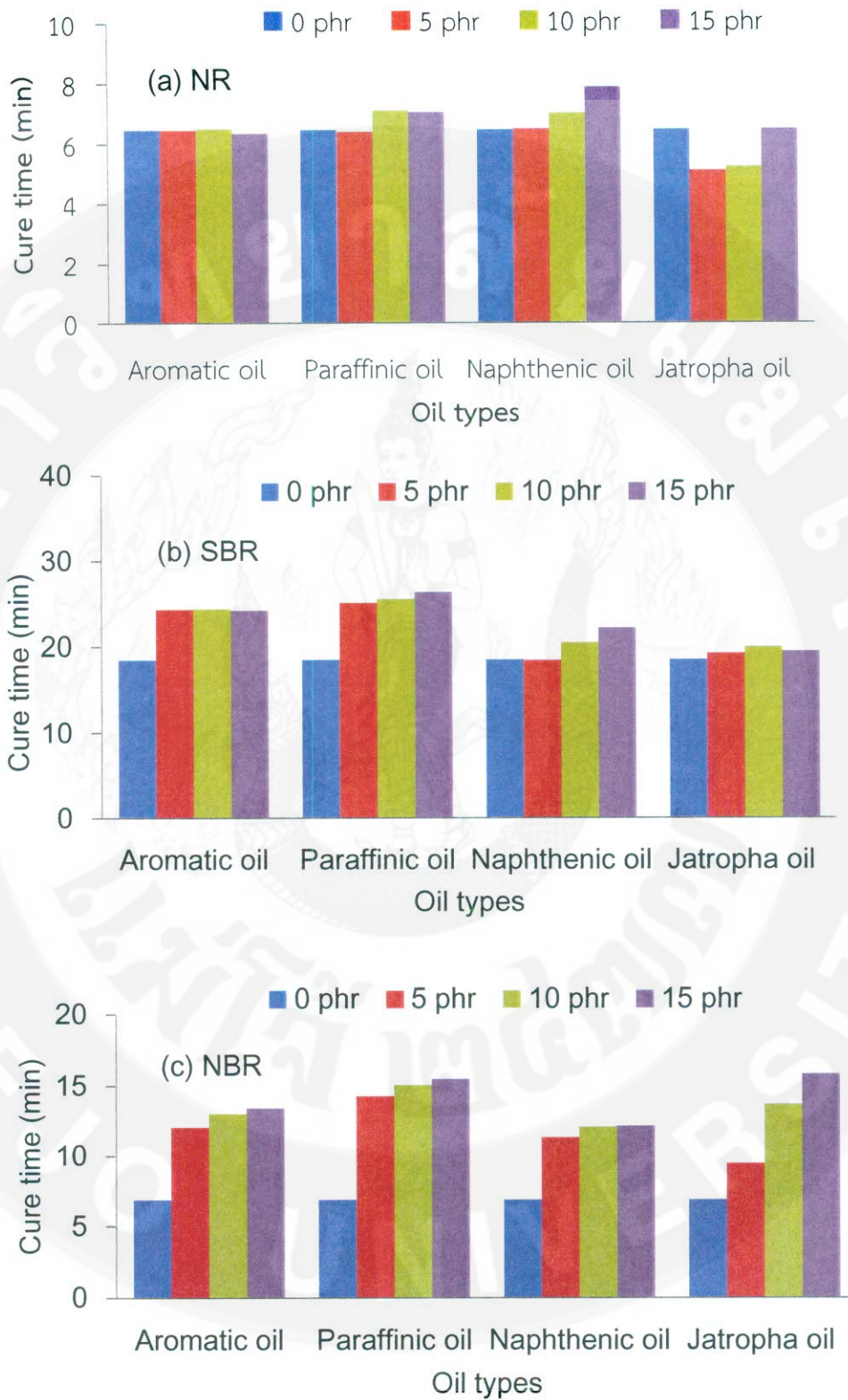
ภาพที่ 25 แสดงระยะเวลาที่ย่างสามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาที่ย่างสามารถแปรรูปได้ในยางทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมันเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางทำให้เกิดความห่างของสายโซ่โมเลกุล จึงทำให้โมเลกุลยางมีเวลาที่จะไหลได้นานขึ้นก่อนเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน นอกจากนี้พบว่ายาง SBR จะมีระยะปลอดภัยในการแปรรูปมากที่สุด (Scorch time สูง) เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่มีความเกาะกะของวงแหวนเบนซีนทำให้การไหลและการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นไปได้นานกว่ายางชนิดอื่น





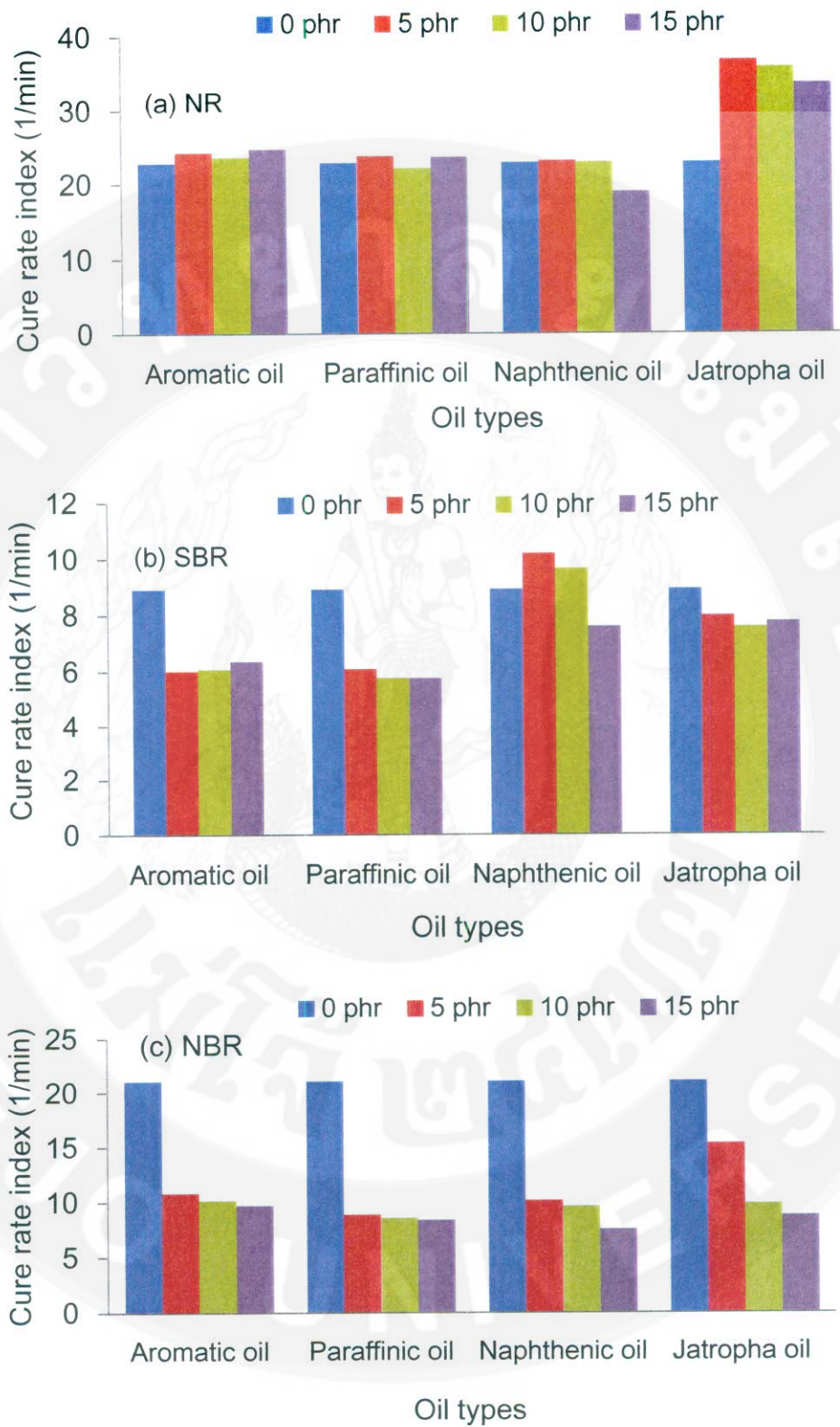
ภาพที่ 25 ระยะเวลาที่ย่างสามารถแปรรูปได้ (Scorch time) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 26 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์จนกระทั่งยางเกิดพันธะเชื่อมโยงสมบูรณ์ จากการทดลองพบว่าระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น เป็นผลเนื่องจากน้ำมันที่เติมลงไปนั้นจะเข้าแทรกระหว่างในสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้ไปขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมโยง จึงส่งผลให้ใช้เวลาวัลคาไนซ์นานขึ้น ซึ่งเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในยาง SBR และ NBR และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของชนิดน้ำมัน พบว่าการใช้น้ำมันสบู่ดำจะทำให้ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์น้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลเนื่องจากน้ำมันสบู่ดำมีกรดไขมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งกรดไขมันในปริมาณที่เหมาะสมจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น (Cure time ต่ำ) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับอัตราการวัลคาไนซ์ในภาพที่ 27 กล่าวคือ อัตราการวัลคาไนซ์ของยางทุกชนิดที่ใช้ น้ำมันสบู่ดำจะมีค่าสูงสุด



ภาพที่ 26 เวลาการวัลคาไนซ์ (Cure time) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR



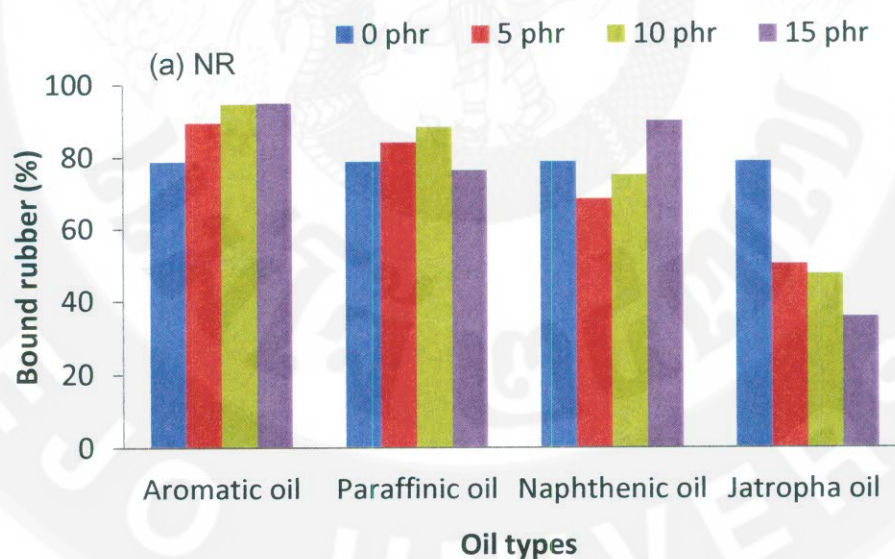
ภาพที่ 27 อัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมัน

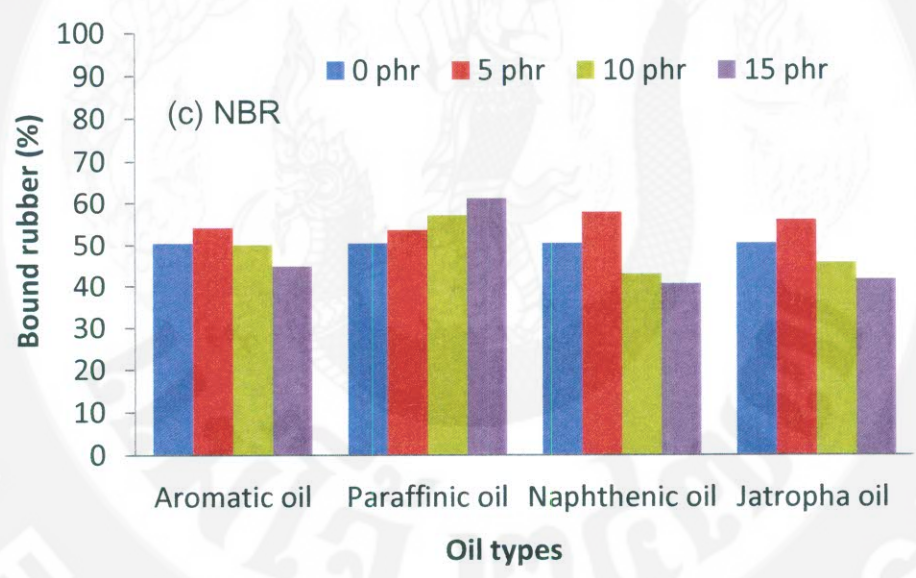
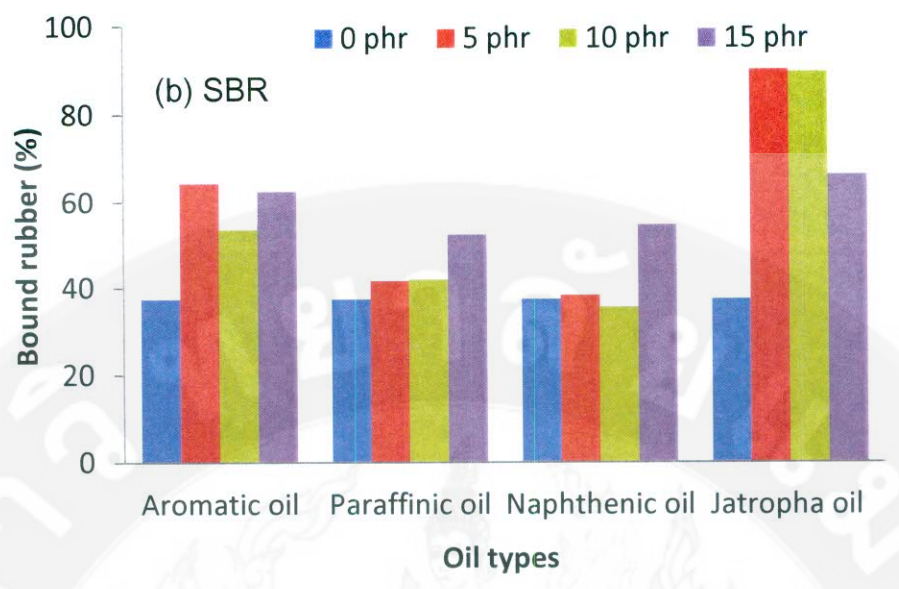
ต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR



## 2. ปริมาณยางบาวนด์ (Bound rubber content)

นำยางคอมพาวนด์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ มาทดสอบปริมาณยางบาวนด์ด้วยวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 2.3.1 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 28 ซึ่งปริมาณยางบาวนด์จะแสดงถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม ที่ไม่เกิดการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าการใช้ไขมันสบู่ดำในยาง NR จะทำให้ปริมาณยางบาวนด์ต่ำกว่าการใช้ไขมันปิโตรเลียมอาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณน้ำมันสบู่ดำที่แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางและอยู่บนอินเทอร์เฟซระหว่างพื้นผิวเขม่าดำกับยาง จึงส่งผลให้ปริมาณยางบาวนด์มีค่าต่ำ ในขณะที่การใช้ไขมันสบู่ดำในยาง SBR จะให้ปริมาณยางบาวนด์สูงกว่าน้ำมันปิโตรเลียม เป็นผลเนื่องจากหมู่เอสเทอร์ของไขมันสบู่ดำสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของอนุภาคเขม่าดำ ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยาง (Filler-rubber interaction) มากกว่าอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับสารตัวเติม (Filler-filler interaction) แม้จะมีน้ำมันแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง และพบว่าปริมาณยางบาวนด์ของยาง NBR ที่ใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ ให้ค่าใกล้เคียงกัน



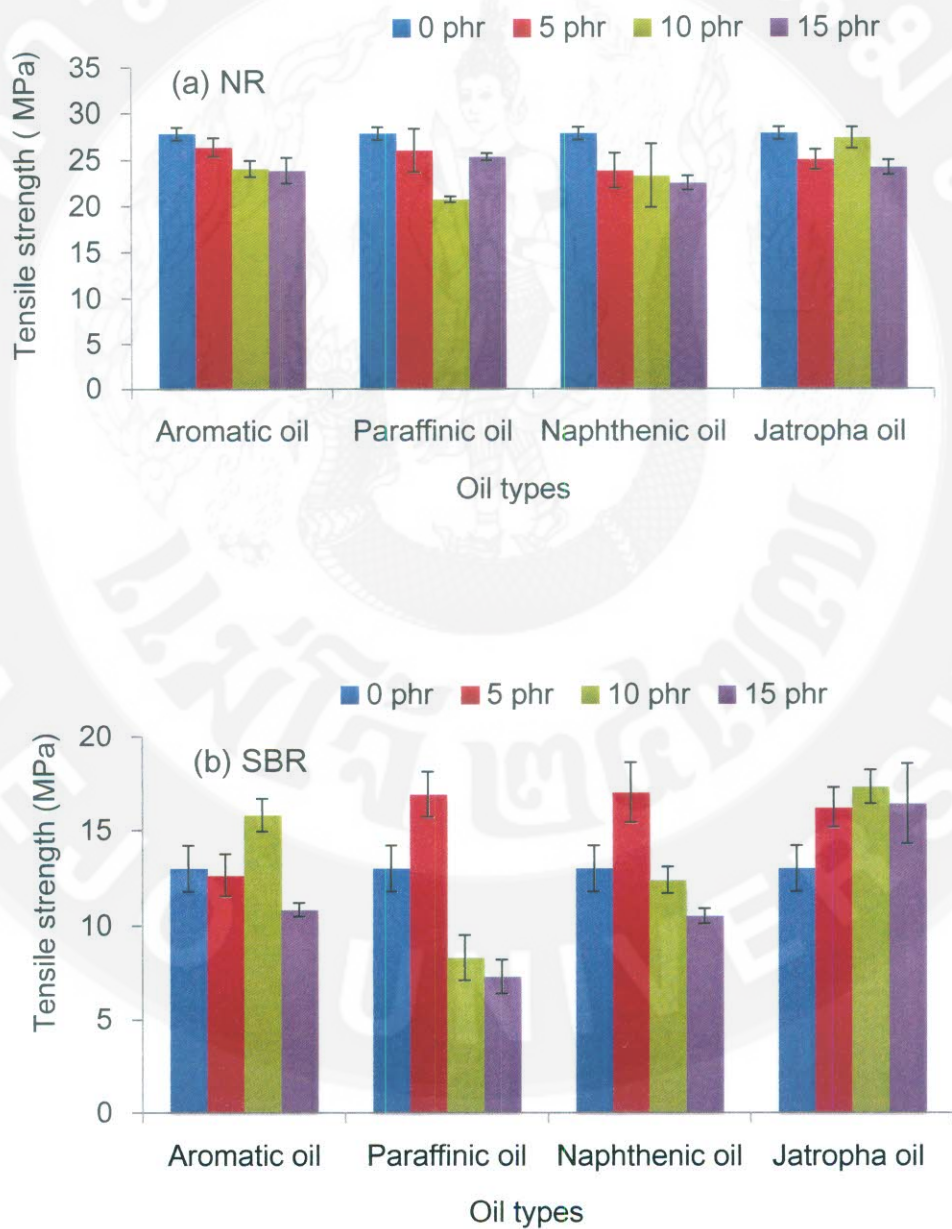


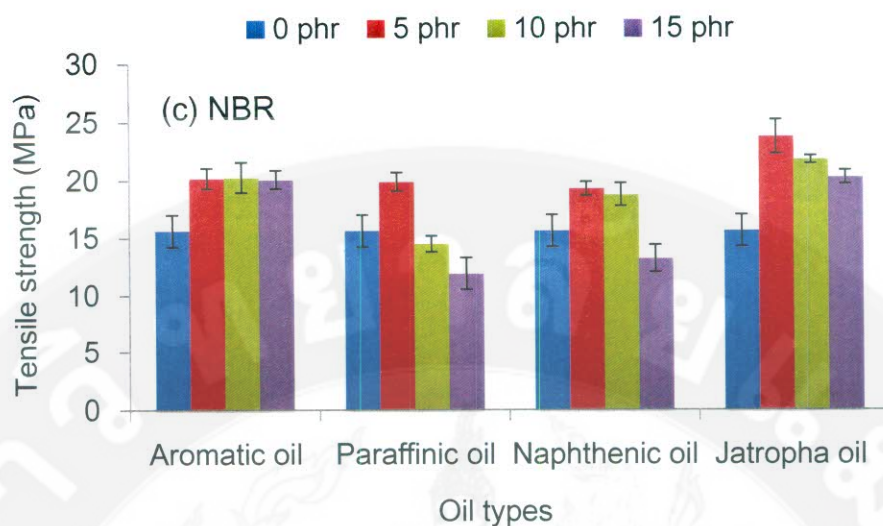
ภาพที่ 28 ปริมาณยางบววนด์ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ  
(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

### 3. สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

#### 3.1 สมบัติแรงดึง (Tensile properties)

นำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบสมบัติแรงดึงด้วยวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 2.4 ได้ผลการทดลองเป็นค่าความทนแรงดึง มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% และระยะยืดเมื่อขาด ดังภาพที่ 29-31 ตามลำดับ

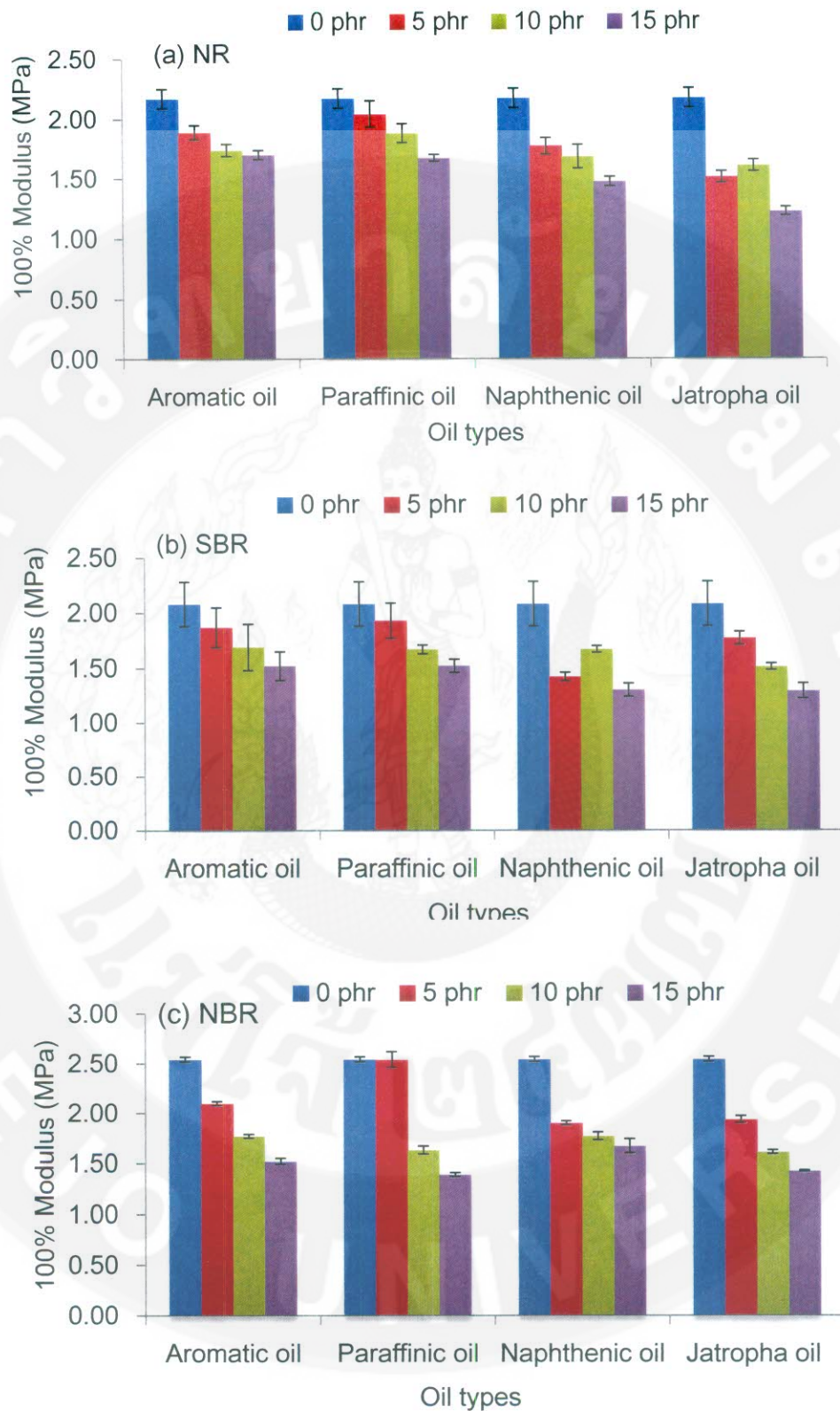




ภาพที่ 29 ความทนแรงดึงของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

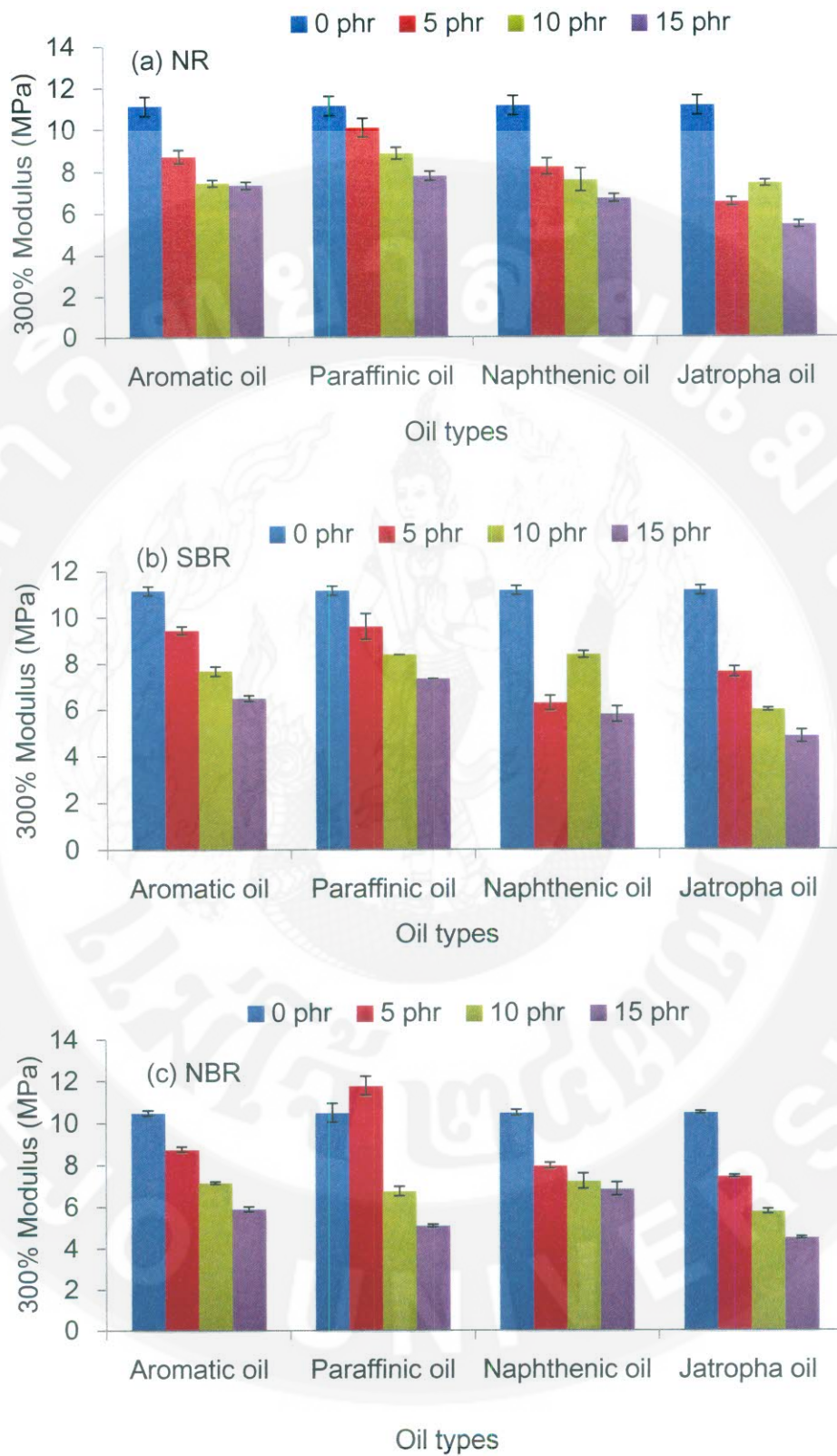
(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 29 พบว่าค่าความทนแรงดึงของยาง NR ที่ใช้น้ำมันทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricant) และแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง จึงเข้าไปขัดขวางความสามารถในการตกผลึกเมื่อดึงยึดของยาง NR ส่งผลให้ความทนแรงดึงมีค่าลดลง ในขณะที่ความทนแรงดึงของยาง SBR และยาง NBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณน้ำมันต่ำ ๆ (0-15 phr) เนื่องจากน้ำมันช่วยให้เขม่าดำกระจายตัวได้ดี แต่เมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นความทนแรงดึงก็จะลดลง เนื่องจากน้ำมันจะทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางลดลงและไปขัดขวางการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง นอกจากนี้ยังพบว่ายางที่ใช้น้ำมันสบู่ดำมีแนวโน้มให้ความทนแรงดึงสูงกว่าน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากในน้ำมันสบู่ดำจะมีส่วนประกอบของความไม่อิ่มตัวของเอสเทอร์ (Unsaturated ester) ซึ่งกำมะถันมีความว่องไวต่อความไม่อิ่มตัวดังกล่าว ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ร่วม (Co-Vulcanization) (Li *et al.*, 2015) ส่งผลให้ความทนแรงดึงของยางมีค่าสูง ซึ่งเห็นได้ชัดในยาง SBR และ NBR



ภาพที่ 30 มอดูลัสที่ร้อยละ 100 ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

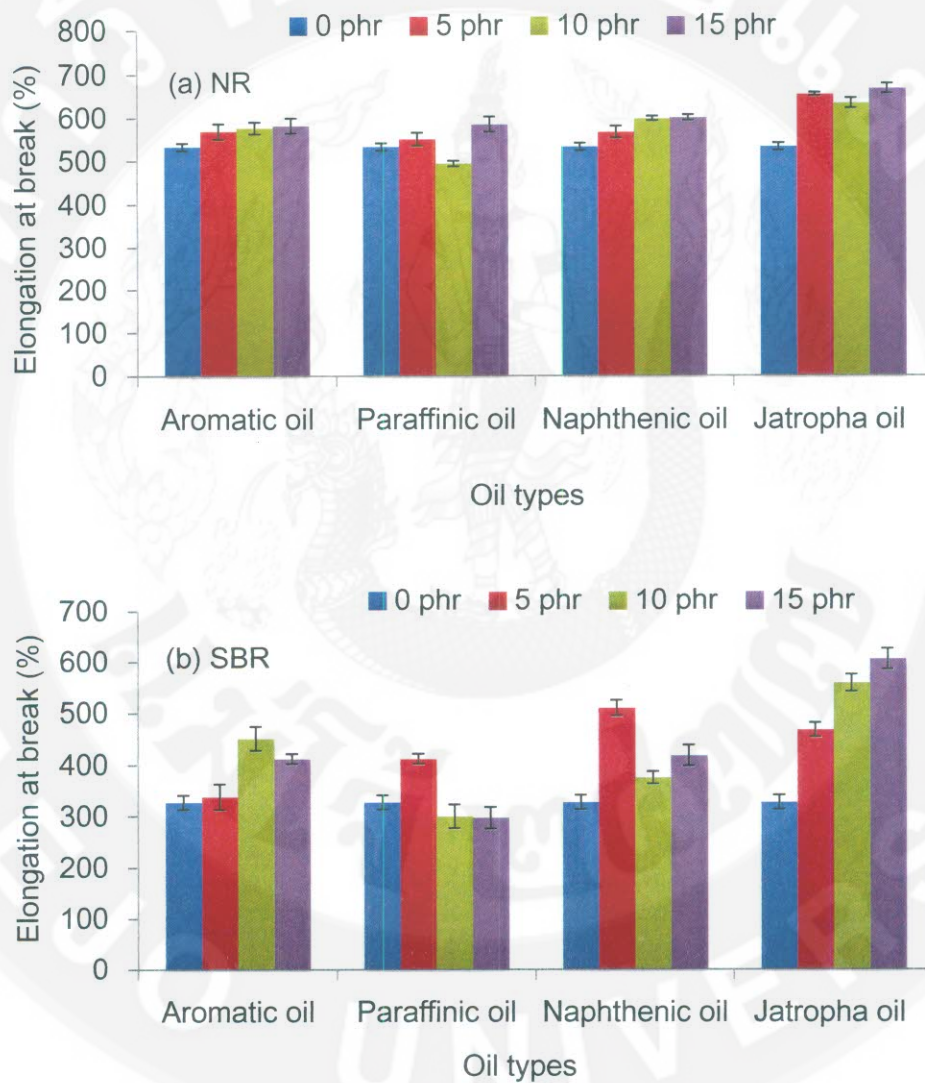
(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

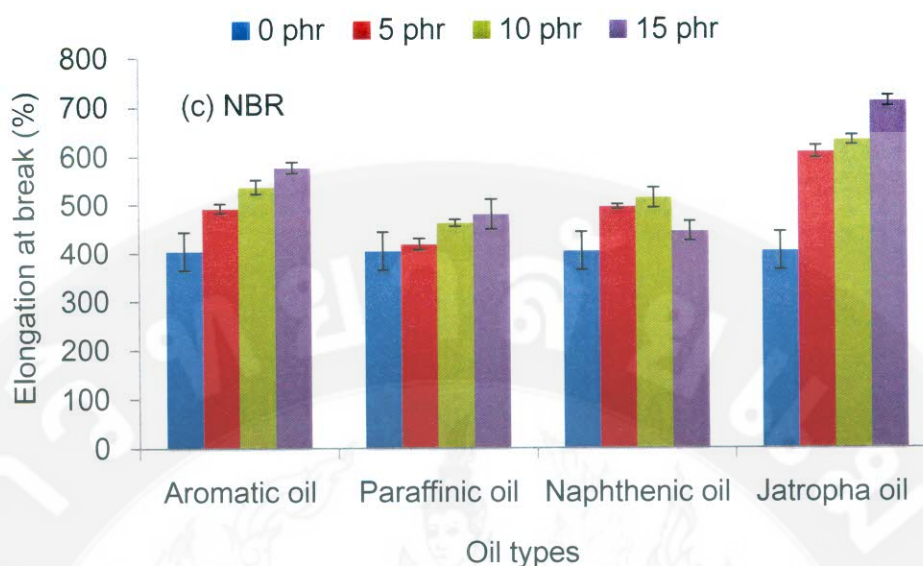


ภาพที่ 31 มอดูลัสที่ระยะยืด 300 % ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 30 และ 31 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ของยางวัลคาไนซ์ พบว่า ค่ามอดูลัสของยางทุกชนิดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยค่ามอดูลัสของยางทุกชนิดที่ใส่น้ำมันต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากน้ำมันที่ใส่ลงไปยางจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นและทำให้ยางนิ่ม ส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในโมเลกุลยางลดลง ยางจึงมีค่าความต้านต่อการผิดรูปต่ำเมื่อได้รับแรงดึง





ภาพที่ 32 ระยะยืดเมื่อขาดของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

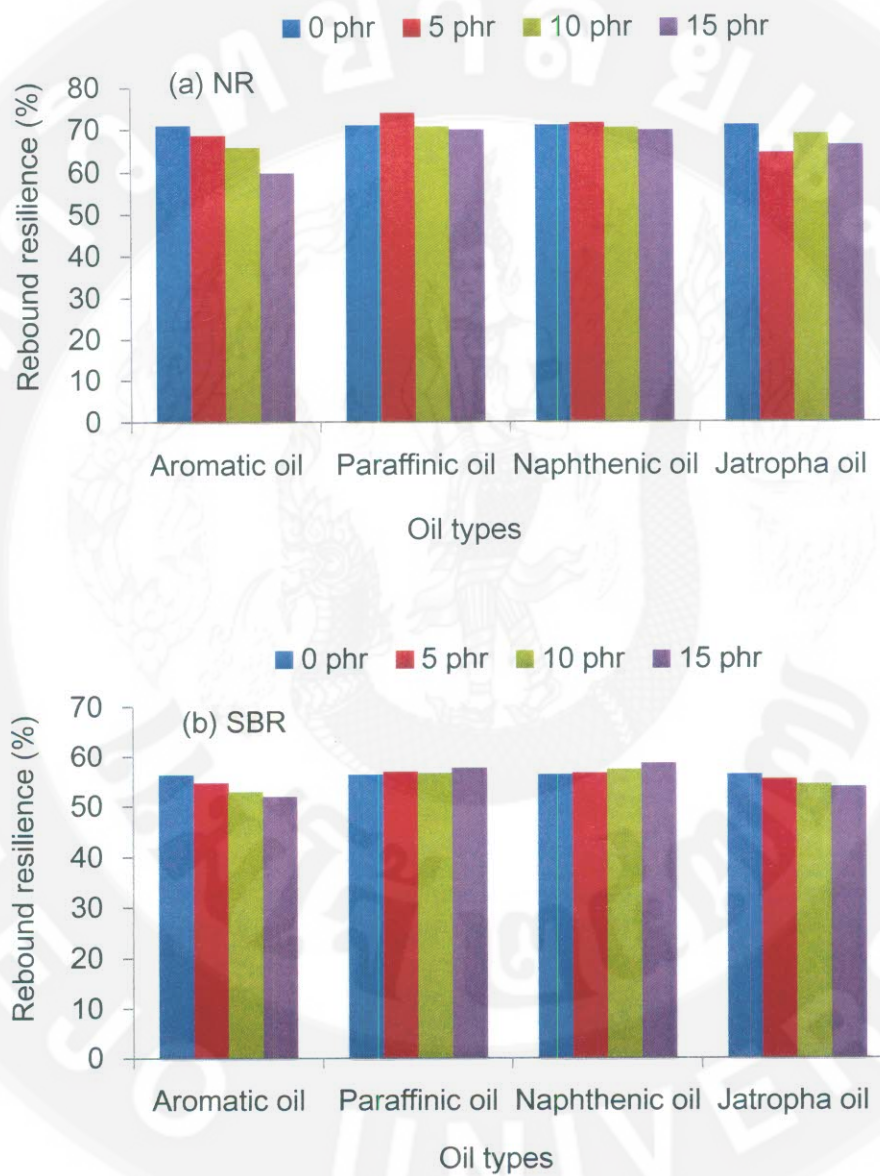
จากภาพที่ 32 พบว่าค่าระยะยืดเมื่อขาดของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ไขมันต่าง ๆ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณไขมัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไขมันจะทำให้สายโซ่ของยางมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพราะไขมันเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุลยางทำให้ปริมาณอิสระ (Free volume) ระหว่างสายโซ่ที่เกี่ยวข้องกันมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนไหวได้ง่าย ยางจึงมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งเห็นผลชัดเจนในยาง NR และ NBR นอกจากนี้พบว่าในยางทุกชนิดที่ใช้ไขมันสบู่ดำ จะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดสูงกว่าน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากปริมาณกรดไขมันในน้ำมันสบู่ดำและความว่องไวของซัลเฟอร์ที่มีต่อความไม่อิ่มตัวของน้ำมัน ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ระหว่างความไม่อิ่มตัวของน้ำมันและซัลเฟอร์ส่งผลให้ความหนาแน่นของพอลิซัลไฟด์ลดลง ยางจึงสามารถขยายตัวได้มากขึ้น (Cataldo *et al.*, 2013) ส่งผลให้ค่าระยะยืดเมื่อขาดมากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

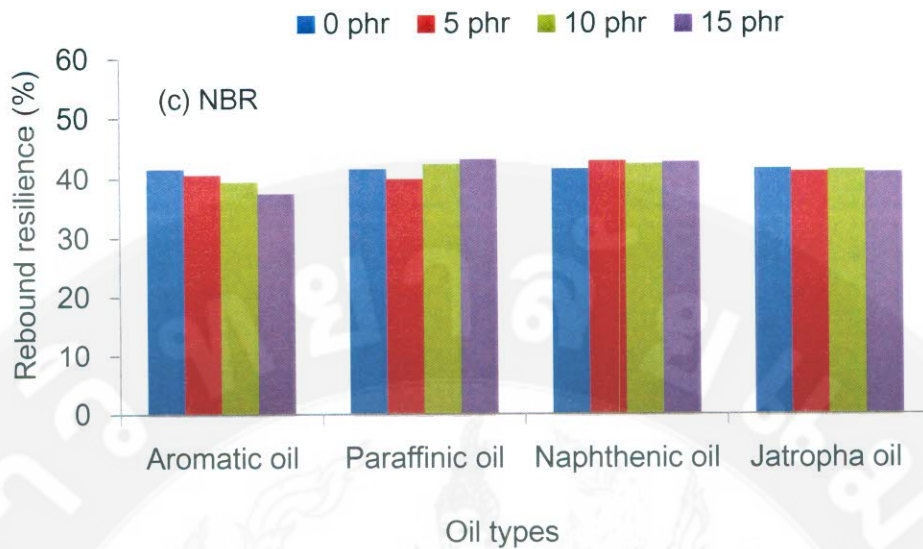


### 3.2 การกระเตื้องตัว (Rebound resilience)

นำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบการกระเตื้องตัวด้วยวิธีการทดลองในหัวข้อ 2.4 ได้ผลการทดลอง

แสดงดังภาพที่ 33





ภาพที่ 33 การกระเด็งตัวของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

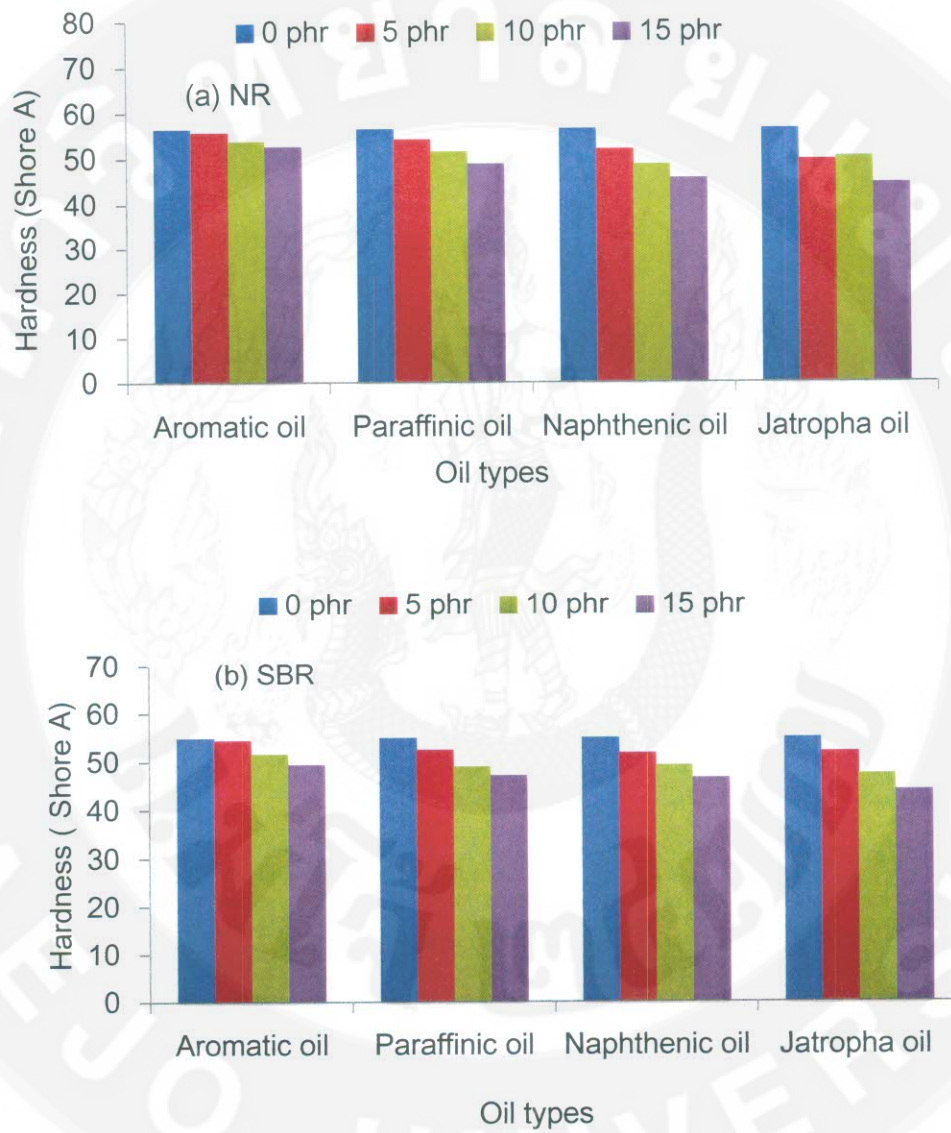
(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

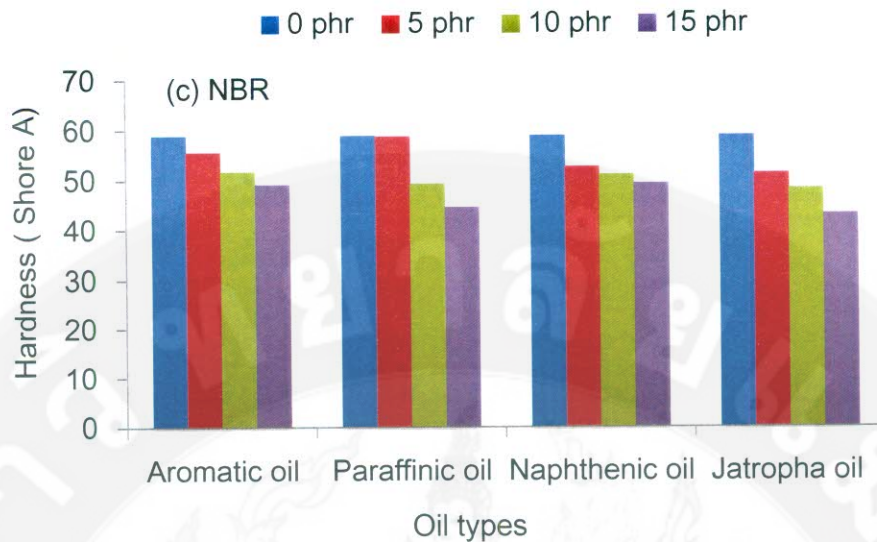
จากภาพที่ 33 พบว่าการใช้น้ำมันอะโรมาติกในน้ำมันทั้ง 3 ชนิด จะทำให้ค่าการกระเด็งตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของส่วนประกอบที่เป็นของไหลหนืด (Viscous component) ในยางคอมพาวนด์ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนระหว่างการผิดรูปค่าการกระเด็งตัวจึงมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ไขมันชนิดอื่นในปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าการกระเด็งตัวในยางวัลคาไนซ์มากนัก และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของยางต่อสมบัติการกระเด็งตัวพบว่ายาง NR จะให้ค่าการกระเด็งตัวสูงกว่ายาง SBR และยาง NBR ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) กล่าวคือ ยางที่มีค่า  $T_g$  ต่ำจะมีการกระเด็งตัวที่ดี ( $T_g$  ของ NR เท่ากับ  $-62.92$  °C,  $T_g$  ของ SBR เท่ากับ  $-48.11$  °C และ  $T_g$  ของ NBR เท่ากับ  $-23.88$  °C ในกรณีไม่เติมน้ำมัน)

### 3.3 ความแข็ง (Hardness)

นำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบความแข็งด้วยวิธีการทดลองในหัวข้อ 2.4 ได้ผลการทดลองแสดง

ดังภาพที่ 34





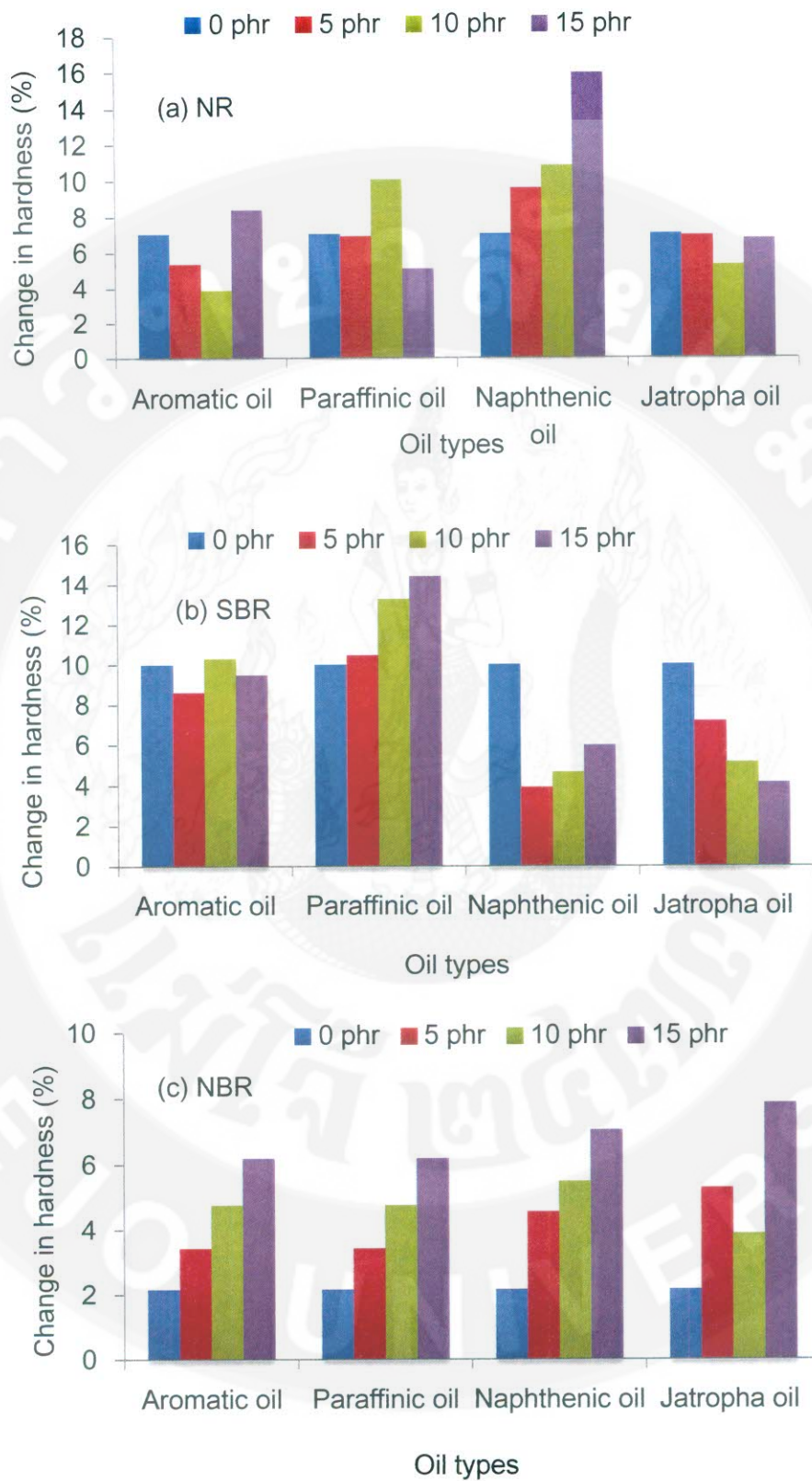
ภาพที่ 34 ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 34 พบว่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันจะเข้าไปแทรกระหว่างโมเลกุลยางและอยู่บริเวณอินเตอร์เฟซ (Interface) ระหว่างพื้นผิวเขม่าดำกับยางจึงส่งผลให้ความหนืดและความแข็งของยางมีค่าลดลง นอกจากนี้พบว่าการใช้น้ำมันสนุ่ดำในยางทุกชนิดจะมีอัตราการลดลงของความแข็งที่เห็นได้ชัดเจนซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลต่างของค่าแรงบิดในภาพที่ 24 โดยมีเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

### 3.4 การบ่มเร่งด้วยอากาศร้อน (Aging properties)

นำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 2.4 โดยเปรียบเทียบค่าความแข็งก่อนและหลังการบ่มเร่งและรายงานผลในรูปแบบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 35

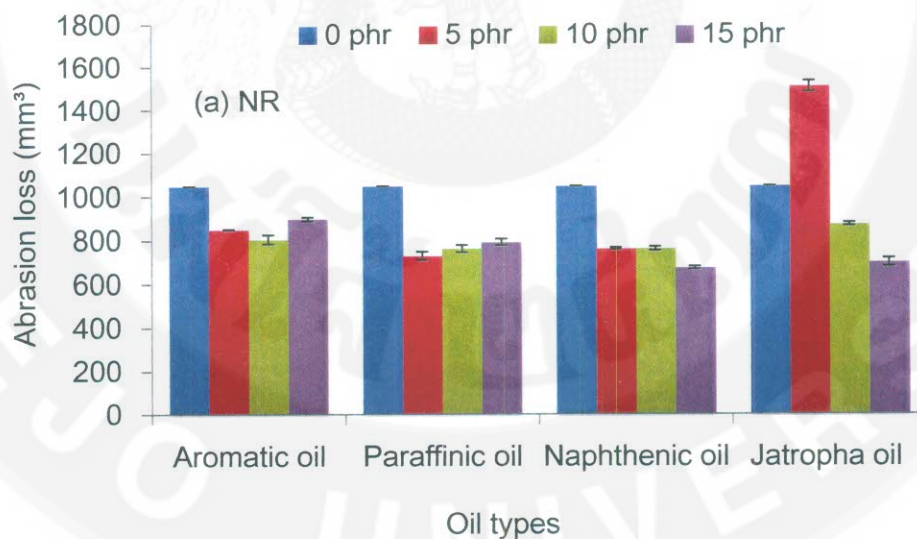


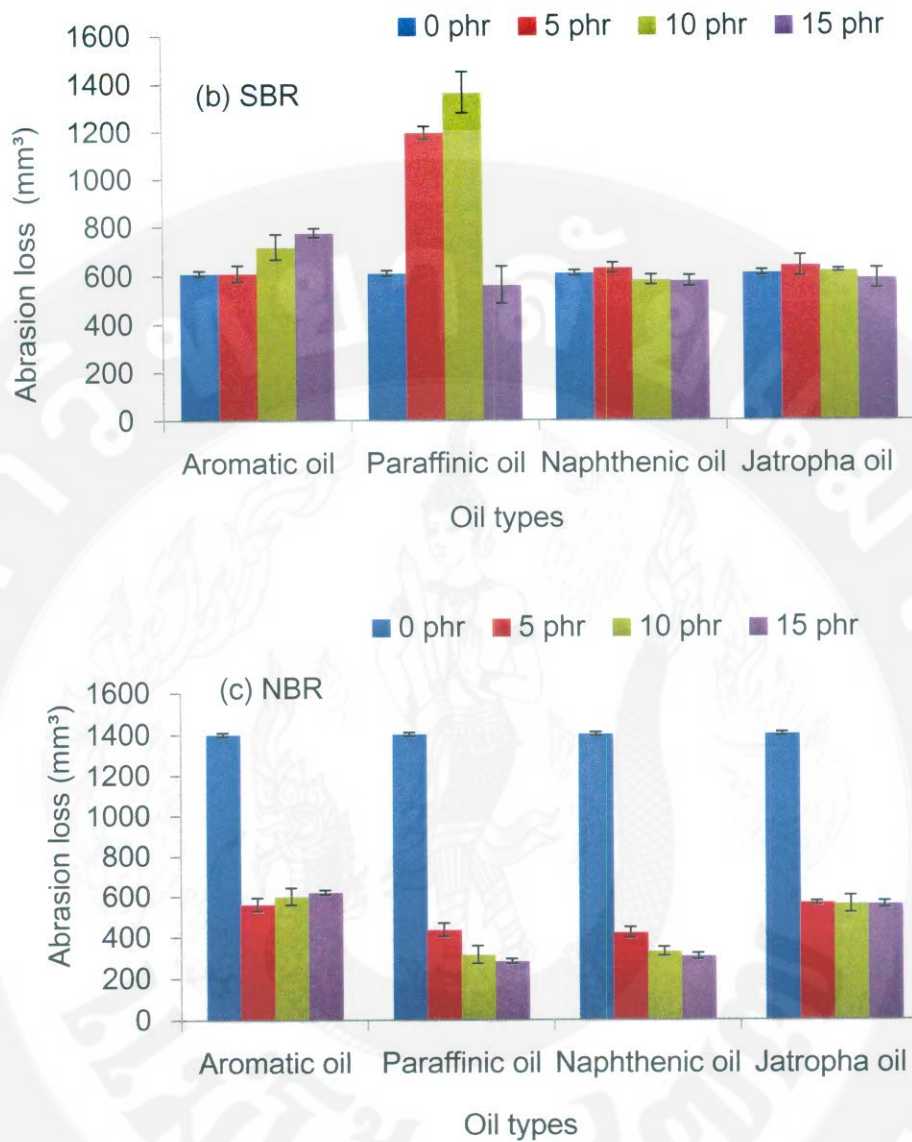
ภาพที่ 35 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความแข็งของยางวัลคาไนซ์ที่เปอร์ชนิดและ ปริมาณน้ำมันต่าง ๆ (a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 35 พบว่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์ทุกชนิดที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลยางสามารถเกิดการวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน (Post cure) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าค่าความแข็งหลังการบ่มเร่งของยาง NBR ที่ใช้น้ำมันสนุ่ดำมีค่ามากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสูง) เนื่องจากน้ำมันสนุ่ดำมีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) ซึ่งสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันในยาง จึงส่งผลให้ยาง NBR ที่ใช้น้ำมันสนุ่ดำมีความต้านทานการบ่มเร่งที่ดี ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความแข็งหลังการบ่มเร่งของยาง NR และ ยาง SBR ที่ใช้น้ำมันสนุ่ดำจะมีแนวโน้มต่ำกว่าน้ำมันปิโตรเลียม อาจเป็นผลเนื่องจากชนิดของยางที่มีความต้านทานต่อความร้อนต่ำจึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน

### 3.5 ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

นำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบความต้านทานต่อการขัดถูโดยวัดปริมาตรการสึกหรอตามวิธีการทดลองในหัวข้อ 2.4 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 36





ภาพที่ 36 ปริมาณการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

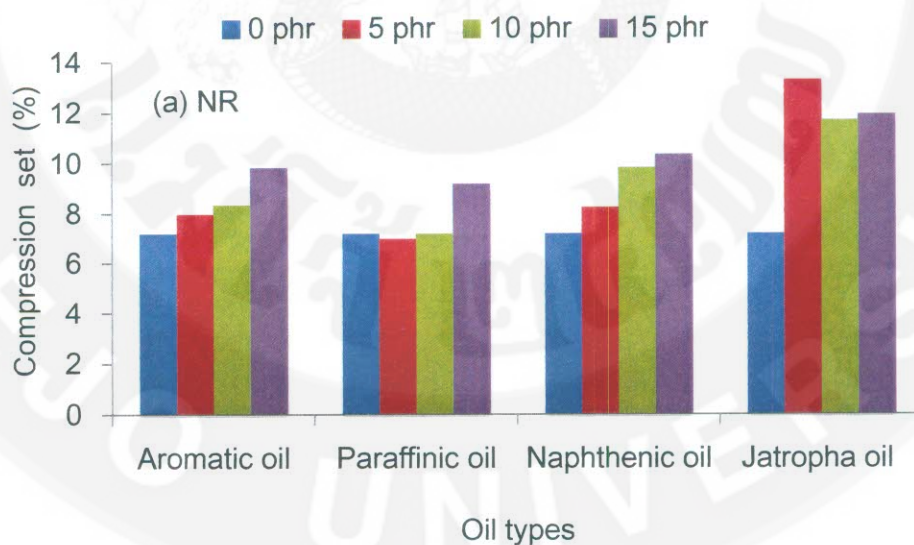
จากภาพที่ 36 พบว่าการใช้น้ำมันปิโตรเลียมในยาง NR ที่ปริมาณต่าง ๆ จะทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าน้ำมันสนุดำ (ปริมาณการสึกหรอน้อย) อาจเป็นผลเนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเขม่าดำ และความสามารถในการเคลื่อนไหวน้ำมัน แต่เมื่อปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมเพิ่มขึ้นจะทำให้ยางวัลคาไนซ์มีปริมาณการสึกหรอมากขึ้นซึ่งเห็นได้ชัดเจนกรณีน้ำมันอะโรมาติกและน้ำมันพาราฟินิก ในทางตรงกันข้ามการใช้น้ำมันสนุดำในยาง NR ที่ปริมาณ 5 phr จะทำให้ยางมีความต้านทานการสึกหรอลดลง เนื่องจากน้ำมันสนุดำสามารถเข้ากันได้ดีกับยาง

NR โดยจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางและอยู่บนอินเตอร์เฟสระหว่างพื้นผิวเขม่าดำกับยางจึงทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้สูญเสียเนื้อยางในระหว่างการขาด แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อปริมาณน้ำมัน สบู่ดำมากกว่า 5 phr จะทำให้ปริมาตรการสึกหรอมีค่าลดลง

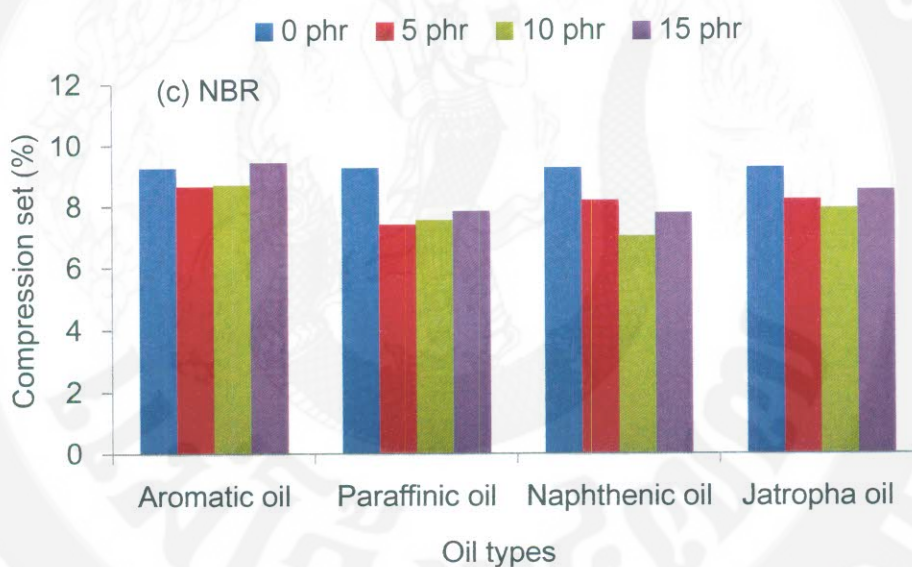
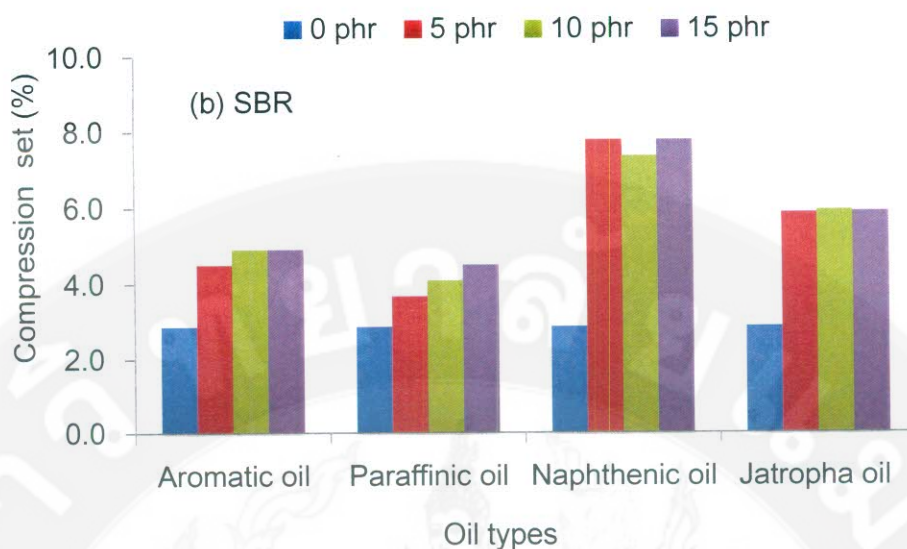
ในกรณียาง SBR พบว่าปริมาตรการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณน้ำมัน ยกเว้นน้ำมันพาราฟินิก อาจเป็นผลเนื่องจากการมีส่วนร่วมของพาราฟินิกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้กับยางและเขม่าดำต่ำ จึงส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอน้อยกว่าน้ำมันชนิดอื่น ส่วนในกรณีของยาง NBR พบว่าปริมาตรการสึกหรอของยางที่เติมน้ำมันทุกชนิดมีค่าต่ำกว่าการไม่เติมน้ำมันอย่างชัดเจน เป็นผลเนื่องจากเขม่าดำมีการกระจายตัวที่ดีในยางและโมเลกุลยางสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายจึงต้านทานการขาดได้ดี

### 3.6 การเสีรูปลังการกดอัด (Compression set)

นำยางวัลคาไนซ์มาทดสอบการเสีรูปลังการกดอัด ตามวิธีการทดลองในหัวข้อที่ 2.4 ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 37





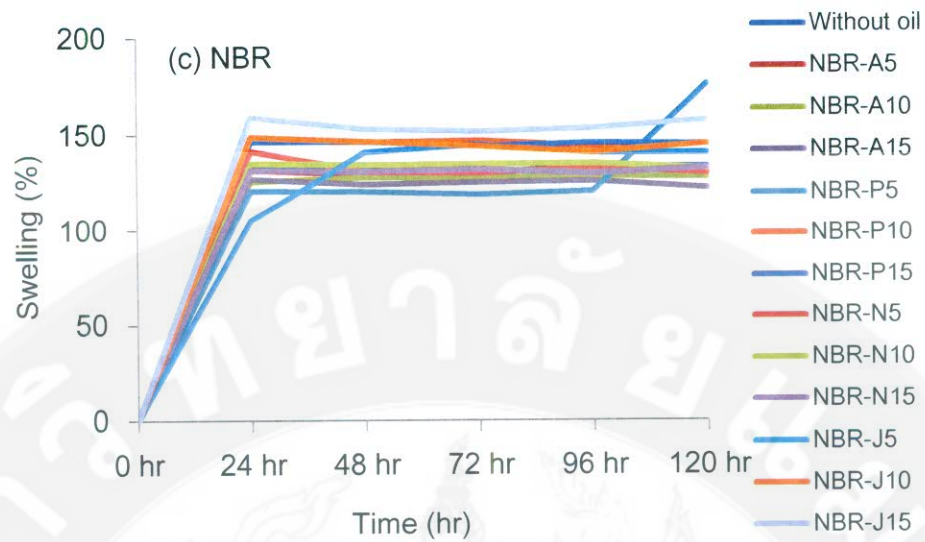


ภาพที่ 37 การเสีรูปร่างหลังการกดอัดของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR

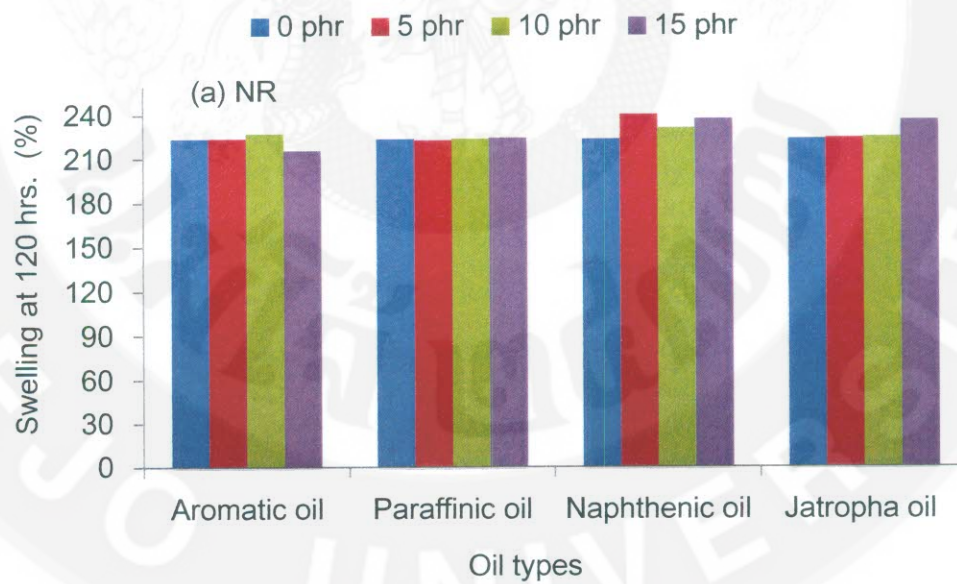
จากภาพที่ 37 พบว่าการเสีรูปร่างหลังการกดอัดของยาง NR และ SBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากการมีน้ำมันแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ทำให้ความสามารถในการคืนรูปเมื่อนำแรงกระทำออกไปทำได้ยาก นอกจากนั้นเป็นผลจากการที่ยาง NR และ SBR มีความสามารถในการทนความร้อนต่ำทำให้พันธะเชื่อมโยงถูกทำลายจึงทำให้เสีรูปร่างได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามพบว่าการเสีรูปร่างหลังการกดอัดในยาง NBR ที่ใช้น้ำมันทุกชนิดมีค่าต่ำกว่า

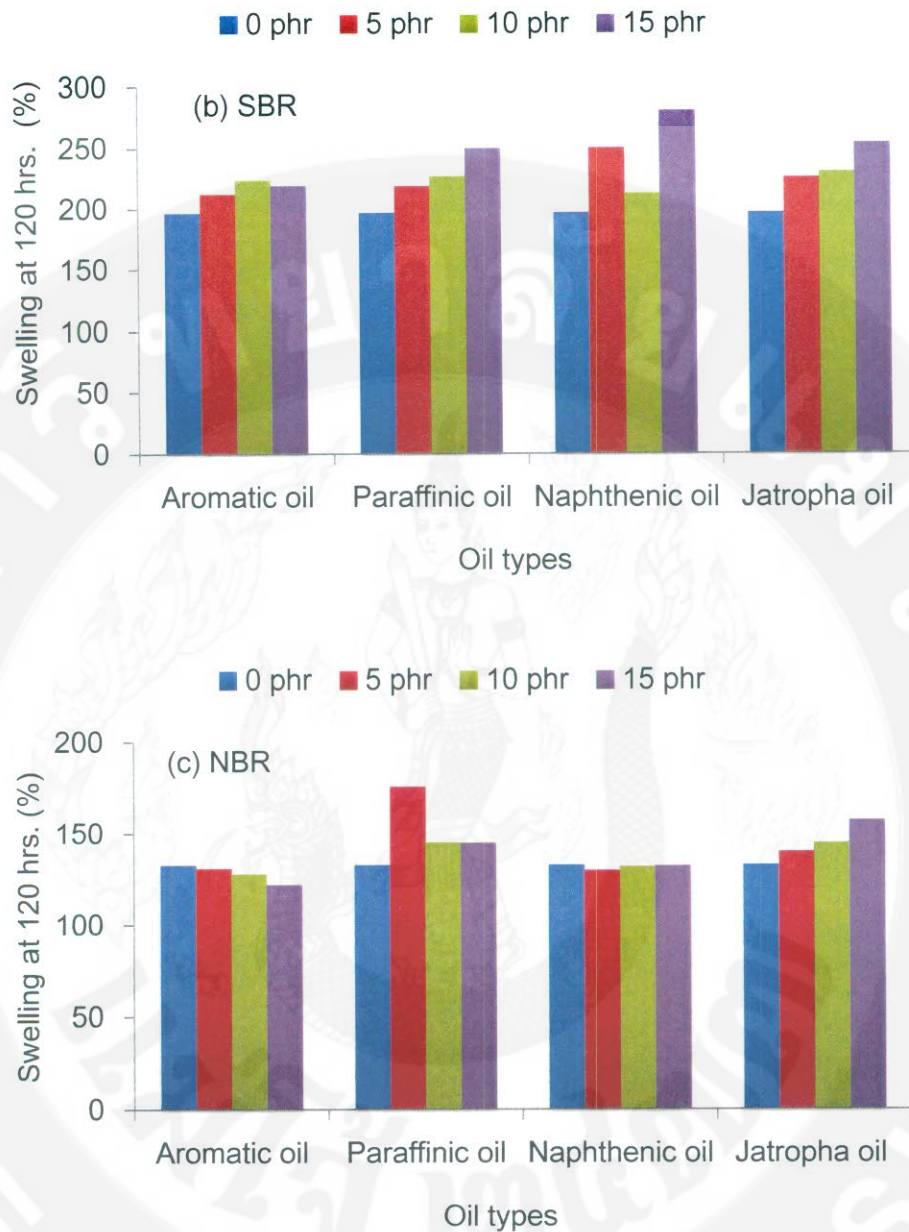




ภาพที่ 38 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ

(a) NR (b) SBR และ (c) NBR





ภาพที่ 39 เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ ที่เวลา 120 ชั่วโมง (a) NR (b) SBR และ (c) NBR

จากภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับเปอร์เซ็นต์การบวมพองของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันต่าง ๆ พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 24 ชั่วโมงแรก เนื่องจากโทลูอีนสามารถแพร่เข้าไปภายในโมเลกุลยางได้ดีและยางดูดซับโทลูอีนไว้ แต่เมื่อเวลามากขึ้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองมีค่าคงที่ เนื่องจากโมเลกุลยางอึดตัวด้วยโทลูอีน นอกจากนี้พบว่าที่เวลา 120 ชั่วโมง (ภาพที่ 39) เปอร์เซ็นต์การบวมพองของ NR ที่ใช้น้ำมันต่าง ๆ มี

ค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดและปริมาณของน้ำมันไม่มีผลต่อความต้านทานการบวมพองของยาง NR ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การบวมพองของยาง SBR จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเพิ่มปริมาณน้ำมันจะไปขัดขวางการเชื่อมโยงโมเลกุลยาง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลต่างของแรงบิดที่ลดลง (ภาพที่ 24) นอกจากนี้พบว่าในยาง NBR ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติกจะมีเปอร์เซ็นต์การบวมพองลดลงเมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีการกระจายตัวของเขม่าดำในยางได้ดีจึงทำให้ยางมีความต้านทานการบวมพองที่ดี และพบว่ายาง NBR ที่ใส่น้ำมันพาราฟินิกที่ปริมาณ 5 phr มีเปอร์เซ็นต์การบวมพองสูงมากอาจเป็นผลเนื่องจากน้ำมันพาราฟินิกมีปริมาณอะโรมาติกต่ำจึงเข้ากับยาง NBR ได้ยาก ทำให้การกระจายตัวของเขม่าดำไม่ดี ส่งผลให้ยางมีเปอร์เซ็นต์การบวมพองสูง

#### 4. การจัดลำดับน้ำมันที่เหมาะสมต่อสมบัติยางวัลคาไนซ์ต่างๆ ด้วยโปรแกรม Statistic 17.0

นำค่าเฉลี่ยสมบัติต่าง ๆ ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรชนิดและปริมาณน้ำมันมาเปรียบเทียบเพื่อจัดกลุ่มด้วยโปรแกรม Statistic 17.0 ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 8-12

ตารางที่ 8 การจัดลำดับค่าความแข็งจากโปรแกรม Statistic 17.0\*

A	B	C	D	E	F	G	H	I
NBR-P5	NR-0	SBR-A5	NBR-N5	NR-J10	SBR-P10	SBR-J10	NR-N15	NBR-J15
NBR-0	NR-A15	NR-P5	SBR-P5	NR-J5	NBR-A15	SBR-P15	NBR-P15	
	NR-A5	NR-A10	SBR-J5	NBR-P10	NR-P15	SBR-N15	NR-J15	
NBR-A5			SBR-N5	SBR-A15	NR-N10		SBR-J15	
SBR-0			SBR-A10	NBR-N15	NBR-J10			
			NBR-A10	SBR-N10				
			NBR-J5					
			NR-N5					
			NR-P10					
			NBR-N10					

\* กลุ่ม A หมายถึง กลุ่มที่มีความแข็งสูงที่สุด (ดี)

จากตารางที่ 8 พบว่ายาง NBR ที่ไม่ใส่น้ำมันและใส่น้ำมันพาราฟินิก 5 phr จะให้ค่าความแข็งสูงที่สุดในยางทุกชนิด และยาง NBR และยาง SBR ที่ใส่น้ำมันสบู่ดำที่ปริมาณต่าง ๆ จะให้ค่าความแข็งใกล้เคียงกัน โดยยาง NBR ที่ใส่น้ำมันสบู่ดำ 15 phr จะให้ค่าความแข็งต่ำที่สุดในยางทุกชนิด

ตารางที่ 9 การจัดลำดับค่าปริมาตรการสึกหรอจากโปรแกรม Statistic 17.0\*

A	B	C	D	E	F	G	H	I
NBR-P15	NBR-P10	NBR-N15	NBR-J15	SBR-J15	NR-N15	NR-N5	NR-0	SBR-P5
NBR-N15	NBR-N10	NBR-P5	SBR-N15	NBR-A10	NR-J15	NR-P10		SBR-P10
			NBR-J10	SBR-A15	NR-N10	SBR-A15		NBR-0
			NBR-A5	SBR-0	SBR-A10	NR-P15		NR-J5
			SBR-P15	SBR-J10	NR-P5	NR-A10		
			NBR-J5	NBR-A15		NR-J10		
			SBR-N10	SBR-N5		NR-A15		
				SBR-J5				

\* กลุ่ม A หมายถึง กลุ่มที่มีปริมาตรการสึกหรอต่ำที่สุด (ดี)

จากตารางที่ 9 จะพบว่ายาง NBR ที่ใช้น้ำมันเนฟทีนิกและน้ำมันพาราฟินิกที่ปริมาณ 15 phr จะให้ค่าปริมาตรการสึกหรอต่ำที่สุด โดยยาง NBR ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำจะให้ค่าปริมาตรการสึกหรอต่ำกว่ายาง SBR และยาง NR ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำ ตามลำดับ

ตารางที่ 10 การจัดลำดับค่าการคืนรูปหลังการกดอัดจากโปรแกรม Statistic 17.0\*

A	B	C	D	E	F	G	H	I
SBR-0	SBR-P5	SBR-P15	SBR-A10	NR-P10	SBR-N10	SBR-N5	NBR-P5	NR-J10
	SBR-P10	SBR-A5	SBR-J5	NR-N10	NR-A15	NR-A5	NR-P5	NR-N10
		SBR-A15	SBR-J10	NR-0	SBR-N15	NBR-N5	NBR-P10	NR-A10
			SBR-J15	NBR-A10	NR-P15	NBR-N15		NBR-P15
				NBR-A5	NR-A15	NBR-J5		NBR-0
					NBR-J10	NR-N5		NR-N15
						NR-J5		NR-J15
						NBR-J15		

\* กลุ่ม A หมายถึง กลุ่มที่มีการคืนรูปหลังการกดอัดสูงที่สุด (ดี)

จากตารางที่ 10 พบว่าการเสียรูปหลังการกดอัดของยาง SBR ที่ไม่ใส่น้ำมันจะให้ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำกว่าน้ำมันทุกชนิด โดยยาง SBR ที่ใส่น้ำมันสบู่อัดที่ปริมาณต่าง ๆ จะให้ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำกว่ายาง NBR และยาง NR ที่ใส่น้ำมันสบู่อัดที่ปริมาณต่าง ๆ ตามลำดับ



ตารางที่ 11 การจัดลำดับค่าความทนแรงดึงจากโปรแกรม Statistic 17.0\*

A	B	C	D	E	F	G
NR-0	NR-A5	NBR-P5	NBR-P10	SBR-A15	SBR-P10	SBR-P15
NR-J10	NBR-A5	NBR-N15	NBR-N15	SBR-N15		
	NR-P5	NBR-N10	SBR-A5			
	NR-P15	NBR-5	SBR-N10			
	NR-J5	NBR-A10	SBR-0			
	NR-A10	SBR-J10	NBR-P15			
	NR-N5	SBR-N5				
	NR-N10	SBR-P5				
	NBR-J5	SBR-J15				
	NR-N10	SBR-J5				
	NR-N15	SBR-A10				
	NBR-J10	NBR-0				
	NR-P10					
	NBR-J15					

\* กลุ่ม A หมายถึง กลุ่มที่มีความทนแรงดึงสูงที่สุด (ดี)

จากตารางที่ 11 พบว่าความทนแรงดึงของยาง NR ที่ไม่ใส่น้ำมัน และยาง NR ที่ใส่น้ำมันสนุ่  
 ค่า 10 phr จะให้ค่าความทนแรงดึงสูงที่สุด โดยยาง NR ที่ใส่น้ำมันสนุ่ค่าทุกปริมาณจะให้ค่าความ  
 ทนแรงดึงมากกว่ายาง NBR และยาง SBR ที่ใส่น้ำมันสนุ่ค่าที่ปริมาณต่าง ๆ ตามลำดับ

ตารางที่ 12 การจัดลำดับค่าระยะยืดเมื่อขาดจากโปรแกรม Statistic 17.0\*

A	B	C	D	E	F	G	H	I
NBR-J15	NR-J5	NBR-J10	NR-N15	NBR-A10	SBR-A10	NBR-P5	SBR-N10	SBR-A5
	NR-J15	NR-J10	NBR-J5	NR-P5	NBR-N15	SBR-N15		
			SBR-J15	NR-0		SBR-P5		
			NR-N10	NBR-N10		SBR-A15		
			NR-P15	SBR-N5		NBR-0		
			NR-A15	NBR-N5				
			NR-A10	NR-P10				
			NBR-A15	NBR-A5				
			NR-N5	NBR-P15				
			NR-A5	SBR-J5				
			SBR-J10	NBR-P10				
J					K			
SBR-0					SBR-P15			
SBR-10								

\* กลุ่ม A หมายถึง กลุ่มที่มีระยะยืดเมื่อขาดสูงที่สุด (ดี)

จากตารางที่ 12 พบว่าระยะยืดเมื่อขาดของยาง NR ยาง SBR และยาง NBR ที่ใช้น้ำมันสนุ่ดำในทุกปริมาณจะให้ค่าระยะยืดเมื่อขาดสูงกว่าน้ำมันปิโตรเลียมโดยยาง NBR ที่ใช้น้ำมันสนุ่ดำจะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดสูงกว่ายาง NR และยาง SBR ที่ใช้น้ำมันสนุ่ดำในปริมาณต่าง ๆ ตามลำดับ

## สรุปผลการวิจัย

### 1. สรุปผลการวิจัย

#### 1.1 ลักษณะการวัดคาบไวนซ์

(1) ค่าแรงบิดต่ำสุดของยางทุกชนิดที่ใช้ น้ำมันสบู่อ่าจะมีค่าต่ำสุด แสดงให้เห็นว่าน้ำมันสบู่อ่าสามารถลดพลังงานในการแปรรูปยางได้ดีกว่าน้ำมันปิโตรเลียม และค่าแรงบิดต่ำสุดของยาง NR และ SBR มีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมันทุกชนิดที่เพิ่มขึ้น แต่จะให้ผลในทางตรงกันข้ามในยาง NBR

(2) ค่าแรงบิดสูงสุดของยาง NR และ SBR ที่เติมน้ำมันทุกชนิดมีค่าลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลในทางตรงกันข้ามกับยาง NBR และน้ำมันสบู่อ่าจะให้ค่าแรงบิดสูงสุดน้อยกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

(3) ระยะเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ของยางทุกชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น โดยยาง SBR จะมีระยะปลอดภัยในการแปรรูปมากที่สุด

(4) ระยะเวลาในการวัดคาบไวนซ์ของยางทุกชนิดที่ผสมน้ำมันสบู่อ่าจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันปิโตรเลียม และพบว่าปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะเวลาในการวัดคาบไวนซ์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเห็นได้ชัดเจนในยาง SBR และ NBR

#### 1.2 ปริมาณยางบววนด์

การใช้น้ำมันสบู่อ่าในยาง NR จะทำให้ปริมาณยางบววนด์ต่ำกว่าการใช้น้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามในยาง SBR ส่วนในยาง NBR มีปริมาณยางบววนด์ที่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

#### 1.3 สมบัติเชิงกลของยางวัดคาบไวนซ์

(1) ค่าความทนแรงดึงของยาง NR ที่ใช้น้ำมันทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนแรงดึงของยาง SBR และยาง NBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณน้ำมันต่ำ ๆ นอกจากนี้พบว่าการใช้น้ำมันสบู่อ่ามีแนวโน้มให้ความทนแรงดึงสูงกว่าน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเห็นได้ชัดในยาง SBR และ NBR

(2) ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 % และ 300 % ของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น

(3) ค่าระยะยืดเมื่อขาดของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ไขมันต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันซึ่งเห็นผลชัดเจนในยาง NR และ NBR และพบว่ายางทุกชนิดที่ใช้ไขมันสปูค่าจะมีค่าระยะยืดเมื่อขาดสูงกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

(4) การใช้ไขมันอะโรมาติกในยางทุกชนิดจะทำให้ค่าการกระเดื่องตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น แต่การใช้ไขมันชนิดอื่นในปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการกระเดื่องตัวในยางวัลคาไนซ์มากนัก

(5) ความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น และการใช้น้ำมันสปูค่าในยางทุกชนิดจะมีความแข็งลดลงอย่างเห็นได้ชัด

(6) ยางวัลคาไนซ์ทุกชนิดมีค่าความแข็งหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งหลังการบ่มเร่งของยาง NBR ที่ใช้น้ำมันสปูค่ามีค่ามากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม แต่เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความแข็งหลังการบ่มเร่งของยาง NR และ ยาง SBR ที่ใช้น้ำมันสปูค่าจะมีแนวโน้มต่ำกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

(7) การใช้น้ำมันปิโตรเลียมในยาง NR ที่ปริมาณต่าง ๆ จะทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าน้ำมันสปูค่า และการเติมน้ำมันทุกชนิดในยาง NBR จะให้ปริมาตรการสึกหรอที่ต่ำกว่ากรณีไม่เติมน้ำมันอย่างชัดเจน

(8) การเสีรูปหลังการกดอัดของยาง NR และ SBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันที่เพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าการเสีรูปหลังการกดอัดในยาง NBR ที่ใช้น้ำมันทุกชนิดมีค่าต่ำกว่ากรณีไม่ใส่น้ำมัน

(9) เปอร์เซ็นต์การบวมพองของ NR ที่ใช้น้ำมันต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยาง SBR จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น และในยาง NBR ที่ใส่น้ำมันอะโรมาติกจะมีเปอร์เซ็นต์การบวมพองลดลงเมื่อปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้น แต่ในน้ำมันชนิดอื่นจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การบวมพองเพิ่มขึ้น

## 2. ข้อเสนอแนะ

### 2.1 การนำผลการวิจัยไปใช้

สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ในการปรับปรุงสูตรเพื่อพัฒนาในการใช้น้ำมันสบู่ดำแทนน้ำมันปิโตรเลียมในยางวัลคาไนซ์

### 2.2 ประเด็นวิจัยใหม่

ศึกษาการใช้น้ำมันชนิดอื่น ๆ ที่สามารถพัฒนาเพื่อนำมาใช้ทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมในยางวัลคาไนซ์



### เอกสารอ้างอิง

ปิยวิทย์ เหล่าบ้านคือ, ไชยวัฒน์ รักสกุลพิวัฒน์ และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2552. ผลของน้ำมันเมล็ดสบู่ดำที่มีต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนแบล็ก. *วารสารวิจัย มข.* 14(11) หน้า 1061-1071

พงษ์ธร แซ่อู๋. 2548. *ยาง ชนิด และการใช้งาน.* กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

พงษ์ธร แซ่อู๋. 2550. *สารเคมียาง.* กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

โสภีนาถ เกตุวิชิต, หทัยรัตน์ ริมศิริ, วิชัย หฤทัยธนาสันต์ และสุพนิดา วินิจนัย. 2551. คุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติด้านอนุโมลลิสของน้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนท์. *รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46* (น. 310-319). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อนุวัติ แซ่ตั้ง, ปรีวัฒน์ พัดยา และอดิศักดิ์ รุ่งวิชานวิวัฒน์. 2548. การใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันอะโรมาติกในยางคอมพาวนด์. *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์.* กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).

A. Okullo, A.K. Temu, P. Ogowok, J.W. Ntalikwa. 2012. Physico-Chemical Properties of Biodiesel from Jatropha and Castor Oils Int. **J.Energy. Res.**2(1), 47.

A.P. Kuriakose and G. Rajendran. 1995. Use of Rice-bran Oil in the Compounding of Styrene Butadiene Rubber. **J. Mat. Sci.** 30, 2257.

F. Cataldo, O. Ursini and G. Angelini. (n.d.) Biodiesel as a Plasticizer of SBR-Based Tire Tread Formulation. 2013. **J. Polym. Sci.**, 9.

G. Chandrasekara, M.K. Mahanama, D.G. Edirisinghe and L. karunanayake. 2011. Epoxidized Vegetable Oils as Processing Aids and Activators in Carbon-black filled Natural Rubber Compounds. **J. Natn. Sci Foundation Sri Lanka.** 39(3), 243.

H. Ismail and H. Anaur. 2000. Plam Oil Fatty Acid as an Activator in Carbon Black filled Natural Rubber Compounds: Dynamic Properties, Curing Characteristics, Reversion and Fatigue Studies. **J. Polym. Test.** 19, 349.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Jiayi Li, Avraam I. Isayev, Xiaofeng Ren and Mark D. Soucek. 2015. Modified soybean oil-extended SBR compounds and vulcanizates filled with carbon black. **Polymer** 60, 144-156.

Lucile Raymond. 2015. **Optimization of an Halogen-free, Oil Resistant Compound For A Fire Resistant.** The R&D Internships. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.emaze.com/@ALIZLWRI/PresentationInternshipMay2015Lucile.pptx> Accessed April 04, 2016.

Mariselma FerreiraI, Ricardo José MendoncaII, Joaquim Coutinho-NettoII and Marcelo MulatoIII. 2009. Angiogenic properties of natural rubber latex biomembranes and the serum fraction of *Hevea brasiliensis*. **Braz. J. Phys.** vol.39 no.3.

P.P. Kundu, T.R. Kukreja. 2002. Surface Modification of Carbon Black by Vegetable Oil-Its Effect on the Rheometric, Hardness, Abrasion, Rebound Resilience, Tensile, Tear and Adhesion Properties. **J. Appl. Polym. Sci.** 84, 256.

V. Nadanan, R. Jodeph and D.J. Francis. 1996. Linseed Oil as a Multipurpose Ingredient in NBR Vulcanizate. **J. Elastom. Plast.** 28. 326.

W. Pechurai, W.Chiangta and P. Tharuen. 2015. Effect of vegetable Oil as Processing Aids in SBR Compounds. **Macro. Symp.** (pp. 191-196.)

Wikipedia. 2008. **Nitrile rubber** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrile\\_rubber](https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrile_rubber) Accessed April 04, 2016.

Wikipedia. 2015. **Styrene-butadiene.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://en.wikipedia.org/wiki/Styrene-butadiene> Accessed April 04, 2016.