

## ความสามารถในการแปรรูป ลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ ที่ใช้ น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

มณฑนา สงไข สุนิสา ห้วนนา และ วัชรินทร์ สายน้ำใส\*

สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

\*ผู้รับผิดชอบบทความ E-mail: watcharin.sa@skru.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความสามารถในการแปรรูป ลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่ใช้ น้ำมันปาล์มในปริมาณ 1-5 phr เป็นน้ำมันช่วยแปรรูปทดแทนน้ำมันอะโรมาติก โดยวิเคราะห์ค่าความหนืด การผ่อนคลาย ความเค้น ลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติด้านการดึง จากผลการวิจัยพบว่า ยางคอมพาวด์ที่ใช้ น้ำมันปาล์มมีค่าความหนืด มูนี ผลต่างแรงบิด ความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดจนขาดต่ำกว่ายางที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติกเล็กน้อย แต่จะมีอัตราการผ่อนคลายความเค้น เวลาวัลคาไนซ์ ดัชนีความเร็วในการวัลคาไนซ์ และความเค้นที่สูงกว่ายางที่ใช้ น้ำมันอะโรมาติกอยู่เล็กน้อย ส่วนยางที่ใช้ น้ำมันมะพร้าวมีค่าความหนืดสูงกว่ายางที่ใช้ น้ำมันชนิดอื่นๆ จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า น้ำมันปาล์มจัดเป็น น้ำมันที่มีศักยภาพสูงสำหรับนำไปใช้เป็นน้ำมันช่วยแปรรูปทดแทนน้ำมันอะโรมาติก

**คำสำคัญ:** ยางธรรมชาติ น้ำมันปาล์ม ความสามารถในการแปรรูป ลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติทางกายภาพ

## Processability, Vulcanization Characteristics and Physical Properties of Natural Rubber Using Palm Oil as Processing Oil

Mantana Songkhai, Sunisa Huana, and Watcharin Sainumsai\*

Program in Rubber and Polymer Technology, Faculty of Science and Technology, SKRU

\*Corresponding Author; E-mail: watcharin.sa@skru.ac.th

### Abstract

*This research studied processability, vulcanization characteristics and physical properties of natural rubber with palm oil in the range of 1-5 phr as processing oil for aromatic oil replacement. The Mooney viscosity, stress relaxation, vulcanization characteristics and tension properties were determined. It was found that the Mooney viscosity, torque difference, tensile strength, and elongation at break of the rubber compounds incorporated with palm oil were slightly lower than those of the rubber compound incorporated with aromatic oil. While, Stress relaxation rate, cure time, and vulcanization rate index were slightly higher than those. Palm oil have great potential to be used as processing oils to replace aromatic oil.*

**Keywords:** natural rubber, palm oil, processability, vulcanization characteristics, physical properties

## 1. บทนำ

การนำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องใช้สารเคมีหลายชนิดมาผสมในระหว่างกระบวนการแปรรูป ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้จะขึ้นอยู่กับสมบัติและการทำงานของผลิตภัณฑ์ยางแต่ละชนิด สารเคมีที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ยาง ได้แก่ สารเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ สารเชื่อมโยงโมเลกุลยาง สารตัวเติม สารช่วยกระบวนการแปรรูป และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ เป็นต้น การผสมสารเคมีลงไปในยางดิบ (raw rubber) เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งยางที่ผสมสารเคมีแล้วเรียกว่ายางคอมพาวด์ (compound rubber) (บุญธรรม, 2539) ซึ่งสารตัวเติมนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความทนทานให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมชนิดเสริมแรง เช่น เขม่าดำ (carbon black) หรือ ซิลิกา (silica) (Laube et al., 2001; Waddell & Evans, 2001) โดยสารตัวเติมเหล่านี้จะยึดติดกับโมเลกุลยางด้วยอันตรกิริยาทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งซิลิกาจัดเป็นสารเสริมแรงที่ไม่ใช้สีดำ ส่วนสารตัวเติมอื่น ๆ นอกจากเขม่าดำและซิลิกา ได้แก่ ดินขาวหรือเคลย์ (clay) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ทัลคัม (talcum) ซึ่งสารเหล่านี้ไม่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงจนถึงเสริมแรงได้ปานกลางขึ้นกับขนาดของอนุภาค (Brydson, 1988) แต่จะช่วยลดต้นทุนในการผลิต และช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่าย

การเตรียมยางคอมพาวด์ที่ใส่สารตัวเติมในปริมาณมากจำเป็นต้องมีการใช้น้ำมันช่วยแปรรูปเพื่อควบคุมความหนืดของยางให้สามารถแปรรูปได้ง่ายและทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดี (Rodgers & Waddell, 2014) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วน้ำมันที่ใช้นั้นมักคือน้ำมันอะโรมาติกเพราะมีความเข้ากันกับยางได้ดี แต่จากผลการศึกษาด้านความเป็นพิษ พบว่าน้ำมันชนิดนี้มีองค์ประกอบของสารพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) ซึ่งถูกจัดเป็นสารในกลุ่มก่อมะเร็ง (carcinogenic substances) ผลของความเป็นพิษดังกล่าวทำให้มีการประกาศข้อบังคับของสหภาพยุโรป (European Union regulation) ที่ IP/04/2008 ลงวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547 เพื่อห้ามการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางรถยนต์ที่มีปริมาณ PAHs เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จากการสกัดด้วยสารไดเมทิลซัลฟอกไซด์หรือ DMSO ตามวิธี IP346 ซึ่งเริ่มมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2553 เป็นต้นมา จากข้อบังคับนี้ทำให้ผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการส่งผลิตภัณฑ์ไปจำหน่ายในสหภาพยุโรป จำเป็นต้องใช้น้ำมันช่วยแปรรูปชนิดอื่นทดแทนน้ำมันอะโรมาติก ทำให้มีความจำเป็นต้องหาน้ำมันชนิดอื่นมาใช้ทดแทน การศึกษาและทดลองใช้น้ำมันชนิดที่มีปริมาณ PAHs ต่ำกว่าข้อกำหนดเพื่อทดแทนการใช้น้ำมันอะโรมาติกมีทั้งน้ำมันที่ได้จากแร่ (mineral oils) เช่น น้ำมัน treated distillate aromatic extract (TDAE) และน้ำมัน mild extraction solvate (MES) และน้ำมันที่ได้จากพืช (vegetable oils) ทั้งแบบที่ไม่ดัดแปรและดัดแปรโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งการใช้น้ำมันจากพืชซึ่งสามารถปลูกทดแทนใหม่ได้มีข้อได้เปรียบทั้งในแง่เศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อม

ในงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำมันปาล์ม (palm oil, PO) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมาทดแทนน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil, AO) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นน้ำมันช่วยแปรรูปยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรด N660 เป็นสารตัวเติม โดยแปรปริมาณน้ำมันปาล์มเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 phr (parts by weight) per hundred parts of rubber) ซึ่งใช้น้ำมันอะโรมาติก 1 phr เป็นตัวควบคุม ศึกษาเปรียบเทียบความหนืดมูนนี่ การอ่อนคลาย ความเค้น และลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติด้านการตั้งเป็นหลัก

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมยางคอมพาวด์

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นยางแท่งมาตรฐานเกรด 20 (STR 20) ผลิตโดยบริษัท ถาวรอุตสาหกรรมยางพารา (1982) จำกัด จังหวัดสงขลา ผสมยางคอมพาวด์ตามสูตรการทดลองในตารางที่ 1 โดยนำยางแท่งมาตรฐานเกรด 20 มาบดผสมยางกับสารเคมีตามวิธีมาตรฐาน ISO 2393 (2014) ด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้งขนาด 10x20 นิ้ว ซึ่งมี

friction ratio เท่ากับ 1:1.2 ผลิตโดยบริษัทซัยเจริญเอ็นจิเนียริ่ง หลังจากนั้นนำยางคอมพาวด์มาทดสอบความสามารถในการแปรรูป ได้แก่ ความหนืดมูนนี่ การผ่อนคลายความเค้น ลักษณะการวัลคาไนซ์ และสมบัติทางกายภาพต่อไป

ตารางที่ 1 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)					
	AO1	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100	100
กรดสเตียริก	2	2	2	2	2	2
ซิงค์ออกไซด์	5	5	5	5	5	5
เอ็มบีที	1	1	1	1	1	1
เขม่าดำเกรด N660	35	35	35	35	35	35
น้ำมันอะโรมาติก	1	-	-	-	-	-
น้ำมันปาล์ม	-	1	2	3	4	5
กำมะถัน	2	2	2	2	2	2

## 2.2 การทดสอบความหนืดมูนนี่และการผ่อนคลายความเค้น

นำยางคอมพาวด์มาทดสอบความหนืดมูนนี่และการผ่อนคลายความเค้นด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS (GOTECH Testing Machines Inc.) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM D 1646 (1999) ซึ่งในการทดสอบมี 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการอุ่นยางตัวอย่างเป็นเวลา 1 นาที ในขั้นตอนที่สอง โรเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาทีและบันทึกค่าแรงบิดเป็นค่าความหนืดมูนนี่ของยางตัวอย่างที่เวลา 4 นาที และในขั้นตอนที่สาม เป็นการวัดการผ่อนคลายความเค้นของยางหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน โดยบันทึกค่าแรงบิดเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นนำข้อมูลแรงบิด (Mooney viscosity value) มาวิเคราะห์หาอัตราการผ่อนคลายความเค้น (stress relaxation rate) จากความสัมพันธ์ของแรงบิด (Mooney units) กับเวลา (วินาที) ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่และอัตราการผ่อนคลายความเค้นได้จากสมการยกกำลังแบบถดถอยดังสมการ (1) ทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

$$M = k(t)^a \quad (1)$$

โดยที่  $M$  หมายถึง ค่าแรงบิดในหน่วย Mooney units

$k$  หมายถึง ค่าคงที่ เป็นแรงบิดในหน่วย Mooney units ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน

$t$  หมายถึง เวลา (วินาที)

$a$  หมายถึง อัตราการผ่อนคลายความเค้น ( $s^{-1}$ )

## 2.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์

นำยางคอมพาวด์มาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ตามวิธีมาตรฐาน ISO 6502-3 (2018) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส บันทึกค่าแรงบิดต่ำสุด แรงบิดสูงสุด ระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ และเวลาการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ จากนั้นคำนวณดัชนีความเร็วการวัลคาไนซ์ (vulcanization rate index) ดังสมการ (2) ทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

$$Vulcanization\ rate\ index\ (min^{-1}) = \frac{100}{CureTime - ScorchTime} \quad (2)$$

โดยที่ Cure time ( $t_{c95}$ ) เป็นระยะเวลาการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ ในหน่วยนาที

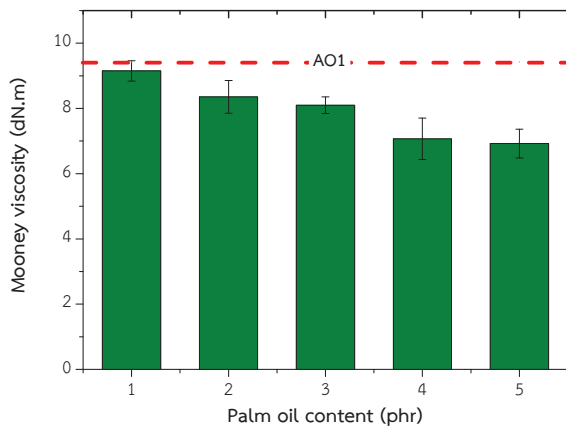
Scorch time ( $t_{s1}$ ) เป็นระยะเวลาที่สามารถแปรรูปได้ของยางคอมพาวด์ ในหน่วยนาที

## 2.4 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

นำยางคอมพาวด์มาอัดเข้ายางคอมพาวด์เป็นแผ่นทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3182 (1994) จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติด้านการดึง (tension properties) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 412 (1998a) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ยี่ห้อ NRI universal testing machine รุ่น NRI-TS500-20B ด้วยอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที

## 3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

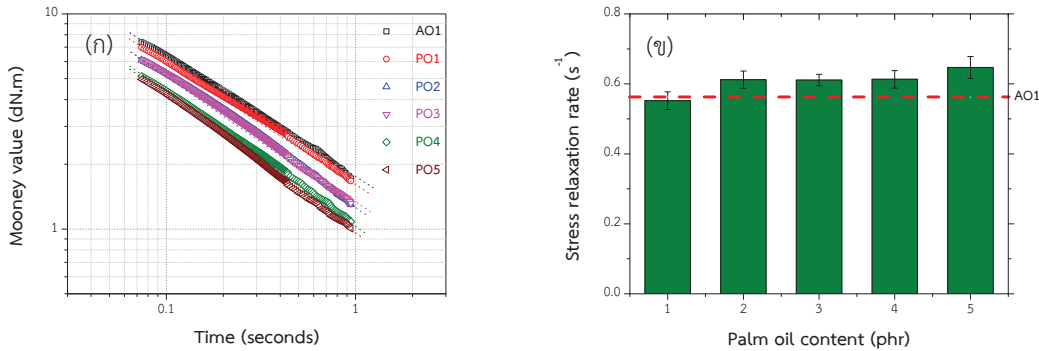
ยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันปาล์ม (PO) ปริมาณ 1 phr มีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ใช้ไขมันอะโรมาติก (AO) ในปริมาณเดียวกัน (เส้นประ) อยู่เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำมันปาล์มมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่า น้ำมันอะโรมาติก (พรพรรณ, 2528) เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปาล์มเป็น 2-5 phr ยางคอมพาวด์มีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำลงตามปริมาณน้ำมันปาล์มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความหนืดของยางคอมพาวด์ที่ต่ำกว่านี้ บ่งชี้ว่ายางที่ผสมน้ำมันปาล์มสามารถแปรรูปได้ง่ายกว่า นั่นคือยางคอมพาวด์สามารถไหลเข้าในแบบพิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปได้ง่าย ส่งผลให้การรีตึงยางคอมพาวด์เป็นแผ่นได้ง่าย หรือดันยางออกมาเป็นโปรไฟล์ต่าง ๆ ได้ง่าย (บุญธรรม, 2539; Ngai et al., 2014) ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากจะลดการใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการแปรรูปลงได้



รูปที่ 1 ความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติที่ใช้ไขมันปาล์มเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดหลังโรเตอร์หยุดหมุนกับเวลาของยางธรรมชาติที่ใช้ไขมันชนิดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2(g) ซึ่งสามารถวิเคราะห์อัตราการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์โดยใช้สมการยกกำลังแบบถดถอย อัตราการผ่อนคลายความเค้นพิจารณาได้จากความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งอัตราการผ่อนคลายความเค้นของยางที่มีค่าน้อยจะบ่งชี้ว่ายางตัวอย่งนั้นมีพฤติกรรมของแข็งที่ยืดหยุ่น (elastic) สูง (Treloar, 2005; Gent, 2014) ในทางกลับกันยางที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงจะแสดงพฤติกรรมของของเหลวหนืด (viscous) สูง รูปที่ 2(ข) แสดงอัตราการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ที่ใช้ไขมันปาล์มในปริมาณ 1-5 phr เป็นน้ำมันช่วยแปรรูป พบว่า การใช้ไขมันปาล์มปริมาณ 1 phr มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำกว่าการใช้ไขมันอะโรมาติกในปริมาณเดียวกัน (เส้นประ) อยู่เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ไขมันปาล์มมีพฤติกรรมเป็นแบบของแข็งยืดหยุ่นสูงกว่าการใช้ไขมันอะโรมาติก เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันปาล์มพบว่า อัตราการผ่อนคลายความเค้นมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของน้ำมันปาล์มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้ปริมาณน้ำมันปาล์มตั้งแต่ 2 phr ขึ้นไปมีค่าอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงกว่าการใช้ไขมันอะโรมาติก นั่นคือยางคอมพาวด์ที่ใช้ไขมันปาล์มตั้งแต่ 2 phr ขึ้นไปจะมีพฤติกรรมของของเหลวหนืดสูงกว่าการใช้ไขมันอะโรมาติกปริมาณ 1 phr เป็นน้ำมันช่วยแปรรูป ซึ่งยางคอมพาวด์ที่มีพฤติกรรมของของเหลวหนืดสูงจะแปรรูปได้ง่ายขึ้น (บุญธรรม, 2539) สอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี่ที่

กล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ ทำให้การบดผสมสารเคมีเข้าไปในยางทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้อัตราการผ่อนคลายความเค้นยังสามารถบ่งชี้ถึงระยะเวลาการเก็บยางเพื่อให้ยางคอมพาวด์คืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้ด้วย กล่าวคือยางคอมพาวด์ที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำจะต้องใช้เวลาในการเก็บยางคอมพาวด์ดังกล่าวเป็นระยะเวลานาน ส่วนยางคอมพาวด์ที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงจะคืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว (Gent, 2014; Roland, 2014) ยางคอมพาวด์ที่ใช้ไขมันปาล์มตั้งแต่ 2 phr ขึ้นไปมีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงกว่า ยางคอมพาวด์ดังกล่าวสามารถคืนตัวกลับสู่สภาพปกติหลังจากได้รับแรงกระทำในแต่ละขั้นตอนการผลิตได้เร็วขึ้น ทำให้ระยะเวลาการเก็บหรือการพักยางคอมพาวด์ในแต่ละขั้นตอนการผลิตน้อยลง และลดปริมาณของสต็อกยางลงได้ด้วย



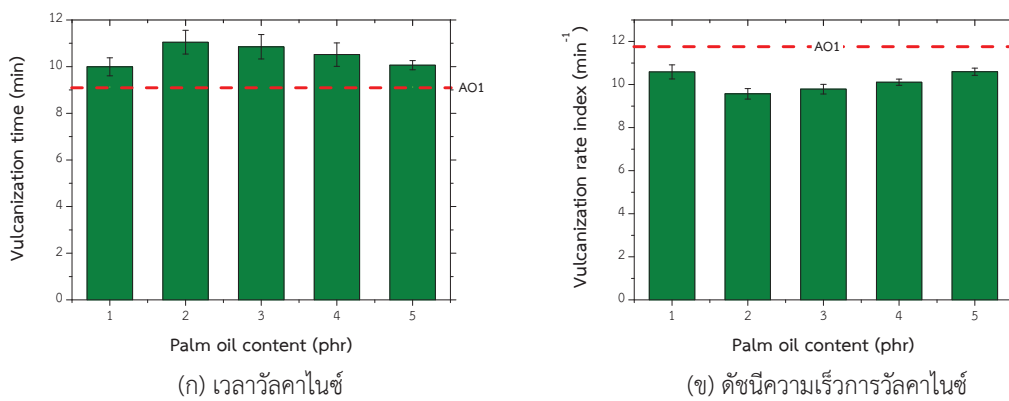
รูปที่ 2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาและ (ข) อัตราการผ่อนคลายความเค้นแรงบิดกับเวลาของยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

ตารางที่ 2 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

สมบัติ	AO1	PO1	PO2	PO3	PO4	PO5
แรงบิดต่ำสุด (dN.m)	0.57±0.07	0.47±0.03	0.36±0.00	0.37±0.01	0.43±0.01	0.54±0.01
แรงบิดสูงสุด (dN.m)	43.22±0.52	41.89±0.27	41.57±0.37	41.77±0.24	40.54±1.30	39.36±1.08
ผลต่างแรงบิด (dN.m)	42.66±0.45	41.42±0.25	41.21±0.34	41.40±0.21	40.10±1.17	38.82±0.98
เวลาที่สามารถแปรรูปได้ (นาที)	0.63±0.06	0.55±0.01	0.59±0.05	0.63±0.01	0.62±0.01	0.62±0.01
เวลาวัลคาไนซ์ (นาที)	9.13±0.14	9.99±0.77	11.05±1.02	10.85±1.05	10.52±1.01	10.06±0.39

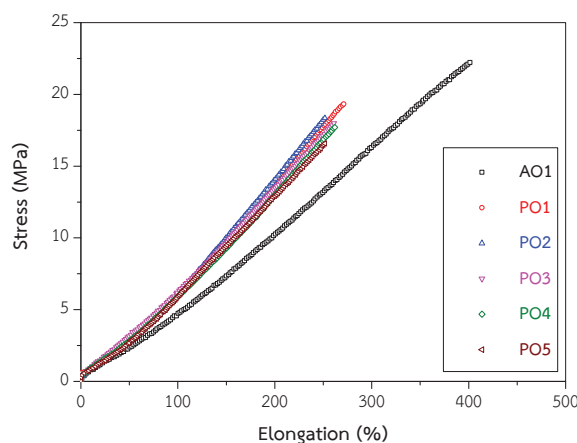
ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติก แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกมีค่าแรงบิดต่ำสุด แรงบิดสูงสุดและผลต่างแรงบิดสูงกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากประกอบของน้ำมันแต่ละชนิดที่ใช้เป็นสารช่วยในการแปรรูป และอาจส่งผลต่อปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง (crosslink) ซึ่งผลต่างระหว่างค่าแรงบิดสูงสุดกับแรงบิดต่ำสุดของยางคอมพาวด์ใช้บ่งชี้ถึงปริมาณการเชื่อมระหว่างโมเลกุลยางได้ (Rodgers & Waddell, 2014) ซึ่งค่าแรงบิดต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น เป็นการวัดแรงต้านการแกว่งของโรเตอร์ในเครื่อง Moving die rheometer นั่นเอง ส่วนเวลาที่สามารถแปรรูปได้ (scorch time) เป็นเวลาที่ยางคอมพาวด์ยังสามารถไหล หรือฉีดรูปไปตามแรงกระทำได้ เนื่องจากยังไม่มีมีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง (Coran, 2014) จากผลการทดลองพบว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติกทั้งหมด มีเวลาที่สามารถแปรรูปได้ใกล้เคียงกัน ส่วนเวลาวัลคาไนซ์ (vulcanization time) ซึ่งเป็นเวลาที่ยางคอมพาวด์เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง เป็นยาวัลคาไนซ์ที่มีสภาพยืดหยุ่นอย่างยาง (rubber-like elasticity) อย่างสมบูรณ์ พบว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกปริมาณ 1 phr มีเวลาวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์ม ดังแสดงในรูป 3(ก) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของน้ำมัน

อะโรมาติก ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซีนอย่างน้อย 1 หมู่ สูตรโครงสร้างทั่วไปประมาณ 35-50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นจะเป็นพาราฟินิก (paraffinic) และแนฟทินิก (naphthenic) ที่จะช่วยเสริมให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดได้สมบูรณ์เร็วขึ้น (พรพรรณ, 2528) ส่วนน้ำมันปาล์มเป็นเอสเทอร์ของไขมันอิสระ และกลีเซอรอล ได้แก่ ปาล์มมิติก สเตียริก ไมริสติก โอลิอิก ลิโนลิก ลอริก เป็นต้น และอาจมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น ฟอสฟาไทด์ โทโคเฟอร์รอล สเตอรอล แอลกอฮอล์ เป็นต้น (บัวชุม, 2548) ส่วนประกอบเหล่านี้อาจช่วยให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดช้าลง จึงทำให้เวลาวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันช่วยแปรรูปใช้เวลานานกว่าเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 3(ข) ว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มมีดัชนีความเร็วการวัลคาไนซ์ ต่ำกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก (เส้นประ) ที่ทุกปริมาณของน้ำมันปาล์ม ตามเหตุผลที่กล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งเวลาวัลคาไนซ์ที่นานกว่า และดัชนีความเร็วการวัลคาไนซ์ที่ต่ำกว่าของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป อาจเป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาเพราะอาจทำให้กำลังการผลิตต่อวันน้อยกว่ายางคอมพาวด์ที่มีเวลาการวัลคาไนซ์สั้น และมีดัชนีความเร็วการวัลคาไนซ์สูง



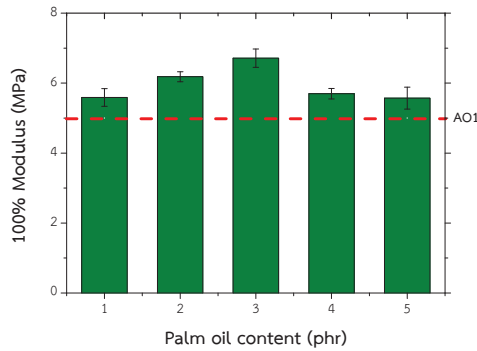
รูปที่ 3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และระยะยืด (elongation) ของยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูปจากการทดสอบการดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ด้วยอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที (Brown, 2006) แสดงดังรูปที่ 4 พบว่ายางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูปสามารถยืดได้สูงกว่า และใช้แรงดึงน้อยกว่าเพื่อให้ยางผิดรูป

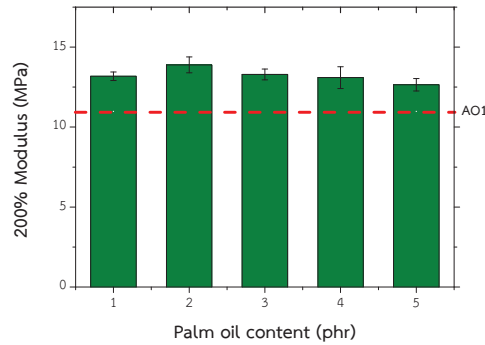


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของความเค้นกับระยะยืดของยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

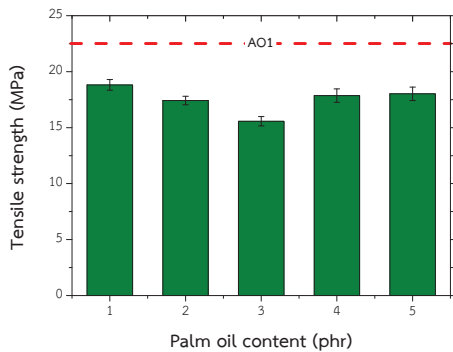
ส่วนยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มในปริมาณ 1-5 phr เป็นน้ำมันช่วยแปรรูป มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะยืดที่ใกล้เคียงกัน มีเส้นกราฟที่สูงชันกว่ายางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก นั่นบ่งชี้ว่าหากพิจารณาที่ระยะยืดเดียวกัน การดึงยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มให้ผิดรูปจะต้องใช้แรงกระทำสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ซึ่งเป็นค่าความเค้นหรือแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำเพื่อให้ยางยืดออก 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Brown, 2006) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ายางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันอะโรมาติก หรืออาจกล่าวได้ว่ายางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มสามารถรับแรงได้สูงกว่า



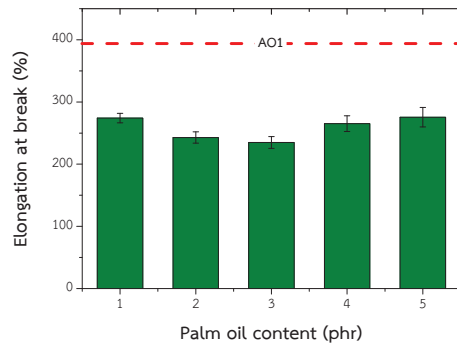
(ก) ความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์



(ข) ความเค้นที่ระยะยืด 200 เปอร์เซ็นต์



(ค) ความทนทานต่อแรงดึง



(ง) ระยะยืดจนขาด

**รูปที่ 5** สมบัติด้านการดึงของยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์มและน้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป

ความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดจนขาดของส่วนยางธรรมชาติที่ใช้น้ำมันปาล์ม และน้ำมันอะโรมาติกเป็นน้ำมันช่วยแปรรูป ดังแสดงในรูปที่ 5(ค) และ 5(ง) ตามลำดับ พบว่ายางที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกมีความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดจนขาดสูงกว่ายางที่ใช้น้ำมันปาล์มในปริมาณ 1-5 phr ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง (Coran, 2014) ดังกล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งในงานวิจัยในอนาคตจะได้วิเคราะห์หาปริมาณการเชื่อมโยงต่อไป

#### 4. สรุปผลการวิจัย

น้ำมันปาล์มมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นน้ำมันช่วยแปรรูปในยางธรรมชาติ ทดแทนน้ำมันอะโรมาติก ซึ่งยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันปาล์มสามารถแปรรูปได้ง่ายกว่า แต่เกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าเล็กน้อย เมื่อวัลคาไนซ์ยางคอมพาวด์ที่ใช้น้ำมันอะโรมาติกแล้ว พบว่ายางที่ผสมน้ำมันปาล์มสามารถรับแรงกระทำได้สูงกว่า แต่มีความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดจนขาดต่ำกว่ายางที่ผสมน้ำมันอะโรมาติก ในการวิจัยนี้ศึกษาเข้ามาค่าเพียงเกรดเดียว (N660) ในปริมาณ 35 phr การวิจัยครั้ง

ต่อไป จะศึกษาโดยใช้เขม่าดำเกรดต่าง ๆ และสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ โดยแปรปริมาณสารตัวเติม รวมถึงการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพทั้งเชิงกล และพลวัตของยางวัลคาไนซ์ด้วย

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือ เครื่องจักร เครื่องทดสอบ และขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนองานวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- บัวชุม อุดมทรัพย์. (2548). การสังเคราะห์เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบและไซปาล์มสเตียรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญธรรม นิธิอุทัย. (2539). กระบวนการแปรรูปยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ASTM D 1646. (1999). Standard test methods for rubber - Viscosity, stress relaxation, and pre-vulcanization characteristics (Mooney viscometer). **Annual book of ASTM standards**, Vol 09.01. New York, USA.
- ASTM D 3182. (1994). Standard practice for rubber - Materials, equipment, and procedures for mixing standard compounds and preparing standard vulcanized sheets. **Annual book of ASTM standards**, Vol 09.01. New York, USA.
- ASTM D 412. (1998a). Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers - Tension. **Annual book of ASTM standards**, Vol 09.01. New York, USA.
- Brown, R. (2006). **Physical testing of rubber**. 4<sup>th</sup> ed. Boston: Springer.
- Brydson, J. A. (1988). **Rubbery materials and their compounds**. Essex: Elsevier Science Publishers Ltd.
- Coran, A. Y. (2014). Vulcanization. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (383-416). 4<sup>th</sup> ed. MA: Elsevier Inc.
- Directive 2005/69/EC of the European Parliament and of the Council of 16 November 2005. **Official Journal of the European Union**. L 323, 51-54.
- Gent, A. N. (2014). Rubber elasticity: Basic concepts and behavior. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (1-26). 4<sup>th</sup> ed. MA: Elsevier Inc.
- ISO 2393. (2014). Rubber test mixes - Preparation, mixing and vulcanization - Equipment and procedures. **International Organization for Standardization**. Geneva, Switzerland.
- ISO 6502-3. (2018). Rubber - Measurement of vulcanization characteristics using curemeters - Part 3: Rotorless curemeter. **International Organization for Standardization**. Geneva, Switzerland.
- Laube, S., Monthey, S., & Wang, M. J. (2001). Compounding with carbon black and oil. In Dick, J. S. (ed.) **Rubber technology: Compounding and testing for performance** (295-324). Ohio: Hanser Gardner Publications.



- Ngai, K. L., Capaccioli, S., & Plazek, D. J. (2014). The viscoelastic behavior of rubber and dynamics of blends. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (193-284). 4<sup>th</sup> ed. MA: Elsevier Inc.
- Rodgers, B. & Waddell, W. (2014). The science of rubber compounding. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (417-471). 4<sup>th</sup> ed. MA: Elsevier Inc.
- Roland, C. M. (2014). Rheological Behavior and processing of unvulcanized rubber. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (285-336). 4<sup>th</sup> ed. MA: Elsevier Inc.
- Treloar, L. R. G. (2005). **The physics of rubber elasticity**. 3<sup>rd</sup> ed. Oxford: Oxford University Press.
- Waddell, W. H. & L. R. Evans. (2001). Precipitated silica and non-black fillers. In Dick, J. S. (ed.) **Rubber technology: Compounding and testing for performance** (325-343). Ohio: Hanser Gardner Publications.