อิทธิพลของระบบวัลคาไนเซชั่นที่มีต่อสมบัติทางกล ความเสียดทานและการสึกหรอของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

INFLUENCE OF VULCANIZATION SYSTEMS ON MECHANICAL, FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF RUBBER FILLED WITH HEXAGONAL BORONNITRIDE PARTICLES

ศิรินทร ทองแสง ไชยยา เผือกแก้ว วิริยา ธราพร*

***Sirinthorn Thongsang**, Chaiya Pueagkeaw, Wiriya Taraporn*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

****Corresponding author, E-mail:** sirinthorn.tho@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์เพอร์ออกไซด์ และแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางกล ความเสียดทานและการสึกหรอของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่เติมสารปรับความเสียดทานอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ปริมาณ 40 ส่วนในร้อยส่วนของยางซึ่งมีการนำยางคอมปาวด์ไปทดสอบคุณลักษณะการคงรูปของยาง สมบัติทางกลด้านการทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดทดสอบสมบัติความเสียดทานและการสึกหรอจากเครื่องไตรโบมิเตอร์แบบลูกบอลบนจานหมุนพร้อมกับตรวจสอบสัณฐานวิทยาของรอยสึกหรอบนผิวยางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบสมบัติของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนด้วยจากการทดลอง พบว่ายางธรรมชาติที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยที่สุด ส่วนระบบวัลคาไนเซชั่นแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ และระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์ใช้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนยางอีพีดีเอ็มให้ผลการทดลองที่สวนทางกันยางทั้งสองชนิดที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ให้ค่าความทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดสูงสุด จึงส่งผลให้ความต้านทานการสึกหรอดีที่สุดแต่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางสูงมากที่แสดงถึงการลื่นไถลไม่ดีนัก เนื่องจากยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์เกิดพันธะข้ามส่วนใหญ่เป็นพอลิซัลฟิดิกที่มีความอ่อนตัวและมีความสามารถในการยืดตัวสูง จึงทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่ผ่านระหว่างคู่ผิวสัมผัสโดยยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ให้สมบัติการทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอโดยรวมสูงกว่าการใช้ผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน แต่สมบัติการลื่นไถลไม่ดีเท่า

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ ยางอีพีดีเอ็ม ลื่นไถล วัลคาไนเซชั่น เฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

Abstract

This research work deals with the influence of vulcanization systems with sulfur, peroxide and sulfur/peroxide on mechanical, friction and wear properties of natural rubber (NR) and ethylenepropylene-diene rubber (EPDM) filled with hexagonal boron nitride (hBN) as friction modifier at loading of 40 phr. The rubber compounds were characterized in terms of cure and mechanical (tensile and tear) properties. The friction and wear properties of rubber vulcanizates were examined by the Ball-on-Disc tribometer and using Scanning Electron Microscope (SEM) to investigate the morphology of wear track on rubber surface. The comparison between hBN and Polytetrafluoroethylene (PTFE) filled rubbers was also interested. The results suggested that thecure time of sulfur-cured NR vulcanizates was the shortest, whereas the increase of cure time with sulfur/peroxide- and peroxide-cured systems, respectively. The opposite behavior was observed for the EPDM vulcanizates. All rubber vulcanizates of sulfur curing system gave the highest tensile and tear strength, leading to the greatest wear resistance. The coefficient of friction of rubber was very high indicating the inferior of the slip property. The reason was associated with the high soft and elongation linkages of polysulfidic crosslink in sulfur-cured rubber compounds which involved the difficulty for sliding between counterfaces. The overall tensile and tear properties, and wear resistance of the hBN-filled rubber vulcanizates were relatively higher than that of PTFE, but the slip property was unsatisfied.

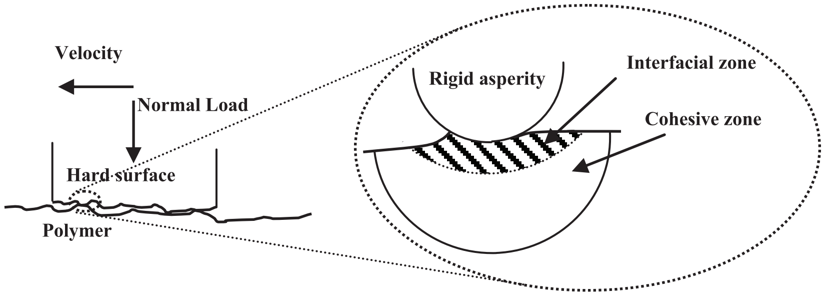
Keywords: Natural Rubber, EPDM, Slip, Vulcanization, Hexagonal Boron Nitride

บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุประเภทยางไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ได้ถูกนำมาเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ยางแต่ละชนิดมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานแตกต่างกันไป ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นทางด้านสมบัติทางกล ทั้งความทนต่อแรงดึง ทนต่อแรงฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ จึงถูกนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทโอริงซีล ยางรองอัด สายพานลำเลียง รวมถึงยางอีพีดีเอ็มก็ถูกนำมาใช้งานในลักษณะนี้ด้วย แต่เน้นการใช้งานในสภาวะที่ต้องสัมผัสความร้อนและแสงแดด สำหรับผลิตภัณฑ์โอริงและซีลที่นำไปใช้งานในแบบพลวัตควรมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีและความเสียดทานต่ำ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลื่นไถลสำหรับป้องกันการรั่วซึมของของไหลและลดกำลังในการขับเคลื่อนของกระบอกสูบ ซึ่งในการปรับปรุงสมบัติความเสียดทานของผลิตภัณฑ์ยางให้ต่ำลงนั้นมีทั้งวิธีการใช้ผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) เคลือบผิวและเติมผสมเข้าไปในยาง [1-2] เพื่อใช้เป็นสารปรับความเสียดทาน (Friction Modifier) สำหรับอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (Hexagonal boron nitride; hBN) นั้นเป็นสารปรับความเสียดทานอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นอนุภาคสีขาวละเอียดขนาดประมาณ 1-10 ไมครอน [3] สามารถลื่นไถลได้ดี มีความเสถียรทางด้านความร้อนและสารเคมีดีเยี่ยม [4] เช่นงานวิจัยของ G. Yi และ F. Yan [5] ได้รายงานไว้ว่า การเติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในวัสดุคอมพอสิทเสียดทานของ

ฟีนอลิกด้วยสัดส่วน 10% โดยปริมาตร ช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอยู่ในช่วง 0.43-0.47 อีกทั้งยังมีความต้านทานการสึกหรอได้ดี ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า 125°C เนื่องจากมีการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มอยู่ระหว่างคู่ผิวสัมผัสและเป็นฟิล์มที่ทนต่อการขัดถูด้วย และงานวิจัยของปิติพงษ์ พรหมรักษ์ และคณะ [6] ได้กล่าวไว้ว่า การเติมเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตนส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าลดลง

พฤติกรรมความเสียดทานของวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์หรือยางนั้นเกิดจากการเสียรูปของวัสดุที่ถูกแบ่งเป็น 2 บริเวณ คือ Interfacial zone และ Cohesive zone ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยที่ Interfacial zone เป็นบริเวณที่เกิดการเสียดสีระหว่างคู่ผิวสัมผัสจากแรงแนบติด (Adhesive Force) ตรงบริเวณผิวหน้าของยาง โดยการเสียดสีที่เกิดขึ้นบริเวณนี้เป็นผลให้ยางที่มีความแข็งน้อยกว่าถูกทำให้เกิดการเสียรูปด้วยแรงเฉือนจากวัตถุที่แข็งกว่าและมีผลต่อการนำไปสู่การสึกหรอในลักษณะของยางที่เกิดการหลุดออกหรือเกิดการอ่อนตัวลง (Shear-induced Softening) แล้วถ่ายโอนเนื้อยางไปเป็นฟิล์มบนคู่ผิวสัมผัสอีกวัตถุหนึ่งที่เรียกว่า Transfer film ดังนั้น ปัจจัยของการสึกหรอที่เป็นผลจากพฤติกรรมความเสียดทานบริเวณ Interfacialzone จึงขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุที่ผิวและใกล้ผิวเป็นหลัก โดยเฉพาะค่าความแข็งและค่ามอดุลัสของยาง



ภาพที่ 1 บริเวณที่เกิดความเสียดทานระหว่างคู่ผิวสัมผัส

ส่วน Cohesive Zone เป็นบริเวณที่เกิดการเสียดสีระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางภายในเนื้อยางที่เป็นแรงโคฮีซีฟ (Cohesive Force) ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นที่ถัดเข้าไปจากผิวนอกสุด โดยการเสียดสีที่เกิดขึ้นบริเวณนี้เป็นผลให้ถูกถ่ายเทแรงไปยังเนื้อยางอย่างต่อเนื่องจนทำให้เกิดรอยตำหนิในเนื้อวัสดุแล้วเกิดการสึกหรอในที่สุด ดังนั้น ปัจจัยของการสึกหรอที่เป็นผลจากพฤติกรรมความเสียดทานบริเวณ Cohesive Zone นี้จึงขึ้นอยู่กับสมบัติทั้งก้อน (Bulk Properties) ของยางเป็นหลัก จะเห็นได้ว่า ในขณะที่เกิดการเสียดสีของคู่ผิวสัมผัสนั้นเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งบริเวณ Interfacial Zone และ Cohesive Zone จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางที่เกิดขึ้นคือ ผลรวมของแรงเสียดทานแบบแนบติดและแรงเสียดทานแบบโคฮีซีฟ [7] จากที่กล่าวมาสมบัติความเสียดทานและการสึกหรอนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติทางกลโดยรวมของยาง ซึ่งอาจเป็นผลจากโครงสร้างพันธะข้ามของยางภายในเองด้วย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์เพอร์ออกไซด์และแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางกล ความเสียดทานและการสึกหรอของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

และทำการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาระบบการวัลคาไนเซชั่นที่มีต่อสมบัติทางกล ความเสียดทานและการสึกหรอของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

2. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุ

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

1. ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกรด STR 20 จากบริษัท สินทองไทย รับเบอร์ จำกัด

2. ยางอีพีดีเอ็ม ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเกรดที่เติมไดอีนชนิดเอทธิลีนนอบอมีน (Ethylidenenorbornene; ENB) ในปริมาณ 7.6 เปอร์เซนต์ จากบริษัท เอ็กซอนโมบิลเคมี (ประเทศไทย) จำกัด

3. ซิงค์ออกไซด์เกรด WHITE SEAL ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีออน แอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด

4. กรดสเตียริก เกรด ST-DDK ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีออน แอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด

5. เททระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Tetrame thylThiuramdisulfide; TMTD) เกรด PERKACIT ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีออน แอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด

6. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลฟีนาไมด์ (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide; CBS) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท MDR International จำกัด

7. พาราฟินแวกซ์ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท บอสแวกซ์ จำกัด

8. ไดบิลทิลพีครีโซล (2,6-Di-tertbutyl-p-cresol; BHT) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ชาแนลเคมิคอล จำกัด

9. น้ำมันพาราฟินิก เกรด PTT Rubflex 111 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

10. ซัลเฟอร์ขนาด 325 เมช ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ซีออน แอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด

11. ไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ (Di-cumyl Peroxide; DCP) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ชาแนลเคมิคอล จำกัด

12. ไตรแอลลิลไซยานูเรต (Triallylcyanurate; TAC) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคมิคอลอินโนเวชั่น จำกัด

13. อนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เกรด MK-hBN-500 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 5 ไมครอน จากบริษัท Low Friction จำกัด

14. ผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนเกรด MP1200 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 5 ไมครอน จากบริษัท Du Pont จำกัด

วิธีการวิจัย

1. ทำการเตรียมยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มด้วยสารเคมีต่างๆ โดยสูตรยางคอมปาวด์ของยางแต่ละชนิดนั้นทำให้ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์เพอร์ออกไซด์และแบบผสมด้วยซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณวัสดุและสารเคมีที่ใช้เตรียมสูตรยางคอมปาวด์

วัสดุ	ปริมาณ (phr)					
	NR			EPDM		
	S	S/P	P	S	S/P	P
ยางธรรมชาติ	100.00	100.00	100.00	-	-	-
ยางอีพีดีเอ็ม	-	-	-	100.00	100.00	100.00
ซิงค์ออกไซด์	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
กรดสเตียริก	2.00	2.00	-	2.00	2.00	-
TMTD	0.20	0.20	-	0.20	0.20	-
CBS	0.80	0.80	-	0.80	0.80	-
พาราฟินแวกซ์	0.75	0.75	-	0.75	0.75	-
BHT	1.50	1.50	-	1.50	1.50	-
น้ำมันพาราฟินิก	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
hBN	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
ซัลเฟอร์	2.50	1.25	-	2.50	1.25	-
DCP	-	1.50	3.50	-	1.50	3.50
TAC	-	0.50	2.50	-	0.50	2.50

2. นำยางคอมปาวด์ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

- คุณลักษณะการคงรูปยาง

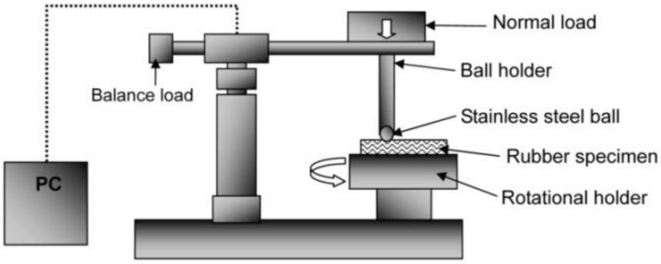
นำยางคอมปาวด์ที่ได้จากการเตรียมในขั้นตอนแรกมาตรวจสอบคุณลักษณะการคงรูปยางด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D2084 ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160°C ซึ่งจะทำให้ทราบเวลาคงรูปยาง

- สมบัติการทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาด

ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยการนำยางคอมปาวด์มารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จากนั้นอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Press) ที่อุณหภูมิ 160°C โดยอัดด้วยเวลาคงรูปยางที่ tc_{90} ของสูตรยางคอมปาวด์ต่างๆ ที่ได้ผลจากเครื่อง ODR แล้วนำไปทดสอบสมบัติต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412-98 และต้านทานแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624-00 โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

- พฤติกรรมความเสียดทานและการสึกหรอ

เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ไปทำการทดสอบพฤติกรรมความเสียดทานและการสึกหรอของยาง โดยใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์แบบลูกบอลบนจานหมุน (Ball-on-Disk) ตามภาพที่ 2 เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะทดสอบ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงสมบัติการลื่นไถลของยาง และคำนวณอัตราการสึกหรอที่แสดงถึงความต้านทานการสึกหรอของยาง



ภาพที่ 2 การทดสอบสึกหรอแบบลูกบอลบนจานหมุน

- สัณฐานวิทยาของรอยสึกหรอบนผิวยาง

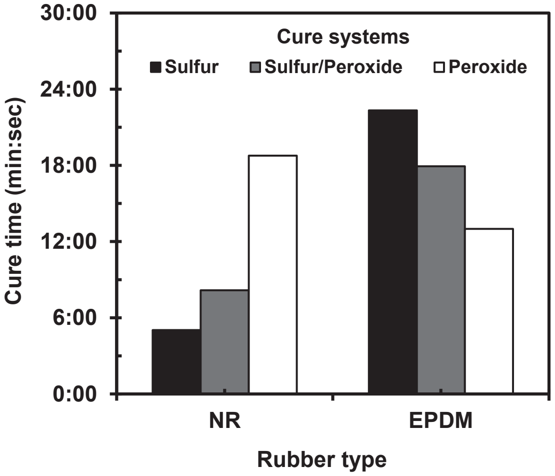
นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์แบบลูกบอลบนจานหมุนไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาของรอยสึกหรอบนผิวยางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราดเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมความเสียดทานและการสึกหรอของยาง

3. เตรียมยางคอมปาวด์ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ โดยใช้ปริมาณสารเคมีตามตารางที่ 1 ยกเว้นอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เปลี่ยนเป็นผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนที่เติมในปริมาณ 40 phr เพื่อนำไปทดสอบเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางระหว่างการเติมสารปรับความเสียดทานทั้งสอง

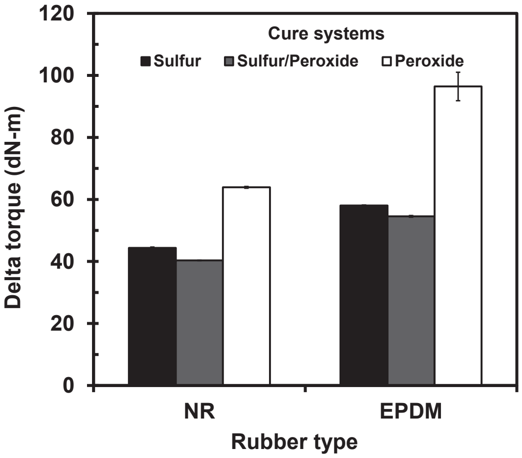
ผลการวิจัย

ผลของระบบวัลคาไนเซชั่นที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์

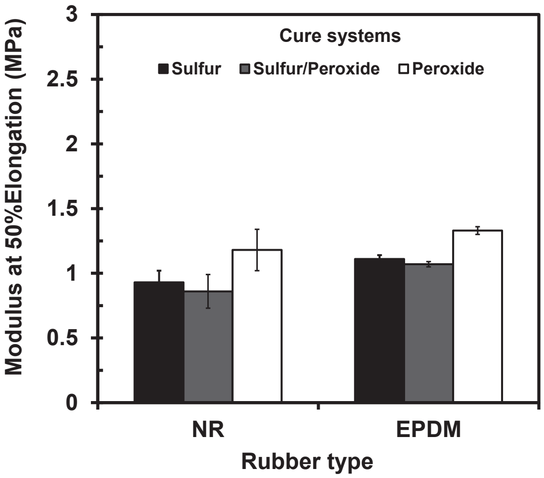
จากภาพที่ 3 แสดงเวลาคงรูปที่ 90% ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ พบว่า ยางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ง่ายในระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์โดยใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยที่สุด เนื่องจากในโครงสร้างยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่จำนวนมากซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไวต่อการเกิดพันธะข้ามในระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ ส่วนระบบวัลคาไนเซชั่นแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ และระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์ จะใช้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มขึ้นตามลำดับ สำหรับยางอีพีดีเอ็มให้ผลการทดลองที่สวนทางกัน กล่าวคือ ยางอีพีดีเอ็มใช้เวลาในการวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์นานสุด รองลงมาคือระบบวัลคาไนเซชั่นแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ และระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์ตามลำดับ โดยยางทั้งสองชนิดที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์นั้นให้ค่าผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR มากกว่าระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์และแบบผสม ดังแสดงในภาพที่ 4 เนื่องจากยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์เกิดโครงสร้างพันธะ C-C ที่แข็งแกร่งจึงทำให้ต้านทานแรงบิดที่สูง ในขณะที่ยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์เกิดพันธะข้ามพอลิซัลฟิดิกซึ่งมีพันธะ S-S ที่มีความอ่อนตัว [8] ทั้งนี้ยังส่งผลต่อค่ามอดุลัส ณ การยืดตัวที่ 50% ด้วยดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 3 เวลาคงรูปที่ 90% ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ

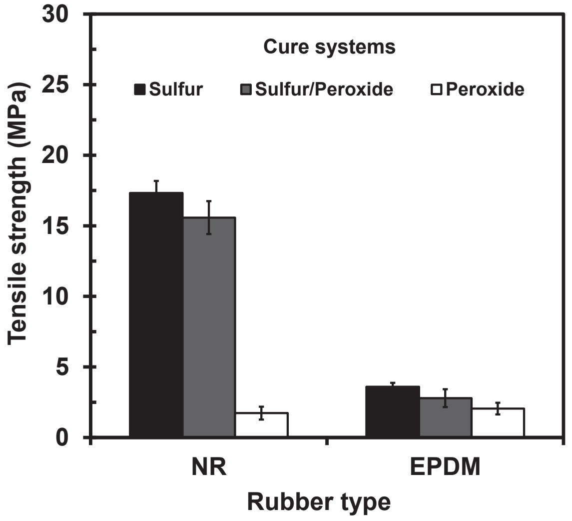


ภาพที่ 4 ผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ

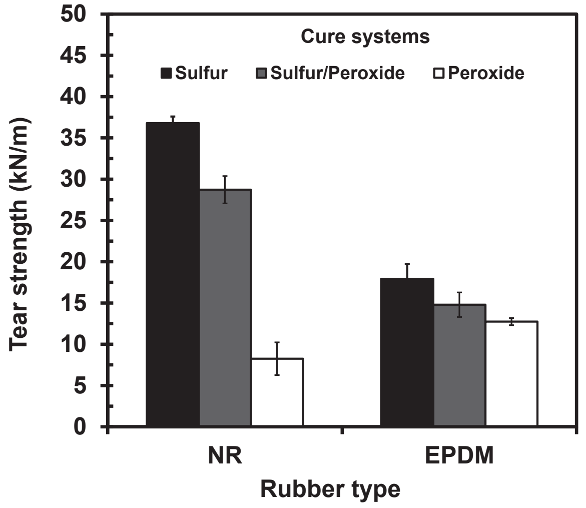


ภาพที่ 5 ค่ามอดุลัส ณ การยืดตัวที่ 50% ของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ

ภาพที่ 6 และ 7 แสดงค่าความทนแรงดึงและความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ พบว่า ยางทั้งสองชนิดให้ผลค่าความทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ให้ค่าความทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดสูงสุด ส่วนระบบวัลคาไนเซชั่นแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ และระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์น้อยลงมาตามลำดับเนื่องจากยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์นี้เกิดพันธะข้ามชนิดพอลิซัลฟิดิก (C-Sx-C) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้มีการยืดตัวได้สูงและสามารถเกิดการตกผลึกขณะยืดตัวได้ ในขณะที่ยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์เกิดพันธะข้ามชนิด C-C ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลน้อย ทำให้มีการยืดตัวได้น้อยกว่า [9]

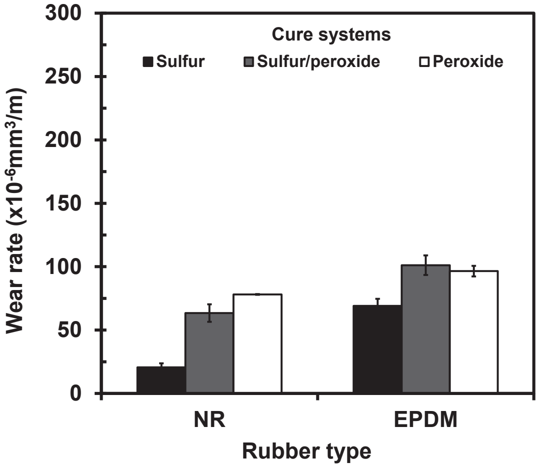


ภาพที่ 6 ค่าความทนแรงดึงของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ

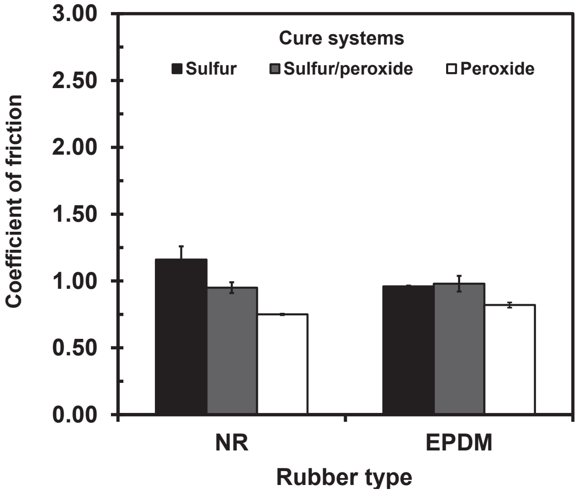


ภาพที่ 7 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ

ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่า สมบัติของยางบริเวณ Interfacial zone สัมพันธ์กับค่ามอดุลัส ณ การยืดตัว 50% และสมบัติของยางบริเวณ Cohesive zone สัมพันธ์กับค่าความทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดนั้นส่งผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของยางโดยตรง กล่าวคือ อัตราการสึกหรอของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ แสดงดังภาพที่ 8 พบว่า ยางทั้งสองชนิดที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์มีอัตราการสึกหรอต่ำสุด นั่นแสดงว่ามีความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด เนื่องจากเป็นผลของสมบัติการทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดสูงสุด สำหรับยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบผสมด้วยซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์มีอัตราการสึกหรอสูงกว่าระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ เนื่องจากผลของค่าความทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดต่ำกว่า อีกทั้งยังให้ค่ามอดุลัสที่ต่ำกว่าด้วยจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากระหว่างยางกับลูกบอลเหล็กที่ใช้ทดสอบและเกิดการสูญเสียยางได้ง่ายด้วย สำหรับกรณียางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์นั้น ยางธรรมชาติที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบนี้เกิดการสึกหรอมากที่สุดเมื่อเทียบกับระบบวัลคาไนเซชั่นแบบอื่นๆ เนื่องจากผลของค่าความทนแรงดึงและทนแรงฉีกขาดต่ำมาก ถึงแม้ว่าค่ามอดุลัสจะสูงกว่าก็ตาม

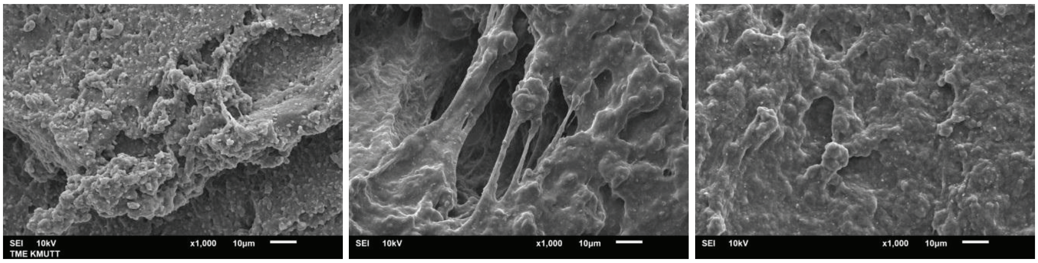


ภาพที่ 8 อัตราการสึกหรอของยางธรรมชาติและยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ



ภาพที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็มที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ

สำหรับผลด้านสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางแสดงดังภาพที่ 9 พบว่า ยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุด เนื่องจากเกิดโครงสร้างพันธะข้ามพอลิซัลฟิดิกที่มีความอ่อนตัวและมีการยืดตัวมากกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบอื่นๆ ส่งผลให้ยากต่อการเคลื่อนที่ผ่านกันของคู่ผิวสัมผัส ดังภาพเปรียบเทียบรอยสึกหรอของผิวยางธรรมชาติที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ ในภาพที่ 10 ในขณะที่ยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำสุด



ก) ข) ค)

ภาพที่ 10 ภาพสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยสึกหรอของยางธรรมชาติที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นแบบต่างๆ ก) ซัลเฟอร์ ข) ซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ ค) เพอร์ออกไซด์

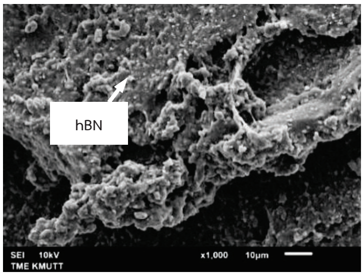
การเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์กับผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน

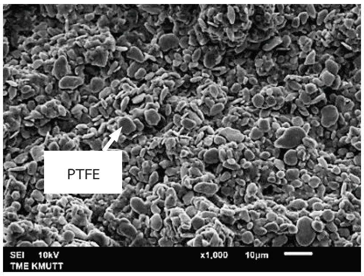
สมบัติต่างๆ ของยาง	ยางคอมปาวด์			
	NR		EPDM	
	hBN	PTFE	hBN	PTFE
Cure time (min:sec)	5:02	6:06	22:20	28:32
Delta torque (dN-m)	44.38+0.17	40.86+0.22	58.05+0.06	50.9+0.67
Tensile strength (MPa)	17.33+0.85	13.05+0.24	3.60+0.28	1.11+0.07
Wear rate (x10-6mm3/m)	20.57+3.23	125.29+22.36	69.11+5.52	257.27+9.09
Coefficient of friction	1.16+0.10	0.9+0.03	0.96+0.01	0.86+0.04

จากตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ (hBN) กับผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน (PTFE) พบว่าการเติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ในยางทั้งสองชนิดให้ผลเวลาคงรูปที่ 90% น้อยกว่าผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน เนื่องจากอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์นั้นมีความสามารถในการนำความร้อนที่ดี โดยค่าความสามารถนำความร้อนของอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์และผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนประมาณ 33 W/mK [10] และ 0.19 W/mK [11] ตามลำดับ จึงทำให้ยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์มีการกระจายความร้อนในยางได้ดีและส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชั่นได้เร็วกว่า โดยยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์นั้นมีค่าผลต่างแรงบิดจากเครื่อง

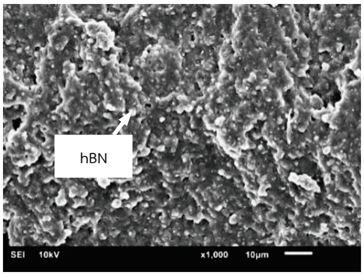
ODR ที่สูงกว่ายางที่เติมผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน เนื่องจากผลของอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่สามารถกระจายความร้อนได้ดีจึงมีส่วนทำให้เกิดปริมาณพันธะข้ามได้มากกว่า อีกทั้งอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์เป็นวัสดุเซรามิกสังเคราะห์ที่มีความแข็งแกร่งสูงกว่าผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน จึงทำให้ความแข็งแกร่งโดยรวมของยางมีค่าสูงด้วยดังแสดงผลด้วยค่ามอดุลัส ณ การยืดตัวที่ 50% นอกจากนี้ ยางทั้งสองชนิดให้ผลค่าความทนแรงดึงไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ให้ค่าความทนแรงดึงสูงกว่ายางที่เติมผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน เนื่องจากมีปริมาณพันธะข้ามที่มากกว่าทั้งนี้ส่งผลให้ยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ยังให้ความต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าด้วยส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางนั้น พบว่า ยางที่เติมผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานน้อยกว่าการเติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ เนื่องจากขณะที่ทำการทดสอบนั้นผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีนมีการหลุดออกจากเนื้อยางและอยู่บนผิวของรอยการสึกหรอมากกว่ากรณีที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์จึงทำให้เกิดการลื่นตัวสูง ดังแสดงพื้นผิวรอยสึกหรอของยางในภาพที่ 11



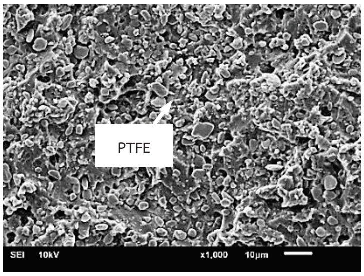
ก)



ข)



ค)



ง)

ภาพที่ 11 ภาพสัณฐานวิทยาของพื้นผิวการสึกหรอของยางชนิดต่างๆ ที่เติม hBN กับ PTFE
ก) ยางธรรมชาติที่เติม hBN ข) ยางธรรมชาติที่เติม PTFE
ค) ยางอีพีดีเอ็มที่เติม hBN ง) ยางอีพีดีเอ็มที่เติม PTFE

สรุปและอภิปรายผล

1. ยางธรรมชาติที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยที่สุด ส่วนระบบวัลคาไนเซชั่นแบบผสมซัลเฟอร์กับเพอร์ออกไซด์ และระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยเพอร์ออกไซด์ จะใช้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนยางอีพีดีเอ็มให้ผลการทดลองที่สวนทางกัน

2. ยางที่ผ่านระบบวัลคาไนเซชั่นด้วยซัลเฟอร์ให้ความต้านทานการสึกหรอดีที่สุด แต่ให้สมบัติการลื่นไถลไม่ดีเมื่อเทียบกับระบบวัลคาไนเซชั่นแบบอื่นๆ เนื่องจากเกิดพันธะข้ามส่วนใหญ่เป็นพอลิซัลฟิดิกที่มีความอ่อนตัวและมีความสามารถในการยืดตัวสูง จึงทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่ระหว่างคู่ผิวสัมผัส

3. ยางที่เติมอนุภาคเฮ็กซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ให้สมบัติการทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอโดยรวมสูงกว่าการใช้ผงพอลิเททระฟลูออโรเอทธิลีน แต่สมบัติการลื่นไถลไม่ดีเท่า

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพาราจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ RDG5550074

เอกสารอ้างอิง

[1] WolfgangTietze; & Alexander Riedl. (2007). *Pocket Book of Seals and Sealing.* Essen: Vulkan-Verlag GmbH.

[2] Khan, M.Sohail; Lehmann, Dieter; Heinrich, Gert;Gohs, Uwe; & Franke, Rainer. (2009, January). Structure-Property Effects on Mechanical, Friction and Wear Properties of Electron Modified PTFE Filled EPDM Composite. *eXPRESS Polymer Letters.* 3(1): 39–48.

[3] Rudnick, Leslie R. (2009). *Lubricant Additives: Chemistry and Applications.* 2nd ed. Boca Raton: CRC Press.

[4] Xanthos, Marino. (2010). *Functional Fillers for Plastics.* Weinheim: Wiley-VCH.

[5] Yi, Gewan; & Yan, Fengyuan. (2007, January). Mechanical and Tribological Properties of Phenolic Resin-Based Friction Composites Filled with Several Inorganic Fillers. *Wear.* 262(1-2): 121-129.

[6] ปิติพงษ์ พรหมรักษ์; ทิพบรรณ ปะละไทย; และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. (2555). *อิทธิพลของเฮกซะโกนอลโบรอนไนไตรด์ที่มีผลต่อสมบัติทางไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน.* ใน เอกสารการประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4. หน้า 50-54. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[7] Moore, Desmond F. (1972). *The Friction and Lubrication of Elastomers.* Oxford: Pergamon Press.

[8] Habeeb, K.; Unnikrishnan, G.; Sujith, A.; & Radhakrishnan, C.K. (2005, March). Cure Characteristics and Mechanical Properties of Styrene–Butadiene Rubber/Acrylonitrile Butadiene Rubber. *Materials Letters.* 59(6): 633-639.

[9] พงษ์ธร แซ่อุย. (2548). *สารเคมียาง.* กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

[10] Chung, Deborah D.L. (2010). *Composite Materials: Science and Applications.* London: Springer.

[11] Drobny, Jiri G. (2006). *Fluoroplastics.* Report 184. Shrophire: Rapra Technology.