

สมบัติเชิงกลและการทนน้ำมันแก๊สโซฮอล์ของวัสดุผสมยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิตเทซิลิกา

Mechanical Properties and Gasohol Oil Resistance of NBR/HNBR Blend Containing Precipitated Silica Filler

จันทราพร พรหมนิม*, เอกชัย วิมลมาลา และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
Jantaraporn Promchim*, Ekachai Wimolmala and Narongrit Sombatsompop

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ บางมด กรุงเทพฯ 10140 โทร 0-2470-8647 โทรสาร 0-2470-8647 E-mail: a_amp06@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสัดส่วนของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ สำหรับงานเป็นผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วที่ใช้งานยานยนต์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ โดยศึกษาผลของสัดส่วนของยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ที่ 0 25 50 75 และ 100 ส่วน และผลของสารตัวเติมพรีซิพิตเทซิลิกาที่ผสมอยู่ในวัสดุยางผสม เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยรวมของชิ้นงานวัสดุยางผสม ผลการทดลองพบว่า การปรับเปลี่ยนสัดส่วนของยางเอชเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้น โมดูลัสแรงดึง ความแข็ง และการคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงอัด ส่วนการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าชนิด E10 E20 และ E85 พบว่า วัสดุยางผสมสามารถทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ (ชนิด E85) ได้ดี โดยเฉพาะยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 สำหรับผลของการเติมพรีซิพิตเทซิลิกาในวัสดุยางผสม พบว่าการเติมปริมาณพรีซิพิตเทซิลิกาที่ 30 ส่วนในร้อยละของยาง สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยรวม และความสามารถในการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ยางเอ็นบีอาร์/ยางเอชเอ็นบีอาร์/น้ำมันแก๊สโซฮอล์/สมบัติเชิงกล/พรีซิพิตเทซิลิกา

Abstract

This work studied the blend proportion of acrylonitrile-butadiene rubber (NBR)/hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber (HNBR) blends at ratios of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100 (wt%) for vehicle seal applications that contact with gasohol fuel. The work studied the effect of precipitated silica loading in rubber compounds on the mechanical properties of the rubber blends. The results suggested the variation of proportion of NBR/HNBR blends could improve the overall mechanical properties of the rubber blends except tensile modulus, hardness and compression set, with increasing HNBR loadings. Under commercial gasohol oil resistance with the presence of 10, 20

and 30% ethanol, the results suggested that the lowest swelling of NBR/HNBR blends was given with gasohol oil E85, and the recommended blend ratio of NBR/HNBR was 50:50. For the effect of precipitated silica loading, it was found that the amount of precipitated silica at 30 phr could improve an enhancement in mechanical properties as well as commercial gasohol oil resistances.

Keyword: NBR/ HNBR/ Gasohol oil/ Mechanical properties/ Precipitated silica

1. บทนำ

อุตสาหกรรมรถยนต์ในปัจจุบัน และอนาคตได้เห็นความสำคัญในการผลิตรถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย (Flexible Fuel Vehicles; FFVs) เพื่อรองรับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เช่น น้ำมันแก๊สโซฮอล์ ซึ่งเป็นน้ำมันที่ได้จากการผสมระหว่างน้ำมันเบนซิน (Gasoline) กับเอทานอล (Ethanol) จากการที่ชิ้นส่วนในระบบเครื่องยนต์และระบบเชื้อเพลิงในรถยนต์รุ่นเก่า ไม่ได้มีการรองรับการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ จึงเกิดปัญหาเกี่ยวกับชิ้นส่วนโลหะ และชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ยาง เช่น ซีลยาง ปะเก็นยาง ท่อยางน้ำมัน ที่ต้องสัมผัสกับเอทานอลที่มีในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ด้วยเหตุนี้ ยางที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไปไม่สามารถทนตัวทำลายด้วยเอทานอลได้ จึงเกิดการเสื่อมสภาพและถูกกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว และส่งผลต่อการสูญเสียสมบัติทางกายภาพ (Reduced physical properties) ได้เร็วขึ้น (Kennedy et al., 2007) โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ยางทนน้ำมันที่ใช้กันมากในชิ้นส่วนเครื่องยนต์ในรถยนต์ คือ ยางเอ็นบีอาร์หรือยางไนไตรล์ (Nitrile rubber, NBR) และยางไฮโดรเจนเนตไนไตรล์หรือยางเอชเอ็นบีอาร์ (Hydrogenated nitrile rubber, HNBR) ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติต้านทานตัวทำละลายที่ดี นอกจากมีสมบัติที่สามารถต้านตัวทำละลายได้ดีแล้ว ยังสามารถต้านทานต่อการขัดสี การยุบตัวหลังได้รับแรงอัด ด้านทานไอโซน และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี (พงษ์ธร, 2548) ซึ่งในปัจจุบันยางซีลที่ใช้กับน้ำมันแก๊สโซฮอล์ส่วนใหญ่ใช้ยางฟลูออโรคาร์บอนหรือยางไวตันที่มีราคาค่อนข้างแพง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

* Corresponding author

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Ibbelwaleed และคณะ (2004) และ ซูลิพันธ์ และคณะ (2553) ได้มีการศึกษาการนำยางเอชเอ็นบีอาร์มา ผสมกับยางเอ็นบีอาร์ เพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติของยางเอชเอ็นบีอาร์ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้วัสดุยางผสมมีสมบัติเชิงกลโดยรวมเพิ่มขึ้น ยกเว้น โมดูลัสแรงดึง และความแข็งแรง Kantala และคณะ (2009) ศึกษาผลของการเติมซิลิกาเกรดการค้า ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการบ่มสุกของวัสดุยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอชเอ็นบีอาร์ พบว่า การเติมซิลิกาเกรดการค้าในวัสดุยางผสมทำให้เวลาในการบ่มสุกลดลง และยังส่งผลให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุยางผสมที่เน้นใช้งานการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้ายังไม่มีแพร่หลาย

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีความต้องการพัฒนาให้มีการขยายขอบเขตและยกระดับการใช้งานของวัสดุยางซิลทอนน้ำมันให้กว้างขึ้น โดยเน้นเพิ่มขอบเขตการใช้งานของยางผสมระหว่างยางเอชเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ให้ทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ ทำการศึกษาถึงปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงชนิดฟริชพิเทตซิลิกาในยางผสม โดยมีผงเขม่าดำเป็นสารเติมแต่งหลัก ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก สมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า

2. วิธีการ

2.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- ยางเอ็นบีอาร์ เกรด JSR N220S มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ร้อยละ 41.8 และยางเอชเอ็นบีอาร์ เกรด Therban 3907 มีปริมาณอะโครโลไนไตรล์ ร้อยละ 39.6 จากบริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด
- สารกระตุ้นปฏิกิริยาชนิดซิงค์ออกไซด์ จากบริษัท ซีโอออน แอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดไดออกทิล ฟลาธาเลต หรือ DOP จากบริษัท วิ.ซี.อุตสาหกรรม จำกัด สารช่วยในการคงรูปร่างชนิดไดคิมิวเปอร์ออกไซด์ จาก บริษัท พี ไอ อินดัสทรี จำกัด สารช่วยบ่มสุกชนิด Trimethylolpropane Trimethacrylate (TMPTMA) จากบริษัท เอ็มดีอาร์ อินเตอร์เนชันแนล จำกัด และสารต้านออกซิเดชัน 6PPD จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- สารคู่ควบประเภทไฮเลขนชนิด Couplink 89 C ใช้ในการปรับปรุงผิวฟริชพิเทตซิลิกา จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบสูตรยางที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบ/สารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ (phr)*
1. ยางเอ็นบีอาร์ : ยางเอชเอ็นบีอาร์	เมทริกซ์	100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)	สารกระตุ้นปฏิกิริยา	5.0
3. ผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรด N660	สารเสริมแรง	60.0
4. Dioctyl phthalate (DOP)	สารเสริมสภาพพลาสติก	8.0
5. Dicumyl peroxide (DCP)	สารเชื่อมโยงปฏิกิริยา	7.5
6. Trimethylolpropane Trimethacrylate (TMPTMA)	สารช่วยเชื่อมโยงปฏิกิริยา	12.0
7. Santoflex 6PPD	สารป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน	2.0
8. ฟริชพิเทตซิลิกา (Precipitated silica; PSi)	สารตัวเติมเสริมแรง	ปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 10, 20, 30, 40

* phr: parts per hundred of rubber by weight

- ผงเขม่าดำ เกรด N660 จากบริษัท ไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด และผงฟริชพิเทตซิลิกา เกรด TOKUSIL 233 จากบริษัท ไทกุยามา สยามซิลิกา จำกัด

2.2 การเตรียมชิ้นงานและการทดสอบ

สัดส่วนยางเอ็นบีอาร์:ยางเอชเอ็นบีอาร์ (NBR:HNBR) ดังนี้ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยเติมผงเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 60 phr เป็นสารเติมแต่งหลัก และปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมฟริชพิเทตซิลิกาที่เป็นสารเติมแต่งรอง ตั้งแต่ปริมาณ 0-40 ส่วนในยางร้อยละ (Parts per hundred of rubber, phr)

- การบดผสมยางด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จากบริษัท ยง พง แมชชีนเนอรี จำกัด แล้วเติมสารเคมีอย่างอื่น ๆ ตามส่วนประกอบสูตรยางดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยใช้เวลาในการผสมสารประกอบยาง 30 นาที
- การตรวจสอบค่าความหนืดมูของยางคอมปาวด์ โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer และตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการคงรูปร่าง (Cure time) ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc₉₀) ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) และเครื่อง Moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิทดสอบ 170 องศาเซลเซียส
- การขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยการนำยางคอมปาวด์ผ่านการคงรูปร่าง ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน จากบริษัท LAB TECH จำกัด โดยอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 170 องศาเซลเซียส ใช้แรงดันปิดแม่พิมพ์ที่ 160 กก./ตร.ซม.
- การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านแรงดึง และความต้านแรงฉีกขาด โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machines จากบริษัท Shimadzu ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 และ ASTM D624-07 ตามลำดับ
- การทดสอบความแข็งของยางคงรูป โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็ง จากบริษัท Tech Lock จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 Shore A
- การทดสอบการต้านทานต่อการขัดถู โดยใช้เครื่องทดสอบ DIN abrader จากบริษัท Hampden Test Equipment จำกัด ตามมาตรฐาน DIN 53516 และทดสอบความยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัดของยางที่คงรูปตามมาตรฐาน ASTM D395-03

- ทดสอบการต้านทานการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ในสภาวะก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 70 ชั่วโมง และทดสอบสมบัติการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าชนิด E10 E20 และ E85 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D471-2010

3. ผลและอภิปราย

จากการศึกษาสัดส่วนการผสมของยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติการบ่มสุก และสมบัติเชิงกล ก่อนการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า การเติมปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัว (ts_1) ของยาง โดยมีเวลาในการไหลตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่ส่งผลต่อเวลาในการคงรูป (tc_{90}) ของยางคอมปาวด์ พบว่า ทำให้เวลาการคงรูปยางมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลที่น้อยกว่ายางเอ็นบีอาร์ ทำให้ยางเอชเอ็นบีอาร์เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงได้ช้ากว่า ส่วนค่าผลต่างแรงบิด พบว่า ยางเอ็นบีอาร์มีค่าผลต่างแรงบิดสูงกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ เนื่องจากค่าผลต่างแรงบิดแปรผันโดยตรงกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง (Sae-oui et al., 2006) ส่วนค่าความหนืดมูนิของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของยางเอชเอ็นบีอาร์ เนื่องจากยางเอชเอ็นบีอาร์เริ่มต้นมีความหนืดสูงกว่ายางเอ็นบีอาร์เริ่มต้น

สมบัติเชิงกลด้านการต้านแรงดึง การต้านแรงฉีกขาด การต้านทานต่อการขีดข่วน ความแข็ง และการยุบตัวเมื่อได้รับแรงอัด ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุยางผสมให้ดีขึ้น เนื่องจากยางเอชเอ็นบีอาร์มีสายโซ่หลักที่เป็นพันธะเดี่ยวในปริมาณมากกว่ายางเอ็นบีอาร์ จึงสามารถเคลื่อนไหว (Flexible) และเกิด Strain hardening ที่เหนียวแน่นต่อการเกิดผลึก (Stress-induced crystallization) ได้ดีกว่ายางเอ็นบีอาร์ (Ibnelwaleed และคณะ, 2004) ยกเว้น ค่ามอดุลัสแรงดึง และการคืน

กลับตัวเมื่อได้รับแรงอัด ที่มีค่าลดต่ำลง เนื่องจากยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลที่น้อยกว่ายางเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้ยางเอชเอ็นบีอาร์มีปริมาณความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) ที่น้อยกว่ายางเอ็นบีอาร์ (ซุสพันธ์ และคณะ, 2553)

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติเชิงกล และการบวมตัวของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ ภายหลังการแช่ชิ้นงานในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุยางผสมมีค่าลดลง เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำมันแก๊สโซฮอล์เกิดการแทรกซึมเข้าไปเนื้อยาง โดยสมบัติเชิงกลภายหลังการแช่ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีผลใกล้เคียงกันการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากยางที่ใช้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางเอชเอ็นบีอาร์ (พงษ์ธร, 2548) ภายหลังการแช่ชิ้นงานในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10 และ E20 ส่งผลให้ชิ้นงานยางบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบวมตัวในตัวทำละลายแปรผกผันกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ดังนั้น การที่ยางเอ็นบีอาร์มีปริมาณพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างโมเลกุลในปริมาณที่มากกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ ส่งผลให้ยางเอ็นบีอาร์มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโมเลกุลที่สูงกว่ายางเอชเอ็นบีอาร์ และในส่วนของการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 พบว่า วัสดุยางผสมทุกสัดส่วนสามารถทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ได้ดี มีการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E85 ในปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการแช่ใน E10 และ E20 โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ สัดส่วน 50:50 ที่สามารถต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดี ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ยางเอชเอ็นบีอาร์สามารถทนทานต่อตัวทำละลายเอทานอลได้เป็นอย่างดี (<http://o-ring.info/en/products/by-compound/hnbr-x-nbr/>) ซึ่งโดยภาพรวมแล้วยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 50:50 เป็นสัดส่วนที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวม และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาต่อไป

ตารางที่ 2 สมบัติการไหลตัว เวลาการคงรูป และสมบัติเชิงกล ของยางผสมระหว่าง NBR:HNBR ก่อนการแช่ในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า

สมบัติ	ปริมาณยาง HNBR ที่เติมในยางเอ็นบีอาร์ (%)				
	0	25	50	75	100
Oscillating Disk Rheometer (ODR):					
Scorch time; ts_1 (min:sec)	0:36	0:37	0:36	0:36	0:38
Cure time; tc_{90} (min:sec)	3:37	4:16	7:19	8:02	8:38
Delta torque (dN-m)	148.4	150.3	157.5	122.7	102.2
Mooney viscosity (ML 1+4)100 °C	32.0	32.8	34.3	40.0	47.1
Modulus at 70 % elongation (MPa)	6.1 ± 0.1	5.8 ± 0.3	5.6 ± 0.3	4.5 ± 0.2	3.4 ± 0.2
Tensile Strength (MPa)	19.7 ± 0.6	16.7 ± 0.5	17.9 ± 0.3	18.6 ± 0.2	20.9 ± 0.3
Elongation at break (%)	145 ± 4	147 ± 3	168 ± 7	217 ± 11	342 ± 3
Tear Strength (kN/m)	12.8 ± 1.3	13.4 ± 0.2	16.2 ± 0.4	27.2 ± 0.7	42.5 ± 2.2
Hardness (Shore A)	82 ± 1	84 ± 1	85 ± 1	85 ± 1	81 ± 1
Compression set (%)	4.0 ± 0	5.4 ± 0.2	6.6 ± 0.8	12.3 ± 0.5	13.0 ± 0.2
Volume loss (mm ³)	94.9 ± 4.7	102.5 ± 6.9	96.5 ± 7.6	78.5 ± 7.7	61.2 ± 9.9

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของยางผสมระหว่าง NBR:HNBR ภายหลังจากแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า

สมบัติ	ปริมาณยาง HNBR ที่เติมในยางเอ็นบีอาร์ (%)				
	0	25	50	75	100
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E10 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.5 ± 0.1	4.0 ± 0.1	3.6 ± 0.1	2.7 ± 0.3	1.7 ± 0.2
Tensile Strength (MPa)	5.9 ± 0.5	6.3 ± 0.5	6.9 ± 0.1	6.7 ± 0.4	8.4 ± 0.4
Elongation at break (%)	83 ± 3	95 ± 6	109 ± 2	139 ± 4	227 ± 10
Tear Strength (kN/m)	4.0 ± 0.2	4.4 ± 0.3	4.5 ± 0.1	9.0 ± 0.7	17.6 ± 1.7
Hardness (Shore A)	75 ± 1	75 ± 1	76 ± 1	69 ± 1	62 ± 1
Swelling in Gasohol E10 (%)	18.5 ± 0.2	19.5 ± 0.1	20.8 ± 0.3	24.6 ± 0.2	27.1 ± 0.2
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E20 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.7 ± 0.1	3.9 ± 0.3	3.6 ± 0	2.6 ± 0.2	1.8 ± 0.1
Tensile Strength (MPa)	5.3 ± 0.2	5.9 ± 0.2	7.6 ± 0.2	7.5 ± 0.5	8.3 ± 0.3
Elongation at break (%)	75 ± 1	92 ± 2	116 ± 2	156 ± 3	223 ± 4
Tear Strength (kN/m)	3.7 ± 0.7	3.9 ± 0.4	4.5 ± 0.3	7.1 ± 0.8	15.7 ± 0.9
Hardness (Shore A)	74 ± 1	76 ± 1	73 ± 1	66 ± 1	61 ± 1
Swelling in Gasohol E20 (%)	19.2 ± 0.4	20.3 ± 0.2	21.5 ± 0	24.3 ± 0.1	27.7 ± 0.1
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.9 ± 0.2	4.4 ± 0.2	4.5 ± 0.1	3.2 ± 0.1	2.3 ± 0.1
Tensile Strength (Mpa)	9.3 ± 0.4	7.9 ± 0.5	9.9 ± 0.5	9.7 ± 0.3	12.3 ± 0.3
Elongation at break (%)	102 ± 1	103 ± 6	123 ± 2	165 ± 4	265 ± 2
Tear Strength (kN/m)	5.0 ± 0.6	5.3 ± 0.4	6.6 ± 0.8	11.5 ± 0.4	21.2 ± 0.1
Hardness (Shore A)	76 ± 1	78 ± 1	76 ± 1	75 ± 1	70 ± 1
Swelling in Gasohol E85 (%)	8.2 ± 0.2	7.0 ± 0.5	6.5 ± 6	7.1 ± 0.3	8.9 ± 0
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E10 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.7 ± 0.1	3.8 ± 0.2	3.5 ± 0.2	2.4 ± 0.5	1.6 ± 0.4
Tensile Strength (MPa)	5.7 ± 0.6	6.4 ± 0.7	6.7 ± 0.3	6.6 ± 0.5	7.9 ± 0.3
Elongation at break (%)	80 ± 5	98 ± 7	118 ± 6	134 ± 5	213 ± 8
Tear Strength (kN/m)	3.7 ± 0.1	3.8 ± 0.1	4.5 ± 0.3	6.3 ± 0.2	14.4 ± 0.4
Hardness (Shore A)	74 ± 1	73 ± 1	71 ± 1	68 ± 1	61 ± 1
Swelling in Gasohol E10 (%)	16.5 ± 0.1	18.6 ± 0	19.9 ± 0.4	23.4 ± 0.2	28.6 ± 0.4
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E20 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.2 ± 0.1	3.6 ± 0.1	3.5 ± 0.1	2.5 ± 0.3	1.8 ± 0.2
Tensile Strength (MPa)	5.8 ± 0.2	5.3 ± 0.3	6.0 ± 0.3	5.7 ± 0.4	7.4 ± 0.2
Elongation at break (%)	87 ± 2	91 ± 3	102 ± 4	122 ± 6	202 ± 2
Tear Strength (kN/m)	3.7 ± 0.1	3.7 ± 0	3.9 ± 0.5	5.6 ± 0.1	11.95 ± 0.7
Hardness (Shore A)	73 ± 1	70 ± 1	70 ± 1	68 ± 1	57 ± 1
Swelling in Gasohol E20 (%)	24.3 ± 0.2	24.7 ± 0.4	25.4 ± 0.3	32.6 ± 0.7	37.1 ± 0.7
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E85 ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.3 ± 0.2	4.0 ± 0.2	4.1 ± 0.2	2.8 ± 0.1	2.3 ± 0.3
Tensile Strength (Mpa)	6.9 ± 0.2	7.1 ± 0.5	8.4 ± 0.6	8.2 ± 0.4	11.1 ± 0.3
Elongation at break (%)	92 ± 2	102 ± 5	115 ± 6	156 ± 5	244 ± 5
Tear Strength (kN/m)	4.3 ± 0.1	4.0 ± 0.1	4.7 ± 0.4	7.8 ± 0.7	17.5 ± 0.6
Hardness (Shore A)	73 ± 1	73 ± 1	74 ± 1	72 ± 1	64 ± 1
Swelling in Gasohol E85 (%)	11.6 ± 0.2	11.4 ± 0.2	12.0 ± 0.1	13.0 ± 0.3	15.1 ± 0.2

ตารางที่ 4 สมบัติการไหลตัว เวลาการคงรูป สมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของยางผสมระหว่าง NBR:HNBR ที่สัดส่วน 50:50 ที่เติมผงฟริชพิเทตซิลิกาเป็นสารเติมแต่งรอง ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า

สมบัติ	ปริมาณฟริชพิเทตซิลิกา (phr)				
	0	10	20	30	40
สมบัติก่อนการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า					
Moving die rheometer (MDR):					
Scorch time; ts_1 (min:sec)	0:40	0:38	0:37	0:36	0:44
Cure time; tc_{90} (min:sec)	6:42	6:17	5:59	5:43	5:24
Delta torque (dN-m)	36.3	39.9	47.6	54.6	50.5
Mooney viscosity (ML 1+4)100 °C	34.3	44.7	54.1	69.1	82.4
Modulus at 70 % elongation (MPa)	5.6 ± 0.3	7.5 ± 0.1	9.3 ± 0.2	11.1 ± 0.3	15.1 ± 0.4
Tensile strength (MPa)	17.9 ± 0.3	19.9 ± 0.3	19.4 ± 0.4	19.7 ± 0.2	17.7 ± 0.3
Elongation at break (%)	168 ± 7	161 ± 2	139 ± 4	131 ± 2	87 ± 2
Tear strength (kN/m)	16.2 ± 0.4	20.4 ± 0.7	27.1 ± 0.8	38.2 ± 1.1	22.5 ± 1.1
Hardness (Shore A)	85 ± 1	85 ± 1	88 ± 1	92 ± 1	95 ± 1
Compression set (%)	6.6 ± 0.8	10.59 ± 0.8	10.83 ± 0.6	13.76 ± 0	11.25 ± 0.4
Volume loss (mm ³)	96.5 ± 7.6	101.4 ± 8.1	107.3 ± 1.8	106.5 ± 5.2	138.8 ± 9.2
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E10 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	3.6 ± 0.1	4.0 ± 0.1	5.3 ± 0.2	5.0 ± 0.3	7.8 ± 0
Tensile strength (MPa)	6.9 ± 0.1	7.3 ± 0.7	8.0 ± 0.7	8.4 ± 0.4	9.0 ± 0.5
Elongation at break (%)	109 ± 2	112 ± 10	97 ± 4	118 ± 10	82 ± 5
Tear strength (kN/m)	4.5 ± 0.1	6.6 ± 0.6	6.9 ± 0.7	9.2 ± 0.8	6.8 ± 0.8
Hardness (Shore A)	76 ± 1	74 ± 1	78 ± 1	80 ± 1	86 ± 1
Swelling in gasohol E10 (%)	20.8 ± 0.3	21.3 ± 0.2	19.7 ± 0.1	19.0 ± 0.3	17.6 ± 0.2
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E20 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	3.6 ± 0	4.1 ± 0.1	5.3 ± 0.2	4.7 ± 0	7.8 ± 0.2
Tensile strength (MPa)	7.6 ± 0.2	7.2 ± 0.4	8.3 ± 0.4	8.7 ± 0.2	8.3 ± 0.4
Elongation at break (%)	116 ± 2	112 ± 5	101 ± 3	125 ± 0	74 ± 4
Tear strength (kN/m)	4.5 ± 0.3	6.2 ± 0.5	6.8 ± 1.2	6.9 ± 0.3	6.8 ± 0.6
Hardness (Shore A)	73 ± 1	75 ± 1	79 ± 1	80 ± 1	86 ± 1
Swelling in gasohol E20 (%)	21.5 ± 0	21.7 ± 0.1	20.2 ± 0.3	19.5 ± 0.1	17.7 ± 0.3
สมบัติหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ชนิด E85 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 70 ชั่วโมง					
Modulus at 70 % elongation (MPa)	4.5 ± 0.1	5.1 ± 0.3	6.9 ± 0.1	7.3 ± 0.2	11.0 ± 0.3
Tensile strength (Mpa)	9.9 ± 0.5	10.8 ± 0.2	12.4 ± 0.4	12.5 ± 0.3	12.0 ± 0.6
Elongation at break (%)	123 ± 2	124 ± 2	111 ± 2	110 ± 3	76 ± 4
Tear strength (kN/m)	6.6 ± 1	9.6 ± 1	9.9 ± 1	12.6 ± 0.1	8.8 ± 0.5
Hardness (Shore A)	76 ± 1	79 ± 1	81 ± 1	84 ± 1	89 ± 1
Swelling in gasohol E85 (%)	6.5 ± 0.6	7.0 ± 0	6.8 ± 0.1	6.2 ± 0.1	6.0 ± 0.1

ดังนั้นคณะวิจัย จึงเลือกสัดส่วนของ NBR:HNBR ที่ 50:50 ศึกษาผลการเติมสารตัวเติมเสริมแรงฟริชพิเทตซิลิกา เพื่อศึกษาผลสมบัติการไหล เวลาการคงรูป ความหนืด และสมบัติเชิงกล ก่อนและหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้า ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4 พบว่า เมื่อปริมาณผงฟริชพิเทตซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลา

ในการคงรูปยางลดลง และทำให้ผลต่างแรงบิด และความหนืดมูนีของยางคอมปาวด์มีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น (มอดุลัส ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการฉีกขาด) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Sombatsompop และคณะ (2008) เนื่องจากผงฟริชพิเทตซิลิกาที่เติมลงไปเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่งสูง (Rigidity)

และพรีซิพิตเทชันซิลิกาเข้าไปเกิดการเชื่อมโยงพันธะกับยาง (Rubber-Filler interaction) ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของยางกับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของซิลิกาที่ดี (Suzuki et al., 2005) แต่สมบัติเชิงกลด้านการยืดตัว ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการขีดสี และการคืนตัวกลับมีค่าลดลง เนื่องจากยางผสมมีปริมาณเนื้อยางที่เป็นส่วนประกอบหลักลดลง ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติคลดลงด้วย และนอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณพรีซิพิตเทชันซิลิกา ส่งผลให้วัสดุยางผสมสามารถทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนการบวมตัวในเฟสยางลดลง และการที่อนุภาคของผงพรีซิพิตเทชันซิลิกาเกิดการยึดเกาะกับเฟสยางมีส่วนช่วยให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้มากขึ้น (Kantala et al., 2009) โดยการเติมปริมาณพรีซิพิตเทชันซิลิกาที่ 30 phr ในยางผสม ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวม และความทนทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่ดีและเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ และเมื่อเพิ่มปริมาณพรีซิพิตเทชันซิลิกาไปที่ 40 phr ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด และความต้านแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลงต่ำลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมพรีซิพิตเทชันซิลิกา วัสดุยางผสมมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E10 และ E20 เนื่องจากวัตถุดิบเริ่มต้นยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ใช้สามารถทนต่อตัวทำละลายเอทานอลได้เป็นอย่างดี

4. บทสรุป

จากผลการศึกษาสมบัติการไหล สมบัติการป้อนสุก สมบัติเชิงกล และการทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ พบว่า

1. การเติมปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ในยางเอ็นบีอาร์ไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวของยางผสม แต่ส่งผลให้เวลาในการคงรูปมีค่าเพิ่มขึ้น
2. ค่าความหนืดของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของยางเอชเอ็นบีอาร์
3. สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เติมลงไป ยกเว้น ค่าการยุบตัวหลังได้รับแรงอัด มอดุลัส และความแข็ง
4. สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางผสมภายหลังการแช่น้ำมันแก๊สโซฮอล์ทางการค้ามีค่าต่ำกว่าก่อนแช่ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
5. วัสดุผสมยางคอมปาวด์ระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์สามารถทนต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ชนิด E85 ได้สูงสุด โดยยางผสมที่แช่ใน E85 มีการบวมตัวน้อยกว่าการแช่ใน E10 และ E20
6. สัดส่วนของยางผสมระหว่างยางเอ็นบีอาร์กับยางเอชเอ็นบีอาร์ที่ 50:50 ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่เหมาะสม และความสามารถในการต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันแก๊สโซฮอล์ที่มีปริมาณเอทานอลสูงๆ ได้ดี
7. การเติมปริมาณพรีซิพิตเทชันซิลิกาที่ 30 phr ในยางผสม สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยรวม และความทนทานต่อน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2553 สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย สัญญาเลขที่ MRG-WI535S052 และบริษัท เพาเวอร์ ซิล จำกัด ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Kennedy, S. and Ahamad, F. (2007). "Estimating the impact of vehicle modification costs on the demand for biofuels in Malaysia". *Energy for Sustainable Development*. 11 (3): 67-76.
2. พงษ์ธร แห่อู๋. (2548). "ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน". พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) ,25-31.
3. Data sheet HNBR, [online], Available: <http://o-ring.info/en/products/by-compound/hnbr-x-nbr/> [31 January 2012]
4. ชูลีพันธ์ พันธุ์เยี่ยม. (2553). "สมบัติเชิงกลและการทนน้ำมันของยางผสมเขม่าดำ/ยางเอชเอ็นบีอาร์/ยางเอ็นบีอาร์ที่เติมด้วยผงซิลิกาเกรดการค้าและผงเถ้าลอย". วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 85-93.
5. Kantala, C., Wimolmala, E., Sirisinha, C. and Sombatsompop, N. (2009). "Reinforcement of Compatibilized NR/NBR Blend by Fly-Ash Particles and Precipitated Silica". *Polymers for Advanced Technology*. 20 (5): 448-458.
6. Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K. (2006). "Role of Silane Coupling Agents on Properties of Silica-Filled Polychloroprene". *European Polymer Journal*. 42 (3): 479-486.
7. Hussein, I. A., Chaudhry, R. A. and Abu Sharkh, B. F. (2004). "Study of The Miscibility and Mechanical Properties of NBR/HNBR Blends". *Polymer Engineering and Science*. 44 (12): 2346-2352.
8. Sombatsompop, N., Wimolmala, E. and Sirisinha, C. (2008). "Fly-Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers: Part III. Cure Characteristics, and Mechanical & Oil Resistance Properties of NBR". *Journal of Applied Polymer Science*. 110 (5): 2877-2883.
9. Suzuki, N., Ito, M. and Ono, S. (2005). "Effects of Rubber/Filler Interactions on the Structural Development and Mechanical Properties of NBR/Silica Composites". *Journal of Applied Polymer Science*. 95 (1): 74-81.