

สมบัติไทรโบโลยี-เชิงกล และการทนน้ำมันของวัสดุเชิงประกอบยางอะครีโลไนไตรล์  
บิวทาไดอีนที่เติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น

**Tribological-Mechanical and Oil Resistant Properties of Acrylonitrile Butadiene Rubber  
Composite Filled with Multi-Walled Carbon Nanotube**

ศิริวรรณ จันทร์สีนาค (Siriwan Jansinak)\* เอกชัย วิมลมาลา (Ekachai Wimolmala)\*\*

ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ (Dr.Narongrit Sombatsompop)\*\*\*

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น โดยปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0, 3, 6, 9, และ 12 ส่วนในยางร้อยละ (phr) ในวัสดุเชิงประกอบยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน (NBR) ตรวจสอบสมบัติไทรโบโลยี สมบัติเชิงกล และการทนน้ำมัน ผลการวิจัย พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และค่าผลต่างแรงบิด ส่วนผลการวิจัยด้านสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0-12 phr ส่งผลทำให้มอดูลัสแรงดึง ความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาด แต่ส่งผลทำให้ความสามารถในการคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง หลังการบ่มเร่งด้วยน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น ส่งผลทำให้มอดูลัสและค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึง แต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานการฉีกขาดลดลง ส่วนผลการวิจัยสมบัติการทนน้ำมัน พบว่า ทั้งในกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ มีความสามารถในการทนน้ำมันไฮดรอลิก และผลการวิจัยด้านสมบัติไทรโบโลยี โดยทำการปรับเปลี่ยนน้ำหนักกด 5, 10, 20 และ 30 นิวตัน พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นที่ปริมาณต่างๆ ในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอจำเพาะลดลง

**ABSTRACT**

This work aimed to investigate the effects of multi-walled carbon nanotube loading (0, 3, 6, 9, and 12 parts per hundred of rubber, phr) on tribological, mechanical and oil resistant properties in acrylonitrile butadiene rubber composites. The results indicated that adding multi-walled carbon nanotube did not significantly affect the scorch time, cure time and torque difference. Adding multi-walled carbon nanotube was found to increase the modulus and hardness, but did not significantly affect the tensile and tear strength with decreases in compression set and elongation at break. After aging in hydraulic oil 125° C at 72 hrs, the modulus and hardness increased and the compression set and elongation decreased. The rubber compounds with and without multi-walled carbon nanotube had the oil resistant properties to hydraulic oil. The coefficient of friction and wear rate of the rubber composites were found to decrease under the applied loads of 5, 10, 20 and 30 N.

**คำสำคัญ:** คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน ไทรโบโลยี

**Keywords:** Acrylonitrile butadiene rubber, Multi-Wall Carbon Nanotubes, Tribology

\* นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\*\* รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

\*\*\* ศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างโครงการขนาดใหญ่ (Mega project) เกิดขึ้นมาก เช่น การก่อสร้างทางด่วนหรือทางตึกสูง และอาคารชุด (Condominium) เป็นต้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องจักรกลใช้ในการทุ่มแรงคน โดยกลไกการทำงานของเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ ต้องอาศัยหลักการทำงานของระบบไฮดรอลิก ซึ่งมีการส่งถ่ายกำลังด้วยของไหลที่เป็นของเหลว เช่น น้ำหรือน้ำมันไฮดรอลิก จากการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ในเครื่องจักรกลมีชิ้นส่วนที่สำคัญทำหน้าที่ป้องกันการรั่วซึมของของไหลในระบบ เช่น ขวงโอริง (O-ring) ปะเก็น (Gasket) และซีลยาง (Seal) หรือยางกันรั่ว โดยยางกันรั่วส่วนใหญ่นิยมใช้ในเครื่องจักรกลทำจากวัสดุยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติทนต่อน้ำมันที่ดี เช่น ขวงไนไตรล์ (Nitrile rubber: NBR) ขวงฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon rubber) เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับวัสดุซีลยางทนน้ำมัน โดยมีการศึกษาสารตัวเติมในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติในยางเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 20 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เติมเถ้าลอย (Fly ash) และพรีซิพิเตดซิลิกา (Precipitated silica) เป็นสารตัวเติม พบว่า ในกรณีที่เติมพรีซิพิเตดซิลิกา ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดูลัสแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็งแรงมีค่าสูงกว่าการเติมเถ้าลอย ส่วนในกรณีที่ผ่านการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนและน้ำมันไฮดรอลิก ทำให้ยางผสมมีสมบัติการยึดตัวลดลง (Kantala et al., 2009) จากนั้นจึงมีการขยายต่อยอดงานวิจัยพัฒนาซีลยางน้ำมันในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์รูปแบบ U – CUP ที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา สำหรับการใช้งานในระบบไฮดรอลิกของเครื่องจักรกลหนัก ภายใต้สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้มีสมบัติและการใช้งานสูงขึ้น โดยศึกษาสมบัติด้านการทนน้ำมันภายใต้สภาวะการใช้งานอย่างต่อเนื่องของซีลยางในกระบอกไฮดรอลิก ผลจากงานวิจัยพบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมและความต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงในวัสดุยางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซิพิเตดซิลิกามีค่าสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกา (ปิยะภรณ์ และคณะ, 2555) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ลักษณะการใช้งานซีลยางชนิด U – CUP เมื่อมีการใช้งานเกิดการเสียดสีกับผนังกระบอกไฮดรอลิกเพื่อต้านแรงดันน้ำมันไฮดรอลิก ส่งผลทำให้ซีลยางอาจเกิดการสึกหรอ สมบัติดังกล่าวจึงทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติไตรโบโลยีและการทนน้ำมันของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes : MWCNT) ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นเพิ่มสมบัติเชิงกลและต้านทานต่อการสึกหรอ ส่งผลทำให้ซีลยางเอ็นบีอาร์ มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีและต้านทานต่อการสึกหรอของชิ้นงาน และช่วยเพิ่มอายุการใช้งานให้นานขึ้น

## วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาปริมาณคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น ที่มีต่อสมบัติไตรโบโลยี สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และการทนน้ำมันของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์

เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ หลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิสูงในน้ำมันที่มีต่อสมบัติเชิงกลกายภาพ

## วิธีการวิจัย

### วัสดุ/สารเคมี ขั้นตอนการผสม และการเตรียมชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์

ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุยางเอ็นบีอาร์เป็นวัสดุหลัก โดยทำการผสมเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เตรียมวัตถุดิบผสมระหว่างยางกับเขม่าดำที่ปริมาณคงที่ 60 phr ขั้นตอนที่ 2 ปรับเปลี่ยนปริมาณคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0, 3, 6, 9 และ 12 phr เติมในยางเอ็นบีอาร์ และสารเคมีอื่นๆด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จาก

บริษัท ขง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ตามส่วนประกอบข้างแสดงในตารางที่ 1 เวลาในการผสม 30 นาทีเท่ากันทุกสูตร  
 ณ อุณหภูมิการผสมในช่วง 40-45 องศาเซลเซียสนำวัสดุเชิงประกอบข้างเอ็นบีอาร์ เตรียมขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบ  
 ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) จากบริษัท แลป เทคโนโลยี เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ประเทศไทย อุณหภูมิการ  
 ขึ้นรูปที่ 170 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสมบัติ  
 เชิงกลด้วยแม่พิมพ์ตัดเป็นรูปคัมเบลล์

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบข้างที่ใช้ในงานวิจัย

Ingredients	Content (phr*)	Function	Commercial source
NBR grade JSR N215SL ACN 41%	100 (Part)	Matrix	Channel Chemical Co., Ltd.
Zinc oxide, ZnO	5.0	Activator	Thai-Lysaght Co., Ltd.
Stearic acid	1.5	Co - Activator	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd.
Carbon Black (HAF N330)	60.0	Reinforcing Agent	Thai Carbon Black Co., Ltd
Carbon nanotube grade NC7000	0, 3, 6, 9,12	Filler	Nanocyl Co., Ltd.
Mercaptobenzothiazole (MBTS)	0.7	Accelerator	PI Industry Co., Ltd.
Tetramethyl Thiuramdisulfide (TMTD)	2.5	Co - Accelerator	ZEON Advanced Polymix Co., Ltd.
Aromatic oil grade E101	10.0	Processing aid	ESSO (Thailand) Public Co., Ltd.
Sulphur powder	2.5	Cross-linker	Zeon advanced Polymix Co., Ltd.

\*phr: part per hundred of rubber

### ขั้นตอนการทดสอบสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล และภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบ

นำยางคอมพาวด์ที่ได้จากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ทดสอบเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (ts) และเวลาในการคง  
 รูปอยู่ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc<sub>90</sub>) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer; ODR) จาก บริษัท โกล  
 เท็ค เทคโนโลยี แมชชีน อินดัสทรีล จำกัด รุ่น GT 70 - 70 S2, ประเทศไต้หวัน ตามมาตรฐาน ASTM D2084 - 01  
 อุณหภูมิในการทดสอบ 170 องศาเซลเซียส ขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านความต้านทานต่อแรงดึง  
 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 และความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624-00  
 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท ซิมัส จำกัด รุ่น Autograph AG-I ที่ 5kN ประเทศญี่ปุ่น และความ  
 แข็งที่ผิวของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Shore A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจากบริษัท เทคโลค จำกัด  
 ประเทศญี่ปุ่น และภาพถ่ายชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Optical microscope (OM)

### ขั้นตอนการทดสอบสมบัติไทรโบโลยี

นำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบข้างเอ็นบีอาร์ที่เต็มและไม่เต็มคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น ทดสอบ  
 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอจำเพาะ โดยในงานวิจัยใช้การทดสอบแบบบอลออนดิสก์ (Ball-on-  
 Disc) ทดสอบจำนวน 3 ชิ้นงานต่อสูตร โดยทำการปรับเปลี่ยนน้ำหนักกด 5, 10, 20 และ 30 N และคำนวณหาค่า  
 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอจำเพาะ ดังแสดงในสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ตามลำดับ (นิธิพงศ์  
 2549; Piyush et al., 2016)

$$\mu = F/F_N \quad (1)$$

โดยที่ F คือ แรงเสียดทาน (N)  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน  
 $F_N$  คือ แรงดันวัตถุในแนวตั้งฉาก (N)

$$\text{Specific wear rate} = \frac{\Delta m}{\square \times \text{load} \times \text{distance}} \quad (2)$$

โดยที่  $\Delta m$  คือ ผลต่างของน้ำหนักชิ้นงาน (g)  
 $\square$  คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 distance คือ ระยะทางในการทดสอบ (m)  
 load คือ น้ำหนักกด (N)

### ขั้นตอนทดสอบการบวมตัวในน้ำมัน

เตรียมชิ้นงานยางลักษณะวงกลม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันไฮดรอลิก โดยใช้อุณหภูมิการทดสอบ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัว ดังแสดงในสมการที่ 3

$$Q = ((M_1 - M_0)/(M_0)) \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ Q คือ สัดส่วนการบวมตัว (%)  
 $M_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่ (g)  
 $M_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่ (g)

### ผลการวิจัย

ผลการตรวจสอบเวลาที่ยางเริ่มการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป สมบัติเชิงกล และการทนน้ำมันของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นที่ 0, 3, 6, 9 และ 12 phr พบว่า เมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time) เวลาที่ยางคงรูป (Cure time) และค่าผลต่างแรงบิด เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับยางเอ็นบีอาร์

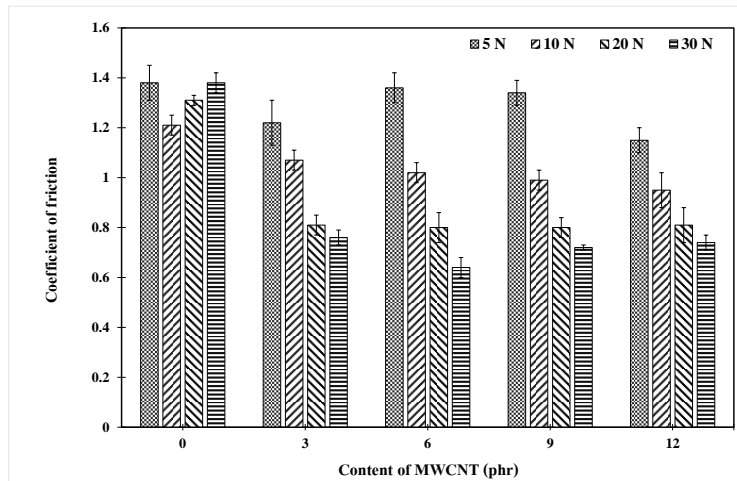
ส่วนผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น ส่งผลทำให้มอดูลัสแรงดึงและความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นมีค่ามอดูลัสที่สูงและมีความแข็งแกร่ง (Rigidity) (Zhou et al., 2006) เมื่อเติมในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เป็นวัสดุหลักทำให้มีความแข็งแกร่งและความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่งผลทำให้ความสามารถในการคืนกลับตัวหลังได้รับแรงกดอัดของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นทำให้ความสามารถการยืดหยุ่น (Elasticity) ของวัสดุลดลง (Thongsang, Sombatsompop, 2006) จึงส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์มีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น ไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาด เนื่องจากไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่

โมเลกุลยางอะครีโลไนไตรล์วิทาไดอินกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ (Filler-filler interaction) (Boonbumrung et al., 2016) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบเปอร์เซ็นต์ยางบวคที่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผงหลายชั้นในปริมาณต่างๆ ไม่ส่งผลต่อค่าการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ เนื่องจากโครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์สามารถต้านทานต่อการแทรกตัวของน้ำมันได้ดี (ปิยะภรณ์ และคณะ, 2555) และในกรณีการบ่มเร่งสภาวะในน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เวลา 72 ชั่วโมง พบว่า โมดูลัสแรงดึงและความแข็งที่ผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ได้รับความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิกเป็นระยะเวลาที่ต่อเนื่อง ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์หลังการบ่มเร่งเมื่อได้รับความร้อน (Post curing) ทำให้สายโซ่ยางเกิดการเคลื่อนไหวได้ยาก แต่ส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การขีดตัว และความต้านทานการฉีกขาดลดลง

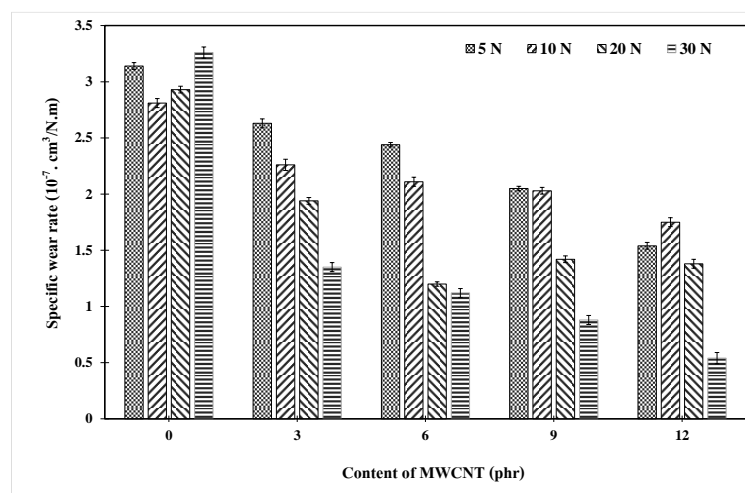
ตารางที่ 2 สมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 125°C เวลา 72 ชั่วโมงของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผงหลายชั้น

Propeties		Cure properties				
		NBR + MWCNT				
		0	3	6	9	12
Scorch time (sec)		55.0±0.3	52.0±0.5	46.0±0.4	44.0±0.4	41.0±0.1
Cure time (sec)		131.0±0.6	124.0±0.4	100.0±5.5	113.0±3.4	123.0±0.1
DT (MH-ML) (dN-m)		90.0±1.2	96.7±1.0	73.6±3.4	86.1±2.1	90.4±2.7
Propeties		Mechanical properties				
		NBR + MWCNT				
		0	3	6	9	12
Tensile modulus at 70% (MPa)	Before	5.0±0.1	7.1±0.4	8.2±0.6	9.0±1.4	12.8±0.4
	After	6.8±0.1	11.1±0.4	14.2±0.5	18.7±0.2	19.2±0.4
Tensile strength (MPa)	Before	14.9±1.6	15.4±2.7	13.3±1.8	13.8±1.4	16.4±2.7
	After	11.6±1.8	15.4±1.8	13.6±1.8	13.9±1.8	16.0±2.6
Elongation at break (%)	Before	224±22	184±18	160±20	146±17	125±18
	After	140±14	125±11	95±14	89±12	76±15
Tear strength (kN/m)	Before	30.8±7.2	39.1±9.2	37.8±4.1	37.1±3.1	45.8±1.4
	After	25.2±3.1	21.4±4.2	30.2±6.7	25.2±2.8	34.0±7.9
Hardness (Shore A)	Before	83±1	84±1	87±1	89±1	90±1
	After	84±1	86±1	89±1	91±1±	93±1
Compression set (%) at 100°C, 22 hr		22.8±0.0	24.4±0.0	25.1±0.1	25.4±0.0	26.7±0.0
Bound rubber (%)		18.9±6.9	20.2±6.2	21.9±4.2	23.4±1.8	25.1±5.9
Swelling (%) at 125 °C in hydraulics oil, 72 hr		No Change				

ผลการตรวจสอบสมบัติไทรโบโลยีของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลงตามน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานทดสอบและหัวกด (Ball) เกิดการสัมผัสกับผิวหน้าชิ้นงานมากขึ้นซึ่งอาจส่งผลทำให้หัวกดสัมผัสกับคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นที่มีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นชนิดแข็ง (Self lubricante) ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง ส่วนอัตราการสึกหรอจำเพาะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นและน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้นรูปที่ 1a และ 1b แต่ชิ้นทดสอบมีรอยแตกมากขึ้น เนื่องจากชิ้นทดสอบมีค่ามอดูลัสและความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นที่สูงขึ้น ดังตารางที่ 1 (Felhos et al., 2007) และเมื่อได้รับน้ำหนักกดอย่างต่อเนื่องอาจทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดความล้า (Fatigue) (ปนัดดา และคณะ, 2545) ในเนื้อวัสดุซึ่งเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์เกี่ยวข้องกับการเกิดรอยแตกและการเติบโตของรอยแตก บริเวณผิวหน้าชิ้นงานดังรูปที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่ายของชิ้นงานทดสอบหลังจากทดสอบสมบัติไทรโบโลยีพบว่า ชิ้นงานทดสอบมีรอยแตกเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายที่เพิ่มขึ้นและน้ำหนักกดที่สูงสุด (30 N)



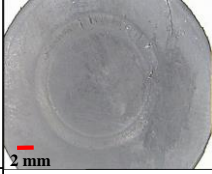
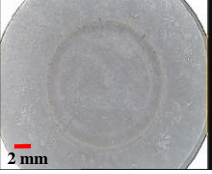

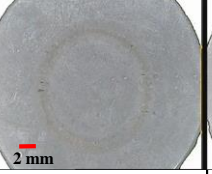

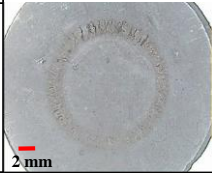

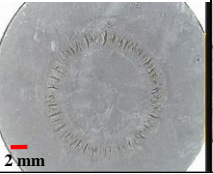

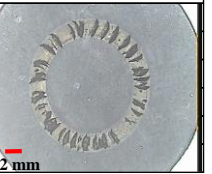
(a)



(b)

รูปที่ 1 วัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นหลังการทดสอบสมบัติไทรโบโลยี ความเร็ว 0.5 เมตร/วินาที น้ำหนักกด 5, 10, 20 และ 30 นิวตัน (a) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (b) อัตราการสึกหรอจำเพาะ



Load (N)	Content of MWCNT (phr)				
	NBR+MWCNT				
	0	3	6	9	12
5					
30					

รูปที่ 2 ภาพถ่ายของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นหลังทดสอบสมบัติ  
ไทรโบโลยี ความเร็ว 0.5 เมตร/วินาที น้ำหนักกดที่ 5 และ 30 นิวตัน

#### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

1. การเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 0-12 phr ไม่ส่งผลต่อเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป เวลาที่ยางคงรูป และค่าผลต่างแรงบิด
2. การเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่ปริมาณ 0-12 phr ส่งผลทำให้มอดูลัสแรงดึง ความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานการฉีกขาด แต่ส่งผลทำให้ความสามารถในการคืนกลับตัวหลังได้รับแรงกดอัดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง
3. การบ่มเร่งด้วยน้ำมันไฮดรอลิก ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ส่งผลทำให้มอดูลัสแรงดึงและความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงและการบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ แต่ค่าความต้านทานการฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง
4. การเติมอนุภาคคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น ในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าอัตราการสึกหรอจำเพาะลดลงตามน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้น แต่พื้นผิวชั้นทดสอบมีรอยแตกมากขึ้น เมื่อมีการเติมคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้นและน้ำหนักกดที่เพิ่มขึ้น

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (National Research University; NRU)

### เอกสารอ้างอิง

- ปนัดดา นรินาทล้ำพงศ์, John T.H. Pearce, ผกามาศ แซ่ว่อง, วารุณี เปรมานนท์, สุรพล ราษฎร์นุ้ย, สิทธิชัย วิโรจน์อุทัย. การสึกหรอ: ความรู้เบื้องต้นและการป้องกัน. 1. กรุงเทพฯ: เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC); 2545.
- ปิยะภรณ์ นิลทุ้ย, ศิริชัย ก้านกิ่ง, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา. การศึกษาเชิงกลพลวัตและพฤติกรรมการคืนกลับตัวทางฮิสตริกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงร่วมกับสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาสำหรับการใช้งานในระบบไฮดรอลิก. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร 2555; 35(2): 143-156.
- นิธิพงษ์ วิลพนันธุ์. การศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพื้นดินและพื้นรองเท้าภายใต้สภาวะพื้นผิวที่แตกต่างกัน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ]. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2549.
- Boonbumrung A, Pongdhorn S.O, Sirisinha C. Reinforcement of multiwalled carbon nanotube in nitrile rubber: in comparison with carbon black, conductive carbon black, and precipitated silica. *Journal of Nanomaterials* 2016; 1-9.
- Felhos D, Kocsis J.K, Xu D. Tribological testing of peroxide cured HNBR with different MWCNT and silica contents under dry sliding and rolling conditions against steel. *Journal of Applied Polymer Science* 2007; 108(5): 2840-2851.
- Kantalaa C, Wimolmala E, Sirisinhab C, Sombatsompop N. Reinforcement of compatibilized NR/NBR blends by fly ash particles and precipitated silica. *Polymer Advanced Technologies* 2009; 20(5): 448-458.
- Piyush C.V, Rodica C, Andrea B, Pranesh A, Giovanni S, Stefano G. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. *Wear*. 2006; 346-347: 56-65.
- Thongsang S, Sombatsompop N. Reinforcement of natural rubber with fly ash from different local sources. *Suranaree Journal of Science Technology* 2006; 14(1): 77-89.
- Zhou X, Zhu Y, Gong O, Liang L. Preparation and properties of the powder SBR composites filled with CNTs by spray drying process. *Materials Letters* 2006; 60(29-30): 3769-3775.