

**การศึกษาเชิงกลพลวัตและพฤติกรรมการคืนกลับตัวทางฮิสเทติก  
ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงร่วมกับสารตัวเติม  
กลุ่มซิลิกาสำหรับการใช้งานในระบบไฮดรอลิก**

**ปิยะภรณ์ นิลทุ้ย<sup>1</sup> ศิริชัย ก้านกิ่ง<sup>1</sup> ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>2</sup>  
และ เอกชัย วิมลมาลา<sup>3</sup>**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต พฤติกรรมการคืนกลับตัวทางฮิสเทติกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารเสริมแรงกลุ่มซิลิกาสำหรับงานระบบไฮดรอลิก โดยการเติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา 2 ชนิด คือ พรีซิพิเตตซิลิกาและผงซิลิติน ที่ผ่านการปรับปรุงผิวทางเคมี ที่ปริมาณ 0 10 20 30 40 และ 50 ส่วนในร้อยส่วนของยางเอ็นบีอาร์ ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลักที่ปริมาณ 50 ส่วนในยางร้อยส่วน และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 ส่วนในยางร้อยส่วน ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม โดยศึกษาขนาด รูปร่าง ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี วิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติการไหลและการบ่มสุก สมบัติเชิงกลทางด้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด และสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต ผลการวิจัยพบว่า การเติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาไม่ส่งผลต่อเวลาการไหลตัวและเวลาการบ่มสุก ยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมผงซิลิติน ให้สมบัติทางด้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัดที่ดีกว่าสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา นอกจากนี้ ยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกามีค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) สูงกว่า และมีค่าแทนเดลต้า (Tan delta) ต่ำกว่าการเติมผงซิลิติน สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมผงซิลิตินสูงกว่าสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา และหลังจากทดสอบสภาวะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีลในระบบไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาและผงซิลิติน พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วแบบ U-CUP ที่ได้จากงานวิจัยที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกาและผงซิลิตินในยางเอ็นบีอาร์สามารถทดแทนผลิตภัณฑ์ซีล U-CUP ที่มีจำหน่ายทางการค้า

**คำสำคัญ :** การคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด / ซิลิกา / ยางเอ็นบีอาร์ / สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต

\* Corresponding author: E-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th

1 นักวิจัย กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

2 ศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

3 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

## Dynamic Mechanical Analysis and Elastic Recovery Behavior of Carbon Black/NBR Co-reinforced with Precipitated Silica and Sillitin for Hydraulic Applications

Piyaporn Niltui<sup>1</sup>, Sirichai Kanking<sup>1</sup>, Narongrit Sombatsompop<sup>2</sup>,  
and Ekachai Wimolmala<sup>3\*</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

### Abstract

This work studied dynamic mechanical thermal properties and elastic recovery behavior of silica based fillers in acrylonitrile-butadiene rubber (NBR) for hydraulic applications. The effect of silica based fillers, including sillitin and precipitated silica with silane surface treatment, on the properties was studied. The loading of the fillers used ranged from 0 to 50 parts per hundred rubber (phr) added into the NBR containing 50 phr carbon black as main reinforcement filler, and 10 phr aromatic oil filled NBR was investigated. The shape and particle size were characterized by Fourier Transform Infrared spectroscopy (FT-IR), X-Ray Fluorescence spectroscopy (XRF) and Scanning Electron Microscope (SEM). The scorch time, cure time, and mechanical properties; compression set and dynamic mechanical thermal properties were of our main interests. The experimental results suggested that the addition of silica based fillers in the NBR vulcanizates had no effect on scorch time and cure time. The sillitin gave better compression set properties of the carbon black/NBR vulcanizates than the precipitated silica. In addition, the vulcanizates with precipitated silica filler had higher storage modulus and lower tan delta values than those with the treated sillitin. The glass-transition temperature of the NBR with precipitated silica was higher than that with sillitin. Finally, under the actual dynamic hydraulic test for seals, the selected NBR vulcanizates filled with precipitated silica and sillitin were produced in form of U-CUP seals and the results suggested that the properties of the seals produced in this work were comparable with the commercial seal product.

**Keywords :** Compression Set / Silica / NBR Rubber / Dynamic Mechanical Thermal Analysis

---

\* Corresponding author: E-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th

<sup>1</sup> Researcher, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

<sup>2</sup> Professor, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials.

## 1. บทนำ

โดยทั่วไปยางสังเคราะห์สามารถปรับปรุงหรือดัดแปรสมบัติด้านต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้โดยใช้สารเติมแต่งต่างๆ อาทิเช่น สารเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกล สารตัวเติมเพิ่มเนื้อเพื่อทำหน้าที่ลดต้นทุน สารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ยางมีการบวมสุกได้เร็วขึ้น สารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อทำยางให้ทนต่อโอโซน รังสียูวี และสภาวะแวดล้อมได้ดี ทั้งนี้ สารเสริมแรงที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง คือ พงเขม่าดำ และผงซิลิกา ซึ่งสารดังกล่าวสามารถเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงดึง การฉีกขาด และทนต่อการขัดสีได้ดี [1-2] สำหรับการใส่สารตัวเติมกลุ่มเสริมแรง ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง พบว่า มีความต้องการการใช้สารดังกล่าวในปริมาณมากอย่างต่อเนื่อง อาทิเช่น อุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ยางรับแรงกระแทก ผลิตภัณฑ์ยางซีล กันรั่วในชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ทั้งนี้ในส่วนผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วนั้น ซึ่งพบได้ในชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชุดเกียร์ส่งกำลังในเพลาชับเคลื่อนหรือระบบไฮดรอลิก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุที่ใช้ในการผลิต คือ ยางสังเคราะห์ชนิดยางอะครีโลไนไตรด์บิวตะไดอินหรือยางเอ็นบีอาร์ (Acrylonitrile Butadiene Rubber, NBR) หรือเรียกอีกชื่อว่า ยางไนไตรล์ (Nitrile rubber) เนื่องจากยางดังกล่าวมีสมบัติที่สำคัญ คือ มีความสามารถต้านทานต่อการขัดสีได้ดี สามารถใช้งานได้ทั้งอุณหภูมิสูง สามารถทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและโอโซน และมีราคาถูก [2] อย่างไรก็ตาม สำหรับสมบัติที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานผลิตภัณฑ์ยางซีลที่ต้องคำนึงถึง คือ ความแข็งแรงเชิงกลขณะได้รับความร้อนที่วิเคราะห์จากสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Thermal Analysis, DMTA) รวมถึงความสามารถในการคืนกลับตัว (Elastic recovery) หลังจากได้รับแรงที่กระทำภายใต้อุณหภูมิสูง

งานวิจัยที่ผ่านมา [3] Sombatsompop และคณะพบว่า การใช้สารตัวเติมเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก โดยเติมในยางธรรมชาติ ยางเอ็นบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ พบว่าการเติมผงเถ้าลอยที่ปริมาณ 20 ส่วนในยางร้อยละ (Parts per hundred rubber; phr) ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางเพิ่มขึ้น โดยมีสมบัติเด่นด้านการกลับ

คืนตัวเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกา [3] นอกจากนี้ ยังได้มีงานวิจัยของ Bandyopadhyay และคณะ ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของยางเอ็นบีอาร์และยางเอ็กซ์เอ็นบีอาร์ (XNBR) โดยมีผงเขม่าดำเป็นสารเสริมแรง จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA พบว่าการเติมผงเขม่าดำส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ของยางเอ็นบีอาร์และยางเอ็กซ์เอ็นบีอาร์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าแทนเดลต้า (Tan delta) ลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางดังกล่าวกับสารตัวเติมผงเขม่าดำได้มากขึ้น [4] สำหรับในปัจจุบันได้มีบริษัทเอกชนได้เสนอสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาที่มีชื่อทางการค้าว่า “ซิลิติน” (Sillitin) เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติการกลับคืนตัวของยางให้ดีขึ้น โดยสารดังกล่าวได้จากแร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่กาไลไนท์ (Kaolinite) ที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ และมีกลุ่มของสารประกอบโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง [5]

สำหรับในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาผลของการเติมผงซิลิตินในยางเอ็นบีอาร์ที่มีการเสริมแรงด้วยผงเขม่าดำ โดยเปรียบเทียบกับยางเอ็นบีอาร์ที่ผสมซิลิกาเกรดการค้าชนิดพรีซิพิตเตดซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ โดยศึกษาถึงสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตและสมบัติการคืนกลับตัวของยาง จากนั้นทำการทดสอบการใช้งานจริงในเครื่องทดสอบจำลองสภาวะในการใช้งานจริง โดยการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วแบบ U-CUP ซึ่งมีรูปร่างคล้ายรูปตัวอักษร U โดยทำการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วแบบ U-CUP ที่มีจำหน่ายทางการค้า

## 2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

- ยางเอ็นบีอาร์ (NBR) เกรด KYRAC 3345F (ปริมาณ ACN ร้อยละ 33.5) จากบริษัท เคมีคอล อินโนเวชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
- สารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) ชนิด bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide (Couplink 89C),  $[(C_2H_5O)_3-Si-(CH_2)_3-S_4-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$  จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด

- สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (Activators) ชนิด Zinc oxide (ZnO) เกรด WHITE SEAL จากบริษัท ไทยไลสจากซ์ (ประเทศไทย) จำกัด และ Stearic acid เกรด ST-DDK จากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด

- สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerators) ชนิด Dibenzothiazyl disulfide (PERKACIT- MBTS) และ Tetramethylthiuram disulfide (PERKACIT-TMTD) จากบริษัท ซ็อนแอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด

- สารช่วยในการคงรูปยาง (Curing agent) ชนิดกำมะถัน (Sulphur) โดยใช้ขนาด 325 mesh จากบริษัท ซ็อนแอดวานซ์ โพลิมิกซ์ จำกัด

- สารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ชนิดผงเขม่าดำ (Carbon black) เกรด N 550 จากบริษัท ไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด ผงซิลิโคน (Sillitin) เกรด PF 216 มีขนาดอนุภาค 2-10 ไมครอน และมีค่า Bulk density 2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอลล ที (ประเทศไทย) จำกัด และพรีซิพิเตตซิลิกา (Precipitated silica) เกรด TOKUSIL 233 ขนาดอนุภาค 10-20 นาโนเมตร ค่า pH 6.8 และมีค่า Bulk density 0.232 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากบริษัท ไทกยูมา สยามซิลิกา (ประเทศไทย) จำกัด

- สารเสริมสภาพพลาสติกและช่วยกระบวนการผสม ประเภทน้ำมันอะโรมาติก เกรด E101 จาก บริษัท เอลโซ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)

## 2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม

- การตรวจสอบขนาดอนุภาคของสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer ยี่ห้อ Coulter รุ่น Coulter LS 100 ประเทศสหรัฐอเมริกา การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตัวเติมกลุ่ม

ซิลิกา ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ยี่ห้อ Horiba รุ่น MESA-500W ประเทศญี่ปุ่น

- การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum one ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้สเปกตรัมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Transmittance และช่วงตำแหน่งเลขคลื่นการทดสอบที่  $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

## 2.3 ขั้นตอนการผสมและการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการผสมยางเอ็นบีอาร์โดยปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ดังนี้ ผงซิลิโคนและพรีซิพิเตตซิลิกาที่ปริมาณ 0 10 20 30 40 และ 50 phr โดยใช้ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลักที่ปริมาณ 50 phr และเติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่ปริมาณ 10 phr ด้วยเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two-roll mill) ของบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด ตามส่วนประกอบของสูตรยาง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เวลาในการผสมเท่ากันทุกสูตรที่ 30 นาที อุณหภูมิในการผสมที่ 40-45 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยที่พรีซิพิเตตซิลิกาและผงซิลิโคนที่ใช้ ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบประเภทไฮลีนในปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [6] เตรียมชิ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน (Hot compression moulding) ของบริษัท LAB TECH จำกัด อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 170 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน

**ตารางที่ 1** หน้าที่และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

| Ingredient                                  | Function           | Content (phr)*        |
|---|--------------------|-----------------------|
| 1. Nitrile rubber; NBR (grade KYRNAC 3345F) | Matrix             | 100 part              |
| 2. Zinc oxide (ZnO)                         | Activator          | 5.0                   |
| 3. Stearic acid                             | Activator          | 2.0                   |
| 4. Dibenzothiazyl disulde (MBTS)            | Accelerator        | 0.7                   |
| 5. Tetramethylthiuram disulde (TMTD)        | Accelerator        | 2.5                   |
| 6. Aromatic oil                             | Plasticizer        | 10.0                  |
| 7. Carbon black (grade N550)                | Reinforcing filler | 50.0                  |
| 8. Silica in Sillitin                       | Reinforcing filler | 0, 10, 20, 30, 40, 50 |
| 9. Precipitated silica                      | Reinforcing filler |                       |
| 10. Sulphur 325 mesh                        | Crosslinking agent | 2.0                   |

\* phr: parts per hundred of rubber by weight

**2.4 การทดสอบสมบัติของยาง****สมบัติการไหลและการบ่มสุกของยาง**

การหาเวลาที่ใช้ในการไหลและบ่มสุกของยาง ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ของบริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 อุณหภูมิทดสอบ 170 องศาเซลเซียส หาเวลาในการบ่มสุกที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc<sub>90</sub>) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนระบบแรงดัน

**สมบัติเชิงกายภาพ**

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิติน ในยางเอ็นบีอาร์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 ตักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ผิวชิ้นงานทดสอบเคลือบด้วยทอง

**สมบัติเชิงกลด้านการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดและความร้อนเชิงกลพลวัต**

- การทดสอบการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของชิ้นงานยางที่ผ่านการคั่งรูป โดยชิ้นงานตัวอย่างอยู่ในสภาพที่มีแรงอัดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D395-03

- การทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของชิ้นงานยาง ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer จากบริษัท Netzsch รุ่น 242 ประเทศเยอรมนี เตรียม

ขึ้นงานทดสอบขนาดความกว้าง 5 มิลลิเมตร ความยาว 50 มิลลิเมตร และความหนา 2 มิลลิเมตร ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ ตั้งแต่ -60 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ความถี่ในการทดสอบ 1 ครั้งต่อวินาที แอมพลิจูด 30 ไมโครเมตร

**2.5 การทดสอบสภาวะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีล เพื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ยาง**

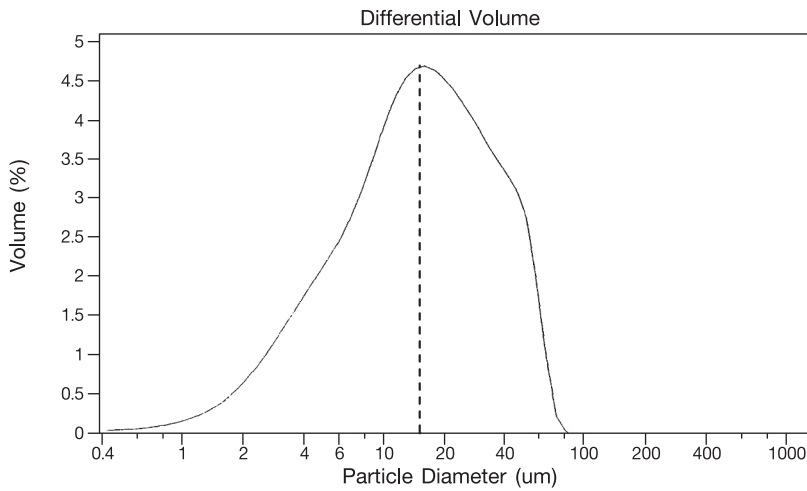
ซีลกันรั่วแบบ U-CUP ที่มีจำหน่ายทางการค้า การทดสอบสภาวะการใช้งานจริงในระบบไฮดรอลิก ด้วยเครื่องทดสอบซีลโดยการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางซีลกันรั่วแบบ U-CUP จากงานวิจัยเปรียบเทียบกับยางซีลกันรั่วเอ็นบีอาร์แบบ U-CUP เกรดการค้ายี่ห้อ NOK Corteco จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีสภาวะในการทดสอบแบบต่อเนื่องในเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิกระบบปิด ดังนี้ ระยะทางทดสอบ 20 กิโลเมตร ความเร็วเคลื่อนที่ของลูกสูบไป-กลับ 0.125 เมตรต่อวินาที และมีการรับแรงจากภายนอก (ลูกตุ้มน้ำหนัก) 65 กิโลกรัม

**3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง****การตรวจสอบลักษณะของสารตัวเติม เวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์และเวลาการบ่มสุก**

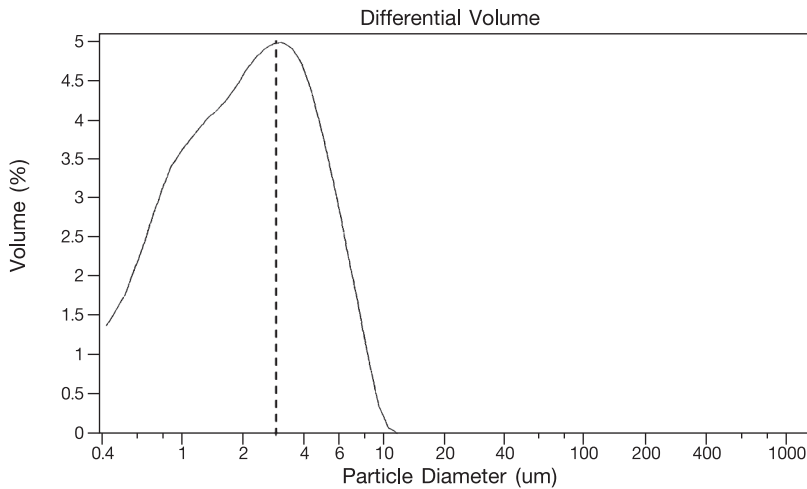
สำหรับผลการศึกษาลักษณะด้านขนาด รูปร่าง และการกระจายตัวของสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิตินในยางเอ็นบีอาร์แสดงในรูปที่ 1 และ 2 พบว่า

อนุภาคของพรีซีพีเตตซิลิกาและผงซิลิตินมีขนาดโดยเฉลี่ย 16 และ 3 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในส่วนลักษณะด้านรูปร่างของพรีซีพีเตตซิลิกาและผงซิลิตินมีลักษณะรูปร่างไม่แน่นอน โดยสังเกตเห็นว่าอนุภาคของสารตัวเติมทั้งสองชนิดมีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงในยางเอ็นบีอาร์ อย่างไรก็ตาม สำหรับในกรณีพรีซีพีเตตซิลิกานั้น พบว่า อนุภาคพรีซีพีเตตซิลิกาบางส่วนมีการเกาะกลุ่มกันเป็นอนุภาค

ขนาดใหญ่ (Agglomerate) ทั้งนี้อาจเกิดจากผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกา (Filler-filler interaction) ด้วยกันเอง เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) เป็นจำนวนมาก เมื่อซิลิกามาอยู่รวมกันสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนผ่านหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้อนุภาคของพรีซีพีเตตซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน [7]



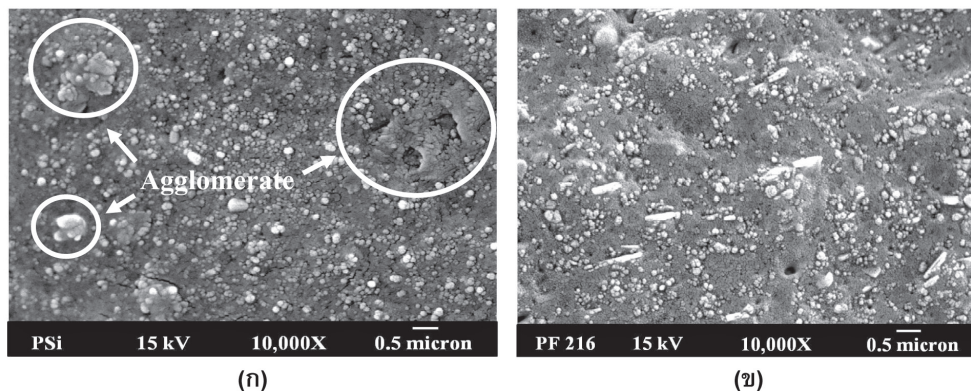
(ก)



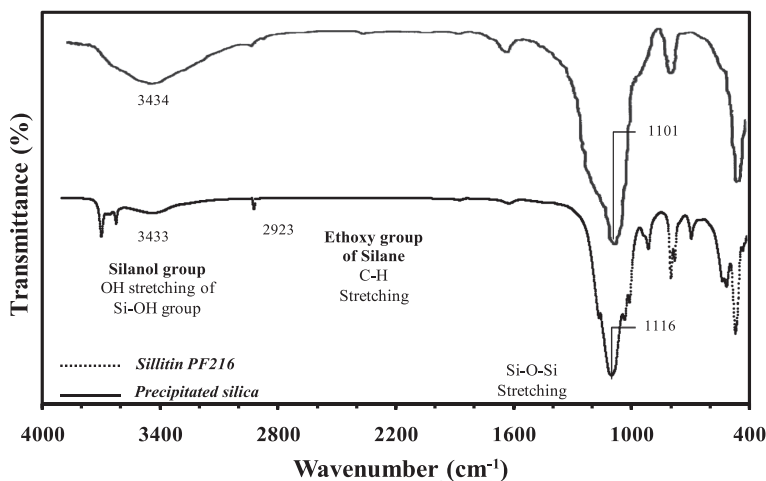
(ข)

**รูปที่ 1** การตรวจสอบขนาดอนุภาคของสารตัวเติม (ก) พรีซีพีเตตซิลิกา และ (ข) ผงซิลิติน ด้วยเครื่อง LS Particle size analyzer





รูปที่ 2 การตรวจสอบรูปร่างการกระจายตัวของสารตัวเดิม (ก) พรีซิพิตเตดซิลิกา และ (ข) ฟงซิลิติน ในยางเอ็นบีอาร์ ด้วยเทคนิค SEM



รูปที่ 3 สเปกตรัมที่แสดงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพรีซิพิตเตดซิลิกาและฟงซิลิตินโดยเทคนิค FT-IR

รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพรีซิพิตเตดซิลิกาและฟงซิลิติน โดยใช้เทคนิค FT-IR พบว่า ทั้งพรีซิพิตเตดซิลิกาและฟงซิลิตินมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่เหมือนกัน คือ หมู่ฟังก์ชันชนิดไฮดรอกซิล (ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3400-3500  $\text{cm}^{-1}$ ) หมู่ฟังก์ชันชนิด Si-O-Si ที่แสดงถึงการยึดของพันธะ Si-O ในหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1000-1100  $\text{cm}^{-1}$ ) รวมถึงสเปกตรัมการยึดของพันธะ C-H บนหมู่เอทอกซีของสารคู่ควบไซเลนบนผิวของอนุภาคฟงซิลิติน (ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2800-3000  $\text{cm}^{-1}$ ) ทั้งนี้ผลการตรวจสอบดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลอง ที่พบในงานวิจัยของ Marrone

และคณะ [8] สำหรับผลการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของสารตัวเดิมกลุ่มซิลิกา ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer; XRF แสดงดังตารางที่ 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่า พรีซิพิตเตดซิลิกาและฟงซิลิตินมีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยพรีซิพิตเตดซิลิกามีซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณสูงถึง 98.77 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ฟงซิลิตินมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่ปริมาณ 72.60 เปอร์เซ็นต์ และมีอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบรองที่ปริมาณ 12.90 เปอร์เซ็นต์

**ตารางที่ 2** หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิติน ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

| Chemical composition investigation                | Chemical composition (%) |          |
|---|--------------------------|----------|
|   | Precipitated Silica      | Sillitin |
| Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )               | 98.77                    | 72.60    |
| Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | -                        | 12.90    |
| Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )      | -                        | 0.81     |
| Calcium oxide (CaO)                               | -                        | 0.16     |
| Magnesium oxide (MgO)                             | -                        | 0.11     |
| Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)                | -                        | 0.46     |
| Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )                 | -                        | 0.99     |
| Other metal oxide                                 | 1.23                     | 11.97    |

สำหรับผลของพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิตินที่มีต่อเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์ และเวลาบ่มสุกของยางเอ็นปีอาร์แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า การเพิ่มปริมาณพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิตินในยางเอ็นปีอาร์ไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวในแม่พิมพ์และเวลาในการบ่มสุก ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างผลของชนิดสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิติน พบว่า ยางเอ็นปีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมดังกล่าว มีค่าเวลาในการไหลตัวในแม่พิมพ์และเวลาบ่มสุกตัวใกล้เคียงกัน โดยเวลาในการไหลตัวใช้เวลาประมาณ 1 นาที ในขณะที่เวลาการบ่มสุกอยู่ระหว่าง 2-3 นาที ซึ่ง

(2008) [3] พบว่า ยางเอ็นปีอาร์ที่มีความเป็นขั้วที่มีการเติมสารตัวเติมผงเถ้าลอยส่งผลทำให้เวลาในการบ่มสุกเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เถ้าลอยมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์สูงถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ที่สามารถเกิดการหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสายโซ่กับส่วนที่มีขั้ว (-CN groups) ของยางเอ็นปีอาร์ [1, 6, 9] แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้การเติมสารตัวเติมผงซิลิตินในยางเอ็นปีอาร์ไม่ส่งผลต่อเวลาการบ่มสุกของยางเอ็นปีอาร์ ทั้งนี้เนื่องจาก ผงซิลิตินมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ในปริมาณเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงตารางที่ 2 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยจึงไม่ส่งผลต่อเวลาการบ่มสุกของยางเอ็นปีอาร์

**ตารางที่ 3** เวลาการไหลตัว เวลาการบ่มสุก และค่าผลต่างแรงบิดของยางเอ็นปีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิติน

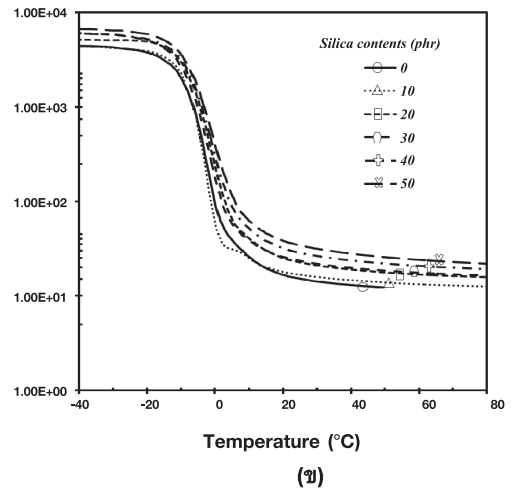
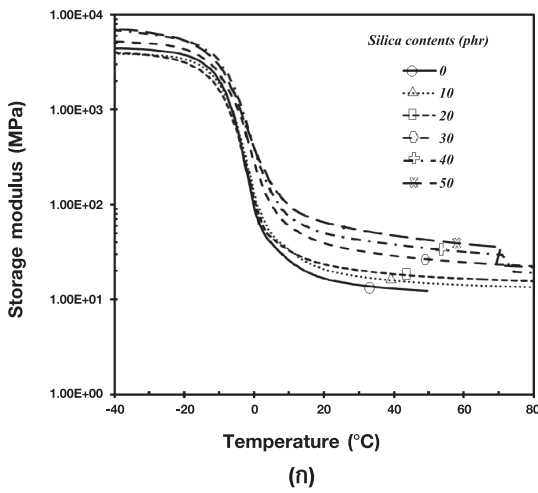
| Type of filler      | Silica content (phr) | Scorch time (Min:Sec) | Cure time (Min:Sec) | Delta torque (dN-m) |
|---------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Precipitated silica | 0                    | 1:01                  | 2:42                | 111.61±0.3          |
|                     | 10                   | 0:59                  | 2:30                | 121.91±1.7          |
|                     | 20                   | 0:53                  | 2:21                | 140.01±2.3          |
|                     | 30                   | 0:53                  | 2:30                | 154.75±1.1          |
|                     | 40                   | 0:54                  | 2:30                | 164.64±0.1          |
|                     | 50                   | 0:55                  | 2:32                | 174.36±1.1          |
| Sillitin            | 0                    | 1:01                  | 2:42                | 111.61±0.3          |
|                     | 10                   | 0:57                  | 2:25                | 114.91±0.1          |
|                     | 20                   | 0:57                  | 2:34                | 122.93±0.5          |
|                     | 30                   | 0:54                  | 2:17                | 128.26±0.3          |
|                     | 40                   | 0:54                  | 2:12                | 133.53±3.4          |
|                     | 50                   | 0:54                  | 2:12                | 138.59±1.5          |



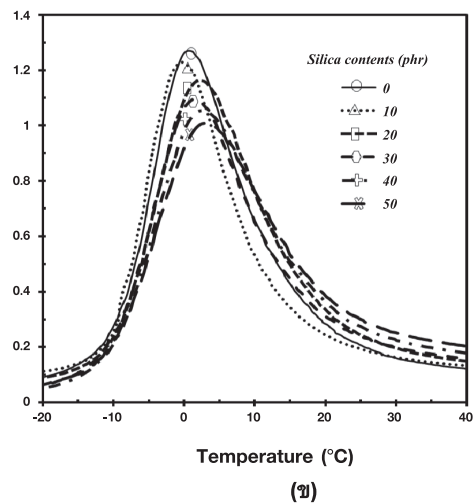
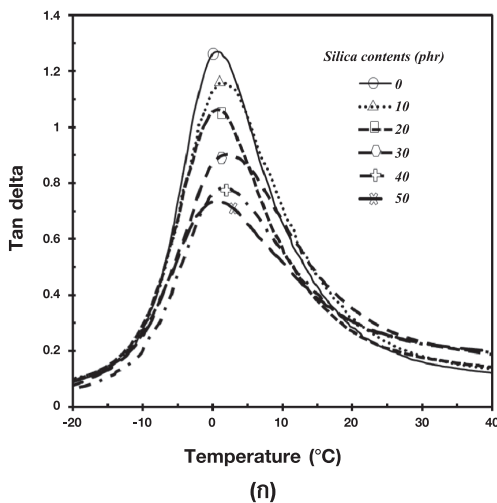
### การตรวจสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต และ สมบัติเชิงกลด้านการยวบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัด

สมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัตของยางเอ็นปียอร์ที่ผสมสารตัวเติมพรีซิพิเตตซิลิกา และผงซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 4-5 พบว่า การเพิ่มปริมาณพรีซิพิเตตซิลิกาและผงซิลิโคนส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) ของยางเอ็นปียอร์เพิ่มขึ้น และค่าแทนเดลต้า (Tan delta) ลดลง ซึ่งแสดงถึงความเป็นอิลาสติกของ

ยางเอ็นปียอร์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่าง ยางเอ็นปียอร์กับสารคู่ควบไซเลนที่หมู่เอททอกซี (Ethoxy group,  $-OC_2H_5$ ) ที่อยู่บนผิวของสารตัวเติม พรีซิพิเตตซิลิกาและผงซิลิโคนที่หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Si-OH group) ในปริมาณที่มากของพันธะการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลยางกับสารตัวเติม ส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเลื่อนไถลและสามารถเก็บพลังงานเพื่อการคืนกลับตัวได้ดี [10, 11, 12]



รูปที่ 4 มอดูลัสการสะสม (Storage modulus) ของยางเอ็นปียอร์ที่มีสารตัวเติม (ก) พรีซิพิเตตซิลิกา และ (ข) ผงซิลิโคน



รูปที่ 5 แทนเดลต้า (Tan delta) ของยางเอ็นปียอร์ในสารตัวเติม (ก) พรีซิพิเตตซิลิกา และ (ข) ผงซิลิโคน

เมื่อเปรียบเทียบมอดุลัสสะสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิโคน ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า มอดุลัสสะสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสของสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกามากกว่าผงซิลิโคน เนื่องจาก สารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกามีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่ในปริมาณมาก และมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงส่งผลทำให้มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Si-OH group) บนพื้นผิวของอนุภาคมาก [13] และสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารคู่ควบไซเลนที่หมู่เอทอกซี (Ethoxy group) ดีกว่าสารตัวเติมผงซิลิโคน สำหรับการเปรียบเทียบค่า  $T_g$  ในกรณีการเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิโคนในยางเอ็นบีอาร์ พบว่ากรณีการเติมผงซิลิโคนมีค่า  $T_g$  มากกว่าการเติมพรีซิพิตเตด

ซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจาก ในการเติมปริมาณของซิลิกาของสารตัวเติมที่เท่ากัน ต้องเติมสารตัวเติมซิลิโคนที่ปริมาณมากกว่าพรีซิพิตเตดซิลิกา เนื่องจากผงซิลิโคนมีปริมาณซิลิกาเพียง 72.60 เปอร์เซ็นต์ จึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลยางถูกจำกัดอิสระ ต้องใช้พลังงานความร้อนที่มากกว่าในการทำให้โมเลกุลยางสั้นไหว [11] ดังนั้น ค่า  $T_g$  ของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมผงซิลิโคนจึงมีค่าสูงกว่าการเติมพรีซิพิตเตดซิลิกา

จากสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 4-5 และตารางที่ 4 สามารถสังเกตเห็นได้ว่ายางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซิพิตเตดซิลิกา มีความเป็นอิลาสติกมากกว่าการเติมสารตัวเติมผงซิลิโคน ซึ่งสมบัติดังกล่าวเป็นการเสียรูปเพียงเล็กน้อย (Small deformation)

**ตารางที่ 4** มอดุลัสสะสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิโคนในยางเอ็นบีอาร์

| Type of filler      | Silica content (phr) | Storage modulus; $E'$<br>temperature 30°C<br>(MPa) | Glass transition<br>temperature; $T_g$<br>(°C) |
|---------------------|----------------------|--|--|
| Precipitated silica | 0                    | 14.22  | 0.1  |
|                     | 10                   | 17.50  | 1.6  |
|                     | 20                   | 20.27  | 0.7  |
|                     | 30                   | 32.60  | 2.2  |
|                     | 40                   | 42.65  | 1.6  |
|                     | 50                   | 54.18  | 1.4  |
| Sillitin            | 0                    | 14.22  | 0.1  |
|                     | 10                   | 15.86  | 0.3  |
|                     | 20                   | 21.09  | 2.3  |
|                     | 30                   | 21.83  | 1.7  |
|                     | 40                   | 26.40  | 2.7  |
|                     | 50                   | 31.58  | 3.2  |

สำหรับสมบัติเชิงกลด้านการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาและผงซิลิโคน บ่งบอกถึงพฤติกรรมการคืนกลับตัวของยางเอ็นบีอาร์เมื่อได้รับแรงกดอัด ดังแสดงในตารางที่ 5 ผลการวิจัยพบว่า การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกด

อัดของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาอยู่ในช่วง 20 - 27 เปอร์เซ็นต์ โดยเปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัด (Compression set) สารตัวเติมผงซิลิโคนมีค่าน้อยกว่าพรีซิพิตเตดซิลิกา ซึ่งแสดงว่ายางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงซิลิโคนมีพฤติกรรมการคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงกด

อัดค่อนข้างดีกว่าการเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจากการเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกาในยางเอ็นปีอาร์ทำให้มีปริมาณพันธะการเชื่อมขวาง (Crosslink) ระหว่างยางกับสารตัวเติมมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ผลต่างแรงบิด (Delta torque) ของยางเอ็นปีอาร์ที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกามากกว่าการเติมผงซิลิโคน โดยค่าผลต่างแรงบิดแสดงถึงปริมาณพันธะการเชื่อมขวางของยางเอ็นปีอาร์กับสารตัวเติม จากการเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกาทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมขวางที่มากกว่า ส่งผลทำให้พันธะเชื่อมขวาง

เกิดความเครียด (Stress) ด้านต่อการถูกแรงกดอัดมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะการเชื่อมขวาง ส่งผลให้ปริมาณพันธะการเชื่อมขวางของยางเอ็นปีอาร์ที่เติมสารตัวเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกาลดลง เมื่อปล่อยแรงกดอัดยางเอ็นปีอาร์สามารถคืนกลับตัวได้น้อย ซึ่งการแตกหักของพันธะการเชื่อมขวางนี้ทำให้เปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดเพิ่มขึ้น แสดงถึงมีการกลับคืนตัวของยางได้น้อยลง ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Park และคณะ [14]

**ตารางที่ 5** เปอร์เซนต์การยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงกดอัดของพรีซิพิตเตชันซิลิกาและผงซิลิโคนที่เติมในยางเอ็นปีอาร์

| Silica content (phr) | Compression set (%) |          |
|----------------------|---------------------|----------|
|                      | Precipitated silica | Sillitin |
| 0                    | 17±1                |          |
| 10                   | 26±1                | 25±2     |
| 20                   | 25±2                | 20±3     |
| 30                   | 26±1                | 26±1     |
| 40                   | 27±3                | 24±1     |
| 50                   | 24±3                | 22±1     |

#### การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ยางซิลกันรั่วแบบ U-CUP ในสถานะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิก

จากผลการทดสอบสมบัติการกลับคืนตัวและสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต แสดงดังรูปที่ 4-5 และตารางที่ 4-5 จึงเลือกสูตรยางเอ็นปีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมพรีซิพิตเตชันซิลิกา และยางเอ็นปีอาร์ที่ผสมผงซิลิโคนที่มีปริมาณซิลิกา 50 phr ทำการขึ้นรูปเป็นยางซิลกันรั่วแบบ U-CUP เพื่อทดสอบเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ

(น้ำหนักและขนาดของยางซิล) สมบัติเชิงกล (ความแข็ง) ของยางซิลกันรั่วแบบ U-CUP ที่จำหน่ายทางการค้า โดยทำการตรวจสอบทั้งก่อนและหลังการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิก เป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร แสดงในตารางที่ 6 พบว่า หลังการทดสอบแบบต่อเนื่องในเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิกของชิ้นงานผลิตภัณฑ์ยางซิลทั้ง 3 ชนิด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาด น้ำหนัก ชิ้นงาน และสมบัติเชิงกลด้านความแข็งของยางซิล

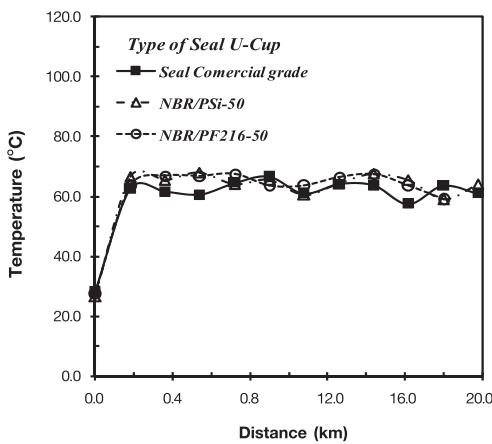
**ตารางที่ 6** ลักษณะทางกายภาพของยางซีลกันรั่วแบบ U-CUP ทางการค้าเปรียบเทียบกับยางซีลกันรั่วแบบ U-CUP จากงานวิจัย ก่อนและหลังการทดสอบในเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิก ที่ระยะทางการทดสอบ 20 กิโลเมตร

| U-CUP seal product         | Weight (g) |       | Hardness (Shore A) |       | Size of U-CUP seal product (mm) |                  |      |                |                |      |
|----------------------------|------------|-------|--------------------|-------|---------------------------------|------------------|------|----------------|----------------|------|
|                            | Before     | After | Before             | After | Before                          |                  |      | After          |                |      |
|                            |            |       |                    |       | D <sub>o</sub> *                | D <sub>i</sub> * | t    | D <sub>o</sub> | D <sub>i</sub> | t    |
| Commercial grade           | 4.45       | 4.46  | 82                 | 82    | 45.69                           | 34.68            | 6.55 | 45.65          | 34.49          | 6.28 |
| Precipitated silica 50 phr | 4.07       | 4.05  | 86                 | 86    | 45.95                           | 34.15            | 5.86 | 45.53          | 34.61          | 5.65 |
| Silittin 50 phr            | 4.32       | 4.34  | 83                 | 83    | 45.59                           | 34.73            | 5.79 | 45.53          | 34.77          | 5.78 |

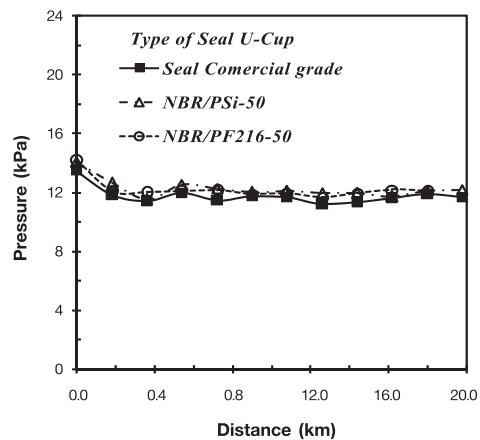
\* D<sub>o</sub> : Outer diameter of U-CUP seal  
 D<sub>i</sub> : Inner diameter of U-CUP seal  
 t : Thickness of U-CUP seal

สำหรับอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลงในการทดสอบยางซีล ด้วยเครื่องทดสอบซีลระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ยางซีลแบบ U-CUP จากงานวิจัยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันในระบบใกล้เคียงกับยางซีลแบบ U-CUP ที่จำหน่ายทางการค้า โดยช่วงระยะทางการทดสอบที่ 2 กิโลเมตรแรก พบว่า อุณหภูมิภายในระบบเพิ่มขึ้นและความดันในระบบลดลง จากนั้นมีค่าคงที่เมื่อระยะทาง

การทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันไฮดรอลิกถูกอัดตัวทำให้เกิดความร้อนสะสมขึ้น ภายในระบบทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลง ส่งผลให้ความดันภายในระบบลดลงและคงที่เมื่อระยะทางการทดสอบเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบดังกล่าวสรุปได้ว่า ยางซีลที่ได้จากงานวิจัยสูตรยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมฟิสิกัลเทคซิลิกาและผงซิลิตินที่ปริมาณ 50 phr สามารถนำไปใช้งานทดแทนยางซีลที่จำหน่ายทางการค้าได้



(ก)



(ข)

**รูปที่ 6** ผลการทดสอบซีลแบบ U-CUP ด้วยเครื่องทดสอบซีลในระบบไฮดรอลิก (ก) อุณหภูมิ และ (ข) ความดัน

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาประกอบด้วย พรีซิ-พีเตดซิลิกาและผงซิลิตินในยางเอ็นบีอาร์สามารถสรุปได้ดังนี้ สารตัวเติมผงซิลิตินมีหมู่ฟังก์ชันไซลาลอนอลและไซลอลอกเซนเหมือนกับพรีซิพีเตดซิลิกา นอกจากนี้พบว่าผงซิลิตินมีปริมาณองค์ประกอบของซิลิกา 72.60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการเติมพรีซิพีเตดซิลิกาและผงซิลิตินไม่ส่งผลต่อเวลาการไหลตัวในแม่พิมพ์และเวลาการบ่มสุก ส่วนสมบัติเชิงกลด้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด พบว่าสารตัวเติมผงซิลิตินดีกว่าพรีซิพีเตดซิลิกา และสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมพรีซิพีเตดซิลิกามีค่ามอดุลัสสะสมที่สูงกว่าผงซิลิติน และมีค่าแทนเดลต่ำต่ำกว่า สำหรับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงซิลิตินสูงกว่าพรีซิพีเตดซิลิกา ส่วนผลการทดสอบสภาวะการใช้งานจริงด้วยเครื่องทดสอบซิลในระบบไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมพรีซิพีเตดซิลิกาและผงซิลิติน พบว่าผลิตภัณฑ์ยางซิลกันรั่วแบบ U-CUP ที่ได้จากงานวิจัยมีสมบัติเทียบเท่า และสามารถใช้งานทดแทนผลิตภัณฑ์ซิลยางที่มีจำหน่ายทางการค้าได้

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ MRG - WI525S074 ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทุนวิจัย บริษัท เพาเวอร์ซิล จำกัด ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสารเคมียาง และบริษัท เป็นไมเออร์ เคมีคอล (ที) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงซิลิติน

#### 6. เอกสารอ้างอิง

1. Pompan N., 1985, Rubber Chemicals, Songkla, Prince of Songkla University, pp. 4-24. (In Thai)
2. Pongdhorn S., 2005, Rubber: Types, Properties and Applications, National Metal and Materials Technology Center, Thailand (MTEC), Second Edition, pp. 25-29. (In Thai)
3. 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*, Vol. 110, No. 5, pp. 2877-2883.

4. Bandyopadhyay, S., De, P.P., Tripathy, D.K. and DE, S.K., 1996, "Influence of Surface Oxidation of Carbon Black on its Interaction with Nitrile Rubbers", *Polymer*, Vol. 37, No. 2, pp. 353-357.

5. Oggermuller, H., "Improving the Processing Properties of SBR-Silica Compound by the Addition of Neuburg Siliceos Earth", [Online], Available: <http://www.hoffmannmineral.com> [2011, November 7].

6. Chuleepan, P., 2009, Mechanical and Oil Resistant Properties of Carbon Black/NBR/HNBR Blend Vulcanizates Filled with Commercial Silica and Fly Ash Particles, *The Degree of Master of Engineering Program (Materials technology)*, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), pp. 19-21, 107-108, 117-118. (In Thai)

7. Weeraya, W., 2010, Mechanical and Wear Properties of Natural Rubber reinforced with Commercial Silica and Fly ash particles, *The Degree of Master of Engineering Program (Materials technology)*, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), pp. 62, 73-76. (In Thai)

8. Marrone, M., Montanari, T., Busca, G., Conzatti, L., Costa, G., Castellano, M., and Turturro, A., 2004, "A Fourier Transform Infrared (FTIR) Study of the Reaction of Triethoxysilane (TES) and Bis [3-triethoxysilylpropyl] tetrasulfane (TESPT) with the Surface of Amorphous Silica", *The Journal of Physical Chemistry. B*, Vol. 108, No. 11, pp. 3563-3572.

9. 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 Technologies*, Vol. 20, No. 5, pp. 448-458.

10. Mostafa, A., Abouel-Kasem, A., Bayoumi, M.R., and El-Sebaie, M.G., 2009. “Effect of Carbon Black Loading on the Swelling and Compression set Behavior of SBR and NBR Rubber Compounds”, *Materials and Design*, Vol. 30, No. 5, pp. 1561-1568.

11. Abdul, K., and Bhowmick, K., 2003. “Effect of Filler on the Mechanical, Dynamic Mechanical, and Aging Properties of Binary and Ternary Blends of Acrylic Rubber, Fluorocarbon Rubber, and Polyacrylate”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 90, No. 1, pp. 278-286.

12. Kongvasana, N., Wimolmala, W., Markpin, T., Sombatsompop, N., and Kositchaiyong, A.,

2010. “Mechanical Properties and Morphology of Natural Rubber/Chloroprene Rubber Blends Filled with Fly-Ash under Thermal and Oil Ageing”, *KMUTT Research & Development Journal*, Vol. 33, No. 1, pp. 25-37. (In Thai)

13. Thongsang, S., Sombatsompop, N., and Ansarifar A., 2008. “Effect of Fly Ash Silica and Precipitated Silica Fillers on the Viscosity, Cure, and Viscoelastic Properties of Natural Rubber”, *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 19, No. 9, pp. 1296-1304.

14. Park, K-W., Kim, G-H., and Chowdhury, S.R., 2008, “Improvement of Compression Set Property of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer / Ethylene-1-Butene Copolymer / Organoclay Nanocomposite Foams”, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 48, No. 6, pp. 1183-1190.