

# การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศ

ศิริินทร์ ทองแสง และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ\*

*Sirinthorn Thongsang and Narongrit Sombatsompop\*. (2007). Reinforcement of Natural Rubber with Fly Ash from Different Local Sources. Suranaree J. Sci. Technol. 14(1):77-89.*

*Received: Sept 22, 2006; Revised: Dec 22, 2006; Accepted: Dec 27, 2006*

## Abstract

This article used of fly ash (FA) particles from various sources in Thailand as reinforcing filler in NR compounds, in comparison with commercial silica. In this work, the FA particles were obtained from Mae Moh, Rayong, and Banphong. The fly ash and commercial silica were treated by 2 %wt Si69 and mixed in natural rubber at loadings from 30 to 75 phr. The properties of all NR vulcanizates were evaluated through cure characteristics, mechanical properties (tensile, tear, hardness, resilience and compression set properties). The results indicated that fly ash particles from all sources could be used as potentially reinforcing filler in NR compounds. It was recommended that FA particles could be used to replace commercial silica at the loading of 30 phr, these giving similar mechanical properties (tensile, tear and hardness properties) to the commercial silica filled NR compounds. The FA/NR vulcanizates had better elastic properties than the commercial silica/NR vulcanizates, the effect being more pronounced for the fly ash from Mae Moh.

**Keywords:** Natural rubber, fly ash, silica, reinforcing filler

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเถ้าลอยในประเทศไทยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในสารประกอบยางธรรมชาติและเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า โดยนำเถ้าลอยจากแม่เมาะ ระยอง และบ้านโป่ง มาทำการปรับปรุงผิวเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าด้วย Si69 ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วเติมลงในยางธรรมชาติปริมาณ 30 - 75 ส่วนในร้อยส่วน จากนั้นนำยางธรรมชาติทุกสูตรไปทดสอบสมบัติการคงรูปยาง สมบัติเชิงกลด้านการทนแรงดึงและแรงฉีกขาด ความแข็ง การกระดอน และการยุบตัวถาวร จากการ

---

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140. โทรศัพท์ 0-2470-8645; E-mail: narongrit.som@kmutt.ac.th

\* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

วารสารเทคโนโลยีสุรนารี 14(1):77-89

ทดลอง พบว่าเถ้าลอยจากทั้งสามแหล่งสามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ และสามารถทดแทนซิลิกาเกรดการค้าได้ในปริมาณซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วน ซึ่งให้สมบัติเชิงกลด้านทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็งเทียบเท่ากัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางดีกว่าซิลิกาเกรดการค้าด้วย โดยเฉพาะการใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะ

## บทนำ

เถ้าลอยเป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหิน โดยมีหลายแหล่งมากในประเทศไทย ซึ่งเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปี และหากไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะกลายเป็นของเสียในที่สุด อีกทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการกำจัดของเสียในส่วนนี้ด้วย แต่ปัจจุบันได้มีการเริ่มนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้นดังในปี พ.ศ. 2545 ปริมาณการใช้เถ้าลอยสูงถึง 1,800,000 ตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 60 ของที่ผลิตได้ (มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545) อย่างไรก็ตาม ปริมาณเถ้าลอยในประเทศไทยยังคงเหลืออยู่ปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินในแหล่งต่าง ๆ ในประเทศด้วย อาทิ เถ้าลอยจากระยอง กาญจนบุรี ซึ่งเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ นั้นมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันด้วย โดยเถ้าลอยเหล่านี้มีส่วนประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกาที่มีอยู่ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ, 2542) เป็นที่ทราบกันดีว่า โดยทั่วไปซิลิกาเป็นสารเสริมแรงที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาผสมในยางธรรมชาติเพื่อใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบซิลิกา รวมถึงการนำไปสู่การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติให้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นทางเลือกหนึ่งของโรงงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ รวมถึงทำให้อุตสาหกรรมยางเจริญเติบโตขึ้นด้วย

งานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ร่วมกับวัสดุพลาสติก เช่น การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยไซเลนเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยถูกทำให้พลังงานพื้นผิวลดลง และไซเลน

สามารถทำให้เกิดพันธะเคมีได้ดีกับเถ้าลอยและพอลิเอสเทอร์ (Guhanathan *et al.*, 2001) และยังพบอีกว่า การใช้ Aminopropyltrimethoxysilane ปรับปรุงผิวเถ้าลอยนั้นช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำ น้ำเค็ม น้ำเกลือ กรด สภาพอากาศ และน้ำแข็งที่ละลายได้ดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบชนิดนี้มีหมู่อะมิโนที่ช่วยให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัวได้ดี (Guhanathan *et al.*, 2002) ส่วนงานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยเติมลงในยางอาทิ Alkadasi *et al.* (2004) พบว่า การเติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วย Si69 ในยางบิวทอะไดอิน ช่วยเพิ่มความต้านแรงดึง โมดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็ง เนื่องจากสารคู่ควบ Si69 สามารถเกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่าง 2 เฟสนี้ และ McGill Garde and Woolard (1999) ยังพบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยด่างแล้วตามด้วยการกัดกรดทำให้ผิวของเถ้าลอยมีพื้นที่ผิวมากขึ้นซึ่งใกล้เคียงกับรูปร่างของซิลิกาเมื่อนำไปเติมในยางพอลิไอโซพรีนนั้นช่วยทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง และช่วยการกระจายของเถ้าลอยให้ดียิ่งขึ้นด้วย จากงานวิจัยที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัย พบว่าการเติมเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวในยางธรรมชาติในช่วงปริมาณซิลิกา 0 - 30 ส่วนในร้อยส่วน ให้สมบัติเชิงกลเทียบเท่ากับการเติมซิลิกาเกรดการค้า แต่ที่การเติมปริมาณซิลิกาสูงกว่านี้ ไม่ทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยเปลี่ยนแปลง นั่นหมายความว่าอนุภาคเถ้าลอยแสดงพฤติกรรมเป็นสารเพิ่มเนื้อ (extender) (Sombatsompop *et al.*, 2004) นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วย Si69 ปริมาณ 2 - 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านต่าง ๆ ของยางให้ดีขึ้น (Thongsang and

Sombatsompop, 2006)

จากงานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในยางชนิดต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการนำเถ้าลอยมาใช้ในอุตสาหกรรมยาง อย่างไรก็ตามเถ้าลอยในประเทศไทยมีหลายแหล่งด้วยกัน ซึ่งล้วนแต่มีส่วนประกอบทางเคมีและรูปร่างอนุภาคเถ้าลอยต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจของการนำเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย ซึ่งมาจากการเผาถ่านหินต่างชนิดกัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเติมเถ้าลอยเหล่านี้เพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ โดยทำการศึกษสมบัติการคงรูปยาง ความหนาแน่นพื้นที่ขั้ว การทนแรงดึง การทนแรงฉีกขาด ความแข็ง การกระดอน และการยุบตัวถาวร รวมถึงศึกษาเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่มีการเติมซิลิกาเกรดการค้าด้วย

## วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

### วัตถุดิบ

1. ยางธรรมชาติ เกรด STR 20 จากบริษัท ช่วยชวน จำกัด
2. สังกะสีออกไซด์ จากบริษัท อูทิสเอนเทอร์ไพร์ส จำกัด
3. กรดสเตียริก เกรด ST-DDK จากบริษัท ซ็อน แอดวานส์ พอลิมิกส์ จำกัด
4. Mercaptobenzothiazole (MBT) เกรด ACCEL M-R จากบริษัท ซ็อน แอดวานส์ พอลิมิกส์ จำกัด

5. Diphenylguanidine (DPG) เกรด PERKACIT จากบริษัท ซ็อน แอดวานส์ พอลิมิกส์ จำกัด

6. ซัลเฟอร์ ขนาด 325 เมช จากบริษัท ซ็อน แอดวานส์ พอลิมิกส์ จำกัด

7. สารประกอบไซเลน (Si69) จากบริษัท เจ-เจ เดกussa (ประเทศไทย) จำกัด

8. ซิลิกาเกรดการค้า Hi-Sil<sup>®</sup> 233-S จากบริษัท โทกยามา สยามซิลิกา จำกัด ซึ่งเป็นซิลิกาแบบตกผลึก (precipitated silica) มีขนาดแอกโกลเมอเรต (agglomerate) 50 - 100 ไมครอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 - 25 นาโนเมตร

9. เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากโรงไฟฟ้าบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี และจากโรงไฟฟ้าโคโค จังหวัดระยอง ซึ่งเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมครอน

โดยปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบยางแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับสารตัวเติมซิลิกาที่ใช้มี 2 ประเภท คือ ซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาในเถ้าลอย เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการนำซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าลอยมาใช้ให้เป็นประโยชน์ การเตรียมสารประกอบยางที่เติมเถ้าลอยจึงต้องคิดจากปริมาณซิลิกาจริงที่มีอยู่ในเถ้าลอยนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น เมื่อเทียบการเติมปริมาณซิลิกาที่เท่ากัน 45 ส่วนในร้อยละ จะใช้ซิลิกาเกรดการค้า 45 ส่วนในร้อยละ แต่ใช้เถ้าลอยจากแม่เมาะ 128 ส่วนในร้อยละ เพราะคิดจากปริมาณซิลิกาจริงที่มีอยู่ในเถ้าลอยประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ปริมาณการเติมซิลิกาทั้งสองประเภทในยางธรรมชาติ จึงแสดงได้ดังตารางที่ 2

**Table 1. Materials formulation of NR compounds**

Materials	Content (phr)
Natural rubber Grade STR 20	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	2
Mercaptobenzothiazole (MBT)	0.5
Diphenyl guanidine (DPG)	0.2
Sulphur	3
Silica (Commercial silica and silica in fly ash)	30, 45, 60 ,75

## วิธีทดลอง

### การตรวจสอบและวิเคราะห์เถ้าลอย

นำเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ไปตรวจสอบคุณลักษณะด้านรูปร่างอนุภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของบริษัท JEOL จำกัด รุ่น JSM-6301F ด้วยกำลังขยาย 1,500 เท่า

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ใช้จากแหล่งต่าง ๆ ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer ของบริษัท HORIBA จำกัด รุ่น MESA-500W

วิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคเถ้าลอย ด้วยตะแกรงคัดขนาด เบอร์ 60, 100, 120, 200 และ 400

### การปรับปรุงผิวเถ้าลอยและซิลิกา

นำเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ และซิลิกาเกรดการค้า (Hi-Sil® 233-S) ไปปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบ Si69 เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้ากับยางธรรมชาติ โดยนำ Si69 2 กรัม ผสมกับเอทานอล 100 มิลลิลิตร กวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเถ้าลอย 100 กรัม เทลงในของผสมที่เตรียมไว้ที่ตะล่อน้อย แล้วใช้แท่งแก้วกวนอีกประมาณ 15 นาที เพื่อให้แน่ใจว่า Si69 กระจายอยู่ทั่วบนผิวเถ้าลอย จากนั้นอบไล่เอทานอลออกให้หมดด้วยการใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

### การเตรียมสารประกอบยาง

การเตรียมสารประกอบยางใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (two roll mill) จากบริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี

จำกัด เริ่มจากการบดยางก่อนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นผสมสารเคมีลงไปยกเว้นซัลเฟอร์ แล้วเติมสารตัวเติม (ซิลิกาเกรดการค้าและเถ้าลอย) ที่ตะล่อน้อย ผสมต่อไปเป็นเวลา 20 นาที และอีก 5 นาทีสุดท้ายผสมซัลเฟอร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน แล้วจึงนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (hot press) จากบริษัท แล็บเทค จำกัด และวัดคาโมสสารประกอบยางที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาที่ได้จากการทดสอบหาเวลาคงรูปยางที่ 90 ( $t_{90}$ ) ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) จากบริษัท โทเทค เทคดิง แมชชีน อินดัสตรีล จำกัด รุ่น GT70-70-S2 ประเทศไต้หวัน

### การทดสอบสมบัติเชิงกล

- ทดสอบความต้านแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D412-98 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Autograph AG-I บริษัท Shimadzu จำกัด ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

- ทดสอบความต้านแรงฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624-00 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Autograph AG-I บริษัท Shimadzu จำกัด ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

- ความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240-97 ด้วยเครื่อง Durometer Hardness รุ่น 475 บริษัท PTC instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา

- เปอร์เซ็นต์ยึดตัวถาวร ทดสอบด้วยการนำขึ้นทดสอบความต้านแรงดึงไปยึดด้วยระยะยึดคงที่ 150 เปอร์เซ็นต์ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ยางคืนตัวอิสระจนระยะยึดในช่วง gauge length ไม่เปลี่ยนแปลง แล้วบันทึกค่าเปอร์เซ็นต์

**Table 2. Actual loading of fly ash particles in NR compounds**

Types of silica	Filler loading (phr)			
Commercial silica	30	45	60	75
Silica in fly ash from Mae Moh	85	128	170	213
Silica in fly ash from Banphong	85	128	170	213
Silica in fly ash from Rayong	109	163	218	272

การยึดตัวที่เปลี่ยนไป (Sombatsompop *et al.*, 2004)

- เปอร์เซ็นต์การกระดอน ตามมาตรฐาน ASTM D2632-01 ด้วยเครื่อง Wallance Dunlop Tripsometer บริษัท HW-Wallance จำกัด ประเทศสหราชอาณาจักร

- เปอร์เซ็นต์การยุบตัวถาวร ตามมาตรฐาน ASTM D395-01

- ทดสอบหาค่าความหนาแน่นพันธะข้าม โดยการแช่ชิ้นทดสอบในโทลูอินเป็นเวลา 7 วัน แล้วจึงนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นพันธะข้ามดังสมการที่ 1

$$-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2 = 2V_s \eta_{swell} \left( V_r^{1/3} - \frac{2V_r}{f} \right) \quad (1)$$

โดยที่  $V_r$  คือ สัดส่วนปริมาตรของยางที่บวมตัว เนื่องจากสมมุติว่าส่วนที่เป็นสารตัวเติมไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้น ดังนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$V_r = \frac{\left( \frac{w_d}{\rho_d} - \frac{w_f}{\rho_f} \right)}{\left( \frac{w_d}{\rho_d} - \frac{w_f}{\rho_f} \right) + \left( \frac{w_t - w_d}{\rho_s} \right)} \quad (2)$$

ซึ่ง  $\rho_d$  คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\rho_f$  คือ ค่าความหนาแน่นของสารตัวเติม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$\rho_s$  คือ ค่าความหนาแน่นของโทลูอิน มีค่าเท่ากับ 0.862 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$w_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่โทลูอิน (กรัม)

$w_f$  คือ น้ำหนักของสารตัวเติมที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบ (กรัม)

$w_t$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่โทลูอิน (กรัม)

$V_s$  คือ ปริมาตรของโทลูอินต่อ 1 โมล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 106.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

$\chi$  คือ ค่าพารามิเตอร์อันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโทลูอิน ซึ่งเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.3795

$\eta_{swell}$  คือ ความหนาแน่นพันธะข้าม (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

$f$  คือ ฟังก์ชันของพันธะข้ามที่เป็นระบบการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 4

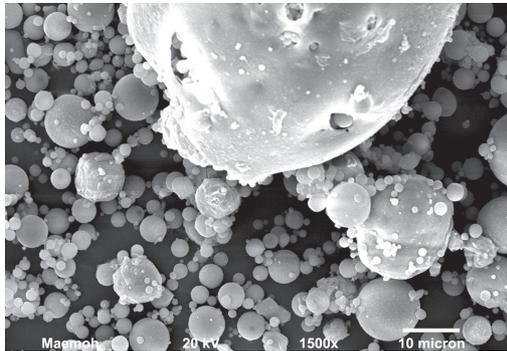
## ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

### ผลการตรวจสอบและวิเคราะห์ถ้ำลอย

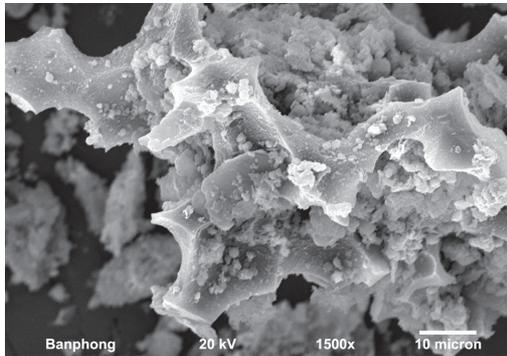
ผลการตรวจสอบคุณลักษณะของถ้ำลอยด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าถ้ำลอยจากแต่ละแหล่งมีรูปร่างค่อนข้างต่างกัน ถ้ำลอยจากแม่เมาะมีรูปร่างทรงกลม ซึ่งถ้ำลอยที่มีขนาดเล็กมีลักษณะตัน แต่ถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่มีความพรุนตัวสูง ส่วนถ้ำลอยจากระยองและบ้านโป่งนั้นมีรูปร่างไม่แน่นอน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของถ้ำลอยแหล่งต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าถ้ำลอยจากแต่ละแหล่งมีปริมาณซิลิกาต่างกัน เนื่องจากถ้ำลอยแต่ละแหล่งนั้นมาจากการเผาหินของถ่านหินและสภาวะการเผาถ่านหินต่างกัน ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้ยังส่งผลต่อความเป็นกรด-ด่างที่ต่างกันด้วย โดยค่า pH ของถ้ำลอยจากแม่เมาะเท่ากับ 9.5 ส่วนถ้ำลอยจากบ้านโป่งและระยองเท่ากับ 12

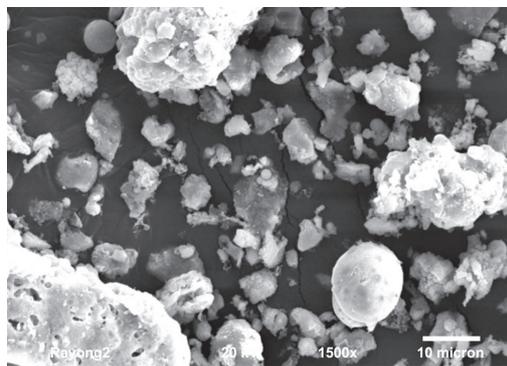
ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ้ำลอยแสดงดังในรูปที่ 2 พบว่า อนุภาคถ้ำลอยจากทั้ง 3 แหล่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง



(a)



(b)



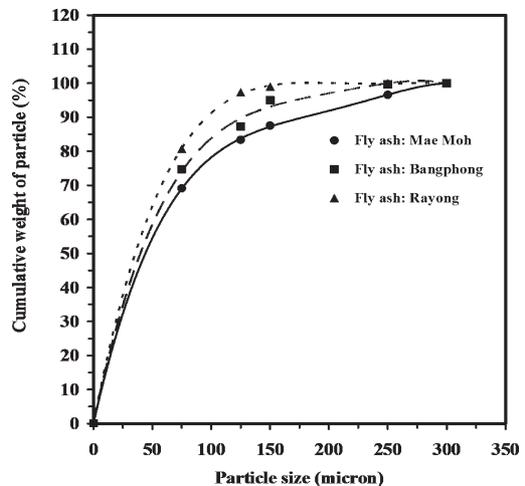
(c)

**Figure 1. Morphologies of fly ash particles**  
 (a) From Mae Moh  
 (b) From Banphong  
 (c) From Rayong

ประมาณ 20 - 50 ไมครอน ผลโดยรวมเถ้าลอยจากกระของมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กสุด รองลงมาคือเถ้าลอยจากบ้านโป่งและแม่เมาะตามลำดับ

### ผลการหาเวลาที่ียงคงรูป

ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปยางด้านผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อเวลาในการคงรูปยางดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้าส่งผลต่อเวลาในการคงรูปยางเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในช่วงที่เติมปริมาณซิลิกา 30 - 45 ส่วนในร้อยส่วน เนื่องจากเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงการก่อตัวของสารตัวเติม โดยทั่วไปการก่อตัวของสารตัวเติมมี 2 แบบ คือ แบบ disperse gel ดังรูปที่ 4(a) ที่อนุภาคสารตัวเติมกระจายตัวอยู่ห่างกัน จนทำให้ปลายสายโซ่โมเลกุลยางยึดเกาะบนผิวของอนุภาคสารตัวเติมเดียวกัน ส่วนรูปที่ 4(b) เป็นการก่อตัวของอนุภาคสารตัวเติมที่อยู่ใกล้กันมากจนปลายสายโซ่โมเลกุลยางสามารถยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารตัวเติมทั้งสองไว้ได้ เรียกว่า coherent gel (Wolff, 1996) ถึงแม้ว่าซิลิกาเกรดการค้านี้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si69 แล้วก็ตาม แต่เป็นการปรับปรุงผิวด้วยปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ประมาณ



**Figure 2. Particle size distribution of fly ash from various sources**

0.6 ส่วนในร้อยส่วน) เพื่อสอดคล้องกับการปรับปรุงผิวเผิน จึงนับว่าใช้ปริมาณ Si69 น้อยมากในการปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้ำในช่วงปริมาณ 30 - 75 ส่วนในร้อยส่วน จากรายงานของ Ansarifar and Nijhawan (2000) พบว่าเวลาในการคงรูปยางของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำ 30 และ 60 ส่วนในร้อยส่วนลดลงเมื่อทำการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วย Si69 ด้วยปริมาณ 4 และ 7 ส่วนในร้อยส่วน ตามลำดับ นั่นหมายความว่า Si69 ช่วยลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับสารตัวเติม (filler-filler interaction) ให้อ่อนลงได้ ในงานวิจัยนี้การเติม Si69 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั้นเป็นปริมาณที่เหมาะสม

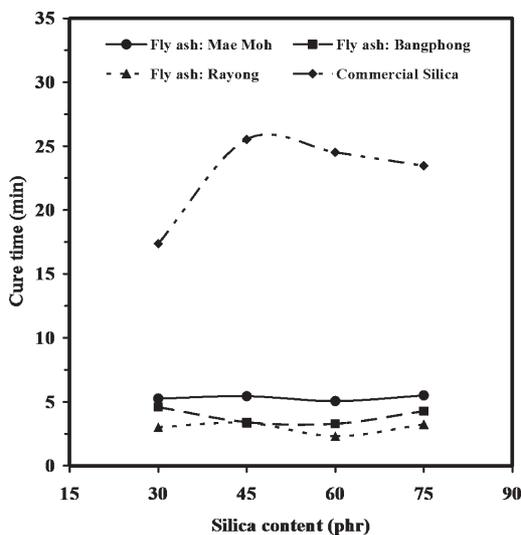


Figure 3. Relationship between cure time and silica content for NR compounds filled with commercial silica and fly ash from various sources

สำหรับการปรับปรุงบนผิวเผิน แต่ไม่ใช่ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับซิลิกาเกรดการค้ำ จึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวซิลิกาเกรดการค้ำเหลืออยู่มาก จึงเป็นผลให้เวลาในการคงรูปยางนี้แสดงพฤติกรรมคล้ายกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำแบบไม่ปรับปรุงผิว ดังนั้นจึงอธิบายได้ว่า ในการเติมซิลิกาปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วน ซึ่งมีสารตัวเติมปริมาณ

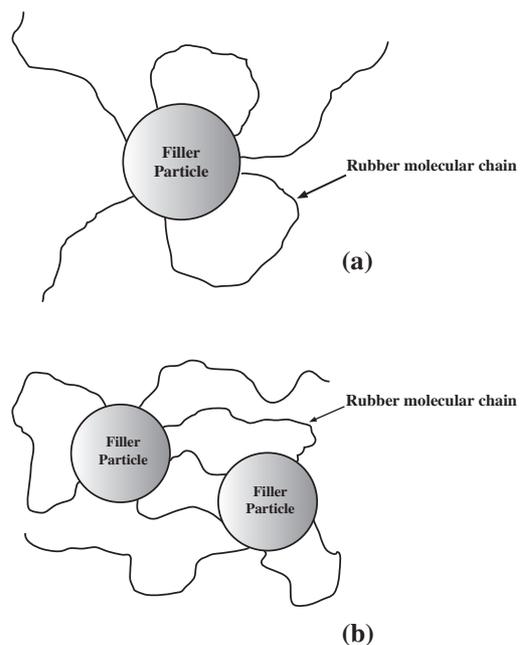


Figure 4. A model of filler formation with rubber molecules  
(a) disperse gel  
(b) coherent gel

Table 3. The chemical compositions of the fly ash particles from various sources

Sources of fly ash	Chemical composition (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Mae Moh	35.05	20.14	9.13	9.56	2.28	1.18	1.91	1.39	0.33	0.36
Banphong	35.19	19.88	5.76	10.06	2.36	0.91	1.76	2.98	0.70	0.87
Rayong	27.47	16.60	7.54	31.36	1.32	1.96	1.26	7.92	0.52	0.29

น้อย ทำให้ก่อตัวแบบ disperse gel ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาคัดในเซชันง่ายและใช้เวลาในการคงรูปน้อย แต่เมื่อเติมซิลิกาปริมาณ 45 - 75 ส่วนในร้อยส่วน ทำให้การก่อตัวของสารตัวเติมเปลี่ยนไปเป็นแบบ coherent gel ที่ทำให้อนุภาคซิลิกาเกิดการค้ำที่มีหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวซิลิกาเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจน จนอนุภาคซิลิกาอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น และปลายสายโซ่โมเลกุลยางสามารถยึดเกาะระหว่างอนุภาคซิลิกา ซึ่งทำให้เกิด bound rubber ขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกิดการค้ำที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบ Si69 2 เพลอร์เซนต์โดยน้ำหนักมีโอกาสเกิดการเชื่อมกันระหว่างแอกกรีเกต (aggregate) จนล้อมยางบางส่วนไว้ภายใน ทำให้แสดงพฤติกรรมคล้ายกับป้องกันยางที่จะไปเกิดปฏิกิริยาคัดในเซชัน นอกจากนี้ผลจากสารตัวเร่งปฏิกิริยาถูกดูดซับจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของซิลิกา จนทำให้ซิงค์ออกไซด์ก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์กับสารตัวเร่งปฏิกิริยาและซัลเฟอร์ (AccS<sub>x</sub> ZnS<sub>x</sub> Acc) ในปฏิกิริยาคัดในเซชันลดลง

จากคำอธิบายข้างต้นนี้คาดการณ์ได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยน่าจะใช้เวลาคงรูปยาวนานขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาเหมือนกับการเติมซิลิกาเกิดการค้ำ แต่กลับพบว่าปริมาณการเติมซิลิกาของเถ้าลอยลงในยางธรรมชาติไม่ทำให้เวลาในการคงรูปยางเปลี่ยนแปลงไป และการเติมซิลิกาของเถ้าลอยลงในยางธรรมชาติยังใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าการเติมซิลิกาเกิดการค้ำประมาณ 4 เท่าด้วย ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาของเถ้าลอยเป็นสารตัวเติมที่มีโลหะออกไซด์มากพอ ดังแสดงในตารางที่ 3 ที่ทำให้อัตราการคงรูปเร็วขึ้น (Costa *et al.*, 2002) อีกทั้งปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของเถ้าลอยไม่หนาแน่นเหมือนกับซิลิกาเกิดการค้ำ จึงทำให้กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาคัดในเซชันไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมด้วยกันเองที่แข็งแรงเหมือนกับซิลิกาเกิดการค้ำ แต่เป็นการก่อตัวของอนุภาคเถ้าลอยที่กระจายแบบ disperse gel ดังแสดงในแบบจำลองรูปที่ 4(a) สิ่งที่น่าสนใจคือ ยาง

ธรรมชาติที่มีซิลิกาของเถ้าลอยนี้ใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าซิลิกาเกิดการค้ำ ซึ่งเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ลดเวลาในการผลิตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ใช้เวลาในการคงรูปยางต่างกัน เนื่องจากเป็นผลของภาวะความเป็นกรด-ด่างของเถ้าลอยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาคัดในเซชันด้วย โดยทั่วไปภาวะที่สามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็วคือ ภาวะที่เป็นเบส (Lewis *et al.*, 2003) ซึ่งเถ้าลอยจากแม่เมาะมีค่า pH เท่ากับ 9.5 เถ้าลอยจากบ้านโป่งและระยองมีค่า pH เท่ากับ 12 ดังนั้นจึงทำให้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากบ้านโป่งและระยองใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าการเติมซิลิกาของเถ้าลอยจากแม่เมาะ

รูปที่ 5 แสดงผลของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ กับซิลิกาเกิดการค้ำที่มีต่อผลต่างแรงบิด (delta torque) จากเครื่อง ODR และความหนาแน่นพันธะข้าม พบว่ายางธรรมชาติที่เติมปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทำให้ผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเติม

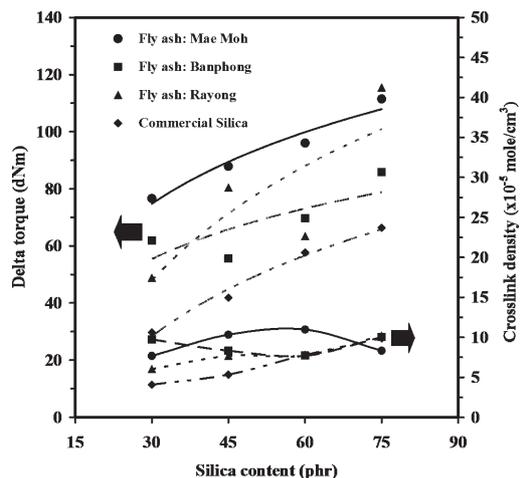


Figure 5. Variations in delta torque and crosslink density with different silica contents for NR vulcanizates filled with commercial silica and fly ash from various sources

ซิลิกาทั้งสองชนิดซึ่งมีความแข็งแรงแรงลงในยางธรรมชาติ จึงทำให้สมบัติของยางโดยรวมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR ของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของถ้ำลอยจากทั้ง 3 แหล่ง มีค่ามากกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า ทั้งนี้เป็นอิทธิพลของสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compounds) ที่มีอยู่มากในถ้ำลอย สำหรับความหนาแน่นพันธะข้ามนั้น พบว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของถ้ำลอยจากทั้ง 3 แหล่ง มีค่าความหนาแน่นพันธะข้ามค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้าที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเหลืออยู่บนผิวอนุภาคซิลิกาเกรดการค้า จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาเกรดการค้าด้วยตัวเอง และส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นพันธะข้ามเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

#### ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

สำหรับสมบัติความต้านแรงดึงด้านผลกระทบของปริมาณซิลิกาของถ้ำลอยจากแหล่งต่าง ๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ ในรูปที่ 6 พบว่าโดยภาพรวมค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของถ้ำลอยทั้ง 3 แหล่ง และซิลิกาเกรดการค้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาเป็นลำดับ เป็นผลจากการเติมซิลิกาที่มีความแข็งแรงแรงสูง จึงทำให้สมบัติโดยรวมของยางมีค่ามอดูลัสตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR ข้างต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมถ้ำลอยยังให้ค่ามอดูลัสเทียบเท่ากับซิลิกาเกรดการค้าตลอดช่วง 30 - 75 ส่วนในร้อยส่วน โดยมีค่าประมาณ 1 - 3 เมกะปาสคาล ถึงแม้ว่ากลไกในการก่อตัวถ้ำลอยในยางธรรมชาติต่างกับซิลิกาเกรดการค้าก็ตาม เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับบนอนุภาคถ้ำลอยมากกว่า จึงทำให้ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของถ้ำลอยจากทั้ง 3 แหล่งมีค่ามอดูลัสเทียบเท่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกา

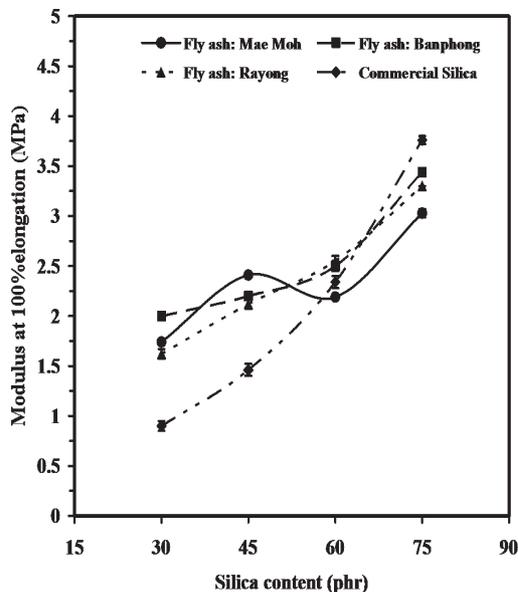
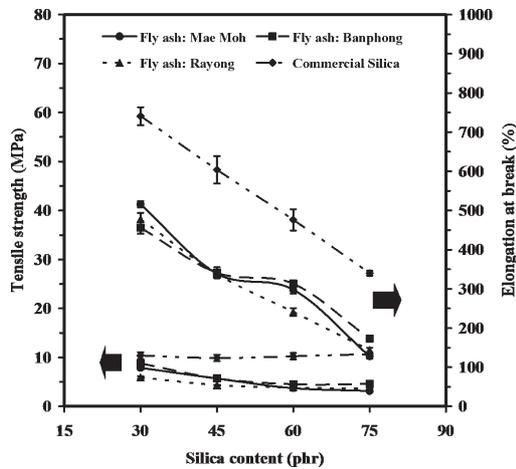


Figure 6. Effect of silica content on the modulus at 100% elongation for NR vulcanizates filled with commercial silica and fly ash from various sources

เกรดการค้าในยางธรรมชาติมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสสูงกว่าการเติมซิลิกาของถ้ำลอยอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นผลของขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับยางได้มากกว่ามาก (Costa *et al.*, 2002)

รูปที่ 7 แสดงผลของปริมาณซิลิกาของถ้ำลอยจากแหล่งต่าง ๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อความต้านแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของถ้ำลอยและซิลิกาเกรดการค้ามีความต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน ณ ปริมาณซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วน แต่ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้าไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางที่มีความแข็งแรงแรงมากกว่ามักมีการยืดตัว ณ จุดขาดน้อยกว่า แต่ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของถ้ำลอยมีแนวโน้มลดลงเป็นลำดับ เนื่องจากเป็นผลของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดที่น้อยกว่าการเติมซิลิกาเกรด



**Figure 7. Tensile strength and elongation at break of NR vulcanizates filled with commercial silica and fly ash from various sources at different silica contents**

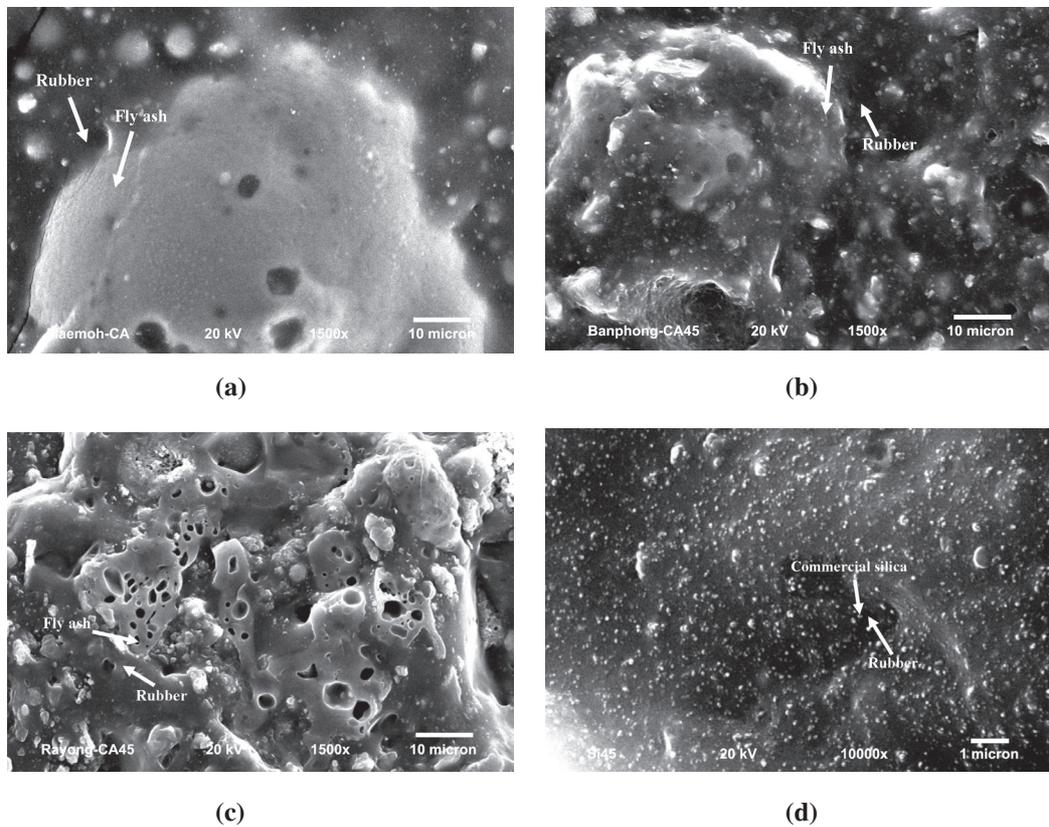
การค้ำ สำหรับการเติมปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นแล้ว ทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นย่อมทำให้อนุภาคสารตัวเติมใกล้ชิดกันมากขึ้น จนทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลง นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยยังมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดน้อยกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้ำ ซึ่งเป็นอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมของเถ้าลอยที่มีปริมาณมากกว่าเช่นกัน ดังคำอธิบายที่กล่าวมาข้างต้น

จากความแตกต่างของค่าทนแรงดึงระหว่างการเติมซิลิกาของเถ้าลอยและเกรดการค้ำในยางธรรมชาติช่วงปริมาณ 30 - 75 ส่วนในร้อยส่วนยังสามารถอธิบายได้จากภาพ SEM บริเวณพื้นผิวรอยขาด ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับเถ้าลอยที่ไม่ดีเหมือนกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำ เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยมีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาเกรดการค้ำมาก ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับเนื้อยางและความต่อเนื่องของเฟสยางในการรับ

แรงน้อยกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่ารูปร่างของอนุภาคเถ้าลอยที่ต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของเฟสยางในการรับแรงที่ทำให้ความต้านแรงดึงใกล้เคียงกัน

สำหรับผลของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อความต้านแรงฉีกขาดและความแข็งในรูปที่ 9 พบว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้ำมีความต้านแรงฉีกขาดใกล้เคียงกัน ณ ปริมาณซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกามากขึ้น ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยค่อนข้างลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลค่าทนแรงดึงข้างต้น ในขณะที่ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาเกรดการค้ำด้วยกันเอง ส่วนค่าความแข็ง พบว่า เมื่อเติมปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นผลของความแข็งแกร่งของยางโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับผลมอดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำมีค่าความแข็งมากกว่าการเติมซิลิกาของเถ้าลอย เนื่องจากเป็นผลรวมของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาเกรดการค้ำด้วยกันเองและอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาเกรดการค้ำที่มากกว่า สำหรับยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความต้านแรงฉีกขาดและความแข็งที่ต่างกัน

รูปที่ 10 แสดงผลของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การกระดอนและเปอร์เซ็นต์ขุดตัวถาวร ซึ่งเป็นสมบัติความเป็นอลาสติกของยางที่แสดงพฤติกรรมการคืนตัวกลับในทันทีเมื่อปล่อยแรงกระทำกับวัตถุนั้น ๆ โดยมีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเป็นสำคัญ กล่าวคือ เมื่อยางและสารตัวเติมเปลี่ยนรูปไปจะสามารถคืนตัวกลับมาพร้อม ๆ กันได้ เพื่อทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน (energy loss) น้อยสุด และสามารถส่งพลังงานกลับคืน (energy return) ให้มากที่สุดได้ จากการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณซิลิกามากขึ้น ยางธรรมชาติสูญเสียความเป็นอลาสติกลดลงเล็กน้อย



**Figure 8.** SEM micrographs of continuous phase between NR and filler particles  
 (a) NR and fly ash from Mae Moh (Magnification of 1500)  
 (b) NR and fly ash from Banphong (Magnification of 1500)  
 (c) NR and fly ash from Rayong (Magnification of 1500)  
 (d) NR and commercial silica (Magnification of 10000)

เนื่องจากปริมาณเนื้อยางลดลง สำหรับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำมีความเป็นอิลาสติกน้อยกว่าการเติมถั่วลอถอย ถึงแม้ว่า ณ ปริมาณซิลิกาเดียวกัน ปริมาณสารตัวเติมของถั่วลอถอยมากกว่าซิลิกาเกรดการค้ำก็ตาม ทั้งนี้ เนื่องจากซิลิกาเกรดการค้ำที่คงเหลือหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน เมื่อมีการให้พลังงานกับยางอาจทำให้เกิดการแตกแยก (breakdown) ระหว่างซิลิกาเกรดการค้ำด้วยตัวเอง เพราะไม่มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาเกรดการค้ำที่แข็งแรง จึงส่งผลให้เกิดการ

สูญเสียพลังงานได้ นอกจากนี้สังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมถั่วลอถอยจากแม่เหาะยังแสดงพฤติกรรมความเป็นอิลาสติกดีกว่าถั่วลอถอยจากบ้านโป่งและระยอง คาดว่าน่าจะเป็นผลของความเป็นทรงกลมและความเรียบของผิวอนุภาคถั่วลอถอยที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีความอิสระในการเคลื่อนไหวคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ง่ายกว่าถั่วลอถอยจากบ้านโป่งและระยอง ที่มีทั้งรูปร่างไม่แน่นอนและความหยาบของผิวมาก ซึ่งนับว่าเป็นสมบัติของยางที่น่าสนใจมากของการนำถั่วลอถอยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ

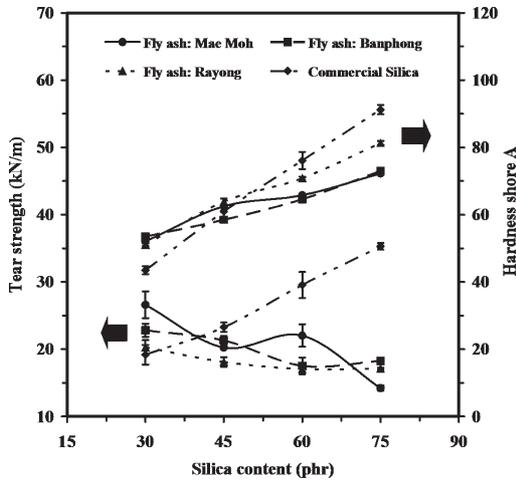


Figure 9. Effect of silica content on the tear and hardness properties for NR vulcanizates filled with commercial silica and fly ash from various sources

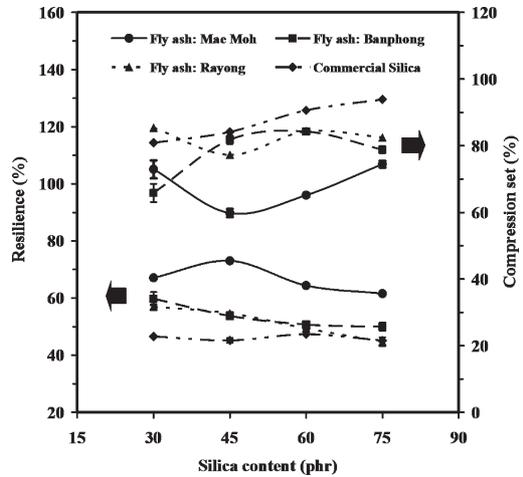


Figure 10. Variations in resilience and compression set properties for different silica contents for NR vulcanizates filled with commercial silica and fly ash from various sources

### บทสรุป

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า สามารถนำซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งของประเทศไทยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ ช่วยลดพลังงานในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกาเกรดการค้า โดยยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากแม่เมาะใช้เวลาในการคงรูปยางมากกว่าการเติมเถ้าลอยจากบ้านโป่งและระยองเพียงเล็กน้อยอย่างไรก็ตาม สามารถใช้ซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งทดแทนซิลิกาเกรดการค้าได้ในปริมาณ 30 ส่วนในร้อยส่วน ซึ่งให้สมบัติเชิงกลด้านความต้านแรงดึง ความต้านแรงฉีกขาด และความแข็งเทียบเท่ากัน นอกจากนี้การใช้ซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งสามารถรักษาสสมบัติความเป็นอิลาสติกของยางดีกว่ซิลิกาเกรดการค้า โดยเฉพาะเถ้าลอยจากแม่เมาะที่ให้สมบัติความเป็นอิลาสติกดีกว่าการเติมเถ้าลอยจากบ้านโป่งและระยอง

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม 5 สัญญาเลขที่ RDG/4650038 และทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD/0285/2545 สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ตลอดจนบริษัทที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในงานวิจัยมีดังนี้ บริษัท ทอรัส ปอซโซลานต์ จำกัด บริษัท เจ-เจ เดกussa (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท โดกุยามา สยามซิลิกา จำกัด บริษัท อุกิฮอนเทอร์ไฟรส์ จำกัด และ บริษัท กฟผ. จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผล

### เอกสารอ้างอิง

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จึงเกษม โชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ. (2542). วารสาร กฟผ., กรุงเทพมหานคร, 8:13-23.

- มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์. (2545). รางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่น ปี 2545. กรุงเทพมหานคร, หน้า 10-14.
- Alkadasi, N.A.N., Hundiwale, D.G., and Kapadi, U.R. (2004). Effect of coupling agent on the mechanical properties of fly ash-filled polybutadiene rubber. *J. Appl. Polym. Sci.*, 91(2):1,322-1,328.
- Ansarifar, M.A., and Nijhawan, R. (2000). Effects of silane on properties of silica filled natural rubber compounds. *J. Rubb. Res.*, 3(3):169-184.
- Costa, H.M., Visconte, L.L.Y., Nunes, R.C.R., and Furtado, C.R.G. (2002). Mechanical and dynamic mechanical properties of rice husk-filled natural rubber compounds. *J. Appl. Polym. Sci.*, 83(11):2,331-2,346.
- Guhanathan, S., Devi, M.S., and Murugesan, V. (2001). Effect of coupling agents on the mechanical properties of fly ash/polyester particulate composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 82(7):1,755-1,760.
- Guhanathan, S., Devi, M.S., and Murugesan, V. (2002). Effect of environmental stress on the mechanical properties of surface treated fly-ash/polyester particulate composite. *Polym. Int.*, 51(4):289-296.
- Lewis, C., Buanpa, R., and Kiatkamjornwong, S. (2003). Effect of rubber ratio, carbon black level, and accelerator level on natural rubber/bromobutyl rubber blend properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, 90(11): 3,059-3,068.
- McGill Garde, W.J., and Woolard, C.D. (1999). Surface modification of fly ash characterisation and evaluation as reinforcing filler in polyisoprene. *Plast. Rubb. Compos.*, 28(1):1-10.
- Sombatsompop, N., Thongsang, S., Markpin, T., and Wimolmala, E. (2004). Fly ash particles and precipitated silica as fillers in rubbers. I. Untreated fillers in natural rubber and styrene-butadiene rubber compounds. *J. Appl. Polym. Sci.*, 93(5): 2,119-2,130.
- Thongsang, S., and Sombatsompop, N. (2006). Effect of NaOH and Si69 treatments on the properties of fly ash/natural rubber composites. *Polym. Compos.*, 27(1):30-40.
- Wolff, S. (1996). Chemical aspects of rubber reinforcement by fillers. *Rubb. Chem. Tech.*, 69:325-346.

