

# คุณลักษณะเฉพาะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางที่เติมซิลิกาผสม

## Cure characteristics and mechanical properties of rubbers filled with silica hybrid filler

ปวีณา แต่งอุดม<sup>1\*</sup>, ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>1</sup> และ ศิรินทร ทองแสง<sup>2</sup>  
Paveena Tangudom<sup>1</sup>, Narongrit Sombatsompop<sup>1</sup> and Sirinthorn Thongsang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
โทร 02-470-8645 โทรสาร 02-470-8647

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
โทร 02-470-9205 โทรสาร 02-872-9080

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางที่เติมซิลิกาผสมระหว่างพรีซิพิตเตดซิลิกาและซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์โดยสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาผสมถูกปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการศึกษาปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่ 0 5 10 และ 15 phr ในยางที่เสริมแรงด้วยพรีซิพิตเตดซิลิกาปริมาณ 20 phr โดยตรวจสอบสมบัติของสารประกอบยางทางด้านคุณลักษณะการคงรูป สมบัติเชิงกล (ความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด ความแข็งที่ผิว ความต้านทานต่อการขีดถู และความสามารถในการกระดอน) จากผลการทดสอบพบว่า การเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในสารประกอบยางธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการคงรูป แต่กลับส่งผลต่อการลดลงของเวลาการคงรูปในสารประกอบยางที่มียางเอสบีอาร์เป็นส่วนผสม ผลต่างแรงบิดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยาง ด้านความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด พบว่าการเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยปริมาณเพิ่มขึ้นในยางธรรมชาติส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดลดลง แต่ค่าความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นในยางเอสบีอาร์แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเสริมแรงของซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยาง สำหรับค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่มากขึ้น โดยยางเอสบีอาร์ที่เติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยให้ค่าความแข็งมากที่สุด สำหรับความต้านทานต่อการขีดถูพบว่าเมื่อเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยปริมาณมากขึ้นทำให้ปริมาตรการสูญเสียเนื้อยางเพิ่มขึ้น โดยปริมาตรการสูญเสียเนื้อยางธรรมชาติเกิดขึ้นน้อยสุด นอกจากนี้ความสามารถในการกระดอนของยางธรรมชาติยังมากกว่ายางเอสบีอาร์ การกระดอนของยางมีแนวโน้มมากขึ้นตามปริมาณการเติมซิลิกาจากเถ้าชานอ้อย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับความหนาแน่นของพันธะข้ามในยาง

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, ยางเอสบีอาร์, เถ้าชานอ้อย

### Abstract

This work involved cure characteristics and mechanical properties of natural rubber (NR), styrene-butadiene rubber (SBR) and rubber blends of NR and SBR filled with silica hybrid filler, the fillers including bagasse ash silica (BASi) and precipitated silica (PSi). The silicas were treated with Si69 silane coupling agent at 2% by weight. The BASi content used was 0, 5, 10 and 15 phr which was incorporated into rubber compounds filled with precipitated silica at 20 phr. The cure characteristics and mechanical properties (tensile and tear properties, hardness, abrasion resistance and resilience) of NR, SBR and NR/SBR blends were considered separately and comparatively with regard to the effect of BASi loading. The results suggested that BASi had no effect on the cure time change for NR compounds, but resulted in a cure time reduction for SBR-based compounds. The delta torque appeared to increase with BASi content. The tensile and tear strength of NR vulcanizates decreased with increasing bagasse ash silica loading, but there was improvement for the SBR-based compounds, indicating the reinforcement of BASi in the rubbers. The addition of bagasse ash silica resulted in a continuous increase in the hardness of the rubber vulcanizates. BASi-filled SBR composites gave the highest hardness value. For abrasion test, the volume loss of BASi-filled rubber compounds increased with an increase in bagasse ash silica. The NR composites had the lowest volume loss. Moreover, the NR compounds had better resilience property than the SBR. The resilience of rubber composites increased with increasing bagasse ash silica which corresponded well with crosslink density results.

Keywords: Natural Rubber, Styrene Butadiene Rubber, Bagasse Ash

\* Corresponding author: E-mail : [tangudom\\_39@hotmail.com](mailto:tangudom_39@hotmail.com)

## 1. บทนำ

การผลิตผลิตภัณฑ์จากยางเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งาน นั้น นิยมใช้ยางผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้ยางผสมคือสายพานลำเลียงในส่วนของยาง ฉาบผ้าใบ นอกจากนี้จะมียางเอสบีอาร์แล้วยังมีการผสมยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงให้ยางฉาบผ้าใบมีความเหนียวสามารถยึดติดกับผ้าได้ดี (ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และคณะ, 2007) และเพิ่มสมบัติเชิงกล เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่สามารถเกิดผลึกได้ในขณะที่รับแรงดึง (stress induced crystallization) จึงมีความทนทานในการใช้งานภายใต้ สภาวะที่ได้รับแรงดึงได้ดี นอกจากนี้ต้องมีการกำหนดชนิดและปริมาณ สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ผสมเข้ากับยางที่เรียกว่า “ออกสุตรยาง” เนื่องจาก ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่งเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง กรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ยางที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นนิยมเติมสารตัว เติมเสริมแรง (reinforcement) ซึ่งที่นิยมใช้กันมี 2 ประเภทคือคาร์บอน แบลคและซิลิกาโดยคาร์บอนแบลคนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ความสวยงามทางด้านสีสนิมเพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีดำตัวอย่างเช่นยาง รถยนต์ ส่วนซิลิกานิยมนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มสีสนิมให้แก่ ผลิตภัณฑ์เนื่องจากซิลิกามีสีขาว โดยยางที่เติมคาร์บอนแบลคให้สมบัติ เชิงกลโดยรวมสูงกว่ายางที่เติมซิลิกา เนื่องจากซิลิกากระจายตัวในยาง ได้้น้อยกว่าเพราะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติม (filler-filler interaction) ที่แข็งแรงจากพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮลันอล (silanol) ที่อยู่บนผิวของซิลิกา (Choi และคณะ, 2004) จึงต้องมีการปรับปรุงผิว ซิลิกาด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) นิยมใช้คือ Bis-(3-(trioxysilyl)- propyl)-tetrasulfane หรือ Si69 โดยบริเวณหมู่อัลคอกซี (alkoxy) ที่อยู่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮลันอล (silanol) บนผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (siloxane) ที่มีความเสถียร (Meon และคณะ, 2004) โดยงานวิจัยของ A. Ansarifar และคณะ พบว่าการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วย Si69 ส่งผลให้ขนาดการเกาะกลุ่มกัน ของซิลิกาที่ได้จากภาพถ่ายทางสัณฐานวิทยาเล็กลงและมีการกระจาย ตัวในยางมากขึ้น แสดงให้เห็นถึงอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมที่ลดลง

สารตัวเติมซิลิกาในยางนอกจากจะได้อาจมาจากการสังเคราะห์แล้วยัง ได้มาจากแหล่งธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น เถ้าลอย (fly ash) ที่เป็นของเสีย จากโรงไฟฟ้าพลังงานถ่านหินและเถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) ที่เป็น ของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ได้มาจากการนำชานอ้อยไปเผาเพื่อ นำ ความร้อนไปผลิตน้ำตาลดิบแล้วใช้ไซโคลนดักเอาเถ้าชานอ้อยออกมา ซึ่งทั้งสองมีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide; SiO<sub>2</sub>) หรือซิลิกาประมาณ 35.05 เปอร์เซ็นต์และ 59.39 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (Thongsong และคณะ, 2008 และ พงศธร จันตรี, 2552) เนื่องจากที่ผิว ซิลิกาจากธรรมชาติมีหมู่ไฮลันอลเหมือนที่ผิวของซิลิกาสังเคราะห์จึง ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนเช่นเดียวกันโดยปริมาณสารคู่ควบ ไซเลนชนิด Si69 ที่เหมาะสมในการปรับปรุงผิวซิลิกาจากธรรมชาติแล้ว ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ดีขึ้นคือที่ ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิกา ตามลำดับ (Thongsang, 2005 และ เอกชัย วิมลมาลาและคณะ, 2549) งานวิจัยที่นำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางมีอย่างแพร่หลาย แต่ สำหรับเถ้าชานอ้อยในช่วงแรกเป็นงานวิจัยที่นำเถ้าชานอ้อยมาทำเป็น วัสดุพอชซิลานซึ่งหมายถึงวัสดุที่ประกอบไปด้วยออกไซด์ของซิลิกา

เพื่อนำไปใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์แล้วทำให้สมบัติทางด้านต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์ดีขึ้น (บุรฉัตร จัตรีวิระ, 2552) ต่อมาจึงเริ่มมีงานวิจัยที่ นำเถ้าชานอ้อยมาเป็นสารตัวเติมในยางโดยศิรัชย์ ก้านกิ่ง ศึกษาผล ของสารตัวเติมกลุ่มผสมกลุ่มซิลิกาในยางธรรมชาติ พบว่าการเติมพรีซิพี เทตซิลิกากับซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยของแหล่งจังหวัดลพบุรีในสัดส่วนที่ เหมาะสมทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการเติมซิลิกา จากเถ้าชานอ้อยเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเอา ซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยมาเป็นสารตัวเติมร่วมกับพรีซิพีเทตซิลิกาใน ปริมาณคงที่ โดยมีการปรับปรุงผิวสารตัวเติมทั้งสองด้วยสารคู่ควบ ไซเลนชนิด Si69 ที่ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิกาแล้วเติม ลงในยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ ยางเอสบีอาร์ ศึกษาผลของซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่มีต่อสมบัติของยาง ทางด้านคุณลักษณะการคงรูป ความทนทานต่อแรงดึงและแรงฉีกขาด ความแข็งที่ผิว ความต้านทานต่อการขีดถู และความสามารถในการ กระดอน

## 2. จุดประสงค์

เพื่อศึกษาผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่มีต่อลักษณะการ คงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์และยางผสม ระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ที่เสริมแรงด้วยพรีซิพีเทตซิลิกา เกรดการค้า

## 3. วิธีการ

ตารางที่ 1 แสดงวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบ	แหล่งที่มา
ยางธรรมชาติ เกรด STR20	บริษัท ศรีเอทีพี โพลีเมอร์ส จำกัด
ยางเอสบีอาร์ เกรด SBR1502	บริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ จำกัด
พรีซิพีเทตซิลิกา เกรด Tokusil233	บริษัท โตกุยามา สยามซิลิกา จำกัด
เถ้าชานอ้อย	บริษัท โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ที.เอ็น. จำกัด
ซิงค์ออกไซด์	บริษัท ไทย-ไลซาท จำกัด
กรดเสตีริก	บริษัท อิมพีเรียลอินดัสเทรียล จำกัด
พอลิเอทิลีนไกลคอล เกรด 4000	บริษัท โคซัน (ประเทศไทย) จำกัด
เมอร์แคปโตเบนโซไทโอาโซล	บริษัท ซีเอ็มซี แอดวานซ์ จำกัด
ไดฟีนิลกาวินดีน	บริษัท สยามเคมี จำกัด (มหาชน)
กัมมะถัน	บริษัท ซีออน แอดวานซ์ โพลีเม็กซ์ จำกัด
สารคู่ควบ	บริษัท เบ็นไมเยอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

### การปรับปรุงผิวสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา

ทำการปรับปรุงผิวพรีซิพีเทตซิลิกาและซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยด้วย สารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 ที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก โดยนำสารคู่ ควบไซเลน 2 กรัมผสมเอทานอล 100 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปผสมกับพรีซิพีเทตซิลิกาปริมาณ 100 กรัม สำหรับซิลิกาจาก

เข้าชานอ้อยจะคิดปริมาณซิลิกาที่มีอยู่จริงคือ 68 เปอร์เซ็นต์ในเครื่องผสม (high speed mixer) อปโลเอทานอลในตู้บที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การเตรียมสารประกอบยาง

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของสารประกอบยาง

วัตถุดิบ	ปริมาณการเติม (phr)		
	สูตรยางธรรมชาติ	สูตรยางเอสบีอาร์	สูตรยางผสม
ยางธรรมชาติ	100	-	50
ยางเอสบีอาร์	-	100	50
ซิงค์ออกไซด์	5		
กรดสเตียริก	2		
เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล	0.5		
ไดฟีนิลกัวนิติน	0.2		
พรีซีพีเทตซิลิกา	20		
ซิลิกาจากเข้าชานอ้อย*	0 5 10 และ 15		
พอลิเอทิลีนไกลคอล**	1 1.25 1.5 และ 1.75		
ซัลเฟอร์	3		

\* คิดตามปริมาณซิลิกาที่มีอยู่จริงในเข้าชานอ้อย (68 เปอร์เซ็นต์)

\*\*เติมพอลิเอทิลีนไกลคอลปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของซิลิกา

การเตรียมสารประกอบยางจะใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (two roll mill) เริ่มจากการบดย่อยยางเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นผสมสารเคมียางตามปริมาณและลำดับการเติมตามตารางที่ 2 ผสมต่อไปเป็นเวลา 20 นาทีและอีก 5 นาทีสุดท้ายผสมซัลเฟอร์ แล้วจึงนำไปขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ที่อุณหภูมิ 160 °C ตามเวลาที่ได้จากการทดสอบหาเวลาการคงรูป ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR)

การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ที่เติมซิลิกามีระหว่างพรีซีพีเทตซิลิกาและซิลิกาจากเข้าชานอ้อยมีรายละเอียดดังนี้

1. ทดสอบความทนทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machines จากบริษัท shimadzu รุ่น Autograph AG- I ประเทศญี่ปุ่น โดยการใช้ตัวจับยึด (grip) ขนาด 5 กิโลนิวตัน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วในการดึงคงที่ 500 มม./นาที ทดสอบหาค่าโมดูลัส ณ การยึดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ การยึดตัว ณ จุดขาดและความทนทานต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D412-98
2. ทดสอบความทนทานต่อแรงฉีกขาดด้วยเครื่อง Universal Testing Machines จากบริษัท shimadzu รุ่น Autograph AG- I ประเทศญี่ปุ่น โดยการใช้ตัวจับยึด (grip) ขนาด 5 กิโลนิวตัน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 25 องศาเซลเซียส ความเร็วในการดึงคงที่

500 มม./นาที ทดสอบความทนทานต่อแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624

3. ทดสอบความต้านทานต่อการขัดถูด้วยเครื่อง DIN Abrasion Machine บริษัท Hampden test Equipment จำกัด ประเทศอังกฤษ ตามมาตรฐาน DIN 53516 โดยใช้โหลดปริมาณ 10 นิวตันและระยะทางการขัดถู 40 เมตร

4. ทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่อง Durometer Hardness รุ่น 475 ของบริษัท PTC instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ASTM D2240-97

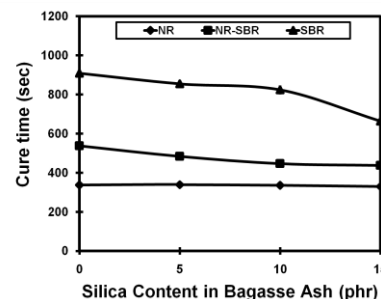
5. การทดสอบการกระดอนตามมาตรฐาน BS 903 Part A8 โดยเครื่อง Dunlop trisometer HW-Wallace จำกัด ประเทศอังกฤษ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

1. ความหนาแน่นของพันธะข้าม ทดสอบหาโดยวิธีการบวมตัว (Sombatsompop, 1999) โดยเตรียมชิ้นงานยางผสมทรงรูปขนาด 2x2 ตารางเซนติเมตร ทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนนำไปแช่ลงในสารละลายโทลูอีนปริมาตร 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 168 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากสารละลายโทลูอีนแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง โดยปริมาณของพันธะข้ามสามารถคำนวณได้จากสมการของ Flory-Rehner โดยค่า  $V_s$  ที่ 106.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร/โมล ค่า  $\chi$  ของ NR คือ 0.379 ส่วน  $\chi$  ของ SBR คือ 0.413 โดยรายละเอียดแสดงไว้ในงานวิจัยของ Sombatsompop และคณะ
2. การตรวจสอบภาพถ่ายทางสัณฐานวิทยา นำชิ้นงานตรงรอยขาดที่ผ่านการทดสอบแรงดึงมาเคลือบทอง จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและการกระจายตัวของพรีซีพีเทตซิลิกาและซิลิกาจากเข้าชานอ้อยในยาง

**4. ผลและอภิปราย**

4.1 คุณลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์

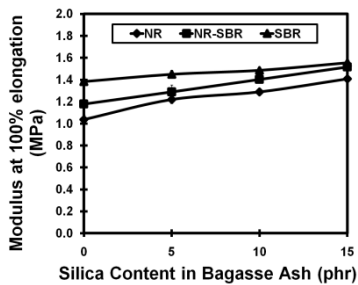


รูปที่ 1 ผลของปริมาณซิลิกาจากเข้าชานอ้อยต่อเวลาในการคงรูป

รูปที่ 1 แสดงผลของเวลาในการคงรูป ผลจากการวิจัยพบว่ายางเอสบีอาร์ใช้เวลาในการคงรูปนานกว่ายางธรรมชาติ เนื่องมาจากโครงสร้างของยางเอสบีอาร์มีส่วนที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาควาคิไนซ์

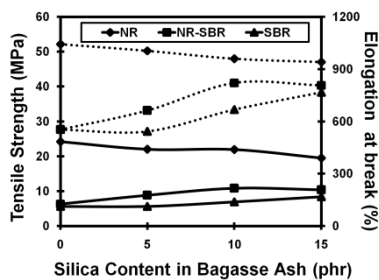
(reactive site) น้อยกว่ายางธรรมชาติ (Sombatsompop, 2004) นอกจากนี้เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางเอสบีอาร์ที่มี steric hindrance group ใหญ่กว่ายางธรรมชาติ (ซึ่งก็คือหมู่วงแหวนเบนซีน) ทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ในสารเคมียางรวมถึงสารตัวเติมเข้าไปทำปฏิกิริยากับบริเวณพันธะคู่ในสายโซ่ยางเอสบีอาร์ได้ยาก (Musickarat, 2009) สำหรับอิทธิพลของซิลิกาจากเถ้าชานอ้อย (BASi) ปริมาณที่มากขึ้นนั้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ ในขณะที่สูตรยางที่มีส่วนผสมของยางเอสบีอาร์กลับแสดงการลดลงของเวลาการคงรูป เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ เหล็ก-ออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งโลหะออกไซด์เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นให้ปฏิกิริยารีดอกซ์ในยางเกิดได้เร็วขึ้น (Sombatsompop, 2004) ซึ่งผลของโลหะออกไซด์ที่มีต่อยางเอสบีอาร์แสดงได้ชัดเจนกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีการคงรูปที่ยากกว่าดังผลของโครงสร้างทางเคมีตามที่กล่าวมา

#### 4.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์



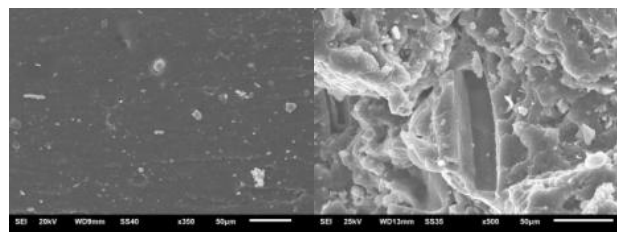
รูปที่ 2 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อผลโมดูลัส ณ การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 2 แสดงค่าโมดูลัส ณ การยืดตัวที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของยางพววยางเอสบีอาร์มีค่าโมดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างของยางเอสบีอาร์ที่มีหมู่เบนซีนที่แสดงถึงความแข็งแกร่ง (stiffness) ในโครงสร้าง เมื่อเติม BASi มากขึ้นพบว่าทำให้ยางทั้งสองมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเพราะเป็นการเติมของแข็งที่มีค่าโมดูลัสสูงส่งผลให้ค่าโมดูลัสโดยรวมของยางผสมสูงขึ้น

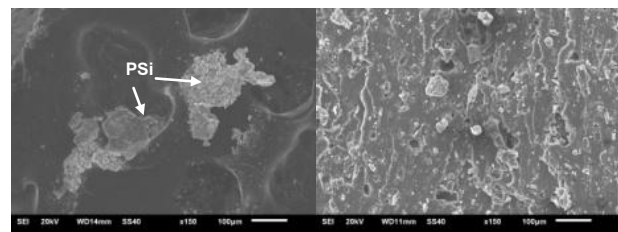


รูปที่ 3 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อผลความทนทานต่อแรงดึง ( — ) และการยืดตัว ณ จุดขาด ( ..... )

รูปที่ 3 แสดงค่าความทนทานต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดพววยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางเอสบีอาร์ซึ่งให้ผลตามการยืดตัว ณ จุดขาด เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ในขณะที่ถูกดึงยืด (strain induced crystallization) จึงทนต่อแรงดึงและเกิดการยืดออกได้มากกว่า กรณีที่เติม BASi ในยางธรรมชาติปริมาณเพิ่มขึ้นพบว่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำลงเรื่อย ๆ เนื่องจากในยางธรรมชาติที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกาอย่างเดียวยังมีการกระจายตัวได้ดี ดังรูปที่ 4a ที่ไม่พบการเกาะกลุ่มของพรีซีพีเทตซิลิกา แต่เมื่อเติม BASi ลงไปที่ 15 phr พบว่าเฟสยางมีความต่อเนื่องลดลงและยังพบการหลุดออกของเถ้าชานอ้อยมีลักษณะเป็นแท่งอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4b ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการส่งผ่านแรงที่ได้รับและความสามารถในการยืดตัวลดลง ในขณะที่ยางเอสบีอาร์มีแนวโน้มของความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติม BASi เนื่องจากในยางเอสบีอาร์ที่เติมพรีซีพีเทตซิลิกาอย่างเดียวยังมีการเกาะกลุ่มของพรีซีพีเทตซิลิกาแสดงดังรูปที่ 4c ซึ่งคาดว่ามาจากความหนืดที่มากกว่าของยางเอสบีอาร์ขณะทำการเตรียมสารประกอบยาง โดยได้ทำการตรวจสอบค่าแรงบิดต่ำสุดที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการไหลของยางก่อนเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ พบว่ายางเอสบีอาร์มีค่าแรงบิดต่ำสุดสูงกว่ายางธรรมชาติเท่ากับ 15 dN-m และ 11 dN-m ตามลำดับจึงส่งผลให้ความสามารถในการผสมพรีซีพีเทตซิลิกาในยางเกิดการกระจายตัวได้น้อยกว่า การเกาะกลุ่มของพรีซีพีเทตซิลิกานี้มีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อยที่อยู่ในช่วง 40-80 ไมครอน จึงคาดว่า การเติม BASi ลงในยางเอสบีอาร์จะสามารถแทรกเข้าไปในกลุ่มของพรีซีพีเทตซิลิกาแล้วทำให้เกิดการแตกออกและช่วยลดการเกาะกลุ่มของพรีซีพีเทตซิลิกาได้แสดงดังรูปที่ 4d ซึ่งทำให้ช่วยเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางเอสบีอาร์กับสารตัวเติมมากขึ้นและช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของเฟสยางและความสามารถในการยืดตัวที่ดีขึ้นด้วย

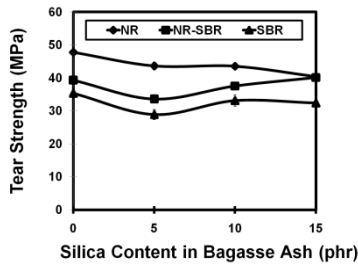


(a) NR/BASi 0 phr (b) NR/BASi 15 phr



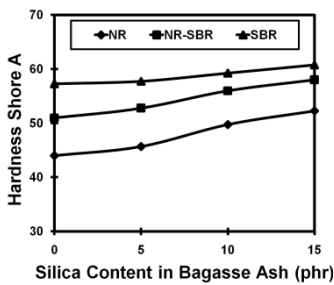
(c) SBR/BASi 0 phr (d) SBR/BASi 15 phr

รูปที่ 4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสบีอาร์ (SBR)



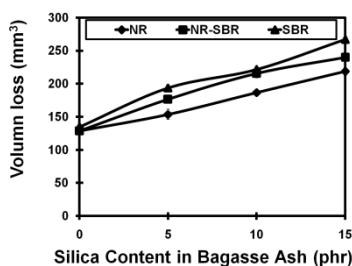
รูปที่ 5 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อผลความทนทานต่อแรงฉีกขาด

รูปที่ 5 แสดงค่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดของยาง พบว่าให้ผลการทดลองคล้ายกับความทนทานต่อแรงดึง กล่าวคือยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงฉีกขาดมากกว่ายางเอสปรีอาร์ ซึ่งเมื่อเติม BASi ลงไปในยางทั้งสามชนิดพบว่าความทนทานต่อแรงฉีกขาดของยางลดลงเนื่องจากความต่อเนื่องของเฟสลดลง โดยความทนทานต่อแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ความทนทานต่อแรงฉีกขาดของยางที่มียางเอสปรีอาร์เป็นส่วนผสมกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติม BASi ในปริมาณมากขึ้น



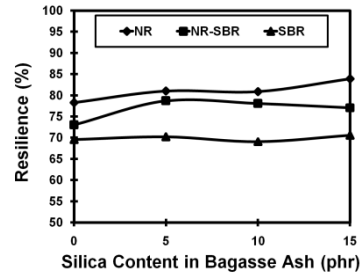
รูปที่ 6 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อค่าความแข็งที่ผิว

รูปที่ 6 แสดงผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อค่าความแข็งที่ผิว พบว่ายางเอสปรีอาร์มีความแข็งที่ผิวมากกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางเอสปรีอาร์มีส่วนประกอบของวงแหวนเบนซีนทำให้มีความแข็งแรงแรงในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังพบว่าความแข็งที่ผิวสูงขึ้นตามปริมาณ BASi เพราะเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่ผิวสูง ทำให้ความแข็งที่ผิวโดยรวมของยางสูงตามไปด้วย



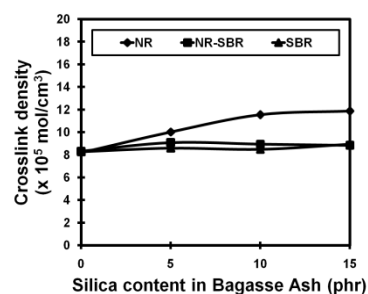
รูปที่ 7 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อความต้านทานต่อการขีดถู

รูปที่ 7 ผลของความต้านทานต่อการขีดถูของยางในกรณีที่ไม่เติม BASi พบว่ายางธรรมชาติและยางเอสปรีอาร์มีความต้านทานการขีดถูใกล้เคียงกัน เมื่อเติม BASi ปริมาณที่มากขึ้นพบว่าทำให้มีการสูญเสียปริมาตรของเนื้อยางมากขึ้น เนื่องจากเถ้าชานอ้อยที่หลุดออกมาทำให้เกิดการขีดถูแบบ 3 ส่วน (3-body abrasive wear) นอกจากนี้พบว่ายางเอสปรีอาร์มีปริมาตรการสูญเสียเนื้อยางมากกว่ายางธรรมชาติซึ่งสัมพันธ์กับความทนทานต่อแรงดึงและฉีกขาด เนื่องจากยางเอสปรีอาร์มีความทนต่อแรงดึงและแรงฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติ



รูปที่ 8 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อค่าความสามารถในการกระดอน

รูปที่ 8 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อความสามารถในการกระดอนยาง พบว่ายางธรรมชาติมีความสามารถในการกระดอนมากกว่ายางเอสปรีอาร์ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติดังที่กล่าวมาทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยากับสารตัวเติมหรือซัลเฟอร์เป็นพันธะข้ามได้ดีกว่ายางเอสปรีอาร์ (Musickarat, 2009) ในการเติมเถ้าชานอ้อยในยางปริมาณมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการกระดอนยางเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจาก BASi มีการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลจากความหนาแน่นพันธะข้ามโมเลกุลยางด้วย ดังผลในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลของปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยต่อค่าความหนาแน่นของพันธะข้าม

## 5. บทสรุป (Conclusion)

จากผลการศึกษาคูณลักษณะการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ยางเอสปรีอาร์และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปรีอาร์ที่เติมซิลิกาผสมระหว่างฟริชพิเทตซิลิกาและซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยสรุปได้ว่า

1. เวลาในการคงรูปของยางที่เติมซิลิกาผสมลดลง โดยเห็นผลชัดเจนในยางที่มียางเอสปีอาร์เป็นส่วนผสม
2. ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาผสมมีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อแรงฉีกขาดลดลง ส่วนยางเอสปีอาร์ที่เติมซิลิกาผสมมีความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเสริมแรงของซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยในยางเอสปีอาร์
3. ยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ที่เติมซิลิกาผสมมีความต้านทานต่อการขาดถดถอยตามปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น
4. ความสามารถในการกระดอนของยางธรรมชาติสูงกว่ายางเอสปีอาร์และการเติมปริมาณซิลิกาจากเถ้าชานอ้อยมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการกระดอนของยางเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับความหนาแน่นพันธะข้ามในยาง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัย ขอขอบคุณทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. (ประจำปี 2552) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการวิจัย ตามสัญญาเลขที่ RTA 5280008

## เอกสารอ้างอิง

1. Sombatsompop, N., Wimolmala E. and Markpin, T. Fly-ash particles and precipitated silica as fillers in rubber II. effects of silica content and Si69-treatment in natural rubber/styrene butadiene rubber vulcanizates. Wiley Interscience. 2007. Vol. 104, No. 5, pp. 3396-3405.
2. Choi, S., Park, B. and Song, H. Influence of filler type and content on properties of styrene-butadiene rubber (SBR) compound reinforced with carbon black or silica. *Polymers for Advanced Technologies*. 2004. Vol. 15, pp. 122-127.
3. Meon, W., Blume, A., Luginsland, H. and Uhrlandt, S. *Rubber compounding : chemistry and application*. Marcel Dekker, Inc. : USA, 2004 (chapter 7).
4. Ansarifar, A., Lim, H.P. and Nijha, R. Assessment of the effect of bifunctional organosilane on the bound rubber and properties of some natural rubber compounds. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2004. Vol. 24, pp. 9-22.
5. Thongsang, S., and Sombatsompop, N. Effect of NaOH and Si69 treatments on the properties of flyash/natural rubber composites. *Polym.Compos*. 2005. Vol. 27, No.1, pp. 30-40.
6. เอกชัย วิมลมาลา, วีระศักดิ์ หมากรผิน และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางเอสปีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 สำหรับปรับปรุงผิวเถ้าลอย. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 2549. ปีที่ 9, ฉบับที่ 3, หน้า 353-373.
7. Thongsang, S., Sombatsompop, N. and Ansarifar, A. Effect of fly ash silica and precipitated silica fillers on the viscosity, cure, and viscoelastic properties of natural rubber. *Polym. Adv. Technol*. 2008. Vol. 19, pp. 1296–1304.
8. พงศธร จันทร์ตรี. (2552). การศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าชานอ้อย. *ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*.
9. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, สุธี จริยธีระเวช และ ณัฏฐ์ มากุล คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกวงชนิดไม่รับน้ำหนักและไม่ควบคุมความชื้นผสมแร่ดินเบาและเถ้าชานอ้อย. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*. 2552. ปีที่ 32, ฉบับที่1, หน้า 59 – 76.
10. ศิริชัย ก้านกิ่ง. (2554). อิทธิพลของสารตัวเติมลูกผสมกลุ่มซิลิกา (เถ้าชานอ้อย/เถ้าลอย/พรีซิพิเตดซิลิกา) ที่มีต่อสมบัติการสึกตัวและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ. *ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*.
11. Sombatsompop, N., Kantala, C. and Wimolmala, E. Wood sawdust fibres as a secondary filler in carbon black filled NR vulcanizates. *Polym. Polym. Compos*.2006. Vol. 14, No. 4, pp. 331-348.
12. Sombatsompop, N., Thongsang, S., Wimolmala E., and Markpin, T. Fly-Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubber I. Untreated Fillers in Natural Rubber and Styrene-Butadiene Rubber Compounds. *Journal of Applied Polymer Science*. 2004. Vol. 93, No. 5, pp. 2119-2130.
13. Thitiphong Musickarat. (2009). Properties of NR/SBR blend influenced by carbon black and silica as reinforcing filler. *The Degree of Master of Science ( Polymer Science and Technology)*. Faculty of Graduate Studies. Mahidol University.