

อิทธิพลของแหล่งขี้เถ้าและปริมาณของซิลิกาในผงเถ้าขี้เถ้าที่มีต่อ  
สมบัติการบ่มสุกและเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

Influences of Bagasse Ash Source and Silica Content in Bagasse Ash  
on Cure and Mechanical Properties of Natural Rubber Composite

ศิริชัย ก้านกิง<sup>1</sup> ศิรินทร ทองแสง<sup>2</sup> ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>1</sup> ชاکริต สิริสิงห์<sup>3</sup> และ เอกชัย วิมลมาลา<sup>1</sup>

Sirichai Kanking<sup>1</sup> Sirinthorn Thongsang<sup>2</sup> Narongrit Sombatsompop<sup>1</sup> Chakrit Sirisinha<sup>3</sup> and Ekachai Wimolmala<sup>1</sup>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาซิลิกาจากผงเถ้าขี้เถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลจังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดลพบุรี และจังหวัดสุพรรณบุรีในประเทศไทย ทำการศึกษาอนุภาคและปริมาณของซิลิกาจากผงเถ้าขี้เถ้าทั้งสามแหล่ง และเติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าขี้เถ้าในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ที่ 0, 15, 30 และ 45 ส่วนในยางร้อยละ ส่วน ตรวจสอบ สมบัติด้านการบ่มสุก และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่า ผงเถ้าขี้เถ้าจากโรงไฟฟ้าทั้งสามแหล่งมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่น้อยกว่า 150 ไมโครเมตร โดยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก และพบว่า การเติมผงเถ้าขี้เถ้าไม่ส่งผลต่อ เวลาการไหล ในแม่พิมพ์ และการบ่มสุก ส่วนสมบัติเชิงกลโดยรวมด้านมอดูลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น ยกเว้นค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลงตามปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าขี้เถ้า นอกจากนี้ที่ปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าขี้เถ้าไม่เกิน 15 ส่วนต่อปริมาณยาง ร้อยส่วนจากโรงไฟฟ้าจังหวัดนครสวรรค์ ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีเมื่อเทียบกับทั้งสองแหล่ง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ ให้เป็นประโยชน์กับภาคอุตสาหกรรมของประเทศได้

Abstract

Silica based bagasse ash (BA) from bio-mass power plant station in Nakhonsawan, Lopburi and Suphanburi provinces of Thailand were used and incorporated into natural rubber (NR) at 0, 15, 30 and 45 parts per hundred rubber (phr) of silica contents and the cure and mechanical properties were assessed and compared. The majority of all bagasse ash powder had particle size of less than 150 micrometer. The cure characteristics of bagasse ash/ natural rubber (BA/NR) composites had no effect on scorch time and cure time. The overall mechanical properties (moduli and hardness) of bagasse ash/ natural rubber (BA/NR) composites increased with increasing ash content, except for elongation at break which decreased with ash content. 15 phr of silica content in bagasse ash powder from Nakhonsawan province gave the optimum mechanical strength as compared with other two ash sources. The outcome of this research could be of value-added for agriculture to industry benefits in sustainable development.

**Key Words:** Natural rubber / Bagasse ash / Rubber composite / Mechanical properties

E-mail address: k.sirichai@hotmail.com

<sup>1</sup>กลุ่มวิจัย P-PROF คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

P-PROF research group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

<sup>3</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University

## คำนำ

ปัจจุบันการนำสารตัวเติมมาใช้ในยาง มีหลากหลายวัตถุประสงค์ คือ เป็นสารเสริมแรงในยาง สารช่วยในกระบวนการผลิตและขึ้นรูปยาง นอกจากนี้ยังเป็นการลดต้นทุนด้านวัตถุดิบ ( Waddell et al, 1996) สารตัวเติมเสริมแรงแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นสารเสริมแรงให้สีดำ คือ ผงเขม่าดำ และอีกกลุ่มเป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ เช่น ฟลูมซิลิกา และฟริชพิเตตซิลิกา (Wolff, 1996) ซึ่งมีการใช้เป็นสารเสริมแรงในอุตสาหกรรมยางเป็นอย่างมาก เนื่องด้วยซิลิกามีขนาดอนุภาคที่ละเอียด ส่งผลต่อพื้นที่ผิวที่สูง จึงสามารถ ปรับปรุงสมบัติเชิงกล ด้านความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู ความแข็งของยาง และสามารถเติมสารให้สีลงในผลิตภัณฑ์ยางได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันสารตัวเติมเสริมแรงกลุ่มซิลิกาทางการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางยังมีราคาค่อนข้างสูง และจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวเพื่อลดการเกาะกลุ่มของอนุภาค

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามี การนำสารตัวเติมจากธรรมชาติที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมาใช้ คือ ผงเถ้าลอย ที่ได้จากโรงไฟฟ้าในกระบวนการเผาถ่านหินลิกไนต์ซึ่งมีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณ 40% ซึ่งงานวิจัยของ Sombatsompop และคณะ (2004) พบว่าการนำผงเถ้าลอยเติมลงในวัสดุยางธรรมชาติ พบว่าสมบัติเชิงกลทางด้านมอดุลัส ความต้านทานแรงดึง และความแข็ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถใช้ทดแทนซิลิกาเกรดการค้าชนิดฟริชพิเตตซิลิกา ได้ในปริมาณถึง 30 ส่วนต่อปริมาณยางร้อยละ ส่วนนั้น งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการใช้สารตัวเติมผงเถ้าชานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากธรรมชาติที่มีองค์ประกอบของซิลิกามากกว่า 70% (ณพงศธร, 2548) ในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเช่นเดียวกับกับฟริชพิเตตซิลิกาและเถ้าลอย ทำให้เห็นถึงความแตกต่างของการศึกษา ซึ่งคาดว่าจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถลดเรื่องค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ ที่ใช้ในการเสริมแรงในยางธรรมชาติ และยังเป็น การเพิ่มมูลค่าของผงเถ้าชานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือใช้ จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับการนำผงเถ้าชานอ้อยมาใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุยางธรรมชาติ ยังมีข้อมูลการศึกษาน้อยมาก

## อุปกรณ์และวิธีการ

### วัสดุและสารเคมี

ในการผสมนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 20 จากบริษัท เคมีคัล อินโนเวชั่น จำกัด มหาชน (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) โดยมีกำมะถัน (Sulphur) จากบริษัท Zeon Advanced Polymix จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการคงรูปยางในกระบวนการผลิต โดยมีซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) จากบริษัท Thai Lysaght จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) และกรดสเตียริก (Stearic acid) จากบริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาร่วมกันในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยางซึ่งมีเมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT) จากบริษัท ซี เอ็ม ซี แอดวานซ์ จำกัด (สมุทรสาคร ประเทศไทย) และไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine, DPG) จากบริษัท สยามเคมี จำกัด (มหาชน) (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิและทุติยภูมิร่วมกันในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ในกระบวนการผลิตยาง โดยมีสารเติม ผงเถ้าชานอ้อยจากโรงไฟฟ้าชีวมวล ที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท รวมผลอุตสาหกรรมนครสวรรค์ จำกัด (นครสวรรค์ ประเทศไทย) บริษัท โรงงาน

อุตสาหกรรมน้ำตาล ที.เอ็น. (ลพบุรี ประเทศไทย) และบริษัท โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลมิตรผล จำกัด (สุพรรณบุรี ประเทศไทย) โดยนำผงเถ้าชานอ้อยมาทำการคัดขนาดอนุภาคไม่เกิน 150 ไมโครเมตร แล้วทำการปรับปรุงผิวผงเถ้าชานอ้อยด้วยสารคู่ควบไซเลน Bis-(3-triethoxysilypropyl) tetrasulfide,  $[(C_2H_5O)_3-Si-(CH_2)_3-S_4-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$ , (Couplink 89) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Thongsang และ Sombatsompop (2007) และปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยแต่ละแหล่งที่ใช้ผสมในยางธรรมชาติ คือ 0, 15, 30 และ 45 ส่วนต่อปริมาณยางร้อยละ

### ขั้นตอนการผสมและเตรียมตัวอย่างชิ้นงานยางกับผงเถ้าชานอ้อย

ส่วนประกอบของสูตรสารประกอบยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรของสารประกอบยางธรรมชาติ

Ingredients	Contents (phr)
1. Natural rubber (grade STR 20)	100 part
2. Zinc oxide (ZnO)	5.0
3. Stearic acid	2.0
4. Mercaptobenzothiazole (MBT)	0.5
5. Diphenylguanidine (DPG)	0.2
6. Sulphur	3.0
7. Silica from bagasse ash	Varying from 0, 15, 30 and 45

ทำการบดผสมยางธรรมชาติและผงเถ้าชานอ้อยด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จากบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด ตามส่วนประกอบของสารประกอบยางธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 1 ที่เติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่ง เติมในยางธรรมชาติที่ปริมาณสัดส่วน 0, 15, 30 และ 45 ส่วนต่อปริมาณยางร้อยละ (คำนวณจากการที่ทราบว่าในผงเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของซิลิกา ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี) โดยใช้เวลาในการผสมที่ 30 นาที ที่อุณหภูมิในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส สารประกอบยางธรรมชาติที่มีผงเถ้าชานอ้อยเป็นสารเติมแต่ง ที่ได้ นำ ไปเตรียมขึ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) จากบริษัท LAB TECH จำกัด อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160 องศาเซลเซียส ใช้แรงดันแม่พิมพ์ที่ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยแม่พิมพ์ตัดเป็นรูปดัมเบลล์

### ขั้นตอนการปรับปรุงผิวผงเถ้าชานอ้อยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน

เตรียมสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เติมสารคู่ควบไซเลนลงในเอทานอล โดยเตรียมเอทานอลในอัตราส่วน 100 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักผงเถ้าชานอ้อย 100 กรัม และกวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำผงเถ้าชานอ้อยเทลงในสารละลายระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเอทานอล และใช้แท่งกวนให้ของผสมเข้ากันโดยใช้เวลา 15 นาที หลังจากนั้น นำผงเถ้าชานอ้อยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

## ขั้นตอนการพิสูจน์เอกลักษณ์ผงเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผงเถ้าชานอ้อยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ ยี่ห้อ JEOL (JSM-5800 ประเทศญี่ปุ่น) และทำการตัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อน ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผงเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer (Spectrum one ประเทศสหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงเถ้าชานอ้อยด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง XRF spectrometer ยี่ห้อ Bruker (S8 TIGER ประเทศเยอรมนี)

## ขั้นตอนการทดสอบสมบัติการไหล การบ่มสุก และสมบัติเชิงกล

นำยางคอมปาวด์ทดสอบหาเวลาการไหลและบ่มสุก ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) จากบริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 ประเทศไต้หวัน ที่อุณหภูมิทดสอบ 160°C ขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านมอดุลัส ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 และความต้านทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D624-00 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5kN ประเทศญี่ปุ่น และค่าความแข็งของขึ้นงานที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 (Shore A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจากบริษัท Tech Lock จำกัด

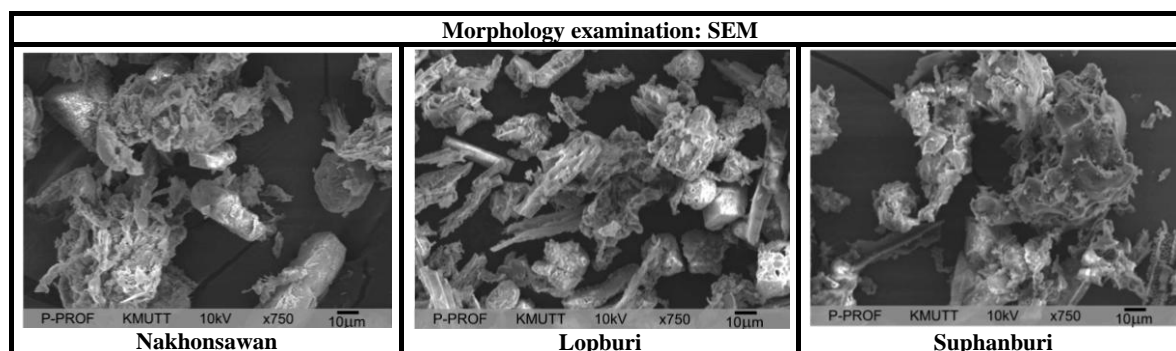
## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จาก ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่งดังแสดงในตารางที่ 2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผง เถ้าชานอ้อย ด้วยเทคนิค XRF พบว่าผงเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดนครสวรรค์ และสุพรรณบุรี มีซิลิกาไดออกไซด์ หรือ ซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักที่ปริมาณ 75% และผงเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดลพบุรีมีปริมาณซิลิกา 68% โดยมีกลุ่มโลหะออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบรอง เมื่อทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่งด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า ผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่งมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงถึงการมีหมู่ไซลาลอนที่เลขคลื่นในช่วง 3427.02-3434.44  $\text{cm}^{-1}$  และหมู่ไซลาลอนที่เลขคลื่นในช่วง 1090.65-1091.04  $\text{cm}^{-1}$  (Barbara H., 2004) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่นดังกล่าว มีความคล้ายกับพรีซิพิเตตซิลิกา (Thongsang และ Sombatsompop, 2006) ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่ง ส่วนใหญ่น้อยกว่า 150 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงขนาดอนุภาคผงเถ้าชานอ้อยที่ผู้วิจัยฯ สนใจศึกษาสมบัติการไหล การบ่มสุก และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยพบว่าผงเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดนครสวรรค์ และลพบุรีมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 75 - 150 ไมโครเมตร และผงเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดสุพรรณบุรีมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงน้อยกว่า 45 ไมโครเมตร ซึ่งสาเหตุที่ปริมาณซิลิกาและขนาดอนุภาคของผงเถ้าชานอ้อยในแต่ละแหล่งต่างกัน อาจเป็นผลจากอุณหภูมิการเผา ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลดังกล่าว (วรพงษ์, 2552) และเมื่อศึกษาภาพถ่ายโครงสร้างสัณฐานวิทยาของ ผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่งด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ผงเถ้าชานอ้อยทั้ง 3 แหล่ง มีลักษณะอนุภาคของผงเถ้าชานอ้อยเป็นแท่ง เหลี่ยม ในขณะที่ผงเถ้าชานอ้อยจังหวัดลพบุรีมีลักษณะค่อนข้างกลมปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย

ตารางที่ 2 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงเถ้าชานอ้อยจากแหล่งจังหวัดนครสวรรค์ ลพบุรี และสุพรรณบุรี

Characterization method	Bagasse ash source (province)		
	Nakhonsawan	Lopburi	Suphanburi
<b>Functional group investigation: FT-IR</b>	<b>Wavenumber (cm<sup>-1</sup>)</b>		
Si-OH stretching (Silanol group)	3427.02	3434.32	3434.44
Si-O-Si stretching (Siloxane group)	1090.65	1090.92	1091.04
<b>Particle size distribution measurement (µm)</b>	<b>Content (%)</b>		
< 45	21.30	28.10	43.08
45 - 75	14.10	20.20	18.66
75 - 150	22.68	38.26	20.90
150 - 210	7.98	6.20	2.98
210 - 300	4.94	4.92	3.28
> 300	29.00	2.32	11.10
<b>Chemical composition investigation: XRF</b>	<b>Chemical composition (%)</b>		
Silicon oxide (SiO <sub>2</sub> )	75.10	68.40	75.40
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.38	8.76	4.11
Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.78	4.02	1.22
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	2.45	2.36	2.66
Calcium oxide (CaO)	2.62	8.60	2.19
Other metal oxide (TiO <sub>2</sub> , MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , SO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, MnO, BaO and ZrO <sub>2</sub> )	2.97	3.85	2.94

ตารางที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของผงเถ้าชานอ้อยจากแหล่งจังหวัดนครสวรรค์ ลพบุรี และสุพรรณบุรี



จากผลการตรวจสอบสมบัติการไหล การบ่มสุก และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติม ผงเถ้าชานอ้อย ดังแสดงในตารางที่ 4 อธิบายได้ว่าเมื่อเติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวก่อนการบ่มสุก และเวลาในการบ่มสุก ส่วนค่าผลต่างแรงบิด มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงอันตรกิริยาระหว่างยางกับปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะข้ามเพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่ง ( Rigidity) ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อย และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยจังหวัดนครสวรรค์ ที่ปริมาณ 15 ส่วนในยางร้อยละ 100 ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกัน เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของผงเถ้าชานอ้อยจังหวัดนครสวรรค์ มีขนาดอนุภาค ส่วนใหญ่กระจายตัวใกล้เคียงกันในช่วงที่ทำการศึกษา ทำให้ได้สมบัติที่ดีกว่าอีกสองแหล่ง และเห็นได้ชัดว่า การเติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยจังหวัดสุพรรณบุรีที่มีขนาดเล็กมาก อาจทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน (Agglomerate) ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างกันของปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อย ( Filler – filler interaction) สูงกว่าอันตรกิริยาระหว่างยางกับปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อย ( Rubber – filler interaction) จึงทำให้สมบัติดีด้อยกว่า นอกจากนี้สมบัติด้านมอดุลัส และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 สมบัติการไหล บ่มสุก และสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

Natural rubber composite properties	Bagasse ash source (province) and Silica content in bagasse ash (phr)									
	0	Nakhonsawan			Lopburi			Suphanburi		
		15	30	45	15	30	45	15	30	45
<b>Cure characteristic of NR/BASi compound</b>										
Scorch time (min)	1.30 ±0.04	1.09 ±0.08	1.14 ±0.04	1.34 ±0.03	1.27 ±0.02	1.18 ±0.08	1.31 ±0.08	1.27 ±0.09	1.33 ±0.04	1.22 ±0.03
Cure time (min)	5.38 ±0.09	5.43 ±0.11	5.45 ±0.03	5.59 ±0.03	5.41 ±0.04	5.25 ±0.08	5.24 ±0.08	5.47 ±0.11	5.50 ±0.06	5.40 ±0.02
Delta torque (dN m)	55.5 ±0.3	62.1 ±0.6	72.0 ±0.7	78.7 ±0.5	65.8 ±0.3	78.3 ±0.4	84.7 ±0.9	61.9 ±1.7	69.0 ±0.2	77.9 ±0.3
<b>Mechanical properties of NR/BASi compound</b>										
Modulus at100% elongation (MPa)	0.9 ±0.01	1.2 ±0.02	1.4 ±0.03	1.6 ±0.04	1.3 ±0.02	1.7 ±0.03	1.8 ±0.03	1.2 ±0.05	1.4 ±0.05	1.5 ±0.06
Tensile strength (MPa)	17.0 ±1.3	19.5 ±0.8	14.5 ±0.6	10.6 ±0.3	19.2 ±1.0	14.4 ±0.6	9.5 ±0.4	20.1 ±0.7	14.5 ±0.3	10.2 ±0.7
Tear strength (kN/m)	36.1 ±0.8	33.4 ±3.8	27.4 ±2.5	34.8 ±2.8	29.5 ±1.4	26.1 ±1.9	30.9 ±2.2	26.0 ±1.6	24.9 ±2.4	34.0 ±2.6
Elongation at break (%)	1053 ±26	1042 ±13	876 ±12	711 ±21	988 ±21	784 ±24	623 ±18	1062 ±13	940 ±22	755 ±28
Hardness (Shore A)	46 ±1	49 ±1	53 ±1	56 ±1	48 ±1	55 ±1	58 ±1	47 ±1	52 ±1	55 ±1

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการนำสารตัวเติมผงเถ้าชานอ้อยมาเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ได้ดังนี้

1. ผงเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดนครสวรรค์ ลพบุรี และสุพรรณบุรี มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักที่ปริมาณ 75.10% 68.40% และ 75.40% ตามลำดับ ปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยทั้งสามแหล่ง มีหมู่ฟังก์ชันหลักที่เหมือนกับพรีซิพิตเตดซิลิกา ที่มีอนุภาคส่วนใหญ่มีน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร
2. ปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ ไม่ส่งผลต่อเวลาการไหลและการบ่มสุก
3. สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อย ทางด้านมอดูลัสและค่าความแข็งมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การยืดตัว มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น
4. การเติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าชานอ้อยแหล่งจังหวัดนครสวรรค์ ไม่เกิน 15 ส่วนในยางร้อยละ ให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว., RTA5280008) ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทุนวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ บริษัท รวมผลอุตสาหกรรมนครสวรรค์ จำกัด (นครสวรรค์ ประเทศไทย) บริษัท โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล ที.เอ็น. (ลพบุรี ประเทศไทย) บริษัท โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลมิตรผล จำกัด (สุพรรณบุรี ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงเถ้าชานอ้อย และบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารเคมียาง

## เอกสารอ้างอิง

- Waddell, W.H. and Evans, L.R. 1996. Use of nonblack fillers in tire compounds. Rubber. Chem. Tech. 69(3): 377-423.
- Wolff, S. 1996. Chemical aspects of rubber reinforcement by fillers. Rubber. Chem. Tech. 69(3): 325-346.
- 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): 2119-2130.
- ณพงษ์ศรี ดิขิตศรีไพบูลย์. 2548. การพัฒนาเถ้าขาน้อยเพื่อเป็นวัสดุปอชโซลาน . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Thongsang, S. and Sombatsompop, N. 2007. Reinforcement of Natural Rubber with Fly Ash from Different Local Sources. Suranaree J. Sci. Technol. 14(1): 77-89.
- Barbara H. Stuart. 2004. Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate. Chichester. England. p 84.
- Thongsang, S. and Sombatsompop, N. 2006. Effect of NaOH and Si69 Treatments on the Properties of Fly Ash/Natural Rubber Composites. Polym. Composite. 27(1): 30-40.
- วรพงษ์ พัทยาวรรณ และคณะ. 2552. การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอกจากเถ้าลอยขาน้อย . บทความการประชุมวิชาการเรื่อง สภาวะโลกร้อน : ความหลากหลายทางชีวภาพและการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน