

## การนำเถ้าแกลบข้าวมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ Utilization of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber

จิราภรณ์ อินทร์เกลี้ยง<sup>1</sup> และ ธันยญา เสาวภาคย์<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม  
\*thanunya@npru.ac.th and bbiirddtt@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเถ้าแกลบข้าวซึ่งเป็นของเหลือปริมาณมากจากโรงสีข้าว มาเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าแกลบข้าว จากการศึกษาพบว่าเถ้าแกลบข้าวนี้มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณที่สูง ซึ่งซิลิกานี้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง การเตรียมซิลิกาเริ่มจากการนำเถ้าแกลบมาทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก นำเถ้าแกลบที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ได้เป็นเถ้าแกลบสีขาว เมื่อทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบด้วยเทคนิค XRF และ XRD พบว่า เถ้าแกลบประกอบด้วยซิลิกาถึงร้อยละ 90 และมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน จากนั้นนำซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ได้ไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติโดยการผสมด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง ศึกษาลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์ทดสอบความทนต่อแรงดึง และความทนต่อตัวทำละลายของยางคงรูป จากการทดลองพบว่า การใช้ซิลิกาจากเถ้าแกลบสามารถลดเวลาคงรูปได้ ส่วนแรงบิดสูงสุดซึ่งแสดงถึงความแข็งของยางนั้นก็เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลของมอดูลัสที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้น้อยลง นอกจากนั้นความทนต่อการบวมในตัวทำละลายเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลต่างของแรงบิด ในขณะที่ความทนต่อแรงดึงของยางคงรูปนั้นลดลง

**คำสำคัญ:** เถ้าแกลบข้าว, ซิลิกา, สารตัวเติม, ยางธรรมชาติ

### Abstract

*This article aimed to add value of the rice husk which is waste from the rice-mill agricultural industrial. In this study, it was found that rice husk ash was rich in silica, an important substance in reinforcing the natural rubber. The silica could be prepared by pretreatment with hydrochloric acid and calcinations at 700 °C. The white rice husk ash (WRH) was obtained. The XRF and XRD results showed that WRA containing large amount of silica (90 %) and amorphous structure. In compounding natural rubber (NR), the WRA acted as a filler was mixed into NR using 2-roll mill. Cure characteristic of NR compounds, tensile strength and swelling resistance of NR vulcanizates were also investigated. The incorporation of WRA to NR played an important role in decreasing cure time and in enhancing maximum torque related with stiffness because of the difficult movement of rubber chains. Furthermore, swelling resistance of rubber vulcanizate corresponding with torque difference was developed whereas the slight reduction in tensile strength of the vulcanizate was observed.*

**Keywords:** rice husk, silica, filler, natural rubber

### 1. บทนำ

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR) เป็นสารประกอบในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยหน่วยย่อยชนิดเดียว มีสมบัติที่สำคัญคือความยืดหยุ่นแต่โดยปกติแล้วยางมีความแข็งแรงจะไม่สูงมากจึงต้องมีการเติมสารตัวเติม

(filler) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง สารตัวเติม (Filler) คือ สารที่เติมลงไปในยาง เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้นหรือเพื่อลดต้นทุนการผลิตลดความหนืดตัวของยางดิบ และยังใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง โดยสารตัวเติมที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับยาง คือ คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) และซิลิกา (Silica) แต่ถึงอย่างไรก็ตามสารตัวเติมที่ใช้ก็มักจะมาจากการสังเคราะห์จากสารเคมีหรือกระบวนการเผาไหม้ของปิโตรเลียมและก๊าซ-ธรรมชาติซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม [1,2]

แกลบข้าว (Rice husk) เป็นส่วนที่เหลือจากการผลิตข้าวสาร แกลบจัดเป็นวัสดุชีวมวลที่สำคัญที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในการอบข้าวและใช้ในการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแกลบพบว่าปริมาณซิลิกา (Silica, SiO<sub>2</sub>) เป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 70-90% และแกลบมีความพรุน (porosity) มาก น้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมาก จากที่กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นว่าแกลบข้าวนั้นอุดมไปด้วยซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมสำคัญที่ใช้ในการเสริมแรงยางธรรมชาติ โดยในปัจจุบันมีแนวโน้มของการนำวัสดุชีวมวลมาใช้ทดแทนสารตัวเติมในทางการค้าซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ [3-5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แกลบข้าวเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ในยาง และทดแทนซิลิกาที่ใช้ในปัจจุบันเพื่อเป็นการลดต้นทุนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาการเตรียมรวมทั้งลักษณะทางกายภาพและเคมีของซิลิกาจากแกลบข้าว นอกจากนี้ศึกษาผลของการใช้ซิลิกาจากแกลบข้าวเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ ที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ ได้แก่ ลักษณะคงรูป (Cure characteristics) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความทนต่อการบวมในตัวทำละลาย (Swelling resistance)

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การเตรียมซิลิกาจากแกลบ

2.1.1 นำแกลบทำปฏิกิริยากับกรด HCl ที่ความเข้มข้น 1M จากนั้น ให้ความร้อน 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปรับ pH จนมีสถานะเป็นกลาง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

2.1.2 นำแกลบที่ได้จากขั้นตอน 2.1.1 มาเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนที่ได้จากการเผาไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF) ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ ศึกษาสัณฐานวิทยาโดย Scanning electron microscope (SEM)

### 2.2 การผสมยางธรรมชาติกับซิลิกาจากแกลบ

เตรียมยางธรรมชาติและสารเคมีที่ใช้แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้ ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ กรดสเตียริก (Stearic acid) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ทีบีบีเอส (N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulfonamide: TBBS) และสารคงรูปใช้กำมะถัน (Sulphur) จากนั้นทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (2-roll mill) โดยการกรีดและพับเพื่อให้สารตัวเติม (ซิลิกาจากแกลบและซิลิกาเกรดการค้า: Hisil-233) มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยางคอมพาวด์

### ตารางที่ 1 สูตรการผสมและปริมาณสารเคมียาง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr*)		
	Control	ซิลิกาจากแกลบ (WRH)	ซิลิกาเกรดการค้า (Hisil-233)
Natural rubber (STR 5L)	100.0	100.0	100.0
Zinc oxide	4.0	4.0	4.0
Stearic acid	2.0	2.0	2.0
Filler	0.0	25.0	25.0
TBBS	2.25	2.25	2.25
Sulphur	0.75	0.75	0.75

\* phr หมายถึง ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

### 2.3 การศึกษาลักษณะการคงรูป (Cure characteristics), ขึ้นรูปและเตรียมชิ้นงานยางคงรูป

ทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์ ลักษณะการคงรูป ได้แก่ เวลาสกอร์ช (scorch time : $t_{s2}$ ) , เวลาคงรูป (cure time : $t_{90}$ ) , แรงบิด (Torque) สูงสุดและต่ำสุด ( $M_H$ ,  $M_L$ ) และผลต่างแรงบิด ( $M_H - M_L$ ) ของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) นำยางคอมพาวด์ ไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยแม่พิมพ์ Compression moulding machine) ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเวลา  $t_{90}$  ที่ได้จากการทดสอบหาเวลาการคงรูป

### 2.4 ทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางคงรูป (Tensile property)

สมบัติความทนต่อแรงดึง ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength), ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่ามอดูลัส (Modulus) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine โดยใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงานทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

### 2.5 ทดสอบความทนต่อการบวมในตัวทำละลายตัวของยางคงรูป (Swelling resistance)

ทดสอบโดยการตัดและชั่งน้ำหนักของชิ้นงานยางคงรูป จากนั้นนำไปแช่ในตัวทำละลายคือ โทลูอีน เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปคำนวณหาอัตราส่วนการบวมตัวของชิ้นงานในตัวทำละลาย (swelling ratio) ตามสมการที่ (1) ซึ่งบ่งบอกถึงการบวมตัวที่เกิดขึ้นของยางคงรูปซึ่งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่เกิดขึ้นในยางคงรูป (Crosslink density) [6]

$$Q = (W_s - W_0) / W_0 \quad (1)$$

เมื่อ  $Q$  คือ อัตราส่วนการบวมตัวของชิ้นงานในตัวทำละลาย (swelling ratio)

$1/Q$  คือ ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง (crosslink density)

$W_0$ ,  $W_s$  คือ น้ำหนักก่อนแช่และหลังแช่ในโทลูอีน (g)

## 3. ผลการวิจัย

### 3.1 ผลการวิเคราะห์เถ้าแกลบข้าว

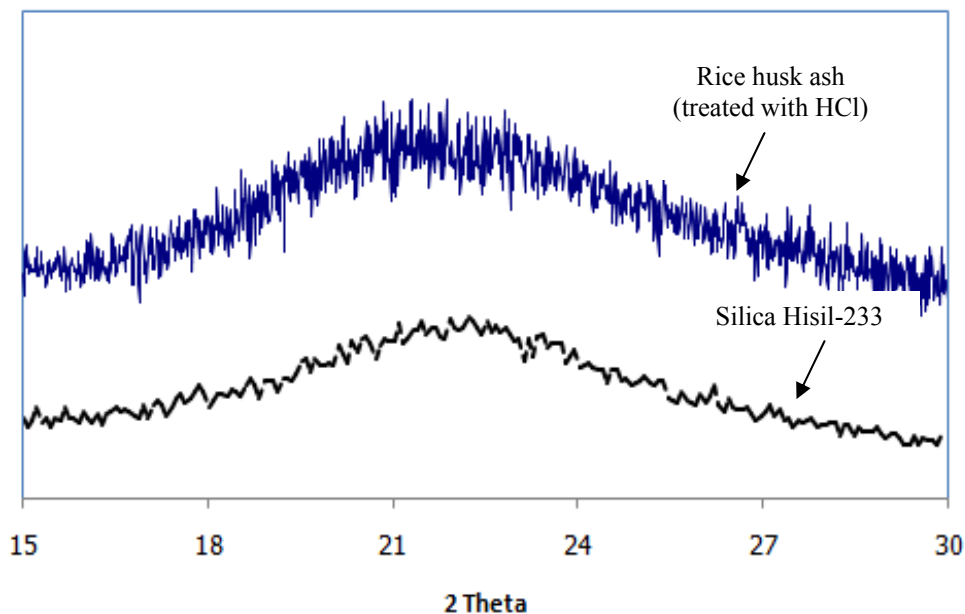
หลังจากที่ทำการเผาเถ้าแกลบที่อุณหภูมิ 700 °C แล้วสิ่งที่ได้ คือ เถ้าแกลบข้าว ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ผ่านและไม่ผ่านปรับปรุงด้วยกรด HCl ด้วยเทคนิค XRF แสดงดังตารางที่ 2 เถ้าแกลบทั้งสองกลุ่มพบองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกา ( $SiO_2$ ) และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น CaO, MnO, ZnO และ  $Fe_2O_3$  เป็นต้น เถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดพบว่าปริมาณของซิลิกาสูงกว่าที่ไม่ผ่านการปรับปรุง น่าจะเป็นผลจากการชะล้างโลหะอื่นๆที่มีอยู่ในเถ้าแกลบออกไปโดยโลหะเหล่านั้นสามารถทำปฏิกิริยากับกรด HCl ได้เป็นสารประกอบคลอไรด์ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ [7]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C

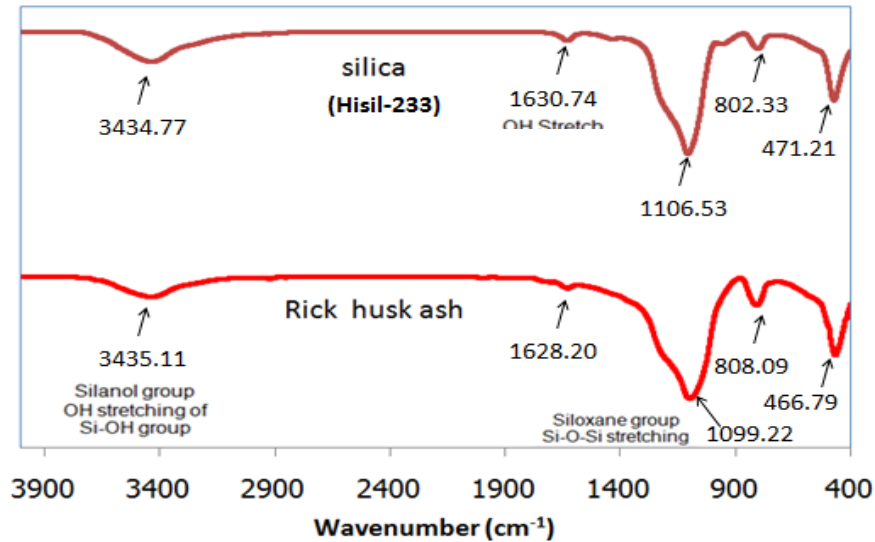
Composition	Content (%)	
	Untreated WRH	Treated WRH with HCl
SiO <sub>2</sub>	97.942	99.861
SO <sub>3</sub>	0.72	-
K <sub>2</sub> O	0.389	0.012
CaO	0.818	0.109
TiO <sub>2</sub>	0.006	-
MnO	0.069	0.002
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.043	0.01
CuO	0.004	0.002
ZnO	0.008	0.002

ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกของเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด HCl แสดงดังรูปภาพที่ 1 จากการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้นมีลักษณะเป็นอสัณฐานคือการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในโครงสร้างของซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าแกลบนั้นมีลักษณะไม่เป็นระเบียบซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ XRD ของซิลิกาเกรดการค้า (Hisil- 233) เช่นเดียวกันโดยจะพบพีคกว้างที่ตำแหน่ง 2 Theta ประมาณ 22-23 ซึ่งเป็นเฟสของซิลิกาอสัณฐาน [8] นอกจากนี้เมื่อนำเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด HCl ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปภาพที่ 2 พบว่า ตรวจพบการปรากฏของสัญญาณอย่างเห็นได้ชัดของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่ตำแหน่ง 3400-3500 cm<sup>-1</sup> นอกจากนั้นยัง ปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันซิลอกเซน (Si-O-Si) ที่ตำแหน่ง 1050-1100 cm<sup>-1</sup> และ Si-O bond rocking ที่ตำแหน่ง 460-470 cm<sup>-1</sup> จากสามพีคแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างหลักของซิลิกาที่มีอยู่ในเถ้าแกลบ เช่นเดียวกับซิลิกาเกรดการค้า [9-10]

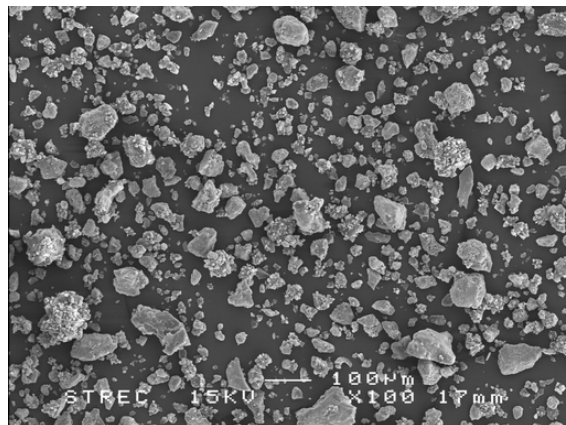
เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของซิลิกาจากเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรด HCl จากการวิเคราะห์ด้วย SEM แสดงดังรูปภาพที่ 3 พบว่า มีลักษณะการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่มีรูปร่างไม่แน่นอน



รูปภาพที่ 1 ผลการวิเคราะห์เฟสของเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดและเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า



รูปภาพที่ 2 ผลการวิเคราะห์ FTIR spectrum ของเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดและเผาที่อุณหภูมิ 700 °C เปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า



รูปภาพที่ 3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเถ้าแกลบที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดและเผาที่อุณหภูมิ 700 °C

### 3.2 ผลของการเติมเถ้าแกลบต่อสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ (Cure characteristic)

ตารางที่ 3 แสดงผลของการเติมเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับ การเติมซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ จากตารางแสดงให้เห็นว่า การเติมซิลิกาลงไปไม่ว่าจะเป็นเถ้าแกลบเผาหรือ ซิลิกา เกรดการค้าส่งผลให้แรงบิดสูงสุด (Maximum torque :  $M_H$ ) สูงขึ้น ซึ่งแสดงถึงความแข็งของยางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมสารตัวเติมลงไปมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้น้อยลงจึงทำให้ยางคงรูปมีความแข็งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับกับค่าผลต่างของแรงบิด (Torque difference :  $M_H - M_L$ ) ของยางคอมพาวด์ที่เติมซิลิกาทั้งสองชนิดนั้น ก็สูงกว่ายางคอมพาวด์ที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม (Control) ซึ่งค่าผลต่างของแรงบิดบ่งบอกถึงมอดูลัสของยางที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม (ซิลิกา) และการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่เพิ่มขึ้นด้วย (crosslink density) แต่ถึงอย่างไรก็ตามซิลิกาเกรดการค้ายังคงให้ค่าแรงบิดที่สูงกว่า ซิลิกาจากแกลบ นอกจากนั้นสิ่งที่น่าสนใจคือ การลดลงของเวลาสกอร์ช ( $t_2$ ) และเวลาในการคงรูป ( $t_{90}$ ) เมื่อใช้ซิลิกาจากเถ้าแกลบเป็นสารตัวเติม อาจเป็นเพราะว่านอกจากส่วนของซิลิกาแล้วยังมีส่วนของโลหะออกไซด์บางประเภท ซึ่งมีส่วนช่วยเร่งให้อัตราการคงรูปนั้นเกิดได้เร็วขึ้น การใช้เวลาในการคงรูปลดลงนั้นสามารถก่อให้เกิดผลดีต่อระบบการขึ้นรูป ทำให้สามารถลดระยะเวลา ลดพลังงาน ในการเตรียมชิ้นงานได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ซิลิกาเกรด

การค้ำมีระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปค่อนข้างยาวนาน ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาเกิดการค้ำมีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากซึ่งสามารถดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ส่งผลให้การคงรูปใช้เวลานานขึ้น [11]

ตารางที่ 3 สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์

	Control	ซิลิกาจากแกลบ (WRH)	ซิลิกาเกรดการค้า (Hisil-233)
Maximum torque , $M_H$ (dN.m)	4.94	5.54	7.64
Minimum torque , $M_L$ (dN.m)	0.71	0.99	1.27
Torque difference , $M_H - M_L$ (dN.m)	4.23	4.55	6.37
Scorch time, $t_{s2}$ (min)	11.22±0.35	7.80±0.13	15.84±0.36
Cure time, $t_{90}$ (min)	13.70±0.45	11.41±0.17	20.87±0.26

### 3.3 ผลของการเติมเถ้าแกลบต่อสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางคงรูป (Tensile property)

ผลของการเติมเถ้าแกลบเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้าลงในยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดึง ได้แก่ ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) แสดงในตารางที่ 4 จากตารางเห็นได้ว่ามอดูลัส เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดไม่ว่าจะเป็นเถ้าแกลบซิลิกา หรือ ซิลิกาเกรดการค้า สอดคล้องกับผลของแรงบิดแสดงในตารางที่ 3 แต่อย่างไรก็ตาม การเติมเถ้าแกลบลงในยางธรรมชาติส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด ลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้าพบว่าเมื่อใส่ซิลิกาเกรดการค้าลงในยางธรรมชาติความทนต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นั่นอาจจะเป็นเพราะเถ้าแกลบมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าซิลิกาเกรดการค้าจึงส่งผลให้การกระจายตัวในยางธรรมชาติไม่ดี

ตารางที่ 4 สมบัติความทนต่อแรงดึงของยางคงรูป

	Control	ซิลิกาจากแกลบ (WRH)	ซิลิกาเกรดการค้า (Hisil-233)
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	21.4±1.1	18.0±0.5	31.6±0.9
ระยะยืด ณ จุดขาด (%)	740±13	719±10	790±10
300 % มอดูลัส (MPa)	1.48±0.02	2.23±0.05	2.65±0.08

### 3.4 ผลของการเติมเถ้าแกลบต่อความทนต่อการบวมในตัวทำละลาย (Swelling resistance)

อัตราส่วนการบวมในตัวทำละลาย (swelling ratio) บ่งบอกถึงความทนทานต่อการบวมในสารละลาย จากผลการทดลองในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนการบวมในตัวทำละลายมีค่าสูงที่สุด เมื่อไม่มีการเติมสารตัวเติม นั่นแสดงให้เห็นว่าความทนทานต่อการบวมในสารละลายต่ำที่สุด ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีการใช้สารตัวเติมทั้งสองชนิดส่งผลให้ความทนต่อการบวมในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง (crosslink density) ซึ่งสอดคล้องกับผลของผลต่างของแรงบิดแสดงในตารางที่ 3 [12]

ตารางที่ 5 อัตราส่วนการบวมในตัวทำละลาย (swelling ratio) และ ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่เกิดขึ้นในยางคงรูป (Crosslink density)

	Control	ซิลิกาจากแกลบ (WRH)	ซิลิกาเกรดการค้า (Hisil-233)
swelling ratio (Q)	2.4146	1.5703	1.3900
crosslink density (1/Q)	0.4142	0.6368	0.7194

## 4. สรุปผลการทดลอง

การเตรียมซิลิกาเริ่มจากการนำแกลบมาทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริก นำแกลบที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิสูง เมื่อทำการวิเคราะห์เถ้าแกลบขาวที่ได้ด้วยเทคนิค XRF และ XRD พบว่า เถ้าแกลบประกอบด้วยซิลิกาถึงร้อยละ 90 และมีลักษณะ

โครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของในแก้วกลบขาวโดย เทคนิค FTIR พบว่ามีลักษณะเหมือนกับซิลิกาเกรดการค้า เมื่อนำซิลิกาจากแก้วกลบไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ พบว่า การใช้ซิลิกาจากแก้วกลบสามารถลดเวลาการบ่มของยางได้ ส่งผลให้ประหยัดเวลาและพลังงานในการขึ้นรูป ส่วนแรงบิดสูงสุดซึ่งแสดงถึงความแข็งของยางนั้นก็เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับผลของมอดูลัสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้น้อยลง นอกจากนั้นความทนต่อการบวมในตัวทำละลายก็ดีขึ้นเนื่องจากปริมาณของปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่เกิดขึ้นในยางคงรูปซึ่งสอดคล้องกับผลต่างของแรงบิด ในขณะที่ความทนต่อแรงดึงของยางคงรูปนั้นลดลง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงสีข้าวเจริญพาณิชย์ อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์แลกเปลี่ยนข้อมูลในงานวิจัยนี้ , ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF, ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีในการผสมยาง และ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย (ทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2557 โครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์ฯ) ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปุญญาณิช อินทรพิพัฒน์. (2555). สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 14 (1), 32-43.
- [2] Kim, J.H. and Jeong, H.Y. (2005). A study on the material properties and fatigue lift of natural rubber with different carbon blacks. **International Journal of Fatigue**. 27, 263-272.
- [3] Ismail, H., Nasaruddin, M.N. and Rozman, H.D. (1999). The effect of multifunctional additive in white rice husk ash filled natural rubber compounds. **European Polymer Journal**. 35, 1429-1437.
- [4] Della, V.P., Kuhn, I. and Houtza, D. (2002) Rice husk ash as an alternate source for active silica production. **Materials Letters**. 57, 818-821.
- [5] ช. วายกรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฐ์, สรัญญา พลอยประดับ และ ปิยะพงศ์ เทพกฤษณ์. (2008). ผลของยางธรรมชาติเหลวตัดแปรในยางคอมพาวด์ที่เติมแก้วกลบดำ. **NU Science Journal**. 5 (1), 92-107
- [6] Rattanasom, N., Saowapark, T. and Deeprasertkul, C. (2007). Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. **Polymer Testing**. 26, 369–377.
- [7] Chakraverty, A., Mishra, P., and Banerjee, H.D. (1988). Investigation of combustion of raw and acid-leaching rice husk for production of pure amorphous white silica. **Journal of Materials Science**. 23, 21-24. [8] Saowapark, T. , Sae-oui ,P., Sombatsompop, N. and Sirisinha C.(2012). Storage instability of fly ash filled natural rubber compounds. **Applied Rheology**. 22(5), 55414-55422.
- [9] Rami, A.O. and Houssam E.R. (2009). Synthesis and characterization by FTIR spectroscopy of silica aerogels prepared using several  $\text{Si}(\text{OR})_4$  and  $\text{R}^-\text{Si}(\text{OR})_3$  precursors. **Journal of Molecular Structure**. 919, 140-145.
- [10] Wunpen, C., Withawat M., Ulchulee K., Nutthaya R. and Witold B. (2011). Vulcanization characteristics and dynamic mechanical behavior of natural rubber reinforced with silane modified silica. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**. 11, 2018-2024.
- [11] Okel, T.A. and Waddell, W.H. (1994). Silica properties/rubber performance correlation. Carbon black-filled rubber compounds. **Rubber Chemistry and Technology**. 67, 217-236.
- [12] Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K. (2006). Role of silane coupling agents on properties of silica-filled polychloroprene. **European Polymer Journal**. 42, 479-486.