ผลของผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

จินตนา ภาถีย์[1] ณัฐมณฑ์ ทับวัล[1] และ ธนัญญา เสาวภาคย์[1,2] *

[1]สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]ศูนย์วิจัยวัสดุธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากวัสดุธรรมชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
*ผู้รับผิดชอบบทความ: bbiirrddtt@hotmail.com, thanunya@webmail.npru.ac.th

บทคัดย่อ

กากน้ำตาลที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย ในงานวิจัยนี้ได้นำกากน้ำตาลมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ เริ่มต้นจากการเตรียมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล จากนั้นนำผงคาร์บอนมากระตุ้นด้วย H_3PO_4 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:4 จากภาพถ่าย SEM พบว่าพื้นผิวของผงคาร์บอนที่ได้จากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับผงคาร์บอนที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น เมื่อนำผงคาร์บอนที่ได้จากกากน้ำตาลไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในปริมาณ 10 phr พบว่า เวลาที่ใช้ในการคงรูปเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อตัวทำละลายของยางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 มีสมบัติที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ไม่ผ่านการกระตุ้น อย่างไรก็ตามพบว่าสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยH_3PO_4 ยังด้อยกว่ายางธรรมชาติที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม

คำสำคัญ: กากน้ำตาล สารตัวเติม ยางธรรมชาติ สมบัติเชิงกล

Effect of H_3PO_4 Activated Molasses Carbon on Properties of Natural Rubber

Jintana Pathee [1], Nattamon Tapwan, and Thanunya Saowapark[1,2 *]

[1]Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University
[2]Research Center of Research Center of Natural Materials and Products Chemistry Program, Nakhon Pathom Rajabhat University Muang
*corresponding author: email bbiirrddtt@hotmail.com, thanunya@webmail.npru.ac.th

Abstract

Molasses which is a by-product of sugar production process or agricultural wastes. In this research, molasses was used as a filler in natural rubber (NR). Initially, molasses carbon (MC) was prepared from molasses. Obtained MC was then activated with H_3PO_4 at ratio 1:4. From the results, it was found the surface roughness of the H_3PO_4 activated MC are enhanced when compared with unmodified MC. H_3PO_4 activated MC was used as filler in NR with the amount of 10 phr. It was found that incorporate H_3PO_4 activated MC in NR increases in cure time of NR. Additionally, both tensile strength and swelling resistance of H_3PO_4 activated MC filled with NR vulcanizates are improved when compared with NR filled with unmodified MC. However, mechanical properties of H_3PO_4 activated MC filled with NR vulcanizate is not better than that filled with carbon black.

Keywords: molasses, filler, natural rubber, mechanical properties

1. บทนำ

ยางธรรมชาติ (natural rubber) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่น (elastic) สูง มีความเหนียว (toughness) แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีแต่อาจจะยังไม่เพียงพอต่อการนำไปผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไป หนึ่งในสารเหล่านั้นก็คือ สารตัวเติม (filler) ในปัจจุบันจึงมีการนำส่วนที่เหลือใช้ทางการเกษตรและของเสียบางประเภทจากอุตสาหกรรม มาเป็นสารตัวเติมเพื่อทดแทนสารตัวเติมที่มาจากการสังเคราะห์ (ปุญญานิช อินทรพิพัฒน์, 2555:32) กากน้ำตาลหรือโมลาส (molasses) เป็นของเหลวลักษณะเหนียวข้นสีน้ำตาลดำซึ่งเป็นผลพลอยจากการผลิตน้ำตาลจากอ้อย เมื่อนำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนทำให้เป็นผงคาร์บอน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติม (Moryadee P et al., 2018:145) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่ปรับสภาพของผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลโดยการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 เพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมและศึกษาสมบัติผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล

นำกากน้ำตาลให้ความร้อนโดยใช้อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนกระทั่งได้กากน้ำตาลแห้ง นำกากน้ำตาลแห้งไปให้ความร้อนภายใต้ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลาที่ 4 ชั่วโมง จะได้ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล จากนั้นนำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4 ภายใต้ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปรับ pH จนเป็นกลาง (ประมาณ 7) นำไปอบให้แห้งจะได้ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 จากนั้นนำมาศึกษาสัณฐานวิทยาโดย Scanning electron microscope (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วย X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

2.2 การผสมยางธรรมชาติ สารเคมี และผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล

ผสมยางและสารเคมีโดยมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 1 โดย phr หมายถึง ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ Zinc oxide, Stearic acid ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator), Filler เป็นสารตัวเติม ซึ่งในงานวิจัยนี้ คือ ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (molasses carbon: MC) ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 (H_3PO_4 activated MC) และผงเขม่าดำเกรดการค้า N550 (Carbon black: CB) N-tert-butyl-2-benzothiazyl sulfenamide (TBBS) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) TBBS และ Sulphur ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) โดยใช้เครื่อง Two roll-mill ในการผสมเป็นเวลา 9 นาที

ตารางที่ 1 สูตรการผสมยางคอมพาวด์

องค์ประกอบ	part per hundred rubber (phr)*			
	control	MC	H_3PO_4 activated MC	CB
Rubber	100	100	100	100
Zinc Oxide	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2
Filler	0	10	10	10
TBBS	2.25	2.25	2.25	2.25
Sulphur	0.75	0.75	0.75	0.75

2.3 การศึกษาลักษณะการคงรูป (cure characteristics)

ทดสอบเวลาคงรูป (cure time :t_{90}) ของยางคอมพาวด์ ของยางคอมพาวด์ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) นำยางคอมพาวด์ ไปขึ้นรูปชิ้นทดสอบด้วยแม่พิมพ์ (compression moulding machine) ที่อุณหภูมิ 150 ℃ ด้วยเวลา t_{90} ที่ได้จากการทดสอบหาเวลาการคงรูป เพื่อทำการทดสอบต่อไป

2.4 ทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของยางคงรูป (tensile property and tear strength)

สมบัติความทนต่อแรงดึง ได้แก่ ความต้านต่อแรงดึง (tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) และความต้านทานต่อแรงฉีกขาด ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624 (Die B) ด้วยเครื่อง universal testing machine

2.5 ทดสอบความต้านทานต่อการบวมในตัวทำละลายตัวของยางคงรูป (swelling resistance)

ทดสอบโดยการตัดและชั่งน้ำหนักของชิ้นงานยางคงรูป จากนั้นนำไปแช่ในตัวทำละลายคือ โทลูอีน เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปคำนวณหาอัตราส่วนการบวมตัวของชิ้นงานในตัวทำละลาย (swelling ratio) ตามสมการที่ (1) ซึ่งบ่งบอกถึงการบวมตัวที่เกิดขึ้นของยางคงรูปซึ่งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางที่เกิดขึ้นในยางคงรูป (crossink density)

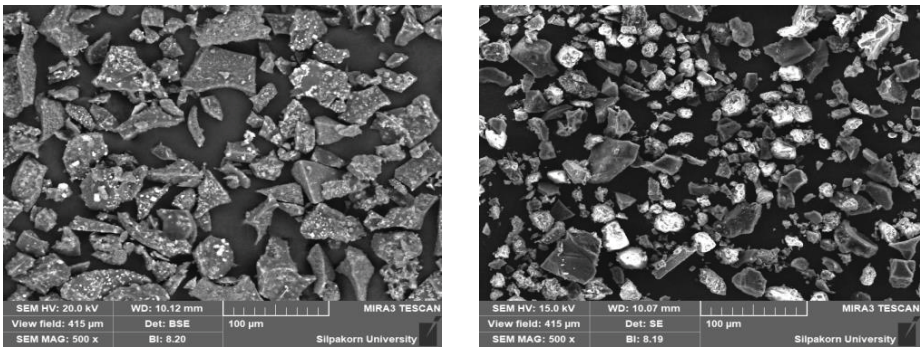
$$Q = (W_s - W_0) / W_0 \qquad (1)$$

เมื่อ Q *หมายถึง อัตราส่วนการบวมตัวของชิ้นงานในตัวทำละลาย (swelling ratio)*
$1/Q$ *หมายถึง ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง (crossink density)*
W_0 , W_s *หมายถึง น้ำหนักก่อนแช่และหลังแช่ในโทลูอีน (g)*

3. ผลการวิจัย

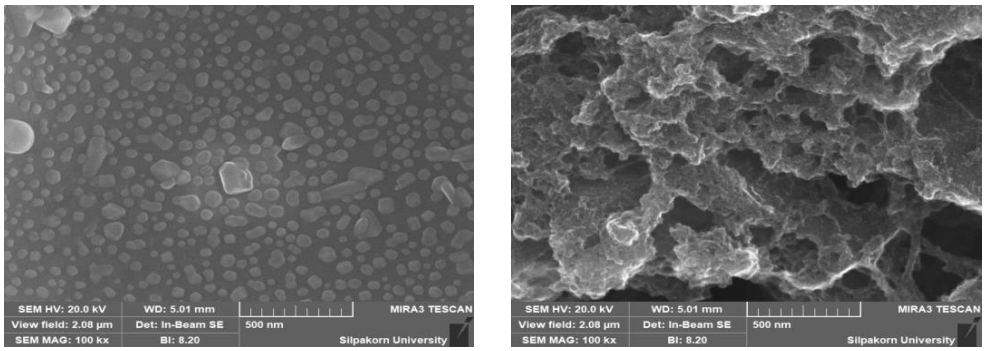
3.1 ผลการวิเคราะห์ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4

เมื่อนำผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C ซึ่งใช้เวลาในการให้ความร้อน 4 ชั่วโมง พบว่าได้ผงคาร์บอนสีดำ ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากภาพที่ 1 จะเห็นว่าผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลมีลักษณะไม่เป็นรูปทรงเช่นเดียวกับผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่นำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4 แต่อย่างไรก็ตามพบว่าผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่นำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4 มีขนาดใกล้เคียงกันผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล ภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลมีลักษณะเรียบในขณะที่ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่นำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4 มีพื้นผิวที่ขรุขระหรือมีความหยาบเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากกรด H_3PO_4 ไปปรับสภาพพื้นผิวของผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลให้มีรูพรุนและความขรุขระ



(a) (b)

ภาพที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภาพผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลกำลังขยาย 500 เท่า (a) ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (b) ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่นำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4



(a) (b)

ภาพที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภาพผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลกำลังขยาย 100k เท่า (a) ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (b) ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่นำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบของธาตุที่พบในผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล และ ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่กระตุ้นด้วยH_3PO_4 พบว่ามีปริมาณธาตุ (C, H และ O) เป็นองค์ประกอบหลักในรูปแบบสารอินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วยH_3PO_4 นั้นมี ปริมาณธาตุองค์ประกอบหลัก (C ,H และ O) น้อยกว่าผงคาร์บอนที่ไม่ได้ผ่านการกระตุ้นและพบปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปของออกไซด์ปริมาณมากกว่าผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลนั่นอาจเป็นเพราะผลของการกระตุ้นโดยใช้กรด H_3PO_4 นอกจากนั้นยังมีองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ อยู่อีกด้วยแสดงดังตารางที่ 2

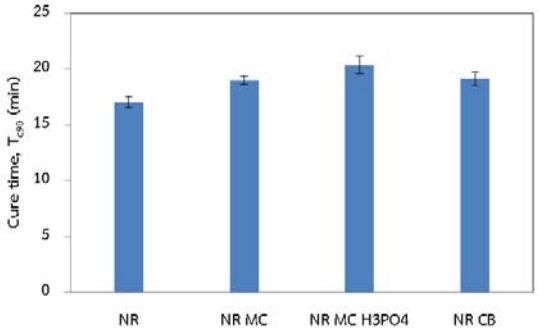
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของผงคาร์บอน

ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (%)	
	ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล	ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้น H_3PO_4
CHO	81.538	65.145
Fe_2O_3	0.138	7.115
MnO	0.017	0.021
Cr_2O_3	-	1.08
CaO	2.631	0.454
K_2O	7.859	0.526
P_2O_5	0.295	25.604
Cl	4.145	0.055

3.2 ผลการใช้ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 เป็นสารตัวเติมที่มีต่อลักษณะการคงรูป

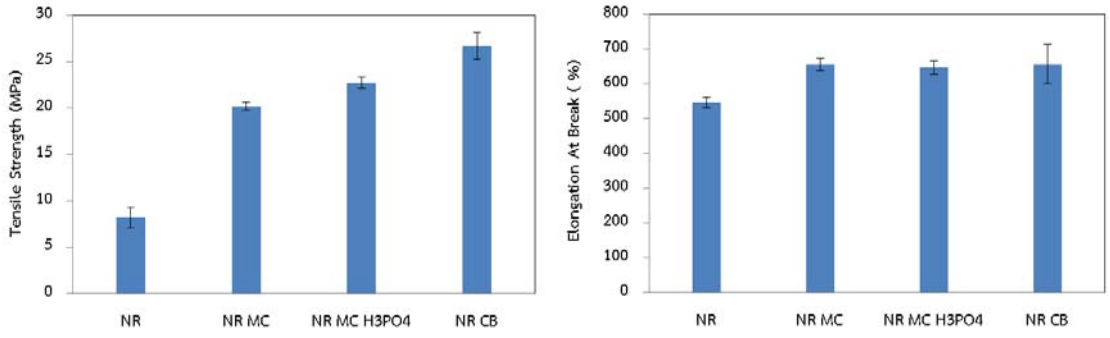
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการคงรูป (cure time, tc_{90}) ซึ่งหมายถึงเวลาที่ยางได้เกิดการคงรูปไปแล้วร้อยละ 90 ภาพที่ 3 แสดงเวลาที่ใช้ในการคงรูป จะเห็นได้ว่าเวลาการคงรูปของยางที่เติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 (NR MC H_3PO_4) มีค่าต่ำกว่ายางที่ใช้ผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (NR MC) และผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม (NR CB) ทั้งนี้เนื่องจากในผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้น

ด้วย H_3PO_4 อาจจะมีสภาพความเป็นกรดส่งผลให้เกิดการลดประสิทธิภาพการทำหน้าที่ของสารกระตุนและสารตัวเรงปฏิกิริยา การคงรูปส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปเพิ่มมากขึ้นหรือนานขึ้น (พงษ์ธร แซ่อุย, 2548:4)



ภาพที่ 3 เวลาการคงรูป cure time (tc_{90}) ของยางธรรมชาติที่มีผงคาร์บอนชนิดต่างๆและผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม

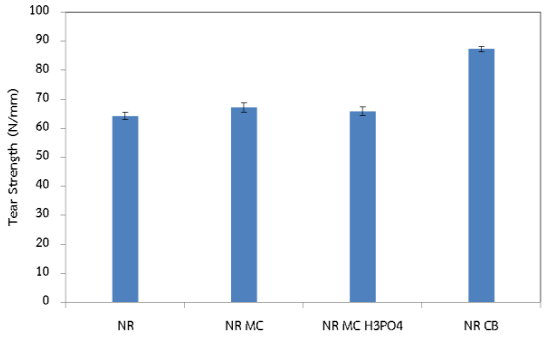
ผลของการเติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ลงในยางธรรมชาติที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในงานนี้ คือ ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) แสดงดังภาพที่ 4 จากภาพที่ 4(a) จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติเมื่อเติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 (NR MC H_3PO_4) ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (NR MC) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าความขรุขระหรือความหยาบที่พื้นผิวของผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ที่เห็นได้จากภาพถ่าย SEM ส่งผลให้ลักษณะการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติและสารตัวเติมมีมากขึ้น (Weiwei L et al.,2015:10) แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่ายางธรรมชาติที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านและไม่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ยังคงมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้คือผงเขม่าดำ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เกรด N550 ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 40-48 นาโนเมตร (Chuayjuljit S et al.,2002: 51, Subhan S et al.,2012:489) ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) แสดงดังภาพที่ 4(b) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยเมื่อเติมสารตัวเติมทุกชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย



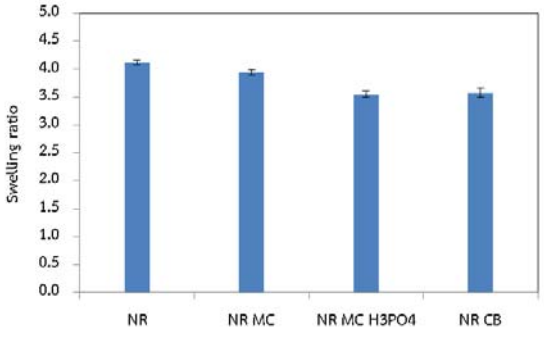
(a) (b)

ภาพที่ 4 (a) ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) (b) ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของยางธรรมชาติที่มีผงคาร์บอนชนิดต่างๆ และผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม

ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางธรรมชาติที่มีผงคาร์บอนชนิดต่างๆ และผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมแสดงดังภาพที่ 5 จากภาพจะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติเมื่อเติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 (NR MC H_3PO_4) และผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (NR MC) มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดไม่ต่างกันและไม่แตกต่างจากยางธรรมชาติมากนัก เนื่องจากผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลทั้งสองชนิดมีขนาดไม่แตกต่างกันและมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับผงเขม่าดำ โดยจากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่ายางธรรมชาติที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม (NR CB) มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด ในขณะที่ความต้านทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายแสดงดังภาพที่ 6 เมื่ออัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลาย มีค่าสูงแสดงถึงความต้านทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายของยางธรรมชาติต่ำ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนการบวมในตัวทำละลาย เมื่อเติมสารตัวเติมจะส่งผลให้ยางมีความต้านทานต่อการบวมดีขึ้นหรือมีค่า swelling ratio ลดลง เนื่องจากสารตัวเติมจะไปช่วยขัดขวางการแทรกตัวของตัวทำละลายในสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบยางธรรมชาติเมื่อเติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 (NR MC H_3PO_4) จะพบว่ามีความต้านทานต่อการบวมดีกว่าการเติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาล (NR MC) นั่นอาจเป็นเพราะความขรุขระของพื้นผิวของผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่กระตุ้นด้วย H_3PO_4 ส่งผลต่อความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติจึงสามารถช่วยขัดขวางการแทรกตัวของตัวทำละลายในสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติได้ดีขึ้น



ภาพที่ 5 ความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางธรรมชาติที่มีผงคาร์บอนชนิดต่างๆและผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม



ภาพที่ 6 ความต้านทานต่อการบวมในตัวทำละลาย (swelling ratio) ของยางธรรมชาติที่มีผงคาร์บอนชนิดต่างๆ และผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม

4. สรุปผลการทดลอง

การเตรียมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลนั้นสามารถทำได้โดยการนำกากน้ำตาลมาทำให้แห้งและให้ความร้อนภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400 ℃ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผงคาร์บอนสีดำ จากนั้นนำมากระตุ้นโดยใช้ H_3PO_4 ภายใต้ไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก็จะได้ผงคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 โดยพบว่าผงคาร์บอนดังกล่าวมีขนาดใกล้เคียงกันผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ไม่ผ่านการกระตุ้น H_3PO_4 แต่มีพื้นผิวที่ขรุขระหรือมีความหยาบเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำผงคาร์บอนที่ได้จากกากน้ำตาลไปใช้เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติในปริมาณ 10 phr พบว่า เวลาที่ใช้ในการคงรูปเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อตัวทำละลายของยางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 มีสมบัติที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนจากกากน้ำตาลที่ไม่ผ่านการกระตุ้น อย่างไรก็ตามพบว่าสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมผงคาร์บอนที่ผ่านการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ยังด้อยกว่ายางธรรมชาติที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติม

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF และมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย (ทุนอุดหนุนวิจัยโครงการวิจัยบูรณาการนักศึกษาและอาจารย์ฯ) ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

6. เอกสารอ้างอิง

ปุญญานิช อินทรพิพัฒน์. (2555). สารตัวเติมในยางธรรมชาติจากวัสดุเหลือใช้ชีวมวล. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**,14 (1), 32-43.

พงษ์ธร แซ่อุย (2548). **สารเคมียาง** (พิมพ์ครั้งที่ 1). ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค)

Chuayjuljit, S., Imvittayan, A., Na-Ranong, N. and Potiyaraj, P. (2002). Effects of particle size and amount of carbon black and calcium carbonate on curing characteristics and dynamic mechanical properties of natural rubber. **Journal of metals, Materials and Minerals.** 12(1), 51-57.

Moryadee, P., Tuamkeaw, S. and Saowapark, T. (2018). Effect of modified molasses carbon filler on mechanical properties of natural rubber vulcanizates. **Current Applied Science and Technology.** 18 (3), 145-155.

Subhan, S. and Charoen, N. (2012). Influence of modified natural rubber and structure of carbon black on properties of natural rubber compounds. **Polymer Composite**. 33, 489-500.

Weiwei, L., Li, M. and Renliang, M. (2016). Effect of surface treatment with potassium permanganate on ultrahigh molecular weight polyethylene fiber reinforced natural rubber composites. **Polymer Testing**, 55, 10-16.