

**ผลของยางธรรมชาติเหลวตัดแปรในยางคอมพาวด์ที่เติมเถ้าแกลบข้าวดำ
ช.วยากรณ์ เพ็ชฌุไพศิษฏ์*, สรัญญา พลอยประดับ และ ปิยะพงษ์ เทพกฤษณ์**

**Effects of Modified Liquid Natural Rubber in
Black Rice Husk Ash Filled Natural Rubber Compound**

Chor.Wayakron Phetphaisit*, Saranya Ploypardup and Piyapong Tepkit

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร 65000

*Corresponding author. E-mail: chorwayakronp@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้าแกลบข้าวดำ (black rice husk ash; BRHA) โดยการผสมโดยตรงและการปรับสภาพผิวก่อนการผสม จากการทดลองพบว่า BRHA ที่ไม่ทำการปรับสภาพผิวที่ปริมาณ 10 phr ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด โดยปริมาณที่เติมมีข้อจำกัด อาจเนื่องมาจากผลของสัดส่วนของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ BRHA ที่ใช้ และเมื่อทำการปรับสภาพผิว BRHA ด้วยสาร 2 ชนิด คือ ไซเลนและยางธรรมชาติเหลวตัดแปร (LENR) พบว่าในปริมาณของสารที่เท่ากัน การใช้ LENR ที่มีกรวดคานร่วมด้วยกับ BRHA แสดงประสิทธิภาพในการเข้ากันได้กับยางธรรมชาติดีกว่าการใช้ไซเลน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก LENR นอกจากช่วยให้ซิลิกาที่มีขั้วเข้ากับยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้วได้มากขึ้นแล้ว LENR ยังสามารถวัดคานร่วมด้วยกับยางธรรมชาติได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ยางคอมพาวด์ เถ้าแกลบข้าว สารคู่ควบ สารเสริมแรง

Abstract

The reinforcement of natural rubber by using black rice husk ash (BRHA) was investigated. The compound studied was prepared by mixing raw BRHA and treated BRHA. It was found that 10 phr of untreated BRHA showed the best mechanical properties. There are limits to the amount of BHRA which may be due to the increase in incompatible silica. The surface treatment of the BRHA

was prepared by using two different reagents, i.e., silane and liquid epoxidized natural rubber (LENR). It should be noted that pre-vulcanized LENR/BRHA proved to be a stronger reagent than silane. It can be postulated that upon improved compatibility between polar silica and non-polar NR, double bonds of LENR could be co-vulcanized with NR matrix.

Keywords: Rubber compound, rice husk ash, coupling agent, reinforcing filler

บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการปลูกและการส่งออกมากที่สุดของประเทศไทย โดยในการปลูกข้าวนี้้นนอกจากจะได้ข้าวเป็นผลผลิตหลักแล้ว ผลผลิตพลอยได้เช่นแกลบก็ยังสามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มมูลค่าได้อีกทางหนึ่ง โดยผลผลิตพลอยได้ที่เกิดจากการเผาแกลบคือเถ้าแกลบจำนวนมากซึ่งเป็นปัญหาขยะที่สำคัญ และแม้ว่าปัจจุบันจะมีการคัดคั้นนำเถ้าแกลบมาเป็นส่วนผสมเพื่อเสริมแรงและเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนความชื้นให้กับวัสดุซีเมนต์หรือคอนกรีต แต่ปริมาณการใช้ก็ยังไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าแกลบที่เกิดขึ้นและต้องทิ้งไป แกลบที่เผาในระบบเปิดจะได้เถ้าแกลบ 2 ชนิดคือเถ้าแกลบข้าวขาว (White rice husk ash, WRHA) และเถ้าแกลบข้าวดำ (Black rice husk ash, BRHA) โดยเถ้าแกลบข้าวดำจะเกิดจากการเผาที่อุณหภูมิต่ำ จะมีสัดส่วนของซิลิกาและคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นจะให้เถ้าแกลบข้าวขาวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และสามารถพบซิลิกาได้สูงถึงประมาณ 96% (Ismail *et al.*, 1999) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยชิ้นนี้สนใจเฉพาะเถ้าแกลบที่เกิดจากการเผาในโรงสีข้าวทั่วไป ที่มีการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะให้เถ้าแกลบข้าวดำ และมีสัดส่วนของซิลิกาประมาณ 32% และคาร์บอนประมาณ 38% (Nakbanpote *et al.*, 2000)

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย โดยยางพาราดิบ (Gum rubber) มีสมบัติเด่นในแง่ของความยืดหยุ่น แต่มีความนิ่มหรือมีค่ามอดุลัสต่ำ (Low modulus) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีหรือวัสดุบางอย่างลงไปเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของยางดิบให้ดีขึ้น เช่น การเติมสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความยืดหยุ่นและสมบัติเชิงกล การเติมสารตัวเติม (Filler) จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านการต้านทานต่อแรงกระทำ และยังมีส่วนช่วยในด้านการลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมที่มีการใช้อยู่ในปัจจุบันคือผงเขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และดิน (Clay) เป็นต้น โดยเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีการใช้งานในสัดส่วนที่มากที่สุดเนื่องจากสมบัติการเสริมแรงที่ดีและมีความสามารถในการเข้ากันได้กับอีลาสโตเมอร์ที่ไม่ยากนัก (Kim and Jeong, 2005) แต่เขม่าดำได้มาจากการเผาของน้ำมันปิโตรเลียมและ

แก่ธรรมชาติซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หมดไป (Non-renewable source) และใช้พลังงานในการผลิตสูง ในขณะที่ซิลิกาที่จัดเป็นสารเสริมแรงอีกตัวหนึ่งที่มีการใช้ในสัดส่วนที่สูงเนื่องจากการให้สมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถปรับแต่งสีขึ้นงานได้ง่าย แต่ซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ที่มีขั้วสูงก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ที่ต่ำกับพอลิเมอร์ซึ่งส่วนใหญ่ไม่มีขั้ว ทั้งยังมีราคาต่อหน่วยที่ค่อนข้างสูง จากโครงสร้างของเส้นใยแก้วที่มีส่วนผสมของวัสดุไม่มีขั้วอันได้แก่คาร์บอนซึ่งน่าจะสามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติที่ไม่มีขั้ว และซิลิกาซึ่งเป็นวัสดุมีขั้วที่อาจก่อให้เกิดการแยกเฟสกับยางธรรมชาติ และเกิดปัญหาการเกาะกลุ่มกันของสารเสริมแรง (Agglomeration) นอกจากนี้ผิวของซิลิกา ยังประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลและไฮดรอกซิลที่มีความเป็นกรด สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารตัวเร่งชนิดเบสที่เติมลงไปเพื่อเร่งปฏิกิริยาการสุก (Cure) หรือปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารตัวเร่งลดลงส่งผลให้ระบบต้องใช้เวลาในการสุกนานขึ้น และไม่สามารถควบคุมความสม่ำเสมอของเวลาในการสุกที่แน่นอนได้ ทั้งยังลดความหนาแน่นเชื่อมโยงของชิ้นงานส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง (Ansarifar *et al.*, 2005) มีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับซิลิกาเสริมแรงมากมายโดยพยายามหาวิธีในการปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของซิลิกาทั้งการใช้ความร้อน สารเคมี หรือการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ซึ่งจากวิธีดังกล่าวข้างต้นการใช้สารคู่ควบเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด และการใช้ไฮเลนเป็นสารคู่ควบก็ได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอีลาสโตเมอร์ สารคู่ควบไฮเลนมีหลากหลายชนิดโดยมีโครงสร้างพื้นฐานเป็น X_3SiRY โดยหมู่ฟังก์ชัน X แทนหมู่ฟังก์ชันอัลคอกซีซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับซิลิกาได้ และหมู่ฟังก์ชัน Y เป็นหมู่ฟังก์ชันออร์แกนิกที่จะสามารถเข้ากันได้กับอีลาสโตเมอร์ส่งผลให้อีลาสโตเมอร์สามารถเกิดการยึดติดกันได้ดีกับซิลิกาผ่านสารคู่ควบไฮเลน นอกจากนี้ไฮเลนเมื่อเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาแล้วยังส่งผลให้เกิดการลดลงของการเกาะกลุ่มกันของซิลิกา ความเหนียวของระบบที่เกิดจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกา ลดลง (Disagglomeration) ส่งผลให้ใช้พลังงานในการผสมลดลงและการกระจายตัวของซิลิกาในยางธรรมชาติดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้น (Sea-oui *et al.*, 2004; Frohlich *et al.*, 2005; Sea-oui *et al.*, 2006)

Ishak และ Bakar (1995) ศึกษาผลของการเติมเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอนในการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติอีพอกไซค์ (50% อีพอกไซค์ ยูนิท) ซึ่งเป็นยางธรรมชาติที่มีการตัดแปรให้มีความเป็นขั้วมากขึ้น เปรียบเทียบผลกับการใช้ซิลิกาและเขม่าดำ โดยมีการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบไฮเลนจากการทดลองพบว่าเส้นใยแก้วให้ค่าการยึดตัวออกจนขาดหรือความแข็งแรงดึง (Tensile strength, TS) สูงกว่าการใช้เส้นใยคาร์บอนแต่มีค่าต่ำกว่าการใช้ซิลิกา และเขม่าดำ และเมื่อมีการใช้สารคู่ควบไฮเลนพบว่าค่า TS ของเส้นใยแก้วเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่เส้นใยคาร์บอนที่มีการเติมสารคู่ควบไฮเลนสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของค่า TS อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่สมบัติเชิงกล

ด้านอื่นๆ ของชิ้นงานที่มีการใช้เส้นใยแก้วเคลือบข้าวขาว เส้นใยแก้วเคลือบข้าวดำ ซิลิกา และเขม่าดำมีค่าไม่ต่างกันมากนัก (ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ค่าความต้านทานการฉีกขาด และค่าความแข็งของชิ้นงาน)

Ismail และคณะ (1999) ศึกษาผลการเติมเส้นใยแก้วเคลือบข้าวขาวลงในยางธรรมชาติโดยใช้หรือไม่ใช้สารคู่ควบไซเลน และสารคู่ควบที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Multifunctional additive, MFA) ซึ่งในการทดลองนี้หมายถึงหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลตแอนไอออน $[R'COO^-]_2$ จากผลการทดลองพบว่าในกรณีที่ไม่ใช้สารคู่ควบไซเลน ปริมาณเส้นใยแก้วเคลือบข้าวขาว 10 phr ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด การใช้สารคู่ควบไซเลน และ/หรือ MFA จะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและเส้นใยแก้วเคลือบข้าวขาวมากขึ้น โดยสังเกตเห็นการกระจายตัวของเส้นใยแก้วเคลือบข้าวขาวในยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และการใช้ไซเลนร่วมกับ MFA จะให้ค่ามอดูลัสการยืดตัวออก (Tensile modulus) สูงกว่าการใช้ไซเลนหรือ MFA เพียงอย่างเดียว

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L โดยซื้อจากบริษัทร่วมโพธิ์หยกจำกัด และสารเคมีอื่นๆที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวด์ ได้แก่กำมะถัน (S) จาก B.D.H. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จาก Ajax Finechem กรดสเตียริก (Stearic acid) จาก Asia Pacific Specialty Chemicals Limited เตตระเมทิลไซยูเรม ไดซัลไฟด์ (TMTD) จาก Aldrich เมธาบิสเบนโซไซโธเอซิล ไดซัลไฟด์ (MBTS) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัททอปโพลท์ จำกัด ตัวเชื่อมประสานไซเลน (Silane 89) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเบน เมเยอร์ เคมีคัล จำกัด ยางธรรมชาติเหลวคัดแปรง (LENR) เตรียมจากห้องปฏิบัติการเคมี ม.นเรศวร มี \bar{M}_v ประมาณ 6,400 g/mol และอีพอกไซด์ยูนิต ประมาณ 25% เส้นใยแก้วดำ (BRHA) ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงสีสินเจริญพาณิชย์ จังหวัดพิษณุโลก โดย BHRA ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาด (Sieve) ขนาด 80 เมช

การตรวจสอบและการวิเคราะห์เส้นใยแก้วเคลือบข้าวดำ

ตรวจวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและการกระจายขนาดรูพรุนของเส้นใยแก้วเคลือบข้าวดำโดยตรวจวัดค่าการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของ BRHA โดยเครื่อง Autosorp-1C, Quantachrome ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR spectroscopy โดยนำ BRHA มาบดผสมรวมกับผง KBr อัดขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ก่อนนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง Perkin-

Elmer System 2000 ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยเครื่อง LEO รุ่น 1455 VP

การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแก้วเคลือบข้าวตัง

ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแก้วเคลือบข้าวตังโดยตัวเชื่อมประสานไซเลน (Si-89) และยางธรรมชาติเหลวคัดแปร (LENR) ด้วย 3 วิธีการคือ

วิธีการที่ 1 การผสมโดยตรงระหว่าง BRHA กับ Si-89 และ LENR

ผสม Si-89 หรือ LENR โดยตรงตามปริมาณที่กำหนดกับ BRHA ในภาชนะภายนอกก่อนนำไปผสมร่วมกับยางคอมพาวด์

วิธีการที่ 2 การทำปฏิกิริยาซิลิเลชัน (Silylation reaction) ระหว่าง BRHA กับ Si-89

กระจายอนุภาค BRHA ในโทลูอีนในอัตราส่วน 1:10 w/w ในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับเพิ่มอุณหภูมิเป็น 110 °C พร้อมปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงเติม Si-89 ลงไป ทำปฏิกิริยาต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยา กรองตะกอนที่ได้ และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นอย่างน้อย 3 ครั้ง อบตะกอนที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

วิธีการที่ 3 การผสมโดยตรงระหว่าง BRHA กับ LENR และสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยง

ผสม LENR และสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยง*ให้เข้ากันในภาชนะภายนอก จากนั้นจึงเติม BRHA ลงไป กวนผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบกำหนดทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำไปผสมร่วมกับยางคอมพาวด์

* สารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่ใช้ในส่วนนี้เป็นส่วนเพิ่มเติมจากสูตรที่ใช้เตรียมยางคอมพาวด์ โดยใช้สัดส่วนเท่ากับสูตรในการเตรียมยางคอมพาวด์ แต่ปริมาณที่ใช้ขึ้นกับปริมาณของ LENR โดย phr ในส่วนนี้หมายถึงส่วนในร้อยละของ LENR

การเตรียมยางคอมพาวด์ การขึ้นรูปและการทดสอบ

ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมยางคอมพาวด์ ดังแสดงในตาราง 1 และ 2 โดยในการทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงผลของการใช้ LENR เป็นต่อยางธรรมชาติกับ BRHA เปรียบเทียบกับตัวเชื่อมประสานไซเลนที่นิยมใช้ในการเชื่อมประสานระหว่างสารอนินทรีย์กับยางธรรมชาติ หลังจากการออกสูตร เตรียมยางคอมพาวด์โดยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) เริ่มจากการบดยางให้ نرمเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นจึงเติมซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริก หลังจากการผสมเข้ากันดีแล้วจึงเติม BRHA ตัวเร่งปฏิกิริยา (TMTD และ MBTS) และซัลเฟอร์ตามลำดับ หลังจากการผสมเสร็จจึงขึ้นที่ยางคอมพาวด์ไว้ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แบ่งยางคอมพาวด์ออกเป็น 2 ส่วนโดย

ส่วนแรกนำไปหาระยะเวลาสกอริช (Scorch time, T_{c2}) และระยะเวลาในการคงรูป (Optimum cure time, T_{c90}) ที่เหมาะสมด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer ที่อุณหภูมิ 155 °C ในขณะที่ส่วนที่ 2 นำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติด้านต่างๆของยางคงรูปโดยอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Compression hot press) ของบริษัทยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัดที่อุณหภูมิ 155 °C ตามเวลาจากการทดสอบหาเวลาคงรูปยางที่ 90 (T_{c90}) + 2 นาที

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 (Die C) และสมบัติด้านการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 (Die B) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron 5566) ด้วยความเร็ว 500 มิลลิเมตรต่อนาที ตรวจสอบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ด้วยเครื่อง Shore A Hardness Tester (Wallace)

ตาราง 1 สูตรการเตรียมยางคอมพาวด์ที่มีการเติมเส้นใยแก้วในปริมาณต่างๆกัน

วัตถุดิบ	สูตร/ ปริมาณ (phr)					
	A	B	C	D	E	F
ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100	100
ซิงค์ออกไซด์	3	3	3	3	3	3
กรดสเตียริก	1	1	1	1	1	1
เตตระเมทิลไทยูเรม ไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ไดบิสเบนโซโซโรเอซิล ไดซัลไฟด์ (MBTS)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ซัลเฟอร์	2	2	2	2	2	2
เส้นใยแก้ว (BRHA)	0	10	20	30	40	50

เมื่อ phr หมายถึง ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติ

ตาราง 2 สูตรการเตรียมยางคอมพาวด์ที่มีการเติมเส้นใยแก้วเคลือบด้วยคาร์บอนร่วมกับการใช้สารคู่ควบไซเลน 89 และยางธรรมชาติเหลวคัดแปร (LENR)

วัตถุดิบ	สูตร/ ปริมาณ (phr)							
	G	H	I	J	K	L	M	N
ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100	100	100	100
ซิงค์ออกไซด์	3	3	3	3	3	3	3	3
กรดสเตียริก	1	1	1	1	1	1	1	1
เคตระเมธิลไธยูเรม ไดซัลไฟด์	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
ไดมิสเบนโซโซโรเอซิด ไดซัลไฟด์	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ซัลเฟอร์	2	2	2	2	2	2	2	2
เส้นใยแก้วเคลือบ	20	20	20	20	20	20	20	20
Si-89	3 ^a	3 ^b	-	-	-	-	-	-
LENR	-	-	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	3 ^c	5 ^c

^a ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแก้วเคลือบด้วยคาร์บอนโดยการผสมโดยตรงระหว่าง BRHA กับ Si-89 หรือ LENR

^b ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแก้วเคลือบด้วยคาร์บอนโดยการทำปฏิกิริยาซิลิเลชันระหว่าง BRHA กับ Si-89

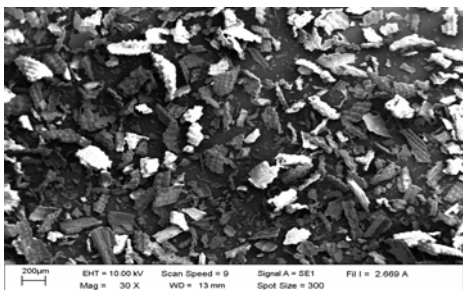
^c ปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยแก้วเคลือบด้วยคาร์บอนโดยการผสมโดยตรงระหว่าง BRHA กับ LENR และสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยง

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

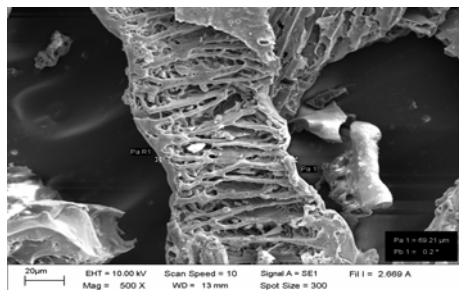
ผลการตรวจสอบและการวิเคราะห์เส้นใยแก้วเคลือบด้วยคาร์บอน (BRHA)

รูป 1 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ BRHA ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการทดลองพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ BRHA ที่กำลังขยาย 30 เท่า (รูป 1 ก) อนุภาคของ BRHA มีลักษณะกระจายตัว ไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อน ขนาดของอนุภาคที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อทำการขยายแต่ละอนุภาคของ BRHA ที่กำลังขยาย 500 เท่า (รูป 1 ข) พบว่าแต่ละอนุภาคมีลักษณะยาวรีและมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่มาก มีลำตัวส่วนกว้างของอนุภาคประมาณ 70 ไมโครเมตร และมีความยาวประมาณ 400 ไมโครเมตร ซึ่งจะแตกต่างจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเขม่าดำและซิลิกาที่มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม และจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะหลอมอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่าแอกกรีเกต และแต่ละแอกกรีเกตของเขม่าดำและซิลิกาจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต ในโรงงานอุตสาหกรรมยางต่างๆ ไปผงเขม่าดำและซิลิกาที่ใช้จะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิในช่วง 19-95 นาโนเมตร และ 10-40 นาโนเมตร ตามลำดับ ทำการตรวจสอบค่าพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวัดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่พื้นผิวของ BRHA พบว่ามีค่า 18 m²/g ซึ่งเมื่อ

เปรียบเทียบกับอนุภาคของเขม่าดำพบว่ามีความพื้นที่ผิวจำเพาะระหว่าง 7-143 m²/g นอกจากนี้เมื่อนำ BRHA ไปตรวจวัดโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี (รูป 2) ตรวจพบการปรากฏสัญญาณอย่างเห็นได้ชัดของหมู่ฟังก์ชันซิลลอกเซน (Si-O-Si) ในขณะที่ปรากฏสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) เพียงเล็กน้อย จึงอาจกล่าวได้ว่า BRHA น่าจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำกว่าเขม่าดำและซิลิกาทางการค้า เนื่องจากการมีอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้มีการกระจายตัวในยางธรรมชาติหลักในสเกลแมโคร ทั้งยังมีส่วนที่เกิดการแทรกสอด (occlude) ของยางธรรมชาติเข้าไปในอนุภาคของเถ้าแกลบข้าวดำดำ ซึ่งเกิดจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำและการมีรูพรุนขนาดเล็ก นอกจากนี้บนพื้นผิวอนุภาคยังมีหมู่ฟังก์ชันซิลานอลเพียงเล็กน้อยจึงอาจกล่าวได้ว่า BRHA ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มเนื้อชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler)

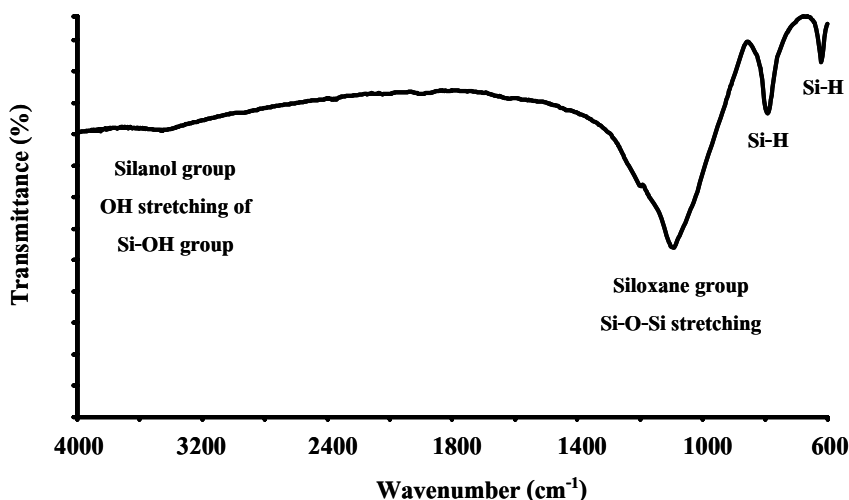


(ก)



(ข)

รูป 1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเถ้าแกลบข้าวดำ เมื่อ (ก) กำลังขยาย 30 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 500 เท่า



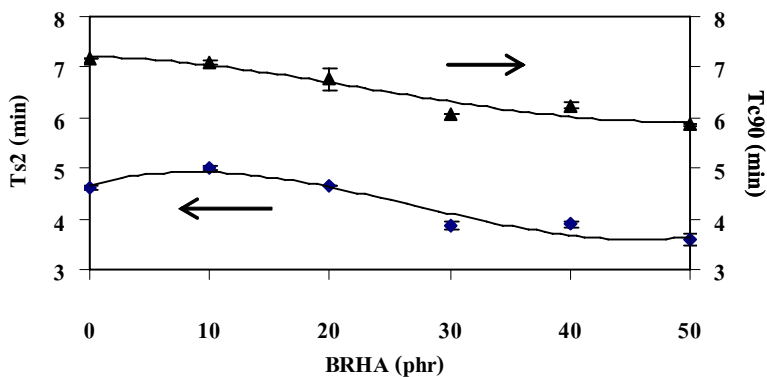
รูป 2 FT-IR สเปกตรัมของเถ้าแกลบข้าวดำ

ผลของถ้าแลกเปลี่ยนค่าต่อสมบัติการสูงและสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

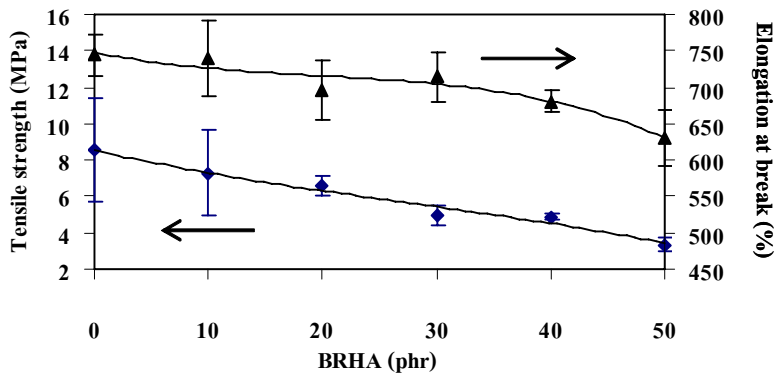
รูป 3 แสดงผลของปริมาณ BRHA ต่อสมบัติการคงรูปของยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่ายางธรรมชาติที่เติม BRHA 10 phr ส่งผลกระทบต่อสมบัติการคงรูป ในขณะที่การเติม BRHA มากกว่า 20 phr จะสังเกตเห็นการลดลงของระยะเวลาสกรอร์ซ (T_2) และระยะเวลาในการคงรูป (T_{90}) โดยมีค่าลดลงตามปริมาณ BRHA ที่เพิ่มขึ้น ซึ่ง BRHA ที่ใช้นอกจากจะประกอบด้วยส่วนของไฮโดรคาร์บอนและซิลิกาแล้วยังมีส่วนของสารอนินทรีย์อื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ ซึ่งมีส่วนเร่งให้อัตราการคงรูปเร็วขึ้น (Costa *et al.*, 2002) นอกจากนี้ BRHA ที่ใช้ยังตรวจพบหมู่ฟังก์ชันไซลานอลจำนวนเพียงเล็กน้อยซึ่งต่างจากซิลิกาทางการค้าที่มีหมู่ฟังก์ชันไซลานอลจำนวนมาก ซึ่งหมู่ไซลานอลดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารตัวเร่งชนิดเบสทำให้ลดประสิทธิภาพการทำงานลง ส่งผลให้ต้องใช้เวลานานในการคงรูป

เมื่อนำยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ BRHA ที่เพิ่มขึ้น (รูป 4-5) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโดยลักษณะอนุภาคของ BRHA เองที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเดี่ยว มีขนาดอนุภาคใหญ่ มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีพื้นที่ผิวน้อย จึงไม่สามารถก่อให้เกิดการแทรกสอดเกิดเป็นยางบาวด์ได้ (Bound rubber) ทำให้ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับ BRHA ได้เช่นเดียวกับในกรณีของเขม่าดำ และเมื่อใช้ BRHA ในปริมาณมากขึ้น ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กหรือช่องว่างที่ยางไม่สามารถแทรกสอดได้เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดด้านหนึ่งของชิ้นงานในการเกิดการเสียดสภาพเมื่อได้รับแรงมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของ BRHA ที่เพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มปริมาณของซิลิกาซึ่งไม่เข้ากับยางธรรมชาติให้เพิ่มขึ้น การเปียกหรือการโอบล้อมด้วยส่วนของยาง (Wetting) มีค่าน้อยลง อนุภาคของ BRHA เข้าใกล้กันมากขึ้น จุดอ่อนของชิ้นงานที่เกิดระหว่างผิวสัมผัสของ BRHA กับยางมีค่ามากขึ้น สังเกตได้จากภาพถ่าย SEM ในรูป 6 ซึ่งเป็นภาพถ่าย ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงของยางคอมพาวด์ที่เติม BRHA 20 และ 40 phr จะเห็นได้ว่ายางคอมพาวด์ที่เติม BRHA 20 phr ชิ้นงานมีส่วนที่เป็นหลุมขนาดใหญ่ ขอบหลุมมีลักษณะขรุขระซึ่งเกิดจากการฟุ้งและหลุดออกไปของ BRHA กระจายตัวอยู่ในส่วนของยางหลักที่ยังคงมีส่วนพื้นที่ผิวที่เรียบอยู่ ในขณะที่เมื่อเติม BRHA 40 phr จะสังเกตเห็นหลุมจำนวนมากและต่อเนื่องกันซึ่งแสดงถึงการอยู่ใกล้ชิดกันของสารตัวเติม และการโอบล้อมอนุภาคของสารตัวเติมด้วยยางที่มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าน้อยลง นอกจากนี้การเติม BRHA ลงในยางธรรมชาติเป็นการลดส่วนของปริมาตร (volume fraction) ที่เคลื่อนไหวได้ของสายโซ่โมเลกุลของยางด้วย โครงสร้างที่แข็ง และเปลี่ยนรูปได้ยากของ BRHA ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์

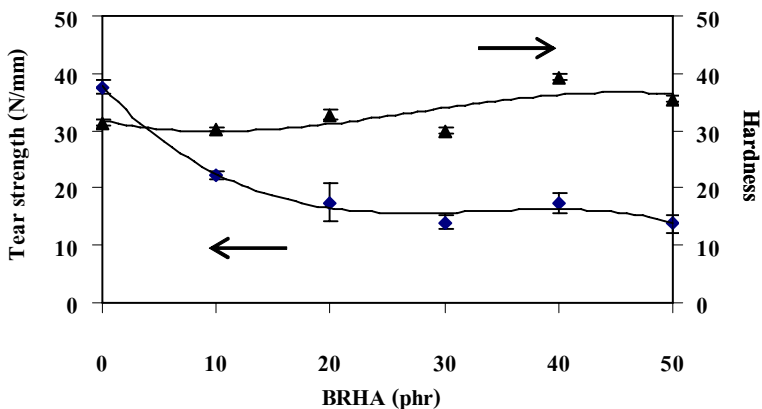
การยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานจึงลดลงตามปริมาณ BRHA ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น



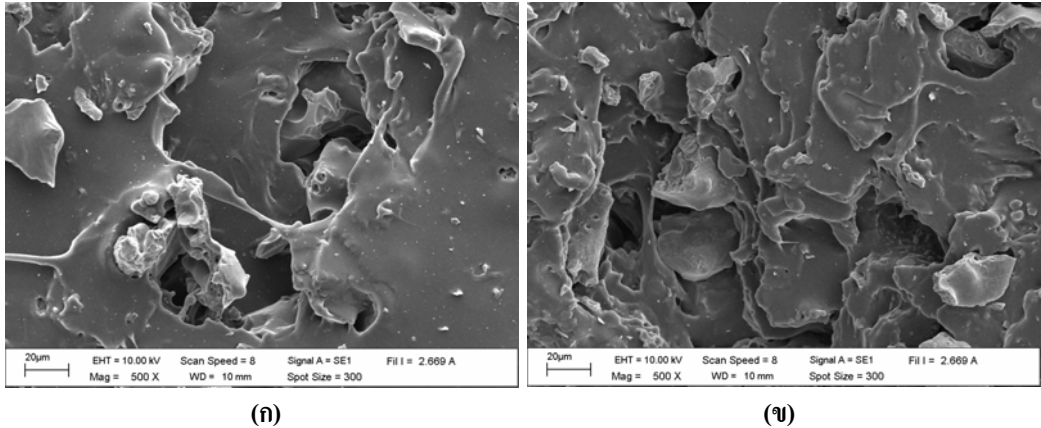
รูป 3 ผลของปริมาณ BRHA ต่อระยะเวลาสกริช (T₂) และระยะเวลาในการคงรูป (T₉₀)



รูป 4 ผลของปริมาณ BRHA ต่อค่าความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด



รูป 5 ผลของปริมาณ BRHA ต่อค่าความต้านทานการฉีกขาด และค่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์



รูป 6 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน ณ จุดขาดของยางคอมพาวด์เมื่อเติม BRHA (ก) 20 phr และ (ข) 40 phr

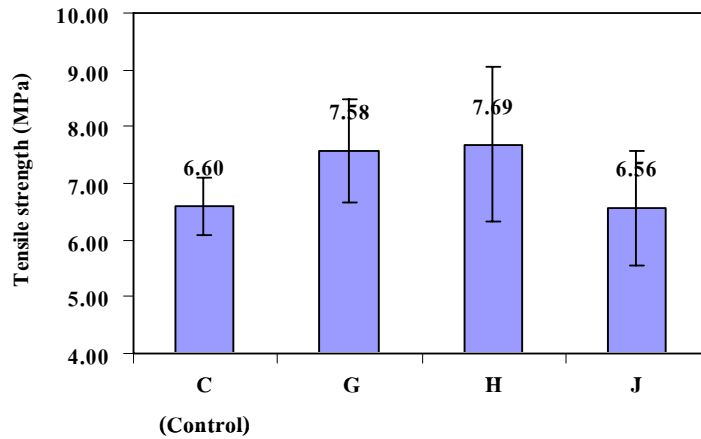
ผลของสารคู่ควบไซเลน และยางธรรมชาติเหลวตัดแปรต่ออย่างธรรมชาติเสริมแรงเส้นใยแก้วคาร์บอน

จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารคู่ควบไซเลนมีหมู่ฟังก์ชันอัลคอกซีซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของซิลิกาได้ และมีหมู่ฟังก์ชันออร์แกนิกที่จะสามารถเข้ากันได้กับอีลาสโตเมอร์ งานวิจัยครั้งนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบเทคนิคการเติมสารคู่ควบไซเลนกับ BRHA ปริมาณ 20 phr โดยการผสมโดยตรงที่อุณหภูมิห้อง (วิธีการที่ 1) ก่อนนำไปบดผสมร่วมกับยางธรรมชาติด้วยเครื่องบดผสม 2 ลูกกลิ้ง กับการทำปฏิกิริยาซิลิเลชัน (วิธีการที่ 2) ซึ่งเป็นเทคนิคที่คาดว่าจะก่อให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีระหว่างหมู่อัลคอกซีของไซเลนกับหมู่ไฮดรอกซิลของยางธรรมชาติก่อนนำไปบดผสมร่วมกับยางธรรมชาติ โดยการเลือกใช้ BRHA ในปริมาณ 20 phr เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าแม้ว่าการใช้ BRHA ในปริมาณ 10 phr จะให้ผลการทดสอบด้านต่าง ๆ ที่ดีที่สุด แต่ปริมาณ 10 phr เป็นปริมาณที่ค่อนข้างน้อยในการนำมาใช้เป็นสารเพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนการผลิต และปริมาณ 20 phr ก็ให้ผลทดสอบใกล้เคียงกับการใช้ BRHA ปริมาณ 10 phr และหากการปรับสภาพผิวของ BRHA ที่ปริมาณ 20 phr สามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของชิ้นงานให้ดีขึ้นได้ ปริมาณ BRHA ที่ 20 phr จึงน่าจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งผลการทดลองพบว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางคอมพาวด์ที่ไม่ใช้สารคู่ควบไซเลนในปริมาณ BRHA ที่เท่ากัน (รูป 7) โดยเทคนิคที่ต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึง จากภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน ณ จุดขาดของยางคอมพาวด์ที่มีการใช้สารคู่ควบไซเลน (รูป 8 (ก)) พบว่าลักษณะหลุมที่เกิดจากการฝังตัวของ BRHA มีขนาดเล็กลง มีความขรุขระของหลุมน้อยลง และมีการกระจายมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีค่าสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว BRHA ที่ไม่มากนักก็ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับการไม่ใช้สารคู่ควบไซเลน ดังนั้นในส่วนของยางธรรมชาติเหลวตัดแปร (LENR) กับ BRHA จะใช้การผสมโดยตรงเนื่องจากไม่เห็น

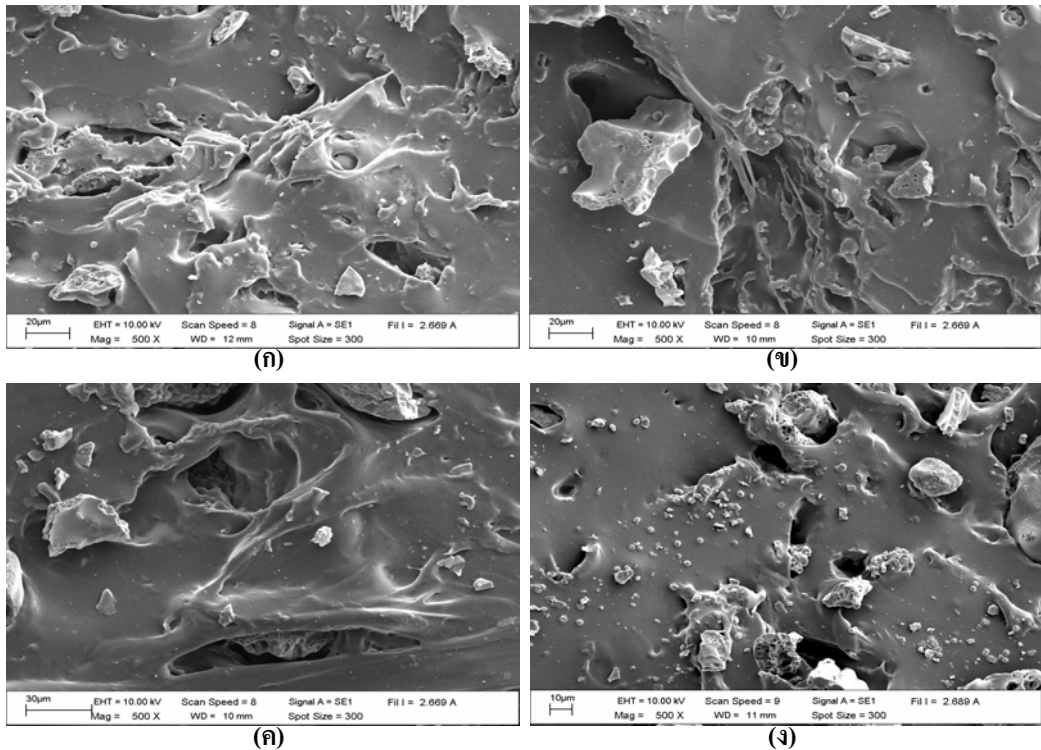
ความแตกต่างในกรณีสารคู่ควบไซเลน จากผลการทดลองเมื่อใช้ LENR ในปริมาณเดียวกับสารคู่ควบไซเลน (3 phr) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าต่ำกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลน และมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่ใช้สารคู่ควบ โดยค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางคอมพาวด์ทั้งกรณีที่ไม่เติมและไม่เติมสารคู่ควบไซเลนและ LENR ให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก (ประมาณ 695 – 730%) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก LENR มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และสามารถใส่สารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่เดิมสำหรับยางหลักได้ (Rubber matrix) ส่งผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงในยางหลักลดลง แม้ว่า LENR จะสามารถเชื่อมโยงผ่านซัลเฟอร์ (Sulfur linkage) ร่วมกับยางหลักได้ก็ตาม แต่น้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำก็มีผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของชิ้นงานลดลง โดยสังเกตเห็นการลดลงของค่าความแข็งแรงดึงตามปริมาณ LENR ที่เพิ่มขึ้น (รูป 9) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้ LENR ปริมาณที่เพิ่มขึ้น ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน ณ จุดขาดของยางคอมพาวด์ที่มีการใช้สารคู่ควบ LENR ปริมาณ 3 และ 5 phr (รูป 8 (ก) และ (ค)) จะสังเกตเห็นหลุมที่มีขนาดเล็ก และมิลักษณะการยืดตัวของยางมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ LENR ปริมาณต่ำ (1 phr) ให้ผลของค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับการใช้ไซเลนที่ 3 phr จึงอาจกล่าวได้ว่า LENR น่าจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างยางธรรมชาติกับ BRHA และมีส่วนช่วยเรื่องความยืดหยุ่น (Elasticity) ให้กับยางหลัก แต่น้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำอาจส่งผลให้ชิ้นงานไม่ทนต่อแรงที่ใช้ในการดึงยืด อย่างไรก็ตามทุกสูตรที่ใช้ LENR ทำให้การบดผสมสามารถทำได้ง่ายขึ้น BRHA มีการฟุ้งกระจายน้อยลง และเข้ากับยางได้ง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีไม่เติมสารคู่ควบและการใช้สารคู่ควบไซเลน

จากปัญหาน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และการใช้ร่วมกันของสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงกับยางหลัก จึงได้ปรับเปลี่ยนเทคนิคในการใช้ LENR โดยการเติมสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงร่วมกับ LENR และ BRHA และผสมให้เข้ากันก่อนนำไปวัลคาไนซ์ในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำไปผสมร่วมกับยางคอมพาวด์ต่อไป จากผลการทดลองพบว่าการใช้ BRHA ร่วมกับ LENR และผ่านการเชื่อมโยงก่อนนำไปผสมร่วมกับยางคอมพาวด์ให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับยางที่ใช้ BRHA กับสารคู่ควบ LENR แต่ไม่ผ่านการเชื่อมโยงก่อน โดยปริมาณ LENR ที่ผ่านการเชื่อมโยงที่มากขึ้น (5 phr) ตรวจพบการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงดึง และการลดลงของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับการใช้เพียง LENR แต่ไม่ผ่านการเชื่อมโยงก่อน (รูป 10) ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน ณ จุดขาดของยางคอมพาวด์ที่มีการใช้สารคู่ควบ LENR ที่ผ่านการเชื่อมโยงปริมาณ 3 phr (รูป 8 (ง)) พบหลุมที่มีขนาดเล็ก ขอบมีลักษณะเรียบ และสังเกตเห็นอนุภาคของ BRHA บางส่วนยังฝังตัวอยู่ในหลุม จึงอาจกล่าวได้ว่าการผสม BRHA, LENR และสารก่อให้เกิดการเชื่อมโยงน่าจะก่อให้เกิดการเชื่อมโยงเกี่ยวพันกันของ BRHA และ LENR ผ่านการเชื่อมโยงซัลเฟอร์ (Sulfur linkage) และ LENR เองก็มีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติหลัก ดังนั้นเมื่อนำ BRHA ที่ได้ไปผสมกับยางหลัก จึงก่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี และสังเกตเห็นการยึดติดของ BRHA กับยางหลักได้ดีขึ้น ซึ่งการอธิบาย

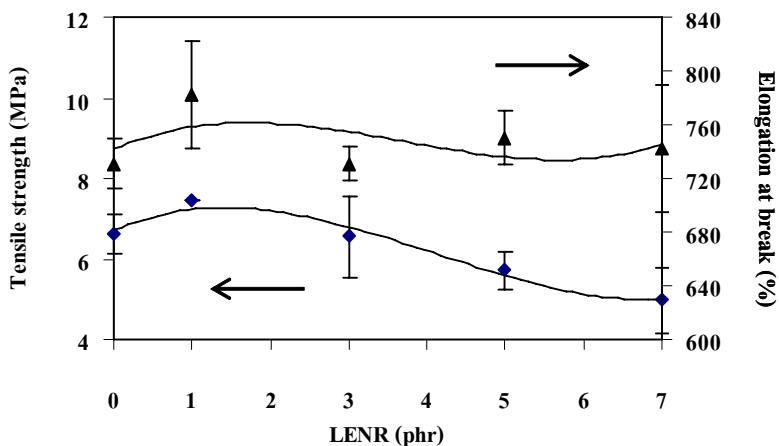
ตั้งกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบค่าความต้านทานการฉีกขาด โดยพบว่ายางคอมพาวด์เมื่อใช้ LENR ที่ผ่านการเชื่อมโยงก่อนในปริมาณ 5 phr ให้ค่าสูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลน (รูป 11)



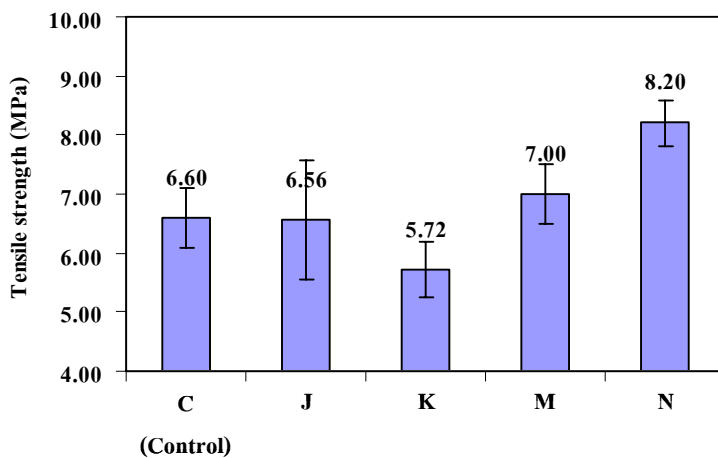
รูป 7 ค่าความแข็งแรงดึงของยางคอมพาวด์เมื่อไม่ใช้สารคู่ควบ (C) ใช้สารคู่ควบไซเลนโดยใช้เทคนิคในการผสมที่ต่างกัน (G และ H) และการใช้ยางธรรมชาติเหลวคัดแปร (J)



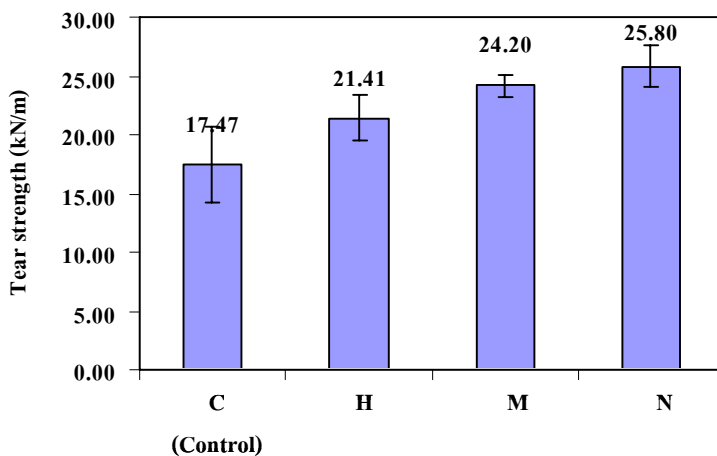
รูป 8 ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน ณ จุดขาดของยางคอมพาวด์เมื่อเติม BRHA 20 phr ร่วมกับ (ก) ไซเลน 3 phr, (ข) LENR 3 phr, (ค) LENR 5 phr และ (ง) LENR ที่ผ่านการเชื่อมโยง 3 phr



รูป 9 ผลของปริมาณ LENR ต่อค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด



รูป 10 ค่าความแข็งแรงดึงของยางคอมพาวด์เมื่อไม่ใช้สารคู่ควบ (C) ใช้ยางธรรมชาติเหลวตัดแปร ปริมาณ 3 phr (J) และ 5 phr (K) และเมื่อใช้ยางธรรมชาติเหลวตัดแปรที่ผ่านการเชื่อมโยง ปริมาณ 3 phr (M) และ 5 phr (N)



รูป 11 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางคอมพาวด์เมื่อไม่ใช้สารคู่ควบ (C) ใช้สารคู่ควบไซเลน ปริมาณ 3 phr (H) และเมื่อใช้ยางธรรมชาติเหลวตัดแปรที่ผ่านการเชื่อมโยงปริมาณ 3 phr (M) และ 5 phr (N)

สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาพบว่าสามารถนำเถ้าแกลบข้าวดำในอัตราส่วน 10 phr มาใช้เป็นสารตัวเติม เพื่อลดต้นทุนในการผลิตของยางธรรมชาติโดยไม่ต้องใช้สารคู่ควบได้ โดยยางคอมพาวด์ที่ได้ยังคงมีระยะเวลาสกร๊ช และระยะเวลาในการคงรูปใกล้เคียงกับยางคอมพาวด์ที่ไม่เติมเถ้าแกลบข้าวดำ และยังคงให้ชิ้นงานที่มีค่าต้านทานแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวออก ณ จุดขาด และค่าความแข็งใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการใช้สารตัวเติม ยกเว้นค่าความต้านทานการฉีกขาดที่มีค่าลดลงค่อนข้างมาก

การใช้เถ้าแกลบข้าวดำในปริมาณที่มากขึ้น (20 phr) การเติมสารคู่ควบไซเลนในปริมาณ 3 phr และยางธรรมชาติเหลวตัดแปรในปริมาณ 1 phr ช่วยเพิ่มระดับความเข้ากันได้ระหว่างเถ้าแกลบข้าวดำกับยางธรรมชาติให้มากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ยางธรรมชาติเหลวตัดแปรที่เพิ่มขึ้น (3-7 phr) ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง การปรับปรุงยางธรรมชาติเหลวตัดแปรให้มีการวัลคาไนซ์ร่วมกับเถ้าแกลบข้าวดำก่อนนำไปผสมกับยางคอมพาวด์ช่วยให้การกระจายตัวของเถ้าแกลบข้าวดำในยางคอมพาวด์ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติด้านต่างๆของยางวัลคาไนซ์เพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้สารคู่ควบไซเลน และยางธรรมชาติเหลวตัดแปรที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยจากงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ประจำปี 2550 ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Ansarifar, A., Azhar, A., Ibrahim, N., Shiah, S.F. and Lawton, J.M.D. (2005). The use of a silanised silica filler to reinforce and crosslink natural rubber. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 25, 77-86.
- 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), 2331-2346.
- Frohlich, J., Niedermeier, W. and Luginsland, H.D. (2005). The effect of filler-filler and filler-elastomer interaction on rubber reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36, 449-460.
- Ishak, Z.A.M. and Bakar, A.A. (1995). An investigation on the potential of rice husk ash as fillers for epoxidized natural rubber (ENR). *Eur Polym J.*, 31, 259-269.
- Ismail, H., Nasaruddin, M.N. and Ishiaku, U.S. (1999). White rice husk ash filled natural rubber compounds: the effect of multifunctional additive and silane coupling agents. *Polymer Testing*, 18, 287-298.
- Ismail, H., Nasaruddin, M.N. and Rozman, H.D. (1999). The effect of multifunctional additive in white rice husk ash filled natural rubber compounds. *Eur Polym J.*, 35, 1429-1437.
- 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.
- Nakbanpote, W., Thiravetyan, P. and Kalambaheti, C. (2000). Preconcentration of gold by rice husk ash. *Minerals Engineering*, 13(4), 391-400.
- Sea-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K. (2006). Roles of silane coupling agents on properties of silica-filled polychloroprene. *Eur Polym J.*, 42, 479-486.
- Sea-oui, P., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K. (2004). Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent. *Polymer testing*, 23, 397-403.

