

การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางเอสปีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง โดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 สำหรับปรับปรุงผิวเถ้าลอย

เอกชัย วิมลมาลา ^{1*} อีระศักดิ์ หมากริน ¹ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ²

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาสมบัติของสารประกอบยางเอสปีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง โดยใช้เถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 ที่ปริมาณความเข้มข้น 2 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของปริมาณการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในสารประกอบยางเอสปีอาร์ที่สัดส่วน 0 ถึง 75 ส่วนในร้อยส่วนของยาง ผลการวิจัยพบว่า สารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่า สารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว นอกจากนี้พบว่าเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิว ทำให้มีสมบัติเชิงกลของสารประกอบยางเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะสารประกอบยางเอสปีอาร์ที่เติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ณ ปริมาณความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ดังนี้ ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น 160 เปอร์เซ็นต์ ความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น 125 เปอร์เซ็นต์ ความต้านแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น 85 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่า เถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน สามารถลดช่องว่างระหว่างเฟสของยางกับเถ้าลอย ทำให้มีการยึดเกาะกับเฟสของยางดีกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว และนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลโดยรวม

คำสำคัญ : ยางเอสปีอาร์ / เถ้าลอย / การปรับปรุงผิว / สารคู่ควบไซเลน

*Corresponding author : E-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th

¹ นักวิจัย กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ

² รองศาสตราจารย์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ

Studies on the Properties of SBR - Fly Ash Composites using Si69 Silane Coupling Agent for Surface Treatment

Ekachai Wimolmala ^{1*}, Teerasak Markpin ¹, and Narongrit Sombatsompop ²

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This article studied the properties of SBR compound with untreated and silane-treated fly ash particles using different silane concentrations of 2%, 4% and 6% by weight. The work also investigated the effect of silica content (0-75 phr) in the fly ash particles on the properties of the SBR compound. The rubber compound with the silane-treated fly ash had less cure time than that with the untreated fly ash. The use of silane coupling agent for surface treatment increased the mechanical properties, especially for 4%wt silane coupling agent. It was found that using the silane coupling agent increased the tensile modulus of about 160%, tensile strength of 125%, tear strength of 85%, surface hardness of 25%. From morphological studies, the silane coupling agent in fly ash particles could improve the physical interfacial interactions between rubber and fly ash phases, thus enhancing the overall mechanical properties.

Keywords : Styrene Butadiene Rubber / Fly Ash / Surface Treatment / Silane Coupling Agent

*Corresponding author: E-mail: ekachai.wim@kmutt.ac.th

¹ Researcher, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy and Materials.

² Professor, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy and Materials.

1. บทนำ

จากเอกสารรายงานของกลุ่มนักเทคโนโลยีดีเด่น ประจำปี พ.ศ. 2546 ซึ่งเป็นรางวัลผลงานด้านเทคโนโลยีดีเด่น จากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ ระบุว่า ปริมาณเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีปริมาณสูงถึง 3 ล้านตันต่อปี ซึ่งเถ้าลอยเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และหากไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะกลายเป็นของเหลือใช้ที่สูญเปล่า อีกทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการกำจัดของเสียในส่วนนี้ด้วย พบว่า ปริมาณเถ้าลอยในประเทศไทยมีอยู่ในปริมาณมากดังได้กล่าวข้างต้น และในปัจจุบันเริ่มมีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้นในปี พ.ศ. 2545 ปริมาณการใช้เถ้าลอยสูงถึง 1,800,000 ตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 60 ของที่ผลิตได้ [1] ส่วนมากนำไปใช้เกี่ยวกับงานคอนกรีต อย่างไรก็ตาม ปริมาณเถ้าลอยในประเทศไทยยังคงเหลืออยู่ปริมาณมาก ไม่เพียงแต่เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเท่านั้น แต่ยังมีเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินในแหล่งต่างๆ ในประเทศด้วย อาทิเช่น เถ้าลอยถ่านหินซันบิทูมินัส จากจังหวัดระยอง ถ่านหินแอนทราไซต์ จากจังหวัดกาญจนบุรี เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ นั้น ล้วนแล้วแต่มีส่วนประกอบของซิลิกาอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น กลุ่มของโลหะออกไซด์ ซึ่งมีส่วนร่วมในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางอีกด้วย [2]

จากงานวิจัยเบื้องต้น [3] เถ้าลอยแบบไม่ปรับปรุงผิวจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สามารถเติมลงในสารประกอบยางธรรมชาติได้ในปริมาณที่มากถึง 30 ส่วนในร้อยละของยางธรรมชาติ ทำให้สมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติดีกว่าการใช้ซิลิกาเกรดการค้าทั่วไป และสมบัติทางกลโดยรวมเมื่อเทียบกับซิลิกาเกรดการค้ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะความสามารถในการรับแรง การคืนตัวกลับของยางหลังได้รับแรงยืดตัว และการกระเด็นของยางที่แสดงถึงสมบัติความเป็นอีลาสติกที่ดี และการเติมเถ้าลอยยังทำให้เวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติสั้นกว่าด้วย ในเถ้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกาที่เป็นสารประกอบที่ใช้กันมากในการเสริมความแข็งแรงในยาง นอกจากนี้การใช้ซิลิกาจากเถ้าลอย มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าการใช้ซิลิกาเกรดการค้า คือ สามารถผสมเข้าในเนื้อยางได้ดี สามารถถอดชิ้นงานออกจากแบบแม่พิมพ์ได้ง่ายและราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า ทำให้คณะวิจัยมีแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางเอสบีอาร์ ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งคาดว่าจะมีความเป็นไปได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเถ้าลอยที่มีในประเทศไทยมาใช้เป็นสารเติมแต่งในสารประกอบยางเอสบีอาร์ และศึกษาการปรับปรุงผิวเถ้าลอยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sombatsompop, N. และคณะ [3] และ Thongsang, S. และ Sombatsompop, N. [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาจากเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวลงในยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ โดยวิธีการผสมให้เข้ากันบนเครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ และนำสารประกอบยางไปอัดขึ้นรูปร้อนให้ยางคงรูป เพื่อให้ได้เป็นแผ่นยางสำหรับนำไปเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ทางด้านความต้านแรงดึง การต้านแรงฉีกขาดและ

ความแข็งที่ผิว ในส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าการเติมซิลิกาจากถ้ำลอยลงในยางคอมปาวด์ที่ปริมาณ 0 ถึง 75 ส่วน ในร้อยละส่วนของยางธรรมชาติ ทำให้เวลาในการคงรูปยาง และค่าความหนืดของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเทียบกับ ซิลิกาเกรดการค้า ทั้งนี้เนื่องจากถ้ำลอยมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งโลหะออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นสาร กระตุ้นช่วยให้ยางคงรูปได้เร็วขึ้น ส่วนสมบัติที่หลังจากการวัลคาไนซ์ พบว่า การเติมซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกา จากถ้ำลอยในช่วงอัตราส่วนระหว่าง 0 ถึง 30 phr มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือ ค่ามอดุลัสของสารประกอบยาง ธรรมชาติที่ 200 เปอร์เซ็นต์มีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของซิลิกามากกว่า 30 phr พบว่า การเติมซิลิกา เกรดการค้า ทำให้ค่ามอดุลัส ค่าความแข็งที่ผิว และการต้านแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ซิลิกาจากถ้ำลอยมี แนวโน้มคงที่ ในส่วนของยางเอสบิอาร์ พบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังจากการวัลคาไนซ์จะคล้ายคลึง กับระบบของยางธรรมชาติ ยกเว้นค่าความต้านแรงดึงและการต้านแรงฉีกขาด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกา เกรดการค้าที่สูงขึ้น และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของซิลิกาจากถ้ำลอย ปัจจัยที่ทำให้สารประกอบยางที่ เติมซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาจากถ้ำลอยมีสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากแรงที่กระทำระหว่างขนาดของอนุภาค สารเติมแต่งและปริมาณของสารประกอบถ้ำลอยที่มีอยู่ในยางคอมปาวด์ ซึ่งเมื่อปริมาณของถ้ำลอยสูงขึ้นจะทำ หน้าที่เป็นเหมือนสารเพิ่มเนื้อ (extender) ในยาง

จากงานวิจัยในระยะแรก [3] สามารถเติมซิลิกาจากถ้ำลอยในสารประกอบยางธรรมชาติได้ในปริมาณสูงถึง 60 phr เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตมากขึ้น แต่เนื่องจากสมบัติเชิงกลโดยรวมด้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า จึงนำไปสู่การปรับปรุงผิวของถ้ำลอย พบว่า กระบวนการปรับปรุงผิวที่เหมาะสม โดยการนำถ้ำลอยเคลือบด้วย สารคู่ควบไซเลน Si69 ที่ปริมาณความเข้มข้น 2 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดุลัส และการต้านแรงฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามของสารประกอบยางธรรมชาติมีค่า เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อเทียบกับการใช้ถ้ำลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวทางเคมี

Garde, K. และคณะ [5] ศึกษาการปรับปรุงผิวของถ้ำลอยเพื่อเป็นสารเสริมแรงในยางพอลิไอโซพรีน ใน การปรับปรุงผิวของถ้ำลอยโดยใช้ กรด เบส เกลือ พบว่า เมื่อปรับปรุงผิวแล้วทำให้มีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะ การปรับผิวด้วยสารละลายเบสแล้วตามด้วยสารละลายกรด ทำให้ผิวของถ้ำลอยมีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกับ ลักษณะพื้นผิวของซิลิกา สามารถนำไปผสมเพื่อเป็นสารเสริมแรงในยางพอลิไอโซพรีนได้ดีด้วย สำหรับการใส่สารคู่ ควบ bis(trithoxysilylpropyl)tetrasulphane: TESPT จะช่วยให้การกระจายของถ้ำลอยในยางพอลิไอโซพรีนได้ดี ยิ่งขึ้น อีกทั้งช่วยให้การกระดอนของยางลดลง เนื่องจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นที่ผิวของถ้ำลอยหายไป และ ทำให้สารประกอบยางพอลิไอโซพรีนมีสมบัติทางด้านความแข็งแรงลดลง และปริมาณการเกิดพันธะข้ามมีการ เปลี่ยนแปลงน้อย

Da Costa, H.M. และคณะ [6] ศึกษาผลกระทบของสารคู่ต่อและสารปรับปรุงผิวทางเคมีของถ้ำกลบที่ เติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ และได้ศึกษาสมบัติทางด้านการคงรูป สมบัติ ทางการไหล และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่คงรูปแล้ว ได้แก่ สมบัติความต้านแรงดึง การต้านแรงฉีก ขาด การทนการขัดสี และค่าความแข็งที่ผิว นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคการวิเคราะห์ FTIR เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน ของซิลิกาที่ตกตะกอนในถ้ำกลบที่บดละเอียด และถ้ำกลบที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน bis(3- triethoxysilylpropyl)-tetrasulphane (Si69) ที่มีต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกายภาพของยางที่คงรูป งานวิจัย

นี้ทำการเปรียบเทียบแก้วเคลือบที่ปรับปรุงผิวทางเคมีกับสารเติมแต่งซิลิกาเกรดการค้าและผงเขม่าดำจากผลการทดลองพบว่า ผลของการใช้สารคู่ควบไซเลนไม่ส่งผลทำให้สมบัติดีขึ้น แต่ได้ล้อยที่ปรับปรุงผิวที่อัตราส่วน 20 phr ให้สมบัติความแข็งแรงสูงกว่าสารประกอบยางที่เติมด้วยสารเติมแต่งประเภทซิลิกาและผงเขม่าดำ

Chuayjuljit, S. [7] ศึกษาการใช้ซิลิกาจากเคลือบเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยนำเคลือบที่ล้างน้ำแล้วไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเป็นผงแล้วผสมในยางธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่า สารประกอบยางธรรมชาติที่เติมด้วยซิลิกาจากเคลือบมีสมบัติความต้านแรงดึง การต้านแรงฉีกขาด การต้านการสึกหรอ และสมบัติการกระดอนที่ดีกว่าการเติมด้วยซิลิกาเกรดการค้าและใช้เวลาการคงรูปยางน้อยกว่าด้วย

Choi, S. S. [8] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อพฤติกรรมการไหลและสมบัติการคงรูปของยางในสารประกอบยางเอสบีอาร์ โดยเติมซิลิกาในยางเอสบีอาร์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ใช้ซิลิกาอย่างเดียว ที่ปริมาณสัดส่วน 20 ถึง 70 phr และกลุ่มที่ 2 ซิลิกากับผงเขม่าดำโดยปริมาณสารตัวเติมรวมกัน ที่ปริมาณ 80 phr ผลการทดลองพบว่า สมบัติการคงรูปของสารประกอบยางกลุ่มที่มีซิลิกาอย่างเดียวทำให้เวลาในการคงรูปยางไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อทดลองกับสารประกอบยางกลุ่มของซิลิกากับผงเขม่าดำทำให้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้น ส่วนผลของค่าแรงบิด พบว่าสารตัวเติมทั้งสองกลุ่มทำให้ค่าแรงบิดและค่าความเหนียวของยางเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะในช่วงปริมาณระหว่าง 50 ถึง 70 phr เนื่องจากซิลิกามีกลุ่มของไซเลนอลที่บริเวณผิวจำนวนมาก ทำให้เกิดพันธะระหว่างกลุ่มไซเลนอลที่ผิวของอนุภาคทำให้เกิดการยึดเกาะที่ดี

Yin, D. และคณะ [9] ศึกษาผลกระทบของสารเสริมแรงที่มีต่อโครงสร้างการแตกหักของยาง โดยการทดสอบสารประกอบยางเอสบีอาร์กับซิลิกาแบบไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิว ด้วยสารคู่ควบ Si69 และทดสอบการกระจายตัวของซิลิกาในยางเอสบีอาร์ ด้วยเทคนิค Atomic Force Microscopic (AFM) และ X-ray scattering (SAXS) พบว่า สารเสริมแรงซิลิกาเกิดการเกาะกลุ่มกันในยางเอสบีอาร์ แต่ไม่เกิดในซิลิกาที่ปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สมบัติวิสโคอิลาสติก และ Bound rubber เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยพันธะข้ามของสารประกอบยางเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะที่มีการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบไซเลน ช่วยทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างผิวของซิลิกากับสารประกอบยางทำให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น

4. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

4.1 วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

- ยางเอสบีอาร์ เกรด SBR1712 มีส่วนประกอบของ สไตรีน 24.5% น้ำมัน 28.8% และกรดอินทรีย์ 5.7% ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท บีเอสที อีลาสโตเมอร์ จำกัด
- สารคู่ควบ (coupling agents) ประเภทไซเลน bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si69), $[(C_2H_5O)_3-Si-(CH_2)_3-S_4-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$ ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท เจเจ เดกุกซา เคมีคอล (ที) จำกัด
- สารกระตุ้นปฏิกิริยา สารเร่งปฏิกิริยา และกำมะถัน ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท ซ็อน แอดวานซ์ โพลีเม็กซ์ จำกัด

- ถ้าวางถ่านหินลิกไนต์ที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมครอน จำหน่าย และจัดส่งโดย บริษัท เค เอ็น อาร์ กรุ๊ป จำกัด

4.2 ขั้นตอนการปรับปรุงผิวถั่วลอมโดยใช้สารคู่ควบไซเลน มีขั้นตอนดังนี้

- เตรียมสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ ที่ 2 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถั่วลอม

- เตรียมเอทานอลในอัตราส่วน 100 มิลลิลิตร ต่อถั่วลอม 100 กรัม
- เติมสารคู่ควบไซเลนลงในเอทานอล และกวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที
- นำถั่วลอมเทลงในสารละลายระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเอทานอล
- ใช้แท่งแก้วกวนให้ของผสมเข้ากันโดยใช้เวลา 15 นาที
- ทำการอบถั่วลอมที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4.3 ขั้นตอนการผสมและเตรียมตัวอย่างชิ้นงานของสารประกอบยางกับถั่วลอม

ส่วนประกอบของสูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของยางคอมปาวด์

| ส่วนประกอบ | ปริมาณ phr* |
|---|-------------|
| 1. ยางเอสบีอาร์ เกรด SBR1712 (Styrene Butadiene Rubber, SBR1712) | 100 ส่วน |
| 2. สารกระตุ้นปฏิกิริยา ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) | 5.0 |
| 3. สารกระตุ้นปฏิกิริยา กรดสเตียริก (Stearic acid, ST-DDK) | 2.0 |
| 4. สารเร่งปฏิกิริยา เมอร์แคปโตเบนโซไทโธล (Mercaptobenzothiazole, MBT, Acceler M-R) | 0.5 |
| 5. สารเร่งปฏิกิริยา ไดฟีนิลกัวนิดีน (Diphenylguanidine, DPG) | 0.2 |
| 6. กำมะถัน (Sulfur # 325 mesh) | 3.0 |

*phr : parts per hundred of rubber by weight

- ทำการบดยางและผสมถั่วลอมโดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จาก บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี จำกัด ตามส่วนประกอบของยางคอมปาวด์ แสดงดังตารางที่ 1 โดยเติมปริมาณซิลิกาจากถั่วลอมลงในยางคอมปาวด์ที่สัดส่วน 0 ถึง 75 phr (ปริมาณถั่วลอมที่ใช้คำนวณจากปริมาณของซิลิกาที่มีในถั่วลอม เช่น การเติมปริมาณซิลิกาจากถั่วลอม 30 phr หมายความว่า ถั่วลอมมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ จะต้องใช้ถั่วลอมที่ปริมาณ 75 กรัม เพื่อเติมลงในยางเอสบีอาร์ 100 กรัม) โดยใช้เวลาในการผสมยางคอมปาวด์ 45 นาที อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์

- นำสารประกอบยางเอสบีอาร์กับแก้วลอยแบบปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิวที่ได้จากเครื่องบดผสม ลูกกลิ้งคู่ไปทดสอบหาเวลาในการคงรูป (tc90) ของสารประกอบยาง ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยเตรียมชิ้นรูปแผ่นชิ้นงานทดสอบที่คงรูปโดยใช้เครื่องอัด ชิ้นรูปร้อน (hot press) จาก บริษัท แล็บเทค จำกัด อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 160 องศาเซลเซียส แรงดันโมลด์ที่ 170 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางตามค่า tc90 ของแต่ละสูตรยาง

- เตรียมชิ้นงานทดสอบความต้านแรงดึงเป็นรูปดัมเบลล์ ชนิด Die C

4.4 การตรวจสอบคุณลักษณะของสารประกอบยางกับแก้วลอย

สมบัติการไหลและการสุกตัว

- ทดสอบหาเวลาในการคงรูปและค่าแรงบิดของสารประกอบยางด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) จาก บริษัท โกเท็ค เทคดิง แม็กซีน อินดัสเตรียล รุ่น GT 70-70, Taiwan ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01

สมบัติเชิงกล

- ทดสอบความต้านแรงดึงของแผ่นยางที่คงรูปด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จาก บริษัท ซิมาสุ รุ่น Autograph AG-I, Japan ตามมาตรฐาน ASTM D412-98 ใช้ความเร็วในการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบหาค่ามอดุลัส ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของการยืดตัว ความต้านแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด

- ทดสอบค่าความแข็งที่ผิวของแผ่นยางที่คงรูปด้วยเครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว จาก บริษัท เท็ค ลีค จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-97 Shore A

- ทดสอบการต้านแรงฉีกขาดของแผ่นยางคงรูป ตามมาตรฐาน ASTM D624-00

สมบัติกายภาพ

- ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 โดยตรวจสอบลักษณะรูปร่างของแก้วลอย และการยึดเกาะระหว่างเฟสของแก้วลอยกับสารประกอบยางเอสบีอาร์

- ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของแก้วลอยด้วยเครื่อง X-ray fluorescence Spectrometer จาก บริษัท Horiba รุ่น MESA-500W, Japan

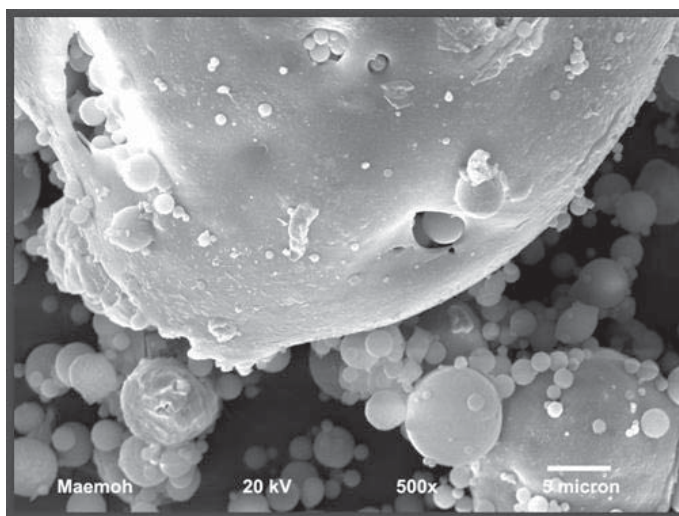
- ตรวจสอบวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR Spectrometer จากบริษัท Nicolet รุ่น Nexus 470, USA.

- ทดสอบความหนาแน่นของพันธะข้าม (crosslink density) โดยตรวจสอบความสามารถในการดูดซับโทลูอีน [3]

5. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

5.1 การตรวจสอบคุณลักษณะและขนาดของอนุภาคเถ้าลอย

จากรูปที่ 1 ตรวจสอบคุณลักษณะรูปร่างของเถ้าลอย พบว่า เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลม มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 250 ไมครอน



รูปที่ 1 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

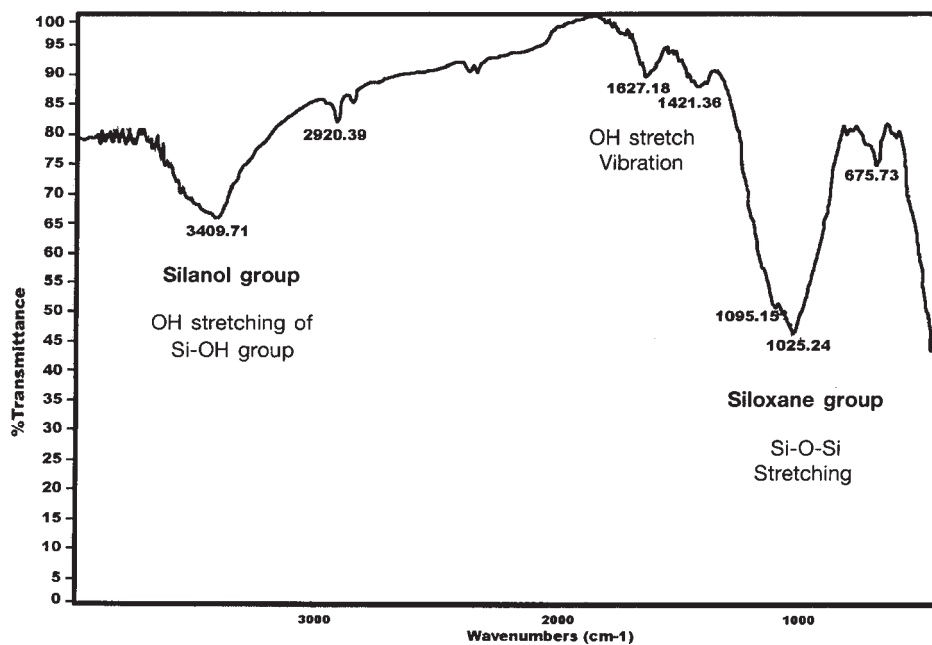
การตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence Spectrometer พบว่า มีส่วนประกอบของซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกา และกลุ่มโลหะออกไซด์ เป็นส่วนประกอบอยู่ในเถ้าลอย แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

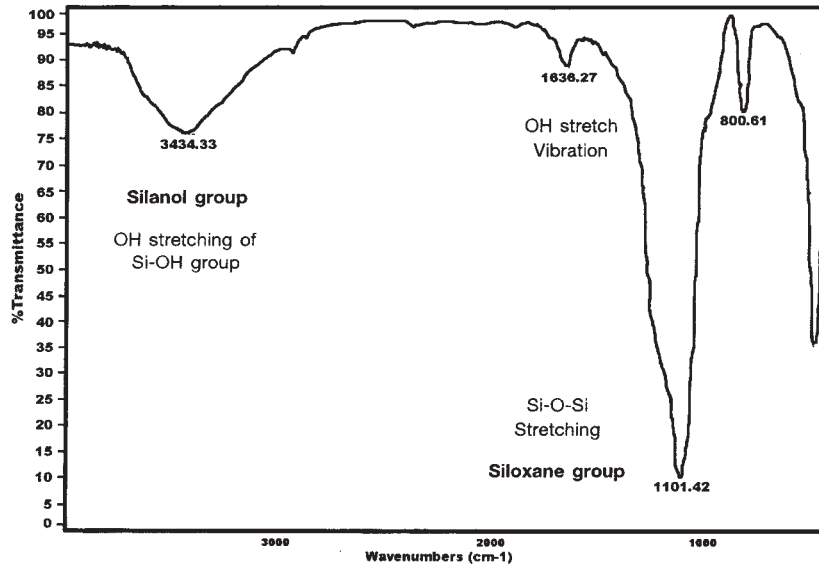
| ส่วนประกอบ | ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์) |
|--------------------------------------|----------------------|
| ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide) | 46.2 |
| อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) | 26.4 |
| เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) | 10.7 |
| แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) | 7.6 |
| แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide) | 2.2 |
| โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide) | 1.1 |
| โพแทสเซียมออกไซด์ (Potassium oxide) | 3.1 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur trioxide) | 1.8 |

5.2 การเตรียมส่วนผสมและศึกษาปริมาณของสารคู่ควบของเถ้าลอยแบบปรับปรุงผิว

คณะวิจัยได้ศึกษาปริมาณของสารคู่ควบไซเลน โดยในการเลือกใช้สารคู่ควบไซเลน พิจารณาจากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนผิวอนุภาคเถ้าลอย โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Analysis: FTIR จากผลการทดสอบ พบว่า อนุภาคของเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับอนุภาคซิลิกาเกรดการค้า โดยเฉพาะในช่วงของความยาวคลื่น $1,000-1,200\text{ cm}^{-1}$ แสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเถ้าลอยมีหมู่ของ Si-OH อยู่ คณะวิจัยจึงเลือกใช้ bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si69) เป็นสารคู่ควบไซเลน ซึ่งนิยมใช้กับซิลิกาเกรดการค้า



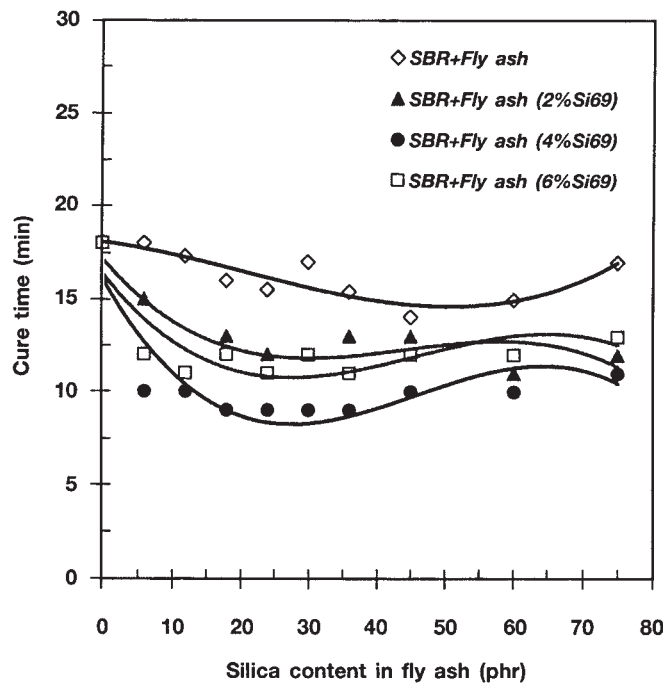
รูปที่ 2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโครงสร้างทางเคมีของอนุภาคเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว



รูปที่ 3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโครงสร้างทางเคมีของอนุภาคซิลิกาเกรดการค้า

5.3 การทดสอบสมบัติการคงรูปยาง และสมบัติการไหลของสารประกอบยาง

ผลการทดสอบเวลาในการคงรูปยาง และสมบัติทางการไหลของสารประกอบยางเอสบีอาร์กับเถ้าลอยแบบไม่ปรับปรุงผิวและแบบปรับปรุงผิว แสดงดังรูปที่ 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ดังนี้



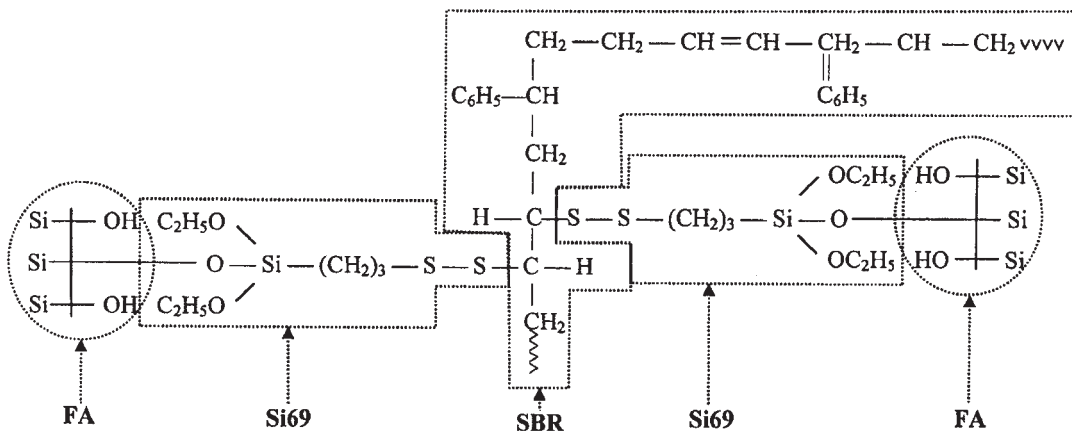
รูปที่ 4 ผลของปริมาณสารคู่คววไซเลนต่อเวลาในการคงรูปของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 4 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาในการคงรูปของสารประกอบยาง เอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากถ้ำลอยในปริมาณต่างๆ พบว่า สารประกอบยางกับถ้ำลอยที่ปรับปรุงผิว มีเวลาในการคงรูป (cure time) น้อยกว่าถ้ำลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

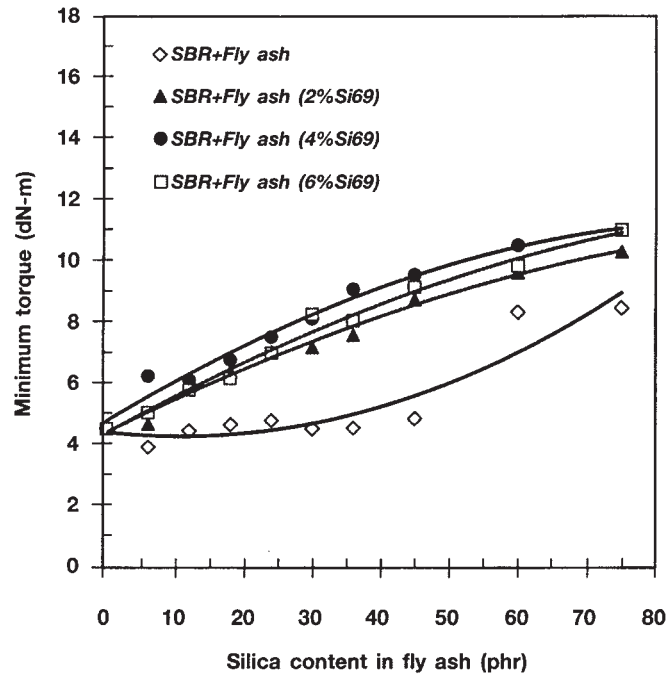
1. ปริมาณของซิลิกาจากถ้ำลอย พบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาที่มีในถ้ำลอยเพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาในการคงรูปของสารประกอบยางลดลง เนื่องจากถ้ำลอยมีส่วนประกอบทางเคมีของกลุ่มโลหะออกไซด์ อาทิเช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ทำให้เกิด Zinc complex เร็วขึ้น ส่งผลทำให้ยางเกิดพันธะข้ามได้เร็วขึ้นด้วย [10]

2. การปรับปรุงผิวถ้ำลอยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน พบว่า สารประกอบยางเอสบีอาร์กับถ้ำลอยที่ปรับปรุงผิวทำให้เวลาในการคงรูปยางลดลง เนื่องจากซิลเฟอร์เรคดิเคิลจากสารคู่ควบไซเลน เป็น active site ที่พร้อมจะเข้าไปเกิดพันธะข้ามที่สมบูรณ์ได้เร็วขึ้น ที่ตำแหน่งของบิวตะไดอินในยางเอสบีอาร์ ซึ่งแสดงพฤติกรรมคล้ายกับ crosslink agent [11] โดยได้แสดงปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง ถ้ำลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 กับยางเอสบีอาร์ ดังรูปที่ 5

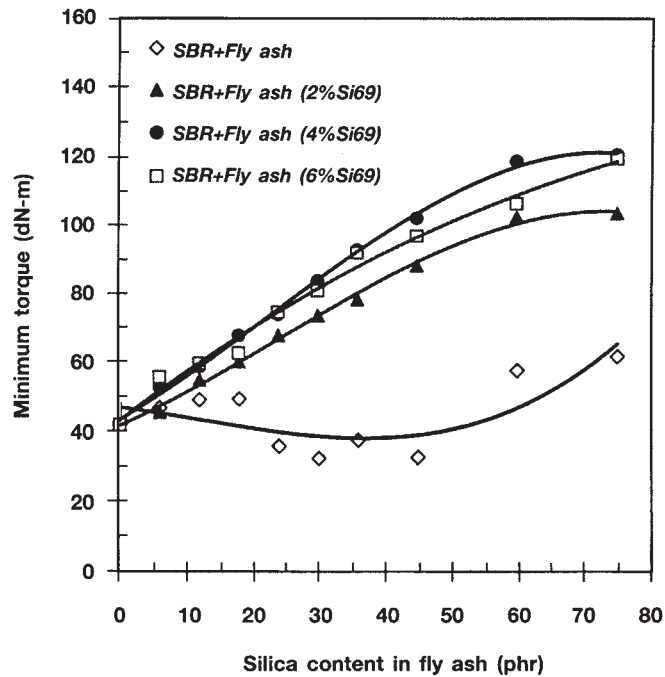
3. ปริมาณของสารคู่ควบไซเลน พบว่า ถ้ำลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้เวลาในการคงรูปของสารประกอบยางลดลงมากกว่าปริมาณความเข้มข้นอื่นๆ อาจเนื่องมาจาก ซิลเฟอร์เรคดิเคิลจากสารคู่ควบไซเลน เข้าไปเกิดพันธะข้ามกับยางเอสบีอาร์ได้สมบูรณ์



รูปที่ 5 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างถ้ำลอยกับสารคู่ควบไซเลน Si69 และยางเอสบีอาร์

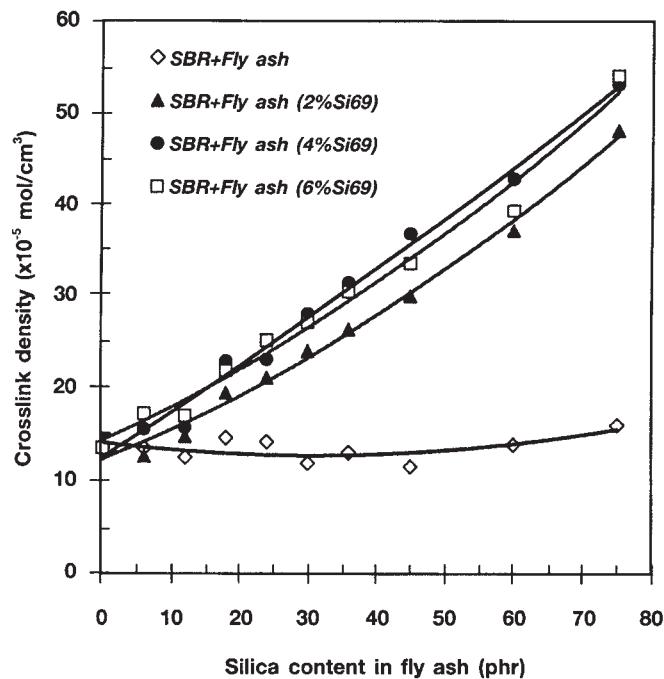


รูปที่ 6 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดต่ำสุดจากเครื่อง ODR ของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 7 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดสูงสุดจากเครื่อง ODR ของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

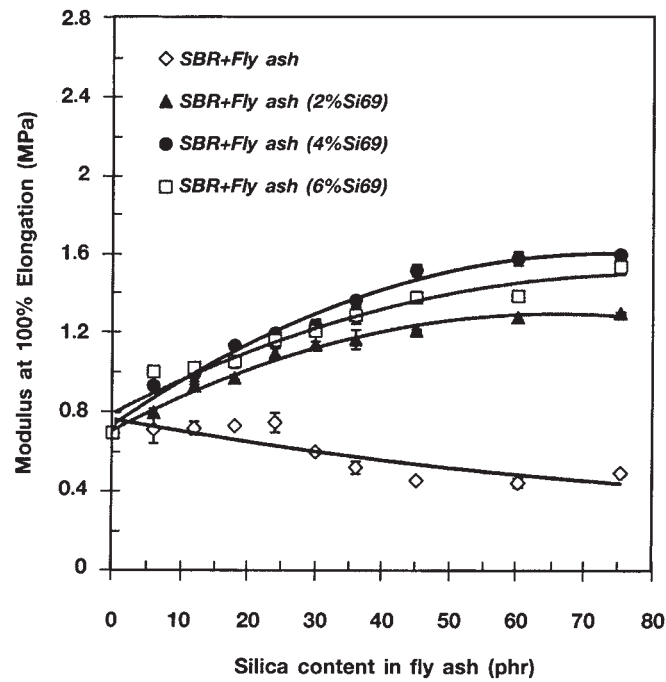
จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดต่ำสุดและสูงสุดจากเครื่อง ODR ของสารประกอบยางเอสบิอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ ของเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว ตามลำดับ ซึ่งค่าแรงบิดต่ำสุดแสดงถึงค่าความเหนียวของสารประกอบยางที่ทำให้ยางเริ่มไหลตัวในแม่พิมพ์โดยไม่เกิดการคงรูปหรือเกิดปฏิกิริยาพันธะข้าม จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณซิลิกาจากเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ทำให้ความเหนียวของสารประกอบยางเอสบิอาร์เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน มีค่าแรงบิดมากกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนที่เคลือบผิวเถ้าลอยทำให้เกิด interaction กับสารประกอบยางได้ดีทำให้ค่าความเหนียวของยางเพิ่มขึ้น ค่าแรงบิดของสารประกอบยางจึงเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าแรงบิดสูงสุดของเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวมีค่าสูงกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว นั้นแสดงให้เห็นว่า สารประกอบยางมีปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามของเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวเป็นผลมาจากการเกิดพันธะข้ามระหว่างเถ้าลอยกับสารคู่ควบไซเลนและโมเลกุลของยางเอสบิอาร์ แสดงดังรูปที่ 8 และจากผลของค่าแรงบิดสูงสุดและความหนาแน่นของพันธะข้ามของสารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวปริมาณความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนที่ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มที่นำไปสู่สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย ส่วนผลของสารประกอบยางเอสบิอาร์กับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว เมื่อปริมาณซิลิกาจากเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของพันธะข้ามไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความหนาแน่นของพันธะข้ามของสารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว เป็นผลจากการเกิดของพันธะระหว่างกำมะถันกับโมเลกุลของยางเท่านั้น ซึ่งเมื่อปริมาณของโลหะออกไซด์ที่ประกอบอยู่ในเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาในการคงรูปยางเร็วขึ้น แต่ไม่ส่งผลกับปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้าม



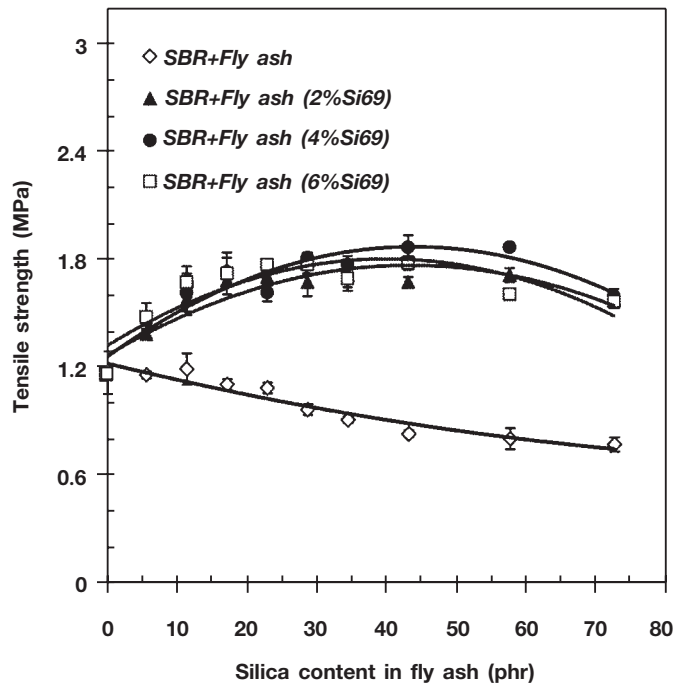
รูปที่ 8 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความหนาแน่นของพันธะข้ามของสารประกอบยางเอสบิอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

ผลการทดสอบสมบัติทางด้านมอดุลัส ความต้านแรงดึง และภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค ของสารประกอบยางเอสบีอาร์กับเถ้าลอยแบบปรับปรุงผิวและแบบไม่ปรับปรุงผิว แสดงดังรูปที่ 9 - 11 ดังนี้



รูปที่ 9 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ ของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

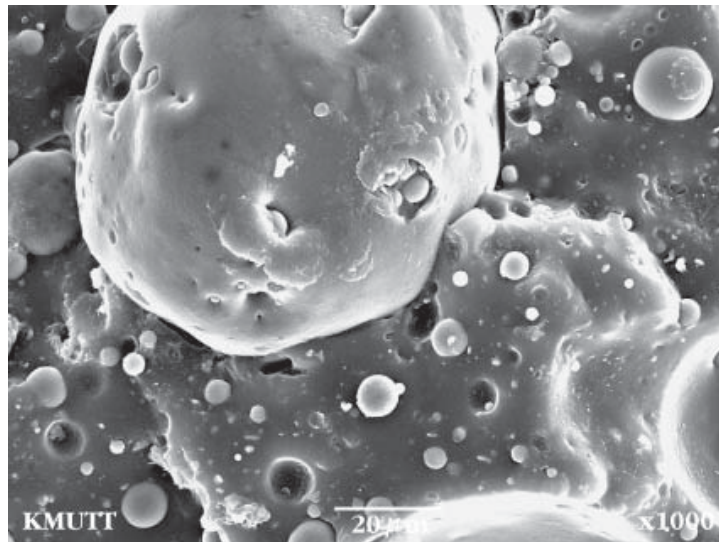


รูปที่ 10 ผลของปริมาณสารคู่ควบต่อความต้านแรงดึงของสารประกอบยางเอสบิโอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

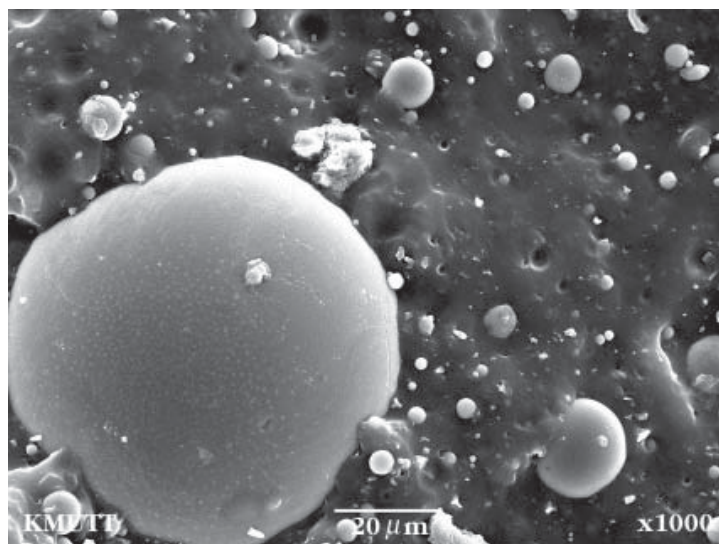
จากรูปที่ 9 และ 10 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบต่อความต้านแรงดึงของสารประกอบยางเอสบิโอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ พบว่า สารประกอบยางเอสบิโอาร์กับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิว ให้ค่ามอดูลัสการยืดตัวที่ 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าสารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว [12] ทั้งนี้เนื่องจากผลของปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่มากกว่าตามที่กล่าวมาแล้ว และยังพบว่าสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสการยืดตัวที่ 100 เปอร์เซ็นต์มีค่าสูงสุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าแรงบิดสูงสุด และปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ พบว่า สารประกอบยางเอสบิโอาร์กับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิว ความต้านแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลมาจากช่องว่างระหว่างเฟสของยางกับเถ้าลอยที่ลดลง จึงทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสของยางกับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวดีกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งแสดงได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบยางเอสบิโอาร์กับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว และปรับปรุงผิว ดังรูปที่ 11 (ก) และ 11 (ข) ตามลำดับ

ส่วนเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว เมื่อเติมในสารประกอบยางเอสบิโอาร์ คาดว่าค่ามอดูลัสจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยมีค่ามอดูลัสที่สูงกว่ายาง แต่ผลการทดลองกลับพบว่า ค่ามอดูลัส และความต้านแรงดึง มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อาจเนื่องจากเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว เมื่อเติมในสารประกอบยางไม่เกิดการยึดเกาะกับเฟสของยางเอสบิโอาร์ ซึ่งสารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว จะเกิดพันธะระหว่างกำมะถันกับโมเลกุลยาง จึงไม่เกิดพันธะระหว่างเถ้าลอยกับโมเลกุลยาง ซึ่งเถ้าลอยทำหน้าที่เป็นเหมือนสารเพิ่มเนื้อ (extender) ในยาง ไม่ใช่เป็นสารเสริมแรงในสารประกอบยาง จึงไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้มี

ช่องว่างระหว่างเฟสของยางกับอนุภาคของถั่วลอยมากขึ้นด้วย ทำให้การยึดเกาะระหว่างเฟสของยางกับอนุภาคของถั่วลอยไม่ดี และผลการทดลองมีความสอดคล้องกับปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่ไม่เปลี่ยนแปลงด้วย

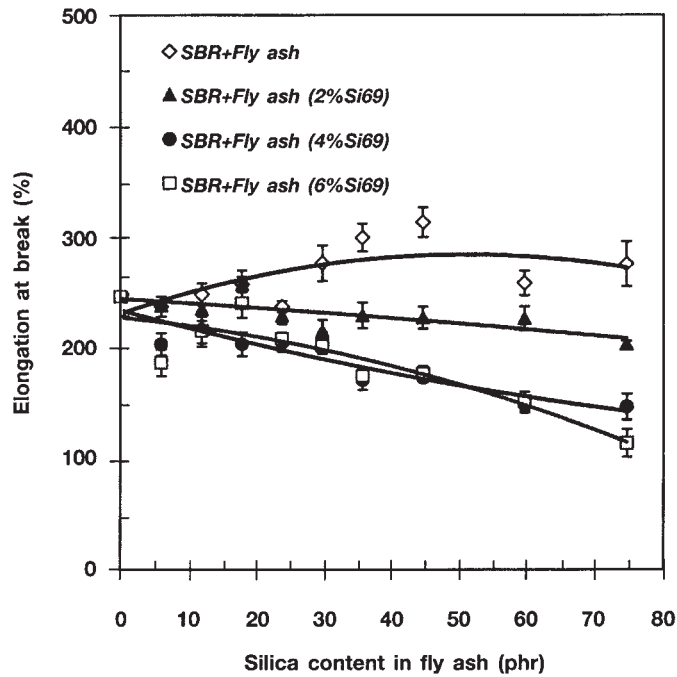


(ก) สารประกอบยางเอพ็อกซีกับถั่วลอยไม่ปรับปรุงผิว



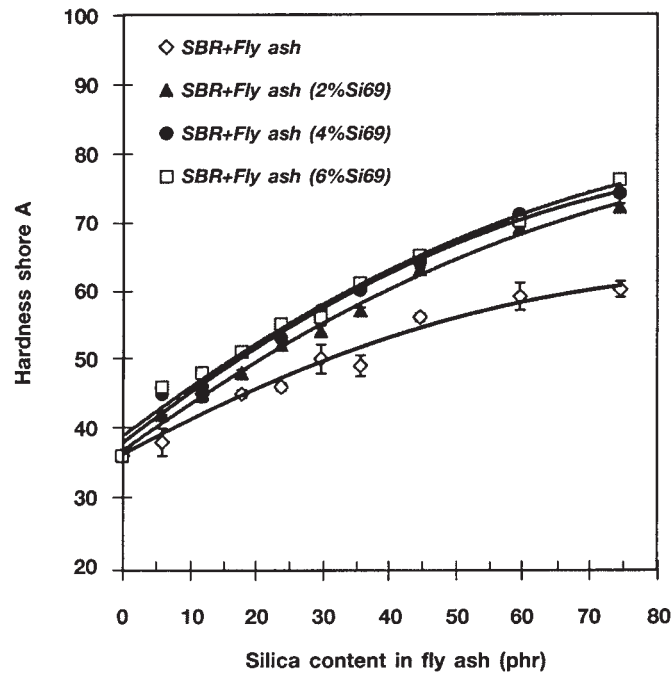
(ข) สารประกอบยางเอพ็อกซีกับถั่วลอยปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 4 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างจุลภาคของสารประกอบยางเอพ็อกซีกับถั่วลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวและปรับปรุงผิวที่มีปริมาณซิลิกาจากถั่วลอย 30 phr



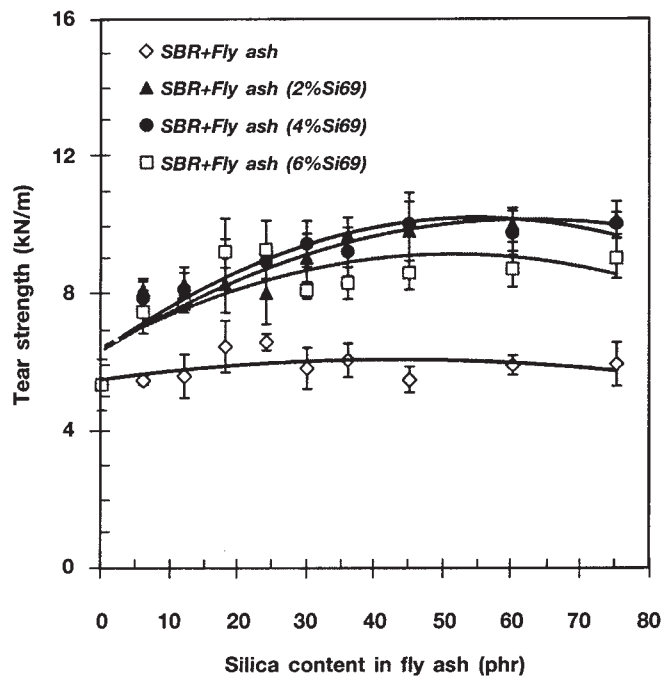
รูปที่ 12 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 12 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ พบว่า เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดของสารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวมีการยืดตัวน้อยกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว ทั้งนี้เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาดแปรผกผันกับค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งที่ผิวของสารประกอบยางเอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 13 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งที่ผิวของสารประกอบยาง เอสบีอาร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ พบว่า สารประกอบยางเอสบีอาร์ที่เติมเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้นมีค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่ผิวสูง จึงทำให้ค่าความแข็งที่ผิวโดยรวมของสารประกอบยางเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนสารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีค่าความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้นจากเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณของซิลิกาจากเถ้าลอยสูงสุด 75 phr ที่ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับค่ามอดุลัส และปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 14 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านแรงฉีกขาดของสารประกอบยางเอสบียอร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ

จากรูปที่ 14 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านแรงฉีกขาดของสารประกอบยางเอสบียอร์ที่มีการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในปริมาณต่างๆ พบว่า สารประกอบยางเอสบียอร์กับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวมีค่าความต้านแรงฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าสารประกอบยางเอสบียอร์กับเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว ทั้งนี้เนื่องจาก ผลของปริมาณความหนาแน่นของพันธะข้ามที่เพิ่มขึ้น และสารคู่ควบไซเลนช่วยลดช่องว่างระหว่างเฟสของยางและเถ้าลอย จึงทำให้ระหว่างเฟสมีการยึดเกาะกันได้ดี ซึ่งแสดงได้จากภาพถ่ายโครงสร้างทางจุลภาค ดังรูปที่ 11 และผลการทดลองมีความสอดคล้องกับความต้านแรงดึงที่เพิ่มขึ้นด้วย

6. สรุปผลการวิจัย

จากผลวิจัยการศึกษาสมบัติของสารประกอบยางเอสบียอร์กับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนและที่ไม่ปรับปรุงผิว สรุปได้ดังนี้

1. เถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว
2. เถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงผิวให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว
3. ปริมาณความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย คือ ที่ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเถ้าลอย

เถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวทำให้สารประกอบยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยเฉพาะสารประกอบยางเอสบิอาร์กับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 ที่ปริมาณความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่ามอดุลัสที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้น 160 เปอร์เซ็นต์ ความต้านแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น 125 เปอร์เซ็นต์ ค่าความต้านแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น 85 เปอร์เซ็นต์ ค่าความแข็งที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์ และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค พบว่า สารประกอบยางกับเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนมีช่องว่างระหว่างเฟสของยางเอสบิอาร์กับเถ้าลอยลดลง จึงทำให้การยึดเกาะกับเฟสของยางได้ดีกว่าเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิว

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2546-2547

8. เอกสารอ้างอิง

1. มุลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545, “รางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่น ปี 2545”
2. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ, 2542, “คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอย”, *วารสาร กพพ.*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 4, หน้า 13-23.
3. Sombatsompop, N., Thongsang, S., Markpin, T., and Wimolmala, E., 2004, “Fly Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers: Part I. Untreated Fillers in Natural Rubber and Styrene-Butadiene Rubber Compounds”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 93, pp. 2119-2130.
4. Thongsang S. and Sombatsompop N., 2005, “Effect of Filler Surface Treatment on Properties of Fly Ash/NR Blends”, *SPE ANTEC Technical Papers*, Boston, USA 1-5 May 2005
5. Garde, K., McGill, W. J., and Woolard, C. D., 1999, “Surface Modification of Fly Ash-Characterisation and Evaluation as Reinforcing Filler in Polyisoprene”, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-10.
6. Da Costa, H. M., Visconte, L. L. Y., Nunes, R. C. R., and Furtado, C. R. G., 2000, “The Effect of Coupling Agent and Chemical Treatment on Rice Husk Ash-Filled Natural Rubber Composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 76, pp. 1019-1027.

7. Chuayjuljit, S., Eiumnoh, S., and Potiyaraj, P., 2001, "Using Silica from Rice Husk as a Reinforcing Filler in Natural Rubber", *Journal of Scientific Research Chulalongkorn University*, Vol. 26, No. 2, pp. 127-138.
8. Choi, S. S., 2001, "Influence of the Silica Content on Rheological Behaviour and Cure Characteristics of Silica-Filled Styrene-Butadiene Rubber Compounds", *Polymer International*, Vol. 50, pp. 524-530.
9. Yin, D., Zhang, Y., Peng, Z., and Zhang, Y., 2003, "Effect of Fillers and Additives on the Properties of SBR Vulcanizates", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 88, pp. 775-782.
10. Da Costa, H. M., Visconte, L. L. Y., Nunes, R. C. R., and Furtado, C. R. G., 2003, "Rice-Husk-Ash-Filled Natural Rubber II. Partial Replacement of Commercial Fillers and the Effect on the Vulcanization Process", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 87, pp. 1405-1413.
11. Poh, B. T. and Ng, C. C., 1998, "Effect of Silane Coupling Agents on the Mooney Scorch Time of Silica-Filled Natural Rubber Compound", *European Polymer Journal*, Vol. 34, pp. 975-979.
12. Shanmugaraj, A. M., Sudip, R., Bandyopadhyay, S. J., and Bhowmickj A. K., 2003, "Surface Morphology of Styrene-Butadiene Rubber Vulcanizate Filled with Novel Electron Beam Modified Dual Phase Filler by Atomic Force Microscopy", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 7, pp. 1167-1186.

