



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้วยพอลิเตอรีสโตน

โดย ดร. กนกทิพย์ บุญเกิดและคณะ

พฤษภาคม 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้วยพอตเตอร์สโตน

คณะผู้วิจัย		สังกัด
1. อ.ดร. กนกทิพย์	บุญเกิด	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. รศ. เสาวรจน์	ช่วยจุลจิตร	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. นาย ดาไลบ	อัปคุรอมัน	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. นาย วีระกุล	เจริญเรืองทรัพย์	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติด้วยพอตเตอร์สโตน
(ภาษาอังกฤษ) Improvement of Physical Properties of Natural Rubber by Pottery Stone

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล	อ.ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด
หน่วยงาน	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์/โทรสาร	02-218-5541/02-218-5561
E-mail address	K.BOONKERD@GMAIL.COM

ผู้ร่วมวิจัย ชื่อ-สกุล รองศาสตราจารย์เสาวฤทธิ์ ช่วยจุลจิตร

นักศึกษา ชื่อ-สกุล นาย คาลิป อับดุลรอหมัน

ชื่อ-สกุล นาย วีระกุล เจริญเรืองทรัพย์

ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญ

การนำยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์มาใช้งาน จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรงลงไป คาร์บอนแบล็ก เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง อย่างไรก็ตามการคาร์บอนแบล็กเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งราคามีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การแสวงหาวัสดุทดแทนเพื่อมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยางจึงเป็นสิ่งสำคัญ ถึงแม้ว่าซิลิกาแบบตกตะกอนจะเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมยางว่าสามารถใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยาง แต่ปัญหาของซิลิกาแบบตกตะกอนก็คือ ต้องใช้ร่วมกับสารคู่ควบไซเลนเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้ต้นทุนชิ้นงานยางสูงขึ้น การสรรหาวัสดุตามธรรมชาติที่มีอยู่ในพื้นที่ ราคาถูกและขั้นตอนในการแปรรูปก่อนนำมาใช้ไม่ยุ่งยากจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องเร่งศึกษา

หินไรโอไลต์ (Rhyolite) หรือหินผุ จัดเป็นหินแกรนิตชนิดหนึ่ง มีองค์ประกอบของ SiO_2 อยู่ถึง 75.9% ใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิก จุดประสงค์หลักก็เพื่อใช้เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัวในเนื้อดินและในสีเคลือบ ทำให้มีชื่อทางการค้าว่าพอตเตอร์สโตน (Pottery Stone) สำหรับประเทศไทยพบพอตเตอร์สโตนอยู่หลายแหล่ง แต่แหล่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่ จังหวัดลำปาง ลพบุรี กาญจนบุรี และเพชรบุรี ลักษณะทางกายภาพของพอตเตอร์สโตนที่สำคัญคือ มีความแข็งแรงน้อย ทำให้ง่ายต่อการบด จากองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของพอตเตอร์สโตน จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ นอกจากนี้แล้วพอตเตอร์สโตนยังมีราคาถูกกว่าดินขาวซึ่งปัจจุบันได้นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางอีกด้วย ซึ่งหากแนวคิดข้างต้นประสบความสำเร็จก็จะนำไปสู่สูตรยางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งาน แต่มีต้นทุนที่ต่ำลง เพื่อเป็นอีกทางเลือกให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมยางในประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรของประเทศไทยให้เพิ่มมากขึ้น

วัตถุประสงค์

- ศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมพอตเตอร์สโตนที่มีขนาดอนุภาคและปริมาณต่าง ๆ กัน
- เปรียบเทียบความสามารถในการเสริมแรงยางธรรมชาติของพอตเตอร์สโตนกับสารตัวเติมเสริมแรงทางการค้าประเภทซิลิกาแบบตกตะกอนและการ์บอนแบล็ก

- ศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงพื้นผิวพอดเทอริสโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลนและกรดสเตียริกต่อคุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

ผลการดำเนินงาน

พอดเทอริสโตนที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ตามกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียม โดยสองกลุ่มแรกเป็นพอดเทอริสโตนที่ไม่ได้ผ่านการบด แต่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน โดยแบ่งออกเป็น กลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่า 106 ไมครอน แทนด้วย **PS(<106)** และกลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่า 38 ไมครอน แทนด้วย **PS(<38)** ส่วนอีกสองกลุ่มที่เหลือเป็นพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดลดขนาด แบ่งตามกรรมวิธีที่ใช้ในการบดดังนี้ กลุ่มที่ผ่านการบดด้วย current jet mill แทนด้วย **PS(JM)** และกลุ่มที่ผ่านการบดด้วย wet ball mill แทนด้วย **PS(BM)** ขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนเมื่อทำการวัดก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคสามารถเรียงลำดับตามค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ จากใหญ่ที่สุดไปหาเล็กที่สุด ได้ดังนี้ **PS(BM)** **PS(<106)** **PS(<38)** และ **PS(JM)** ในขณะที่ขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนเมื่อทำการวัดหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิค พบว่า **PS(BM)** มีค่า $d(0.5)$ น้อยที่สุดและเป็นพอดเทอริสโตนเพียงกลุ่มเดียวที่มีค่า $d(0.5)$ น้อยกว่าไมครอน ในขณะที่พอดเทอริสโตน 3 กลุ่มที่เหลือหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคมีค่า $d(0.5)$ ที่ใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงประมาณ 3-5 ไมครอน ซึ่งขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนเมื่อผ่านการผสมกับยางน่าจะใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้หลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิค ซึ่งการที่อนุภาคเกิดการแตกตัวออกก็เนื่องมาจากแรงเฉือนระหว่างการผสมยาง ผลของการเติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดและปริมาณต่าง ๆ กันต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางถูกศึกษาเทียบกับผลของการเติมสารตัวเติมเสริมแรงยางทางการค้า 2 ชนิด ซึ่งในที่นี้คือ ซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้ การเติมพอดเทอริสโตนลงในยางธรรมชาติส่งผลทำให้ระยะเวลาสกรอว์ (t_{90}) และระยะเวลาในการคงรูปที่ 90% (t_{90}) ลดลง โดยพอดเทอริสโตนทั้ง 4 กลุ่ม ส่งผลต่อการลดลงของระยะเวลาสกรอว์ใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีของระยะเวลาในการคงรูป พบว่า **PS(BM)** เป็นกลุ่มที่ส่งผลต่อการลดลงมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลของปริมาณพอดเทอริสโตนที่เติม พบว่า ปริมาณของพอดเทอริสโตนที่เติมไม่ได้ส่งผลต่อการลดลงของค่าทั้งสองอย่างมีนัยสำคัญ การเติมคาร์บอนแบล็กก็ส่งผลให้ระยะเวลาสกรอว์และเวลาในการคงรูปของยางลดลงเช่นกัน แต่สำหรับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนมีแนวโน้มที่จะทำให้การคงรูปของยางเกิดได้ช้าลง จากการคำนวณจำนวนพันธะข้ามของยางคงรูปจากการบวมตัวของยางในโทลูอิน พบว่า การเติมพอดเทอริสโตนลงในยางไม่ส่งผลต่อจำนวนพันธะข้ามของยางคงรูปแต่อย่างใด เมื่อพิจารณาผลของการเติมคาร์บอนแบล็ก พบว่า ยางที่เติมคาร์บอนแบล็กมีจำนวนพันธะข้ามสูงกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย ยิ่งเติมคาร์บอนแบล็กมากขึ้นจำนวนพันธะข้ามก็ยิ่งสูงขึ้น สาเหตุที่ยางคงรูปเมื่อเติมคาร์บอนแบล็กแล้วมีจำนวนพันธะข้ามที่สูงกว่ายางคงรูปที่ไม่ได้เติมคาร์บอนแบล็กมาจาก 2 ส่วนด้วยกันดังนี้ สายโซ่ของยางที่ขาดระหว่างการผสม(เนื่องมาจากแรงเฉือน)เกิดพันธะเคมีกับหมู่ฟังก์ชันเคมีที่บริเวณผิวของคาร์บอนแบล็ก ทำให้การบวมตัวลดลง อีกสาเหตุคือ การแทรกตัวของสายโซ่ยางเข้าไปตามซอกหรือรูพรุนที่ผิวของคาร์บอนแบล็กซึ่งทำให้มีลักษณะคล้าย physical crosslink ส่งผลให้การบวมตัวของยางในตัวทำละลายลดลงเช่นกัน ดังนั้นจำนวนพันธะข้ามที่ได้จากการคำนวณจึงสูงขึ้น ซึ่งจำนวนพันธะข้ามที่เพิ่มขึ้นสามารถบ่งชี้ถึงระดับอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมได้ จากการพิจารณาจำนวนพันธะข้ามของยางที่เติมพอดเทอริสโตนทำให้สามารถสรุปได้ว่า อันตรกิริยาระหว่างพอดเทอริสโตนกับยางมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนส่งผลให้จำนวนพันธะข้ามของยางลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการดูดซับสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการคงรูปยางบนผิวของซิลิกาแบบตกตะกอน ส่งผลให้การคงรูปของยางลดลง เมื่อพิจารณาผลของการเติมพอดเทอริสโตนต่อสมบัติเชิงกล พบว่า สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางคงรูปที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและปริมาณของพอดเทอริสโตนที่เติม ยางธรรมชาติที่เติมพอดเทอริสโตนกลุ่ม **PS(BM)** ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดจะมีค่าความต้านทานการฉีกขาด ความทนแรงดึง ความต้านทานการขาด และความแข็งแรงสูงสุด สำหรับปริมาณที่เหมาะสมของ **PS(BM)** ต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางจะอยู่ที่ 30

p/hr (ยกเว้นค่าความแข็งของยางซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอดเทอริสโตนที่เติมลงไป) สำหรับพอดเทอริสกลุ่ม PS(JM) PS(<38) และ PS(<106) จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า พอดเทอริสโตนทั้ง 3 กลุ่มข้างต้นมีความสามารถในการเสริมแรงต่ำ สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับของยางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเสริมแรงระหว่างพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(BM) ซึ่งเป็นพอดเทอริสโตนกลุ่มที่มีความสามารถในการเสริมแรงดีที่สุดกับคาร์บอนแบล็กและซิลิกาแบบตกตะกอนพบว่า ความสามารถในการเสริมแรงของพอดเทอริสโตนมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับของคาร์บอนแบล็ก ในขณะที่ความสามารถในการเสริมแรงของ PS(BM) เมื่อเติมในปริมาณ 30 p/hr จะมีค่าใกล้เคียงกับของซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเมื่อเติมในปริมาณ 20 p/hr อย่างไรก็ตามในกรณีของพอดเทอริสโตนหากเติมเกินปริมาณที่เหมาะสมสมบัติเชิงกลจะค่อย ๆ ลดต่ำลง แต่ในกรณีของซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว การเติมเกินปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงอย่างรวดเร็ว การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 และกรดกรดเตียริกที่ 2 และ 4% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลให้ความสามารถในการเสริมแรงของพอดเทอริสโตนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของพอดเทอริสโตนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับของซิลิกาแบบตกตะกอน นอกจากนี้แล้วในบางกรณียังพบว่า สมบัติเชิงกลบางประการมีค่าลดลง สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาแบบตกตะกอนส่งผลให้ความสามารถในการเสริมแรงของซิลิกาแบบตกตะกอนสูงขึ้นอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาถึงต้นทุน ราคาของพอดเทอริสโตนที่ใช้เป็นวัตถุดิบอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 2 บาท (หมายเหตุ: ราคานี้เป็นราคาที่บริษัทสั่งซื้อในปริมาณมาก) สำหรับการเตรียมพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(BM) ต้นทุนสำหรับการบดอนุภาคด้วย wet ball mill ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ พิษณุ บุญนวลและคณะ (RDG485021) จะอยู่ที่ 10,690 บาท/เมตริกตัน เมื่อเวลาในการบดเท่ากับ 147 ชั่วโมง (หมายเหตุ: เวลาในการบดที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 72 ชั่วโมง) ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า ต้นทุนการเตรียมพอดเทอริสโตนสำหรับใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงยังคงมีราคาถูกกว่ามากเมื่อเทียบกับสารตัวเติมเสริมแรงทางการค้าซึ่งมีราคาขายอยู่ที่ตั้งแต่ 50 บาทต่อกิโลกรัม เป็นต้นไป (ขึ้นกับชนิดและเกรดของสารเสริมแรงนั้น ๆ)

สรุปผลการวิจัย

การนำพอดเทอริสโตนซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศไทย มาดัดแปลงให้มีขนาดเล็กกว่าไมครอน โดยการบดด้วย wet ball mill ทำให้ได้สารตัวเติมที่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยางธรรมชาติได้ ถึงแม้ว่าพอดเทอริสโตนจะมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงไม่สูงเท่ากับคาร์บอนแบล็ก แต่สมบัติเชิงกลของยางที่ได้ก็มีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้เติมสารคู่ควบไซเลน เมื่อเปรียบเทียบขั้นตอนในการผลิตหรือขั้นตอนในการเตรียมสารตัวเติมแต่ละชนิด จะเห็นว่า การเตรียมพอดเทอริสโตนนอกจากจะมีความยุ่งยากน้อยที่สุดแล้ว ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตก็ต่ำกว่าด้วย

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

จากการทดลองจะเห็นว่า การเติมพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าระดับไมครอนสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางได้ การเติมพอดเทอริสโตนในปริมาณมากส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงจากจุดสูงสุดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นหากมีการใช้พอดเทอริสโตนร่วมกับคาร์บอนแบล็กน่าจะส่งผลให้ได้ยางที่มีสมบัติเชิงกลที่สูงมากพอที่จะนำไปใช้งาน ในขณะที่ผู้ผลิตสามารถลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้จะเห็นว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อระดับความสามารถในการเสริมแรงคือ ขนาดหรือพื้นที่ผิวของอนุภาค ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการบดเพื่อลดขนาดเพียงอย่างเดียว หากทำการกระตุ่นพอดเทอริสโตนที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ผิว ซึ่งจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของพอดเทอริสโตนเพิ่มมากขึ้น ยางกับพอดเทอริสโตนน่าจะเกิดอันตรกิริยาต่อกันมากขึ้น จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางเพิ่มมากขึ้น

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น บทความวิจัยระดับชาติ

บทคัดย่อ

ผลของขนาด ปริมาณ และการปรับปรุงพื้นผิวของพอดเทอริสโตนต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยพอดเทอริสโตนที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม สองกลุ่มแรกเป็นพอดเทอริสโตนที่ไม่ได้ผ่านการบด แต่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน แบ่งเป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กกว่า 106 ไมครอน ($PS(<106)$) และที่มีขนาดเล็กกว่า 38 ไมครอน ($PS(<38)$) อีกสองกลุ่มเป็นพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบด โดยแบ่งกลุ่มตามกรรมวิธีที่ใช้บด กลุ่มที่ผ่านการบดด้วย current jet mill ($PS(JM)$) และที่ผ่านการบดด้วย wet ball mill ($PS(BM)$) ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก จากค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ สามารถเรียงลำดับพอดเทอริสโตนจากกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ที่สุดไปเล็กที่สุด ได้ดังนี้ $PS(BM)$ $PS(<106)$ $PS(<38)$ และ $PS(JM)$ อย่างไรก็ตามหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่า $PS(BM)$ มีค่า $d(0.5)$ ต่ำที่สุดและค่าที่ได้ก็น้อยกว่าไมครอน ในขณะที่พอดเทอริสโตน 3 กลุ่มที่เหลือมีค่า $d(0.5)$ ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 3-5 ไมครอน ปริมาณของพอดเทอริสโตนที่เติมอยู่ที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง สารตัวควบไซเลน Si69 และกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักถูกใช้เป็นตัวปรับปรุงพื้นผิว โดยความสามารถในการเสริมแรงของพอดเทอริสโตนถูกศึกษาเปรียบเทียบกับการใช้สารตัวเติมเสริมแรงทางการค้า 2 ชนิด คือ ซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก

ผลการทดลองพบว่า การเติมพอดเทอริสโตนทำให้ระยะเวลาสกร๊ชและเวลาในการคงรูปยางลดลง โดย $PS(BM)$ จะส่งผลทำให้ระยะเวลาในการคงรูปยางลดลงมากที่สุด ในขณะที่ปริมาณของพอดเทอริสโตนที่เติมไม่มีผลต่อค่าทั้งสองสำหรับสมบัติเชิงกลของยางที่เติมพอดเทอริสโตนจะขึ้นกับทั้งขนาดและปริมาณของพอดเทอริสโตนที่เติม โดยรวมแล้วยางธรรมชาติที่เติม $PS(BM)$ ที่ปริมาณตั้งแต่ 20 ถึง 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง มีค่าความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการขาด และความแข็งแรงสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใดๆ และค่าที่ได้ยังสูงกว่าการเติมพอดเทอริสโตนกลุ่มอื่นๆ โดยปริมาณของ $PS(BM)$ ที่ให้ค่าความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการขาดที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยาง สำหรับค่าความแข็งแรงของยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอดเทอริสโตนที่เติม เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางที่เติมพอดเทอริสโตนกับยางที่เติมคาร์บอนแบล็ก พบว่า ความสามารถในการเสริมแรงของพอดเทอริสโตนมีค่าต่ำกว่ามาก ในขณะที่ค่าความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานการขาดสูงสุดของยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้เติมสารปรับปรุงพื้นผิวเมื่อเทียบกับยางที่เติม $PS(BM)$ พบว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยปริมาณของซิลิกาแบบตกตะกอนและ $PS(BM)$ ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 20 และ 30 ส่วนในร้อยส่วนของยางตามลำดับ การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารตัวควบไซเลน Si69 และกรดสเตียริกไม่มีผลต่อความสามารถในการเสริมแรงของพอดเทอริสโตนแต่อย่างใด แต่พบว่า ซิลิกาแบบตกตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารตัวควบไซเลน Si69 จะให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอย่างชัดเจน

Abstract

Effects of size, amount, and surface modification of pottery stone (PS) on the curing and mechanical properties of natural rubber were studied here. PS used here was divided into four groups. Two of these were raw PS without grinding. By sieving, PS with particle size less than 106 micron (PS(<106)) and less than 38 micron (PS(<38)) were obtained. The rests were ground PS classified by grinding method. One was PS ground by current jet milling, PS(JM). The other was PS ground by wet ball milling, PS(BM). Results from determining particle size distribution of PS prior to ultrasonication showed that the order of PS according to their $d(0.5)$ and $d(0.9)$ from one with the largest size to one with the smallest size was PS(BM), PS(<106), PS(<38), and PS(JM). However, it was shown that after ultrasonication for 10 min, PS(BM) had the smallest $d(0.5)$ and its value was less than micron. The remaining three PS groups showed nearly the same $d(0.5)$ which was in the range of 3-5 micron. The amounts of PS were varied from 10 to 20, 30, 40 and 50 phr, respectively. Silane coupling agent Si69 and stearic acid at 2 and 4% by weight was used as a surface modifier. The ability to reinforce of PS was studied in comparison with two commercial reinforcing fillers, precipitated silica and carbon black.

The results showed that the presence of PS shortened the scorch time and optimum cure time. PS(BM) had the greatest effect on the optimum cure time, while PS loading did not show any significant impact on these two curing properties. For mechanical properties, it was observed that they depended on both size and amount of PS. Generally, NR filled with PS(BM) from 20 to 50 phr gave higher tensile strength, tear strength, abrasion resistance and hardness than not only those of gum NR but also those of NR filled with the remaining three PS groups. The optimum loading of PS(BM) for the first three properties was at 30 phr. While the hardness increased proportionally with the increase in PS loading. When compared to carbon black, the degree of reinforcing of PS(BM) was considerably low. However, the highest obtainable tensile strength, tear strength and abrasion resistance of NR filled with precipitated silica without surface modifier were comparable to those of NR filled with PS(BM). The optimum loading of precipitated silica and PS(BM) was 20 and 30 phr, respectively. Surface modification of PS by silane coupling agent Si69 and stearic acid had no effect on the ability to reinforce of PS. Nevertheless, the Si69 modified surface precipitated silica gave NR much higher mechanical strength than the unmodified surface one.

ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

การนำยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์มาใช้งาน จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรงลงไป คาร์บอนแบล็ก เป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง อย่างไรก็ตามคาร์บอนแบล็กเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งราคามีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การแสวงหาวัสดุทดแทนเพื่อมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยางจึงเป็นสิ่งสำคัญ ถึงแม้ว่าซิลิกาแบบตกตะกอนจะเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมยางว่าสามารถใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยาง แต่ปัญหาของซิลิกาแบบตกตะกอนก็คือ ต้องใช้ร่วมกับสารคู่ควบไซเลนเพื่อทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี ส่งผลให้ต้นทุนชิ้นงานยางสูงขึ้น การสรรหาวัสดุตามธรรมชาติที่มีอยู่ในพื้นที่ ราคาถูกและขั้นตอนในการแปรรูปก่อนนำมาใช้ไม่ยุ่งยากจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องเร่งศึกษา

หินไรโอไลต์ (Rhyolite) หรือหินผุ จัดเป็นหินแกรนิตชนิดหนึ่ง มีองค์ประกอบของ SiO_2 อยู่ถึง 75.9% ใช้มากในอุตสาหกรรมเซรามิก จุดประสงค์หลักก็เพื่อใช้เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมตัวในเนื้อดินและในสีเคลือบ ทำให้มีชื่อทางการค้าว่า พอตเตอร์สโตน (Pottery Stone) สำหรับประเทศไทยพบพอตเตอร์สโตนอยู่หลายแหล่ง แต่แหล่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกได้แก่ จังหวัดลำปาง ลพบุรี กาญจนบุรี และเพชรบุรี ลักษณะทางกายภาพของพอตเตอร์สโตนที่สำคัญคือ มีความแข็งน้อย ทำให้ง่ายต่อการบด จากองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของพอตเตอร์สโตน จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ นอกจากนี้แล้วพอตเตอร์สโตนยังมีราคาถูกกว่าดินขาวซึ่งปัจจุบันได้นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยางอีกด้วย ซึ่งหากแนวคิดข้างต้นประสบความสำเร็จก็จะนำไปสู่สูตรยางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งาน แต่มีต้นทุนที่ต่ำลง เพื่อเป็นอีกทางเลือกให้กับผู้ประกอบการอุตสาหกรรมยางในประเทศไทย อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรของประเทศไทยให้เพิ่มมากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติเมื่อมีการเติมพอตเตอร์สโตนที่มีขนาดอนุภาคและปริมาณต่าง ๆ กัน
2. เปรียบเทียบความสามารถในการเสริมแรงยางธรรมชาติของพอตเตอร์สโตนกับสารตัวเติมเสริมแรงทางการค้าประเภทซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก
3. ศึกษาเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงพื้นผิวพอตเตอร์สโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไซเลนและกรดสเตียริกต่อคุณสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติ

ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างทางเคมีเป็น cis-1,4-polyisoprene มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมากตั้งแต่ 200,000-400,000 และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อยู่ที่ประมาณ -72°C ที่อุณหภูมิห้องยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อนำแรงภายนอกที่กระทำออกไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังจะได้รับแรงดึง ยางธรรมชาติยังสามารถเกิดการตกผลึกได้ ส่งผลทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่ายางสังเคราะห์ อย่างไรก็ตามการนำยางไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์มาใช้งานนอกเหนือจากการเติมสารคงรูปเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ยาง ซึ่งจะส่งผลให้ยางมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น ลักษณะทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแล้ว ยังจำเป็นต้องเติมสารตัวเติมชนิดอื่น ๆ อีกด้วย โดยเฉพาะสารตัวเติมกลุ่มที่เสริมแรง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติเชิงกลสูงมากพอที่จะนำไปใช้ได้ สำหรับปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเสริมแรงยางคือ ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม ยิ่งขนาดอนุภาคเล็กเท่าไร ประสิทธิภาพในการเสริมแรงก็ยิ่งสูงขึ้น และจะต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้แล้วหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของสารตัวเติมก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสริมแรงเช่นกัน สำหรับสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์บอนแบล็กและซิลิกาแบบตกตะกอน โดยคาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมแรงให้แกยางมากที่สุด มีขนาดอนุภาค

ตั้งแต่ 10-100 นาโนเมตร มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก สำหรับซิลิกาแบบตกตะกอนมีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นสารตัวเติมที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ ดังนั้นจึงมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางที่มีสี อย่างไรก็ตามเนื่องจากพื้นผิวของซิลิกาแบบตกตะกอนประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้อนุภาคของซิลิกา รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่อย่างเหนียวแน่นผ่านพันธะไฮโดรเจน ทำให้การแตกตัวและการกระจายตัวในยางเกิดได้ยากกว่าคาร์บอนแบล็กแล้ว นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลยังทำให้พื้นผิวมีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่าง ๆ ที่มีอยู่ในยางคอมพาวนด์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการคงรูปของยาง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาข้างต้น จึงต้องมีการเติมสารเคมีที่เรียกว่า สารคู่ควบไฮเลน (silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา และลดการรวมตัวกันเป็นแอ็กโกลเมอเรตขนาดใหญ่ โดยทั่วไปสารคู่ควบไฮเลนจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ คือหมู่อัลคอกซี (alkoxy) และหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์

ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการนำวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติหรือขยะจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มาดัดแปลงเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยาง ไม่ว่าจะเป็นดินขาว (kaolin) เถ้าลอย (fly ash) หรือเถ้าแกลบ (rice husk ash) ทั้งนี้ก็เพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบและการแสวงหาวัสดุทดแทนเพื่อเตรียมไว้สำหรับอนาคต เนื่องจากการผลิตคาร์บอนแบล็กต้องใช้วัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมซึ่งปริมาณที่เหลืออยู่ในธรรมชาติลดลงเรื่อย ๆ และราคาก็มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ซิลิกาแบบตกตะกอนถึงแม้ว่าจะผลิตจากวัตถุดิบที่มีราคาถูกกว่า แต่ขั้นตอนการผลิตมีค่าใช้จ่ายที่สูง อีกทั้งต้องใช้ร่วมกับสารคู่ควบไฮเลนซึ่งมีราคาก่อนข้างสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ต้นทุนชิ้นงานยางสูงขึ้น

สำหรับตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้ทดแทนสารตัวเติมเสริมแรงในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ งานวิจัยของ Jincheng, Yuehui, and Jihu (2005) [1] ซึ่งนำดินขาวมาดัดแปลงเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงยางธรรมชาติ โดยคณะผู้วิจัยได้ศึกษาประสิทธิภาพการเสริมแรงของดินขาวเทียบกับคาร์บอนแบล็ก ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้คณะผู้วิจัยเลือกใช้ดินขาวก็เนื่องมาจากดินขาวมี SiO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาแบบตกตะกอนอยู่ถึง 44.66% นอกจากนี้แล้วดินขาวยังเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่าย สำหรับขั้นตอนในการดัดแปลงดินขาวเพื่อนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงเริ่มจากการบดดินขาวด้วย air flow milling จากนั้นนำดินขาวที่ผ่านการบดมาผ่านด้วยตะแกรงร่อน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ผ่านตะแกรงร่อนละเอียดขนาด 1250 เมช ใช้สัญลักษณ์ (#1) และกลุ่มที่ผ่านตะแกรงร่อนละเอียดขนาด 4500 เมช แทนด้วยสัญลักษณ์ (#2) ดินขาวทั้งสองกลุ่มจะถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกก่อนที่จะเติมลงในยาง ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ จากการทดลองพบว่า ยางคงรูปที่มีการเติมดินขาว 60 phr กลุ่ม (#2) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจะมีความทนแรงดึงสูงกว่ายางคงรูปที่เติมดินขาวกลุ่ม (#1) ในขณะที่ค่าความแข็ง Shore A ของยางคงรูปที่เติมดินขาวทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลระหว่างยางที่เติมคาร์บอนแบล็กกับยางที่เติมดินขาวกลุ่ม (#2) ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่า ยางที่เติมดินขาวให้ค่าความทนแรงดึงสูงกว่ายางที่เติมคาร์บอนแบล็กประมาณ 2 MPa ในขณะที่ยางคงรูปที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าความแข็ง Shore A สูงกว่า

ศิริพรและณรงฤทธิ์ (2550) [2] ได้นำเถ้าลอยซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการเผาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแหล่งต่าง ๆ ภายในประเทศครั้งนี้ แม่เมาะ บ้านโป่งและระยอง มาใช้เป็นสารเสริมแรงยางธรรมชาติเทียบกับการใช้ซิลิกาแบบตกตะกอนขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งอยู่ในช่วงประมาณ 20-50 ไมครอน ปริมาณ SiO_2 ในเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะและบ้านโป่งจะอยู่ที่ประมาณ 35% ในขณะที่จากระยะของจะอยู่ที่ 27% พื้นผิวของเถ้าลอยและซิลิกาแบบตกตะกอนจะถูกปรับปรุงด้วยสารคู่ควบไฮเลนชนิด Si69 ก่อนที่จะถูกเติมลงในยาง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มการกระจายตัวและการยึดเกาะระหว่างเถ้าลอยหรือซิลิกาแบบตกตะกอนกับยางธรรมชาติ จากการทดลองพบว่า ยางคงรูปที่เติมเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ ที่ 30 phr

(คิดจากปริมาณ SiO_2 ที่อยู่ในเถ้าลอย) จะมีความทนแรงดึงและความต้านทานต่อการสึกกร่อนใกล้เคียงกับยางคงรูปที่เดิม ซิลิกาแบบตกตะกอนที่ 30 phr แต่เมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มมากขึ้น ยางคงรูปที่เติมเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ จะมีความทนแรงดึงและความต้านทานการสึกกร่อนลดลง ในขณะที่เมื่อปริมาณซิลิกาแบบตกตะกอนมากขึ้น ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น

นอกเหนือจากตัวอย่างข้างต้นแล้ว เถ้าแกลบเป็นสารตัวเติมอีกชนิดหนึ่งที่ได้ความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากเถ้าแกลบมีองค์ประกอบของ SiO_2 อยู่ในปริมาณสูง เริ่มตั้งแต่ 49 % จนถึง 98% ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการเผาเถ้า งานวิจัยของ Sac-Oui, Rakdee, and Thanmathorn (2002) [3] เป็นหนึ่งในงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาผลของเถ้าแกลบต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติ เถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ เถ้าแกลบที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ (RHA-LC, 3.4%) และเถ้าแกลบที่มีปริมาณคาร์บอนสูง (RHA-HC, 7.0%) ผลการทดลองพบว่า เถ้าแกลบทั้งสองชนิดส่งผลต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติในแนวโน้มเดียวกันดังนี้ การเติมเถ้าแกลบทำให้ระยะเวลาสกร๊ชและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ 90% ลดลง ยิ่งเติมเถ้าแกลบมากระยะเวลาสกร๊ชและระยะเวลาในการคงรูปยางที่ 90% ก็จะลดลงมากขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของยางที่ได้ พบว่า การเติมเถ้าแกลบส่งผลทำให้สมบัติความทนแรงดึง ความต้านทานการสึกกร่อน และความต้านทานการขัดถูของยางลดลง โดยสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางที่เติมเถ้าแกลบจะใกล้เคียงกับของยางที่เติมสารตัวเติมกลุ่มที่ไม่เสริมแรง คือ ทดกัม เกลิน และแคลเซียมคาร์บอเนต

จากตัวอย่างการนำวัสดุต่าง ๆ มาดัดแปลงเพื่อใช้ในยางธรรมชาติ จะเห็นว่าส่วนใหญ่เป็นการนำเอาวัสดุที่มี SiO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของซิลิกาแบบตกตะกอนมาใช้ โดยมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ขนาดอนุภาค จะเห็นว่าขนาดยิ่งเล็กความสามารถในการเสริมแรงก็จะสูงขึ้น ปริมาณที่เติมต้องมีความเหมาะสม นอกจากนี้หุ้มน้ำมันที่พื้นผิวของสารตัวเติมก็เป็นอีกปัจจัยที่กำหนดความสามารถในการเสริมแรง สำหรับงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำพอตเตอร์สโตนมาดัดแปลงเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพอตเตอร์สโตนหรือหินผุซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่าหิน Rhyolite มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบสูงถึง 75% Aungathichart (2007) [4] รายงานว่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของพอตเตอร์สโตนจะอยู่ในรูปของแร่ไตรโคไมท์ (SiO_2) และแร่เฟลด์สปาร์ ($\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีส่วนของแร่ควอตซ์และเกลินปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งนอกจากปริมาณของ SiO_2 ที่สูงแล้ว พอตเตอร์สโตนยังเป็นทรัพยากรที่สามารถหาได้ในประเทศไทย มีราคาถูกและสามารถทำการบดให้มีขนาดเล็กลงได้ง่ายเนื่องจากจัดอยู่ในกลุ่มหินอัคนีหรือหินที่กำลังกลายสภาพเป็นดิน ทำให้คาดว่าจะมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ โดยที่ต้นทุนการดัดแปลงจะเลือกวิธีที่มีต้นทุนไม่สูงมากนัก

วิธีการ

การเตรียมพอตเตอร์สโตน

พอตเตอร์สโตนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไชมิส เมอร์ชานไดส์ จำกัด ซึ่งมีต้นกำเนิดจากจังหวัดลพบุรี พอตเตอร์สโตนที่ใช้จะแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ตามกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียมก่อนนำไปผสมกับยาง ดังนี้

1. พอตเตอร์สโตนที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 106 ไมครอน (แทนด้วย **PS(<106)**)

นำพอตเตอร์สโตนประมาณ 200 กรัม มาวางด้านบนของตะแกรงร่อนขนาด 140 เมช ทำการเขย่าเป็นเวลา 50 นาที พอตเตอร์สโตนที่มีขนาดเล็กกว่า 106 ไมครอน จะถูกแยกออกมาอยู่ด้านล่างของตะแกรงร่อน

2. พอตเตอร์สโตนที่ผ่านการคัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 38 ไมครอน (แทนด้วย **PS(<38)**)

นำพอตเตอร์สโตนประมาณ 200 กรัม มาวางด้านบนของตะแกรงร่อนขนาด 400 เมช ทำการเขย่าเป็นเวลา 50 นาที พอตเตอร์สโตนที่มีขนาดเล็กกว่า 38 ไมครอน จะถูกแยกออกมาอยู่ด้านล่างของตะแกรงร่อน

3. พอตเตอร์สโตนที่ผ่านการบดด้วย current jet mill (แทนด้วย **PS(JM)**)

นำพอดเทอริสโตนใส่ลงในเครื่องบด current jet mill กลไกการทำงานเริ่มจากการพ่นลำของไหล (ในที่นี้คือพอดเทอริสโตน) เข้าไป เพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อนุภาคจะบดกันเองเนื่องจากการกระแทกกันระหว่างเคลื่อนที่ และจะผ่านเข้าสู่ห้องสำหรับคัดแยกขนาดต่อไป สำหรับเครื่อง current jet mill สามารถใช้ในการบดวัสดุให้มีขนาดอนุภาคระดับไมครอนหรือเล็กกว่าไมครอนได้

4. พอดเทอริสโตนที่ผ่านการบด wet ball mill (แทนด้วย PS(BM))

นำพอดเทอริสโตนประมาณ 400 กรัม ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 1000 ml ที่มีลูกบอลลูมินาอยู่ 2 ใน 3 ของขวดพลาสติก หลังจากนั้นเติมน้ำ 400 ml ปิดฝาขวดให้สนิท ทำการบดเป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นกรองส่วนผสมที่ได้จากการบด (slurry) ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 38 ไมครอน (400 เมช) ทำการเติมน้ำให้ได้ปริมาตรรวมเป็น 4000 ml ตั้งทิ้งไว้ข้ามคืน แยกส่วนของเหลวออกมาและนำไปอบไล่ความชื้นแห้ง นำพอดเทอริสโตนที่ได้มาผ่านการบดซ้ำด้วย vibrating cup mill เป็นเวลาประมาณ 30 วินาที อีกครั้งหนึ่ง

การปรับปรุงพื้นผิวของพอดเทอริสโตนและซิลิกาแบบตกตะกอน

1. การปรับปรุงพื้นผิวของพอดเทอริสโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไฮเลน Si69 (Bis-(3-Triethoxysilylpropyl)-Tetrasulfide) มีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

- ทำการเติมสารคู่ควบไฮเลน Si69 จำนวน 2 และ 4 กรัม ลงในเอทานอล 100 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารเข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร

- เติมพอดเทอริสโตน (หรือซิลิกาแบบตกตะกอน) 100 กรัม ลงในสารละลายที่เตรียมไว้อย่างช้า ๆ จากนั้นทำการคนต่ออีกประมาณ 15 นาที เพื่อให้ของผสมเข้ากัน

- นำของผสมที่ได้ไปอบเพื่อไล่เอทานอลออกให้หมดที่อุณหภูมิ 100-110°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

- บดพอดเทอริสโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน Si69 ที่แห้งแล้วด้วย vibrating cup mill เป็นเวลา 30 วินาที

2. การปรับปรุงพื้นผิวของพอดเทอริสโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยกรดสเตียริก มีขั้นตอนการเตรียมเหมือนกับการใช้สารคู่ควบไฮเลน Si69 แตกต่างกันแค่เพียงใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางแทนเอทานอล

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพอดเทอริสโตน

องค์ประกอบทางเคมีของพอดเทอริสโตนจากแหล่งลพบุรีที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence

การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตน

การกระจายขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนทั้ง 4 กลุ่ม สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่อง Mastersizer 2000 โดยการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังนี้ การวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคก่อนการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก และการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคหลังการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที เพื่อดูขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนและลักษณะการเกาะกลุ่มกันของพอดเทอริสโตน

การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของอนุภาคพอดเทอริสโตน

นำพอดเทอริสโตนทั้งที่ไม่ผ่านการบดลดขนาดและที่ผ่านการบดลดขนาดด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ มาวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของอนุภาคด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (Philips รุ่น XL 30 CP)

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของพอดเทอริสโตน

โครงสร้างทางเคมีของพอดเทอริสโตนและของซิลิกาแบบตกตะกอนสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR Spectroscopy (Bruker รุ่น Vector 22) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 4000 ถึง 500 cm^{-1}

การเตรียมยางคอมพาวด์

สูตรสารประกอบยางที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1 โดยมีขั้นตอนการเตรียมยางคอมพาวด์แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: ทำการผสมยางกับสารเคมียางทั้งหมดตามตารางที่ 1 ยกเว้นกำมะถันและสารเร่ง TBBS ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Brabender) โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมที่ 50°C ความเร็วในการหมุนของโรเตอร์ที่ 50 rpm ใช้ระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 8 นาที นำยางคอมพาวด์ที่ได้ออกมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งเย็น

ขั้นตอนที่ 2: นำยางคอมพาวด์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาผสมกับกำมะถันและสารเร่ง TBBS บนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 5 นาที โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของลูกกลิ้งที่ 40°C หลังจากผสมเสร็จแล้ว รีดยางคอมพาวด์ที่ได้ให้เป็นแผ่นวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 16-24 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 สูตรสารประกอบยาง

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr) ¹
ยางแท่ง STR 5L	100
สารตัวเติม ²	0,10, 20, 30, 40 และ 50
กรดสเตียริก	2
ซิงค์ออกไซด์	5
ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลดีนไธโอเอมีน (6PPD)	3
บิวทิลเบนโซโทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (TBBS)	1.2
กำมะถัน	1.5

¹ phr: parts per hundred of rubber by weight

² สารตัวเติมที่ใช้มีด้วยกัน 3 ชนิด ดังนี้ พोटเตอร์สโตน ซิลิกาแบบตกตะกอน (TOKUSIL® 255) และคาร์บอนแบล็ก (N330)

การทดสอบหาเวลาในการคงรูป

นำยางคอมพาวด์ประมาณ 4-5 กรัม มาทดสอบลักษณะการคงรูปด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 160°C เพื่อหาระยะเวลาสกร็อซ (t_{s2}) ระยะเวลาในการคงรูปยางที่ 90% (t_{c90}) และผลต่างแรงบิด (delta torque)

การเตรียมยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์มาขึ้นรูปเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 18 x 18 x 0.2 cm สำหรับเตรียมขึ้นทดสอบหาสมบัติความทนแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความแข็ง และจำนวนพันธะข้ามจากการบวมตัว และสี่เหลี่ยมขนาด 15 x 24 x 0.35 cm สำหรับเตรียมขึ้นทดสอบสมบัติต้านความต้านทานการขาดด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C โดยใช้เวลาในการขึ้นรูปเท่ากับ t_{c90}

การหาความหนาแน่นของพันธะข้ามของยางคงรูปจากดัชนีการบวมตัว

นำชิ้นทดสอบยางที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีน้ำหนักประมาณ 0.7 กรัม แคล่งในโทลูอีนเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาซับด้วยกระดาษก่อน แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก ผึ่งลมให้แห้งแล้วทำ

การชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำค่าน้ำหนักของยางที่บวมตัวและยางที่แห้งมาแทนค่าในสมการที่ 1 เพื่อหาค่าสัดส่วนปริมาตรของยางที่บวมตัว (V_r) หลังจากนั้นนำค่า (V_r) ที่ได้ไปแทนค่าในสมการที่ 2 เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพันธะข้าม (η_{swell}) (Flory and Rehner, 1943) [5]

$$V_r = \frac{\left[\frac{W_d}{\rho_d} - \frac{W_f}{\rho_f} \right]}{\left[\frac{W_d}{\rho_d} - \frac{W_f}{\rho_f} \right] + \left[\frac{W_s - W_d}{\rho_t} \right]} \quad (1)$$

$$-\ln(1 - V_r) - V_r - \chi V_r^2 = 2V_t \eta_{\text{swell}} \left[V_r^{1/3} - \frac{2V_r}{f} \right] \quad (2)$$

- โดย ρ_d = ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบยาง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 ρ_f = ความหนาแน่นของสารตัวเติม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 ρ_t = ความหนาแน่นของไทลูอิน (มีค่าเท่ากับ 0.862 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 W_d = น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่แห้ง (กรัม)
 W_f = น้ำหนักของสารตัวเติมที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบ (กรัม)
 W_s = น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังจากแช่ในไทลูอิน (กรัม)
 V_t = ปริมาตรของไทลูอินต่อ 1 โมล (มีค่าเท่ากับ 106.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
 χ = ค่าอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับไทลูอิน (มีค่าเท่ากับ 0.3796)
 f = ฟังก์ชันของพันธะข้ามที่เป็นระบบการวัดค่าในซัดด้วยกัมมะถัน (มีค่าเท่ากับ 4)

การทดสอบความทนแรงดึง

นำยางที่ผ่านการขึ้นรูปมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลตามมาตรฐาน ISO 37 (type 2) แล้วนำมาวัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง คือ ตรงกลางและบริเวณหัวท้ายภายในความยาว gauge ของชิ้นทดสอบ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบสำหรับการคำนวณ ทำการทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron รุ่น 5843) โดยใช้ความเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกค่าความทนแรงดึง (tensile strength) และความสามารถในการยืดออกจนขาด (elongation at break)

การทดสอบความต้านทานการฉีกขาด

นำยางที่ผ่านการขึ้นรูปมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปคันธนู (Die C, Nicked crescent) ตามมาตรฐาน ISO 34 แล้วนำมาวัดความหนาของชิ้นทดสอบ 3 ตำแหน่ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกับการทดสอบความทนแรงดึงเพื่อใช้เป็นค่าความหนาของชิ้นทดสอบสำหรับการคำนวณ ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron รุ่น 5566) โดยใช้ความเร็วในการดึงชิ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที บันทึกแรงดึงสูงสุดต่อความหนาของชิ้นทดสอบ (maximum tear strength)

การทดสอบความแข็ง

ความแข็งของยางคงรูปสามารถทดสอบโดยเครื่อง Durometer hardness ชนิด Shore A ตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการวัดความแข็งของยางคงรูปที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน 5 จุด แล้วรายงานเป็นค่าเฉลี่ย

การทดสอบความต้านทานการขัดถู

นำยางที่ผ่านการคงรูปด้วยแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด 15 x 24 x 0.35 cm มาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน จากนั้นนำไปแช่น้ำหนักก่อนทำการทดสอบ ทำการทดสอบความต้านทานต่อการขัดถูตามมาตรฐาน DIN 53516 ด้วยเครื่อง Din Abrader โดยชิ้นทดสอบจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 4.2 มิลลิเมตรต่อรอบของการหมุนของลูกกลิ้งเป็นระยะทาง 40 เมตร หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบดังกล่าวมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักที่หายไป นำผลต่างของน้ำหนักมาคำนวณหาค่าปริมาตรที่สูญเสียไปตามสมการที่ 3

$$\Delta V = (\Delta V_c / S_c) \times 200 \quad (3)$$

เมื่อ ΔV = ปริมาตรตัวอย่างยางที่สูญเสียไป (volume loss) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)
 ΔV_c = ปริมาตรที่สูญเสียไปของตัวอย่างยางที่วัดได้จากแผ่นขัดที่มีกำลังการขัดถูเท่ากับ S_c
 S_c = กำลังการขัดที่แท้จริงของแผ่นขัด (current abrasive power) หาได้จากค่าเฉลี่ยปริมาณของตัวอย่างมาตรฐานที่สูญเสียทั้งก่อนและหลังการทดสอบตัวอย่างจริง

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและคุณลักษณะทางกายภาพของพอตเตอริสโตน

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพอตเตอริสโตน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพอตเตอริสโตนด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer พบว่าพอตเตอริสโตนจากแหล่งลพบุรีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่สูงถึง 77.1% ส่วนที่เหลือประกอบไปด้วยออกไซด์ของโลหะชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

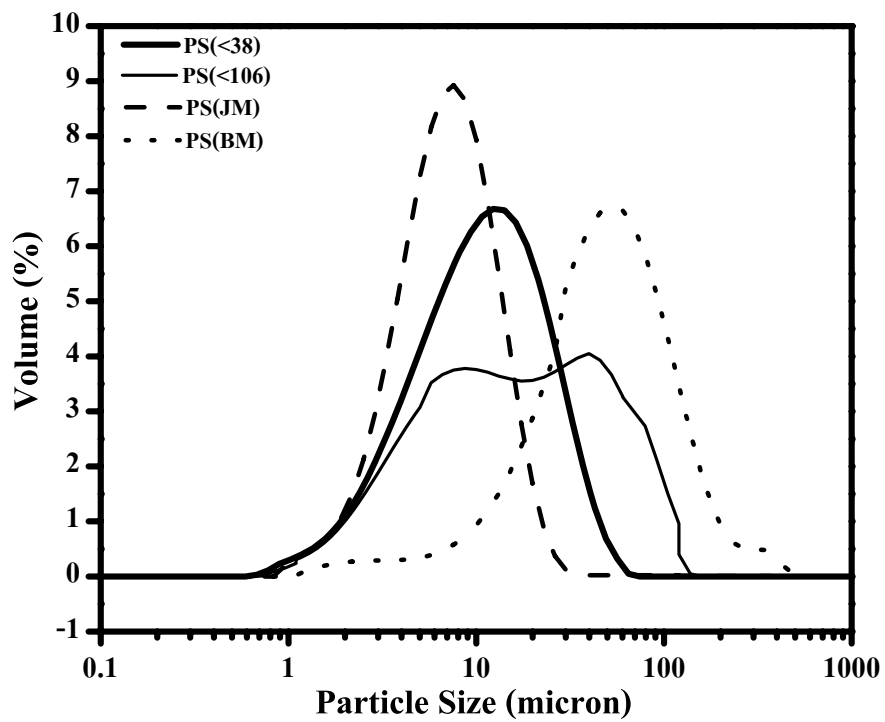
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของพอตเตอริสโตนจากลพบุรี

องค์ประกอบทางเคมี							
SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	ZrO_2
77.1 %	9.43 %	6.44 %	5.02 %	0.82 %	0.23 %	0.21 %	0.01 %

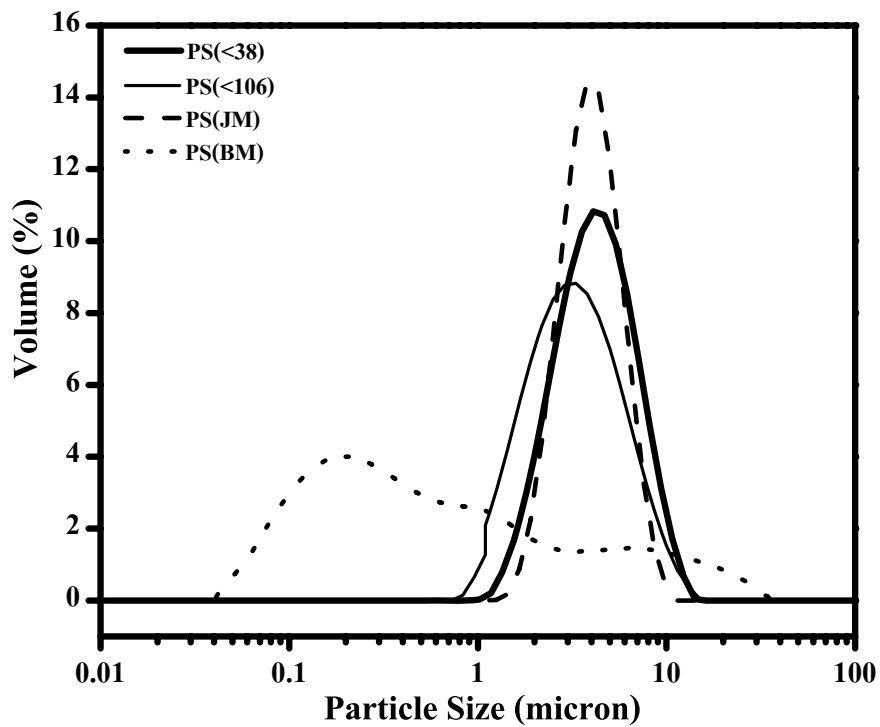
หมายเหตุ: % LOI = 0.7

การวิเคราะห์ลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคของพอตเตอริสโตน

กราฟแสดงลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคพอตเตอริสโตนในตัวอย่างที่เป็นน้ำกลั่นก่อนและหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแสดงอยู่ในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่า การกระจายตัวของขนาดอนุภาคก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมีลักษณะค่อนข้างกว้าง กราฟของ PS(<106) แสดงยอดฟีกถึง 2 ฟีก ในขณะที่กราฟของ PS(BM) บ่งชี้ว่า อนุภาคมีลักษณะการกระจายตัวอยู่ในช่วงที่กว้างที่สุด อย่างไรก็ตาม หลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่า กราฟแสดงลักษณะการกระจายขนาดอนุภาคเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด โดยช่วงการกระจายขนาดอนุภาคจะแคบลง ขนาดอนุภาคเฉลี่ยก็เล็กลง อย่างไรก็ตาม PS(BM) ยังคงเป็นพอตเตอริสโตนกลุ่มที่มีการกระจายขนาดอนุภาคที่กว้างที่สุด



รูปที่ 1 ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์สโตนก่อนการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก



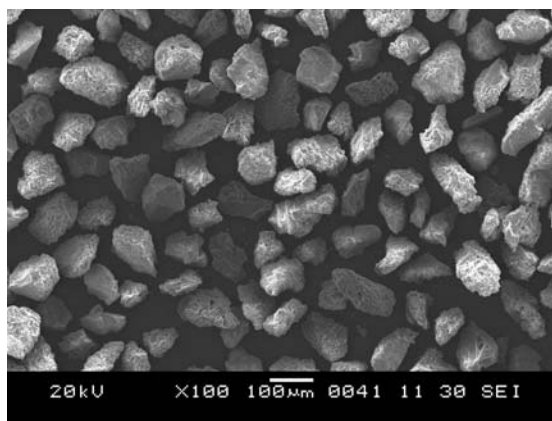
รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์สโตนหลังการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 3 แสดงค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของพอดเทอริสโตนที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่นก่อนและหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก จากตารางจะเห็นว่า ก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก สามารถเรียงลำดับของอนุภาคจากใหญ่ที่สุดไปเล็กที่สุดโดยพิจารณาจากค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ได้ดังนี้ PS(BM) PS(<106) PS(<38) และ PS(JM) อย่างไรก็ตามระหว่างขั้นตอนการบดพอดเทอริสโตนด้วย wet ball mill หลังการบด ส่วนผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งที่ได้จะถูกกรองด้วยตะแกรงร่อนขนาด 38 ไมครอน แต่ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ที่ได้กลับสูงถึง 57.6 และ 154 ไมครอนตามลำดับ ดังนั้นขนาดอนุภาคที่ได้จากการวัดก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจึงไม่น่าจะเป็นขนาดอนุภาคที่แท้จริงของพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(BM) โดยค่าที่ได้น่าจะเป็นขนาดของอนุภาคที่เกิดจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หลังจากการอบไล่น้ำ เมื่อวัดขนาดอนุภาคหลังจากผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีพบว่า ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของพอดเทอริสโตนทุกกลุ่มลดลงอย่างชัดเจน สำหรับพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(<106) PS(<38) และ PS(JM) เมื่อผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของพอดเทอริสโตนทั้ง 3 กลุ่มจะใกล้เคียงกัน (ยกเว้น PS(JM) ซึ่งมีค่า $d(0.9)$ ต่ำกว่าของ PS(<106) และ PS(<38) เล็กน้อย) นอกจากนี้ยังพบว่า ในบรรดาพอดเทอริสโตนกลุ่มต่าง ๆ ค่า $d(0.5)$ ของ PS(BM) จะน้อยที่สุดและที่สำคัญคือ PS(BM) เป็นพอดเทอริสโตนเพียงกลุ่มเดียวที่มีค่า $d(0.5)$ น้อยกว่าไมครอน สำหรับการลดลงของค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ หลังจากผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก เบื้องต้นสันนิษฐานน่าจะมีสาเหตุมาจาก 2 ประการด้วยกัน ประการแรกอาจจะเป็นการแตกตัวของอนุภาคพอดเทอริสโตนที่เกาะกลุ่มกันอยู่ ส่วนสาเหตุประการที่สองอาจมาจากการแตกของอนุภาคพอดเทอริสโตนเอง เพื่อพิสูจน์ว่า ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ก่อนหรือหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ค่าใดจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงขนาดอนุภาคที่แท้จริง พอดเทอริสโตนที่มีขนาดอนุภาคในช่วง 63-106 ไมครอน ถูกเตรียมขึ้น ขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากการร่อนพอดเทอริสโตนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 106 ไมครอน จากนั้นทำการร่อนพอดเทอริสโตนที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 106 ไมครอน ด้วยตะแกรงร่อนขนาด 63 ไมครอน อีกครั้ง โดยในขั้นที่ 2 จะเป็นการร่อนแบบเปียก เนื่องจากจะให้ประสิทธิภาพในการร่อนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 63 ไมครอน ได้ดีกว่าการร่อนแบบแห้ง ส่วนที่ไม่ผ่านตะแกรงร่อนก็จะพอดเทอริสโตนที่มีขนาด 63-106 ไมครอน เท่านั้น นำพอดเทอริสโตนที่ได้ไปศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วย SEM ซึ่งผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3 หลังจากนั้นก็ทำการวัดการกระจายขนาดอนุภาค จากรูปที่ 3 จะเห็นว่า พอดเทอริสโตนที่ได้มีขนาดเล็กตั้งแต่ 80 ไมครอน เป็นต้นไป แต่จะไม่เกิน 150 ไมครอน สำหรับผลของการวัดขนาดอนุภาคก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ มีค่าเท่ากับ 100 และ 144 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้สอดคล้องกับขนาดที่ได้จากรูป SEM ในขณะที่หลังจากผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ มีค่าเท่ากับ 3.39 และ 7.39 ไมครอน ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า การสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกนอกจากจะทำให้การเกาะกลุ่มกันของพอดเทอริสโตนแตกออกแล้ว ยังสามารถทำให้อนุภาคแตกออกเช่นกัน และจากการพิจารณาตัวเลขในตารางที่ 2 จะเห็นว่า การสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกส่งผลให้อนุภาคแตกตัวออก แต่ค่าที่ได้จะไม่ต่ำกว่าไมครอน ดังนั้นหากพิจารณาขนาดอนุภาคของพอดเทอริสโตนในตารางที่ 2 ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(<106) PS(<38) และ PS(JM) ที่ถูกต้องน่าจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก แต่สำหรับ PS(BM) ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ที่ถูกต้องน่าจะเป็นค่าที่ได้หลังจากการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทั้งนี้เนื่องมาจากตามที่ได้อ้างไว้ข้างต้นแล้วว่าหลังจากขั้นตอนการบดด้วย wet ball mill สารผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งที่ได้จะถูกกรองผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาด 38 ไมครอน ดังนั้นอนุภาคที่จะผ่านได้ต้องเล็กกว่า 38 ไมครอน แต่ค่าที่วัดได้ก่อนการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกลับสูงกว่า 38 ไมครอน ดังนั้นขั้นตอนต่าง ๆ หลังจากการกรองผ่านตะแกรงร่อนน่าจะส่งผลทำให้อนุภาคของพอดเทอริสโตนเกิดการรวมตัวเป็นแอ็กโกลเมอเรตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าที่วัดได้จึงเป็นค่าขนาดของแอ็กโกลเมอเรตที่เกิดขึ้น เมื่อผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของ PS(BM) กลับ

ลดลงอย่างชัดเจนและค่าอนุภาคเฉลี่ยที่ได้ก็มีขนาดน้อยกว่าไมครอน ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในระดับที่สูงเกินกว่าการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกจะทำให้ ดังนั้นจากข้อมูลเบื้องต้นทำให้สรุปได้ว่า พอตเตอร์สโตนที่ผ่านการบดด้วย wet ball mill (PS(BM)) มีขนาดเล็กที่สุด ในขณะที่พอตเตอร์สโตนอีก 3 กลุ่มที่เหลือ ถึงแม้ว่าก่อนผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก จะมีขนาดอนุภาคเรียงลำดับจากกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดไปหากลุ่มที่มีขนาดเล็กที่สุดได้ดังนี้ PS(<106) PS(<38) และ PS(JM) ก็ตาม แต่หลังจากผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พอตเตอร์สโตนทั้ง 3 กลุ่ม มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน หากพิจารณาขนาดอนุภาคของพอตเตอร์สโตนหลังจากการบดผสมเข้ากับเนื้อยาง พอตเตอร์สโตนทั้ง 3 กลุ่มนี้อาจมีขนาดใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการแตกออกของอนุภาคเนื่องจากแรงเฉือนระหว่างการผสมกับยางในเครื่องผสม

ตารางที่ 3 ค่า d(0.5) และ d(0.9) ของพอตเตอร์สโตนกลุ่มต่าง ๆ ก่อนและหลังผ่านการสั่นด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

	ก่อนผ่านการสั่น ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก		หลังผ่านการสั่น ด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก 10 นาที	
	d(0.5)	d(0.9)	d(0.5)	d(0.9)
PS(<38)	10.7	27.1	4.16	7.66
PS(<106)	19.2	82.8	3.39	7.28
PS(JM)	7.61	16.3	3.67	5.87
PS(BM)	57.6	154	0.50	8.42

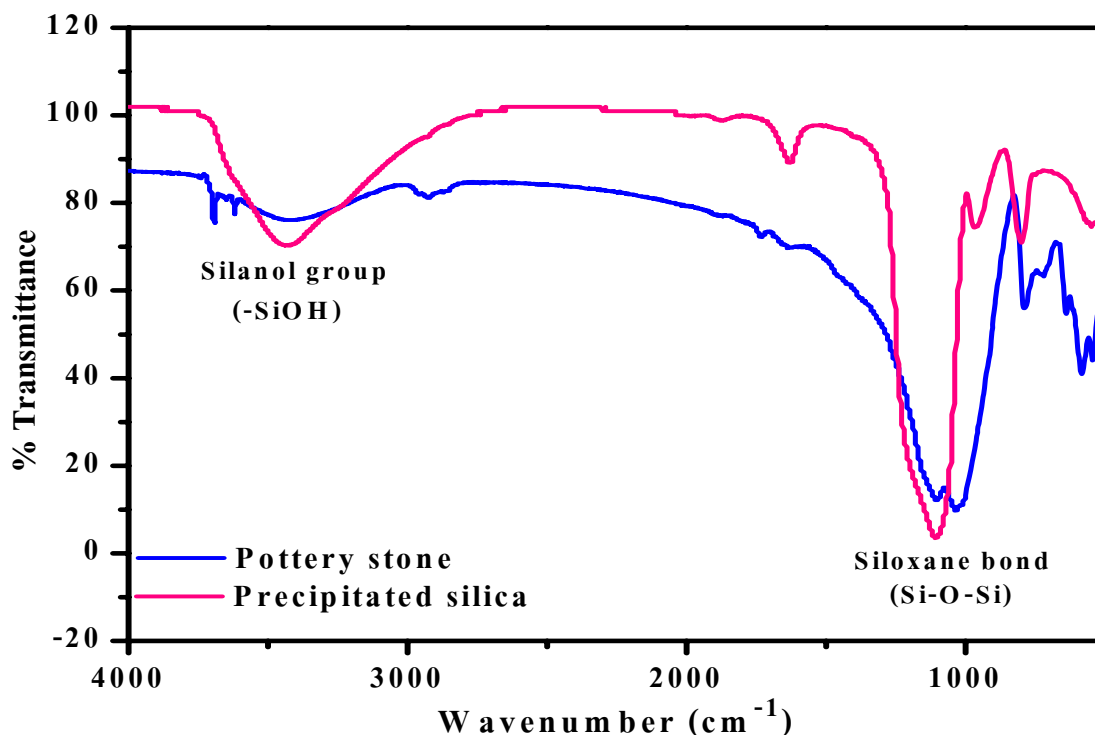


รูปที่ 3 ภาพถ่าย SEM ของพอตเตอร์สโตนที่มีขนาดอยู่ในช่วง 63-106 ไมครอน

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเคมีของพอตเตอร์สโตนและซิลิกาแบบตกตะกอน

รูปที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเคมีของพอตเตอร์สโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) จากการเปรียบเทียบกราฟที่ได้ พบว่า อนุภาคของพอตเตอร์สโตนมีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่ใกล้เคียงกับอนุภาคของซิลิกาแบบตกตะกอน โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่น $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และช่วงความยาวคลื่น $3000-3750\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงลักษณะเฉพาะของหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group) อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าพื้นที่ใต้กราฟของพิกที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น $3000-3750\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็น

พิกของหมู่ไฮดรอกซิลของพอตเตอริสโตนมีค่าน้อยกว่าของซิลิกาแบบตกตะกอน แสดงให้เห็นว่าพอตเตอริสโตนมีหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวน้อยกว่าของซิลิกาแบบตกตะกอน

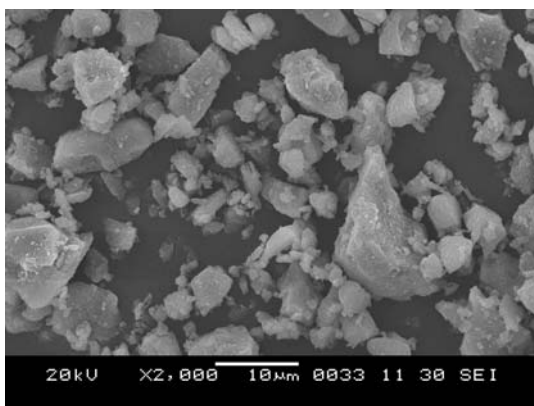


รูปที่ 4 กราฟการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเคมีของพอตเตอริสโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยเทคนิค FT-IR Spectroscopy

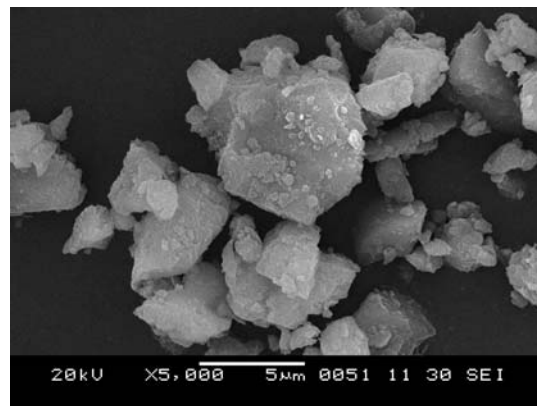
การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของพอตเตอริสโตน

จากการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างอนุภาคของพอตเตอริสโตนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope พบว่าอนุภาคของพอตเตอริสโตนที่ไม่ได้ผ่านการบดลดขนาด PS(<38) และ PS(<106) มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่ไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 5(a) และ (b) ตามลำดับ โดยที่บริเวณพื้นผิวของพอตเตอริสโตนทั้งสองกลุ่มจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือค่อนข้างขรุขระดังแสดงในรูปที่ 5(c) เมื่อใช้กำลังขยายที่สูงขึ้น จะเห็นว่าพื้นผิวบางส่วนมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกที่เกิดจากการเรียงซ้อนกันอย่างหนาแน่น ในขณะที่บางส่วนประกอบขึ้นจากโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายผลึกที่แตกกระจายรวมกลุ่มกันอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 5 (d) ซึ่งลักษณะของผลึกชนิดต่าง ๆ ที่เห็นมาจากแร่ชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของพอตเตอริสโตนดังนี้ แร่ไตรโดไมท์ (SiO_2) และแร่เฟลด์สปาร์ ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ และแร่ควอตซ์และเกลินปนในปริมาณเล็กน้อย

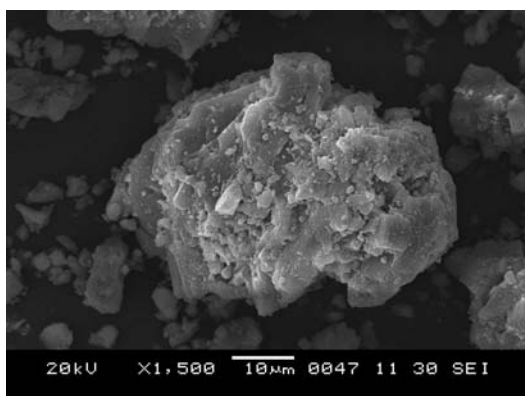
นอกจากนี้ยังพบว่า บางอนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่ชั้นเปลือกด้านนอกอย่างหนาแน่น ในขณะที่เนื้อด้านในมีการจัดเรียงเป็นแบบโครงสร้างผลึกที่แตกกระจายอย่างหลวม ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6(a) และ (b)



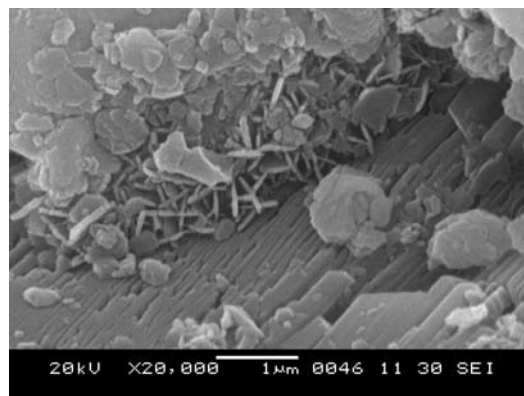
(a)



(b)

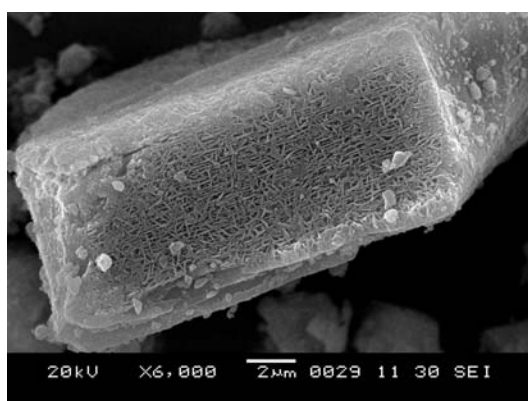


(c)

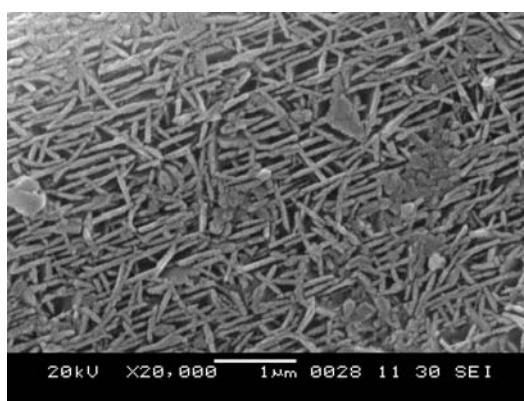


(d)

รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผ่านการบด (a) ลักษณะรูปร่างของ PS(<38), (b) ลักษณะรูปร่างของ PS(<106), (c) ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (d) ลักษณะพื้นผิวของอนุภาคที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



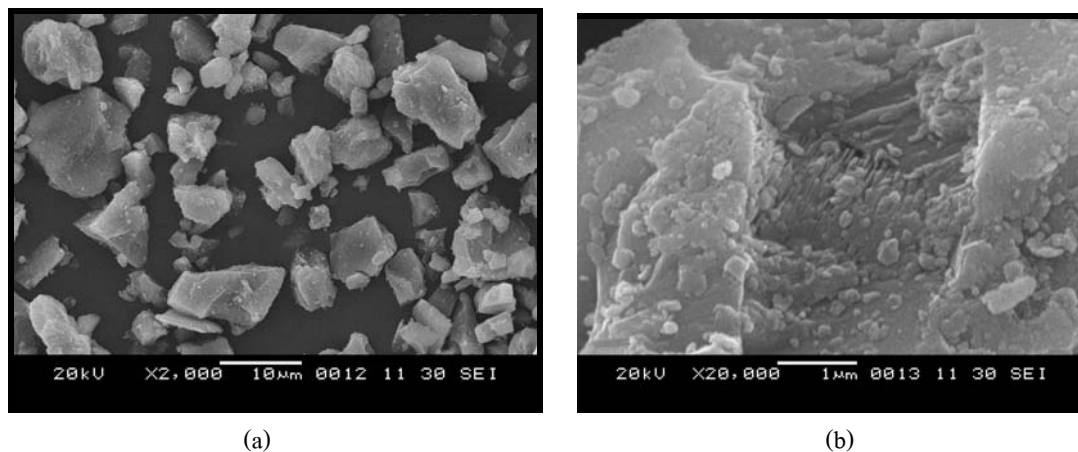
(a)



(b)

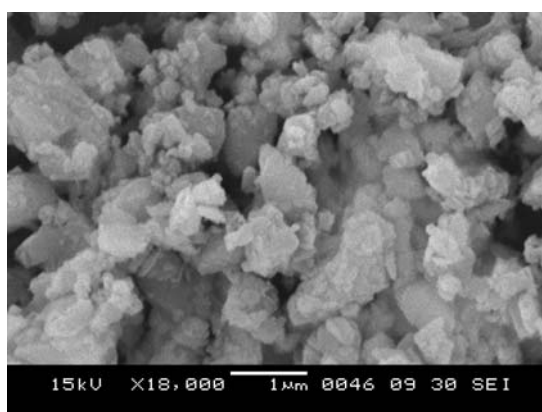
รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผ่านการบด (a) ลักษณะขอบด้านนอก และ (b) ลักษณะของผลึกภายในอนุภาค

รูปที่ 7 แสดงลักษณะรูปร่างของพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดด้วย current jet mill จากรูปที่ได้จะเห็นว่า อนุภาคของ PS(JM) ยังคงมีลักษณะคล้ายคลึงกับของพอดเทอริสโตนที่ไม่ได้ผ่านการบด คือ มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมที่ไม่แน่นอน และพื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างขรุขระ



รูปที่ 7 ภาพถ่าย SEM ของพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดด้วย current jet mill (a) ลักษณะรูปร่างอนุภาค และ (b) ลักษณะพื้นผิวของอนุภาค

สำหรับพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดด้วยวิธี wet ball mill จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป ดังแสดงในรูปที่ 8 จากรูปจะเห็นได้ว่าอนุภาคของ PS(BM) มีขนาดเล็กมาก และที่ถ่างขยายสูงถึง 18,000 เท่า ไม่พบบริเวณที่มีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยม คาดว่าบริเวณดังกล่าวน่าจะเกิดการแตกหักระหว่างการบดลดขนาด



รูปที่ 8 ภาพถ่าย SEM ของพอดเทอริสโตนที่ผ่านการบดด้วย wet ball mill

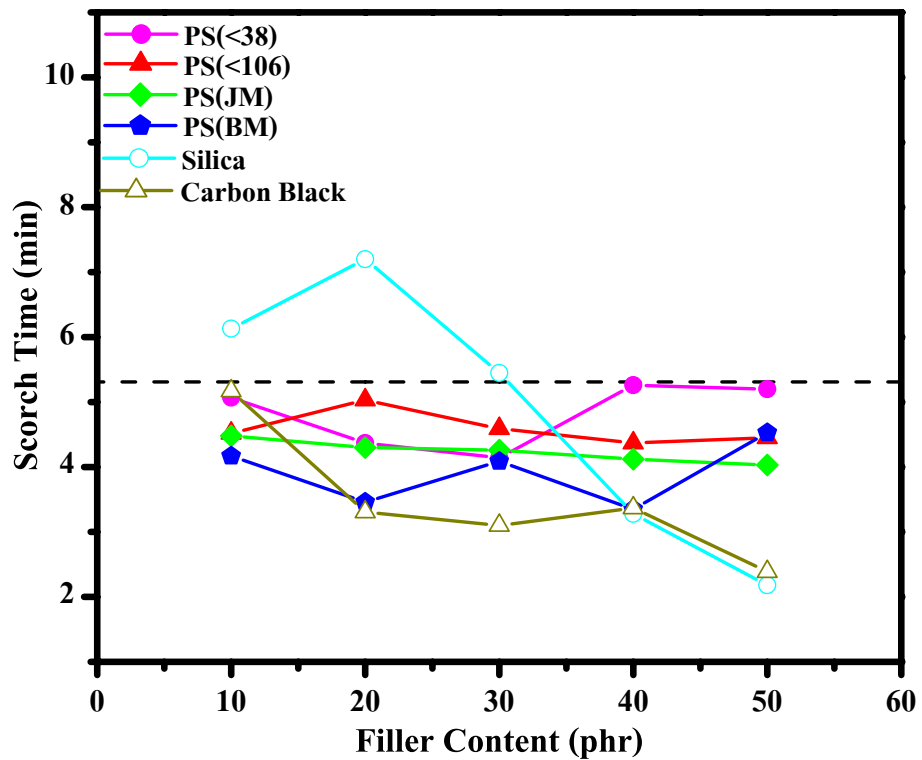
การวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติมพอดเทอริสโตน ซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก

ผลการทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง

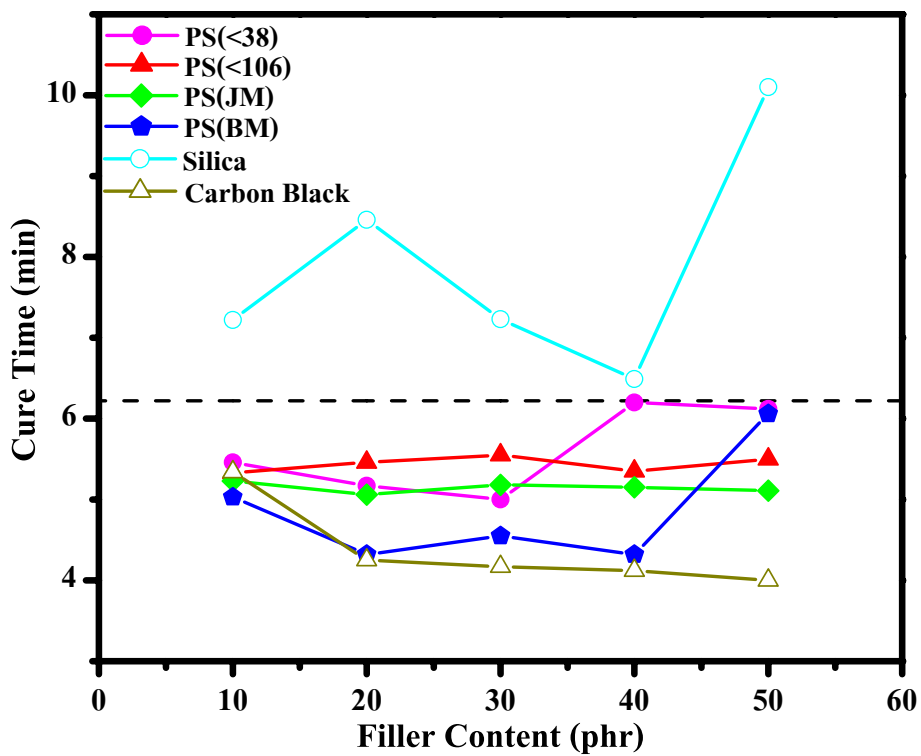
ผลของขนาดและปริมาณของพอดเทอริสโตนตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ต่อระยะเวลาสกร๊ช (t_{s2}) และระยะเวลาในการคงรูปที่ 90% (t_{c90}) ของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็กแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า การเติมพोटเตอรีสโตนส่งผลทำให้ระยะเวลาสกรอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปของยางลดลงเมื่อเทียบกับยางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากกลุ่มโลหะออกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบของพोटเตอรีสโตนจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป โดยจะทำให้เกิด Zinc complex ได้เร็วขึ้น (Da Costa *et. al.*, 2003) [6] การเติม PS(BM) ซึ่งเป็นพोटเตอรีสโตนกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดจะส่งผลต่อการลดลงของเวลาในการคงรูปมากที่สุด ในขณะที่พोटเตอรีสโตนทั้ง 4 กลุ่ม ส่งผลต่อการลดลงของระยะเวลาสกรอร์ชใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ยังพบว่า ปริมาณของพोटเตอรีสโตนที่เติมไม่มีผลต่อการลดลงของระยะเวลาสกรอร์ชและเวลาในการคงรูปยางสำหรับการเติมคาร์บอนแบล็กที่ส่งผลต่อลักษณะการคงรูปที่คล้ายคลึงกับผลของการเติมพोटเตอรีสโตนแต่กลไกการเร่งปฏิกิริยาการคงรูปจะต่างกันไป โดยสารเร่งกลุ่มซัลฟีนามีจะต้องมีการแตกออกของพันธะ S-N ก่อนถึงจะได้สารเร่งที่แท้จริง การที่ระยะเวลาสกรอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปสั้นลงเมื่อเติมคาร์บอนแบล็กก็เนื่องมาจาก คาร์บอนแบล็กเร่งให้พันธะดังกล่าวเกิดการแตกออกได้เร็วขึ้น (Gerspacher, and Wampler, 2001) [7] สำหรับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่พื้นผิว ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ผลของปริมาณซิลิกาแบบตกตะกอนที่เติมต่อสมบัติการคงรูปจะไม่ชัดเจนก็ตาม แต่โดยรวมแล้วจะพบว่า การเติมซิลิกาแบบตกตะกอนจะส่งผลให้ระยะเวลาในการคงรูปมากกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการดูดซับสารเร่งหรือสารกระตุ้นปฏิกิริยาบนผิวของซิลิกาแบบตกตะกอน (Gerspacher, and Wampler, 2001) [7]

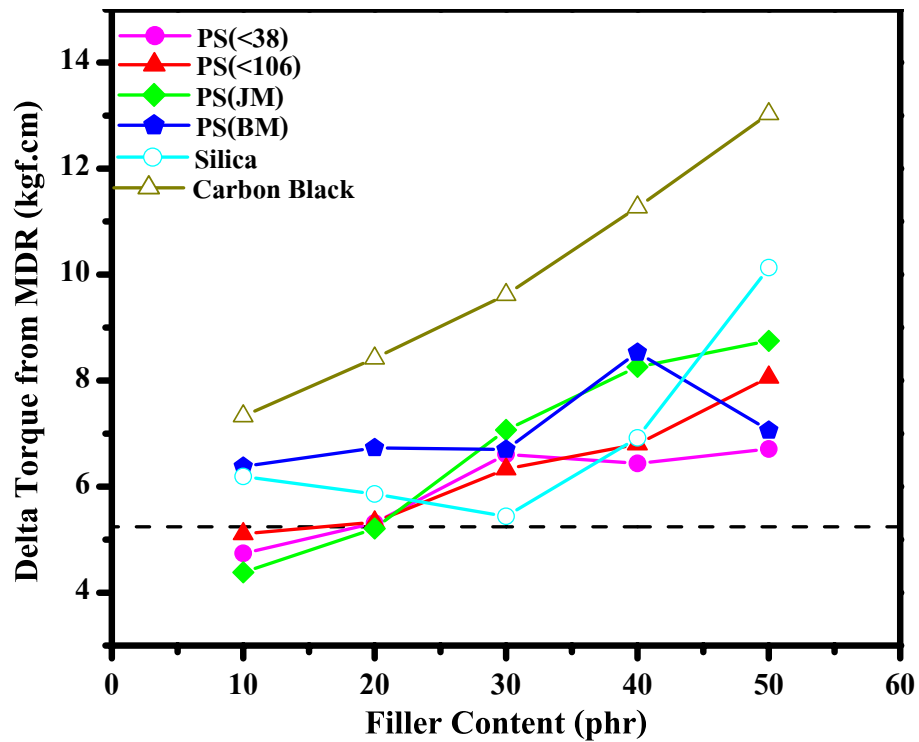
รูปที่ 11 และ 12 แสดงผลของขนาดและปริมาณของพोटเตอรีสโตนที่เติมตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ต่อผลต่างแรงบิด (delta torque) จากกราฟ MDR และจำนวนพันธะข้ามของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็กตามลำดับ จากรูปที่ 11 จะเห็นว่าผลต่างแรงบิดของยางที่เติมพोटเตอรีสโตนตั้งแต่ 20 phr ขึ้นไป จะมีค่าสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ และค่าผลต่างแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมพोटเตอรีสโตนในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้บ่งชี้ว่าการเติมพोटเตอรีสโตนทำให้ค่าความหนืดของยางคอมพาวนด์สูงมากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของขนาดอนุภาคของพोटเตอรีสโตน พบว่า ขนาดอนุภาคของพोटเตอรีสโตนไม่มีผลต่อค่าผลต่างแรงบิดเท่าไรนัก การเติมซิลิกาแบบตกตะกอนตั้งแต่ 10-30 phr ส่งผลให้ค่าผลต่างแรงบิดสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เลยเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเติมในปริมาณที่สูงขึ้นค่าผลต่างแรงบิดจะสูงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกาะรวมตัวกันมากขึ้นของอนุภาคซิลิกาเมื่อปริมาณที่เติมสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดของยางเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การเติมคาร์บอนแบล็กส่งผลให้ค่าผลต่างแรงบิดมีค่าสูงที่สุด สำหรับการคำนวณจำนวนพันธะข้าม สมการที่ใช้ในการคำนวณได้ทำการหักปริมาตรของสารตัวเติมในขั้นตอนทดสอบออก ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด เนื่องจากสารตัวเติมไม่สามารถเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายโทลูอินได้ ผลที่ได้ในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่า การเติมพोटเตอรีสโตนไม่ส่งผลต่อจำนวนพันธะข้ามของยางคงรูปที่ได้ ไม่ว่าพोटเตอรีสโตนที่เติมจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่หรือเติมในปริมาณเท่าไรก็ตาม สำหรับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนจะทำให้การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสาเหตุก็เนื่องมาจากการดูดซับสารเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ผิวของซิลิกาดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ทำให้ปริมาณของสารทั้งสองในระบบลดลง การเชื่อมขวางจึงเกิดได้น้อยลง สำหรับการเติมคาร์บอนแบล็กจะเห็นว่าจำนวนพันธะข้ามที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย ทั้ง ๆ ที่ใช้สูตรสารประกอบยางเหมือนกัน สาเหตุก็เนื่องมาจากที่บริเวณพื้นผิวของคาร์บอนแบล็กมีหมู่ฟังก์ชันเคมีอยู่ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเคมีดังกล่าวสามารถสร้างพันธะเคมีกับเรดิกัลบนสายโซ่ของยางที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขาดของสายโซ่จากแรงเฉือนระหว่างการผสม หรืออาจเกิดจากการแตกตัวของสายโซ่ของยางเข้าไปตามช่องว่างหรือรูพรุนที่ผิวของคาร์บอนแบล็กซึ่งจะทำหน้าที่คล้าย physical crosslink ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมานี้ส่งผลให้อัตราการบวมตัวของยางลดลง ทำให้จำนวนพันธะข้ามที่คำนวณได้มีค่ามากกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย



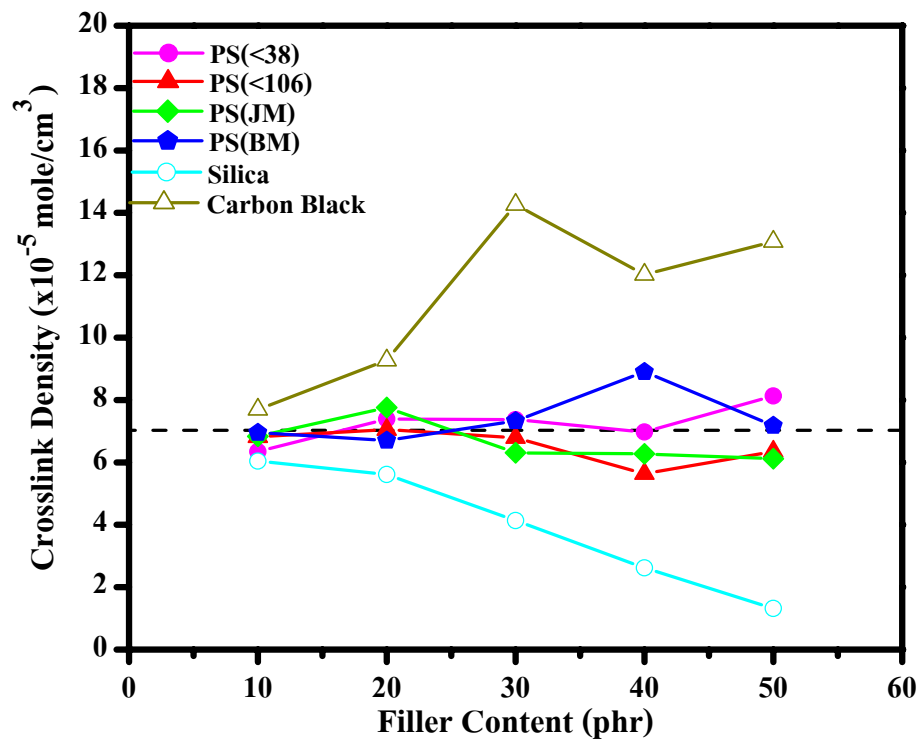
รูปที่ 9 ผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนต่อระยะเวลาสกอร์ชของยางธรรมชาติที่เกี่ยวกับการเติมซิลิกาแบบ ตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นประแสดงค่าระยะเวลาสกอร์ชของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)



รูปที่ 10 ผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนต่อเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่เกี่ยวกับการเติมซิลิกาแบบ ตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นประแสดงค่าเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)



รูปที่ 11 ผลของขนาดและปริมาณของพอลิเมอร์สต่อนต่อผลต่างแรงบิดจากกราฟ MDR ของยางธรรมชาติที่เกี่ยวกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นปะแสดงค่าผลต่างแรงบิดจากกราฟ MDR ของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

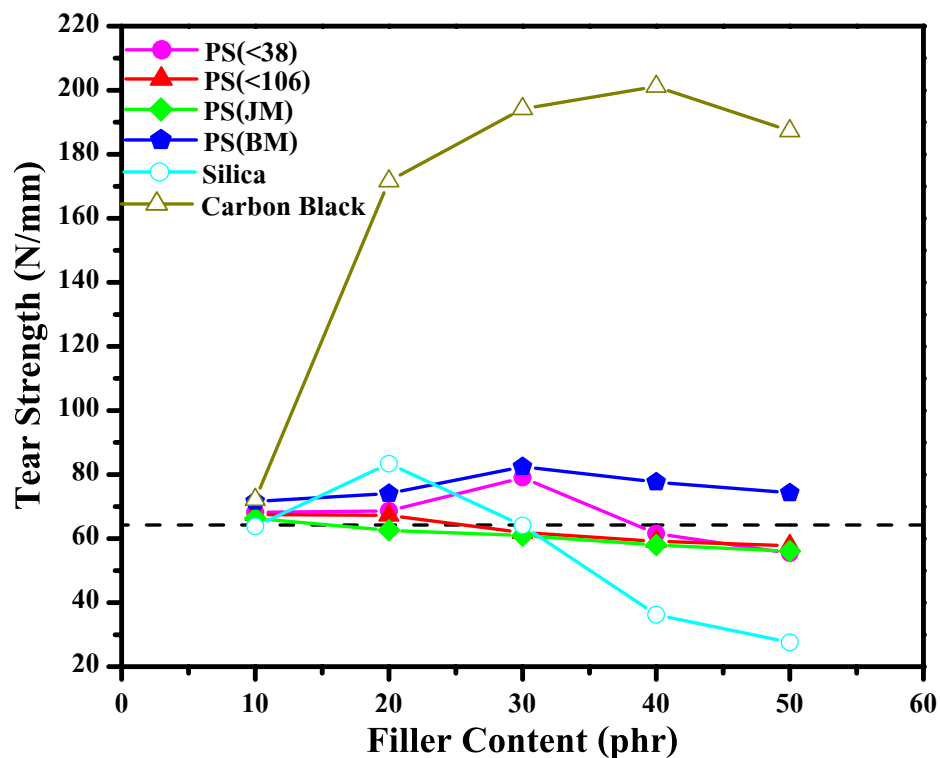


รูปที่ 12 ผลของขนาดและปริมาณของพอลิเมอร์สต่อนต่อจำนวนพันธะข้ามของยางธรรมชาติที่เกี่ยวกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นปะแสดงจำนวนพันธะข้ามของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกกร่อน

ผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนที่เติมตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ต่อความต้านทานการสึกกร่อนของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็กแสดงในรูปที่ 13 ผลการทดสอบพบว่า ยางที่เติมพอตเตอร์สโตนขนาดต่าง ๆ กันที่ปริมาณ 10 phr มีความต้านทานการสึกกร่อนสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เลยเล็กน้อย แต่เมื่อเติมพอตเตอร์สโตนในปริมาณที่มากขึ้นตั้งแต่ 20 phr เป็นต้นไป ความต้านทานการสึกกร่อนของยางที่เติมพอตเตอร์สโตนกลุ่มต่าง ๆ จะแตกต่างกันไปดังนี้ สำหรับยางที่เติม PS(<106) และ PS(JM) เมื่อปริมาณของพอตเตอร์สโตนเพิ่มขึ้นจาก 10 phr เป็น 50 phr พบว่า ความต้านทานการสึกกร่อนจะลดลงเรื่อย ๆ สำหรับยางที่เติม PS(<38) จะให้ค่าความต้านทานการสึกกร่อนสูงสุดเมื่อเติมพอตเตอร์สโตนในปริมาณ 30 phr หลังจากนั้นความต้านทานการสึกกร่อนจะเริ่มลดลง โดยยางที่เติม PS(<38) ตั้งแต่ 40 phr เป็นต้นไปจะมีค่าความต้านทานการสึกกร่อนต่ำกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ ผลของปริมาณพอตเตอร์สโตนต่อความต้านทานการสึกกร่อนของยางที่เติม PS(BM) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับยางที่เติม PS(<38) คือที่ปริมาณ 30 phr ยางที่ได้จะมีความต้านทานการสึกกร่อนสูงสุด แต่จะต่างกันตรงที่ในกรณีของ PS(BM) ถึงแม้ว่าปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานการสึกกร่อนลดลง แต่ความต้านทานการสึกกร่อนที่ยังคงมีค่าที่สูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย จากผลที่ได้ข้างต้นจะเห็นว่าพอตเตอร์สโตนที่ผ่านการบดด้วย wet ball mill (PS(BM)) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กที่สุด จะมีความสามารถในการเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนของยางได้ดีที่สุดและปริมาณที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 30 phr การที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดส่งผลให้ความต้านทานการสึกกร่อนของยางเพิ่มขึ้นมากที่สุดก็เนื่องมาจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมกับยางเกิดได้มากกว่า อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า เมื่อปริมาณของ PS(BM) เพิ่มสูงขึ้นเป็น 40 และ 50 phr ยางจะมีความต้านทานการสึกกร่อนลดลงตามลำดับ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวของพอตเตอร์สโตนในเนื้อยางเกิดได้ยากขึ้น เมื่อสารที่เติมลงไปไม่สามารถกระจายตัวได้ดี การเกิดอันตรกิริยากับยางก็จะลดน้อยลงส่งผลให้ความต้านทานการสึกกร่อนลดลง หากพิจารณาขนาดอนุภาคของ PS(<106) PS(JM) และ PS(<38) ถึงแม้ว่าก่อนผ่านการสับด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พอตเตอร์สโตนทั้งสามกลุ่มจะมีค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ต่างกัน แต่หลังจากผ่านการสับด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ค่า $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของพอตเตอร์สโตนทั้งสามกลุ่มจะใกล้เคียงกัน หากพิจารณาขนาดอนุภาคของพอตเตอร์สโตนทั้ง 3 กลุ่มนี้หลังจากทำการบดผสมกับยาง พอตเตอร์สโตนทั้ง 3 กลุ่มอาจมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งด้วยเหตุนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานการสึกกร่อนของยางที่เติมพอตเตอร์สโตนทั้ง 3 กลุ่มมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเติมในปริมาณที่เท่ากัน (ยกเว้นกรณีการเติม PS(<38) ที่ 30 phr เท่านั้น ที่มีความต้านทานการสึกกร่อนที่สูงกว่าของยางที่เติม PS(<106) หรือ PS(JM))

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนระหว่างพอตเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) กับสารเสริมแรงทางการค้า จะเห็นว่าคาร์บอนแบล็กสามารถเพิ่มความต้านทานการสึกกร่อนได้สูงที่สุด ถึงแม้ว่าที่ปริมาณการเติมที่ 10 phr ความต้านทานการสึกกร่อนของยางที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับยางที่เติมสารตัวเติมชนิดอื่น สำหรับยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนความต้านทานการสึกกร่อนจะมีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณที่เติมเท่ากับ 20 phr โดยความต้านทานการสึกกร่อนที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่ได้สูงสุดจากการเติมพอตเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) ที่ 30 phr หลังจากนั้นค่าความต้านทานการสึกกร่อนของยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีและปริมาณการเชื่อมขวางของยางที่ลดลง

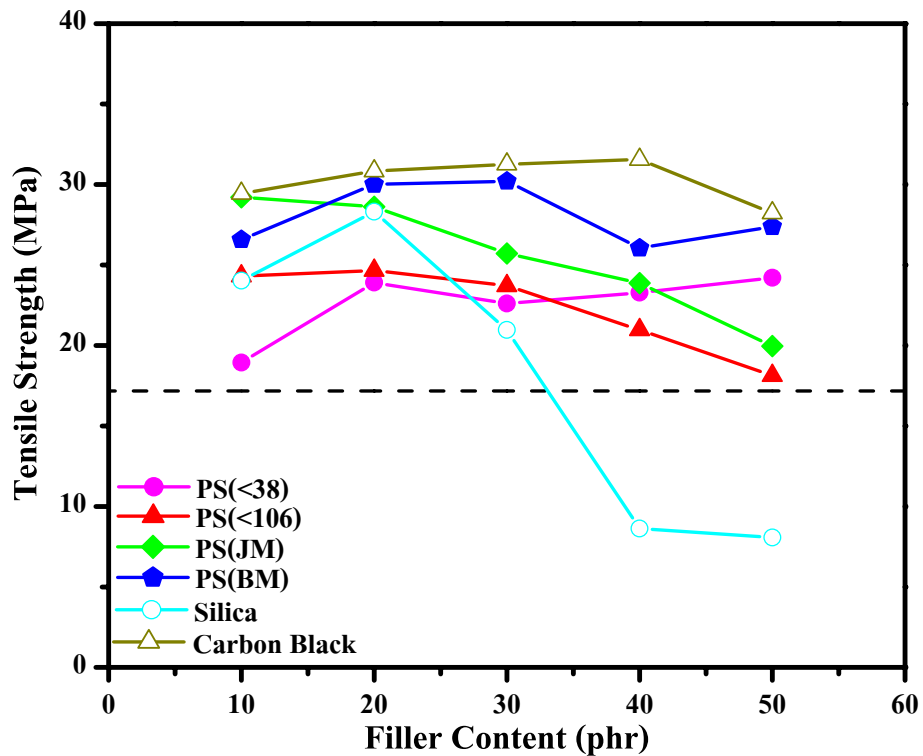


รูปที่ 13 ผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนต่อความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นปะแสดงค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

ผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนที่เติมตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 14 จากการทดลอง พบว่า พอตเตอร์สโตนที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่ว่าจะมีขนาดเท่าไรเมื่อเติมลงในยางช่วงปริมาณตั้งแต่ 10 ถึง 50 phr จะให้ค่าความทนแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ โดยผลของขนาดและปริมาณพอตเตอร์สโตนที่เติมต่อความทนแรงดึงจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกรณีของความต้านทานการฉีกขาด (ยกเว้น PS(<38) ซึ่งปริมาณที่ให้ค่าความทนแรงดึงสูงสุดจะอยู่ที่ 50 phr ในขณะที่ปริมาณที่ให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดสูงสุดจะอยู่ที่ 30 phr) โดยจากรูปที่ 14 จะเห็นว่า ยางที่เติม PS(BM) จะมีความทนแรงดึงสูงกว่ายางที่เติมพอตเตอร์สโตนกลุ่มอื่น ๆ (ยกเว้นที่ 10 phr) โดยความทนแรงดึงของยางจะสูงที่สุดเมื่อเติม PS(BM) ที่ 30 phr ความทนแรงดึงของยางที่เติม PS(<106) และ PS(JM) จะสูงที่สุดเมื่อเติมที่ 10 phr

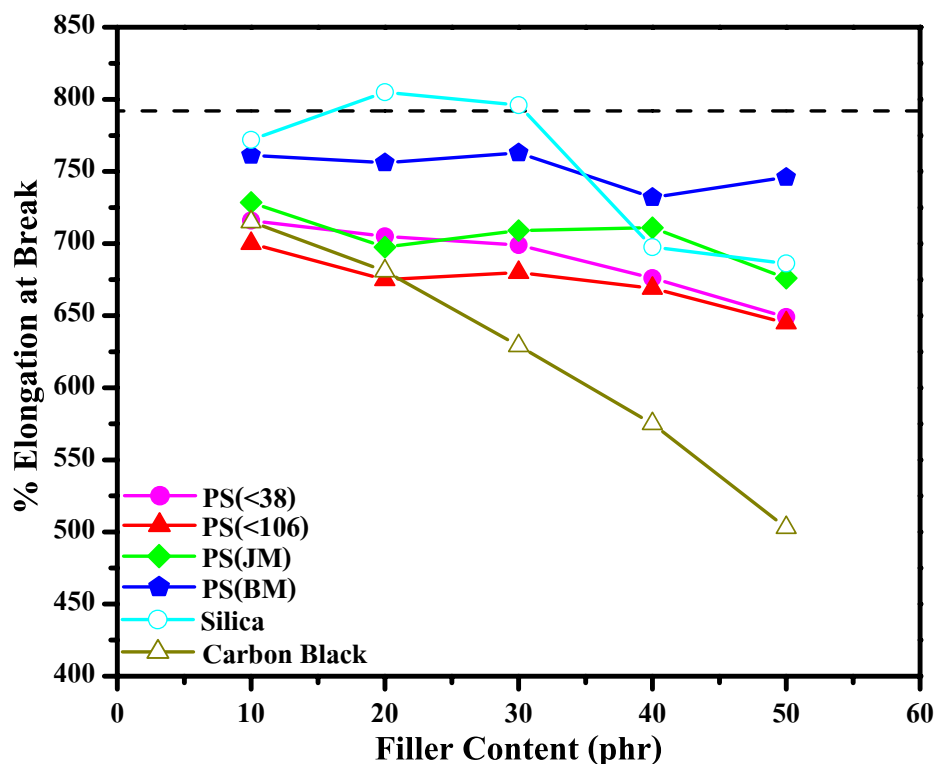
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเพิ่มความทนแรงดึงระหว่างพอตเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) กับสารเสริมแรงทางการค้า พบว่า ยางที่เติมคาร์บอนแบล็กมีความทนแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือยางที่เติม PS(BM) โดยค่าความทนแรงดึงของยางที่เติม PS(BM) จะน้อยกว่ายางที่เติมคาร์บอนแบล็กเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนจะมีความทนแรงดึงน้อยที่สุดและค่าความทนแรงดึงของยางที่ได้จะค่อนข้างขึ้นกับปริมาณที่เติมมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น โดยจะสังเกตเห็นว่าที่ปริมาณตั้งแต่ 20 phr เป็นต้นไป ความทนแรงดึงของยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ปริมาณตั้งแต่ 40 phr เป็นต้นไป ความทนแรงดึงของยางที่ได้จะน้อยกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ



รูปที่ 14 ผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นปะแสดงค่าความทนแรงดึงของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

สำหรับผลของขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนที่เติมตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าการเติมพอตเตอร์สโตนไม่ว่าพอตเตอร์สโตนจะมีขนาดเท่าไรจะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง โดยขนาดของพอตเตอร์สโตนจะส่งผลต่อการลดลงของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางต่างกันไปดังนี้ PS(BM) จะส่งผลต่อการลดลงของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางน้อยที่สุด ในขณะที่พอตเตอร์สโตน 3 กลุ่มที่เหลือจะส่งผลต่อการลดลงของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดใกล้เคียงกัน ปริมาณของพอตเตอร์สโตนที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากปริมาณของวัสดุที่สามารถยืดตัวได้ซึ่งในที่นี้คือ เนื้อยางลดลง ทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลงตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดระหว่างยางที่เติมพอตเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) กับสารเสริมแรงทางการค้า พบว่า ยางที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงมากที่สุด ทั้งนี้ก็เนื่องจากยางสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของคาร์บอนแบล็กได้ทั้งแบบ chemical และ physical ทำให้ความสามารถในการยืดตัวสูงสุดลดลงมากที่สุด รองลงมาคือ ยางที่เติมพอตเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) และยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนตามลำดับ

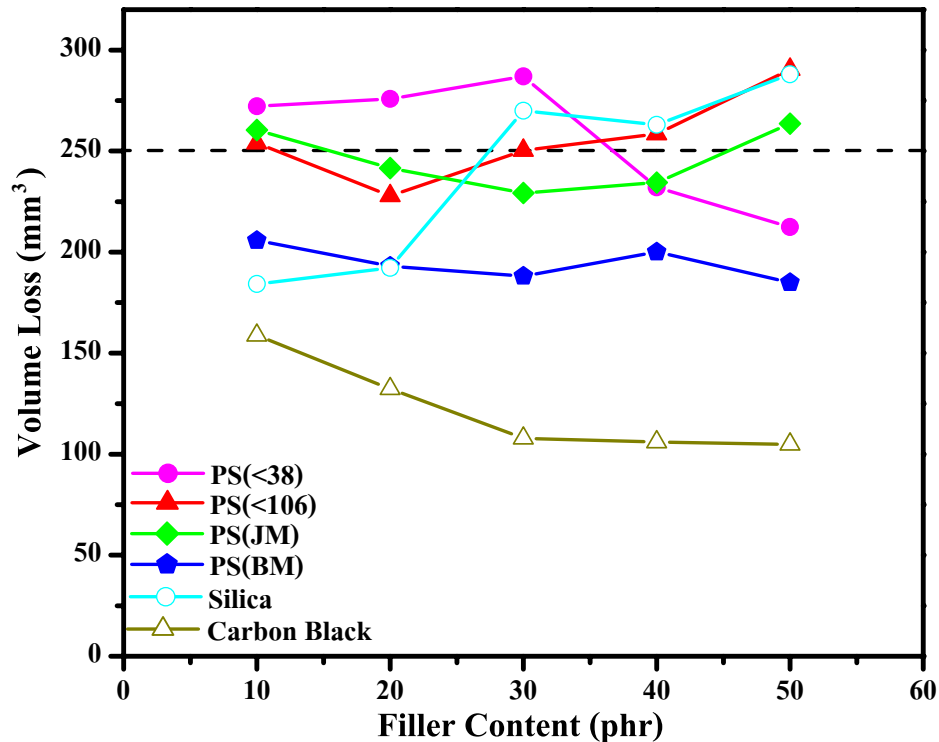


รูปที่ 15 ผลของขนาดและปริมาณของพอลิเมอร์โตนต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นปะแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

ผลการทดสอบความต้านทานการขาด

รูปที่ 16 แสดงผลของขนาดและปริมาณของพอลิเมอร์โตนที่เติมตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ต่อความต้านทานการขาดของยางธรรมชาติ ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่า ยางที่เติม PS(<38) PS(<106) และ PS(JM) ที่ปริมาณต่าง ๆ กันมีค่าความต้านทานการขาดไม่แตกต่างกับยางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เท่าไรนัก ในขณะที่ยางที่เติม PS(BM) มีค่าความต้านทานการขาดสูงกว่ายางที่เติมพอลิเมอร์โตนกลุ่มอื่นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า และค่าความต้านทานการขาดที่ได้มีค่าสูงกว่าของยางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย โดยปริมาณของ PS(BM) ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 30 phr

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการเพิ่มความต้านทานการขาดระหว่างยางที่เติมพอลิเมอร์โตนกลุ่ม PS(BM) กับสารเสริมแรงทางการค้า จะเห็นว่าคาร์บอนแบล็กจะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยความต้านทานการขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 phr เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม PS(BM) กับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนต่อความต้านทานการขาด พบว่า ที่ปริมาณ 10 ถึง 20 phr ยางคงรูปที่ได้จะมีความต้านทานการขาดใกล้เคียงกันและสูงกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ เลย อย่างไรก็ตามเมื่อเติมซิลิกาแบบตกตะกอนในปริมาณที่มากขึ้นจะพบว่า ยางที่ได้มีความต้านทานการขาดลดลงอย่างรวดเร็วและค่าที่ได้จะน้อยกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ อีกด้วย ในขณะที่ยางที่เติม PS(BM) ที่ 30 phr มีค่าความต้านทานการขาดเพิ่มขึ้นจากที่เติม 20 phr เล็กน้อย และจะเริ่มคงที่เมื่อปริมาณที่เติมเพิ่มมากขึ้น

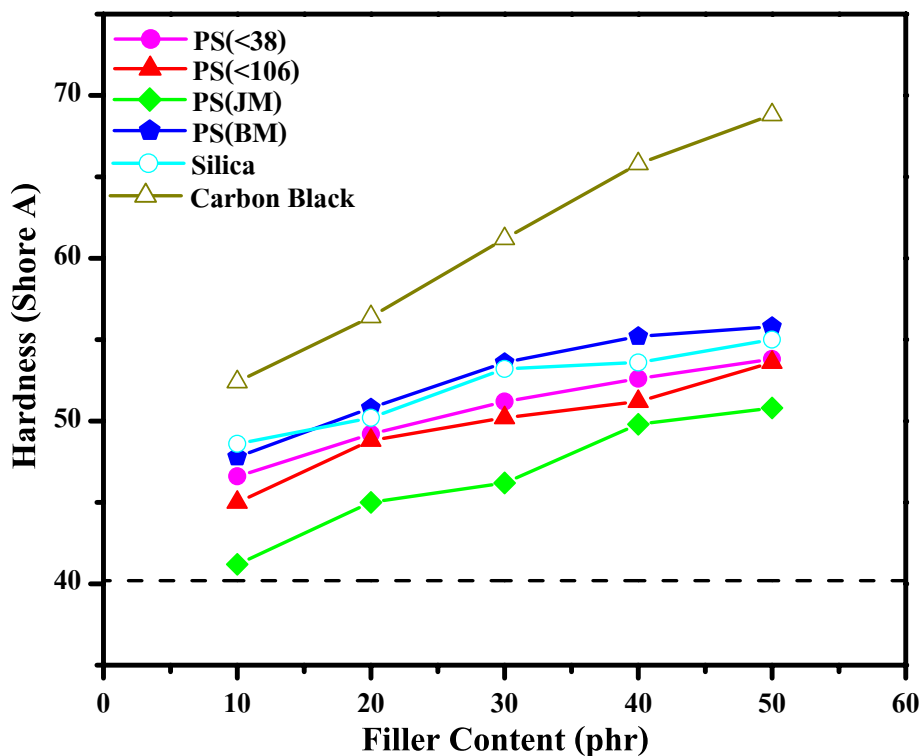


รูปที่ 16 ผลของขนาดและปริมาณของพอดเตอร์สโตนต่อความต้านทานการขัดถูของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นประแสดงค่าความต้านทานการขัดถูของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

ผลการทดสอบความแข็ง

รูปที่ 17 แสดงค่าความแข็งของยางที่เติมพอดเตอร์สโตนขนาดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่สัดส่วน 10 ถึง 50 phr ซึ่งผลการทดลอง พบว่า การเติมพอดเตอร์สโตนลงในยางส่งผลให้ความแข็งของยางสูงกว่ายางที่ไม่เติมสารตัวเติมใด ๆ และเมื่อเติมพอดเตอร์สโตนในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของยางก็เพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เติม โดยการเติม PS(BM) จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นมากที่สุด ในขณะที่การเติม PS(JM) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งน้อยที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของยางที่เติมพอดเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) กับสารเสริมแรงทางการค้า พบว่า ยางที่เติมคาร์บอนแบล็กจะมีความแข็งสูงที่สุด ในขณะที่ยางที่เติมพอดเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) กับยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนจะมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน



รูปที่ 17 ผลของขนาดและปริมาณของพอลิเมอร์โตนต่อความแข็งของยางธรรมชาติเทียบกับการเติมซิลิกาแบบ ตกตะกอนและคาร์บอนแบล็ก (**เส้นประแสดงค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ)

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนต่อความสามารถในการเสริมแรง

สำหรับการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนที่มีขนาดต่าง ๆ กันต่อความสามารถในการเสริมแรงจะเลือกศึกษาที่ปริมาณการเติมที่ทำให้ยางที่ได้มีค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงสุดเท่านั้น โดยตารางที่ 4 แสดง ปริมาณของพอลิเมอร์โตนกลุ่มต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาส่วนนี้

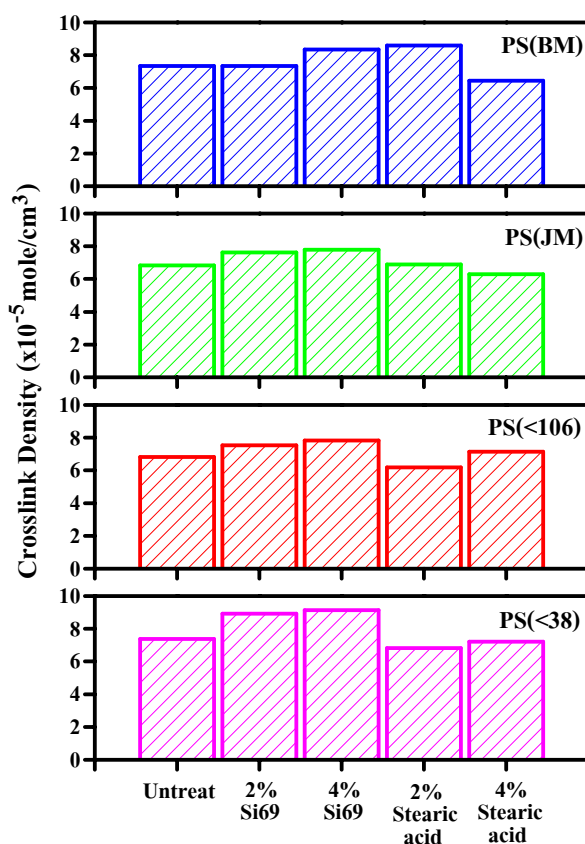
ตารางที่ 4 ปริมาณของพอลิเมอร์โตนที่ใช้ในการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวต่อความสามารถในการเสริมแรง

	ปริมาณที่ใช้ศึกษา (phr)
PS(<38)	30
PS(<106)	10
PS(JM)	10
PS(BM)	30

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนต่อจำนวนพันธะข้าม

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนด้วยสารคู่ควบไฮเลน Si69 และกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 2 และ 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์โตนต่อจำนวนพันธะข้ามของยางแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน Si69 ส่งผลให้จำนวนพันธะข้ามเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เนื่องจากโครงสร้างของสารคู่ควบไฮเลน Si69 ซึ่งปลายด้านหนึ่งสามารถเกิดพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของพอลิเมอร์โตนในขณะที่ปลายอีกด้านสามารถ

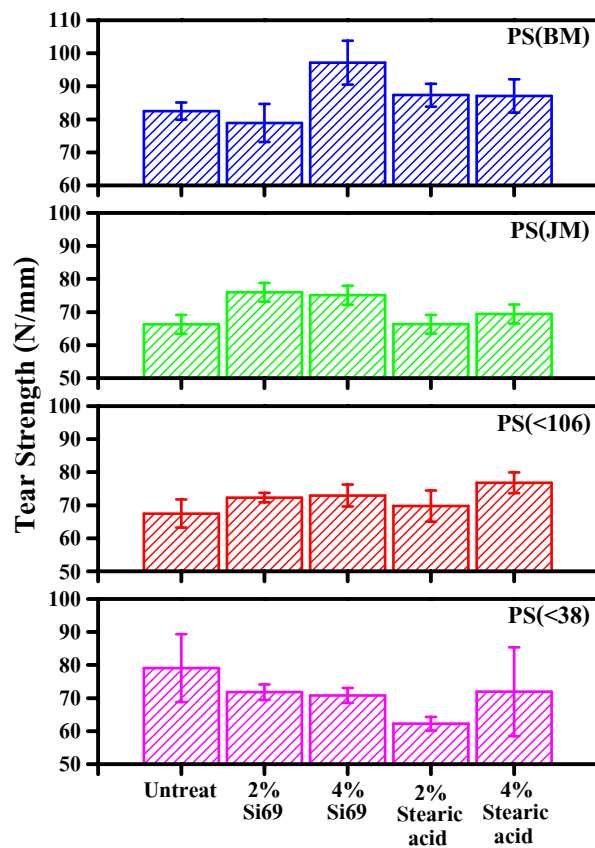
เกิดพันธะกับสายโซ่ของยางจึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้จำนวนพันธะข้ามของยางสูงขึ้น สำหรับกรดสเตียริกมีฟังก์ชันเคมีที่ปลายด้านเดียว ซึ่งฟังก์ชันเคมีดังกล่าวจะเกิดพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิเมอร์โตนเท่านั้น จึงไม่ส่งผลให้จำนวนพันธะข้ามของยางคงรูปเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 18 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนต่อจำนวนพันธะข้ามของยางธรรมชาติ

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนต่อสมบัติความต้านทานการฉีกขาด

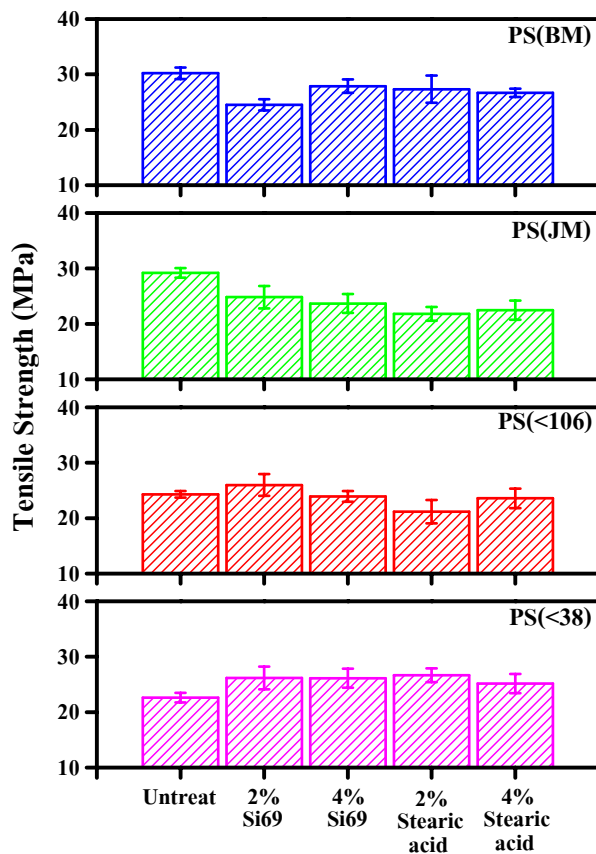
จากการทดลอง พบว่า การปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์โตนด้วยตัวสารก่อกวนโซ่ Si69 และกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 2 และ 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์โตนไม่ได้ส่งผลให้ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นกรณีของพอลิเมอร์โตนกลุ่ม PS(BM) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารก่อกวนโซ่ Si69 ที่ความเข้มข้น 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์โตนเท่านั้นที่ความต้านทานการฉีกขาดของยางสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนต่อความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติ

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์สโตนต่อสมบัติความทนแรงดึง

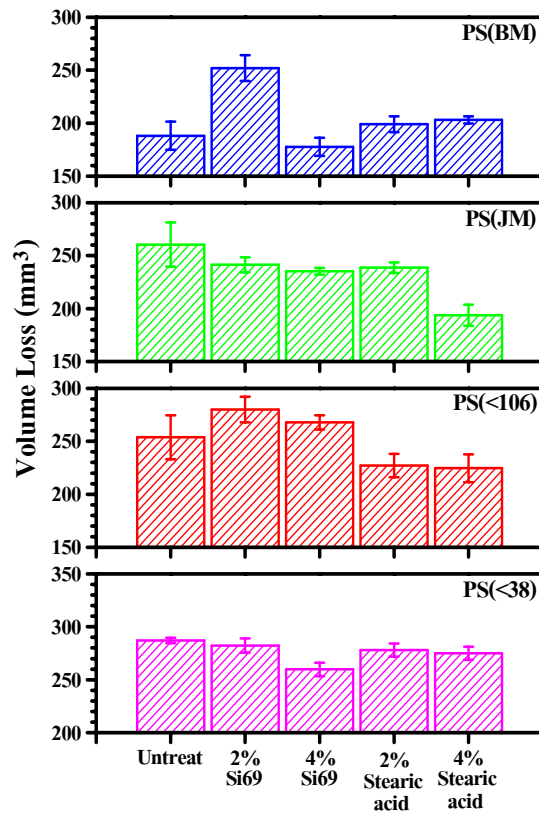
ความทนแรงดึงของยางที่เติมพอลิเมอร์สโตนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวสารคู่ควบไฮดรอกซิล Si69 และ กรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 2 และ 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์สโตน แสดงในรูปที่ 20 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนกลุ่มต่าง ๆ ไม่ได้ส่งผลให้สมบัติความทนแรงดึงของยางเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 20 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนต่อความต้านทานการขีด

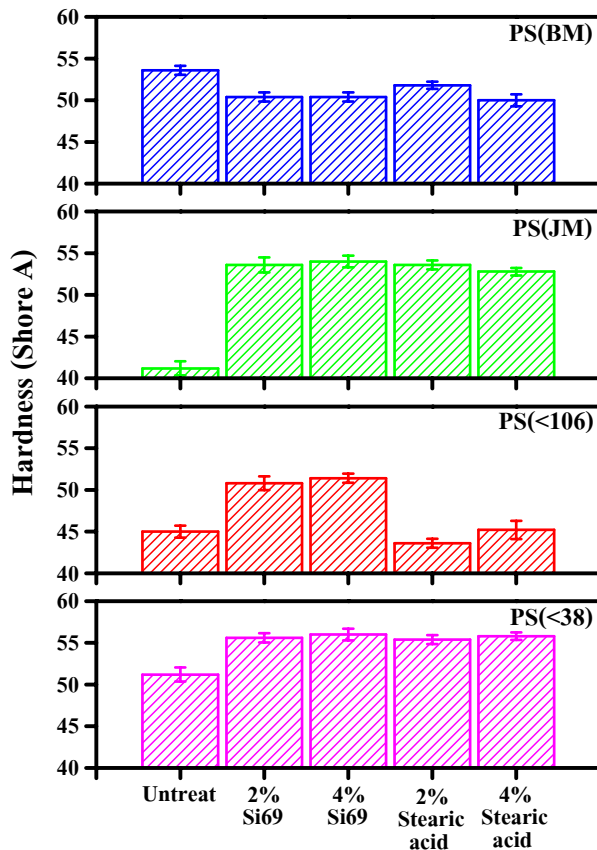
ความต้านทานการขีดของยางที่เติมพอลิเมอร์สโตนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวสารคู่ควบไฮดรอกซิล Si69 และ กรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 2 และ 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์สโตนแสดงในรูปที่ 21 ซึ่งผลการทดลองพบว่า การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนขนาดต่าง ๆ จะส่งผลต่อสมบัติความต้านทานการขีดต่างกันไป มีเพียงยางที่เติม PS(JM) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวสารคู่ควบไฮดรอกซิล Si69 หรือกรดสเตียริกเท่านั้นที่เมื่อปรับปรุงพื้นผิวแล้วส่งผลให้ สมบัติความต้านทานการขีดสูงขึ้น ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนกลุ่มอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถสรุป แนวโน้มที่ชัดเจนได้ แต่ค่าที่ได้ก็ไม่แตกต่างจากกรณีที่ยังไม่เติมพอลิเมอร์สโตนที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวมากนัก



รูปที่ 21 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนต่อความต้านทานการกัดกร่อนของยางธรรมชาติ

ผลของการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเมอร์โตนต่อความแข็งแรงของยาง

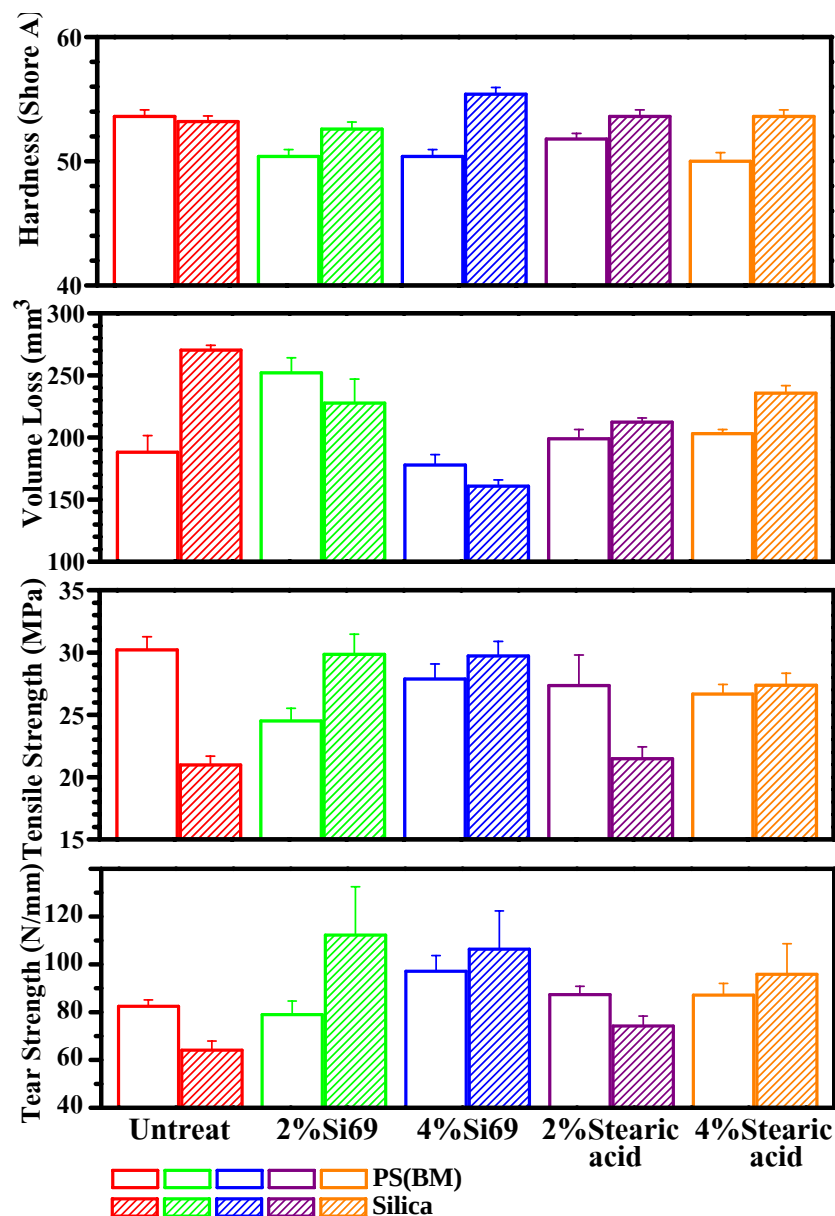
ความแข็งแรงของยางรูปที่เติมพอลิเมอร์โตนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยตัวสารเคลือบซิลิโคน Si69 และกรดสเตียริกที่ความเข้มข้น 2 และ 4% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์โตนแสดงในรูปที่ 22 จากรูปจะเห็นว่า การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์โตนด้วยตัวสารเคลือบซิลิโคน Si69 และกรดสเตียริกส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของยางสูงขึ้นเล็กน้อย (ยกเว้นการเติม PS(BM) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเท่านั้นที่ค่าความแข็งแรงของยางมีแนวโน้มลดลง)



รูปที่ 22 ผลของการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์สโตนต่อความแข็งของยางธรรมชาติ

สมบัติเชิงกลของยางที่เติมพอลิเมอร์สโตนและซิลิกาแบบตกตะกอนที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

รูปที่ 23 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางที่เติมพอลิเมอร์สโตนกับยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ 30 phr ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ผลการทดลองก่อนหน้านี้นอกจากจะพบว่า สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนในปริมาณตั้งแต่ 30 phr ขึ้นไปจะมีค่าต่ำกว่ายางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมใด ๆ แล้ว ยังพบอีกว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าของยางที่เติมพอลิเมอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) อีกด้วย ซึ่งจากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในสูตรสารประกอบยาง การเติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในปริมาณตั้งแต่ 30 phr จะส่งผลเสียต่อสมบัติเชิงกลยาง สำหรับปริมาณที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 20 phr สำหรับการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติม ในกรณีของพอลิเมอร์สโตน พบว่า การปรับปรุงพื้นผิวไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของยางอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แล้วในบางกรณียังพบว่า สมบัติเชิงกลของยางที่ได้กลับมีค่าลดลงอีกด้วย สำหรับยางที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และสมบัติเชิงกลของยางที่ได้จะมีค่าสูงกว่ายางที่เติมพอลิเมอร์สโตนทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว โดยการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน Si69 ที่ความเข้มข้น 4% โดยน้ำหนัก จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด (ยกเว้นค่าความต้านทานการฉีกขาด ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน Si69 ที่ความเข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก) การปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาแบบตกตะกอนด้วยกรดสเตียริกส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางที่ได้เพิ่มสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เท่านั้น



รูปที่ 23 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างยางธรรมชาติที่เติมพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(BM) กับที่เติมซิลิกาแบบตกตะกอน ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในปริมาณ 30 phr

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติที่เติมพอดเทอริสโตนขนาดต่าง ๆ กัน ที่สัดส่วนตั้งแต่ 10 ถึง 50 phr สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเติมพอดเทอริสโตนส่งผลต่อลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติโดยเมื่อเติมลงไปในช่วงแล้วจะทำให้ระยะเวลาสกร๊ชและเวลาในการคงรูปที่ 90% ลดลง โดยพอดเทอริสโตนกลุ่ม PS(BM) ซึ่งเป็นพอดเทอริสโตนกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดจะส่งผลให้เวลาในการคงรูปที่เหมาะสมลดลงมากที่สุด ดังนั้นการใช้พอดเทอริสโตนเป็นสารตัวเติมจึงช่วยลดระยะเวลาและพลังงานในการขึ้นรูปได้

2. สำหรับสูตรสารประกอบยางหนึ่ง ๆ การเติมพอดเทอริสโตนที่มีขนาดและปริมาณต่างกันจะไม่ส่งผลต่อจำนวนพันธะข้ามของยางคงรูป

3. ถึงแม้ว่าพอตเตอร์สโตนจะไม่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติได้ดีเท่ากับการใช้สารตัวเติมเสริมแรงประเภทคาร์บอนแบล็ก แต่พอตเตอร์สโตนก็สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติได้ โดยระดับความสามารถในการเสริมแรงจะขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลที่เราสนใจ ขนาดและปริมาณของพอตเตอร์สโตนที่เติม

4. พอตเตอร์สโตนที่ได้จากการบดด้วย wet ball mill (PS(BM)) ซึ่งเป็นพอตเตอร์สโตนกลุ่มที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดจะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความต้านทานการฉีก ความทนแรงดึง ความต้านทานการขัดถู และความแข็งแรงของยางสูงที่สุด โดยปริมาณที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 30 phr ซึ่ง ณ จุดนี้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับการเติมซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่ปริมาณ 20 phr สำหรับพอตเตอร์สโตนกลุ่มอื่นทั้งที่ไม่ได้ผ่านการบด PS(<38) และ PS(<106) และที่ผ่านการบด PS(JM) ถึงแม้จะไม่สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับยาง แต่ก็สามารถใช้เป็นสารตัวเติมเพิ่มเนื้อที่ก็ได้ เนื่องจากจะเห็นว่าสมบัติเชิงกลต่าง ๆ จะลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อปริมาณพอตเตอร์สโตนที่เติมเพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 50 phr โดยที่ขั้นตอนการเตรียมพอตเตอร์สโตนในกลุ่มนี้ไม่ยุ่งยากและมีต้นทุนในการเตรียมค่อนข้างต่ำ

5. การปรับปรุงพื้นผิวของพอตเตอร์สโตนด้วยสารคู่ควบไซเลน Si69 และกรดสเตียริกที่ 2 และ 4% โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลทำให้ความสามารถในการเสริมแรงของพอตเตอร์สโตนเปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของพอตเตอร์สโตนมีค่อนข้างน้อย ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาแบบตกตะกอนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของยางอย่างมาก

6. สำหรับการบดด้วย wet ball mill จะมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 10,690 บาท/เมตริกตัน (อ้างอิงจากงานวิจัยของ พิษณุ บุญนวลและคณะ [8] ซึ่งใช้เวลาในการบด 147 ชั่วโมง (หมายเหตุ: สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เวลาในการบด 72 ชั่วโมง)) โดยราคาของพอตเตอร์สโตนที่ใช้เป็นวัตถุดิบอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 2 บาท ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า ต้นทุนของพอตเตอร์สโตนที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยางยังคงมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับสารตัวเติมเสริมแรงทางการค้า ซึ่งมีราคาขายอยู่ที่ตั้งแต่ 50 บาทต่อกิโลกรัม เป็นต้นไป (ขึ้นกับชนิดและเกรดของสารเสริมแรงนั้น ๆ)

ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าความสามารถในการเสริมแรงของพอตเตอร์สโตนจะไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็ก แต่การเติมพอตเตอร์สโตนกลุ่ม PS(BM) ก็สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติได้ใกล้เคียงกับการใช้ซิลิกาแบบตกตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่ปริมาณไม่เกิน 20 phr ซึ่งในอุตสาหกรรมยาง บางครั้งพบว่า มีการใช้คาร์บอนแบล็กร่วมกับซิลิกาแบบตกตะกอน ซึ่งโดยส่วนใหญ่เมื่อใช้ซิลิกาแบบตกตะกอนในปริมาณที่ไม่สูงนัก (15-20 phr) มักจะไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ดังนั้นผู้วิจัยคิดว่าในกรณีดังกล่าว การใช้พอตเตอร์สโตนแทนการใช้ซิลิกาแบบตกตะกอนน่าจะมีความเป็นไปได้สูง ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้แล้วว่าพอตเตอร์สโตนเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ กระบวนการเตรียมใช้พลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นหากสามารถนำมาใช้ทดแทนซิลิกาแบบตกตะกอน ก็จะส่งผลให้ต้นทุนของผลิตภัณฑ์ยางลดลงได้ นอกจากนี้จะเห็นว่า เมื่อเติมพอตเตอร์สโตนในปริมาณที่เกินจากจุดที่เหมาะสมก็ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงอย่างช้า ๆ การศึกษาในครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น การดัดแปลงพอตเตอร์สโตนใช้เพียงพลังงานเชิงกลเพื่อทำให้เกิดการลดขนาดของอนุภาค ซึ่งยังคงมีวิธีที่จะเพิ่มพื้นที่ผิววิธีอื่น ๆ อีก เช่น การกระตุ้นด้วยความร้อนหรือสารเคมี ซึ่งอาจให้ผลที่ดีกว่า ในขณะที่ต้นทุนรวมยังคงต่ำกว่าการใช้สารตัวเติมเสริมแรงทางการค้า

เอกสารอ้างอิง

1. Jincheng, W., Yuehui, C. and Jihu, W. Novel Reinforcing Filler: Application to Natural Rubbers (NR) System. *J. of Elastomers and Plastics*, 2005, 37, 169-180.
2. ศิริินทร์ ทองแสง และ ณรงฤทธิ์ สมบัติสมภพ. การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ. วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, 2550, 14(1), 77-89.
3. Sae-Oui, P., Rakdee, C. and Thanmathorn, P. Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanizates: In Comparison with Other Commercial Fillers. *J. App. Poly. Sci.*, 2002, 83, 2485-2493.
4. P. Aungaticchart, Effects of Sand and Pottery Stone on Physical Properties of Terra Cotta Body, Ph.D Dissertation, Chulalongkorn University, 2007.
5. Flory, P. J. and Rehner, J. Statistical Mechanics of Cross-linked Polymer Networks. II. Swelling. *J. Chem. Phys.*, 1943, 11, 521.
6. Da Costa, H. M., Visconte, L. L. Y., Nunes, R. C. R. and Furtado, C. R. G. Rice-Husk-Ash-Filled Natural Rubber II: Partial Replacement of Commercial Fillers and the Effect on the Vulcanization Process. *J. App. Poly. Sci.*, 2003, 87, 1405-1413.
7. Gerspacher, A. and Wampler, W. Fillers. In Baranwal, K. et al.(ed.) Basic Elastomer Technology. The Rubber Division American Chemical Society, Ohio, 2001, 57.
8. พิษณุ บุญนวล, เล็ก สีกง และบงกช หะราภัย. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยผงอนุภาคหินปูนขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).