



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ แนวทางการพัฒนายางประหยัดพลังงานจากยางธรรมชาติความหนืดต่ำ
ซิลิกาマスターแบทช์

Development of reducing energy rubber from low viscosity natural rubber
with silica masterbatch

โดย จุฑาทิพย์ อาจขมภู และคณะ

มิถุนายน 2555

สัญญาเลขที่ RDG 5450060

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ แนวทางการพัฒนายางประหยัดพลังงานจากยางธรรมชาติความหนืดต่ำ
ซิลิกาเมสเตอร์แบท

Development of reducing energy rubber from low viscosity natural rubber
with silica masterbatch

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. นางจุฑาทิพย์ อัจฉมภู มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
2. นางสาวขวัญฤทัย บุญส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
3. นางสาวศิริวรรณ อัญชลี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) แนวทางการพัฒนายางประหยัดพลังงานจากยางธรรมชาติความหนืดต่ำ
ซิลิกามาสเตอร์แบท

(ภาษาอังกฤษ) Development of reducing energy rubber from low viscosity natural
rubber with silica masterbatch

ชื่อหัวหน้าโครงการ **หน่วยงานสังกัด และที่อยู่**

ชื่อ-สกุล นางจุฑาทิพย์ อาจชมภู

หน่วยงาน สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช

ที่อยู่ 109 หมู่ที่ 2 ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110

โทรศัพท์/โทรสาร 075-773335 / 075773338 E-mail artchomphoo3@yahoo.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นางสาวขวัญฤทัย บุญส่ง นางสาวศิริวรรณ อัญชลี

งบประมาณโครงการ 140,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2554 ถึงวันที่ 30 เมษายน 2555

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางแห้งต้องผ่านขั้นตอนการผสม ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานและ
ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต งานวิจัยนี้จึงศึกษายางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท
เพื่อเป็นแนวทางพัฒนายางให้ได้จุดเด่นของยางทั้งสองด้าน คือช่วยลดพลังงานในกระบวนการผสมยาง
และช่วยแก้ปัญหาการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติโดยสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้
โดยตรงในสภาวะน้ำยางทำให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ในยางแห้ง เพื่อการประยุกต์ใช้งานในระดับ
อุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท
2. เพื่อลดปัญหาการใช้งานซิลิกาในคอมปาวด์ยางธรรมชาติ

ผลการดำเนินงาน

สมบัติของยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด (NRmSi) ที่ซิลิกา 30, 40 และ 50 phr คอมปาวด์
ตามสูตรซึ่งดัดแปลงจากสูตรดอกยางรถยนต์ ตาม ASTM E 1136 พบว่าการเพิ่มซิลิกามีผลให้เวลาใน
การวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น ทั้ง scorch time และ cure time ในขณะที่อัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ลดลง เนื่องจาก
ซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด มีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่ผิวซึ่งสามารถดูดซับตัวเร่ง ค่าแรงบิด (M_H-M_L) เพิ่มขึ้น
สอดคล้องกับความแข็ง โมดูลัสที่ 100% และ 300% เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติมเสริมแรงซิลิกาที่
เพิ่มขึ้น และยาง NRmSi ให้โมดูลัสที่ 300% ความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด ความ
ทนทานต่อการฉีกขาด การทนต่อการสึกหรอ สูงกว่าน้ำยางสดจับตัวอบแห้ง (FNR) ยาง STR 5L และยาง
RSS โดยให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด 26.25 MPa ที่ปริมาณซิลิกา 40 phr เนื่องจากการเตรียมในรูป
มาสเตอร์แบททำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าและสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ทั้งขณะเป็นน้ำ
ยางและยางแห้งจึงให้สมบัติเชิงกลสูงกว่ายางชนิดอื่น ส่วนที่ซิลิกา 50 phr อาจเกิดปัญหาการกระจายตัว
และเกิดเป็น aggregate ของซิลิกาในเนื้อยางทำให้การเสริมแรงในยางน้อยลง

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในรูปของน้ำยางสด โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr (LNR1) โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.0 phr (LNR2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.4 phr (LNR3) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr (LNR4) ทุกชนิดให้ลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นดิบที่เหมาะสม ยางความหนืดต่ำที่ได้มีความหนืดมูนอยู่ในช่วง 52.3 ถึง 58.5 และขนาดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_w) อยู่ในช่วง 426,400 ถึง 518,870 การคอมปาวด์ด้วยเครื่อง Internal mixer สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 8.41% ถึง 13.53% และ 15.08% ถึง 20.51% เมื่อเทียบกับยาง STR 5L และ ยาง RSS ตามลำดับ โดยยาง LNR4 ให้พลังงานในการผสมต่ำที่สุด สมบัติการวัลคาไนซ์ยางความหนืดต่ำให้ผลในทำนองเดียวกับยางแท่ง STR 5L และยาง RSS และสมบัติด้านการดึงของยางที่ได้จากการลดขนาดโมเลกุลด้วยสารเคมีต่างชนิดกันไม่มีความแตกต่างของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ให้ ความแข็ง มอดูลัสที่ 100% และ 300% ความทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด และการทนต่อการสึกหรอ มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มซิลิกาทำให้ยางวัลคาไนซ์แข็งขึ้นแต่การกระจายตัวและการเกิดอันตรกิริยาของซิลิกากับยางเกิดได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามยางความหนืดต่ำทุกชนิดให้ความทนทานต่อแรงดึงมากกว่า 23 MPa ความสามารถในการยืดขาดมากกว่า 700% และยาง LNR1 ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด โดยยาง LNR3, LNR4 มีการสึกหรอสูงกว่ายาง LNR1, LNR2 เนื่องจากในยาง LNR1, LNR2 ซิลิกามีการกระจายตัวได้ดีกว่า

สมบัติของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ที่ซิลิกา 30, 40 และ 50 phr จากลักษณะสัญญาณวิทยาของแผ่นยางดิบแสดงให้เห็นว่าซิลิกามีการกระจายตัวในเนื้อยางอย่างสม่ำเสมอ และคอมปาวด์ของ LNR1mSi และ LNR4mSi สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 33.12% และ 37.30% เมื่อเทียบกับยาง STR 5L และ 33.48% และ 37.66% เมื่อเทียบกับยาง RSS การเตรียมในรูปมาสเตอร์แบทที่ซิลิกา 30 phr สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากที่สุด เท่ากับ 25.06% และ 26.25% เมื่อเทียบกับคอมปาวด์ในรูปซิลิกาผง ลดทั้งพลังงานขณะเติมสารเคมีและเวลาในการผสมเพราะสามารถลดขั้นตอนในการเติมซิลิกาในคอมปาวด์ สมบัติของยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทให้ scorch time, cure time เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากซิลิกาเกิดการกระจายตัวในเนื้อยางได้มากขึ้นหมู่ไฮดรอกซิลกระจายตัวและดูดซับตัวเร่งได้มากขึ้น ความแข็งและมอดูลัสที่ 300% ต่ำกว่ายาง RSS และยาง STR 5L เล็กน้อย ความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น แต่ความทนทานต่อการสึกหรอและความสามารถในการยืดขาดลดลง อย่างไรก็ตามซิลิกามีการกระจายและเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีจึงให้ความทนทานต่อการฉีกขาดไม่แตกต่างจากยาง STR 5L และความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณซิลิกา 40 phr ใกล้เคียงกับยางแผ่นรมควันเท่ากับ 22.85 MPa และ 24.90 MPa สำหรับยาง LNR1mSi และยาง LNR4mSi ตามลำดับ และลักษณะสัญญาณวิทยาของยางวัลคาไนซ์จากการใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทในน้ำยาง ทั้งยาง NRmSi, LNR1mSi และ LNR4mSi ยืนยันการกระจายตัวที่ดีกว่าการใช้ซิลิกาแบบผงตามปกติ ทำให้เนื้อยางสามารถห่อหุ้มอนุภาคของซิลิกาและเกิดอันตรกิริยาได้ดีกว่า ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงที่ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NRmSi สามารถให้สมบัติเชิงกล ทั้งมอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และทนต่อการสึกหรอ สูงกว่าการใช้งานในรูปซิลิกาผงทั้งในยางแผ่นรมควันและยาง STR 5L

สรุปผลการวิจัย

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในรูปของน้ำยางสดทุกชนิด ให้ลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นดิบที่เหมาะสม มีความหนืดมูนน้อยในช่วง 52.3 ถึง 58.5 และขนาดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_w) อยู่ในช่วง 426,400 ถึง 518,870 เมื่อนำมาเตรียมคอมปาวด์สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 8.41% ถึง 13.53% เมื่อเทียบกับยาง STR 5L และ 15.08% ถึง 20.51% เมื่อเทียบกับยางแผ่นรมควัน นอกจากนี้การเตรียมในรูปซิลิกาเมสเตอร์แบท สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากขึ้น ที่ปริมาณซิลิกา 30 phr ยาง NRmSi, LNR1mSi และ LNR4mSi สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 30.15%, 33.12% และ 37.30% เมื่อเทียบกับยาง STR 5L และ 30.49%, 33.48% และ 37.66% เมื่อเทียบกับยางแผ่นรมควัน ตามลำดับ

การเพิ่มซิลิกามีผลให้เวลาในการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น และยางธรรมชาติความหนืดต่ำให้สมบัติการวัลคาไนซ์ไม่แตกต่างจากยางคอมปาวด์ปกติ แต่ยางซิลิกาเมสเตอร์แบทให้ scorch time, cure time เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความแข็ง มอดูลัส และความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น แต่ความทนทานต่อการสึกหรอและความสามารถในการยืดขาดลดลง โดยยางแผ่นรมควันให้ความแข็งแรงสูงที่สุด และยาง NRmSi ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมทั้ง มอดูลัสที่ 300% ความทนทานต่อการฉีกขาด การทนต่อการสึกหรอ ความสามารถในการยืดขาด และความทนทานต่อแรงดึงดีที่สุด ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด 26.25 MPa ที่ปริมาณซิลิกา 40 phr และการลดขนาดโมเลกุลจากทุกเทคนิคที่ใช้ไม่มีผลต่อความแข็งแรงและมอดูลัสของยาง แต่ทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาด การทนต่อการสึกหรอ ความสามารถในการยืดขาด และความทนทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามให้ความทนทานต่อแรงดึงมากกว่า 23 MPa และความสามารถในการยืดขาดมากกว่า 700% ในขณะที่การเตรียมในรูปซิลิกาเมสเตอร์แบททำให้ยางความหนืดต่ำมีความแข็งแรง มอดูลัสที่ระยะยืด 300% การทนต่อการสึกหรอ และความทนทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่เนื่องจากซิลิกามีการกระจายและเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีจึงให้ความทนทานต่อการฉีกขาดไม่แตกต่างจากยาง STR 5L และความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณซิลิกา 40 phr ใกล้เคียงกับยางแผ่นรมควันเท่ากับ 22.85 MPa และ 24.90 MPa สำหรับยาง LNR1mSi และยาง LNR4mSi ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

การใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปยางธรรมชาติซิลิกาเมสเตอร์แบท ทั้งจากน้ำยางสด และน้ำยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากกว่า 30% และให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง internal mixer ขนาด 0.5 ลิตร ซึ่งแตกต่างจากการผสมยางในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งการศึกษสมบัติของยางธรรมชาติซิลิกาเมสเตอร์แบทที่ได้ยังไม่ครอบคลุมทุกสมบัติของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม และการใช้งานจริงอาจจำเป็นต้องใช้ยางผสมหรือใช้สารตัวเติมชนิดอื่นร่วมด้วย จึงควรมีการนำยางธรรมชาติซิลิกาเมสเตอร์แบทไปวิจัยเพิ่มเติมในยางผสม หรือใช้สารตัวเติมชนิดอื่นร่วมด้วย และควรวิจัยในระดับอุตสาหกรรมกับกลุ่มผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยให้มีการทดลองกับสูตรที่ใช้จริง ขึ้นรูปและทดสอบผลิตภัณฑ์จริง เพื่อวิเคราะห์ให้แน่ชัดว่าการใช้ยางธรรมชาติซิลิกาเมสเตอร์แบทสามารถ ลดพลังงานในการผสมได้ก็เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและไม่มีปัญหาในกระบวนการผลิต เพื่อส่งเสริมการใช้งานซิลิกาและขยายผลการใช้งานสู่อุตสาหกรรมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น : การนำเสนองานวิจัยเพื่อขยายองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสู่บุคลากรที่เกี่ยวข้องและภาคอุตสาหกรรม

บทคัดย่อ

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เพื่อลดแรงต้านทานการหมุนพร้อมๆ กับประสิทธิภาพยางล้อที่ดี แต่ซิลิกามักมีปัญหาการยึดติดกับยางเนื่องจากเป็นสารอนินทรีย์ และมักจะเกิดการเกาะกลุ่มระหว่างการเก็บ ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมและการใช้งานยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทในสูตรดอกยางรถยนต์ที่ดัดแปลงจากสูตรมาตรฐาน ASTM E-1136 เพื่อศึกษาการลดพลังงานจากการผสม การกระจายตัวของซิลิกา การเกิดอันตรกิริยาของซิลิกากับยาง และสมบัติของยางคอมปาวด์ ผลการศึกษาพบว่า การลดน้ำหนักโมเลกุลของน้ำยางสดโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr (LNR_1) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr (LNR_4) ให้ยางมีความหนืดมูนี้เท่ากับ 58.5 และ 52.3 และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_w) เท่ากับ 518,870 และ 426,400 ตามลำดับ เมื่อนำมาเตรียมคอมปาวด์โดยใช้ผงซิลิกาปริมาณ 50 phr เปรียบเทียบกับคอมปาวด์ของยาง STR 5L พบว่าสามารถลดพลังงานในการผสมได้ 13.53% และ 8.41% ตามลำดับ การเตรียมยางธรรมชาติในรูปซิลิกามาสเตอร์แบทให้เวลาในการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงของซิลิกากับยาง ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดจึงให้สมบัติเชิงกลโดยรวม ทั้งมอดูลัสที่ 300% ความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดขาด ความทนทานต่อการฉีกขาด การทนต่อการสึกหรอดีกว่ายางแผ่นจับตัวอบแห้ง ยางแท่ง STR 5L และยางแผ่นรมควัน และเมื่อเทียบกับคอมปาวด์ของยาง STR 5L ที่ปริมาณซิลิกา 30 phr การเตรียมในรูปซิลิกามาสเตอร์แบททั้งจากน้ำยางสด และน้ำยางสดที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล (LNR_1 และ LNR_4) สามารถลดพลังงานในการผสมได้เท่ากับ 30.15%, 33.12% และ 37.30% ตามลำดับ

คำสำคัญ ความหนืดต่ำ; ซิลิกา; มาสเตอร์แบท; พลังงาน

Abstract

Silica is widely used as a reinforcing filler in rubber products. In particular, industrial tires in order to decrease rolling resistance, and hence high performance tires. However, inorganic material silica has weak interaction with rubber compound, and tend to be agglomerate during storage. In this work, rubber with silica masterbatch was produced and used as based material in rubber compound. The compound formulation was modified from standard tread formulation given in ASTM E-1136. The reduction of mixing energy, particle distribution, rubber and silica interaction, and rubber compound properties were investigated. The result was found that, the low viscosity natural rubber were modified with 1.0 phr of hydrogen peroxide treatment, and 0.34 phr of hydrogen peroxide and 2.7 phr of potassium persulphate mixture treatment technique (LNR₁ and LNR₄) gave rubber sheets with mooney viscosity, 58.5 and 52.3, and average molecular weight ($\overline{M}_w$), 518,870 and 426,400, respectively. When compare with STR 5L compound, the low viscosity natural rubber (LNR₁ and LNR₄) compound with 50 phr of silica powder content can reduced the mixing power consumption 13.53% and 8.41%, respectively. The preparation of silica in masterbatch form slightly increased compound cure time. Whereas, scanning electron microscopy test revealed their homogenous distribution and strength interaction of silica particle in rubber matrix. The physical properties such as, 300% modulus, tensile strength, elongation at break, tear resistance, and abrasion resistance, results from fresh latex silica masterbatch exhibited higher level than the reference compound, dry rubber sheets, STR 5L, and RSS. Furthermore, compound with 30 phr silica content from both fresh latex and reducing molecular weight fresh latex (LNR₁ and LNR₄) showed the significant energy saving, 30.15%, 33.15 and 37.30% in comparison with those STR 5L compound, respectively.

Keywords low viscosity; silica; masterbatch; energy

เนื้อหา

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางแท่งทุกชนิดจะต้องผ่านขั้นตอนการผสม การขึ้นรูปและวัลคาไนซ์ผลิตภัณฑ์ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น ส่งผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต การใช้พลังงานของประเทศ และมลพิษสิ่งแวดล้อม การศึกษาทางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท เป็นแนวทางการพัฒนาชนิดใหม่ที่มีขนาดโมเลกุลและความหนืดของยางให้เหมาะสมต่อการแปรรูป อยู่ในช่วง 4×10^4 ถึง 5×10^5 แล้วทำซิลิกามาสเตอร์แบทในสภาวะน้ำยาง ซึ่งจะทำให้ได้จุดเด่นของยางทั้งสองด้าน คือช่วยลดพลังงานในกระบวนการบดยาง (mastication) และช่วยแก้ปัญหาการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขี้ เนื่องจากสามารถเกิดอันตรกิริยาได้โดยตรงในสภาวะน้ำยาง ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ในยางแท่ง (Peng, et al., 2007; Yanakisawa, et al., 2005) และลดปัญหายากในการผสมซิลิกาในคอมปาวด์ของผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา ที่ทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดสูงแปรรูปได้ยาก และการฟุ้งกระจายของซิลิกาในระหว่างขั้นตอนการผสม (LeBlanc, 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมหลักที่มักจะใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง เช่น อุตสาหกรรมยางล้อ สายพานยาง และพื้นรองเท้า ซึ่งการใช้ซิลิกามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะนอกจากจะให้ประสิทธิภาพยางล้อที่ดีกว่าเขม่าดำ และให้สมบัติเชิงกลที่ดีแล้ว ซิลิกายังผลิตจากวัสดุธรรมชาติที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมหลักอีกชนิดหนึ่งผลิตจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ

ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท สามารถเตรียมได้โดยเทคนิคการใช้สารเคมีเติมลงในน้ำยางสด เช่น ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.8 phr ร่วมกับโซเดียมไนไตรต์ปริมาณ 0.5 phr หรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1 phr หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr และใช้ไฮดรอกซิลอะซีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด ให้ยางมีขนาดโมเลกุล 4×10^5 ถึง 5×10^5 และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางคอมปาวด์ (อรสา และคณะ, 2546) แล้วเติมซิลิกาดีสเปอร์ชันที่กระจายตัวในน้ำ กวนให้เกิดการกระจายตัวและเกิดการเชื่อมติดระหว่างอนุภาคซิลิกาและโมเลกุลยาง

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท
2. เพื่อลดปัญหาการใช้งานซิลิกาในคอมปาวด์ยางธรรมชาติ

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลถึง 1.6×10^6 ถึง 2.3×10^6 จึงจำเป็นต้องมีการบดยาง (mastication) เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของยางสั้นลง ประมาณ 400,000 ถึง 500,000 ก่อนการผสมสารเคมีในกระบวนการเตรียมยางคอมปาวด์ ซึ่งในอุตสาหกรรมจะใช้แรงเฉือนจากเครื่องบดผสม (เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง หรือเครื่องผสมแบบปิด) เพื่อลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติก่อนการผสมสารเคมี ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงและใช้เวลาในการคอมปาวด์มากขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น นอกจากนี้ประสิทธิภาพการลดขนาดโมเลกุลยังขึ้นอยู่กับสภาวะและเทคนิคการบดด้วย การลดขนาดโมเลกุลและควบคุมความหนืดของน้ำยางสดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งทำได้โดยการเติมสารลดขนาดโมเลกุลและสารควบคุมความหนืด เช่น ใช้ไนโตรเบนซีน 0.62 phr ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.8 phr ร่วมกับโซเดียมไนไตรต์ปริมาณ 0.5 phr หรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1 phr หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับ

โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr และใช้ไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด ให้ยางมีขนาดโมเลกุล 4×10^5 ถึง 5×10^5 และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 (ออร์สา และคณะ, 2546; Akinlabi, *et al.* 2006) หรือการฉายรังสียูวีร่วมกับสารย่อยขนาดโมเลกุลยาง คือ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไททาเนียมไดออกไซด์ฟิล์มเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลา 5 ชั่วโมง จะให้น้ำยางมีขนาดโมเลกุลประมาณ 10^4 กรัมต่อโมล (พัทจารี และ จิตต์ลัดดา, 2005) การใช้สารเคมีย่อยขนาดโมเลกุลยางให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางคอมปาวด์ ก่อนการจับตัวเป็นยางแผ่นดิบ จึงเป็นทางเลือกที่ดีในการพัฒนายางใหม่ที่มีขนาดโมเลกุลและความหนืดของยางเหมาะสมต่อการแปรรูป สามารถแปรรูปยางได้โดยไม่ต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการบดยางก่อนการเติมสารเคมี และช่วยลดเวลาในกระบวนการผสมยางได้ด้วย

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมอนุภาคเล็กที่นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงในยาง ปัจจุบันประเทศที่พัฒนาแล้ว โดยเฉพาะประเทศในยุโรปมีการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมหลักทดแทนเขม่าดำมากยิ่งขึ้นเนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมยางรถยนต์ ในปี ค.ศ. 1998 ดอกยางล้อรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในยุโรปร้อยละ 67 ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม และในปี 2006 มีรายงานว่าการใช้ซิลิกา (precipitated silica) จะเติบโตขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 4.7 ต่อปีในอีก 10 ปีต่อมา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นความต้องการของอุตสาหกรรมยางล้อ เนื่องจากการใช้ ซิลิกาทำให้ความต้านทานต่อการหมุน (rolling resistance) ลดลงพร้อมๆ กับประสิทธิภาพยางล้อที่ดี (ชญาภา, มปป) อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาในคอมปาวด์ผลิตภัณฑ์ยางมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเป็นกรดทำให้ซิลิกาต้องใช้สารลดประสิทธิภาพผิวด้วยเสมอ ความเป็นสารอนินทรีย์ของซิลิกาทำให้ซิลิกาเข้ากับยางธรรมชาติและยางไม่มีขั้วอื่นๆ ได้ยาก จำเป็นต้องใช้สารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างผิวของซิลิกากับยาง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของสารคู่ควบยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิด วิธีการผสมสารคู่ควบในยาง วิธีที่จะให้ได้ผลดีก็คือการทำมาสเตอร์แบท ซึ่งทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มขึ้นอีก นอกจากนี้ซิลิกายังเกิดการเกาะกลุ่มเพื่อตั้งทิ้งไว้ (agglomerate) หากสภาวะการผสมไม่เหมาะสม ก็อาจจะไม่สามารถทำให้ก้อน agglomerate ของซิลิกาเหล่านั้นเกิดการกระจายตัว (dispers) ในยางได้ดี (Ansarifar, *et al.*, 2006; Frohlich, *et al.*, 2005; Luginsland, *et al.* 2002) เนื่องจากซิลิกากระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับยางได้ยากกว่าเขม่าดำ (Rattanasom, *et al.* 2007) ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาการเติมซิลิกาลงในน้ำยางเพื่อการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และแก้ปัญหาคาการกระจายตัวยากของการผสมในรูปผงในยางแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกา ซึ่งเป็นสารตัวเติมอนุภาคเล็กที่เข้ากับยางได้ยาก การเติมซิลิกาลงในน้ำยางธรรมชาติพบว่าอนุภาคนาโนซิลิกาที่ได้จะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แม้จะเกิดการเกาะกลุ่มก็จะเป็นก้อนเล็กๆ (primary aggregate) ซึ่งจะเกิดเมื่อปริมาณของซิลิกาในน้ำยางมีปริมาณมากขึ้น การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคส่งผลให้เกิดการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพให้ยางมีสมบัติต้านทานต่อความร้อน และสมบัติเชิงกลสูงขึ้นกว่าการใช้งานในรูปยางแห้งอย่างมีนัย (Peng, *et al.*, 2007; Yanakisawa, *et al.*, 2005) นอกจากการเตรียมซิลิกามาสเตอร์แบทในน้ำยางธรรมชาติแล้ว ยังสามารถเตรียมซิลิกามาสเตอร์แบทได้ในน้ำยางสังเคราะห์ เช่นน้ำยาง SBR น้ำยาง NBR เป็นต้น โดยสามารถเตรียมได้ทั้งในรูปซิลิกามาสเตอร์แบท และซิลิกา-เขม่าดำมาสเตอร์แบท ซึ่งหลังจับตัวน้ำยางมาสเตอร์แบทที่ได้ ทดสอบหาปริมาณซิลิกาในน้ำยางที่เติมลงไปโดยวิธีการหาปริมาณซีเถ้า พบว่าสามารถตรวจพบปริมาณซิลิกา สูงถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ โดยซิลิกามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในน้ำยางธรรมชาติและน้ำยางสังเคราะห์ (Lightsey, *et al.*, 1998)

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกา มาสเตอร์แบท เป็นแนวทางการพัฒนายางชนิดใหม่ที่ลดพลังงานในขั้นตอนการบดผสมยางคอมปาวด์ และลดความยุ่งยากของขั้นตอนการผสมซิลิกา โดยการทำซิลิกา มาสเตอร์แบทในสภาวะน้ำยาง ซึ่งจะทำให้ได้จุดเด่นของยางทั้งสองด้าน คือช่วยลดพลังงานในกระบวนการบดยาง และช่วยแก้ปัญหาการยึดติดและการกระจายตัวที่ไม่ดีระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติ โดยศึกษาความเป็นไปได้ของการนำไปใช้งาน เพื่อเป็นแนวทางในการ ลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาในยาง และส่งเสริมการใช้สารตัวเติมที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ทดแทนเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมหลักอีกชนิดหนึ่งผลิตจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ

4. วิธีการ

4.1 การเตรียมและสมบัติของยางซิลิกา มาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด

1) เตรียมยางซิลิกา มาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดที่ปริมาณซิลิกา 30, 40 และ 50 phr ดังนี้ เตรียมน้ำยางสด ทดสอบเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TSC) ของน้ำยางสด เจือจางให้ได้ 30% TSC เติมน้ำรักษาสภาพน้ำยาง ผสมซิลิกาดีสเพอร์ชันที่ได้จากการเตรียมตามสูตรในตารางที่ 1 โดยแปรปริมาณซิลิกาเป็น 30, 40 และ 50 phr กวนส่วนผสมเป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องกวนผสมเชิงกลความเร็ว 200 รอบต่อนาที จับตัวด้วยกรดอะซิติก 5%wt รีดแผ่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ทดสอบปริมาณซิลิกาที่เหลือในชีรั่ม โดยการหาเปอร์เซ็นต์ TSC น้ำชีรั่มที่ได้จากการจับตัวน้ำยางซิลิกา มาสเตอร์แบท

ตารางที่ 1 สูตรการเตรียม 20% silica Dispersion

Ingredient	Quantity (phr)
silica	20
Bentonite	1
Vultamol	1
น้ำกลั่น	78
ระยะเวลาการบด (ชั่วโมง)	48

2) เตรียมคอมปาวด์ยางซิลิกา มาสเตอร์แบท ตามสูตรพื้นฐานในตารางที่ 2 ซึ่งดัดแปลงจากสูตรออกยางรถยนต์ ตาม ASTM E 1136 ในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ขนาด 0.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80 °C ความเร็วรอบโรเตอร์ 50 rpm บันทึกเวลาในการผสม พลังงานในการผสม และอุณหภูมิของยางคอมปาวด์ นำยางคอมปาวด์ที่ได้มาทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-07 อัตราเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล ด้านความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืด ตามมาตรฐาน ASTM D 412 ความทนทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 624 และสมบัติการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM D 5963

ตารางที่ 2 สูตรยางคอมปาวด์พื้นฐานที่เตรียมจากยางซิลิกามาสเตอร์แบท

Ingredient	Quantity of Ingredient (phr)
NRmSi*	100/30, 100/40, 100/50
Naphthenic Oil	6.00, 8.00, 10.00
Zinc oxide	5.00
Stearic acid	1.50
6PPD	1.50
TMQ	2.00
Wax	0.50
TBBS	0.80
DPG	0.25
Sulphur	1.90
DEG	6% by wt of Silica
Silane	9% by wt of Silica

หมายเหตุ NRmSi* หมายถึง ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มียางธรรมชาติ 100 ส่วน

4.2 การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติความหนืดต่ำ

1) เตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำ โดยเลือกใช้สารเคมีและสภาวะการทดลองจาก อรสา และคณะ (2546) ที่ให้ยางมีขนาดน้ำหนักโมเลกุล (M_w) 4×10^5 ถึง 5×10^5 และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 และเป็นสารไม่อันตรายต่อผู้ทดลองและผู้นำไปใช้งานในอนาคต ดังนี้

1. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง
2. โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 1.4 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง

โดยใช้น้ำยางสด ที่ 30% TSC เติมสารรักษาสภาพน้ำยาง เติมสารลดขนาดโมเลกุล กวนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที และบ่มไว้ตามเวลาที่กำหนด เติมไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด กวนต่ออีก 30 นาที จับตัวด้วยกรดอะซิติก 5%wt รีดแผ่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ทดสอบขนาดน้ำหนักโมเลกุลของยางด้วยเครื่อง GPC และความหนืดของยางด้วยเครื่อง Mooney viscometer

2) เตรียมคอมปาวด์ยางธรรมชาติความหนืดต่ำ ตามสูตรพื้นฐานในตารางที่ 2 ด้วยวิธีการผสมเดียวกับยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ในตอนที่ 1 และทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์และยางวัลคาไนซ์ในทำนองเดียวกัน

4.3 การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท

เลือกวิธีการลดขนาดโมเลกุลที่ให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่กำหนดจากตอนที่ 2 มาใช้เตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท 2 วิธี โดยเลือกที่ให้ลักษณะทางกายภาพของแผ่นยางความหนืดต่ำและสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และเลือกที่ให้พลังงานในการผสมต่ำที่สุดหรือต้นทุนต่ำที่สุด โดยวิธีการเตรียมดังนี้ เจือจางน้ำยางสด ที่ 30% TSC เติมสารรักษาสภาพน้ำยาง เติมสารลดขนาดโมเลกุลและสารควบคุมความหนืด ตามวิธีการในตอนที่ 2 ผสม 20% ซิลิกาดีสเพอร์ชัน โดยแปรปริมาณซิลิกาเป็น 30, 40 และ 50 phr กวนส่วนผสมเป็นเวลา 30 นาที ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที จับตัวด้วยกรดอะซิติก 5%wt รีดแผ่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ทดสอบปริมาณซิลิกาที่เหลือในซีรัม โดยการหาเปอร์เซ็นต์ TSC น้ำซีรัมจากการจับตัวน้ำยางซิลิกามาสเตอร์แบท ทดสอบความหนืดของยางด้วยเครื่อง Mooney viscometer ทดสอบการกระจายตัวของซิลิกาด้วยเครื่อง SEM และการหาค่าความถ่วงจำเพาะ น้ำยางซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้มาเตรียมคอมปาวด์ตามสูตรในตารางที่ 2 ทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์และยางวัลคาไนซ์เปรียบเทียบกับคอมปาวด์ของยางแห้ง ยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดที่ไม่ลดขนาดโมเลกุล ทดสอบสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของซิลิกาในยางวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่อง SEM

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

5.1 สมบัติของซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด

5.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด (NRmSi) ที่ปริมาณซิลิกา 30, 40 และ 50 phr ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ที่แปรปริมาณซิลิกา

Rubber	Silica (phr)	Cure Characteristics			
		Scorch time (min)	Cure time (min)	M _H - M _L (lb.in)	CRI (s ⁻¹)
FNR*	30	2.35	10.93	20.10	11.66
	40	2.52	11.53	22.37	11.10
	50	2.97	13.81	26.50	9.23
NRmSi*	30	3.01	12.43	15.78	10.62
	40	3.17	13.16	19.85	10.01
	50	3.40	14.27	23.43	9.20
STR 5L	30	2.48	11.34	18.25	11.29
	40	2.52	12.59	23.60	9.93
	50	2.86	14.04	26.74	8.94
RSS	30	2.64	10.93	19.40	12.06
	40	2.76	11.73	21.63	11.15
	50	3.16	13.24	24.76	9.92

หมายเหตุ FNR* คือ ยางธรรมชาติที่เตรียมจากน้ำยางสดที่ผ่านการจับตัวและอบแห้งที่ 50 °C

NRmSi* คือ ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มียางธรรมชาติ 100 ส่วน

การเพิ่มซิลิกามีผลให้เวลาในการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์ทุกสูตรที่ศึกษาเพิ่มขึ้น ทั้ง scorch time และ cure time ในขณะที่อัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ลดลงเมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงการใช้ซิลิกามากกว่า 40 phr ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด มีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่ผิวซึ่งสามารถดูดซับตัวเร่ง ทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลง เมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้นความเป็นกรดของคอมปาวด์และการดูดซับตัวเร่งก็จะมากขึ้นด้วย ทำให้ปริมาณสารตัวเร่งในยางลดลงระยะเวลาในการวัลคาไนซ์จึงเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าแรงบิด (M_H-M_L) เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้น และให้ค่าสูงสุดที่ปริมาณการใช้ซิลิกา 50 phr แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มซิลิกาจะทำให้ยางคอมปาวด์มีค่ามอดูลัสสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างคอมปาวด์ของ NRmSi กับคอมปาวด์ของน้ำยางสดจับตัวอบแห้ง (FNR) ยาง STR 5L และยางแผ่นรมควัน พบว่าคอมปาวด์ของ NRmSi ให้ค่า scorch time, cure time เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมในรูปซิลิกามาสเตอร์แบททำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวในเนื้อยางได้มากขึ้นหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่ผิวซิลิกาเกิดการกระจายตัวในเนื้อยางและดูดซับตัวเร่งได้มากขึ้นทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลงเล็กน้อย

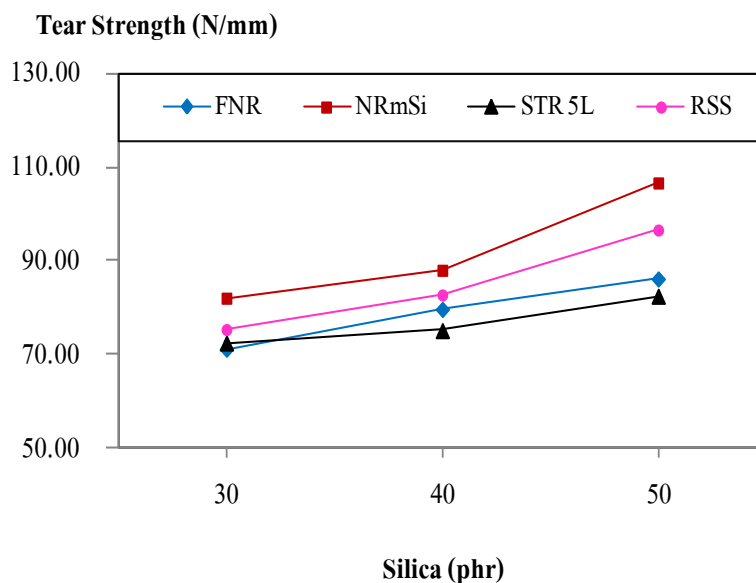
5.1.2 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติความแข็ง มอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ของยางวัลคาไนซ์ ดังตารางที่ 4 พบว่าความแข็งของยางวัลคาไนซ์ทุกสูตรเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีอนุภาคเล็กการเพิ่มปริมาณซิลิกาจึงยิ่งทำให้ความแข็งของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างยางวัลคาไนซ์ชนิดต่างๆ ยางแผ่นรมควันจะให้ความแข็งสูงกว่ายาง NRmSi ยาง FNR และยาง STR 5L ทั้งนี้เนื่องจากยางแผ่นรมควันผลิตจากน้ำยางสดจับตัวโดยตรงโมเลกุลมีขนาดใหญ่และมีค่าความหนืด Mooney สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ให้ความแข็งเริ่มต้นของยางแผ่นรมควันสูงกว่ายางชนิดอื่นที่ศึกษาจึงให้ยางที่มีความแข็งสูงกว่ายางชนิดอื่นๆ

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา

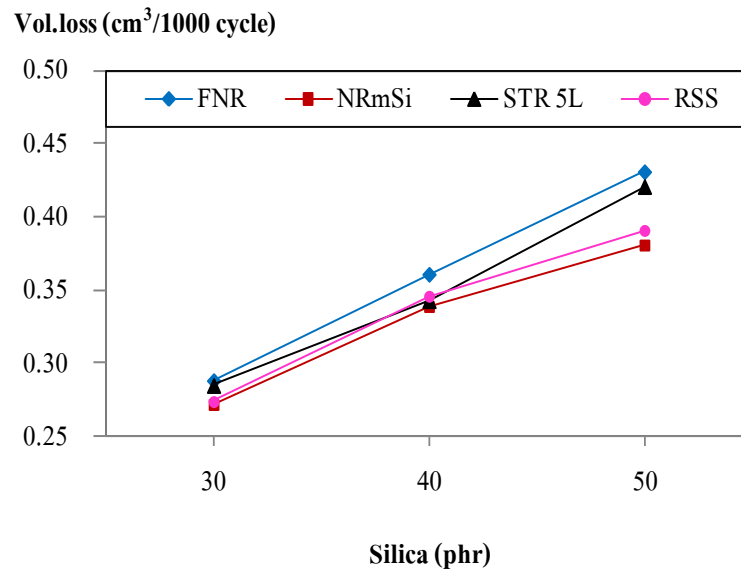
Rubber	Silica (phr)	Vulcanizate properties				
		Hardness (Shore A)	100% Mod. (MPa)	300%Mod. (MPa)	TS. (MPa)	EB. (%)
FNR	30	52.8	0.97	3.13	25.49	780
	40	60.0	1.38	4.31	24.79	740
	50	66.0	1.57	5.15	24.53	700
NRmSi	30	52.5	1.04	3.43	25.62	828
	40	58.4	1.17	4.91	26.25	780
	50	66.4	1.48	5.65	24.99	740
STR 5L	30	54.1	1.05	3.15	25.72	812
	40	61.7	1.24	4.17	25.11	750
	50	65.8	1.33	4.63	23.98	708
RSS	30	59.0	1.10	3.43	24.82	772
	40	65.2	1.26	4.76	24.20	740
	50	69.2	1.48	5.42	23.79	710

ผลการทดสอบสมบัติการดึง พบว่า ค่ามอดูลัสของยางวัลคาไนซ์ทั้งสี่สูตรมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ให้ผลในการทำงานเดียวกัน แต่ที่ระยะยืด 300% การเพิ่มซิลิกาช่วง 30 ถึง 40 phr ให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วง 40 ถึง 50 phr และยาง NRmSi ให้ค่ามอดูลัสสูงที่สุด เนื่องจากยาง NRmSi มีการกระจายตัวที่ดีกว่าจึงให้ยางมีค่ามอดูลัสสูง ความทนทานต่อแรงดึงของยางแผ่นรมควัน ยาง FNR และยาง STR 5L มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อซิลิกาปริมาณสูงขึ้นอาจเกิดปัญหาการกระจายตัวและเกิดเป็น aggregate ของซิลิกาในเนื้อยางทำให้การเสริมแรงในยางน้อยลง ในขณะที่ยาง NRmSi ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุดที่ปริมาณซิลิกา 40 phr และการลดลงของความทนทานต่อแรงดึงที่ซิลิกา 50 phr น้อยกว่ายางชนิดอื่นๆ เนื่องจากการเตรียมในรูปมาสเตอร์แบททำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าและสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ทั้งขณะเป็นน้ำยางและยางแห้งจึงให้สมบัติความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางชนิดอื่นที่ศึกษา ยาง NRmSi ให้ความสามารถในการยืดขาดของยางวัลคาไนซ์สูงที่สุด และความสามารถในการยืดขาดลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นจึงยืดได้น้อยลง



ภาพที่ 1 ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา

ยางวัลคาไนซ์ของยาง NRmSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่าคอมปาวด์ยางแผ่นรมควัน ยาง FNR และยาง STR 5L ตามลำดับ เนื่องจากการเตรียมซิลิกามาสเตอร์แบทในสถานะน้ำยางช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าและเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้อนุภาคซิลิกาหลุดจากเนื้อยางยากขึ้นจึงทนทานต่อการฉีกขาดได้ดีกว่า การเพิ่มปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์ทุกชนิดที่ศึกษาให้ผลในการทำงานเดียวกัน ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์สูงขึ้น เนื่องจากซิลิกามีโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างซึ่งสามารถช่วยขัดขวางการฉีกขาดของยางได้ดี



ภาพที่ 2 การสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา

ผลการทดสอบการสึกหรอ ดังภาพที่ 2 พบว่าคอมปาวด์ของยาง NRmSi ให้ยางมีการสึกหรอต่ำกว่าคอมปาวด์ยางแผ่นรมควัน ยาง FNR และยาง STR 5L เนื่องจากการเตรียมยางในรูปซิลิกามาสเตอร์แบบในสถานะน้ำยาง ซิลิกาที่ผ่านการบดให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงสามารถทำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวในยางได้ดีกว่าในยางแห้ง เกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีกว่า และสามารถเกิดพันธะที่แข็งแกร่งกับยางมากกว่า ทำให้เกิดการเสริมแรงและทนทานต่อการสึกหรอได้ดี สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลโดยรวมของคอมปาวด์ยาง NRmSi ที่ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ที่ศึกษา

5.2 การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติความหนืดต่ำ

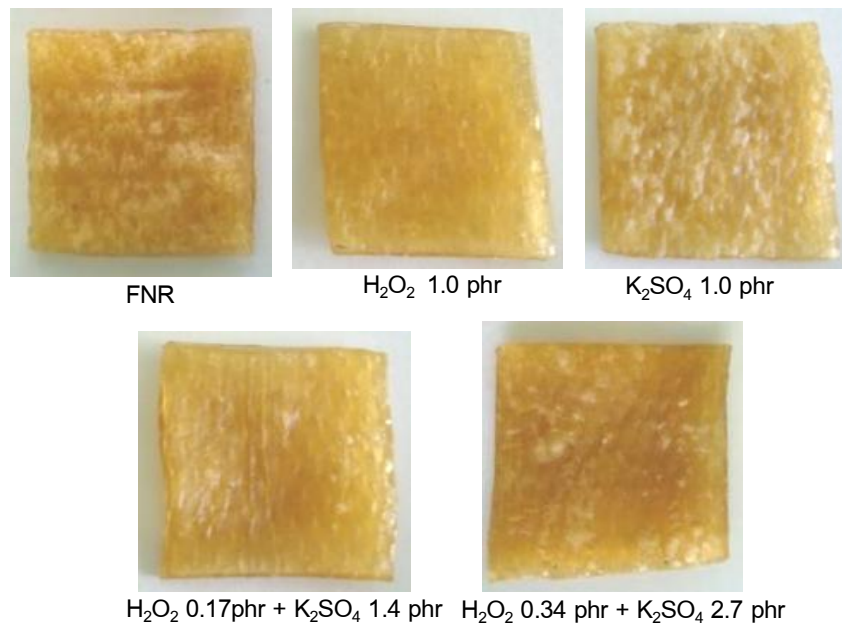
5.2.1 สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติความหนืดต่ำ

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในรูปของน้ำยางสด โดยเทคนิคการใช้สารเคมีทุกชนิดที่ศึกษาให้ลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นดิบที่เหมาะสม ดังภาพที่ 3 พบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr (LNR1) ให้ลักษณะของยางที่ได้มีสีเหลืองอ่อน การใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.0 phr (LNR2) ลักษณะของยางที่ได้มีสีเข้มกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เล็กน้อยและมีฟองอากาศขนาดเล็กภายในเนื้อยาง การใช้สารร่วมกันระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.4 phr (LNR3) เปรียบเทียบกับการใช้สารเพียงตัวใดตัวหนึ่งพบว่าการใช้สารทั้งสองตัวร่วมกันมีประสิทธิภาพในการลดน้ำหนักโมเลกุลได้ดีกว่า แต่ให้ยางมีลักษณะสีเข้มขึ้น และยังเพิ่มปริมาณสารที่ใช้ร่วมกันสียางก็จะยิ่งเข้มขึ้น โดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr (LNR4) จะให้ยางมีสีเข้มกว่าสูตรอื่นๆ

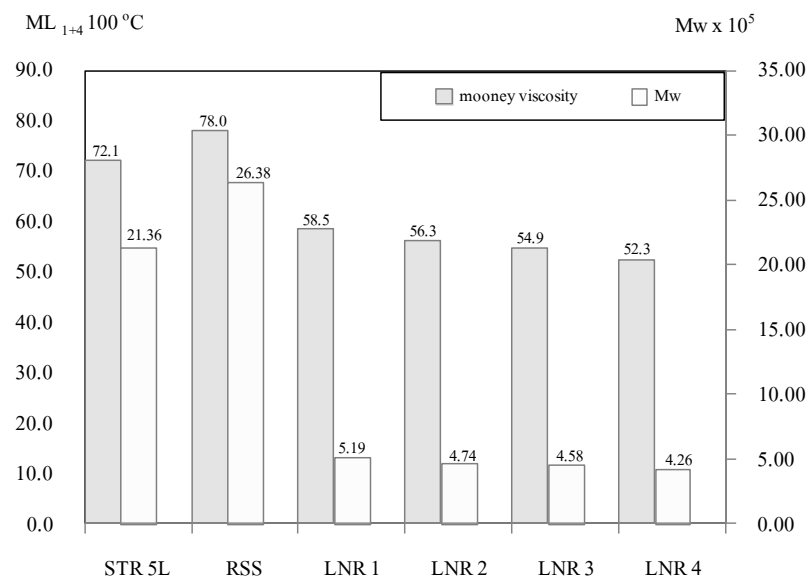
5.2.2 สมบัติด้านความหนืดและน้ำหนักโมเลกุล

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยเทคนิคทางเคมี ให้ความหนืดมูนิของยางอยู่ในช่วง 52.3 ถึง 58.5 และขนาดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_w) อยู่ในช่วง 426,400 ถึง 518,870 ดังภาพที่ 4 โดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง สามารถลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติได้มากที่สุดให้ยางธรรมชาติมีขนาดโมเลกุล

เฉลี่ย 426,400 รองลงมาเป็นการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.4 phr เวลาในการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง การใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.0 phr เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมงและ การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr เวลาในการทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมงตามลำดับ



ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของยางที่ลดขนาดโมเลกุลด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ

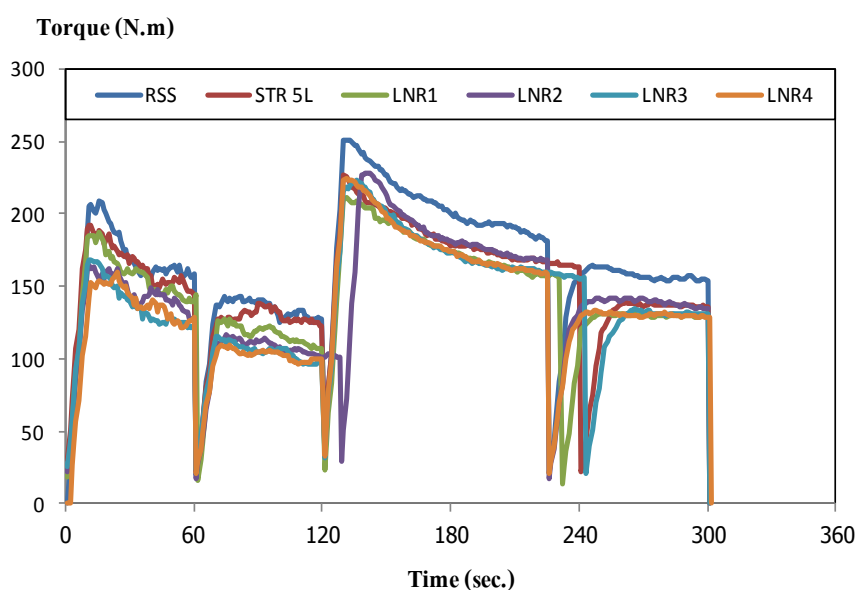


ภาพที่ 4 ความหนืดมูนีและน้ำหนักโมเลกุลของยางความหนืดต่ำ

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แม้จะให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยลดลงน้อยกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่น แต่เนื่องจากลักษณะของยางที่ได้มีสีเหลืองอ่อนสวยงาม และเป็นสารที่มีต้นทุนต่ำกว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต จึงเป็นสารที่น่าสนใจในการนำมาศึกษาต่อไป ความน่าจะเป็นของปฏิกิริยาเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำ เริ่มจากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็นอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล ซึ่งเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลของยางขาดออกจากกันและมีหมู่ปลายเป็นอัลดีไฮด์หรือคีโตน

5.2.3 พลังงานในการผสม

การศึกษาพลังงานในการผสมยางคอมปาวด์ด้วยเครื่อง Internal mixer ได้กราฟการผสมดังภาพที่ 5 พบว่าพลังงานในการผสมสูงขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มซิลิกาทำให้ยางแข็งขึ้น ส่งผลให้พลังงานสูงขึ้นและอุณหภูมิเนื้อยางสูงขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 90-100°C เมื่อเปรียบเทียบคอมปาวด์ของยางธรรมชาติความหนืดต่ำกับยางแท่ง STR 5L และยางแผ่นรมควัน พบว่ายางธรรมชาติความหนืดต่ำทุกชนิดที่ศึกษาให้พลังงานในการผสมต่ำกว่ายาง STR 5L และยางแผ่นรมควัน พลังงานในการผสมในตารางที่ 5 สอดคล้องกับขนาดโมเลกุลและความหนืดมูนี้ของยางดิบที่ใช้ในการคอมปาวด์ โดยยางแผ่นรมควันมีขนาดโมเลกุล 2,637,731 และความหนืด 78.80 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในยางทุกชนิดที่ศึกษา ในขั้นตอนการผสมจึงใช้พลังงานทั้งในการบดยางก่อนผสมสารเคมี (mastication) และขณะใส่สารเคมีเพื่อเตรียมคอมปาวด์ที่สูงที่สุด ในขณะที่ยางความหนืดต่ำจะมีขนาดโมเลกุลลดลงเหลือประมาณ 426,400 ถึง 518,870 จึงใช้พลังงานในการผสมน้อยกว่า และยางคอมปาวด์ที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr ให้พลังงานในการผสมต่ำที่สุด สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 13.53% และ 20.51% ในขณะที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมงสามารถลดพลังงานในการผสมได้ 8.41% และ 15.08% เมื่อเทียบกับคอมปาวด์ของยางแท่ง STR 5L และยางแผ่นรมควัน ตามลำดับ



ภาพที่ 5 กราฟการผสมของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำที่แปรปริมาณซิลิกา

ตารางที่ 5 พลังงานในการผสมและอุณหภูมิเนื้อยางของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำ

Rubber	Silica (phr)	พลังงานในการผสม (kJ.s)	อุณหภูมิเนื้อยาง (°C)
RSS	30	41.47	91.6
	40	46.77	95.5
	50	49.23	98.4
STR 5L	30	41.36	89.8
	40	44.05	90.0
	50	46.38	92.2
LNR 1	30	38.86	88.3
	40	40.44	93.4
	50	42.78	96.8
LNR 2	30	38.03	90.7
	40	39.87	91.8
	50	42.22	94.6
LNR 3	30	38.99	89.6
	40	40.15	95.8
	50	41.74	99.3
LNR 4	30	38.17	92.1
	40	39.00	93.5
	50	40.85	95.7

5.2.4 สมบัติการวัลคาไนซ์

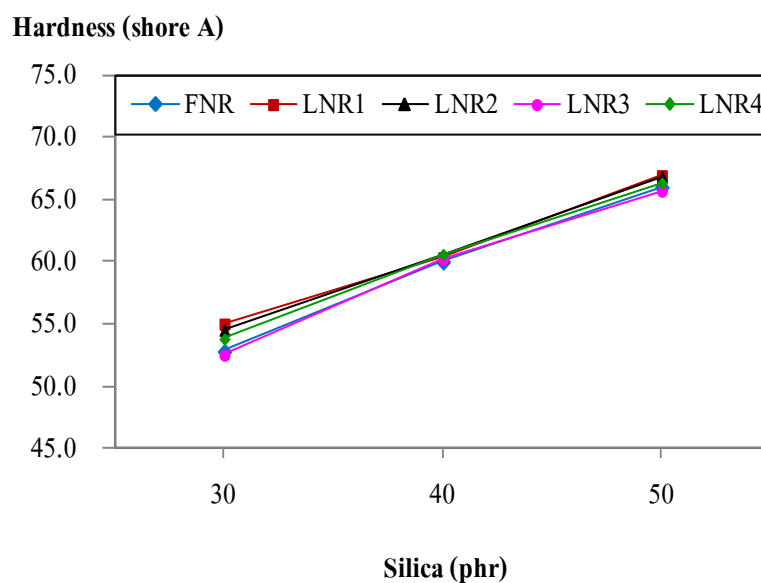
สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำดังข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่ายางธรรมชาติ ความหนืดต่ำที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุลทุกชนิดให้ผลในทำนองเดียวกับยางแท่ง STR 5L และยาง RSS คือ scorch time และ cure time เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ลดลงเมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการลดขนาดโมเลกุลไม่ได้มีผลต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยาง อัตราการวัลคาไนซ์ยังขึ้นอยู่กับซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมในคอมปาวด์เนื่องจากซิลิกามีฤทธิ์เป็นกรด มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวซึ่งสามารถดูดซับตัวเร่งทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลง และทุกเทคนิคการลดขนาดโมเลกุลให้สมบัติการวัลคาไนซ์มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำที่แปรปริมาณซิลิกา

Rubber	Silica (phr)	Cure Characteristics			
		Scorch time (min)	Cure time (min)	$M_H - M_L$ (lb.in)	CRI (s^{-1})
FNR	30	2.35	10.93	20.10	11.66
	40	2.52	11.53	21.37	11.10
	50	2.97	13.81	26.50	9.23
LNR 1	30	2.35	10.14	20.18	12.84
	40	2.43	10.77	22.49	11.99
	50	2.95	13.01	27.05	9.94
LNR 2	30	2.33	10.57	18.97	12.14
	40	2.45	10.98	21.96	11.72
	50	2.98	12.39	25.41	10.63
LNR 3	30	2.37	10.22	18.19	12.74
	40	2.50	11.28	22.29	11.39
	50	2.89	12.38	26.34	10.54
LNR 4	30	2.44	10.47	18.53	12.45
	40	2.57	11.25	20.78	11.52
	50	2.83	12.04	25.50	10.86

5.2.4 สมบัติเชิงกล

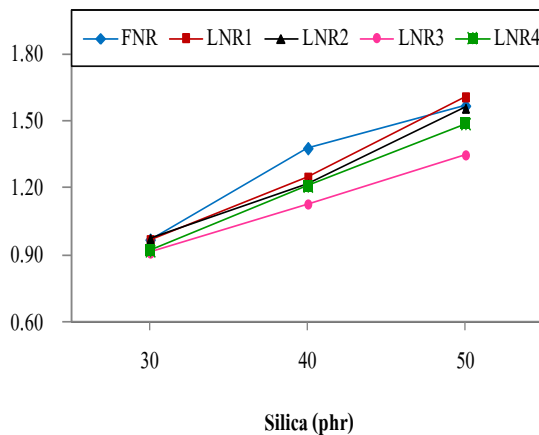
การทดสอบสมบัติความแข็ง สมบัติด้านการดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และการสึกหรอของยาง ดังภาพที่ 6-10



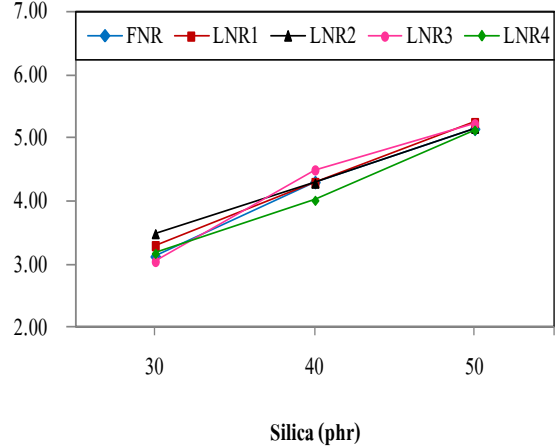
ภาพที่ 6 ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำที่แปรปริมาณซิลิกา

การลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติไม่ได้มีผลให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ลดลง จากภาพที่ 6 ความแข็งแรงของยางคอมปาวด์จากยางที่ลดขนาดโมเลกุลทุกชนิดให้ผลใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างจากยาง FNR โดยความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีอนุภาคเล็กการเพิ่มปริมาณซิลิกาจึงทำให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น

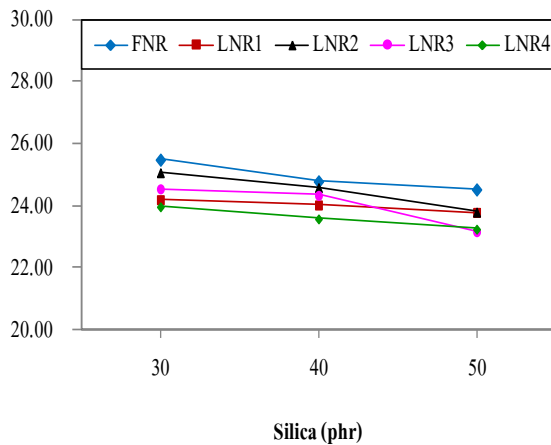
100% Modulus (MPa)



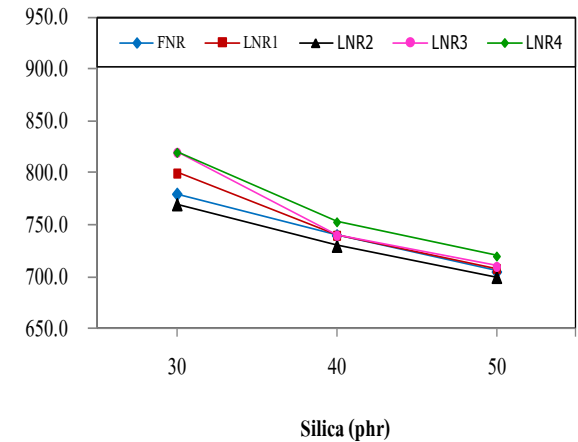
300% Modulus (MPa)



Tensile strength (MPa)



Elongation at Break (%)

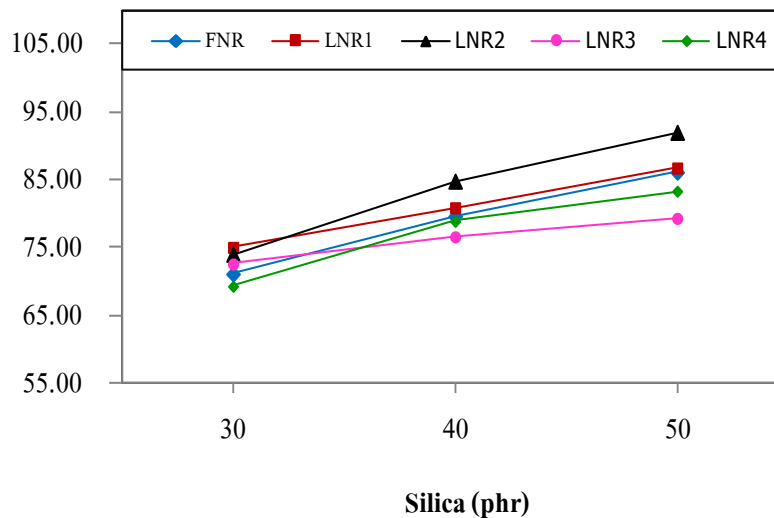


ภาพที่ 7 สมบัติด้านการดึงของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำที่แปรปริมาณซิลิกา

การทดสอบสมบัติด้านการดึง พบว่าสมบัติเชิงกลโดยรวมทั้ง ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ความทนทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดขาด ของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำซิลิกา มาสเตอร์แบทที่เตรียมจากยางความหนืดต่ำที่ได้จากเทคนิคการลดขนาดโมเลกุลด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน ไม่มีความแตกต่างของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล โดยมอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกา ในขณะที่ความทนทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดขาดของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มซิลิกาทำให้ยางวัลคาไนซ์แข็งขึ้น มอดูลัสจึงเพิ่มขึ้นแต่การกระจายตัวและการเกิดอันตรกิริยาของซิลิกากับยางเกิดได้ยากขึ้นความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจึงลดลง นอกจากนี้การลดขนาดโมเลกุลทำให้ความแข็งแรงของยาง

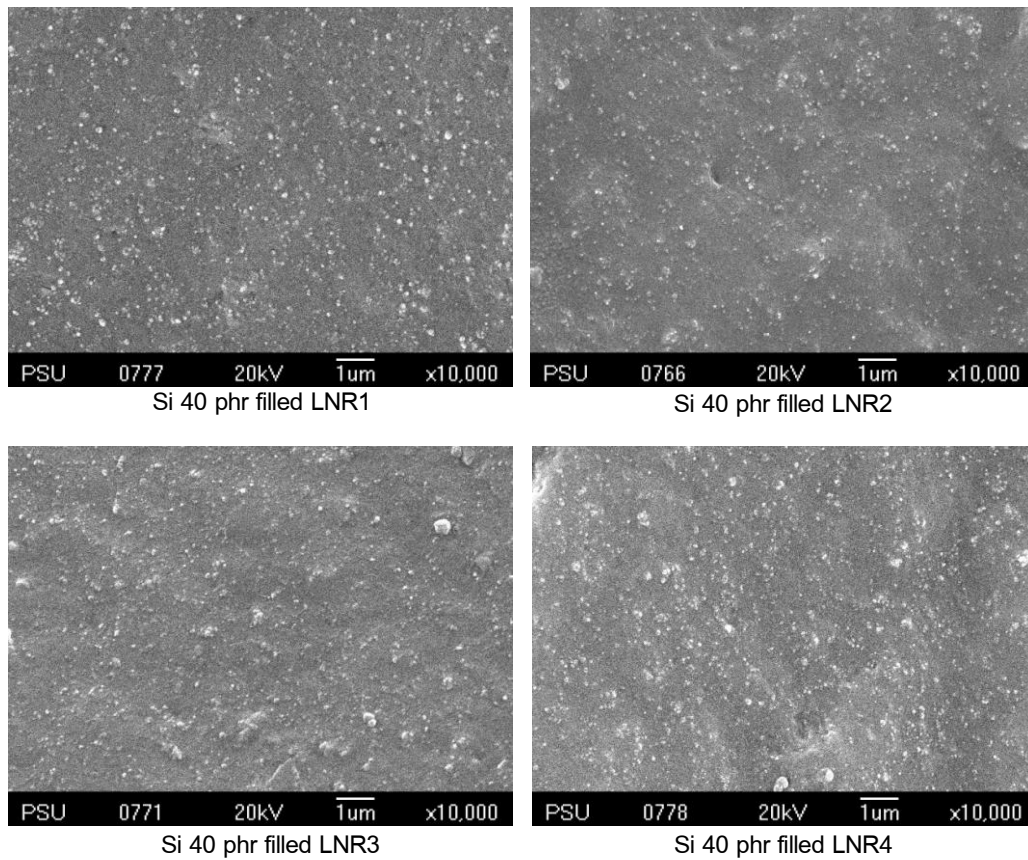
เริ่มต้น (gum strength) ลดลงความทนทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์จึงลดลงเล็กน้อย และทุกเทคนิคการลดขนาดโมเลกุลที่ศึกษาให้ความทนทานต่อแรงดึงยางวัลคาไนซ์มากกว่า 23 MPa และความสามารถในการยืดขาดเกิน 700% โดยยางความหนืดต่ำที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr ให้ความทนทานต่อแรงดึงต่ำที่สุด แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ให้ค่าพลังงานในการผสมต่ำที่สุด และการลดขนาดโมเลกุลด้วยวิธีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 phr ใช้สารเคมีในปริมาณน้อยและมีต้นทุนต่ำที่สุด จึงเลือกเทคนิคการลดขนาดโมเลกุลทั้งสองวิธีนี้สำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

Tear Strength (N/mm)

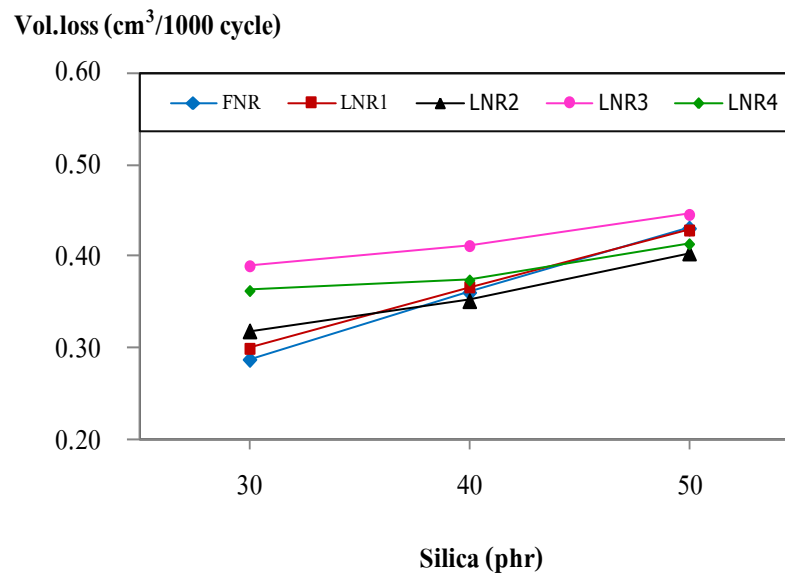


ภาพที่ 8 สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำที่แปรปริมาณซิลิกา

ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำให้ผลในทำนองเดียวกับยางแผ่นรมควัน ยาง FNR และยาง STR 5L มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาในสูตรยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกามีโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างซึ่งสามารถช่วยขัดขวางการฉีกขาดของยางได้ดี เมื่อเปรียบเทียบยางความหนืดต่ำที่เตรียมจากสารเคมีชนิดต่างกัน พบว่าให้ความทนทานต่อการฉีกขาดแตกต่างกันเล็กน้อย โดยยางความหนืดต่ำที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.0 phr ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด ในขณะที่การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.4 phr ให้ค่าต่ำที่สุด เนื่องจากในยางความหนืดต่ำแต่ละชนิดซิลิกามีการกระจายตัวได้ไม่เท่ากัน จากภาพที่ 9 ยาง LNR3 ซึ่งใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 0.17 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 1.4 phr เป็นสารลดขนาดโมเลกุล ซิลิกาเกิดการกระจายตัวได้ไม่ดีเท่าความหนืดต่ำชนิดอื่นๆ ความทนทานต่อการฉีกขาดจึงมีค่าน้อยกว่า



ภาพที่ 9 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำชนิดต่างๆ ที่ปริมาณซิลิกา 40 phr



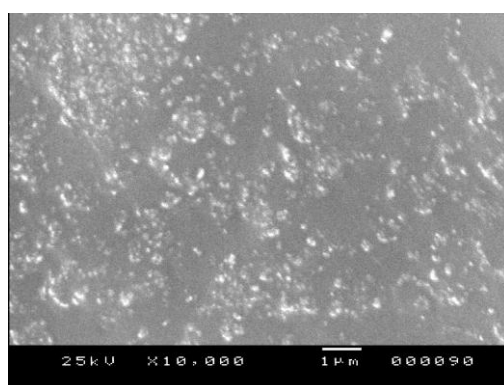
ภาพที่ 10 การสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำชนิดต่างๆ ที่แปรปริมาณซิลิกา

สมบัติการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำให้ผลในทำนองเดียวกับยางแผ่นรมควัน ยาง FNR และยาง STR 5L โดยยางวัลคาไนซ์มีการสึกหรอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาในสูตรยางเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มซิลิกาทำให้น้ำมันยางลดลงความยืดหยุ่นของยางวัลคาไนซ์ลดลงจึงมีการสึกหรอเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางความหนืดต่ำที่ใช้สารลดขนาดโมเลกุลต่างชนิดกัน พบว่ายางความหนืดต่ำที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (LNR3, LNR4) มีการสึกหรอสูงกว่ายางความหนืดต่ำที่เตรียมโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเพียงชนิดเดียว (LNR1, LNR2) เนื่องจากในยาง LNR1, LNR2 ซิลิกามีการกระจายตัวได้ดีกว่า ลักษณะสัญญาณวิทยาจากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่าซิลิกาสามารถกระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากกว่าทำให้เกิดการเสริมแรงและทนทานต่อการสึกหรอได้ดี นอกจากนี้ยาง LNR3, LNR4 มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ายาง LNR1, LNR2 ทำให้ความแข็งแรงของยางเริ่มต้นน้อยลง ยาง LNR3, LNR4 จึงทนทานต่อการสึกหรอได้น้อยกว่ายาง LNR1, LNR2

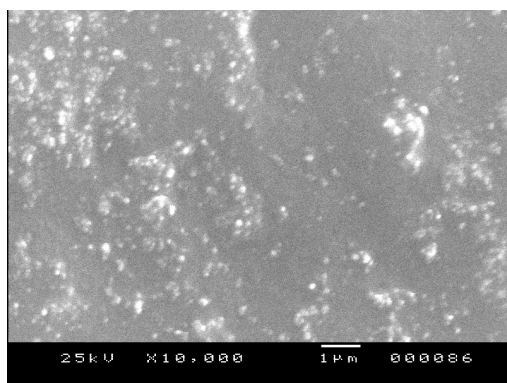
5.3 การเตรียมและสมบัติของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท

5.3.1 สมบัติด้านความหนืด

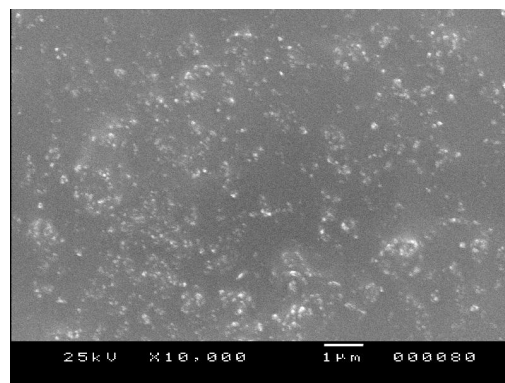
แผ่นยางดิบของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทจากยางความหนืดต่ำที่เตรียมโดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr (LNR1mSi) และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr (LNR4mSi) ให้ผลในทำนองเดียวกับของยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล (NRmSi) ดังภาพที่ 11



NRmSi 30 phr



LNR1mSi 30 phr

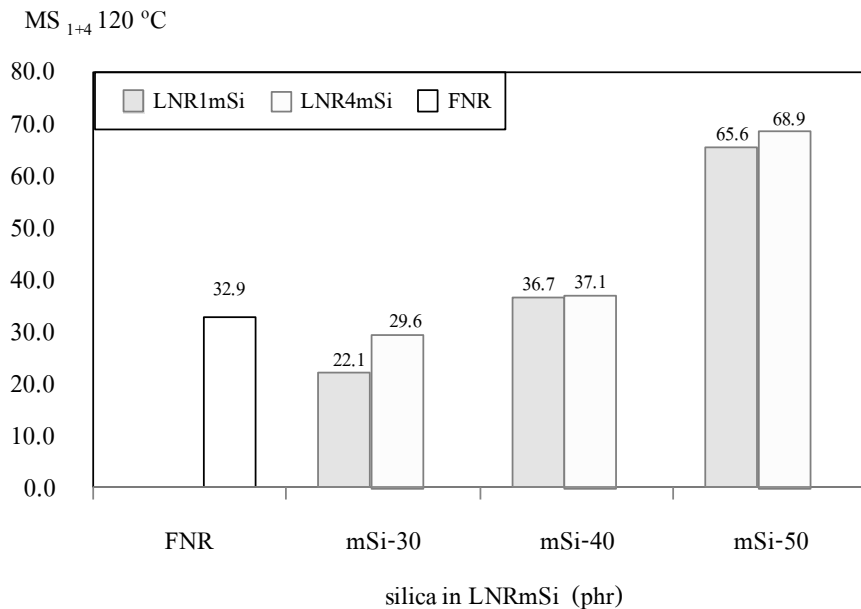


LNR4mSi 30 phr

ภาพที่ 11 ลักษณะสัญญาณวิทยายางแผ่นดิบซิลิกามาสเตอร์แบทที่ปริมาณซิลิกา 30 phr

จากภาพที่ 11 พบว่ายางซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้มีการกระจายตัวของซิลิกาในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ ทั้งแผ่นยางดิบของยางธรรมชาติที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุลและไม่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล การจับตัวแผ่นยางดิบให้เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดในน้ำซีรัมที่เหลืออยู่ในช่วง 1.5-3.5% ซึ่งไม่แตกต่างจากการจับตัวน้ำยางปกติ นอกจากนี้การทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของซิลิกาโดยการสุ่มทดสอบความถ่วงจำเพาะของยางซิลิกามาสเตอร์แบทในตำแหน่งต่างๆ ของแผ่นยางพบว่าให้ค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าซิลิกามีการกระจายตัวที่ดี ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นยางซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้ มีการกระจายตัวของซิลิกาในเนื้ออย่างสม่ำเสมอ แม้บางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มเนื่องจากปริมาณของซิลิกาในน้ำยางมีปริมาณมากก็จะเป็นก้อนเล็กๆ (primary aggregate)

การทดสอบสมบัติด้านความหนืดของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทโดยใช้โรเตอร์เล็กที่อุณหภูมิ 120 °C พบว่ายาง LNR1mSi มีความหนืดน้อยกว่ายาง NRL4mSi เล็กน้อยและยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีซิลิกา 30 phr ให้ความหนืดต่ำกว่ายางธรรมชาติที่เตรียมจากน้ำยางสด ดังภาพที่ 12

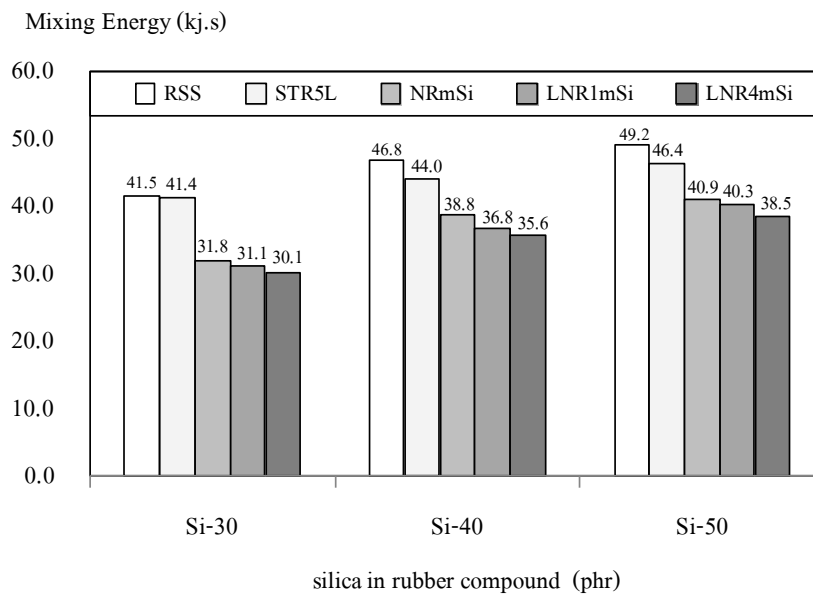


ภาพที่ 12 ความหนืดมูนิของยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทและยางแผ่นดิบ

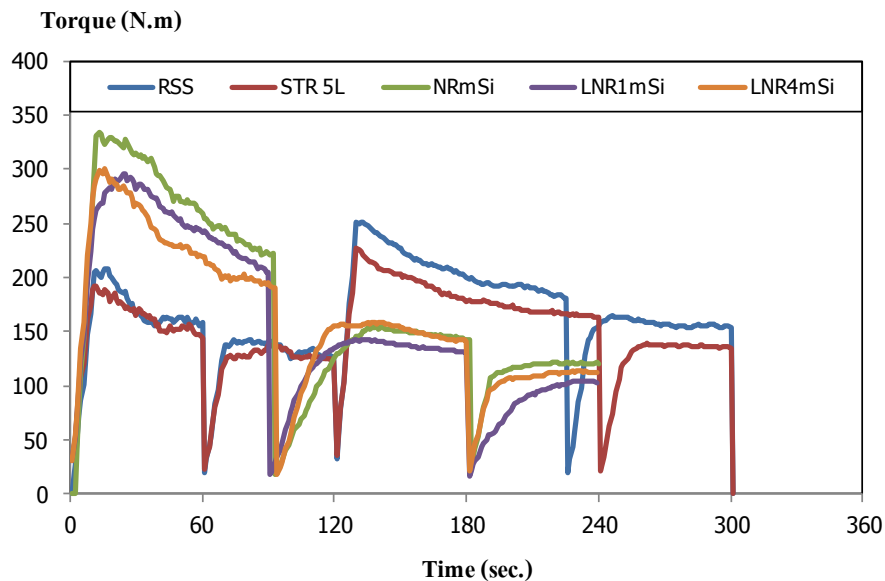
5.3.2 พลังงานในการผสม

การศึกษาพลังงานในการผสมได้ผลดังภาพที่ 13 พบว่าพลังงานในการผสมของยางคอมปาวด์ทุกสูตรเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มซิลิกาทำให้ยางแข็งขึ้นส่งผลให้พลังงานสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอมปาวด์ของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทกับยางแท่ง STR 5L และยางแผ่นรมควัน พบว่ายางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบททั้งสองชนิดให้พลังงานในการผสมต่ำกว่ายางแท่ง STR 5L และยางแผ่นรมควัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 30 phr สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากที่สุด โดยยางคอมปาวด์ LNR4mSi ให้พลังงานในการผสมต่ำที่สุด สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 37.30% และ 37.66% รองลงมาเป็นยางยาง LNR1mSi สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 33.12% และ 33.484% ในขณะที่ยาง NRmSi สามารถ

ลดพลังงานในการผสมได้ 30.15% และ 30.49% เมื่อเทียบกับยางแท่ง STR 5L และยางแผ่นรมควันตามลำดับ ให้อุณหภูมิเนื้อยางที่ได้จากคอมปาวด์ทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 90 - 100 °C และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานในการผสมของยางความหนืดต่ำที่เติมซิลิกาผงกับยางความหนืดต่ำในรูปมาสเตอร์แบท พบว่าการเตรียมในรูปมาสเตอร์แบทที่ปริมาณซิลิกา 30 phr สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากที่สุด สามารถลดพลังงานได้ 25.06% และ 26.25% สำหรับยาง LNR1mSi และยาง LNR4mSi ตามลำดับ ลักษณะกราฟที่ได้จากการผสมดังภาพที่ 14 โดยพลังงานการผสมลดลงจากทั้งขณะเติมสารเคมีและลดลงเนื่องจากเวลาในการผสมลดลงเพราะสามารถลดขั้นตอนในการเติมซิลิกาในคอมปาวด์



ภาพที่ 13 พลังงานการผสมของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทเทียบกับคอมปาวด์ปกติ



ภาพที่ 14 กราฟการผสมของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทเทียบกับคอมปาวด์ปกติ

5.3.3 สมบัติการวัลคาไนซ์

สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ได้ผลดังตารางที่ 7 พบว่าสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทให้ผลในทำนองเดียวกับยางซิลิกามาสเตอร์แบทที่ไม่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล คือ การเพิ่มขึ้นของค่าแรงบิด ($M_H - M_L$) เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้น และ ค่า scorch time, cure time เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอมปาวด์ยางแผ่นรมควัน และยาง STR5L เนื่องจากการเตรียมในรูปแบบซิลิกามาสเตอร์แบททำให้ซิลิกาเกิดการกระจายตัวในเนื้อยางได้มากขึ้นหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวซิลิกาเกิดการกระจายตัวในเนื้อยางและดูดสารตัวเร่งได้มากขึ้นทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลงเล็กน้อย

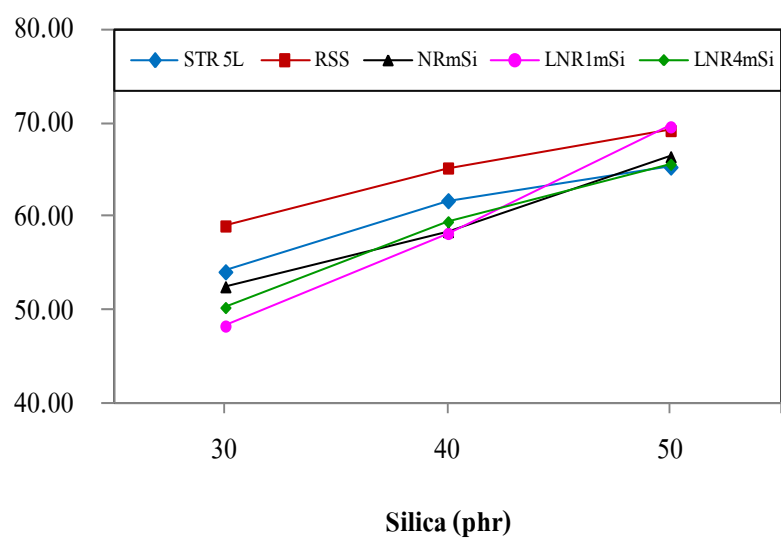
ตารางที่ 7 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท

Rubber	Silica (phr)	Cure Characteristics			
		Scorch time (min)	Cure time (min)	$M_H - M_L$ (lb.in)	CRI (s^{-1})
STR 5L	30	2.48	11.34	18.25	11.29
	40	2.52	12.59	23.60	9.93
	50	2.86	14.04	26.74	8.94
RSS	30	2.64	10.93	19.40	12.06
	40	2.76	11.73	21.63	11.15
	50	3.16	13.24	24.76	9.92
NRmSi	30	3.01	12.43	15.78	10.62
	40	3.17	13.16	19.85	10.01
	50	3.40	14.27	23.43	9.20
LNR1mSi	30	3.38	12.94	14.11	10.46
	40	3.45	13.95	19.86	9.52
	50	3.64	14.67	26.83	9.07
LNR4mSi	30	3.27	11.80	17.62	11.72
	40	3.31	13.02	19.33	10.30
	50	3.46	14.31	23.90	9.22

5.3.4 สมบัติเชิงกล

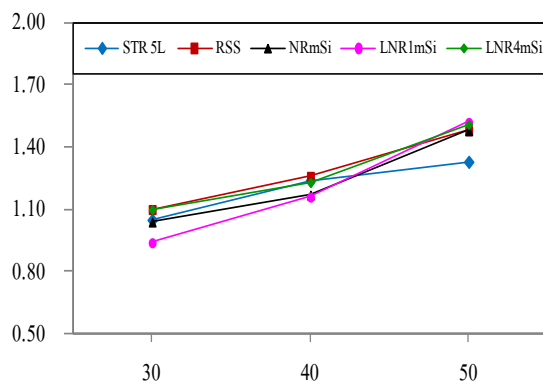
สมบัติความแข็งแรงของยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทดังภาพที่ 15 พบว่าความแข็งแรงความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทให้ผลในทำนองเดียวกับยางซิลิกามาสเตอร์แบทที่ไม่ผ่านการลดขนาดโมเลกุลยางแผ่นรมควัน และยาง STR 5L โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีอนุภาคเล็กการเพิ่มปริมาณซิลิกายังยิ่งทำให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้น และความแข็งแรงซิลิกามาสเตอร์แบทต่ำกว่ายางแผ่นรมควัน และยาง STR 5L เล็กน้อย เนื่องจากซิลิกามีการกระจายตัวในเนื้อยางได้ดีกว่า

Hardness (shore A)



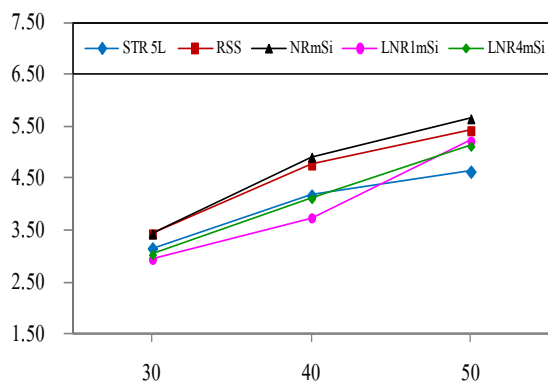
ภาพที่ 15 ความแข็งของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำซิลิกาเมสเตอร์แบท

100% Modulus (MPa)



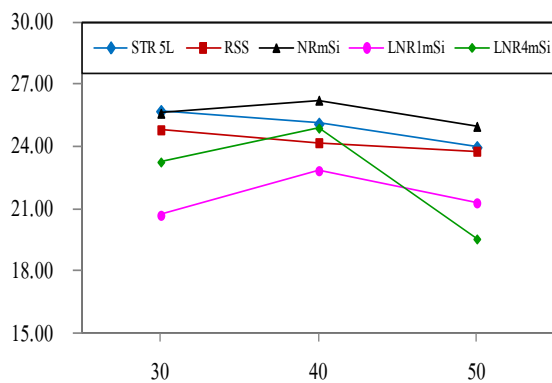
Silica (phr)

300% Modulus (MPa)



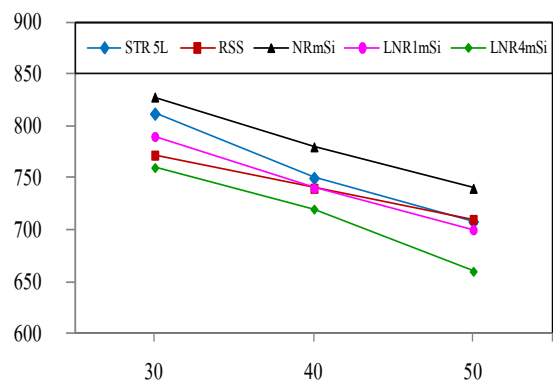
Silica (phr)

Tensile strength (MPa)



Silica (phr)

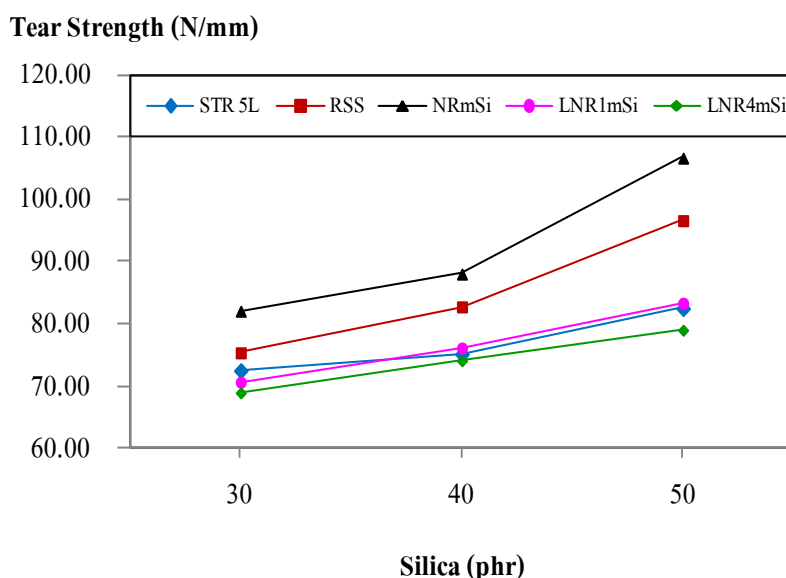
Elongation at Break (%)



Silica (phr)

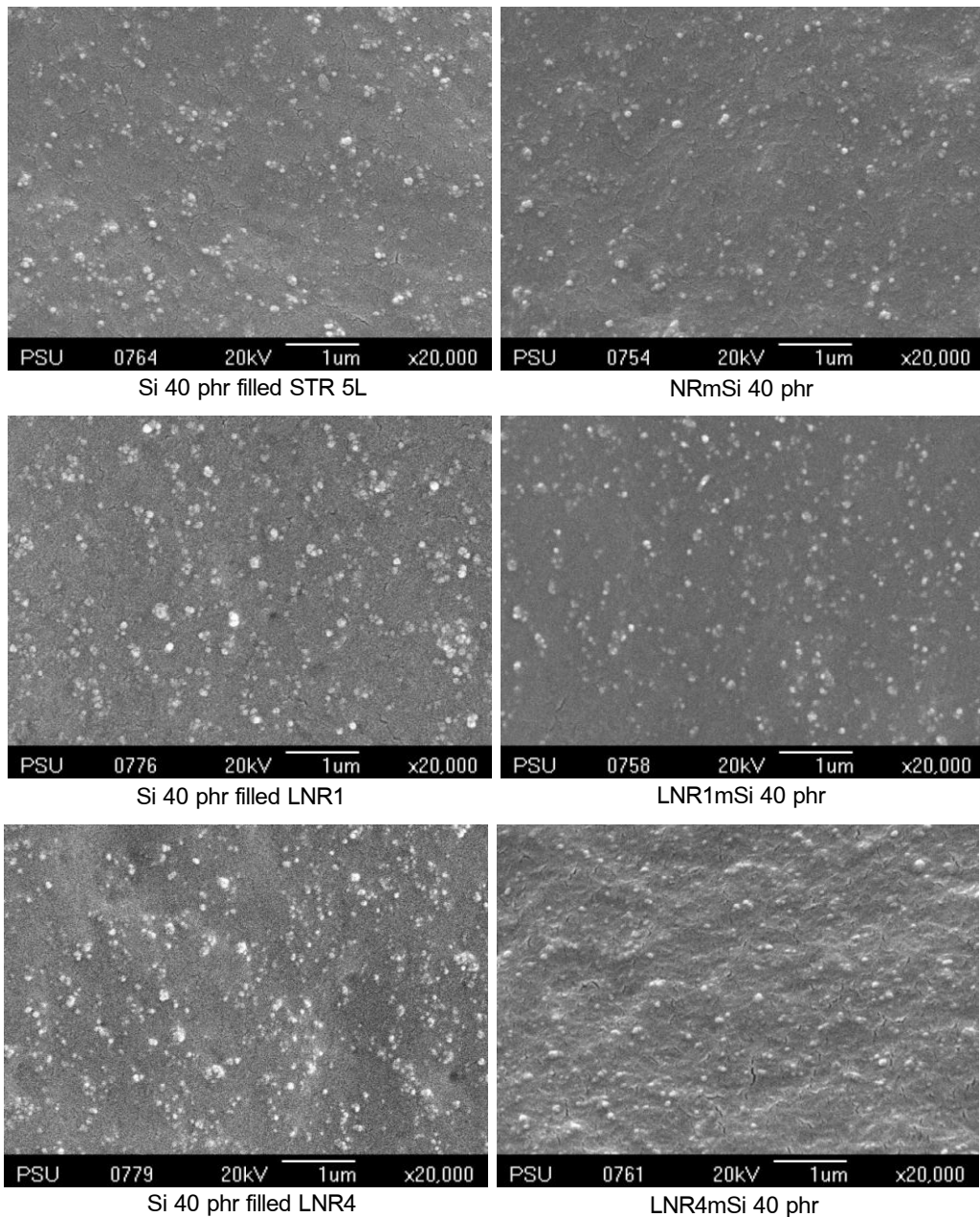
ภาพที่ 16 สมบัติด้านการดึงของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำซิลิกาเมสเตอร์แบท

ผลการทดสอบสมบัติการดึง พบว่า ค่ามอดูลัสของยางวัลคาไนซ์ LNR1mSi และ LNR4mSi มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงมอดูลัสในทำนองเดียวกับยาง NRmSi ยางแผ่นรมควัน และยาง STR 5L โดยมอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยาง LNR1mSi และ LNR4mSi มีค่าน้อยกว่ายาง NRmSi และยางแผ่นรมควัน เล็กน้อย สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดในยาง LNR1mSi และ LNR4mSi จะให้แรงบิดที่ต่ำกว่าแสดงให้เห็นว่าในยาง LNR1mSi และ LNR4mSi อาจจะมีการเชื่อมโยงโมเลกุลน้อยกว่าจึงให้ค่ามอดูลัสต่ำกว่า ความทนทานต่อแรงดึงของยาง LNR1mSi และ LNR4mSi มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกับยาง NRmSi โดยความทนทานต่อแรงดึงมีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณซิลิกา 40 phr และลดลงเมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้นเป็น 50 phr ต่างจากในยางแผ่นรมควันและยาง STR 5L ซึ่งความทนทานต่อแรงดึงมีค่าสูงที่สุดที่ 30 phr และลดลงเมื่อซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องจากในยางซิลิกามาสเตอร์แบทซิลิกามีการกระจายตัวได้ดีกว่าและสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้ตั้งแต่วางในสถานะน้ำยางจึงสามารถใส่สารตัวเติมซิลิกาในปริมาณที่มากกว่าได้ ลักษณะการกระจายตัวของซิลิกาดังภาพที่ 18 อย่างไรก็ตามที่ปริมาณซิลิกา 50 phr ซิลิกาสูงขึ้นอาจเกิดปัญหาการกระจายตัวเกิดเป็น aggregate ของซิลิกาในเนื้อยางหรือปริมาณเนื้อยางไม่เพียงพอในการหุ้มอนุภาคของซิลิกาทำให้อันตรกิริยาของซิลิกากับยางลดลงความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์จึงลดลง นอกจากนี้การลดขนาดโมเลกุลทำให้ความแข็งแรงของยางเริ่มต้นในยางความหนืดต่ำลดลงและการเติมซิลิกาลงในน้ำยางความหนืดต่ำอาจทำให้ระดับการเชื่อมโยงโมเลกุลลดลง ความทนทานต่อแรงดึงของยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทจึงมีค่าน้อยกว่าแผ่นรมควัน ยาง STR 5L ที่ปริมาณซิลิกา 30 phr แต่ที่ซิลิกา 40 phr จะให้ค่าใกล้เคียงกัน ความสามารถในการยืดขาดของยางทุกชนิดลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางวัลคาไนซ์แข็งขึ้นจึงยืดได้น้อยลง ยาง NRmSi ให้ความสามารถในการยืดขาดสูงที่สุดเนื่องจากมีการกระจายตัวของซิลิกาในยางดีที่สุด ส่วนยาง LNR4mSi ให้ความสามารถในการยืดขาดต่ำที่สุดเนื่องจากยางมีความแข็งแรงน้อยกว่ายางสูตรอื่นๆ ที่ศึกษา



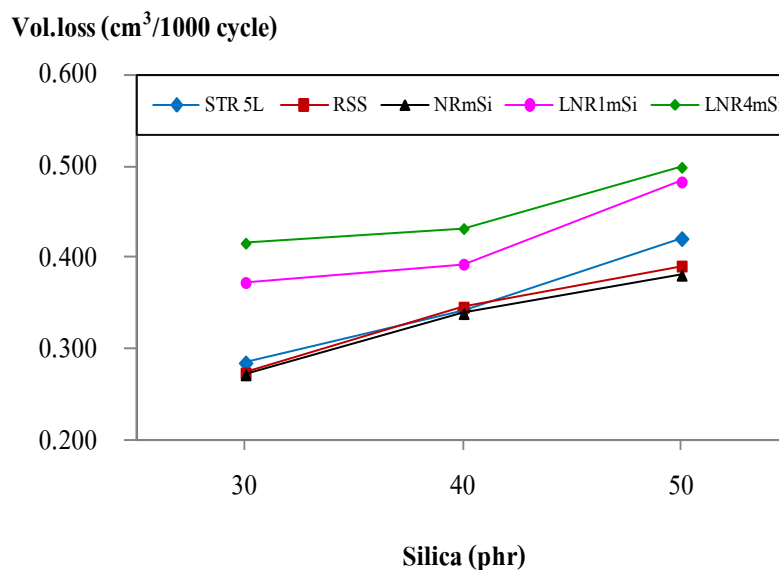
ภาพที่ 17 ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท

ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ LNR1mSi และ LNR4mSi สอดคล้องกับความแข็งแรงของยางเริ่มต้นและความสามารถในการกระจายตัวของซิลิกาในยางวัลคาไนซ์ โดยยาง NRmSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด รองลงมาเป็นยางแผ่นรมควัน ส่วนยาง LNR1mSi ยาง LNR4mSi และยาง STR 5L ให้ค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในยาง LNR1mSi และ LNR4mSi แม้จะมีความแข็งแรงของยางเริ่มต้นต่ำกว่ายาง STR 5L แต่ซิลิกามีการกระจายตัวได้ดีกว่าจากการเตรียมในรูปมาสเตอร์แบท จึงให้ความทนทานต่อการฉีกขาดไม่แตกต่างกันและเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 18 ลักษณะฐานฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิลิกาผงเปรียบเทียบกับซิลิกามาสเตอร์แบทในน้ำยาง

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของซิลิกาในยางวัลคาไนซ์ พบว่า การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทในน้ำยาง ทั้งยาง NRmSi, LNR1mSi และ LNR4mSi ให้ซิลิกามีการกระจายตัวในยางวัลคาไนซ์ดีกว่าการใช้ซิลิกาแบบผงตามปกติ มีส่วนที่เกิดการ aggregate น้อย ทำให้เนื้อยางสามารถห่อหุ้มอนุภาคของซิลิกาและเกิดอันตรกิริยาได้ดีกว่า ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงที่ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในยาง NRmSi สามารถให้สมบัติเชิงกล ทั้งมอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และทนต่อการสึกหรอ สูงกว่าการใช้งานในรูปซิลิกาผงทั้งในยางแผ่นรมควันและยาง STR 5L



ภาพที่ 19 การสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท

ยาง LNR1mSi และ LNR4mSi มีการสึกหรอสูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ที่ไม่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล เนื่องจากการลดขนาดโมเลกุลทำให้ความแข็งแรงของยางลดลงและการเติมซิลิกาในน้ำยางความหนืดต่ำ อาจทำให้ระดับการเชื่อมโยงในโมเลกุลลดลงการเปิดผิวของการสึกหรอเริ่มต้นจึงเกิดได้ง่ายขึ้น

6. สรุปผลการวิจัย

การลดน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติในรูปของน้ำยางสด โดยเทคนิคการใช้สารเคมีทุกชนิดที่ศึกษาให้ลักษณะทางกายภาพของยางแผ่นดิบที่เหมาะสม ยางความหนืดต่ำที่ได้มีความหนืดมูนั้นอยู่ในช่วง 52.3 ถึง 58.5 และขนาดน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (M_w) อยู่ในช่วง 426,400 ถึง 518,870 เมื่อนำมาเตรียมคอมปาวด์สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 8.41% ถึง 13.53% เมื่อเทียบกับยาง STR 5L และ 15.08% ถึง 20.51% เมื่อเทียบกับยางแผ่นรมควัน นอกจากนี้การเตรียมยางธรรมชาติในรูปซิลิกามาสเตอร์แบทสามารถลดพลังงานในการผสมได้มากขึ้น ที่ปริมาณซิลิกา 30 phr ยาง NRmSi, LNR1mSi และ LNR4mSi สามารถลดพลังงานในการผสมได้ 30.15%, 33.12% และ 37.30% เมื่อเทียบกับยาง STR 5L และ 30.49%, 33.484% และ 37.66% เมื่อเทียบกับยางแผ่นรมควัน ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับคอมปาวด์ในรูปซิลิกาผง การเตรียมในรูปมาสเตอร์แบทที่ปริมาณซิลิกา 30 phr สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากที่สุด เท่ากับ 25.06% และ 26.25% สำหรับยาง LNR1mSi และยาง LNR4mSi ตามลำดับ

การเพิ่มซิลิกาให้ผลให้เวลาในการวัลคาไนซ์ยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น และยางธรรมชาติความหนืดต่ำที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุลให้สมบัติการวัลคาไนซ์ไม่แตกต่างจากยางคอมปาวด์ปกติ แต่ยางคอมปาวด์ของซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดและน้ำยางที่ลดขนาดโมเลกุลให้ scorch time, cure time มากกว่าคอมปาวด์ของน้ำยางสดจับตัวอบแห้ง ยาง STR 5L และยางแผ่นรมควัน เล็กน้อย ความแข็ง มอดูลัส และความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น แต่ความทนทานต่อการสึกหรอและความสามารถในการยืดขาดลดลง โดยยางแผ่นรมควันให้ความแข็งแรงที่สูงที่สุด และยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดให้สมบัติเชิงกลโดยรวมทั้ง มอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การยืด 300% ความทนทานต่อการฉีกขาด การทนต่อการสึกหรอ ความสามารถในการยืดขาด และความทนทานต่อแรงดึงดีที่สุด ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด 26.25 MPa ที่ปริมาณซิลิกา 40 phr และการลดขนาดโมเลกุลจากทุกเทคนิคที่ใช้ไม่มีผลต่อความแข็งแรงและมอดูลัสของยาง แต่ทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาด การทนต่อการสึกหรอ ความสามารถในการยืดขาด และความทนทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่ให้ความทนทานต่อแรงดึงมากกว่า 23 MPa และความสามารถในการยืดขาดมากกว่า 700% ในขณะที่การเตรียมในรูปซิลิกามาสเตอร์แบททำให้ยางความหนืดต่ำมีความแข็งแรง มอดูลัสที่ระยะยืด 300% การทนต่อการสึกหรอ และความทนทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย แต่เนื่องจากซิลิกามีการกระจายและเกิดอันตรกิริยากับยางได้ดีจึงให้ความทนทานต่อการฉีกขาดไม่แตกต่างจากยาง STR 5L และความทนทานต่อแรงดึงสูงสุดที่ปริมาณซิลิกา 40 phr ใกล้เคียงกับยางแผ่นรมควันเท่ากับ 22.85 MPa และ 24.90 MPa สำหรับยาง LNR1mSi และยาง LNR4mSi ตามลำดับ

7. ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้งจากน้ำยางสด และน้ำยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล สามารถลดพลังงานในการผสมได้มากกว่า 30% และให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง internal mixer ขนาด 0.5 ลิตร ซึ่งแตกต่างจากการผสมยางในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งการศึกษสมบัติของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้ยังไม่ครอบคลุมทุกสมบัติของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม และการใช้งานจริงอาจจำเป็นต้องใช้ยางผสมหรือใช้สารตัวเติมชนิดอื่นร่วมด้วย จึงควรมีการนำยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทไปวิจัยเพิ่มเติมในยางผสม หรือใช้สารตัวเติมชนิดอื่นร่วมด้วย และควรวิจัยในระดับอุตสาหกรรมกับกลุ่มผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยให้มีการทดลองกับสูตรที่ใช้จริง ขึ้นรูปและทดสอบผลิตภัณฑ์จริง เพื่อวิเคราะห์ให้แน่ชัดว่าการใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทสามารถ ลดพลังงานในการผสมได้กี่เปอร์เซ็นต์ ภายใต้สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและไม่มีปัญหาในกระบวนการผลิต เพื่อส่งเสริมการใช้งานซิลิกาและขยายผลการใช้งานสู่อุตสาหกรรมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- อรสา ภัทรไพบุญชัย ชลดา เลวิส โสภา อิศระ ญัฐการณ์ ชูใหม่ อัจฉรีย์ ศรีประพันธ์ สมคิด ศรีสุวรรณ.
2546. การปรับปรุงสภาพยางธรรมชาติเพื่อลดพลังงานที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 163 น.
- ASTM E1136-93. 2007. Standard specification for a radial standard reference test tire. CD-ROM of
ASTM Standard, Section 9, Volume 09.02.
- Akinlabi ,A.K., Okieimen, F.E., Egharevba, F. and Malomo, D. 2006. Investigation of the effect of mixing
schemes on rheological and physico-mechanical properties of modified natural rubber blends.
Materials and Design, 27: 783–788.
- Ansarifar, A., Shiah, S. F. and Bennett, M. 2006. Optimising the chemical bonding between silanised
silica nanofiller and natural rubber and assessing its effects on the properties of the rubber.
International Journal of Adhesion & Adhesive, 26: 454-463.
- Frohlich, J., Niedermeier, W. and Luginsland, H. D. 2005. The effect of filler-filler and filler-elastomer
interaction on rubber reinforcement. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,
36: 449-460.
- Lightsey, J. W., Kneiling, D. J. and Long, J. M. 1998. Process for producing improved silica-reinforced
masterbatch of polymers prepared in latex form. U.S. Patent No. 5,763,388.
- LeBlanc, J. L. 2002. Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. Progress
in Polymer Science, 27: 627-687.
- Luginsland ,H. D., Frohlich, J. and Wehmeier, A. 2002. Influence of different silanes on the
reinforcement of silica filled rubber compounds. Rubber Chemistry and Technology, 75: 563-579.
- Peng, Z., Kong, L. X., Li, S. D., Chen, Y. and Huang, M. F. 2007. Self-assembled natural rubber/silica
nanocomposites: Its preparation and characterization. Composites Science and Technology,
67: 3130-3139.
- Peter ,A. C. and Norman, H., 1999. The rubber formulary. William Andrew Publishing, LLC. New York.
743 p.
- Rattanasom, N., Saowapark, T. and Deeprasertkul, C. 2007. Reinforcement of natural rubber with
silica/carbon black hybrid filler. Polymer Testing, 26: 369-377.
- Yan, H., Sun, K., Zhang, Y. and Zhang, Y. 2005. Effect of nitrile rubber on properties of silica-filled
natural rubber compounds. Polymer Testing, 26: 369-377.
- Yanakisawa, K., Someno, K. and Mukai, U. 2005. Natural rubber masterbatch, production method
thereof, and natural rubber composition. U.S. Patent No. 6,841,606 B2.

9. ภาคผนวก

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงรายละเอียดการแก้ไข
ความคิดเห็นด้านวิชาการ (Technical) 1. นักวิจัยควรทบทวนการวิจารณ์และการสรุปผลการวิจัยด้านสมบัติเชิงกล ดังนี้ 1.1 ความแข็ง (Hardness) ของ RSS ที่สูง ไม่น่าจะเกี่ยวกับเรื่อง Storage Hardening เพราะเข้าใจว่ายางที่นำมาศึกษาคงไม่ได้ถูกเก็บนานจนเกิด Storage Hardening จริงๆ แล้ว นักวิจัยควรกลับไปดูค่าความหนืด Mooney ที่ตั้งต้นมากกว่า ซึ่งพบว่าตัวอย่าง RSS สูงกว่ายางอื่นๆ 1.2 กรณีค่า Tensile ควรทบทวนผล เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา ค่า Mod ที่ 300% มีแนวโน้มเพิ่มทุกกรณี แต่กลับมีค่า Tensile Strength ลดลง จึงไม่น่าเป็นไปได้โดยเหตุผลของทฤษฎี ซิลิกาเป็น Reinforcing filler ที่ควรจะให้ค่า Tensile Strength, Abrasion Resistance และ Tear Strength เพิ่ม เมื่อเพิ่มปริมาณ	1.1 ได้ทบทวนการวิจารณ์และสรุปผลการวิจัย และแก้ไขตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิเสนอแนะ ในเอกสารหน้า 12 1.2 ได้ทบทวนผลการวิจัยแล้วไม่ได้แก้ไขตามที่เสนอแนะ เนื่องจากเห็นด้วยกับผู้ทรงคุณวุฒิในกรณีการใช้ซิลิกาในปริมาณน้อย แต่ในการศึกษาครั้งนี้ ค่า Tensile Strength ลดลงในช่วงการใช้ซิลิกาเกิน 40 phr เนื่องจากการกระจายตัวที่แย่งลงของซิลิกา และอาจเกิด aggregate หรือ agglomerate ของซิลิกาในเนื้อยาง ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผลเป็นไปในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Yan, <i>et al.</i> (2005) ซึ่งศึกษาการใช้ซิลิกาในปริมาณ 50 phr และงานวิจัยของ Rattanasom, <i>et al.</i> (2007) ซึ่งศึกษาการใช้ซิลิกาในปริมาณ 0 - 50 phr
ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม (Suggestions) 1. นักวิจัยควรเก็บตัวอย่างยางที่ลดน้ำหนักโมเลกุลไว้ศึกษาความเสถียรของ MV ซึ่งหากมีตัวอย่างเหลืออยู่ ควรเก็บให้เหมาะสมและติดตามการทดสอบหาค่า MV ประมาณเดือนละครั้ง ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจว่า เมื่อลดน้ำหนักโมเลกุลได้แล้ว ยางนั้นจะมีค่า MV เสถียรหรือไม่ อย่างไร	1. เห็นด้วยกับข้อเสนอแนะเพิ่มเติมของผู้ทรงคุณวุฒิ และนักวิจัยจะได้ศึกษาและนำเสนอความเสถียรของ MV ในงานวิจัยปี 2555 ซึ่งกำลังดำเนินการวิจัย