



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทช์ในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ
กับยางคลอโรพรีน

The applications of natural rubber with silica masterbatch in natural rubber and
chloroprene blends

โดย จุฑาทิพย์ อัจฉมภู และคณะ

ตุลาคม 2557

สัญญาเลขที่ RDG 5550075

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ยางธรรมชาติซิลิกาเมสเตอร์แบทในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ กับยางคลอโรพรีน

The applications of natural rubber with silica masterbatch in natural rubber and
chloroprene blends

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--------------------------|---|
| 1. นางจุฑาทิพย์ อัจฉมภู | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช |
| 2. นายเตี๋ยว สายจันทร์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช |
| 3. นายณรงค์ศักดิ์ ศรีดำ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช |
| 4. นายธีระพงศ์ ศิริโรจน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน

(ภาษาอังกฤษ) The applications of natural rubber with silica masterbatch in natural rubber and chloroprene blends

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล นางจุฑาทิพย์ อัจฉมภู
หน่วยงาน สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
ที่อยู่ 109 หมู่ที่ 2 ตำบลถ้ำใหญ่ อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110
โทรศัพท์/โทรสาร 075-773335 / 075773338 E-mail artchomphoo3@yahoo.com

นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นายเดี่ยว สายจันทร์ นายณรงค์ศักดิ์ ศรีดำ นายธีระพงศ์ ศิริโรจน์
งบประมาณโครงการ 140,000 บาท
ระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2555 ถึงวันที่ 30 กรกฎาคม 2556

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

การใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ช่วยให้สามารถลดพลังงานในขั้นตอนการผสมยาง ทั้งจากพลังงานที่ใช้ในการบดยางและการลดเวลาในการผสมยางคอมปาวด์ของขั้นตอนการผสมผงซิลิกา โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสามารถลดพลังงานในการผสมอยู่ในช่วง 20-30% สำหรับคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ซิลิกาในยางผสมของยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนที่มีสภาพขั้วต่างกัน โดยให้ซิลิกาเกิดอันตรกิริยาโดยตรงกับยางธรรมชาติในสภาวะน้ำยาง ในรูปยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท เพื่อแก้ปัญหาความเข้ากันได้ของซิลิกากับยางธรรมชาติ แล้วนำมาผสมกับยางคลอโรพรีนซึ่งมีขั้วในระหว่างการคอมปาวด์ยางผสม เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติการแปรรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทผสมกับยางคลอโรพรีน

ผลการดำเนินงาน

การผสมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 30 40 และ 50 phr ซึ่งเตรียมจากยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท 3 ชนิด คือ จากน้ำยางสด (FNR_mSi) น้ำยางสดที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr (LNR₁mSi) และน้ำยางสดที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr (LNR₂mSi) กับยางคลอโรพรีนที่สัดส่วน 25/75 50/50 และ 75/25 สามารถใช้เครื่องผสมแบบปิดด้วยเทคนิคการผสมเช่นเดียวกับการผสมยางโดยทั่วไป ให้อุณหภูมิเนื้อยางเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของซิลิกาที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 90-110°C ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณ 30 phr ให้พลังงานการผสมต่ำที่สุด และการเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนจาก 25/75 เป็น 50/50 และ 75/25 ทำให้พลังงานการผสมเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้สัดส่วนของแข็งรวมในยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น และยางธรรมชาติมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้พลังงานในการผสมเพิ่มขึ้น ยางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบททั้ง FNR_mSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ใช้

พลังงานในการผสมน้อยกว่ายางผสมจากยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผงในทุกสัดส่วนการผสม โดยที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเป็น 75/25 หรือปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์เท่ากับ 37.5 phr สามารถลดพลังงานในการผสมได้สูงสุดเท่ากับ 37.95% สำหรับคอมปาวด์ของยางผสมที่ใช้ LNR₂mSi และการใช้ LNR₁mSi และ FNRmSi ลดพลังงานได้ 34.12 และ 28.48% ตามลำดับ เพราะการเตรียมในรูปซิลิกามาสเตอร์แบบทำให้ซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีกว่าตั้งแต่ขั้นตอนการกระจายตัวของซิลิกาดีสเปอร์ชันในน้ำยาง ทำให้สามารถลดขั้นตอนในการผสมซิลิกาในคอมปาวด์ยางจึงใช้เวลาในการผสมและพลังงานน้อยลง และ LNR₂mSi และ LNR₁mSi ให้พลังงานการผสมต่ำกว่า FNRmSi เนื่องจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลงยางจะมีความหนืดต่ำลงพลังงานที่ต้องใช้ในการบดผสมจึงลดลง คอมปาวด์ยางผสมที่ได้มี scorch time และ cure time เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาและสัดส่วนของยางคลอโรพรีนที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของยางคลอโรพรีนมีผลให้ค่า scorch time และ cure time เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณ ซิลิกา และการใช้ซิลิกาในรูปผงกับซิลิกามาสเตอร์แบบทั้งในยาง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้สมบัติการวัลคาไนซ์ทั้ง scorch time, cure time และ CRI ใกล้เคียงกัน แต่การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบบให้ยางผสมมีค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ความแข็ง มอดูลัสที่ 300% เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และสัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมที่เพิ่มขึ้น การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบบในทุกสัดส่วนของยางผสมให้มอดูลัสสูงขึ้นเล็กน้อย และยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบบ ทั้ง FNRmSi, LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผง โดยให้ค่าสูงสุดที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 ปริมาณซิลิกา 37.5 phr เนื่องจากซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้นมีการกระจายตัวในเฟสยางทั้งสองไม่เท่ากัน หมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของซิลิกามีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนอะตอมในยางคลอโรพรีนทำให้เกิดการกระจายตัวในยางคลอโรพรีนได้ดีกว่าในยางธรรมชาติ ส่วนในเฟสยางธรรมชาติปริมาณซิลิกาที่มากขึ้นมีแนวโน้มเกิดพันธะระหว่างอนุภาคทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนแอกกรีเกตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเจนจากการใช้ซิลิกาผงในยางผสมมากกว่า 30 phr และยางผสมของ FNRmSi ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมปาวด์ของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi เล็กน้อย ความสามารถในการยืดขาดของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ที่ซิลิกาปริมาณน้อยความทนทานต่อการฉีกขาดและการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของยางเริ่มต้น ยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล ทั้ง LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบบจากน้ำยางสดที่ไม่ลดขนาดโมเลกุล และยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผง แต่ที่ปริมาณซิลิกาในยางผสมเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกา การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบบให้ความทนทานต่อการฉีกขาดและการทนต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์สูงกว่าการใช้ซิลิกาผง โดยยางผสมของ FNRmSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงสุด รองลงมาเป็นยางผสมของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi ตามลำดับ เหมือนกันทั้งที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50 และ 75/25 และการเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นแต่ยางผสมทนการสึกหรอได้น้อยลง โดยในสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 ยางผสมมียางธรรมชาติที่มากกว่าเป็นเฟสต่อเนื่องทำให้มีความยืดหยุ่นสูงกว่าที่สัดส่วน 50/50 จึงมีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่า และยางผสมของ FNRmSi ซึ่งมีการกระจายตัวที่ดีกว่าและเฟสยางธรรมชาติมีความแข็งแรงกว่า สามารถทนการสึกหรอได้สูงที่สุด นอกจากนี้ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและคลอโรพรีนทั้งสามสัดส่วนที่ศึกษาสามารถทนไฟได้ โดยไฟจะดับภายในเวลาไม่เกิน 70 วินาที และยางผสมที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 25/75 สามารถทนไฟได้ดีที่สุดเนื่องจากเฟสต่อเนื่องของยางผสมเป็นยางคลอโรพรีนที่ทนไฟ อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณซิลิกาในสัดส่วนยางผสมเท่ากันสามารถ

ให้สมบัติการทนไฟดีขึ้น และการใช้ซิลิกามาสเตอร์แบททำให้ซิลิกากระจายตัวได้ดีกว่าช่วยให้ยางผสมของ FNRmSi LNR1mSi และ LNR2mSi ทนไฟได้สูงขึ้นในทุกสัดส่วนที่ศึกษา และจากลักษณะฐานฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นการกระจายตัวของซิลิกาในเฟสยางผสมโดยเนื้อยางสามารถห่อหุ้มอนุภาคซิลิกาและเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวซิลิกากับยางให้ผลสอดคล้องสนับสนุนประสิทธิภาพการกระจายตัวที่ดีกว่า ทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลทั้งมอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และการทนไฟ สูงกว่าการใช้งานในรูปซิลิกาผงในยางผสมของยาง STR 5L

สรุปผลการวิจัย

การใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนสามารถใช้เทคนิคการผสมแบบเดียวกับยางผสมโดยทั่วไป ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทที่ปริมาณ 30 phr ให้พลังงานการผสมต่ำที่สุด และยางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบททั้ง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ใช้พลังงานในการผสมน้อยกว่ายางผสมจากยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผงในทุกสัดส่วนการผสม โดยที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเป็น 75/25 หรือปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์เท่ากับ 37.5 phr ยางผสมมีความหนืดสูงที่สุด และสามารถลดพลังงานในการผสมได้สูงสุดเท่ากับ 37.95% สำหรับคอมปาวด์ของยางผสมที่ใช้ LNR₂mSi และการใช้ LNR₁mSi และ FNRmSi โดยสามารถลดพลังงานได้ 34.12 และ 28.48% ตามลำดับ ยางผสมมี scorch time และ cure time เพิ่มขึ้น ตามปริมาณซิลิกาและสัดส่วนของยางคลอโรพรีนที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของยางคลอโรพรีนมีผลให้ค่า scorch time และ cure time เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณซิลิกา และการใช้ซิลิกาในรูปผงกับซิลิกามาสเตอร์แบททั้งในยาง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้สมบัติการวัลคาไนซ์ทั้ง scorch time, cure time และ CRI ใกล้เคียงกัน แต่การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทให้ยางผสมมีค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ความแข็ง มอดูลัสที่ 300% เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และสัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมที่เพิ่มขึ้น การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทในทุกสัดส่วนของยางผสมให้มอดูลัสสูงขึ้นเล็กน้อย และคอมปาวด์ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้ง FNRmSi, LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผง โดยให้ค่าสูงสุดที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 ปริมาณซิลิกา 37.5 phr และยางผสมของ FNRmSi ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมปาวด์ของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi เล็กน้อย ความสามารถในการยืดขาดของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ที่ซิลิกาปริมาณน้อยความทนทานต่อการฉีกขาดและการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของยางเริ่มต้น แต่ที่ปริมาณซิลิกาในยางผสมเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกา การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทให้ความทนทานต่อการฉีกขาดและการทนต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์สูงกว่าการใช้ซิลิกาผงในยางแท่ง STR 5L โดยยางผสมของ FNRmSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด รองลงมาเป็นยางผสมของ LNR1mSi และ LNR2mSi ตามลำดับ เหมือนกันทั้งที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50 และ 75/25 และการเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นแต่ยางผสมทนการสึกหรอได้น้อยลง อย่างไรก็ตามยางผสมของ FNRmSi ให้สมบัติการทนต่อการสึกหรอสูงที่สุด นอกจากนี้การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทของ FNRmSi LNR1mSi และ LNR2mSi ให้ยางผสมทนไฟได้สูงขึ้นในทุกสัดส่วนที่ศึกษา และลักษณะฐานฐานวิทยาให้ผลสอดคล้องสนับสนุนสมบัติที่เหนือกว่าของการใช้งานซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทเนื่องมาจากประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีกว่าจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกากับเฟสยางผสม

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

การใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้งจากน้ำยางสด และน้ำยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล สามารถลดเวลาในการผสมยางได้โดยไม่กระทบต่อสมบัติของยางผสม และยังช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวได้ดีขึ้น ทำให้สามารถลดพลังงานในการผสมได้ การพลังงานในการผสมได้มากกว่า 30% และให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง internal mixer ขนาด 0.5 ลิตร ซึ่งแตกต่างจากการผสมยางในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งการศึกษสมบัติของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้ยังไม่ครอบคลุมทุกสมบัติของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม จึงควรมีการนำยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทไปวิจัยเพิ่มเติมในระดับอุตสาหกรรมกับกลุ่มผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยให้มีการทดลองกับสูตรที่ใช้จริง ขึ้นรูปและทดสอบผลิตภัณฑ์จริง เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการลดพลังงานในการผสมในระดับอุตสาหกรรม ภายใต้สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและไม่มีปัญหาในกระบวนการผลิต เพื่อส่งเสริมการใช้งานซิลิกาและขยายผลการใช้งานสู่อุตสาหกรรมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น : การนำเสนองานวิจัยเพื่อขยายองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยสู่บุคลากรที่เกี่ยวข้องและภาคอุตสาหกรรม

บทคัดย่อ

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ยาง แต่ซิลิกามักมีปัญหาการยึดติดกับยางเนื่องจากเป็นสารอนินทรีย์ และมักจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มระหว่างการเก็บ ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมและการใช้งานยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน เพื่อศึกษาพลังงานการผสม และสมบัติของยางวัลคาไนซ์ ผลการศึกษาพลังงานการผสมพบว่าคอมปาวด์ยางผสมของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือจากน้ำยางสด (FNR_mSi) น้ำยางสดที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1.0 phr (LNR₁mSi) และน้ำยางสดที่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุลด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr (LNR₂mSi) ใช้พลังงานในการผสมน้อยกว่าคอมปาวด์ยางผสมของยาง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผงในทุกสัดส่วนการผสม การศึกษาสมบัติของยางวัลคาไนซ์ พบว่าคอมปาวด์ยางผสมของ FNR_mSi, LNR₁mSi และ LNR₂mSi ใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ใกล้เคียงกับคอมปาวด์ยางผสมของยาง STR 5L ในขณะที่คอมปาวด์ยางผสมของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้ง FNR_mSi, LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้สมบัติเชิงกล และความทนทานการดีดไฟ สูงกว่าคอมปาวด์ยางผสมของยาง STR 5L นอกจากนี้การศึกษาลักษณะทางกายภาพพบว่าการใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมช่วยให้ซิลิกามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและเกิดอันตรกิริยากับเมตริกซ์ของยางได้ดีขึ้น

คำสำคัญ ซิลิกา; มาสเตอร์แบท; ยางคลอโรพรีน; ยางผสม

Abstract

Silica is widely used as a reinforcing filler in rubber products. However, inorganic material silica has weak interaction with rubber compound, and tends to be agglomerate during storage. In this work, natural rubber with silica masterbatch was produced and used as based material in natural rubber/chloroprene rubber (NR/CR) blends. The mixing energy and rubber vulcanizate properties were investigated. Results indicate that in comparison with STR 5L blend used silica powder, the blends with 3 different silica masterbatch, i.e. fresh latex (FNRmSi), low viscosity natural rubber used 1.0 phr of hydrogen peroxide (LNR₁mSi) and low viscosity natural rubber used 0.34 phr of hydrogen peroxide and 2.7 phr of potassium persulphate mixture (LNR₂mSi), could reduce the mixing power consumption in all blend ratios. The cure characteristics of FNRmSi, LNR₁mSi and LNR₂mSi blends are similar to those STR 5L blends, whereas the blend with silica masterbatch vulcanizate shows superior mechanical properties and flame resistance. The homogenous distribution and interfacial interaction of silica filler and rubber matrix were enhanced by the self-assembled silica masterbatch, as shown by the fracture surfaces morphology of the vulcanizate using a Scanning Electron Microscope.

Keywords silica; masterbatch; chloroprene rubber; rubber blend

เนื้อหา

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ซิลิกามีการใช้งานในคอมปาวด์ของผลิตภัณฑ์ยาง เช่น อุตสาหกรรมยางล้อ สายพานยาง พื้นรองเท้า เป็นต้น การใช้ซิลิกามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะนอกจากจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีแล้ว ซิลิกายังผลิตจากวัสดุธรรมชาติที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมหลักอีกชนิดหนึ่งผลิตจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ ซิลิกาจึงมีการใช้งานทั้งในคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และยางผสม แต่เนื่องจากซิลิกาก็มีปัญหาการยึดติดกับยางที่ไม่มีขั้ว ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ซิลิกาในยางผสมที่มีสภาพขั้วต่างกันสองชนิด คือ ยางธรรมชาติ และยางคลอโรพรีน โดยให้ซิลิกาเกิดอันตรกิริยาโดยตรงกับยางธรรมชาติในสภาวะน้ำยาง ในรูปยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทเพื่อแก้ปัญหาความเข้ากันได้ของซิลิกากับยางธรรมชาติ แล้วนำมาผสมกับยางคลอโรพรีนซึ่งมีขั้วในระหว่างการคอมปาวด์ยางผสม เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ

การเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทในสภาวะน้ำยาง เป็นแนวทางการพัฒนายางดิบในรูปแบบที่ผสมสารตัวเติมซิลิกาตั้งแต่ก่อนขั้นตอนการจับตัวน้ำยางทำให้ช่วยแก้ปัญหาการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้ว เนื่องจากสามารถเกิดพันธะได้โดยตรงในสภาวะน้ำยาง ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ในยางแห้ง (Peng, *et al.*, 2007; Yanakisawa, *et al.*, 2005) และลดปัญหายากในการผสมซิลิกาในคอมปาวด์ของผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา ที่ทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดสูงแปรรูปได้ยาก และการฟุ้งกระจายของซิลิกาในระหว่างขั้นตอนการผสม (LeBlanc, 2002) นอกจากนี้ น้ำยางที่ได้ปรับให้มีขนาดโมเลกุล 4×10^5 ถึง 5×10^5 และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางคอมปาวด์ (อรสา และคณะ, 2546; Akinlabi, *et al.*, 2006) โดยเทคนิคการใช้สารเคมีเติมลงในน้ำยางสด คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง ก่อนการเติมซิลิกาดีสเปอร์ชันที่กระจายตัวในน้ำ ช่วยให้สามารถลดพลังงานในขั้นตอนการผสมยางทั้งจากพลังงานที่ใช้ในการบดยาง (mastication) และการลดเวลาในการผสมยางคอมปาวด์ ในขั้นตอนการผสมผงซิลิกาในคอมปาวด์ จากการดำเนินโครงการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท สามารถลดพลังงานในการผสมอยู่ในช่วง 20-30% (Artchomphoo and Boonsong, 2013) ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการลดขนาดโมเลกุล นอกจากนี้ความหนืดและขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติความหนืดต่ำที่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผสมกับยางคลอโรพรีนซึ่งมีขนาดโมเลกุลต่ำกว่ายางธรรมชาติ

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติการแปรรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทผสมกับยางคลอโรพรีน

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานยางผสมในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการทั้งในด้านสมบัติเชิงกล สมบัติพิเศษเฉพาะอย่าง ที่ยางเพียงชนิดเดียวไม่สามารถให้ได้ และทั้งต้นทุนคอมปาวด์ของยางสังเคราะห์ซึ่งแพงกว่ายางธรรมชาติ ยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีนเป็นคู่ยางผสมที่มีการศึกษานำมาใช้งานในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมสายพานยางซึ่งต้องการสมบัติเชิงกลสูง และสมบัติต้านทานต่อ

ความร้อนสูง แทนการใช้คอมปาวด์ของยางคลอโรพรีนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากยางทั้งสองชนิดสามารถตกผลึกได้จึงให้สมบัติเชิงกลสูง (Ismail, *et al.*, 2000; Ramesan, *et al.*, 2000; Sae-oui, *et al.*, 2007) โดยซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้ในคอมปาวด์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลสูง เช่นอุตสาหกรรมยางล้อ สายพานยางพื้นรองเท้า เป็นต้น และมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะให้สมบัติเชิงกลที่ดี ผลิตจากวัสดุธรรมชาติที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในขณะที่เขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมหลักอีกชนิดหนึ่งผลิตจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติ ซิลิกาจึงมีการใช้งานทั้งในคอมปาวด์ของยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และยางผสม แต่เนื่องจากซิลิกามักมีปัญหาการยึดติดกับยางที่ไม่มีขั้ว ในยางผสมที่มีสภาพขั้วต่างกันจะทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวของซิลิกา ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ซิลิกาในยางผสมที่มีสภาพขั้วต่างกันสองชนิด คือ ยางธรรมชาติและยางคลอโรพรีน โดยใช้ยางความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท ซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการยึดติดของยางธรรมชาติกับซิลิกา โดยให้ซิลิกาเกิดอันตรกิริยาโดยตรงกับยางธรรมชาติในสถานะน้ำยาง ในรูปยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ซึ่งให้สมบัติเชิงกลสูงกว่าการใช้ในยางแห้ง (Peng, *et al.*, 2007; Yanakisawa, *et al.*, 2005) และลดปัญหายุงยากในการผสมซิลิกาในคอมปาวด์ของผลิตภัณฑ์ยาง ทั้งจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลิกา ที่ทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดสูงแปรรูปได้ยาก และการฟุ้งกระจายของซิลิกาในระหว่างขั้นตอนการผสม (LeBlanc, 2002) แล้วนำมาผสมกับยางคลอโรพรีนซึ่งมีขั้วในระหว่างการคอมปาวด์ยางผสมเพื่อนำยางผสมที่ได้มาประยุกต์ใช้งาน

การเตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทในสถานะน้ำยาง เป็นแนวทางการพัฒนายางดิบในรูปแบบที่ผสมสารตัวเติมซิลิกาตั้งแต่ก่อนขั้นตอนการจับตัวน้ำยางทำให้ช่วยแก้ปัญหาการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขั้ว เนื่องจากสามารถเกิดพันธะได้โดยตรงในสถานะน้ำยาง นอกจากนี้ น้ำยางที่ได้ปรับให้มีขนาดโมเลกุล 4×10^5 ถึง 5×10^5 และความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเตรียมยางคอมปาวด์ (อรสา และคณะ, 2546; Akinlabi, *et al.* 2006) โดยเทคนิคการใช้สารเคมีเติมลงในน้ำยางสด คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง ก่อนการเติมซิลิกาดีสเปอร์ชันที่กระจายตัวในน้ำ ช่วยให้สามารถลดพลังงานในขั้นตอนการผสมยาง ทั้งจากพลังงานที่ใช้ในการบดยาง และการลดเวลาในการผสมยางคอมปาวด์ ในขั้นตอนการผสมผงซิลิกาในคอมปาวด์จากการดำเนินโครงการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสามารถลดพลังงานในการผสมได้ประมาณ 30% และ 20% เมื่อเทียบกับคอมปาวด์ของยางแห้ง STR 5L สำหรับคอมปาวด์ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 2.7 phr และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 phr เป็นสารลดขนาดโมเลกุล ตามลำดับ นอกจากนี้ยังให้สมบัติเชิงกลที่ดียางคอมปาวด์ที่ได้มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่า 23 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดขาดเกิน 700% ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้งานยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทได้กว้างขึ้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษา การนำมาใช้ผสมกับยางคลอโรพรีน ซึ่งเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลสูงและมีขนาดโมเลกุลเหมาะสมกับยางธรรมชาติที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล เพื่อลดความยุ่งยากของขั้นตอนการผสมซิลิกาในคอมปาวด์ยางผสม ช่วยแก้ปัญหาการยึดติดและการกระจายตัวที่ไม่ดีระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติ และช่วยลดพลังงานในขั้นตอนการคอมปาวด์ยางผสม เพื่อให้สามารถขยายการใช้งานสู่อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

4. วิธีการ

4.1 การเตรียมและสมบัติของยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด

1) เตรียมยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด (FNRmSi) ที่ปริมาณซิลิกา 30 40 และ 50 phr ดังนี้ เตรียมน้ำยางสด ทดสอบเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TSC) ของน้ำยางสด เจือจางให้ได้ 30% TSC เติมน้ำกลั่นตามสภาพน้ำยาง ผสมซิลิกาดีสเปอร์ชันที่ได้จากการเตรียมตามสูตรในตารางที่ 1 โดยแปรปริมาณซิลิกาเป็น 30 40 และ 50 phr กวนส่วนผสมเป็นเวลา 30 นาที ด้วยเครื่องกวนผสมเชิงกลความเร็ว 200 รอบต่อนาที จับตัวด้วยกรดอะซิติก 5%wt รีดแผ่นและอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C ทดสอบปริมาณซิลิกาที่เหลือในซีรัม โดยการหาเปอร์เซ็นต์ TSC น้ำซีรัมที่ได้จากการจับตัวน้ำยางซิลิกามาสเตอร์แบท

ตารางที่ 1 สูตรการเตรียม 20% silica Dispersion

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

2) เตรียมยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบท โดยเลือกใช้สารเคมีและสภาวะการทดลองที่ให้อย่างมีขนาดโมเลกุล 4×10^5 ถึง 5×10^5 ความหนืดอยู่ในช่วง 50 ถึง 60 และให้สมบัติเชิงกลสูงและสามารถลดพลังงานในการคอมปาวด์ได้สูงที่สุดจากการศึกษาที่ผ่านมา คือการใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณ 1 phr เวลาทำปฏิกิริยา 12 ชั่วโมง (LNR₁mSi) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.34 phr ร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 2.7 phr เวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง (LNR₂mSi) โดยใช้ยางสด ที่ 30% TSC เติมน้ำกลั่นตามสภาพน้ำยาง เติมน้ำกลั่นขนาดโมเลกุล กวนด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที และบ่มไว้ตามเวลาที่กำหนด เติมน้ำไฮดรอกซิลอะมีนไฮโดรคลอไรด์ปริมาณ 0.4 phr เป็นสารควบคุมความหนืด กวนต่ออีก 30 นาที เติมน้ำซิลิกาดีสเปอร์ชัน จับตัวและอบแห้งตามวิธีการในข้อ 1

4.2 การใช้ยางธรรมชาติความหนืดต่ำซิลิกามาสเตอร์แบทในสูตรยางผสม

เตรียมคอมปาวด์ยางผสม ตามสูตรในตารางที่ 2 ทดสอบสมบัติของยางคอมปาวด์และยางวัลคาไนซ์ เปรียบเทียบกับคอมปาวด์ของยางผสมจากยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดที่ไม่ลดขนาดโมเลกุล และจากยางแห้งที่ใช้ซิลิกาผง ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ขนาด 0.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80°C ความเร็วรอบโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที บันทึกเวลา พลังงานในการผสม และอุณหภูมิของยางคอมปาวด์ ทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 150 °C ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-07 อัดเข้าเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล ด้านความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM D 2240 มอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง และความสามารถในการยืดขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 412 ความทนทานต่อการฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D 624 และความทนทานการติดไฟ UL 94 Vertical testing ทดสอบสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของซิลิกาในยางผสม ด้วยเครื่อง SEM

ตารางที่ 2 สูตรคอมปาวด์อย่างผสม

Ingredient	Quantity of Ingredient (phr)
NRmSi*	100/30, 100/40, 100/50
CR	75, 50, 25
Zinc oxide	5.00
Stearic acid	1.50
6PPD	1.50
TBBS	0.80
DPG	0.25
ETU	0.30
MgO	4.00
Sulphur	2.00
DEG	6% by wt of Silica
Silane	9% by wt of Silica

หมายเหตุ NRmSi* หมายถึง ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีซิลิกา 30, 40, 50 phr ใช้ในปริมาณเทียบเท่ายางธรรมชาติ 25, 50 และ 75 phr

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

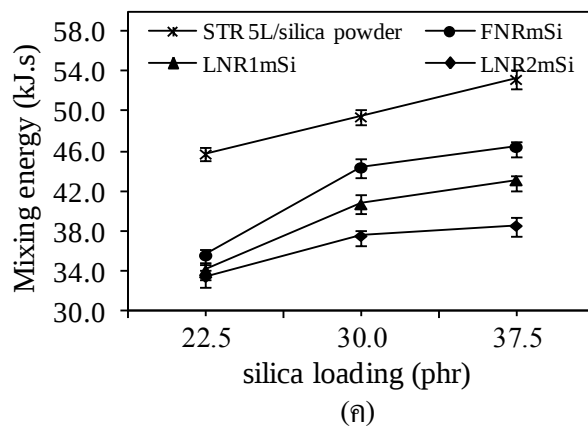
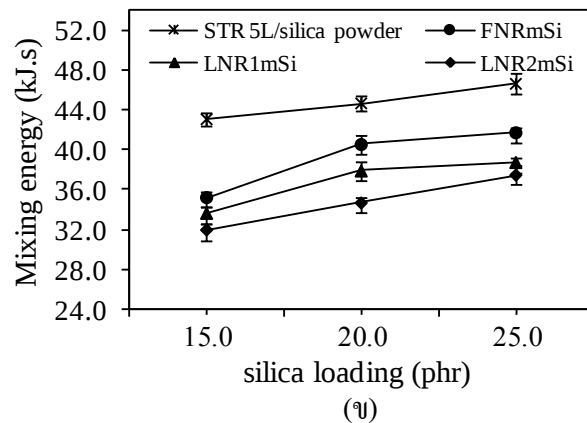
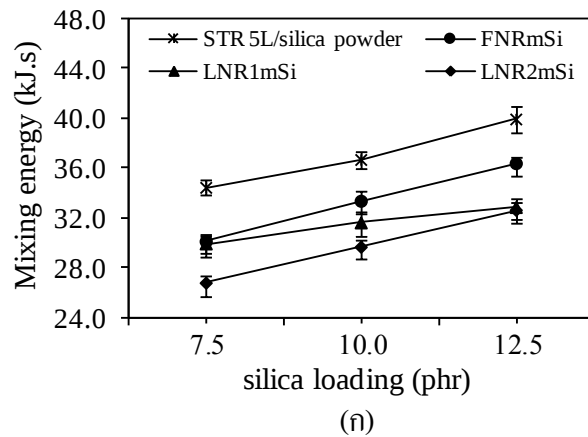
5.1 สมบัติการแปรรูปยางผสม

5.1.1 พลังงานในการผสม

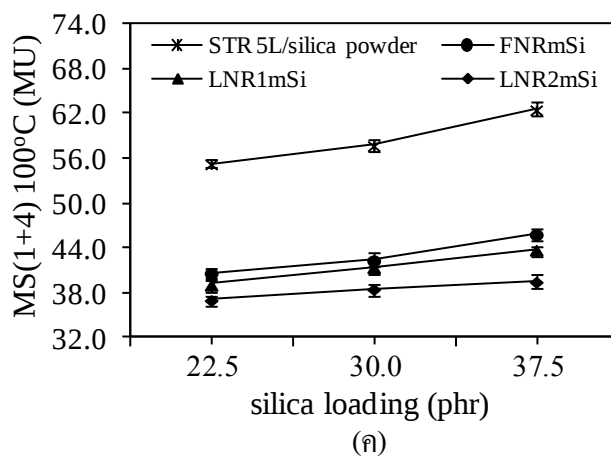
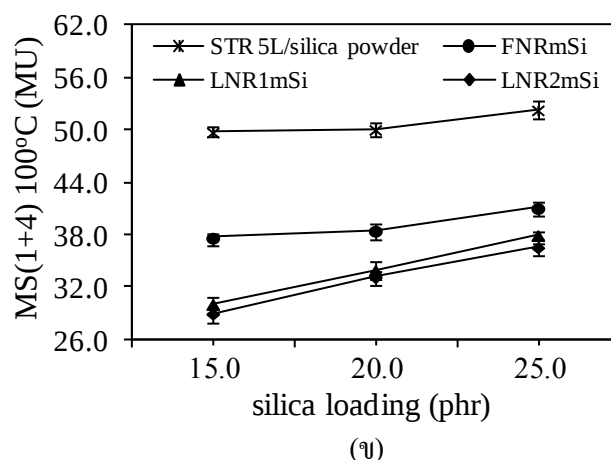
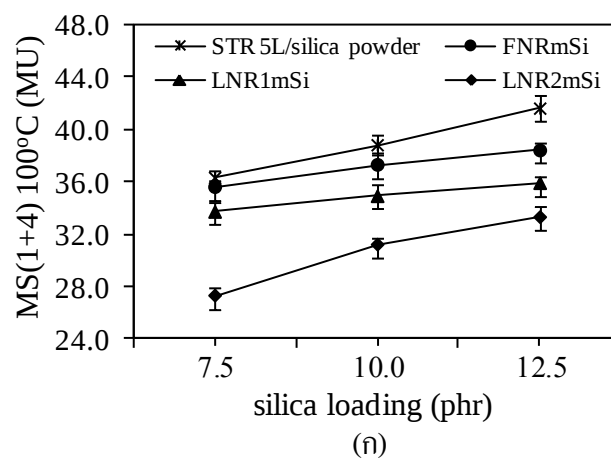
การผสมยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 30 40 และ 50 phr กับยางคลอโรพรีนที่สัดส่วน 25/75 50/50 และ 75/25 สามารถใช้เครื่องผสมแบบปิดด้วยเทคนิคการผสมเช่นเดียวกับการผสมยางโดยทั่วไป ให้อุณหภูมิเนื้อยางที่ได้จากคอมปาวด์มีค่าอยู่ในช่วง 90-110°C โดยอุณหภูมิของเนื้อยางจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น พลังงานในการผสมดังภาพที่ 1 พบว่าในการผสมยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากัน คอมปาวด์ที่ใช้ยางซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 30 phr จะให้พลังงานในการผสมต่ำที่สุด รองลงมาเป็นยางผสมของยางซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีปริมาณซิลิกา 40 และ 50 phr ตามลำดับ เหมือนกันทั้งกรณีการใช้ยางซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสด FNRmSi และน้ำยางสดที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล LNR₁mSi และ LNR₂mSi ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณซิลิกาในยางซิลิกามาสเตอร์แบทเป็นการเพิ่มสัดส่วนของแข็งรวมในยางคอมปาวด์ทำให้เกิดการขัดขวางการไหลของยางทำให้ยางมีความหนืดและพลังงานการผสมเพิ่มขึ้น

การเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเป็น 50/50 และ 75/25 ทำให้พลังงานการผสมเพิ่มขึ้นเนื่องจากทำให้ซิลิกาในคอมปาวด์เพิ่มขึ้นและยางธรรมชาติมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้พลังงานในการผสมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยของสัดส่วนซิลิกาในคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มพลังงานการผสมมากกว่าการเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติในยางผสม นอกจากนี้การใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบททั้ง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ใช้พลังงานในการผสมน้อยกว่าคอมปาวด์ยางผสมจากยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผงในทุกสัดส่วนการผสม โดยที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเป็น 75/25 หรือปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์เท่ากับ 37.5 phr สามารถลดพลังงานในการผสมได้สูงสุดเท่ากับ 37.95% สำหรับคอมปาวด์ของยางผสมที่ใช้ LNR₂mSi และการใช้ LNR₁mSi และ FNRmSi สามารถลดพลังงานได้ 34.12 และ 28.48% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเตรียมในรูปซิลิกามาสเตอร์แบททำให้ซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีกว่า

ตั้งแต่ขั้นตอนการกระจายตัวของซิลิกาดีสเปอร์ชันในน้ำยาง การเกิดพันธะระหว่างอนุภาคของซิลิกาจึงลดลง นอกจากนี้ยังสามารถลดขั้นตอนในการผสมซิลิกาในคอมปาวด์ยาง ทำให้การผสมคอมปาวด์ใช้เวลาในการผสมน้อยและใช้พลังงานน้อยลง (Ansarifar, *et al.*, 2005) และ LNR₂mSi และ LNR₁mSi ให้พลังงานการผสมต่ำกว่ายางซิลิกามาสเตอร์แบทที่ไม่ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล FNRmSi เนื่องจากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลงยางจะมีความหนืดต่ำลงพลังงานที่ต้องใช้ในการบดผสมจึงลดลง



ภาพที่ 1 พลังงานการผสมยางคอมปาวด์ยางผสมที่ใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วน NR/CR ต่างกัน (ก) 25/75 (ข) 50/50 (ค) 75/25



ภาพที่ 2 ความหนืดยางคอมปาวด์ยางผสมที่ใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วน NR/CR ต่างกัน (ก) 25/75 (ข) 50/50 (ค) 75/25

5.1.2 ความหนืดคอมปาวด์

สมบัติด้านความหนืดสอดคล้องกับพลังงานการผสม พบว่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยางธรรมชาติและซิลิกาในคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 2 ทำให้คอมปาวด์ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 ให้ความหนืดสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มปริมาณซิลิกากับการเพิ่มสัดส่วนยางธรรมชาติในยางผสม พบว่าการเพิ่มสัดส่วนยางธรรมชาติมีผลต่อการเพิ่มความหนืดของคอมปาวด์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีขนาดโมเลกุลใหญ่และความหนืดสูง เมื่อสัดส่วนมากขึ้นทำให้ยางผสมที่ได้มีความหนืดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเตรียมยางธรรมชาติในรูปซิลิกามาสเตอร์แบทสามารถลดความหนืดของคอมปาวด์จากการเกิดพันธะระหว่างอนุภาคซิลิกาได้เนื่องจากซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีกว่าในขั้นตอนการกระจายตัวในน้ำยาง ในทำนองเดียวกันการลดขนาดโมเลกุลทำให้ความหนืดของยางธรรมชาติเริ่มต้นลดลง ส่งผลให้คอมปาวด์ของยางที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทและยางธรรมชาติที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุลทั้ง FNR_mSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi มีความหนืดลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกาผงในยางผสมของยาง STR 5L

5.2 สมบัติการวัลคาไนซ์

สมบัติการวัลคาไนซ์ยางผสมดังตารางที่ 3 พบว่าเมื่อสัดส่วนของยางคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้นทำให้ยางผสมมีค่า scorch time และ cure time เพิ่มขึ้น และอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ลดลง ตามสัดส่วนของยางคลอโรพรีนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยางคลอโรพรีนมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์น้อยกว่ายางธรรมชาติ เพราะมีพันธะคู่ที่ว่องไวน้อยกว่ายางธรรมชาติ นอกจากนี้ส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยางในยางธรรมชาติยังสามารถเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ได้ด้วย การเพิ่มสัดส่วนยางคลอโรพรีนจึงทำให้ยางผสมมีอัตราการวัลคาไนซ์ช้าลง ให้ผลในทำนองเดียวกันกับการศึกษาของ Ismail และคณะ (2000) นอกจากนี้ที่สัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมเท่ากัน การเพิ่มปริมาณซิลิกาทั้งการใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบททำให้ค่า scorch time และ cure time เพิ่มขึ้น และอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) ลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวซึ่งสามารถดูดซับตัวเร่งได้ ทำให้ปริมาณสารตัวเร่งในยางลดลงระยะเวลาในการวัลคาไนซ์จึงเพิ่มขึ้น (Goerl, *et al.*, 1997) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปัจจัยของสัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมกับปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนยางธรรมชาติในยางผสมที่เพิ่มขึ้น พบว่าปัจจัยของสัดส่วนยางคลอโรพรีนมีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ยางมากกว่าปริมาณซิลิกามาก ทำให้ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีน เท่ากับ 25/75 ให้ค่า scorch time และ cure time มากที่สุด และยางผสมมีอัตราการวัลคาไนซ์ต่ำกว่าที่สัดส่วน 50/50 และ 75/25 ซึ่งมีซิลิกาในปริมาณสูงกว่า และเนื่องจากปัจจัยของสัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมมีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ยางผสมมากกว่าประสิทธิภาพการกระจายตัวของซิลิกาในยางผสม ทำให้การใช้ซิลิกาในรูปผงกับซิลิกามาสเตอร์แบททั้งในยาง FNR_mSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้สมบัติการวัลคาไนซ์ทั้ง scorch time, cure time และ CRI ใกล้เคียงกัน

ค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้น (MH-ML) มีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนยางธรรมชาติในยางผสมและปริมาณซิลิกาในยางผสมที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสัดส่วนยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นยางผสมสามารถเกิดพันธะการเชื่อมโยงได้เพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้ซิลิกาขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่โมเลกุลของยางค่าแรงบิดจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมของ FNR_mSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi มีค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีกว่าทำให้เกิดการเสริมแรงมากขึ้น

ตารางที่ 3 สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ที่แปรรูปส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีน

NR/CR ratios		Cure Characteristics			
type of silica	Silica (phr)	Scorch time (min)	Cure time (min)	M _H - M _L (lb.in)	CRI (s ⁻¹)
25/75	NRpSi	7.5	1.67	11.73	17.71
		10.0	1.71	14.54	18.09
		12.5	1.74	15.47	19.28
	FNRmSi	7.5	1.74	11.73	20.80
		10.0	1.75	14.55	21.25
		12.5	1.75	14.68	22.00
	LNR1mSi	7.5	1.90	16.51	21.78
		10.0	1.93	16.81	22.77
		12.5	1.95	17.46	23.62
50/50	LNR2mSi	7.5	1.88	15.84	20.75
		10.0	1.91	15.98	21.36
		12.5	1.96	16.84	23.10
	NRpSi	15.0	1.52	10.64	18.22
		20.0	1.54	12.63	19.91
		25.0	1.55	13.61	21.36
	FNRmSi	15.0	1.55	10.52	22.24
		20.0	1.57	12.67	24.10
		25.0	1.58	13.49	24.63
	LNR1mSi	15.0	1.51	9.69	22.20
		20.0	1.52	11.45	22.97
		25.0	1.55	12.64	23.40
	LNR2mSi	15.0	1.50	10.71	21.16
		20.0	1.51	11.43	22.75
		25.0	1.52	12.65	23.94
75/25	NRpSi	22.5	1.42	8.69	22.43
		30.0	1.44	10.59	22.50
		37.5	1.47	12.76	22.59
	FNRmSi	22.5	1.43	8.69	23.81
		30.0	1.44	9.75	25.48
		37.5	1.48	11.60	26.32
	LNR1mSi	22.5	1.43	10.42	22.67
		30.0	1.50	11.85	24.99
		37.5	1.54	12.56	25.34
	LNR2mSi	22.5	1.37	10.93	23.38
		30.0	1.43	11.81	25.09
		37.5	1.47	12.61	26.05

5.3 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติความแข็งแรง มอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ของยางวัลคาไนซ์ดังตารางที่ 4 พบว่าความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น โดยให้ผลในการทำงานเดียวกันทั้งการใช้ซิลิกาในรูปซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบท เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีอนุภาคเล็กการเพิ่มปริมาณซิลิกาจึงทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ปริมาณซิลิกาใกล้เคียงกันผลของสัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมมีผลต่อสมบัติความแข็งแรง พบว่าที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 25/75 ให้ความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์สูงกว่าที่สัดส่วน 50/50 ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีพันธะการเชื่อมโยงเกิดขึ้นในยางคลอโรพรีนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกากับคลอรีนอะตอมในยางคลอโรพรีน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในเฟสยางคลอโรพรีนเพิ่มมากขึ้น ยางผสมที่มีสัดส่วนของยางคลอโรพรีนมากจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ให้ผลในการทำงานเกี่ยวกับการศึกษาของ Sae-oui และคณะ (2007)

สมบัติมอดูลัสที่ 300% ให้ผลในการทำงานกับความแข็งแรงของยางวัลคาไนซ์ คือในสัดส่วนของยางผสมระหว่างยางคลอโรพรีนและยางธรรมชาติเท่ากัน การใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทให้มอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง การเพิ่มซิลิกาช่วยให้อายุการใช้งานแข็งแรง (stiffness) มากขึ้นและมีโอกาสเกิดโครงข่ายระหว่างอนุภาคของซิลิกายางวัลคาไนซ์จึงมีมอดูลัสและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในคอมปาวด์ที่มีสัดส่วนยางคลอโรพรีนมากกว่ายางธรรมชาติ ยางคลอโรพรีนจะเป็นเฟสต่อเนื่องในยางผสมและมีโอกาสเกิดพันธะการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกากับคลอรีนอะตอมในยางคลอโรพรีน ดังได้กล่าวมาแล้ว จึงมีผลทำให้ยางผสมที่ได้มีมอดูลัสสูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทในทุกสัดส่วนของยางผสม พบว่าการใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทให้มอดูลัสสูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นในเฟสยางธรรมชาติของซิลิกาทำให้เกิดการเสริมแรงได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการลดขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติมีผลให้ความแข็งแรงเริ่มต้นซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของยางมีค่าลดลง ค่ามอดูลัสของยางผสมที่ใช้ FNRmSi จึงมีค่าสูงกว่าในยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล ทั้ง LNR₁mSi และ LNR₂mSi เล็กน้อย

ความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาในสัดส่วนของยางผสมที่เพิ่มขึ้น โดยที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 25/75 ซิลิกาในคอมปาวด์ที่มีปริมาณน้อยสามารถกระจายตัวในยางได้ดี การเพิ่มซิลิกาจึงเป็นการเพิ่มสารตัวเติมเสริมแรงในยางผสม การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทจึงมีผลให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมที่ใช้ FNRmSi เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนในยางผสมของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ค่าไม่แตกต่างจากการใช้งานในรูปซิลิกาผง แต่เมื่อสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น การเสริมแรงของซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทมีความแตกต่างกัน คอมปาวด์ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้ง FNRmSi, LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผง ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาที่เพิ่มมากขึ้นมีการกระจายตัวในเฟสยางทั้งสองไม่เท่ากัน หมู่ไฮดรอกซิลของซิลิกามีแนวโน้มเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนอะตอมในยางคลอโรพรีนทำให้เกิดการกระจายตัวในยางคลอโรพรีนได้ดีกว่าในยางธรรมชาติ ส่วนในเฟสยางธรรมชาติปริมาณซิลิกาที่มากขึ้นมีแนวโน้มเกิดพันธะระหว่างอนุภาคซิลิกาด้วยกันเอง ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนแอกกรีเกตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางน้อยลง ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเจนจากการใช้ซิลิกาผงที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 ความทนทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาในยางผสมมากกว่า 30 phr

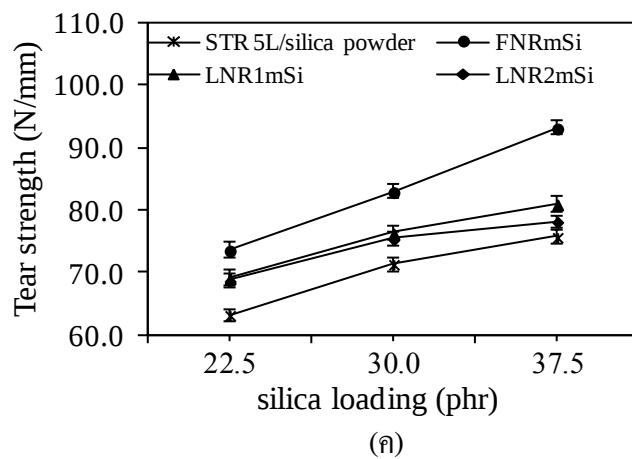
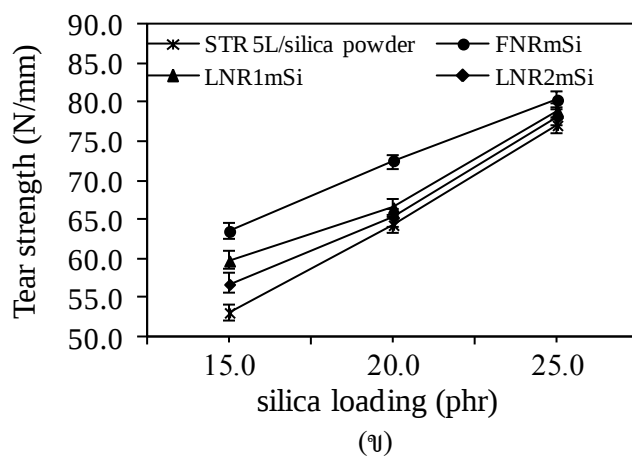
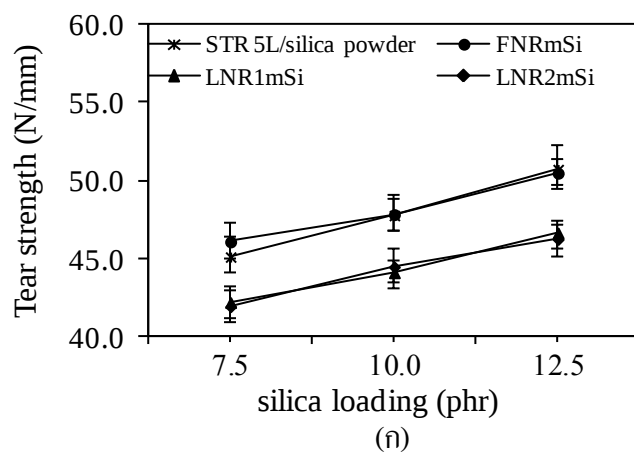
ตารางที่ 4 ความแข็งและสมบัติด้านการดึงของยางวัลคาไนซ์ที่แปรสัณฐานอย่างธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีน

NR/CR ratios		Mechanical Properties				
type of silica	Silica	Hardness	300% Mod.	TS.	EB.	
	(phr)	(Shore A)	(MPa)	(MPa)	(%)	
25/75	7.5	51.0	2.18	24.58	780	
	NRpSi	10.0	53.5	2.73	25.13	732
		12.5	56.0	4.19	25.51	676
	7.5	52.6	2.84	25.03	756	
	FNRmSi	10.0	54.0	3.00	26.09	740
		12.5	57.5	4.70	26.49	700
	7.5	50.0	2.43	24.49	748	
	LNR1mSi	10.0	53.0	2.87	25.00	708
		12.5	55.0	4.36	25.85	700
	7.5	53.0	2.43	24.07	770	
	LNR2mSi	10.0	55.0	3.10	24.85	724
		12.5	56.0	4.51	25.65	700
50/50	15.0	52.0	3.53	24.50	714	
	NRpSi	20.0	56.0	3.68	25.60	644
		25.0	59.0	5.53	26.30	628
	15.0	52.5	4.07	26.20	740	
	FNRmSi	20.0	55.0	4.83	27.18	660
		25.0	57.5	5.79	29.58	640
	15.0	51.0	4.14	25.42	702	
	LNR1mSi	20.0	53.0	4.35	27.48	650
		25.0	58.0	5.56	28.18	644
	15.0	50.5	3.96	26.09	705	
	LNR2mSi	20.0	54.0	4.22	27.31	694
		25.0	58.0	5.34	28.03	660
75/25	22.5	56.0	3.62	24.35	700	
	NRpSi	30.0	59.0	4.69	23.92	673
		37.5	62.0	5.32	20.79	625
	22.5	56.0	3.82	26.88	735	
	FNRmSi	30.0	60.0	4.85	27.30	669
		37.5	63.0	5.67	28.88	660
	22.5	56.5	3.84	26.19	724	
	LNR1mSi	30.0	61.0	4.96	26.55	620
		37.5	64.0	5.73	26.97	604
	22.5	57.0	4.01	26.67	682	
	LNR2mSi	30.0	59.2	4.79	27.78	660
		37.5	63.1	5.42	27.69	657

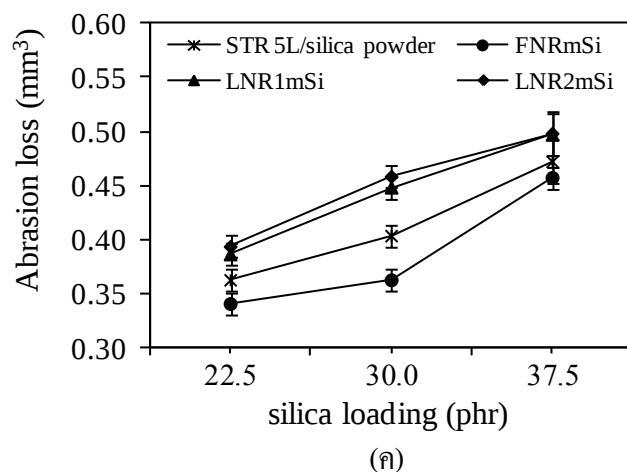
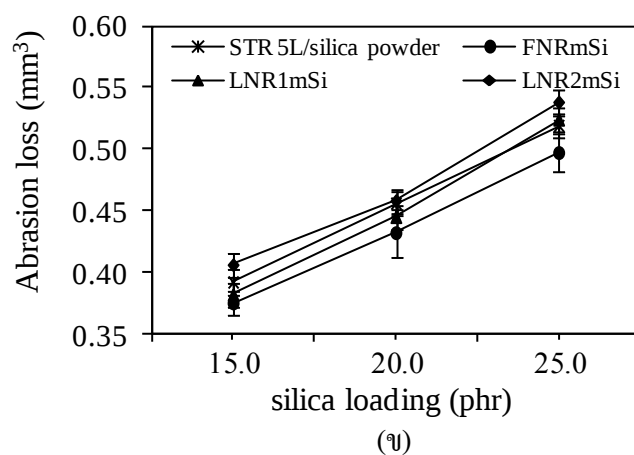
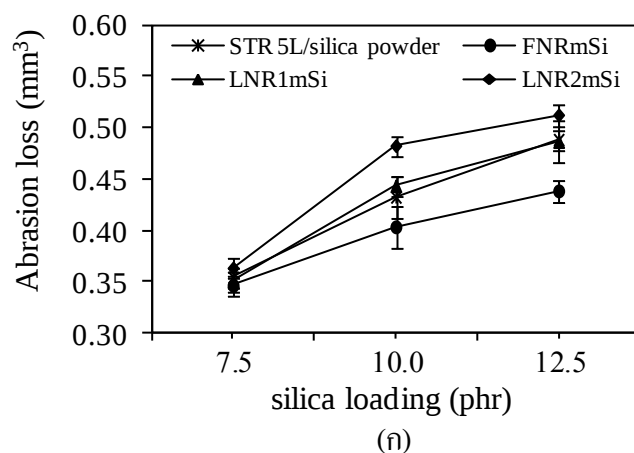
อย่างไรก็ตามการเสริมแรงด้วยซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในยางธรรมชาติที่ดีกว่าตั้งแต่ขณะอยู่ในสภาวะน้ำยาง ทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาเพิ่มขึ้น ให้ความทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณซิลิกา 37.5 phr ซึ่งเป็นปริมาณซิลิกาสูงสุดที่ศึกษา และคอมปาวด์ของ FNRmSi ให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมปาวด์ของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi เล็กน้อย เนื่องจาก FNRmSi เตรียมจากน้ำยางสดที่ไม่ได้ผ่านการลดน้ำหนักโมเลกุล ความแข็งแรงเริ่มต้นซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของยางจึงมีค่าสูงกว่าในยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล ทั้ง LNR₁mSi และ LNR₂mSi แต่เนื่องจากการเพิ่มปริมาณซิลิกาในยางผสมทำให้สัดส่วนของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทต่อยางคลอโรพรีนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นชนิดของยางที่เป็นเฟสต่อเนื่องซึ่งให้ความแข็งแรงหลักกับยางผสมจะเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทต่อยางคลอโรพรีน กล่าวคือที่สัดส่วน 25/75 ความแข็งแรงของยางผสมจะขึ้นอยู่กับเฟสต่อเนื่องที่เป็นยางคลอโรพรีน ขณะที่ในสัดส่วน 75/25 ยางธรรมชาติซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มากกว่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของยางผสมมากกว่ายางคลอโรพรีน และยางคลอโรพรีนซึ่งเป็นเฟสที่กระจายตัวอาจเกิดการขัดขวางการตกผลึกของยางธรรมชาติ ให้ความแข็งแรงของยางผสมลดลง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณซิลิกามาสเตอร์แบทที่มีการกระจายตัวที่ดีกว่าแม้จะทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้มีผลให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นจากยางผสมที่สัดส่วนยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50

ความสามารถในการยืดขาดของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มซิลิกาทำให้ยางวัลคาไนซ์มีการยืดหยุ่นน้อยลงเนื่องจากซิลิกาไปขัดขวางการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลของยาง นอกจากนี้เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น เกิดการจับตัวเป็นก้อนของซิลิกาและการเกิดอันตรกิริยาของซิลิกากับยางลดลง ยางจึงมีความแข็งแรงต่ำและความสามารถในการยืดขาดลดลง

สมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ดังภาพที่ 3 พบว่าความทนทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคทรงกลมของซิลิกาสามารถยึดเกาะกับสายโซ่โมเลกุลของยางในลักษณะสามมิติได้ในระดับนาโนเมตร (Liu, *et al.*, 2008) ทำให้ยางมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในยางผสมที่มีสารตัวเติมซิลิกาปริมาณน้อยในสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 25/75 ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของยางเริ่มต้น ในยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล ทั้ง LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทจากน้ำยางสดที่ไม่ลดขนาดโมเลกุล และยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผง (ภาพที่ 3 ก) ในขณะที่เมื่อปริมาณซิลิกาในยางผสมเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกา การใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทซึ่งให้การกระจายตัวที่ดีกว่าจึงให้ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์สูงกว่าการใช้ซิลิกาผงในยางผสมของยางแท่ง STR 5L โดยยางผสมของ FNRmSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด รองลงมาเป็นยางผสมของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi ตามลำดับ เหมือนกันทั้งที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50 และ 75/25



ภาพที่ 3 ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทที่ สัดส่วน NR/CR ต่างกัน (ก) 25/75 (ข) 50/50 (ค) 75/25



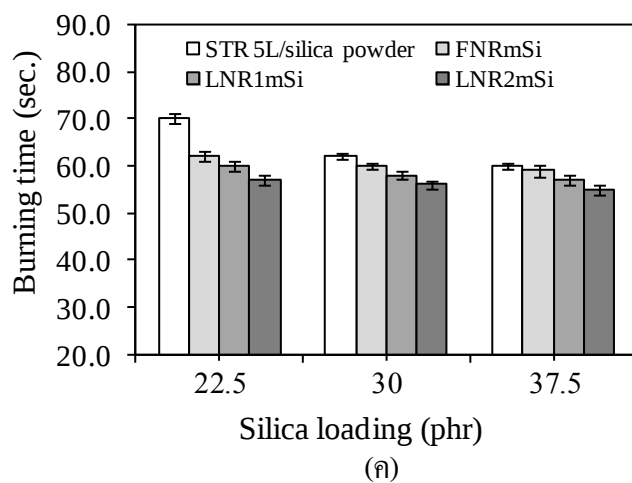
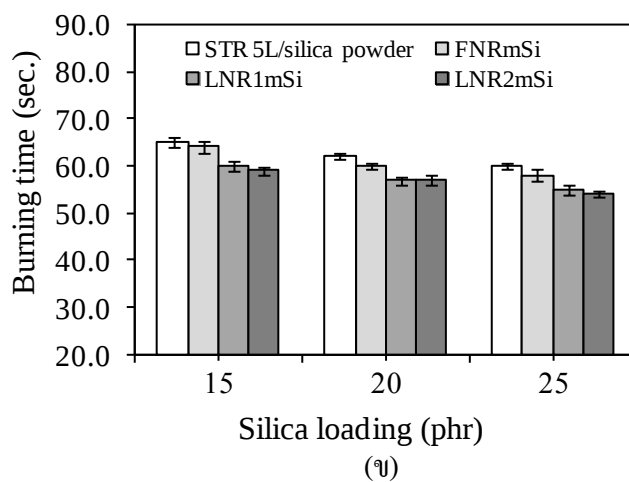
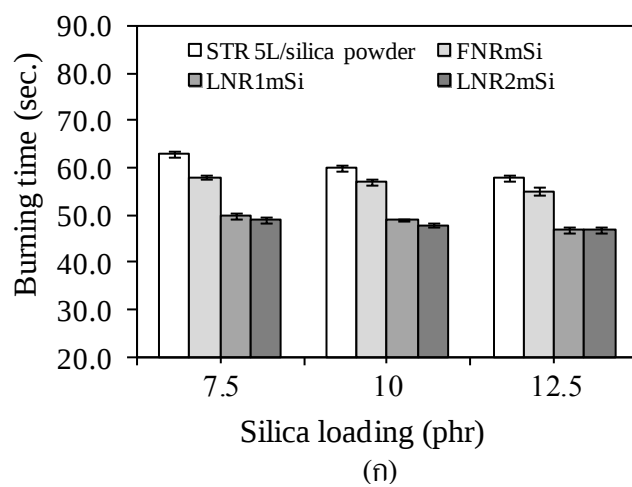
ภาพที่ 4 การสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วน NR/CR ต่างกัน
(ก) 25/75 (ข) 50/50 (ค) 75/25

ยางวัลคาไนซ์ทนต่อการสึกหรอลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาในยางผสมเพิ่มขึ้น เหมือนกันทั้งกรณีการใช้งานสารตัวเติมในรูปซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบท เนื่องจากการเพิ่มซิลิกาเป็นการเพิ่มสัดส่วนของแข็งรวมในยางคอมปาวด์ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยางผสมมีความยืดหยุ่นน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณซิลิกาก็ทำให้อนุภาคของซิลิกาในยางผสมสามารถเกิดโครงข่ายระหว่างอนุภาคซิลิกา

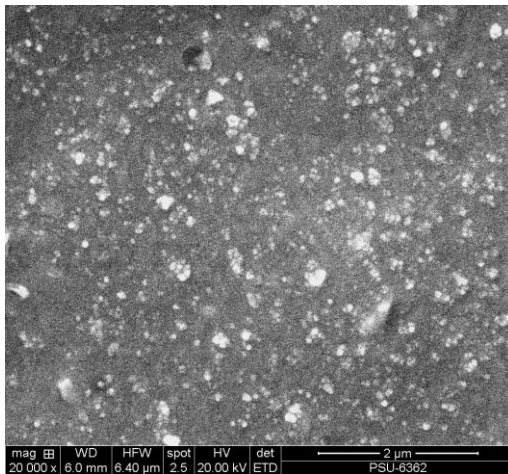
ตัวกันเอง และเกิดพันธะการเชื่อมโยงกับอะตอมของคลอรีนในยางคลอโรพรีนมากขึ้น ยางผสมจึงมีมอดุลัสสูงขึ้นและยืดหยุ่นได้น้อยลง จึงเกิดการสึกหรอได้ง่ายขึ้น และเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้นทำให้เนื้อยางไม่เพียงพอที่จะหุ้มรอบอนุภาคของซิลิกา จึงเกิดการจับตัวของก้อนแอกกรีเกตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดเป็นจุดอ่อนแอในเฟสยางผสมทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความแข็งแรงต่ำและทนการสึกหรอได้น้อยลง ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 25/75 ซึ่งปริมาณซิลิกาในยางผสมไม่เกิน 12.5 phr การสึกหรอจะขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของยางเริ่มต้น ในยางผสมของ FNRmSi เนื่องจากการกระจายตัวของ ซิลิกาที่ดีและเตรียมจากน้ำยางสดที่ไม่ได้ผ่านการลดขนาดโมเลกุลจึงให้ความแข็งแรงของยางเริ่มต้นสูงกว่า ในยางผสมของ LNR1mSi และ LNR2mSi จึงให้สมบัติการทนต่อการสึกหรอสูงที่สุด และยางผสมของ LNR2mSi มีการสึกหรอมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้งานซิลิกาในรูปแบบสเตอร์แบทที่มีการกระจายตัวของซิลิกาที่ดีกว่าการใช้ในรูปแบบซิลิกาผงทำให้ที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50 ซึ่งใช้ซิลิกาในปริมาณ 15 – 25 phr ยางผสมมีการสึกหรอไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ในสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 สัดส่วนของยางธรรมชาติที่มากกว่าทำให้ยางผสมมีเฟสต่อเนื่องเป็นยางธรรมชาติที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางคลอโรพรีนเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณซิลิกาใกล้เคียงกัน ยางผสมที่สัดส่วนนี้จึงมีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่าที่สัดส่วน 50/50 และยางผสมของ FNRmSi ซึ่งมีการกระจายตัวที่ดีกว่าและเฟสยางธรรมชาติมีความแข็งแรงกว่าสามารถทนการสึกหรอได้สูงที่สุด ในขณะที่ยางผสมของ LNR1mSi และ LNR2mSi แม้จะมีการกระจายตัวของซิลิกาที่ดีกว่าแต่เฟสยางธรรมชาติซึ่งให้ความแข็งแรงกับยางผสมมีความแข็งแรงน้อยกว่ายาง STR 5 L ทำให้ยางผสมของยางซิลิกามาสเตอร์แบททั้งสองชนิดที่ลดขนาดโมเลกุลทั้งสองชนิดทนการสึกหรอได้น้อยกว่ายาง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผง

5.4 สมบัติการทนไฟ

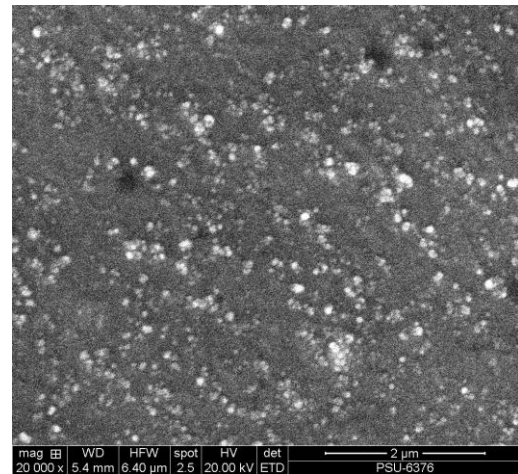
ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและคลอโรพรีนทั้งสามสัดส่วนที่ศึกษาสามารถทนไฟได้ โดยไฟจะดับภายในเวลาไม่เกิน 70 วินาที พบว่าทั้งสัดส่วนของยางคลอโรพรีนในยางผสมและซิลิกามีผลต่อสมบัติการทนไฟ ยางผสมที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 25/75 สามารถทนไฟได้ดีที่สุด แต่สมบัติการทนไฟของยางผสมไม่เป็นไปตามกฎการผสม เนื่องจากที่สัดส่วนยางผสม 50/50 และ 75/25 ให้สมบัติการทนไฟใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากที่สัดส่วน 25/75 เฟสต่อเนื่องของยางผสมเป็นยางคลอโรพรีนที่ทนไฟ แต่ที่สัดส่วน 50/50 และ 75/25 เฟสของยางธรรมชาติมากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของยางผสมจากยางคลอโรพรีนเป็นยางธรรมชาติจึงทนไฟได้น้อยลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณซิลิกาในสัดส่วนยางผสมเท่ากันสามารถให้สมบัติการทนไฟดีขึ้น และการใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทที่ให้ซิลิกากระจายตัวได้ดีกว่าช่วยให้ยางผสมของ FNRmSi LNR1mSi และ LNR2mSi มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและทนไฟได้สูงขึ้นในทุกสัดส่วนของยางผสม



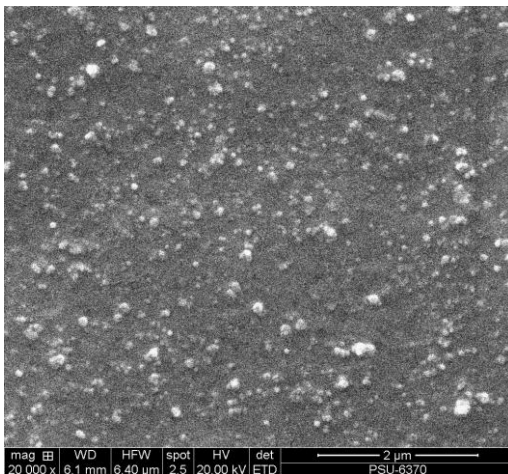
ภาพที่ 5 สมบัติการทนไฟของยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิลิกาผงและซิลิกามาสเตอร์แบทที่สัดส่วน NR/CR ต่างกัน
(ก) 25/75 (ข) 50/50 (ค) 75/25



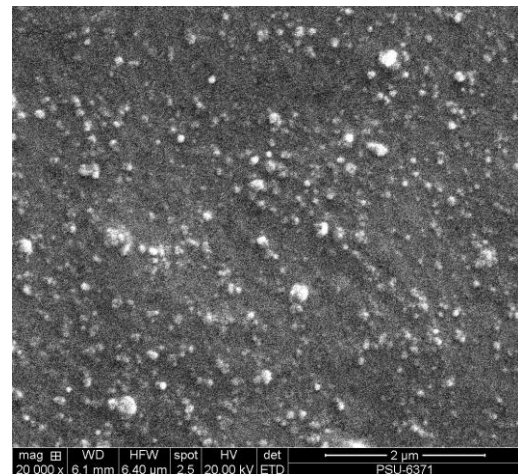
NRpSi 25 phr



FNRmSi 25 phr



LNR1mSi 25 phr



LNR2mSi 25 phr

ภาพที่ 6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของซิลิกาในยางวัลคาไนซ์ที่ใช้ซิลิกาผงเปรียบเทียบกับซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมที่ สัตส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50

5.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของซิลิกา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมที่สัตส่วนยางธรรมชาติต่อ ยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50 ซึ่งมีปริมาณซิลิกา 25 phr พบว่าการใช้ซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบทในน้ำยาง ทั้ง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ซิลิกามีการกระจายตัวในยางวัลคาไนซ์ได้ดีกว่าการใช้ซิลิกา แบบผงในยางผสมของยาง STR 5L ตามปกติ โดยไม่เห็นช่องว่างระหว่างอนุภาคซิลิกากับเฟสของยางผสม ลักษณะเนื้อยางสามารถห่อหุ้มอนุภาคซิลิกาและเกิดอันตรกิริยาระหว่างผิวซิลิกากับยางได้ดีกว่า ซึ่งจะ สังเกตได้จากลักษณะอนุภาคซิลิกาฝังอยู่ในเนื้อยาง มีส่วนที่เกิดการรวมตัวเป็นก้อนแฉกเกิดปริมาณน้อย และขนาดเล็กไม่เกิน 250 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าอนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวและเกิดอันตรกิริยากับ เฟสยางธรรมชาติตั้งแต่นั้นตอนการเตรียมมาสเตอร์แบทในสภาวะน้ำยาง ดังนั้นจึงสามารถให้ซิลิกาเกิดการ กระจายได้ดีกว่าการใช้ในรูปซิลิกาผงแม้เวลาในการผสมยางคอมปาวด์น้อยกว่า ในขณะที่การใช้ซิลิกาผง

ตามปกติจะให้ก้อนแอกกรีเกตขนาดใหญ่ขึ้นและมีปริมาณมากกว่า จากการศึกษาของ Ansarifar (2006) พบว่าที่เวลาในการผสม 4 นาที การใช้ซิลิกาผงที่ปริมาณ 10 phr ให้อนุภาคซิลิกาเกาะกลุ่มเป็นก้อนแอกกรีเกตขนาดใหญ่มากประมาณ 40 ไมโครเมตร และเนื่องจากสมบัติของยางวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในยาง (Li, *et al.*, 2006) ดังนั้นจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของการใช้ซิลิกาในรูปแบบมาสเตอร์แบทให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งพบว่าการใช้ซิลิกาในรูปแบบมาสเตอร์แบทให้ซิลิกาเกิดการเสริมแรงได้ดีกว่า ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกล ทั้งมอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และการทนไฟ สูงกว่าการใช้งานในรูปแบบซิลิกาผงในยางผสมของยาง STR 5L

6. สรุปผลการวิจัย

การใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนสามารถใช้เทคนิคการผสมแบบเดียวกับยางผสมโดยทั่วไป ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทที่ปริมาณ 30 phr ให้พลังงานการผสมต่ำที่สุด และยางผสมที่ใช้ยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบททั้ง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ใช้พลังงานในการผสมน้อยกว่ายางผสมจากยางแท่ง STR 5L ที่ใช้ซิลิกาผงในทุกขั้นตอนการผสม โดยที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเป็น 75/25 หรือปริมาณซิลิกาในคอมปาวด์เท่ากับ 37.5 phr ยางผสมมีความหนืดสูงที่สุด และสามารถลดพลังงานในการผสมได้สูงสุดเท่ากับ 37.95% สำหรับคอมปาวด์ของยางผสมที่ใช้ LNR₂mSi และการใช้ LNR₁mSi และ FNRmSi สามารถลดพลังงานได้ 34.12 และ 28.48% ตามลำดับ ยางผสมมี scorch time และ cure time เพิ่มขึ้น ตามปริมาณซิลิกาและสัดส่วนของยางคลอโรพรีนที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของยางคลอโรพรีนมีผลให้ค่า scorch time และ cure time เพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณซิลิกา และการใช้ซิลิกาในรูปแบบกับซิลิกามาสเตอร์แบททั้งในยาง FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้สมบัติการวัลคาไนซ์ทั้ง scorch time, cure time และ CRI ใกล้เคียงกัน แต่การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทให้ยางผสมมีค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ความแข็ง มอดูลัสที่ 300% เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และสัดส่วนยางคลอโรพรีนในยางผสมที่เพิ่มขึ้น การใช้ซิลิกาในรูปแบบมาสเตอร์แบทในทุกสัดส่วนของยางผสมให้มอดูลัสสูงขึ้นเล็กน้อย และคอมปาวด์ยางผสมที่ใช้ซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้ง FNRmSi, LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางผสมที่ใช้ซิลิกาผง โดยให้ค่าสูงสุดที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 75/25 ปริมาณซิลิกา 37.5 phr และยางผสมของ FNRmSi ให้ความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าคอมปาวด์ของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi เล็กน้อย ความสามารถในการยืดขาดของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น ที่ซิลิกาปริมาณน้อยความทนทานต่อการฉีกขาดและการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของยางเริ่มต้น แต่ที่ปริมาณซิลิกาในยางผสมเพิ่มมากขึ้น การกระจายตัวของซิลิกาในยางผสมมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกา การใช้ซิลิกาในรูปแบบมาสเตอร์แบทให้ความทนทานต่อการฉีกขาดและการทนต่อการสึกหรอของยางวัลคาไนซ์สูงกว่าการใช้ซิลิกาผงในยางผสมของยางแท่ง STR 5L โดยยางผสมของ FNRmSi ให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงที่สุด รองลงมาเป็นยางผสมของ LNR₁mSi และ LNR₂mSi ตามลำดับ เหมือนกันทั้งที่สัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางคลอโรพรีนเท่ากับ 50/50 และ 75/25 และการเพิ่มปริมาณซิลิกาทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นแต่ยางผสมทนการสึกหรอได้น้อยลง อย่างไรก็ตามยางผสมของ FNRmSi ให้สมบัติการทนต่อการสึกหรอสูงที่สุด นอกจากนี้การใช้ซิลิกามาสเตอร์แบทของ FNRmSi LNR₁mSi และ LNR₂mSi ให้ยางผสมทนไฟได้สูงขึ้นในทุกสัดส่วนที่ศึกษา และลักษณะ

สัณฐานวิทยาให้ผลสอดคล้องสนับสนุนสมบัติที่เหนือกว่าของการใช้งานซิลิกาในรูปมาสเตอร์แบท เนื่องจากประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีกว่าจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกากับเฟสยางผสม

7. ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกาในรูปยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท ทั้งจากน้ำยางสด และน้ำยางที่ผ่านการลดขนาดโมเลกุล สามารถลดเวลาในการผสมยางได้โดยไม่กระทบต่อสมบัติของยางผสม และยังช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวได้ดีขึ้น ทำให้สามารถลดพลังงานในการผสมได้ การพลังงานในการผสมได้มากกว่า 30% และให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยเครื่อง internal mixer ขนาด 0.5 ลิตร ซึ่งแตกต่างจากการผสมยางในระดับอุตสาหกรรม รวมทั้งการศึกษสมบัติของยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทที่ได้ยังไม่ครอบคลุมทุกสมบัติของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม จึงควรมีการนำยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบทไปวิจัยเพิ่มเติมในระดับอุตสาหกรรมกับกลุ่มผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยให้มีการทดลองกับสูตรที่ใช้จริง ขึ้นรูปและทดสอบผลิตภัณฑ์จริง เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการลดพลังงานในการผสมในระดับอุตสาหกรรม ภายใต้สมบัติของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและไม่มีปัญหาในกระบวนการผลิต เพื่อส่งเสริมการใช้งานซิลิกาและขยายผลการใช้งานสู่อุตสาหกรรมได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- อรสา ภัทรไพบุญชัย ชลดา เลวิส โสภา อิศระ ญัฏการณ ชูใหม่ อัจฉรีย์ ศรีประพันธ์ สมคิด ศรีสุวรรณ.
2546. การปรับปรุงสภาพยางธรรมชาติเพื่อลดพลังงานที่ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 163 น.
- 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.
- Artchomphoo, J. and Boonsong, K. 2013. Nanocomposite Based on Silica Masterbatch Reinforced Natural Rubber. Burapha University International Conference 2013. 4th-5th July 2013. Thailand.
- 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.
- Goerl, U., Hunsche, A. Mueller, A. and Koban H.G. 1997. Investigations into the Silica/Silane Reaction System. *Rubber Chemistry Technology*, 70(4): 608-623.
- Ismail H., Leong, H.C. 2000. Curing characteristics and mechanical properties of natural rubber/ chloroprene rubber and epoxidized natural rubber/chloroprene rubber blends. *Polymer testing*, 20: 509-516.
- 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.
- Li, S.D., Peng, Z., Kong, L.X. and Zhong, J.P. 2006. Thermal degradation kinetics and morphology of natural rubber/silica nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(2): 541-546.
- Liu, Q., Zhang, Y. and Xu, H. 2008. Properties of vulcanized rubber nanocomposites filled with nanokaolin and precipitated silica. *Applied Clay Science*, 42: 232–237.
- 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.

- Ramesan, M.T., Alex, R, Khanh, N. V., 2004. Studies on the cure and mechanical properties of blends of natural rubber with dichlorocarbene modified styrene–butadiene rubber and chloroprene rubber. *Reactive and Functional Polymers*, 62 : 41–50.
- Rattanasom, N., Saowapark, T. and Deeprasertkul, C. 2007. Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polymer Testing*, 26: 369-377.
- Sae-oui, P, Sirisinha, C, Hatthapanit, K. 2007. Influence of silica loading on the mechanical properties and resistance to oil and thermal aging of CR/NR blends. *Journal of applied polymer science*, 104:3478-3483.
- 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.