



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาสมบัติในการต้านทานการติดไฟของยางธรรมชาติโดยใช้ nano clay
และ Zeolite

โดย น.ส. จันทิทิพ คำนวนทิพย์ และ คณะ

พฤษภาคม 2551

สัญญาเลขที่.....

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาสมบัติในการต้านทานการติดไฟของยางธรรมชาติโดยใช้ nano clay
และ Zeolite

คณะผู้วิจัย สังกัด

1. น.ส. จันทิพิท คำนวนทิพย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นาย วิทพงศ์ อินทร์ช่วย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นาย เกียรติศักดิ์ ทองสม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
4. นาย สดาพร จันทคาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็ก เรื่อง ยางพารา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การพัฒนาสมบัติในการต้านทานการติดไฟของยางธรรมชาติโดยใช้ nano clay และ Zeolite

(ภาษาอังกฤษ): Flammability Retardation Improvement of Natural Rubber by Using Nano Clay and Zeolite

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล: ดร. ฉันททิพย์ คำนวนทิพย์

หน่วยงาน: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี

ที่อยู่: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี
ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ รัตนบุรี ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์/โทรสาร: 02-5493484-5 / 02-5493483

E-mail: chuntipk@yahoo.com, ckumnuantip@hotmail.com

นักศึกษาร่วมโครงการ

ชื่อ-สกุล: นาย วิพงษ์ อินทร์ช่วย

ชื่อ-สกุล: นาย เกียรติศักดิ์ ทองสม

ชื่อ-สกุล: นาย สุภาพกร จันทคาม

หน่วยงาน: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี

ที่อยู่: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี
ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ รัตนบุรี ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์/โทรสาร: 02-5493484-5 / 02-5493483

ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญ

จากการท้าวิจัยในเรื่องการใช้ชีโอสไต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ ของคณะผู้วิจัย โดยการสนับสนุนของ โครงการวิจัย SPR ในปี 2548 ที่ผ่านมามีพบว่าต้องใช้ Zeolite ในปริมาณสูงจึงจะมีประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟ แต่ในขณะเดียวกันสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติก็ต่ำลง เนื่องจากไม่มีการเสริมแรงกันระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติกับ Zeolite ทางคณะผู้วิจัยได้มีความประสงค์ที่จะร่วมมือกับ บริษัท พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ผู้ผลิตชีโอสไต์ในประเทศไทย เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาการใช้ชีโอสไต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยจะใช้ Zeolite ร่วมกับ nano layer siclicate clay ในการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟ โดยคาดหวังว่าจะใช้สาร Zeolite ในปริมาณที่ต่ำลง ตลอดจนมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานความร้อนของยางธรรมชาติเนื่องจากผลของการเติมสารประเภท nano clay

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของ nano layer silicate clay และ Zeolite ที่มีผลต่อการต้านทานการติดไฟ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ

ผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้ nano layer silicate clay และซีโอไลต์ในการเป็นสารหน่วงไฟของยางธรรมชาติ ตลอดจนผลของสารดังกล่าวที่มีต่อสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ เบนโทไนซ์ ซึ่งเป็น layer silicate clay ที่ผลิตได้ในประเทศ ปริมาณ 5-20 phr เติมลงในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ 40, 80 และ 120 phr ตามลำดับ แล้วนำไปทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C และทำการทดสอบสมบัติต่างๆของยางดังต่อไปนี้

- ความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity)
- พฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristics)
- ความหนาแน่น (Density)
- ความทนแรงดึง (Tensile Properties)
- ความทนต่อการฉีกขาด (Tear Strength)
- Compression set
- ความแข็ง (Hardness)
- การทดสอบการติดไฟ (Flammability)
- การทดสอบหาค่าอุณหภูมิสลายตัว (Degradation Temperature , T_d)

จากผลการทดลองพบว่าได้ว่า สามารถใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ โดยจากการทดลองพบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 120 phr มีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 และยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 80 phr ขึ้นไป จะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST มีค่าอัตราเร็วของการเผาไหม้ (Burning Rate) ต่ำกว่า 30 mm/sec การที่ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นสารหน่วงไฟได้นั้นเนื่องมาจากการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุล ซึ่งการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุลนี้เองจะช่วยให้เปลวไฟจางลง และช่วยลดอุณหภูมิของเปลวไฟลง ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ลงได้ แต่การเติมซีโอไลต์ลงไปในยางธรรมชาติจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติลดลง และการเติมเบนโทไนซ์ลงไปยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ เบนโทไนซ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟให้กับซีโอไลต์ โดยช่วยชะลออัตราเร็วของการเผาไหม้ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ช้าลง และนอกจากนี้การเติมเบนโทไนซ์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติในเรื่องความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาด

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ เมื่อพิจารณาถึงราคาแล้วก็พบว่า ซีโอไลต์นั้นมีราคาที่ถูกกว่าสารหน่วงไฟปกติที่ใช้ในยางธรรมชาติ แต่การเติมซีโอไลต์ลงไป

ในบางธรรมชาติจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติลดลง และการเติมเบนโทไนซ์เพียงเล็กน้อยลงไป
ในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ เบนโทไนซ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟให้กับซีโอไลต์
โดยช่วยชะลออัตราเร็วของการเผาไหม้ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ช้าลง และนอกจากนี้การเติมเบน
โทไนซ์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติในเรื่องความ
ทนต่อแรงดึงและการฉีกขาด

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟของซีโอไลต์นั้น ควรจะลดอุณหภูมิที่ใช้ในการวัล
คาไนซ์ยางลง เพื่อจะได้ลดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ อันจะช่วยให้มีปริมาณน้ำหลงเหลืออยู่ใน
โครงสร้างซีโอไลต์เพื่อจะปลดปล่อยออกมาในการยับยั้งการติดไฟได้มากขึ้น

ผลทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ผลที่เกิดขึ้นจากการวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับประเทศ
หรือระดับนานาชาติได้อย่างน้อย 1 ฉบับ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์และเบนโทไนต์ในการเป็นสารหน่วงไฟของยางธรรมชาติ ตลอดจนผลของสารดังกล่าวที่มีต่อสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ ในงานวิจัยนี้ทำการผสมยางธรรมชาติกับซีโอไลต์ในปริมาณ 40, 80 และ 120 phr และทำการผสมยางดังกล่าวกับ เบนโทไนต์ในปริมาณ 5-20 phr แล้วนำไปทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C และทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางทั้ง ความหนืดมูนี พฤติกรรมการคงรูป สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และการติดไฟ จากผลการ ทดลองพบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 120 phr มีผลการทดสอบระดับการติดไฟตาม มาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 และยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 80 phr ขึ้นไป จะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST มีค่า อัตราเร็วของการเผาไหม้ (Burning Rate) ต่ำกว่า 30 mm/sec แต่การเติมซีโอไลต์ลงไปในยางธรรมชาติจะส่งผล ให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติลดลง และการเติมเบนโทไนต์ลงไปในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ เบน โทไนต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟให้กับซีโอไลต์ โดยช่วยชะลออัตราเร็วของการเผาไหม้ ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ช้าลง และนอกจากนี้การเติมเบนโทไนต์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติในเรื่องความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาด

ABSTRACT

This research aimed to investigate the effects of zeolite and bentonite on the properties of the natural rubber as the flame retardant. The natural rubber was compounded with zeolite in various ratios, 40, 80 and 120 phr and then they also were compounded with bentonite in 5-20 phr. The rubber compounds were vulcanized on 160 °C. The Mooney viscosity, cure characteristics, physical properties, mechanical properties and flammability of the rubber compounds were studied. It was found that 120 phr of zeolite gave V-0 level in flammability test UL-94 standard (V TEST) and 80 phr of zeolite had burning rate lower than 30mm/sec according to flammability test UL-94 standard (HB TEST). However, mechanical properties of the natural rubber were reduced because of loading zeolite into the natural rubber. Bentonite could improve the flame retardation of the natural rubber and zeolite compounds. The burning rate could be retarded by bentonite loading. In addition, bentonite could be improved the tensile strength and tear strength of the natural rubber and zeolite compounds.

ความสำคัญและความจำเป็นของการวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ของโลก แนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติ คือ การวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานที่หลากหลายยิ่งขึ้น เช่น ใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้าง ใช้เป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ ใช้ในการหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิลต่างๆ สายพานลำเลียงต่างๆ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม แต่ก็มีสมบัติที่เป็นข้อด้อยหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการติดไฟที่ต่ำ เป็นต้น [1] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้สารเติมแต่ง (additive) เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ สำหรับการปรับปรุงสมบัติในเรื่องความทนทานต่อการติดไฟนั้น จำเป็นจะต้องใช้สารเติมแต่ง ที่เรียกว่า สารหน่วงไฟ (flame retardant) เพื่อช่วยในการชะลอการติดไฟของยางหรือทำให้ยางนั้นไม่ลุกไหม้ติดไฟได้เอง หรือสามารถดับไฟได้เองเมื่อเกิดการลุกไหม้เกิดขึ้น สารหน่วงไฟที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น แอนติโมนีออกไซด์ (antimony oxide) เป็นสารหน่วงไฟที่เหมาะสมสำหรับยางที่มีองค์ประกอบของธาตุฮาโลเจนอยู่ หรือถ้าไม่มี เช่น ยางธรรมชาติ ก็ต้องมีการใส่สารเติมแต่งที่มีองค์ประกอบของฮาโลเจน เช่น chlorinated rubber powder ลงไป เพื่อจะเกิดการทำงานร่วมกันกับ แอนติโมนีออกไซด์ เพราะถ้ามีธาตุฮาโลเจนอยู่ในระบบจะไม่มีผลต่อการต้านทานการลุกติดไฟ [2] นอกจากนี้ แอนติโมนีออกไซด์ยังมีราคาสูงถึงประมาณกิโลกรัมละ 180 บาท สารหน่วงไฟอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ คือ อลูมินาไฮเดรต (alumina hydrate) โดยสารหน่วงไฟชนิดนี้จะปลดปล่อยน้ำออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 210-220 องศาเซลเซียส อันจะทำให้เปลวไฟจางลงพร้อมกับอุณหภูมิของเปลวไฟจะค่อยๆ ลดลง ทำให้การติดไฟเกิดยากขึ้น แต่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงต้องใช้เป็นปริมาณมาก เช่น ยางธรรมชาติ ต้องใช้ในปริมาณถึง 80-250 phr

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการใช้สารหน่วงไฟชนิดใหม่ในยางธรรมชาติ อันได้แก่ สารจำพวก nano clay ในกลุ่มของ layer silicate เพื่อเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟของยางธรรมชาติ เนื่องจากมีรายงานการวิจัยพบว่า nano clay นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟในเทอร์โมพลาสติกบางชนิดได้ และนอกจากนี้ยังมีรายงานการวิจัยว่า layer silicate clay ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของยางได้อีกด้วย และในรายงานวิจัยที่ผ่านมายังพบว่า เมื่อใช้ layer silicate ร่วมกับ Zeolite จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟในเทอร์โมพลาสติกบางชนิดได้อีกด้วย [3] สารซีโอไลต์ (zeolite) ซึ่งมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงก็จะสามารถปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเหล่านั้นออกมา อันจะเป็นการลดอุณหภูมิของระบบ และทำให้เปลวไฟจางลงได้ นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังมีราคาต่ำอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ 30 บาท แต่จากการทำงานวิจัยในเรื่องการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ ของคณะผู้วิจัย โดยการสนับสนุนของ โครงการวิจัย SPR ในปี 2548 ที่ผ่านมามีพบว่าต้องใช้ Zeolite ในปริมาณสูงจึงจะมีประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟ แต่ในขณะเดียวกันสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติก็ต่ำลง เนื่องจากไม่มีการเสริมแรงกันระหว่างโมเลกุลของยางธรรมชาติกับ Zeolite

ทางคณะผู้วิจัยได้มีความประสงค์ที่จะร่วมมือกับ บริษัท พีคิว เคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ผู้ผลิตซีโอไลต์ในประเทศไทย เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยจะใช้ Zeolite ร่วมกับ nano clay ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟ โดยคาดหวังว่าจะใช้สาร Zeolite ในปริมาณที่ต่ำลง ตลอดจนมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานความร้อนของยางธรรมชาติเนื่องจากผลของการเติมสารประเภท nano clay และนำเทคโนโลยีดังกล่าวถ่ายทอดลงสู่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติภายในประเทศ เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการที่จะได้ใช้สารหน่วงไฟที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ และมีราคาถูก อันจะนำไปสู่การลดการขาดดุลการนำเข้าสารเคมีจากต่างประเทศ ตลอดจนเพิ่มข้อได้เปรียบในทางการค้ากับประเทศคู่แข่งเพราะ

สามารถใช้วัตถุดิบในราคาต่ำลงได้ และข้อมูลจากการวิจัยนี้จะเป็นความรู้ที่จะสามารถในการนำไปประยุกต์ในการออกสูตรของผลิตภัณฑ์ยางชนิดอื่นๆ อันจะทำให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่หลากหลายต่อไปในอนาคต เช่น วัสดุก่อสร้าง ยางรองกรอบประตูหน้าต่าง สายพานลำเลียง เป็นต้น

วัตถุดิบ

ศึกษาผลของ nano clay และ Zeolite ที่มีผลต่อการต้านทานการติดไฟ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ

ทฤษฎี แนวความคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน(หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน(หรืออะลูมิเนียม)อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้าจะเชื่อมต่อกันที่มุม(ใช้ออกซิเจนร่วมกัน)ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิคอน(หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก [4] ในโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้สารซีโอไลต์ซึ่งผลิตได้ภายในประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้สารซีโอไลต์ประเภท โซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต (sodium aluminosilicate) มีสูตรโครงสร้าง $\text{Na}_{12}[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{20}]\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ และมีชื่อทางการค้าคือ Advera 401PS ผลิตโดยบริษัทบริษัท พีคิว เคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ จากสูตรโครงสร้างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสารซีโอไลต์มีน้ำเป็นองค์ประกอบในโครงผลึกถึง 27 โมเลกุล และการที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบนี้เอง จึงนำไปสู่สมมติฐานที่ว่าเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงสารซีโอไลต์ดังกล่าวก็จะสามารถปลดปล่อยน้ำออกมาจากโครงผลึก และน้ำดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้เปลวไฟจางลง และลดอุณหภูมิของระบบ และช่วยชะลอการติดไฟของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติได้ ในที่สุด จากการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลทางวิชาการ พบว่าในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติอย่างชัดเจนนัก แต่ได้มีการศึกษาการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในเทอร์โมพลาสติกบางชนิดดังนี้

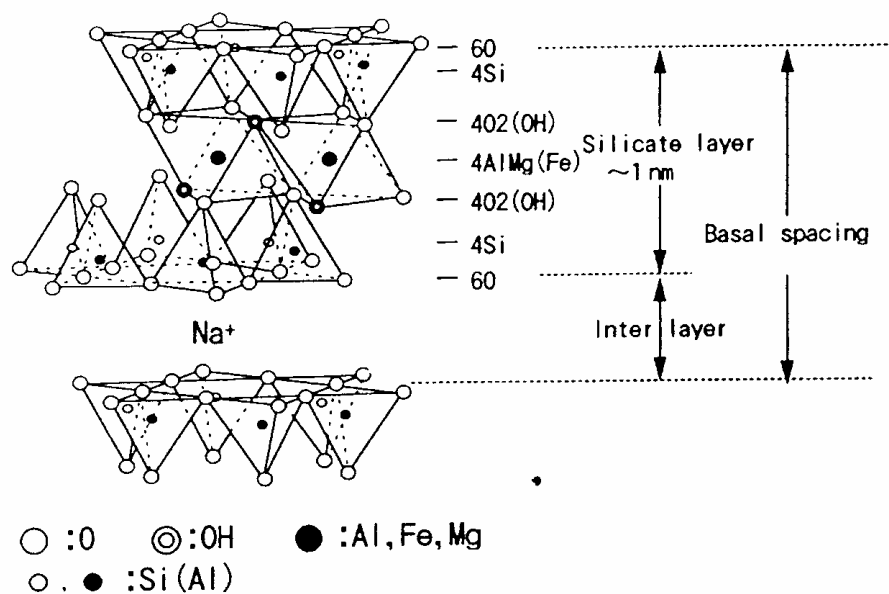
Parbir K. Patra และคณะ[3] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเส้นใยไนลอน6 (nylon6) ให้มีความทนต่อการติดไฟโดยมีการใช้ Laptonite ซึ่งเป็นนาโนเคลย์ (nanoclay) และซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟพบว่า Laptonite เป็นสารที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการติดไฟของเส้นใยไนลอน6 และความต้านทานการติดไฟของเส้นใยดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อมีสารซีโอไลต์อยู่ภายในระบบ

H. Demirและคณะ [5] ศึกษาการใช้สารซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟร่วมกับสาร แอมโมเนียม โพลีฟอสเฟต(ammonium polyphosphate) ในโพลีพรอพิลีน (polypropylene) โดยใช้สารซีโอไลต์ในปริมาณต่างๆกัน ได้แก่ 1, 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก และทำการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) โดยใช้เครื่อง TGA และทำการวัดค่า limiting oxygen index (LOI) และทำการทดสอบการติดไฟแบบ horizontal burning HB พบว่าสารซีโอไลต์ที่ใส่เข้าไปในระบบมีผลในการส่งเสริมประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟของโพลีพรอพิลีนได้

C. Kumnuantip และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของการเติม Zeolite ลงในยางธรรมชาติ พบว่าสาร Zeolite จะเป็นสารหน่วงไฟที่มีประสิทธิภาพ เมื่อมีการเติมลงในยางธรรมชาติ ในปริมาณ 120 phr ขึ้นไป แต่ในขณะเดียวกันจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางลดต่ำลง เนื่องจากไม่เกิดการเสริมแรงกันระหว่างยางธรรมชาติ และ Zeolite

เคลย์ (clay) ภาษาไทยแปลว่า ดินเหนียว ดินโคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ซึ่งแร่ดินเหนียวที่นำไปสู่เทคโนโลยีของนาโน เคลย์ และนาโนคอมพอสิต เป็นแร่ที่มีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic matters) สารอนินทรีย์ (inorganic matters) และความชื้น (น้ำ) ในส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ นี้มีแร่ธาตุหรือแร่ดินเหนียวที่สำคัญหลากหลายชนิด ที่สำคัญที่สุดคือ กลุ่มแร่ซิลิเกต (silicate) แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ชนิดโครงสร้างผลึกหรืออัญรูปเป็นต้น

แร่ดินเหนียวที่สำคัญนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ และนาโนคอมพอสิตก็คือกลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีจุดเด่นคือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วหรือประจุ (polarity) เรียกว่ากลุ่ม Smectite clay และแร่ดินเหนียวที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้ก็คือ แร่ดินเหนียว มอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไป $\text{Na}_{0.2} \text{Ca}_{0.1} \text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_{10}$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เบนโทไนท์ หรือเบนโทน (Bentonite, Bentone) ซึ่งอยู่ในตระกูล phyllosilicate มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส แร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ ในกลุ่มนี้ที่มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นนาโนเคลย์ ได้แก่ Saponite, Vermiculite มอนท์มอริลโลไนท์ มีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึกที่เรียกว่า 2:1 ประกอบด้วยชั้น อลูมินาออกตะฮีดรอล (octahedral) ที่ถูกประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ความหนาแน่นของชั้นผลึก 2:1 ประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ในขณะที่ความยาวด้านข้างเป็นไมครอน มีประจุลัพท์เป็นลบจึงมักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ (ไม่มีประจุ) ดังในรูป 2.1



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของ Montmorillonite

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้ มอนต์มอริลโลไนท์ ชอบน้ำ (โดยทั่วไปพบว่า ความหนาของชั้นผลึกขยายจนถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มากจึงเป็นที่รู้จักดี และนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเป็นเวลานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น (ในสภาพปฏิกลของสัตว์เลี้ยง เช่น แมว) รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์แร่ดินเหนียวขึ้นมาได้โดยเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ ทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดประจุได้ เช่น ประจุบวก

เมื่อแร่ดินเหนียว มอนต์มอริลโลไนท์ ซึ่งมีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ ถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทนโดยการแทนที่ประจุต่างๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์ จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า โมดิฟายด์เคลย์ (modified clay) หรือ ออร์กาโนฟิลลิกเคลย์ (organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออร์กาโนเคลย์ (organoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ มีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ เกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึก ทำให้ชั้นผลึกห่างกัน เกาะกันอย่างหลวมๆ ประมาณว่าเป็นอนุภาคนาโนเมตรของซิลิเกต (เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร) ที่มี aspect ratio (สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา) สูงมากในสองมิติ

หลักการนี้จึงเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคนาโนเมตรจากธรรมชาติจึงเรียกว่านาโนเคลย์ ซึ่งมีประโยชน์มากในงานบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โลหะหนักสีย้อมผ้าเป็นต้น(เป็นการนำมาใช้โดยตรง)

นาโนคอมโพสิต (nanocomposite) เป็นวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีการ ใช้สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโน (nanometer range) สารตัวเติมนาโน (nanofiller) นั้นจะต้องมีขนาดในมิติ (dimension) มิติหนึ่งไม่เกิน 100 นาโนเมตร (nm) [7] ในการแบ่งชนิดของนาโนคอมโพสิตจะแบ่งตามชนิดของสารตัวเติมออกเป็น 3 ชนิด ขึ้นอยู่กับมิติที่มีขนาดระดับนาโนของสารตัวเติม โดยแบ่งออกเป็น Three-dimensional filler สารตัวเติมชนิดนี้จะมีขนาดของอนุภาคในระดับนาโนทั้ง 3 มิติ ตัวอย่างเช่น นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nanocalcium carbonate) นาโนซิลิกา (special silica nanoparticle) ชนิดที่สองได้แก่ Fiber filler เป็นสารตัวเติมที่มีมิติใน 2 มิติมีขนาดอยู่ในระดับนาโน และมิติที่3 จะมีขนาดใหญ่กว่าระดับนาโน ซึ่งสารตัวเติมในกลุ่มนี้จะมีรูปร่างอนุภาคในรูปคล้ายเส้นใย (fiber filler) ตัวอย่างเช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube) ชนิดสุดท้ายได้แก่ Plate-like filler เป็นสารตัวเติมที่มีเพียง 1 มิติที่มีขนาดในระดับนาโน สารตัวเติมกลุ่มนี้จะมีรูปร่างเป็นแผ่น (plate, flake) โดยจะมีความหนาอยู่ในระดับนาโน ตัวอย่างเช่นสารตัวเติมในกลุ่มของดินเหนียว(clay) หรือเลเยอร์ซิลิเกต (layered silicate) เช่น มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ซาโปไนท์ (saponite) และแร่ดินขาว (kaolinite) เป็นต้น [7]

จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์หลายๆท่านพบว่าการใช้สารตัวเติมนาโนเติมลงในวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) และอีลาสโตเมอร์ (elastomer) เพื่อทำเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตนั้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เช่น วัสดุจะมีความใส เพราะอนุภาคนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงมาก จึงไม่ทำให้แสงแตกกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น แต่จะโปร่งแสง วัสดุจะมีความทนแรงดึง (tensile strength)และมีโมดูลัส (modulus)สูงขึ้น วัสดุจะมีความทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น และมีการทนต่อการกัดไฟได้ดีขึ้น [7]

นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาการเกี่ยวกับพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต โดยใช้สารตัวเติมนาโนชนิดต่างๆ โดยมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตในการใช้ สารตัวเติมในกลุ่มของ nano clay ตัวอย่างเช่น

Akelah, A. และคณะ [8] ทำการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่าง amine-terminated butadiene-acrylonitrile กับมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite; MMT) โดยใช้กระบวนการ แลกเปลี่ยนแคตไอออนระหว่าง

Na⁺ ของมอนท์มอริลโลไนท์ กับ ammonium แคตไอออนของยาง amine-terminated butadiene-acrylonitrile จำนวนของยางที่ถูกกราฟลงบนมอนท์มอริลโลไนท์ วัดโดยใช้เครื่อง TGA พบว่ามี 0.6 g rubber/1 g rubber-MMT จากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้ SEM และ TEM พบว่า ชั้นของ MMT มีความหนาในระดับนาโน และกระจายตัวอยู่ในเนื้อยาง โดยมีความหนาที่ 60 nm

Varghese, S. และคณะ [9] ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ Pristine (sodium bentonite และ sodium fluorohectorite) และ organophilic modification silicate (มอนท์มอริลโลไนท์ ที่ถูกปรับแต่งด้วย amine และ quaternary ammonium) ในการเป็นสารตัวเติมใน ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ENR) ในการทดลองนี้ใช้ clay 10 phr ผสมลงในยาง ENR โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง และทำการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัดความร้อน (heated hydraulic press) ที่อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลา t_{90} ที่หาได้จากเครื่อง moving die rheometer (MDR) หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลแบบพลวัตร โดยใช้เครื่อง dynamic mechanical thermal analyzer (DMTA) ทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ อาทิ ความทนแรงดึง ความแข็งแรง การกระดอน และใช้เครื่อง transmission electron microscopy (TEM) และ X-ray diffraction (XRD) ในการดูการกระจายตัวของ nanoclay ในยาง จากการทดลองพบว่า organophilic modification silicate จะให้เวลาในการคงรูปที่เร็วกว่าและให้ค่าความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาดที่ดีกว่า Pristine โดยที่การกระจายตัวของ organoclay ในยางจะมีบางส่วนเป็นแบบ exfoliation บางส่วนเป็นแบบ intercalation

Varghese, S. และ Karger-Kocsis, J. [10] ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ layer silicate ทั้งจากธรรมชาติและการสังเคราะห์เป็นสารตัวเติมในน้ำยางธรรมชาติ โดย layer silicate จากธรรมชาติ ได้แก่ sodium bentonite และ layer silicate สังเคราะห์ ได้แก่ fluorohectorite ในงานวิจัยนี้ผสม layer silicate จำนวน 10 % โดยน้ำหนักลงในน้ำยางธรรมชาติ หลังจากนั้นนำน้ำยางธรรมชาติดังกล่าวไปทำการวัลคาไนซ์ ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมการบวมตัวในตัวทำละลายของชิ้นงานที่ได้ พบว่า fluorohectorite มีการกระจายตัวที่ดีในเนื้อยาง และส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความต้านทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายได้สูง และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี

Mgaraphan, R. และคณะ [11] ทำการปรับแต่ง มอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite; MMT) ด้วย primary และ quaternary ammonium salts (มี C₁₂-C₁₈) clay ที่ถูกปรับแต่งในปริมาณต่างๆจะถูกผสมลงในยางธรรมชาติที่ละลายอยู่ในโทลูอีน ทำการทดสอบดูการกระจายตัวของ clay โดยใช้เครื่อง XRD และ TEM พบว่าที่ปริมาณ clay ต่ำกว่า 10 phr จะมีการกระจายตัวเป็นแบบ exfoliation ในขณะที่ปริมาณ clay สูงกว่า 10 phr จะมีการกระจายตัวแบบ exfoliation เพียงบางส่วนเท่านั้น clay ที่ถูกปรับแต่งด้วย primary ammonium salt จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า clay ที่ถูกปรับแต่งด้วย quaternary ammonium salt (ที่ปริมาณ C เท่ากัน) ในการทดลองนี้พบว่าการใช้ clay ในปริมาณเพียง 7 phr ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้เซมาต้าและซิลิกาในปริมาณ 20 phr

The, P.L. และคณะ [12] ทำการผสมมอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite; MMT) ที่ถูกปรับแต่งด้วย onium ion จำนวน 2 phr ลงในยางธรรมชาติที่มีผสมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ ที่มี 25 % mol epoxidation (ENR25) และ 50 % mol epoxidation (ENR50) ในปริมาณ 5 และ 10 phr จากการทดลองพบว่า การใส่ ENR ลงไปมีผลให้ค่า scorch time และเวลาในการคงรูปลดลง การกระจายตัวของ organoclay ในยางเป็นแบบ intercalation และยาง ENR50 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับยาง ENR25 การไม่ผสมยาง ENR

Zheng, H. และคณะ [13] ทำการผสม organic Montmorillonite (OMMT) ที่ถูกปรับแต่งด้วยสารเคมีต่างๆกัน ลงในยาง ethylene-propylene diene (EPDM) โดยใช้กระบวนการ melt mixing ใน HAAKE rheometer และนำไปวัลคาไนซ์ด้วยเครื่องอัดความร้อน ที่อุณหภูมิ 170 °C ทำการทดสอบหาการพฤติกรรมทางรูป การกระจายตัวของ OMMT และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้ พบว่า OMMT มีผลให้เวลาในการคงรูปยางนานขึ้น ผลการทดลองจากเครื่อง XRD และ TEM บ่งชี้ว่า OMMT ที่ถูกปรับแต่งด้วย trimethyloctadecylamine และ

dimethylbenzylamine ให้การกระจายตัวแบบ intercalation ในขณะที่ OMMT ที่ถูกปรับแต่งด้วย surfactant ของ methylbis(2-hydroxyethyl)cocoalkylamine ให้การกระจายตัวแบบ exfoliation และการกระจายตัวแบบนี้เองที่ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่าง EPDM กับ OMMT ได้มากส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ ทำการวิจัยและพัฒนาการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยจะใช้ Zeolite ร่วมกับ nano clay ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟ โดยคาดหวังว่าจะใช้สาร Zeolite ในปริมาณที่ต่ำลง ตลอดจนมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานความร้อนของยางธรรมชาติเนื่องจากผลของการเติมสารประเภท nano clay โดยในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลของ nano clay และ Zeolite ที่มีผลต่อการต้านทานการติดไฟ และสมบัติของยางธรรมชาติ เพื่อจะได้เข้าใจถึงผลของ nano clay และ Zeolite ที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติโดยละเอียดทั้งสมบัติการไหล สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และความต้านทานต่อการติดไฟ อันจะเป็นพื้นฐานข้อมูลที่มีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสูตรของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติที่มีการใช้สารดังกล่าวเป็นสารเติมแต่งต่อไป

วิธีการ

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

- 1.1. ยางธรรมชาติ (STR20)
- 1.2. ซีโอไลต์ประเภท โซเดียมอลูมิโนซิลิเกต (sodium aluminosilicate) มีสูตรโครงสร้าง $\text{Na}_{12}[\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}]\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ และมีชื่อทางการค้าคือ Advera 401PS ผลิตโดยบริษัท บริษัท พีคิว เคมีคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 1.3. เบนโทไนท์ เป็นแร่ดินเหนียว มอนท์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไป $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ มีชื่อทางการค้าคือ Mac-Gel เกรด SAC และ SAC-1 ผลิตโดยบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์ แสดงในตารางที่ 1
- 1.4. ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)
- 1.5. กรดสเตียริก (stearic acid)
- 1.6. Mercaptobenzthiasoles (MBT)
- 1.7. Diphenylguanidine (DPG)
- 1.8. กำมะถัน (sulphur)

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนท์

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในเบนโทไนท์ (%wt)	
	SAC	SAC-1
SiO ₂	55-60	65-70
Al ₂ O ₃	14-18	13-17
Fe ₂ O ₃	1-2	1-2
Na ₂ O	2-3	0.5-1
MgO	1.8-2.2	2-3
CaO	1.8-2.1	1.5-2
K ₂ O	0.3-0.5	0.4-0.8
TiO ₂	0.2-0.3	0.2-0.3
LOI	10-12	10-12

2. การผสมยางธรรมชาติกับสารเคมี

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการผสมยางธรรมชาติกับสารที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์และสารหน่วงไฟ โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) อัตราส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมยาง

สารเคมี	ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ ผสมใน ยางธรรมชาติ (phr)
ยางธรรมชาติ (STR20)	100
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	5
กรดสเตียริก (stearic acid)	2
Mercaptobenzthiasoles (MBT)	0.5
Diphenylguanidine (DPG)	0.2
กำมะถัน (sulphur)	3
ซีโอไลต์ (zeolite)	40, 80 และ 120
เบนโทไนท์ (benonite)	5, 10, 15 และ 20

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณของเบนโทไนซ์และซีโอไลต์ ที่ใช้ในการผสมยาง

ปริมาณ ซีโอไลต์ที่ใช้ในการผสมยาง (phr)	ปริมาณ เบนโทไนซ์ที่ใช้ในการผสมยาง (phr)
40	0
	5
	10
	15
	20
80	0
	5
	10
	15
	20
120	0
	5
	10
	15
	20

ยางที่ผ่านการผสมสารเคมีแล้วนั้นจะถูกนำมาทดสอบสมบัติดังนี้

- ความหนืดมูนี (Mooney Viscosity) โดยใช้เครื่อง Mooney Viscometer ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1646

3. การทำให้ยางคงรูป

ในขั้นตอนนี้เป็นการวัลคาไนซ์ยางที่ผ่านการผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้ว โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางนั้นมาจากการหาค่า เวลาในการคงรูป(cure time) ที่ได้จากการหาพฤติกรรมการคงรูปของยางโดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084

4. การทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบสมบัติต่างๆของยางวัลคาไนซ์ ทั้งสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และการทนต่อการติดไฟ โดยมีสมบัติที่ทำการทดสอบดังนี้

สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- ความหนาแน่น (Density) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 792

สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

- ความทนแรงดึง (Tensile Properties) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 412
- ความทนต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624
- ความแข็ง (Hardness) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240
- Compression set ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 395

สมบัติการติดไฟ

- การทดสอบการติดไฟ (Flammability) ทดสอบตามมาตรฐาน UL 94
- การทดสอบหาค่าอุณหภูมิในการปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำ และปริมาณน้ำที่ปลดปล่อยออกมา ทดสอบโดยใช้เครื่อง Thermogravimetry Analyzer (TGA) โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบอยู่ที่ 0-500 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 °C/นาที

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนืดมูนี ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณซีโอไลต์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดมูนีของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มการเติมเบนโทไนซ์ ปริมาณเบนโทไนซ์ที่เพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ ค่าความหนืดมูนีของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย ค่าความหนืดมูนีมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ที่เติมลงไปเป็นอนุภาคของแข็งจึงเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ [6,14] อันเป็นการส่งผลให้ค่าความหนืดมูนีของยางมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนืดมูนีของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	ความหนืดมูนี (ML(1+4)100 °C)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	47.42	47.42	53.42	53.42	59.34	59.34
5	46.91	38.38	61.44	48.24	61.85	60.07
10	54.49	48.18	62.92	55.95	62.46	60.32
15	57.89	48.24	63.02	56.42	63.90	63.43
20	60.04	49.36	67.11	64.69	67.66	65.05

ตารางที่ 5 แสดงค่าเวลาในการคงรูป (cure time) ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปลดลงเล็กน้อย แต่เมื่อมีการเติมเบนโทไนซ์ลงไปจะส่งผลทำให้ เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์มีระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 6 แสดงค่าความหนาแน่น ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณซีโอไลต์ที่เพิ่มความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อมีการเติมเบนโทไนท์ลงไป ส่งผลทำให้ ความหนาแน่นของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเบนโทไนท์ เกรด SAC มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ มากกว่าเบนโทไนท์ เกรด SAC-1

ตารางที่ 5 แสดงค่าเวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนท์ (phr)	เวลาในการคงรูป (นาที)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	4.10	4.10	3.53	3.53	3.57	3.57
5	4.88	4.12	4.56	4.53	4.52	4.85
10	4.97	4.18	4.73	4.45	4.42	4.32
15	4.75	4.05	4.62	4.32	4.27	4.33
20	4.57	4.25	4.50	4.42	4.22	4.38

ตารางที่ 6 แสดงค่าความหนาแน่นของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนท์ (phr)	ความหนาแน่น (g/cm ³)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	1.115	1.115	1.225	1.225	1.31	1.31
5	1.329	1.206	1.341	1.271	1.345	1.364
10	1.333	1.201	1.342	1.275	1.349	1.341
15	1.335	1.211	1.344	1.27	1.353	1.339
20	1.341	1.207	1.345	1.277	1.354	1.347

ตารางที่ 7 แสดงค่า 300% Modulus ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ลงในยางธรรมชาติจะทำให้ค่า 300% Modulus เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเติมเบนโทไนท์ลงไปส่งผลทำให้ ค่า 300% Modulus ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเบน

โทไนซ์ เกรด SAC มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า 300% Modulus ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ มากกว่าเบนโทไนซ์ เกรด SAC-1 ค่า 300% Modulus มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ที่เติมลงไปเป็นอนุภาคของแข็งจึงเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์มีความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากยิ่งขึ้น [6,14] อันเป็นการส่งผลให้ค่า 300% Modulus ของยางมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 7 แสดงค่า 300% Modulus ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	300% Modulus (psi)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	627.36	627.36	630.55	630.55	635.90	635.90
5	709.31	731.75	729.90	756.34	704.40	697.56
10	870.29	749.27	798.67	745.97	729.58	707.05
15	917.41	756.43	889.44	747.34	832.15	737.68
20	1008.02	763.85	925.18	757.97	860.82	776.74

ตารางที่ 8 แสดงค่า ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ลงในยางธรรมชาติจะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าซีโอไลต์เป็นสารตัวเติมที่ไม่มีการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ การเติมซีโอไลต์ลงไปในยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ค่าการทนแรงดึงของยางธรรมชาติมีค่าลดลง [6] แต่เมื่อมีการเติมเบนโทไนซ์เพียง 5-20 phr ลงไปในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ กลับพบว่าค่าความทนต่อแรงดึงของยางมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าการเติม layer silicate clay เป็นสารตัวเติมในยางจะช่วยให้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น [9-12] และการกระจายตัวของเบนโทไนซ์ในยางมีแนวโน้มที่จะมีบางส่วนเป็นแบบ exfoliation บางส่วนเป็นแบบ intercalation จึงช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น [9,11] จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเติมเบนโทไนซ์ในปริมาณเล็กน้อยลงในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้นทั้งในเรื่องความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยพิจารณาจากค่า 300% Modulus ที่เพิ่มขึ้น และมีความทนทานต่อแรงดึงมากยิ่งขึ้น โดยเบนโทไนซ์ เกรด SAC มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อแรงดึง ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ มากกว่าเบนโทไนซ์ เกรด SAC-1 ทั้งนี้เนื่องจากเบนโทไนซ์เกรด SAC มีการปรับปรุงผิวหน้าที่ช่วยทำให้เกิดการเสริมแรงกับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ซึ่งต่างจากเบนโทไนซ์เกรด SAC-1 ที่ไม่มีการปรับปรุงผิวหน้า

ตารางที่ 8 แสดงค่าความทนต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	ความทนต่อแรงดึง (psi)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	2189.73	2189.73	1664.50	1664.50	1055.08	1055.08
5	2972.87	2882.65	1781.21	1712.02	1604.51	1472.90
10	3219.26	3206.39	2054.61	1777.72	1694.66	1586.20
15	3295.13	3242.60	2166.06	1792.25	1655.31	1591.66
20	3357.50	3410.12	2063.70	1694.29	1644.53	1522.74

ตารางที่ 9 แสดงค่าความทนต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	ความทนต่อการฉีกขาด (Load Force (lbf))					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	14.63	14.63	12.75	12.75	10.64	10.64
5	15.50	13.98	14.20	12.20	11.84	10.29
10	15.54	14.58	14.36	12.62	11.97	10.70
15	17.65	14.64	14.69	13.38	12.32	11.25
20	17.72	14.69	15.03	14.01	13.50	11.72

ตารางที่ 9 แสดงค่า ความทนต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ลงในยางธรรมชาติจะทำให้ค่าความทนต่อการฉีกขาดลดลง เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารตัวเติมที่ไม่มีการเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ แต่เมื่อมีการเติมเบนโทไนซ์ลงไปในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ พบว่าค่าความทนต่อการฉีกขาดของยางมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าการเติม layer silicate clay เป็นสารตัวเติมในยางจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น [9-12] ซึ่งสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับผลของการทดสอบการทนต่อแรงดึง โดยเบนโทไนซ์ เกรด SAC มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความทนต่อการฉีกขาด ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ มากกว่าเบนโทไนซ์ เกรด SAC-1 เช่นเดียวกับผลการทดสอบการทนต่อแรงดึง

ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ลงในยางธรรมชาติจะทำให้ค่าความแข็ง เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเติมเบนโทไนท์ลงไปส่งผลทำให้ ค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 10 แสดงค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนท์ (phr)	ความแข็ง (Shore A)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	53	53	62	62	70	70
5	57	50	66	65	72	72
10	56	49	62	63	71	70
15	56	51	65	63	71	70
20	55	52	65	63	72	71

ตารางที่ 11 แสดงค่า Compression set ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนท์ (phr)	Compression set (%)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	64.45	64.54	59.57	59.57	52.27	52.27
5	58.57	63.46	51.15	58.85	42.53	51.53
10	55.92	61.44	49.34	58.85	42.17	48.26
15	55.48	62.30	46.93	57.24	41.98	43.75
20	55.24	59.70	44.50	56.50	40.53	42.95

ตารางที่ 11 แสดงค่า Compression set ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ในปริมาณต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ลงในยางธรรมชาติจะทำให้ค่า Compression set ลดลง และเมื่อมีการเติมเบนโทไนท์ลงไปส่งผลทำให้ ค่า Compression set ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์มีค่าลดลง แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนท์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งลงในยางธรรมชาติ ทำให้สมบัติความยืดหยุ่นของยางธรรมชาติลดลง ยางคืนตัวกลับได้น้อยลงหลังจากผ่านการกดทับด้วยน้ำหนักเป็นเวลานาน

จากผลการทดลองในตารางที่ 12 พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 120 phr ขึ้น ไปจะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 ซึ่ง ถ้ามีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 40 และ 80 phr จะให้ผลการทดสอบที่ไม่อยู่ในมาตรฐาน ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [6]

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการติดไฟ (Flammability) ตามมาตรฐาน UL94 แบบ V TEST ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	Flame Test (V-TEST)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	V-0	V-0
5	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	V-0	V-0
10	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	V-0	V-0
15	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	V-0	V-0
20	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	V-0	V-0

จากผลการทดลองในตารางที่ 13 พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 80 phr ขึ้นไป ขึ้นไปจะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST มีค่า อัตราเร็วของการเผาไหม้ (Burning Rate) ต่ำกว่า 30 mm/sec และเมื่อมีการเติมเบนโทไนซ์ลงไปในยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ อัตราเร็วของการเผาไหม้ก็จะยิ่งลดลง โดยยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 120 phr จะไม่ติดไฟเมื่อถูกเผาเป็นเวลานาน 30 วินาที การที่เติมเบนโทไนซ์ลงไปในยางธรรมชาติในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ อัตราเร็วของการเผาไหม้ลดลง เนื่องจาก เบนโทไนซ์ที่ใช้เป็น layersilicate clay ซึ่งซิลิเกตจะมีสมบัติทนความร้อนสูงได้ดี เมื่อเผาไหม้จะให้ถ่าน (char) ปกคลุมผิวหน้าจึงไม่ลามไฟและช่วยให้ไฟดับอย่างรวดเร็ว [15] ซึ่งให้ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [3]

จากผลการทดลองในตารางที่ 14 โดยการนำอนุภาคของซีโอไลต์ ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่มีการสลายตัวและปลดปล่อยน้ำออกมาโดยเครื่อง Thermogravimetry Analysis (TGA) พบว่า ซีโอไลต์ จะมีการปลดปล่อยน้ำออกมา 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิ 137.37 °C ปลดปล่อยน้ำออกมา 17.78 %

ผลการทดลองที่ได้จากการนำยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ ไปศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อน จากเครื่อง Thermogravimetry Analysis (TGA) แสดงในตารางที่ 15 พบว่ายางที่มีการเติมซีโอไลต์ จะปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมาในปริมาณมากยิ่งขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟมากยิ่งขึ้นดังแสดงในผลการทดลองในตารางที่ 12 และตารางที่ 13 การที่ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นสารหน่วงไฟได้นั้นเนื่องจากมีการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุล ดังแสดงในผลการทดลองในตารางที่ 14 และ 15 ซึ่งการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุลนี้เองจะช่วยให้เปลวไฟจางลง และช่วยลดอุณหภูมิของเปลวไฟลง ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ลงได้ [3,5,16]

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบการติดไฟ (Flammability) ตามมาตรฐาน UL94 แบบ HB TEST ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	Flammability Test (HB-TEST) ; Burnig Rate (mm/min.)					
	ซีโอไลต์ 40 phr		ซีโอไลต์ 80 phr		ซีโอไลต์ 120 phr	
	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1	SAC	SAC-1
0	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	29.05	29.05	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
5	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	28.99	28.74	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
10	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	26.45	27.09	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
15	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	22.87	21.59	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
20	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่ อยู่ในมาตรฐาน	19.76	20.03	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ

ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำและปริมาณน้ำที่ปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์

อุณหภูมิของการปลดปล่อยน้ำ (°C)	ปริมาณน้ำที่ปลดปล่อย (%)
137.37	17.78

ตารางที่ 15 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำและปริมาณน้ำที่ปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์ ที่มีการเติมลงในยางธรรมชาติ

ปริมาณของซีโอไลต์ (phr)	อุณหภูมิที่ปลดปล่อยน้ำ (°C)	ปริมาณการปลดปล่อยน้ำ (%)
40	259.32	8.57
80	209.82	10.14
120	134.33	12.22

ผลการทดลองที่ได้จากการนำยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ 120 phr และเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ ไปศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อน จากเครื่อง Thermogravimetry Analysis (TGA) แสดงในตารางที่ 16 จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมเบนโทไนซ์ในปริมาณที่มากขึ้นลงในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ 120 phr ส่งผลให้อุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำออกมาลดลง โดยเบนโทไนซ์เกรด SAC มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำออกมาของซีโอไลต์ที่ถูกเติมในยางธรรมชาติ มากกว่าเบนโทไนซ์ เกรด SAC-1

ตารางที่ 16 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำและปริมาณน้ำที่ปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์ 120 phr ที่มีการเติมลงในยางธรรมชาติที่มีการเติมเบนโทไนซ์ในปริมาณต่าง ๆ

ปริมาณเบนโทไนซ์ (phr)	SAC		SAC-1	
	อุณหภูมิที่ ปลดปล่อยน้ำ (°C)	ปริมาณการ ปลดปล่อยน้ำ (%)	อุณหภูมิที่ ปลดปล่อยน้ำ (°C)	ปริมาณการ ปลดปล่อยน้ำ (%)
0	134.33	12.22	134.33	12.22
5	122.42	11.58	134.27	10.23
10	121.82	11.55	133.48	11.36
15	119.71	11.10	133.13	11.38
20	118.21	11.25	133.03	11.48

สรุป

ยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณ 120 phr มีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 และยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 80 phr ขึ้นไป จะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST มีค่าอัตราเร็วของการเผาไหม้ (Burning Rate) ต่ำกว่า 30 mm/sec และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารหน่วงไฟมากขึ้นอัตราเร็วของการเผาไหม้ก็จะยิ่งลดลง โดยยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 120 phr จะไม่ติดไฟเมื่อถูกเผาเป็นเวลานาน 30 วินาที จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าซีโอไลต์มีประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟได้ การที่ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นสารหน่วงไฟได้นั้นเนื่องมาจากการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุล ซึ่งการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุลนี้เองจะช่วยให้เปลวไฟจางลง และช่วยลดอุณหภูมิของเปลวไฟลง ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ลงได้ แต่การเติมซีโอไลต์ลงไปในยางธรรมชาติจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติลดลง

เมื่อมีการเติมเบนโทไนซ์ลงไปในยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ เบนโทไนซ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟให้กับซีโอไลต์ โดยช่วยชะลออัตราเร็วของการเผาไหม้ของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ช้าลง และนอกจากนี้การเติมเบนโทไนซ์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ให้ดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติในเรื่องความทนต่อแรงดึงและการฉีกขาด

เอกสารอ้างอิง

1. พงษ์ธร แซ่ฮุย (2547) – ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี
2. John S.Dick (2001)- **Rubber Technology : Compounding and Testing for Performance**, Hanser Publishers, Munich.

3. P. K. Patra, S.B. Warner, Y.K. Kim, Q. Fan and S. Adanur (2002) Nano Engineered Fire Resistant Composite Fibers - **National Textile Center Annual Report** , November(2002): 1-9.
4. <http://update.se-ed.com/192/zeolite.htm> (2005), บริษัท ซีอีดียูเคชั่น จำกัด(มหาชน)
5. H. Demir, E. Arkis, D. Balköse' and S. Ülkü (2005) Synergistic Effect of Natural Zeolites on Flame Retardant Additives - **Polymer Degradation and Stability**, 89(3): 478-483
6. C. Kumnuantip, S. Sreetano, T. Phanturat and B.Sanuthut (2006) The Effects of Loading Zeolite as a Flame Retardant on the Natural Rubber Properties -**Asian Workshop on Polymer Processing 2006 (AWPP 2006)**. Japan Society of Polymer Processing. 6-8 December 2006. Bangkok, Thailand : 29-32.
7. M. Alexandre and P. Dubois (2000) Polymer-layered Silicate Nanocomposite: Preparation, Properties and Use of a New Class of Materials - **Materials Science and Engineering**, 28: 1-63.
8. A. Akelah, N.S. El-Deen, A. Hiltner, E. Baer, and A. Moet (1995) Organophilic Rubber-Montmorillonite Nanocomposites- **Materials Letters**, 22: 97-102.
9. S. Varghese, J. Karger-Kocsis and K.G. Gatos (2003) Melt Compounding Epoxidized Natural Rubber/Layered Silicate Nanocomposite: structure-Properties Relationship- **Polymer**, 44: 3977-3983.
10. S. Varghese and J. Karger-Kocsis(2003) Natural Rubber-based Nanocomposite by Latex Compounding with Layered Silicates- **Polymer**, 44: 4921-4927.
11. R. Magaraphan, W. Thaijaroen and R. Lim-Ochakun (2003) Structure and Properties of Natural Rubber and Modified Montmorillonite Nanocomposites- **Rubber Chemistry and Technology**, 74(3) : 406-418.
12. P.L. Teh, Z.A.M. Ishak, A.S. Hashim, J. Karger-Kocsis and U.S. Ishiaku (2004) Effect of epoxidized Natural Rubber as a Compatibilizer in Melt Compounded Natural Rubber-Organoclay Nanocomposite- **European Polymer Journal**, 40: 2513-2521.
13. H. Zheng, Y. Zhang, Z. Peng, and Y. Zhang (2004) Influence of Clay Modification on the Structure and Mechanical Properties of EPDM/Montmorillonite Nanocomposite- **Polymer Testing**, 23: 217-223.
14. N. Sombatsompop (1999) Rheological Behaviour of Unvulcanised Natural Rubber Compounded with Cryogenically Pulverised Polyurethane Foam Particles - **Journal of Elastomers & Plastics**, 31 (3): 271-284.
15. รัตน์วรรณ มกรพันธ์ (ม.ป.ป.), - นาโนเคลย์/นาโนคอมโพสิต,
http://thaiscience.com/lab_vol/p18/NANOCLAY.asp.
16. พรพรรณ นิธิอุทัย (2528) – สารเคมีสำหรับยาง, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี