



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ชีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ

โดย น.ส. จันททิพ คำนวนทิพย์ และ คณะ

พฤษภาคม 2549

สัญญาเลขที่ RDG4950023

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ชีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย สังกัด

1. น.ส. ฉันททิพย์ คำนวนทิพย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
2. นาย สุทธิรักษ์ ศรีทะโน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
3. นาย เถกิง พันธุ์รัตน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
4. นาย บัณฑิต สาธุทัศน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ชุดโครงการ "โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา"

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย): การใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ

(ภาษาอังกฤษ): Using Zeolite as Flame Retardant in Natural Rubber

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล: ดร. ชันท์ทิพ คำนวนทิพย์

หน่วยงาน: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี

ที่อยู่: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี

ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ ธัญบุรี ปทุมธานี 12120

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

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

นักศึกษาร่วมโครงการ

ชื่อ-สกุล: นาย เถกิง พันธุ์รัตน์

ชื่อ-สกุล: นาย บัณฑิต สาธุทัศน์

ชื่อ-สกุล: นาย สุทธิรักษ์ ศรีทะโน

หน่วยงาน: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี

ที่อยู่: ภาควิชาวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี

ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล คลองหก อำเภอ ธัญบุรี ปทุมธานี 12120

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

ปัญหาที่ท้าวิจัยและความสำคัญ

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้สารหน่วงไฟชนิดใหม่ในยางธรรมชาติ อันได้แก่ สารซีโอไลต์ (zeolite) ซึ่งมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงก็จะสามารถปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเหล่านั้นออกมา อันจะเป็นการลดอุณหภูมิของระบบ และทำให้เปลวไฟจางลงได้ เนื่องจากซีโอไลต์มีองค์ประกอบของน้ำอยู่ในปริมาณที่มาก โครงการวิจัยนี้จึงมีความคาดหวังว่าในการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาตินั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่มากนัก และนำเทคโนโลยีดังกล่าวถ่ายทอดลงสู่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติภายในประเทศ เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการที่จะได้ใช้สารหน่วงไฟที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ และมีราคาถูก

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติการเป็นสารหน่วงไฟของซีโอไลต์ในยางธรรมชาติ
2. ศึกษาผลของซีโอไลต์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

ผลการดำเนินงาน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของซีโอไลต์ในการเป็นสารหน่วงไฟของยางธรรมชาติ ตลอดจนผลของซีโอไลต์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ โดยได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของยางที่มีการเติมซีโอไลต์ กับยางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟของซีโอไลต์ โดยเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม

ในงานวิจัยนี้จะทำการผสมยางธรรมชาติกับสารหน่วงไฟ ซึ่งได้แก่ซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 20-200 phr แล้วนำไปทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C และทำการทดสอบสมบัติต่างๆของยางดังต่อไปนี้

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

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ โดยจากผลการทดลองพบว่าปริมาณซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟที่ทัดเทียมกันอยู่ที่ปริมาณ ซีโอไลต์ 120 phr และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ 100 phr การที่ซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์สามารถใช้เป็นสารหน่วงไฟได้นั้นเนื่องมาจากการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุล ซึ่งการปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุลนี้เองจะช่วยให้เปลวไฟจางลงและช่วยลดอุณหภูมิของเปลวไฟลง ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ลงได้ และการที่อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์สามารถให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟได้ดีกว่าซีโอไลต์เล็กน้อยนั้นเป็นเพราะสามารถปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุลได้ในปริมาณที่มากกว่า และเมื่อพิจารณาผลของซีโอไลต์ที่มีต่อสมบัติอื่นๆของยางธรรมชาติพบว่า

- ซีโอไลต์จะมีผลในการเพิ่มค่าความหนืดมูนนี่ของยาง
- ซีโอไลต์จะมีผลให้ scorch time สั้นลงอัตราเร็วในการคงรูป (cure rate) แต่ไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูป (cure time) ของยาง
- ซีโอไลต์พฤติกรรมเป็นเหมือนสารตัวเติม (filler) โดยจะช่วยในการเพิ่มเนื้อให้กับยาง แต่ไม่มีผลต่อการเสริมแรง ไม่ให้ผลในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยาง

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ ถึงแม้ว่าจะต้องใช้ซีโอไลต์ในปริมาณที่มากกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เล็กน้อย (ประมาณ 20 phr) จึงจะให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟที่ทัดเทียมกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงราคาแล้วก็พบว่า ซีโอไลต์นั้นมีราคาที่ถูกกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และเมื่อพิจารณาถึงค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าของซีโอไลต์เมื่อเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อนำไปผสมในยางธรรมชาติในปริมาณที่เท่ากัน ยางธรรมชาติที่ผสมซีโอไลต์จะได้เนื้อของยางผสม (rubber compound) ที่มากกว่า อันสังเกตได้จากผลของค่าความหนาแน่นของยางที่ผสมซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่เท่ากัน ยางที่ผสมซีโอไลต์จะมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่า การที่ให้เนื้อของยางผสม (rubber compound) ที่มากกว่าและมีราคาที่ถูกว่านี้เอง น่าจะเป็นผลที่ส่งเสริมให้ การใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ จะช่วยในการลดต้นทุนการผลิตลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟของซีโอไลต์นั้น ควรจะลดอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางลง เพื่อจะได้ลดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ อันจะช่วยให้มีปริมาณน้ำหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างซีโอไลต์เพื่อจะปลดปล่อยออกมาในการยับยั้งการติดไฟได้มากขึ้น

ผลทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

ผลที่เกิดขึ้นจากการวิจัยนี้คาดว่าจะสามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับประเทศหรือระดับนานาชาติได้อย่างน้อย 1 ฉบับ

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของซีโอไลต์ในการเป็นสารหน่วงไฟของยางธรรมชาติ ตลอดจนผลของซีโอไลต์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ทั้งสมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ โดยได้ทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของยางที่มีการเติมซีโอไลต์ กับยางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟของซีโอไลต์ โดยเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่นิยมใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้จะทำการผสมยางธรรมชาติกับสารหน่วงไฟ ซึ่งได้แก่ซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ ตั้งแต่ 20-200 phr แล้วนำไปทำการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 160 °C และทำการทดสอบสมบัติต่างๆของยางทั้ง ความหนืดมูนนี่ พฤติกรรมการคงรูป สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และการติดไฟ

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ โดยจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่ให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟที่ทัดเทียมกันอยู่ที่ปริมาณ ซีโอไลต์ 120 phr และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ 100 phr และเมื่อพิจารณาผลของซีโอไลต์ที่มีต่อสมบัติอื่นๆของยางธรรมชาติพบว่า ซีโอไลต์พฤติกรรมเป็นเหมือนสารตัวเติม(filler)โดยจะช่วยในการเพิ่มเนื้อให้กับยาง แต่ไม่มีผลต่อการเสริมแรง ไม่ให้ผลในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยาง

ABSTRACT

This research aimed to investigate the effects of zeolite on the properties of the natural rubber as the flame retardant. The effects of zeolite and aluminum trihydrate, which is the ordinary flame retardant in the rubber industry, on the properties of the natural rubber were compared in this study. The natural rubber was compounded with zeolite and aluminum trihydrate in various ratios, 20 -200 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 the equal effective of 100 phr of aluminum trihydrate as the flame retardant of the natural rubber. When considered the effects of zeolite on the other properties of the natural rubber, it could be observed that, zeolite acted as the filler in the natural rubber but could not improved the mechanical properties of the vulcanites.

1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ของโลก ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่ทำรายได้เข้าประเทศ นับแสนล้านบาท และมีพื้นที่สำหรับปลูกยางทั่วประเทศถึง 12.3 ล้านไร่ [1] จากสถานการณ์ยางปี 2544 ราคายางธรรมชาติตกต่ำ ผลผลิตล้นตลาด โดยในปี 2544 ประเทศไทยผลิตยางธรรมชาติได้ถึง 2.41 ล้านตัน และเป็นประเทศที่ส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยสัดส่วนการส่งออกเป็นร้อยละ 42.3 ของปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติของโลก [2] โดยสถานการณ์ยางของประเทศไทยเมื่อปี 2544 ประเทศไทยส่งออกยางดิบแปรรูปเบื้องต้นถึง 90 % ของผลผลิต สร้างรายได้ 46,700 ล้านบาท และใช้เพียง 10 % ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใช้เองในประเทศและเหลือส่งออกสร้างรายได้จากการส่งออกได้ถึง 48,500 ล้านบาท จึงกล่าวได้ว่าการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้นสร้างมูลค่าเพิ่มได้ถึง 10 เท่า [3] จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าช่องว่างอันหนึ่งของการเติบโตของรายได้จากยางธรรมชาติของประเทศไทยคือการใช้ยางธรรมชาติผลิตผลิตภัณฑ์เพียง 10 % ตลาดที่สำคัญคือตลาดภายในประเทศ ซึ่งมีข้อมูลว่าในขณะที่ประเทศไทยมีรายได้จากการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางปีละ 48,000 ล้านบาทนั้น ประเทศไทยยังคงนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางถึงปีละ 16,000 ล้านบาทอีกด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยยังมีมูลค่าการตลาดภายในประเทศที่รอรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางอีกถึงปีละ 16,000 ล้านบาท ซึ่งเป็นการสร้างงานและลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศจากการนำเข้า [3]

จากข้อมูลข้างต้นจึงให้แนวความคิดว่าแนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการเพิ่มมูลค่าให้แกยางธรรมชาติ คือ การวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานที่หลากหลายยิ่งขึ้น เช่น ใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้าง ใช้เป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ ใช้ในการหุ้มสายไฟหรือสายเคเบิลต่างๆ สายพานลำเลียงต่างๆ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม แต่ก็มีสมบัติที่เป็นข้อด้อยหลายประการ เช่น มีความทนทานต่อการติดไฟที่ต่ำ [4] เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใช้สารเติมแต่ง (additive) เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ สำหรับการปรับปรุงสมบัติในเรื่องความทนทานต่อการติดไฟนั้นจำเป็นต้องใช้สารเติมแต่ง ที่เรียกว่า สารหน่วงไฟ (flame retardant) เพื่อช่วยในการชะลอการติดไฟของยาง หรือทำให้ยางนั้นไม่ลุกไหม้ติดไฟได้เอง หรือสามารถดับไฟได้เอง เมื่อเกิดการลุกไหม้เกิดขึ้น สารหน่วงไฟที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น อันติโมนีออกไซด์ (antimony oxide) เป็นสารหน่วงไฟที่เหมาะสมสำหรับยางที่มีองค์ประกอบของธาตุฮาโลเจนอยู่ หรือถ้าไม่มี เช่น ยางธรรมชาติ ก็ต้องมีการใส่สารเติมแต่งที่มีองค์ประกอบของฮาโลเจน เช่น chlorinated rubber powder ลงไป เพื่อจะเกิดการทำงานร่วมกันกับ อันติโมนีออกไซด์ เพราะถ้ามีธาตุฮาโลเจนอยู่ในระบบจะไม่มีผลต่อการต้านทานการลุกติดไฟ [5] นอกจากนี้ อันติโมนีออกไซด์ยังมีราคาสูงถึงประมาณกิโลกรัมละ 180 บาท สารหน่วงไฟอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ คือ อลูมินาไฮเดรต (alumina hydrate) โดยสารหน่วงไฟชนิดนี้จะปลดปล่อยน้ำออกมาที่อุณหภูมิประมาณ 210-220 องศาเซลเซียส [5] อันจะทำให้เปลวไฟางลงพร้อมกับอุณหภูมิของเปลวไฟจะค่อยๆ ลดลง ทำให้การติดไฟเกิดยากขึ้น แต่เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงต้องใช้เป็นปริมาณมาก ในทางที่ไม่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น ยางธรรมชาติ ต้องใช้ในปริมาณถึง 80-250 phr [5]

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการใช้สารหน่วงไฟชนิดใหม่ในยางธรรมชาติ อันได้แก่ สารซีโอไลต์ (zeolite) ซึ่งมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงก็จะสามารถปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำเหล่านั้นออกมา อันจะเป็นการลดอุณหภูมิของระบบ และทำให้เปลวไฟางลงได้ เนื่องจากซีโอไลต์มีองค์ประกอบของน้ำอยู่ในปริมาณที่มาก โครงการวิจัยนี้จึงมีความคาดหวังว่าในการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ นั้น ไม่จำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่มากนัก นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังมีราคาต่ำอยู่ที่ประมาณกิโลกรัมละ

30 บาท และทางคณะผู้วิจัยได้มีความประสงค์ที่จะร่วมมือกับ บริษัท พีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด ผู้ผลิตซีโอไลต์ในประเทศไทย เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติและนำเทคโนโลยีดังกล่าวถ่ายทอดลงสู่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติภายในประเทศ เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการที่จะได้ใช้สารหน่วงไฟที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศ และมีราคาถูก อันจะนำไปสู่การลดการขาดดุลการนำเข้าสารเคมีจากต่างประเทศ ตลอดจนเพิ่มข้อได้เปรียบในทางการค้ากับประเทศคู่แข่งเพราะสามารถใช้วัตถุดิบในราคาต่ำลงได้

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษามลพิษที่เป็นสารหน่วงไฟของซีโอไลต์ในยางธรรมชาติ และศึกษาผลของซีโอไลต์ต่อสมบัติของยางธรรมชาติ

3. ทฤษฎีแนวคิดในการทำงานวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน(หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน(หรืออะลูมิเนียม)อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม(ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิกอน(หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก [6] ในโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะใช้สารซีโอไลต์ซึ่งผลิตได้ภายในประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้สารซีโอไลต์ประเภท โซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต (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 ผลิตโดยบริษัทพีคิว เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติ จากสูตรโครงสร้างดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสารซีโอไลต์มีน้ำเป็นองค์ประกอบในโครงผลึกถึง 27 โมเลกุล และการที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบนี้เอง จึงนำไปสู่สมมติฐานที่ว่า เมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงสารซีโอไลต์ดังกล่าวก็จะสามารถปลดปล่อยน้ำออกมาจากโครงผลึก และน้ำดังกล่าวนี้จะช่วยทำให้เปลวไฟจางลง และลดอุณหภูมิของระบบ และช่วยชะลอการติดไฟของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติได้ในที่สุด

จากการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลทางวิชาการ พบว่าในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาผลของการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติอย่างชัดเจนนัก แต่ได้มีการศึกษาการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในเทอร์โมพลาสติกบางชนิดดังนี้

Parbir K. Patra และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเส้นใยไนลอน6 (nylon6) ให้มีความทนต่อการติดไฟโดยมีการใช้ Laptonite ซึ่งเป็นนาโนเคลย์ (nanoclay) และซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟพบว่า Laptonite เป็นสารที่ช่วยเพิ่ม

ความต้านทานการติดไฟของเส้นใยในลอน 6 และความต้านทานการติดไฟของเส้นใยดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อมีสารซีโอไลต์อยู่ภายในระบบ

H. Demir และคณะ [8] ศึกษาการใช้สารซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟร่วมกับสาร แอมโมเนียม โพลีฟอสเฟต (ammonium polyphosphate) ในโพลิพรอพิลีน (polypropylene) โดยใช้สารซีโอไลต์ในปริมาณต่างกัน ได้แก่ 1, 2, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก และทำการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) โดยใช้เครื่อง TGA และทำการวัดค่า limiting oxygen index (LOI) และทำการทดสอบการติดไฟแบบ horizontal burning HB พบว่าสารซีโอไลต์ที่ใส่เข้าไปในระบบมีผลในการส่งเสริมประสิทธิภาพในการต้านทานการติดไฟของโพลิพรอพิลีนได้

4. วิธีการ

ในงานโครงการวิจัยนี้มีสมมุติฐานว่าซีโอไลต์น่าจะมีความสามารถในการถูกใช้เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ เนื่องจากมีน้ำเป็นจำนวนมากเป็นองค์ประกอบ ภายในโมเลกุลของซีโอไลต์ ดังที่กล่าวมาแล้ว และเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะปลดปล่อยน้ำออกมาในระบบ และช่วยชะลอในการติดไฟของยางได้ ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สารซีโอไลต์ประเภท โซเดียมอลูมิโนซิลิเกต (sodium aluminosilicate) มีสูตรโครงสร้าง $\text{Na}_{12}[\text{Al}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{48}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ และมีชื่อทางการค้าคือ Advera 401PS ผลิตโดยบริษัทพีทีที เคมิคอลส์ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติและทำการทดสอบสมบัติต่างๆ โดยเปรียบเทียบสมบัติต่างๆกับ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต (Aluminium trihydrate) ซึ่งเป็นสารหน่วงไฟที่นิยมใช้ในยางธรรมชาติ ซึ่งจะแบ่งกระบวนการทำงานเป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การผสมยางกับสารเคมี (Rubber Compounding)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการผสมยางธรรมชาติกับสารที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์และสารหน่วงไฟ โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) อัตราส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในการผสมยาง

สารเคมี	ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ ในยางธรรมชาติที่ใช้ ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟ (phr)	ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในยางธรรมชาติที่ใช้ อะลูมิเนียมไตรไฮดรตเป็นสารหน่วงไฟ (phr)
ยางธรรมชาติ (STR20)	100	100
ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)	5	5
กรดสเตียริก (stearic acid)	2	2
Mercaptobenzthiasoles (MBT)	0.5	0.5
Diphenylguanidine (DPG)	0.2	0.2
กำมะถัน (sulphur)	3	3
ซีโอไลต์ (zeolite)	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180 และ 200	-
อะลูมิเนียมไตรไฮดรต (aluminium trihydrate)	-	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 180 และ 200

อย่างที่ผ่านมาการผสมสารเคมีแล้วนั้นจะถูกนำมาทดสอบสมบัติดังนี้

- ความหนืดมูนนี่ (Mooney Viscosity) โดยใช้เครื่อง Mooney Viscometer ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 289-1
- พฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristics) โดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการทำให้ยางคงรูป (Rubber Vulcanization)

ในขั้นตอนนี้เป็นการวัลคาไนซ์ยางที่ผ่านการผสมสารเคมีในขั้นตอนที่ 1 โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางนั้นมาจากการหาค่า Cure time (t_{c90}) ที่ได้จากการหาพฤติกรรมการคงรูปของยางโดยใช้เครื่อง ODR

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบสมบัติต่างๆของยางวัลคาไนซ์ (Vulcanisates Properties Testing)

ในขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบสมบัติต่างๆของยางวัลคาไนซ์ ทั้งสมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกล และการทนต่อการติดไฟ โดยมีสมบัติที่ทำการทดสอบดังนี้

สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- ความหนาแน่น (Density) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 792
- ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink Density)

ในการหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางจะทำโดยกระบวนการ Swelling Method โดยจะนำยางวัลคาไนซ์ไปแช่ในตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene) และทำการคำนวณหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink Density) โดยใช้สมการ Flory – Rehner

$$-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2 = 2V_s \eta_{swell} \left(V_r^{1/3} - \frac{2V_r}{f} \right)$$

เมื่อ V_r = ปริมาตรของยางในการบวมตัวในของเหลว

V_s = ปริมาณ mol ของ โทลูอีน (ในการใช้งาน 106.2 cm³/mol)

χ = ผลรวมของตัวทำละลาย (ในกรณี 0.3795)

η_{swell} = ความหนาแน่นความเชื่อมโยงของยาง (mol/cm³)

f = โครงสร้างของการเชื่อมโยง (สำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์)

สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

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

สมบัติการติดไฟ

- การทดสอบการติดไฟ (Flammability) ทดสอบตามมาตรฐาน UL 94

การทดสอบมาตรฐานความสามารถในการติดไฟแบบ UL 94 คือ วิธีการทดสอบมาตรฐานความสามารถในการติดไฟด้วยวิธีการ BURNERFLAMMABILITY ซึ่งจะสามารถทดสอบได้ 2 แบบคือ แบบ HB TEST และ V TEST

HB TEST คือวิธีการทดสอบความสามารถในการติดไฟของชิ้นงานตามแนวนอน โดยการนำชิ้นงานมาเผาด้วยเปลวไฟเป็นเวลานาน 30 วินาที กำหนดระยะเวลาของชิ้นงานตามแนวนอนห่างจากเปลวไฟ ไม่เกิน 25.4 มิลลิเมตร และตั้งเปลวไฟเพียง 45 องศา

V TEST คือ วิธีการทดสอบความสามารถในการติดไฟของชิ้นงานตามแนวตั้ง โดยใช้เปลวไฟที่มีความสูง 38 มิลลิเมตร และตั้งเปลวไฟเพียง 45 องศา

- การทดสอบหาค่าอุณหภูมิสลายตัว (Degradation Temperature, T_d) ทดสอบโดยใช้เครื่อง Thermogravimetry Analyzer (TGA) โดยช่วงอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบอยู่ที่ 0-500 °C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 °C/นาที

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยในครั้งนี้แบ่งเป็นผลของสารหน่วงไฟ ซึ่งในการทดลองนี้ได้แก่ ซีโอไลต์ และอลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อยางผสมสารเคมีที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (Green Compound) และยางวัลคาไนซ์ (Vulcanisates)

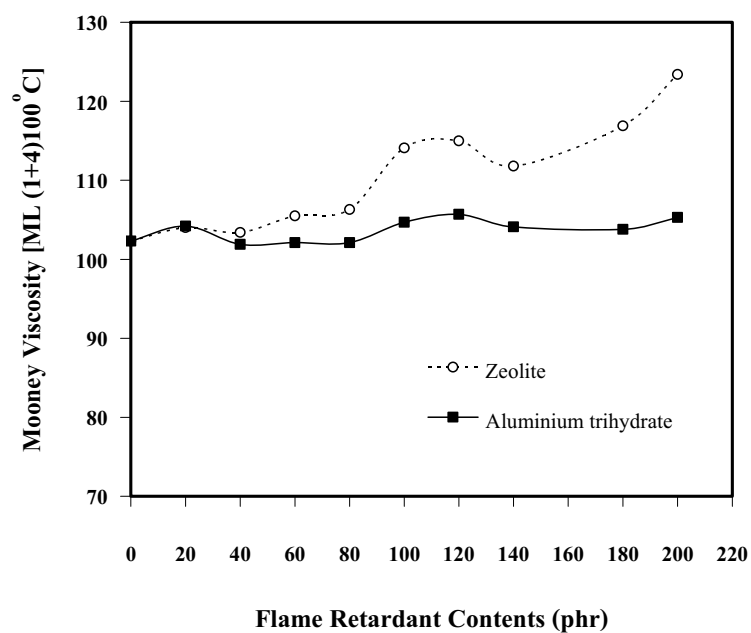
5.1 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อยางธรรมชาติผสมสารเคมีที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

5.1.1 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อความหนืดมูนี

ตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.1 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดมูนี กับปริมาณของสารหน่วงไฟ จะเห็นว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟ อันได้แก่ ซีโอไลต์และอลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดมูนีของระบบสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารหน่วงไฟจะมีค่าความหนืดมูนีเท่ากับ 102.30 (ML (1+4) 100 °C) ในขณะที่ ยางธรรมชาติที่มีการเติม ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในปริมาณ 200 phr มีค่าความหนืดมูนี 123.40 (ML (1+4) 100 °C) ยางธรรมชาติที่มีการเติม อลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟในปริมาณ 200 phr มีค่าความหนืดมูนี 105.30 (ML (1+4) 100 °C) และจากผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ จะมีผลต่อค่าความหนืดมูนีของยางธรรมชาติ มากกว่าอลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าความหนืดมูนี (Mooney Viscosity) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	ค่าความหนืดมูนี(Mooney Viscosity) [ML(1+4)100 °C]	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	102.30	102.30
20	104.00	104.20
40	103.40	101.90
60	105.50	102.10
80	106.30	102.10
100	114.10	104.70
120	115.00	105.70
140	111.80	104.10
180	116.90	103.80
200	123.40	105.30



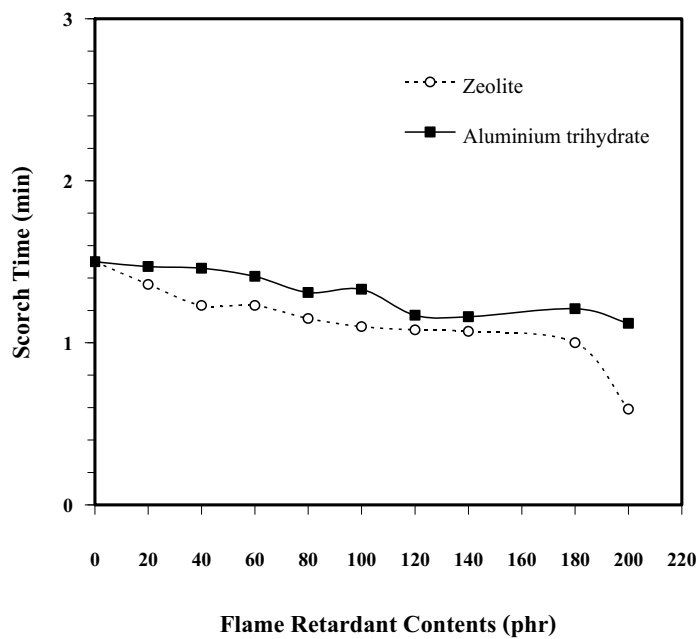
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดมูนี กับ ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

5.1.2 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อพฤติกรรมการคงรูปของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.2 และ รูปที่ 5.2 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า scorch time (t_2) กับปริมาณของสารหน่วงไฟ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟ อันได้แก่ ซีโอไลต์และอลูมิเนียมไตรไฮดรต มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่า Scorch time ของระบบลดลง โดยที่ยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมสารหน่วงไฟจะมีค่า scorch time เท่ากับ 1.50 นาที ในขณะที่ ยางธรรมชาติที่มีการเติม ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟในปริมาณ 200 phr มีค่า scorch time เท่ากับ 0.59 นาที ยางธรรมชาติที่มีการเติม อลูมิเนียมไตรไฮดรตเป็นสารหน่วงไฟในปริมาณ 200 phr มีค่า scorch time เท่ากับ 1.12 นาที และจากผลการทดลอง พบว่า ซีโอไลต์ จะมีผลต่อค่า scorch time ของยางธรรมชาติ มากกว่าอลูมิเนียมไตรไฮดรต

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่า Scorch time (t_2) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็น สารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	Scorch time(t_2) (นาที)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	1.50	1.50
20	1.36	1.47
40	1.23	1.46
60	1.23	1.41
80	1.15	1.31
100	1.10	1.33
120	1.08	1.17
140	1.07	1.16
180	1.00	1.21
200	0.59	1.12

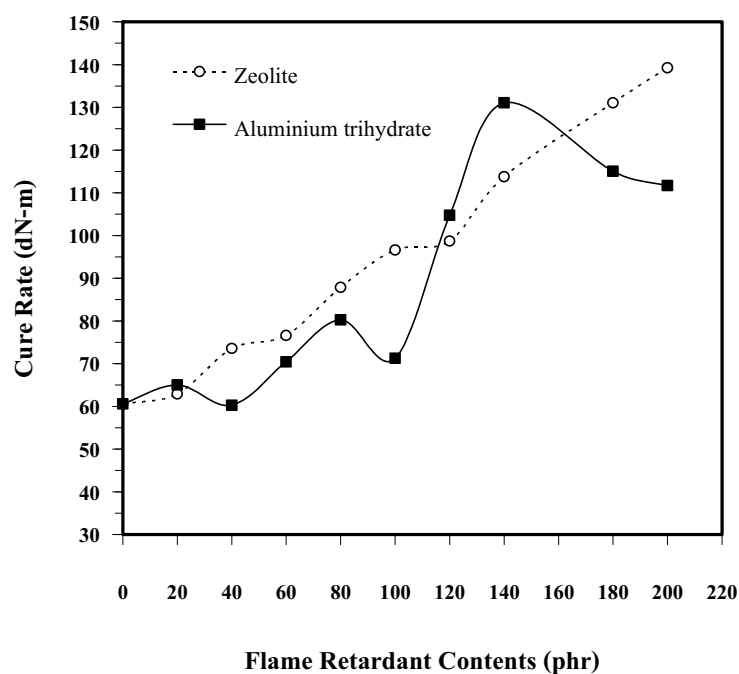


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Scorch Time กับ ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cure Rate กับปริมาณสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ พบว่า เมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟเพิ่มขึ้น ค่า Cure Rate จะสูงขึ้นเรื่อยๆ แสดงว่ายางในระบบมีอัตราเร็วในการเกิดการวัลคาไนซ์ที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟอันได้แก่ ซีโอไลต์ และ อลูมิเนียมไตรไฮดรต มีปริมาณเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงค่า Cure Rate ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	ค่า Cure Rate (dN-m)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	60.59	60.59
20	62.91	65.01
40	73.554	60.267
60	76.605	70.436
80	87.859	80.266
100	96.604	71.249
120	98.705	104.739
140	113.755	131.042
180	131.042	115.043
200	139.245	111.654

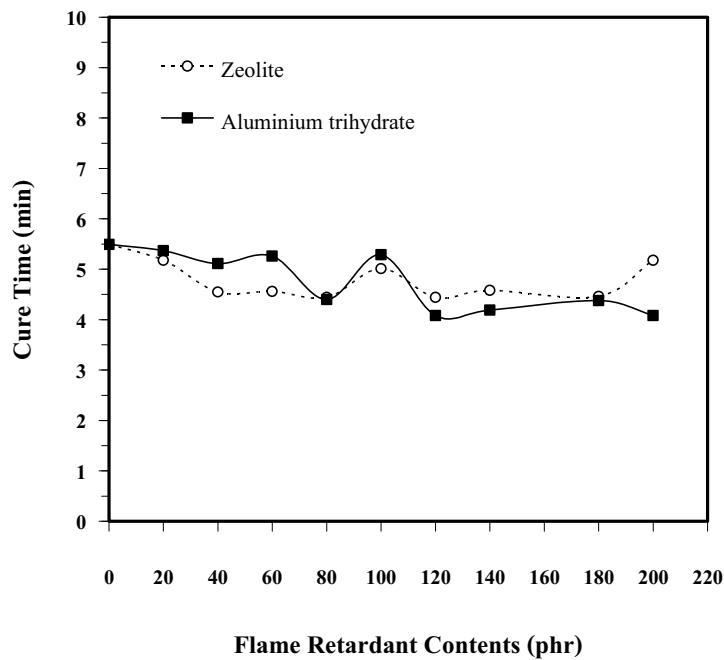


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cure Rate กับ ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.4 และจากรูปที่ 5.4 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า cure time กับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารหน่วงไฟอันได้แก่ ซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตลงในยางธรรมชาติ นั้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Cure Time ของระบบ

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงค่า Cure Time (t_{90}) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	ค่า Cure time t_{90} (min)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	5.49	5.49
20	5.18	5.37
40	4.55	5.11
60	4.56	5.26
80	4.44	4.4
100	5.01	5.29
120	4.44	4.08
140	4.58	4.19
180	4.46	4.38
200	5.18	4.08



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cure Time กับ ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

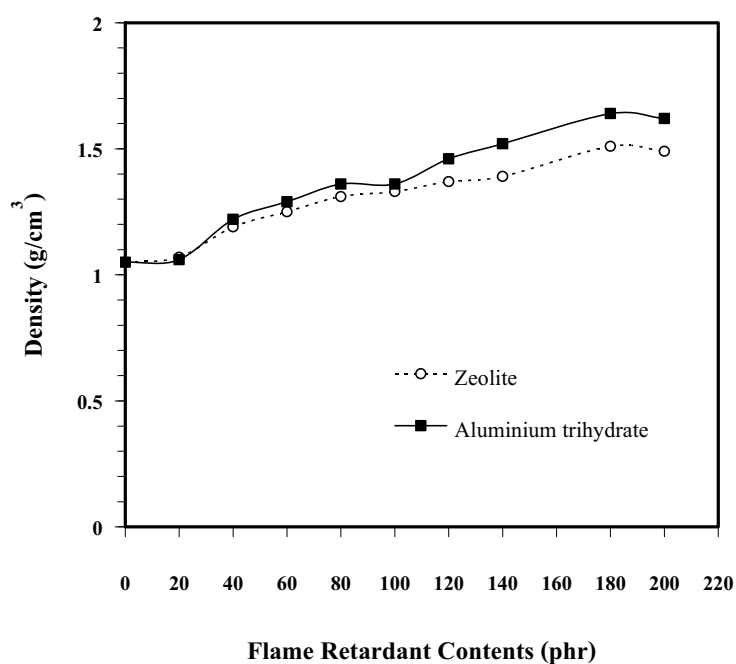
5.2 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์

5.2.1 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.5 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น กับปริมาณสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ จากการทดลองพบว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารหน่วงไฟจะมีความหนาแน่น 1.05 g/cm^3 และเมื่อมีการเติมสารหน่วงไฟลงไปในระบบจะทำให้ค่าความหนาแน่นของยางมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงไป โดยยางธรรมชาติที่มีการใช้อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟจะมีความหนาแน่นสูงกว่ายางธรรมชาติที่มีการใช้ซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟ โดยยางธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ 200 phr จะมีค่าความหนาแน่น 1.62 g/cm^3 ในขณะที่ยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ 200 phr จะมีค่าความหนาแน่น 1.49 g/cm^3

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงค่า ความหนาแน่นของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	Density (g/cm ³)	
	Zeolite	Aluminium tri hydrate
0	1.05	1.05
20	1.07	1.06
40	1.19	1.22
60	1.25	1.29
80	1.31	1.36
100	1.33	1.36
120	1.37	1.46
140	1.39	1.52
180	1.51	1.64
200	1.49	1.62

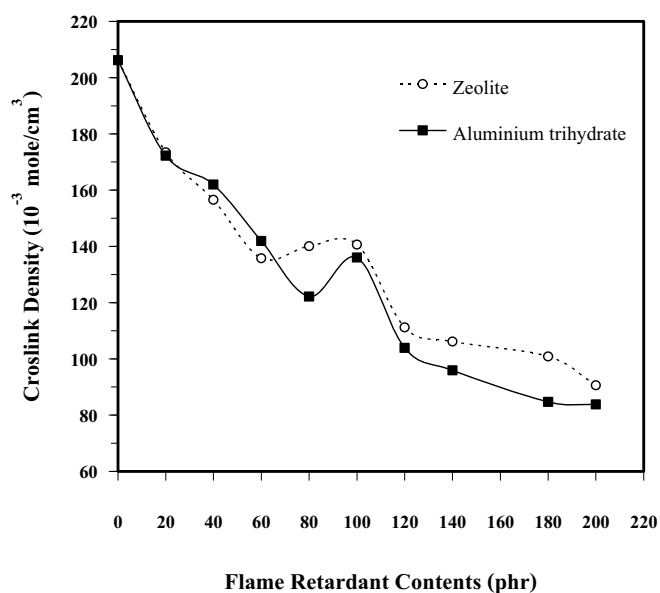


รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density) กับ ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้น จะ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางลดลง โดยทั้งซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่า ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซี โอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วง ไฟ (phr)	Crosslink Density (10^{-3} mole/cm ³)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	206.17	206.17
20	173.45	172.24
40	156.53	161.97
60	135.75	141.87
80	140.08	122.12
100	140.65	136.01
120	111.15	103.90
140	106.17	95.89
180	100.86	84.68
200	90.59	83.80



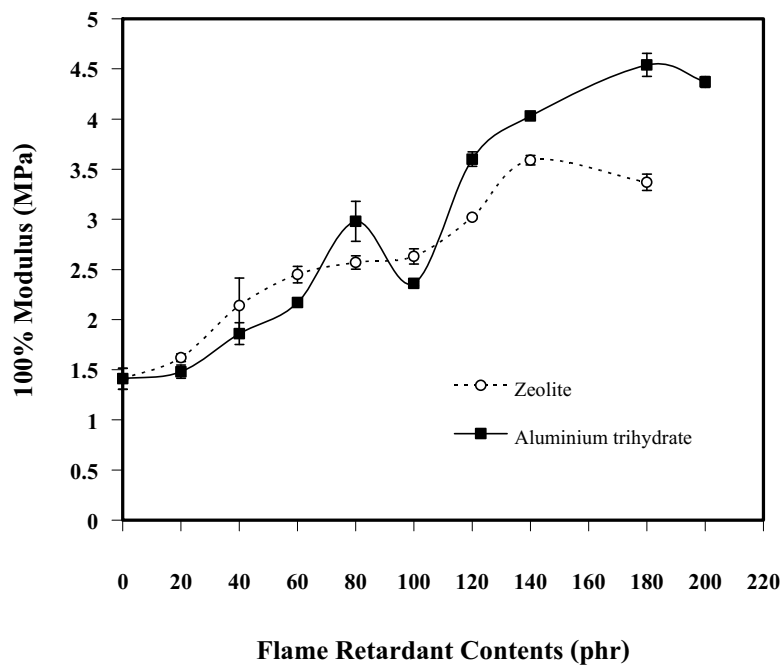
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางกับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

5.2.2 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 5.7 และ รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% Modulus และปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารหน่วงไฟลงในยางธรรมชาติจะทำให้ค่า 100% Modulus มีค่าสูงมากขึ้น โดยในช่วงของปริมาณสารหน่วงไฟ 20-100 phr ค่า 100% Modulus จากยางที่มีการเติมซีโอไลต์ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากยางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรต แต่เมื่อปริมาณสารหน่วงไฟมีค่าตั้งแต่ 120 phr เป็นต้นไป ค่า 100% Modulus จากยางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรตจะมีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากยางที่มีการเติมซีโอไลต์เป็นสารหน่วงไฟ ในกรณีของยางที่มีการเติมซีโอไลต์ 200 phr เป็นสารหน่วงไฟไม่สามารถหาค่า 100% Modulus ได้เนื่องจากยางถูกดึงจนขาดออกก่อนที่จะมีการยืดตัวถึง 100% elongation

ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงค่า 100%Modulus ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	100% Modulus (MPa)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	1.41	1.41
20	1.62	1.48
40	2.14	1.86
60	2.45	2.17
80	2.57	2.98
100	2.63	2.36
120	3.02	3.60
140	3.59	4.03
180	3.37	4.54
200	ไม่สามารถวัดได้	4.37

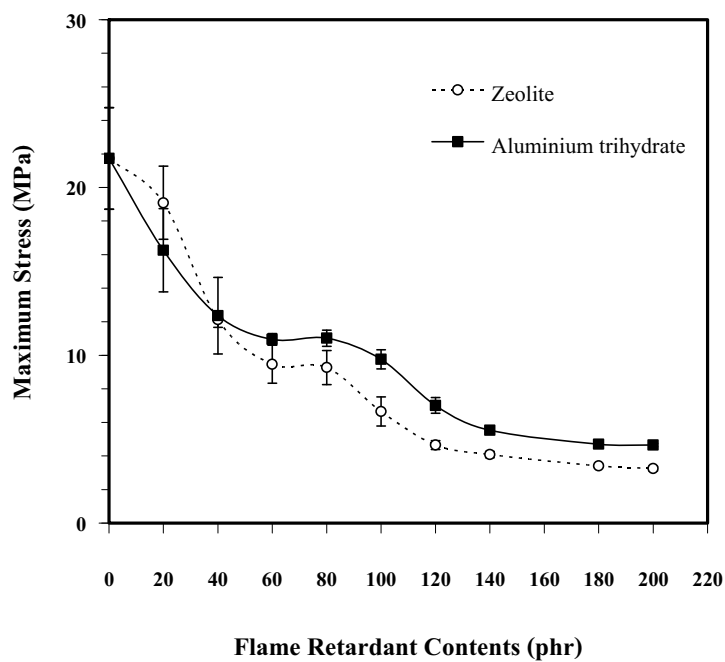


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% Modulus กับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.8 และ รูปที่ 5.8 , ตารางที่ 5.9 และ รูปที่ 5.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุดกับปริมาณสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดกับปริมาณสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าทั้งซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อเพิ่มปริมาณสารหน่วงไฟจะทำให้ค่าแรงดึงสูงสุดและการยืดตัวออก ณ จุดขาด ของยางมีค่าลดลง

ตารางที่ 5.8 ตารางแสดงค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Stress) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรเอต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

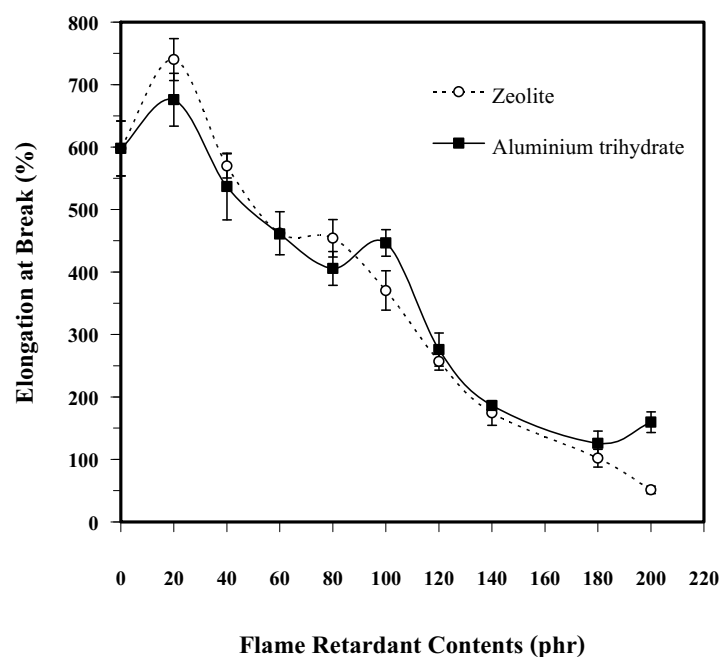
ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	Maximum Stress (MPa)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	21.73	21.73
20	19.09	16.26
40	12.12	12.36
60	9.47	10.95
80	9.27	11.02
100	6.65	9.76
120	4.65	7.01
140	4.08	5.53
180	3.41	4.70
200	3.25	4.65



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงสูงสุด กับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	Elongation at Break (%)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	597.81	597.81
20	740.07	675.73
40	569.66	536.95
60	462.14	460.84
80	454.11	405.65
100	370.33	446.57
120	256.84	275.74
140	174.41	186.29
180	102.07	125.59
200	51.26	159.65

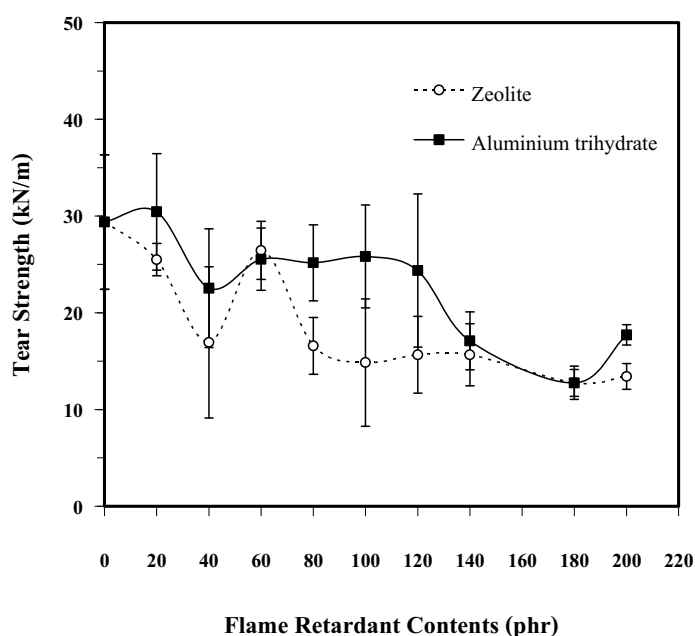


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัว ณ จุดขาด กับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.10 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงทนต่อการฉีกขาดกับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟทั้งซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าแรงทนต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มมีค่าลดลง

ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงค่าแรงทนต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต เป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	Tear Strength (kN/m)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	29.39	29.39
20	25.50	30.44
40	16.95	22.54
60	26.45	25.54
80	16.58	25.17
100	14.86	25.82
120	15.66	24.36
140	15.66	17.10
180	12.77	12.75
200	13.42	17.71

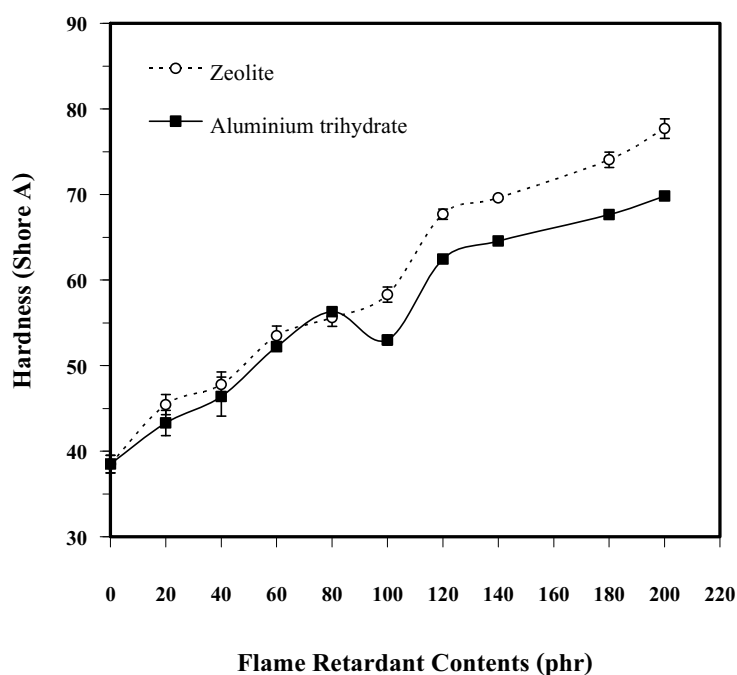


รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงทนต่อการฉีกขาด กับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟทั้งซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งของยางเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงค่าความแข็ง (Hardness) ของยางธรรมชาติที่มีการผสม ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรตเป็นสารหน่วงไฟ ในปริมาณต่างๆ

ปริมาณสารหน่วงไฟ (phr)	Hardness (Shore A)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	38.50	38.50
20	45.45	43.30
40	47.80	46.40
60	53.50	52.20
80	55.60	56.30
100	58.30	53.00
120	67.70	62.45
140	69.60	64.55
180	74.05	67.65
200	77.70	69.80



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง กับปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงในยางธรรมชาติ

5.2.3 ผลของสารหน่วงไฟต่อสมบัติการติดไฟของยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.12 พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 120 phr ขึ้นไป และธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณตั้งแต่ 100 phr ไปจะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 ในการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST นั้นการที่ชิ้นงานทดสอบมีระดับการติดไฟอยู่ในระดับ V-0 หมายถึงเมื่อชิ้นงานถูกไฟในแนวตั้งโดยให้เปลวไฟเพียงทำมุม 45 องศา เป็นเวลา 10 วินาที และเมื่อนำเปลวไฟออกจากชิ้นงานแล้ว ไฟที่ติดอยู่ที่ชิ้นงานสามารถดับลงได้ภายใน 30 วินาที

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบการติดไฟ (Flammability) ตามมาตรฐาน UL94 แบบ V TEST ของยางธรรมชาติที่มีการใช้ซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์เป็นสารหน่วงไฟ

ปริมาณ Retardant (phr)	Flame Test (V-TEST)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
20	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
40	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
60	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
80	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
100	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	V-0
120	V-0	V-0
140	V-0	V-0
180	V-0	V-0
200	V-0	V-0

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.13 พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 60 phr ขึ้นไป และธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณตั้งแต่ 40 phr ขึ้นไปจะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST มีค่า อัตราเร็วของการเผาไหม้ (Burning Rate) ต่ำกว่า 30 mm/sec และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารหน่วงไฟมากขึ้นอัตราเร็วของการเผาไหม้ก็จะยิ่งลดลง โดยยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณตั้งแต่ 120 phr ขึ้นไป และธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณตั้งแต่ 80 phr ขึ้นไป จะไม่ติดไฟเมื่อถูกเผาเป็นเวลานาน 30 วินาที ในการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST นั้นชิ้นงานจะถูกเผาในแนวนอนโดยให้เปลวไฟเพียงทำมุม 45 องศา เป็นเวลา 30 วินาที หรือจนเผาไหม้ชิ้นงานผ่านจุดที่กำหนดเป็นระยะทาง 1 นิ้ว หลังจากนั้นนำเปลวไฟออก หลังจากนั้นทำการจับเวลาที่เปลวไฟเผาไหม้ชิ้นงานต่อไปจนได้ระยะทางรวมทั้งหมดตั้งแต่ตอนแรกเป็นระยะทาง 4 นิ้ว โดยชิ้นงานที่มีความหนาตั้งแต่ 0.12 – 0.50 นิ้วต้องมีอัตราเร็วในการเผาไหม้ที่ต่ำกว่า 1.5 นิ้ว/นาที หรือ 38 มิลลิเมตร/นาที จึงจะอยู่ในมาตรฐานการทดสอบ หรือไฟที่ชิ้นงานดับก่อนที่จะเผาไหม้ชิ้นงานเป็นระยะทาง 4 นิ้ว จึงจะอยู่ในมาตรฐานการทดสอบ

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบการติดไฟ (Flammability) ตามมาตรฐาน UL94 แบบ HB TEST ของยางธรรมชาติที่มีการใช้ซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตเป็นสารหน่วงไฟ

ปริมาณ Flame Retardant (phr)	Flammability Test (HB-TEST) ; Burnig Rate (mm/min.)	
	Zeolite	Aluminium trihydrate
0	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
20	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน
40	ผลการทดสอบไม่อยู่ในมาตรฐาน	29.26
60	23.39	19.75
80	17.02	ไม่ติดไฟ
100	10.47	ไม่ติดไฟ
120	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
140	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
180	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
200	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.14 โดยการนำ ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต วิเคราะห์หาอุณหภูมิที่มีการสลายตัวและปลดปล่อยน้ำออกมาโดยเครื่อง Thermogravimetry Analysis (TGA) พบว่า ซีโอไลต์ จะมีการปลดปล่อยน้ำออกมา 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิ 137.37 °C ปลดปล่อยน้ำออกมา 16.09 % และ ช่วงอุณหภูมิ 324.52 °C ปลดปล่อยน้ำออกมา 2.722 % ส่วนอะลูมิเนียมไตรไฮดรตจะปลดปล่อยน้ำออกมา 31.68 % ใน ช่วงอุณหภูมิ 275.52 °C

ตารางที่ 5.14 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำออกโครงสร้างของ ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต

ชนิดของสารหน่วงไฟ	อุณหภูมิของการปลดปล่อยน้ำ (°C)	ปริมาณน้ำที่ปลดปล่อย (%)
Zeolite	137.37	16.09
	324.52	2.722
Aluminium trihydrate	275.52	31.68

ผลการทดลองในตารางที่ 5.15 ได้จากการนำยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรต ไปศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อน จากเครื่อง Thermogravimetry Analysis (TGA) พบว่ายางที่มีการเติมซีโอไลต์ มีการปลดปล่อยน้ำออกมาใน 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิ 170.25 - 193.28 °C และ ช่วงอุณหภูมิ 294.95 – 304.34 °C ในขณะที่ ยางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรต จะมีการปล่อยน้ำในช่วง

อุณหภูมิ 304.78-325.94 °C และพบว่ายางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรต มีการปลดปล่อยน้ำออกมาในปริมาณที่มากกว่ายางที่มีการเติมซีโอไลต์

ตารางที่ 5.15 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่มีการปลดปล่อยน้ำออกจากโครงสร้างของ ซีโอไลต์ และ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต ที่มีการเติมลงในยางธรรมชาติ

ชนิดและปริมาณของสารหน่วงไฟ (phr)	อุณหภูมิที่ปลดปล่อยน้ำ (°C)	ปริมาณการปลดปล่อยน้ำ (%)
Zeolite 80 (phr)	180.81	7.957
	294.95	2.387
Zeolite 100 (phr)	193.28	4.907
	304.34	6.698
Zeolite 120 (phr)	170.25	8.267
	297.56	5.14
Aluminium tri hydrate 80 (phr)	304.78	15.36
Aluminium tri hydrate 100 (phr)	307.64	16.0209
Aluminium tri hydrate 120 (phr)	325.94	17.238

6. วิจัยผลการวิจัย

6.1 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่ออย่างธรรมชาติผสมสารเคมีที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

6.1.1 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อความหนืดมูนิ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 พบว่าเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดมูนิมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะสารหน่วงไฟที่เติมลงไปเป็นอนุภาคของแข็งจึงเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติ [9] อันเป็นการส่งผลให้ความหนืดมูนิของยางมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อพิจารณาผลของการเติมซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรตที่มีต่อความหนืดมูนิของยางธรรมชาติ พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์ในปริมาณที่เท่ากันจะมีค่าความหนืดมูนิที่สูงกว่ายางที่เติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรต ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นของซีโอไลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรต พบว่าซีโอไลต์มีความหนาแน่น อยู่ในช่วง 0.5-0.75 g/cm³ ในขณะที่อะลูมิเนียมไตรไฮดรตมีความหนาแน่น 2.4 g/cm³ จากการที่ซีโอไลต์มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรตถึงประมาณ 3.2-4.8 เท่า ดังนั้นในน้ำหนักที่เท่ากัน ซีโอไลต์ จะมีปริมาตรสูงกว่าและมีจำนวนอนุภาคที่มากกว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรต จึงมีอนุภาคของแข็งที่ลงไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่โมเลกุลของยางมากกว่า จึงส่งผลให้ยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอไลต์มีค่าความหนืดมูนิที่สูงกว่ายางที่เติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรต

6.1.2 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อพฤติกรรมการคงรูปของยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2 พบว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ scorch time ลดลง แต่จะเพิ่ม อัตราเร็วของการคงรูป (cure rate) มากยิ่งขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3 แต่ปริมาณของสารหน่วงไฟที่เติมลงไปจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ใช้ในการทำให้ง่ายคงรูป (cure time) ดังแสดงในตารางที่ 5.4

6.2 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์

6.2.1 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.5 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของสารหน่วงไฟมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของยางมีค่าสูงขึ้น และยางที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดจะมีความหนาแน่นสูงกว่ายางที่มีการเติมซีโอโลต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่า จึงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของยางมากกว่า

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.6 พบว่าเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density) ของยางลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากซีโอโลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดที่เติมลงไปนั้นมียุติกรรมเป็นสารเพิ่มเนื้อ ที่ไม่ได้เกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารหน่วงไฟกับยางธรรมชาติ ซีโอโลต์และอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางเท่านั้นส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลของยางมากยิ่งขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานยางลงไปแช่ในตัวทำละลายโทลูอิน โมเลกุลของโทลูอินจึงเข้าไปแทรกในระหว่างโมเลกุลของยางได้มากขึ้นเกิดการบวมตัว (swelling) ได้มากขึ้น จึงทำให้คำนวณค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางลดลง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะตรงข้ามกับสารตัวเสริมแรง (reinforcing filler) ที่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของยางกับสารตัวเติมจึงทำให้ตัวทำละลายเข้าไปแทรกในระหว่างโมเลกุลของยางได้ลดลง [10,11,12]

6.2.2 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อสมบัติเชิงกล

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.7 พบว่าเมื่อปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า 100% Modulus ของยางสูงขึ้น เนื่องจากอนุภาคของสารหน่วงไฟเป็นของแข็งที่มีค่า Modulus ที่สูงกว่ายางธรรมชาติและเมื่อเติมลงไปนั้นยางธรรมชาติจึงทำให้ค่า Modulus โดยรวมของระบบสูงมากขึ้น และนอกจากนี้การที่อนุภาคของสารหน่วงไฟเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางนั้นก็ส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่า Modulus ได้เช่นกัน [13]

และการที่ค่าแรงดึงสูงสุด (maximum stress) และค่าการยืดตัวออก ณ จุดขาด (elongation at break) ของยางมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นนั้น เป็นผลมาจากไม่มีแรงกระทำเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของยางและสารหน่วงไฟ สารหน่วงไฟที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นเหมือนสารตัวเติม (filler) ที่เข้าไปแทรกตัวในเนื้อยางเท่านั้น แต่ไม่เกิดการเสริมแรงจึงทำให้สมบัติในการทนต่อแรงดึงลดลงดังผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.8 และ 5.9 และการที่ไม่เกิดการเสริมแรงนี้เองก็ส่งผลให้ค่าการทนต่อการฉีกขาด (tear strength) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นดังผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 5.10 เช่นกัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.11 พบว่า เมื่อปริมาณสารหน่วงไฟเพิ่มมากขึ้นค่าความแข็ง (hardness) ของยางจะสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของสารหน่วงไฟเป็นของแข็ง และเมื่อเติมลงในยางในปริมาณที่มากขึ้น อนุภาคของสารหน่วงไฟจะกระจายตัวอยู่ที่ผิวของยางมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ความแข็งของยางสูงขึ้นตามลำดับ

6.2.3 ผลของสารหน่วงไฟที่มีต่อการติดไฟของยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.12 พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอโลต์ในปริมาณตั้งแต่ 120 phr ขึ้น และธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดในปริมาณตั้งแต่ 100 phr ไปจะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 และจากผลการทดลองในตารางที่ 5.13 พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอโลต์ในปริมาณตั้งแต่ 60 phr ขึ้นไป และธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรเตดใน

ปริมาณตั้งแต่ 40 phr ขึ้นไปจะมีผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST มีค่าอัตราเร็วของการเผาไหม้ (Burning Rate) ต่ำกว่า 30 mm/sec และเมื่อเพิ่มปริมาณของสารหน่วงไฟมากขึ้น อัตราเร็วของการเผาไหม้ก็จะยิ่งลดลง โดยยางธรรมชาติที่มีการเติมซีโอโลดในปริมาณตั้งแต่ 120 phr ขึ้นไป และธรรมชาติที่มีการเติมอะลูมิเนียมไตรไฮดรตในปริมาณตั้งแต่ 80 phr ขึ้นไป จะไม่ติดไฟเมื่อถูกเผาเป็นเวลานาน 30 วินาที จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าซีโอโลดมีประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟได้เช่นเดียวกับ อะลูมิเนียมไตรไฮดรต จากผลการทดลองพบว่าปริมาณซีโอโลดและอะลูมิเนียมไตรไฮดรตที่ให้ประสิทธิภาพ ในการเป็นสารหน่วงไฟที่ทดสอบกันอยู่ที่ปริมาณ ซีโอโลด 120 phr และอะลูมิเนียมไตรไฮดรต 100 phr ที่ ให้ผลการทดสอบระดับการติดไฟตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ V TEST ในระดับ V-0 และไม่ติดไฟ เมื่อถูกเผาเป็นเวลานาน 30 วินาที ตามมาตรฐานการทดสอบ UL 94 แบบ HB-TEST

การที่ซีโอโลดและอะลูมิเนียมไตรไฮดรตสามารถใช้เป็นสารหน่วงไฟได้นั้นเนื่องมาจากการปลดปล่อย น้ำออกมาจากโมเลกุล ดังแสดงในผลการทดลองในตารางที่ 5.14 และ 5.15 ซึ่งการปลดปล่อยน้ำออกมาจาก โมเลกุลนี้เองจะช่วยให้เปลวไฟจางลง และช่วยลดอุณหภูมิของเปลวไฟลง ทำให้ชะลอการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ลงได้ [7,8,14] และการที่อะลูมิเนียมไตรไฮดรตสามารถให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟได้ดีกว่าซี โอโลดเล็กน้อยนั้นเป็นเพราะสามารถปลดปล่อยน้ำออกมาจากโมเลกุลได้ในปริมาณที่มากกว่าดังแสดงในตารางที่ 5.14 และ 5.15

7. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถใช้ซีโอโลดเป็นสารหน่วงไฟในยางธรรมชาติได้ โดยจากผลการทดลองพบว่าปริมาณซีโอโลดและอะลูมิเนียมไตรไฮดรตที่ให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟที่ทดสอบ กันอยู่ที่ปริมาณ ซีโอโลด 120 phr และอะลูมิเนียมไตรไฮดรต 100 phr และเมื่อพิจารณาผลของซีโอโลดที่มีต่อ สมบัติอื่นๆของยางธรรมชาติพบว่า

- ซีโอโลดจะมีผลในการเพิ่มค่าความหนืดมูนีของยาง
- ซีโอโลดจะมีผลให้ scorch time สั้นลงอัตราเร็วในการคงรูป (cure rate) แต่ไม่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูป (cure time) ของยาง
- ซีโอโลดพฤติกรรมเป็นเหมือนสารตัวเติม (filler) โดยจะช่วยให้การเพิ่มเนื้อให้กับยาง แต่ไม่มีผลต่อการเสริมแรง ไม่ให้ผลในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยาง

8. ข้อเสนอแนะ

ถ้าต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟของซีโอโลดนั้น ควรจะลดอุณหภูมิที่ใช้ในการวัล คาไนซ์ยางลง เพื่อจะได้ลดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างซีโอโลด อันจะช่วยให้มีปริมาณน้ำหลงเหลืออยู่ใน โครงสร้างซีโอโลดเพื่อจะปลดปล่อยออกมาในการยับยั้งการติดไฟได้มากขึ้น

9. เอกสารอ้างอิง

1. http://www.thailandrubber.thigov.net/knowledge_1m.html (2003) , สำนักงานกองทุนสงเคราะห์ การทำสวนยาง
2. http://www.bot.or.th/BOTHomepage/DataBank/Real_Sector/agriculture/ (2003) , ธนาคารแห่ง ประเทศไทย

3. สุธีระ ประเสริฐสรพ์ (2547) แนวทางการพัฒนายางให้เป็นเครื่องจักรเศรษฐกิจของประเทศ-
ประชาคมวิจัย, 54 (เดือน มีนาคม-เมษายน 2547): 3-7
4. พงษ์ธร แซ่อูย (2547) – ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
(เอ็มเทค), ปทุมธานี
5. John S.Dick (2001)- **Rubber Technology : Compounding and Testing for Performance**,
Hanser Publishers, Munich.
6. <http://update.se-ed.com/192/zeolite.htm> (2005), บริษัท ซีอีดูเคชั่น จำกัด(มหาชน)
7. 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.
8. 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.
9. N. Sombatsompop (1999) Rheological Behaviour of Unvulcanised Natural Rubber Compounded
with Cryogenically Pulverised Polyurethane Foam Particles - **Journal of Elastomers & Plastics**,
31 (3): 271-284.
10. Sombatsompop N (1999) Swelling & Viscoelastic Properties of NR Vulcanisates Filled with
Cryogenically Pulverised Polyurethane Foam Particles - **Journal of Elastomers and Plastics**, 31
(1): 37-55.
11. Kumnuantip C & Sombatsompop N (2003) Dynamic Mechanical Properties and Swelling
Behaviour of NR/Reclaimed Rubber Blends - **Materials Letters**, 57 (21): 3167-3174.
12. Sombatsompop N, Kantala C and Wimolmala E (2006) Wood Sawdust Fibres as a Secondary
Filler in Carbon Black Filled NR Vulcanizates - **Polymers & Polymer Composites** 14 (4): 331-
347.
13. Sombatsompop N & Kumnuantip C (2003) Rheology, Cure Characteristics, Physical and
Mechanical Properties of Tire-Tread Reclaimed Rubber/NR Compounds - **Journal of Applied
Polymer Science**, 87 (10), 1723-1731.
14. พรพรรณ นิธิอุทัย (2528) – **สารเคมีสำหรับยาง**, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี,
ปัตตานี

10. สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

1. สรุปในบทสรุปเรื่อง cure rate ไม่สมบูรณ์ ควรเพิ่มเติมวิธีการหา cure rate ด้วยว่าหาอย่างไร ใช้ผลจากการทดสอบโดย mooney viscometer หรือ ODR
ตอบ ในการหา Cure Characteristics ทั้งค่า Scroch Time, Cure Time และ Cure rate โดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer (ODR) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C
2. ตารางที่ 5.1 หน้า 6 ค่า Mooney viscosity ที่ใส่มาไม่น่าจะถูก ขงธรรมชาติไม่ใส่สารตัวเติมเลย ไม่ควรสูงถึง 100 และค่า mooney จะหาที่ ML (1+4) 100 °C ไม่ใช่ 4+1 ถ้า warm 4 นาทีแล้วเดินเครื่อง 1 นาที คงได้ค่าสูง แต่ถ้า warm 1 นาที แล้วให้อ่านเมื่อเครื่องเดิน 4 นาที ค่าคงไม่ใช้อย่างในตารางที่แสดงแน่นอน ทบทวนค่า mooney viscosity ทั้งหมดด้วย เพราะสูงกว่าปกติมากๆ แม้การใช้ carbon black ก็ยังมีค่าไม่ถึง 100 โดยเฉพาะ compound ที่ไม่มี filler เลย และใช้ STR20 จะไม่ถึง 100แน่นอน
ตอบ ในการหาค่า Mooney viscosity ในการทดลองนี้มีหน่วยเป็น ML (1+4) 100 °C ซึ่งได้ทำการแก้ไขในตารางที่ 5.1 เรียบร้อยแล้ว และขอสงวนสิทธิ์ในการยืนยันค่า Mooney viscosity ที่รายงานในรายงานนี้เนื่องจากเป็นค่าที่วัดได้จริงจากเครื่อง Mooney viscometer ที่ใช้ในการทดลองนี้
3. ค่า tear resistance ไม่น่าจะถูก ต่ำเกินไปสำหรับขงธรรมชาติ ไม่ทราบว่าตัวอย่างเตรียมวิธีไหนไม่ได้บอกมาในรายงาน
ตอบ ในการหาค่าความทนต่อการฉีกขาด (Tear Strength) ได้ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 624 และขอสงวนสิทธิ์ในการยืนยันค่า Tear Strength ที่รายงานในรายงานนี้เนื่องจากเป็นค่าที่วัดได้จริงจากการทดลองนี้
4. การอ้างอิงคิด หน้า 21 ตารางที่ 4.16 ไม่มี ผลที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ ตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ ATH มีเพียง 3 น้ำ ขณะที่ Zeolite มี 27 น้ำ แต่ผลออกมา ATH มีความสามารถมากกว่า Zeolite
ตอบ ตารางที่ 4.16 ถูกแก้ไขเป็นตารางที่ 5.15 ที่ ATH มีความสามารถในการดับไฟมากกว่า Zeolite เนื่องจาก ATH ปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมาในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า ในขณะที่ Zeolite ถึงแม้จะมีน้ำในโมเลกุลมากกว่า แต่มีการปลดปล่อยน้ำในอุณหภูมิที่ต่ำกว่ามาก และมีการสูญเสียน้ำไปในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ จึงให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟที่ต่ำกว่า ATH
5. การ vary ปริมาณสารหน่วงต้องระบุชัดเจนว่าเท่าไร ไม่ใช่ระบุ 2-200
ตอบ ทำการแก้ไขแล้วดังในตารางที่ 4.1
6. ควรเพิ่มเติมรายละเอียด ข้อกำหนดมาตรฐาน UL94 ที่อ้างถึง และใช้เปรียบเทียบ
ตอบ อธิบายเพิ่มเติมที่คำอธิบายของตารางที่ 5.12 และ 5.13 แล้ว
7. ควรจะเพิ่มเติมการอธิบายได้ตาราง 5.12 ว่าระดับ V-0 เป็นอย่างไร
ตอบ อธิบายเพิ่มเติมที่คำอธิบายของตารางที่ 5.12 แล้ว
8. ต้องใช้ zeolite ในปริมาณสูงมากจึงจะทนไฟ และมีความแข็งแรงต่ำ เวลาจะนำไปใช้งานคงต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ด้วย
ตอบ จากผลการทดลอง พบว่าต้องใช้ zeolite ในปริมาณสูงจึงจะทนไฟ แต่ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลง ในการใช้งานจึงควรออกสูตรยางให้เหมาะสมกับแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยมีการใช้สารตัวเติมเสริมแรงอื่น เข้ามาช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางด้วย