



การศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอย
ที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์

โดย

นายณัฏวดี แดงจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถั่วลันเตา
ที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์

โดย
นายณัฏฐวัฒน์ แดงจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**MECHANICAL AND THERMAL CHARACTERIZATION OF MMT FILLED
NATURAL RUBBER FLY ASH COMPOSITES**

By

Nantavat Tangchantra

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

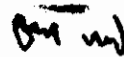
Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2008

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอริกลีโอไนต์” เสนอโดย นายณัฏฐวัฒน์ แดงจันทร์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์



(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะดังกูร)

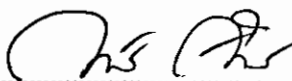
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๑๑ เดือน ๑๑ พ.ศ. ๒๕๕๑

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น
2. ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

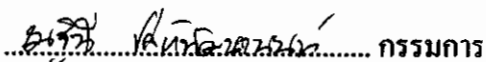
คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

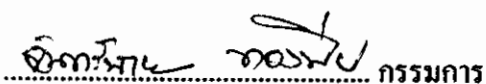
(อาจารย์ ดร. วิมลรัตน์ ศรีจรัสสิน)

๒๙ / ๑๑ / ๒๕๕๑

 กรรมการ

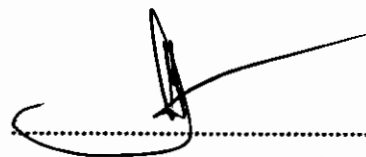
(อาจารย์ ดร. ณัฐินี โล่ห์พัฒนานนท์)

๒๙ / ๑๑ / ๒๕๕๑

 กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

๒๙ / ๑๑ / ๒๕๕๑



กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

๒๙ / ๑๑ / ๒๕๕๑

49402204 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ/มอนต์มอริลโลไนต์/เถ้าลอย/สมบัติเชิงกล/สมบัติเชิงความร้อน

นักทวิพนธ์ แดงจันทรา : การศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น และ ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 152 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าลอยและมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารตัวเติมยางธรรมชาติ จากการศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุง (Montmorillonite, MMT) ออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Organo-montmorillonite, OMMT) และการดอ์กิ้งออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Organic grafted montmorillonite, O-g-MMT) พบว่า สมบัติเชิงกลทั้งมอดูลัส ความต้านทานแรงดึงยืด ความต้านทานแรงฉีกขาด และความแข็งแรงของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ MMT มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อปริมาณ MMT เพิ่มขึ้น เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่าง MMT และยางธรรมชาติ อีกทั้งกระจายตัวของ MMT ในยางธรรมชาติไม่ดี ทำให้ MMT ไม่สามารถแสดงหน้าที่เป็นสารเสริมแรงที่ดีได้ อย่างไรก็ตามทางด้านสมบัติเชิงความร้อนพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับยางวัลคาไนซ์ได้ดี เนื่องจาก MMT มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง สำหรับการศึกษาผลของ OMMT ต่อสมบัติของยางธรรมชาติพบว่าสามารถเข้ากันกับยางธรรมชาติได้ดี ทำให้ OMMT สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านสมบัติเชิงกลได้ดีกว่า MMT ซึ่งการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่าง OMMT กับยางธรรมชาติจะทำให้ OMMT กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น และยางคอมพอสิตจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นอย่างมาก สำหรับการศึกษาผลของการเติม O-g-MMT ในยางธรรมชาติ พบว่า O-g-MMT มีความเข้ากันกับยางธรรมชาติได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ OMMT ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลของยางคอมพอสิต

การศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ระหว่างเถ้าลอยและ OMMT พบว่า เถ้าลอยสามารถช่วยให้ OMMT กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น อีกทั้งเถ้าลอยซึ่งมีการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 มีความเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ ทำให้สารตัวเติมแบบคู่ระหว่างเถ้าลอยและ OMMT สามารถปรับปรุงยางคอมพอสิตให้มีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่สูงขึ้น

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา... น.ส. ทวีรัตน์... /นางจันทรา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. อ.ดร.จ. ...

49402204 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : NATURAL RUBBER/MONTMORILLONITE/FLY ASH/MECHANICAL PROPERTIES/THERMAL PROPERTIES

NANTAVAT TANGCHANTRA: MECHANICAL AND THERMAL CHARACTERIZATION OF MMT FILLED NATURAL RUBBER FLY ASH COMPOSITES. THESIS ADVISORS: ASST.PROF.CHANCHAI THONGPIN, Ph.D., AND PROF.NARONGRIT SOMBATSOMPOP, Ph.D. 152 pp.

In this research, fly ash and montmorillonite were used as fillers in natural rubber composites. The effect of unmodified montmorillonite (MMT), organic modified montmorillonite (OMMT) and organic grafted montmorillonite (O-g-MMT) on mechanical properties such as modulus, tensile strength, tear strength and hardness was studied. The mechanical properties of NR/MMT decreased with increasing clay loading due to incompatibility between natural rubber and MMT and poor dispersion of MMT, however thermal properties were increased because of high thermal stability of clay. In NR/OMMT composites, OMMT was found to be more compatible with NR leading to higher mechanical properties when compared with NR/MMT composites. Increasing mixing time led to better dispersion of OMMT in rubber matrix and higher mechanical properties of OMMT/rubber composites. In the study of NR/O-g-MMT composites, it was found that higher mechanical properties were obtained when compared with the NR/OMMT composites due to more compatibility.

The study of effect of hybrid fillers between fly ash and OMMT on natural rubber showed that fly ash could enhance the dispersion of OMMT in rubber matrix. Treated fly ash with Si-69 led to high compatible level with rubber matrix therefore hybrid fillers between fly ash and OMMT could improve mechanical and thermal properties of natural rubber composites.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2008

Student's signature *Nantavat Tangchantra*

Thesis Advisors' signature *Chanchai Thongpin* *Nongrit Sombatsompop*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นไปได้ด้วยดี เป็นผลมาจากการได้รับความอนุเคราะห์จากหลากหลายฝ่าย ทั้งนี้ต้องขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการสนับสนุนด้านเงินทุน อุปกรณ์ และห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง SEM กลุ่มวิจัย P-PROF และ CUP-NATURE ที่ร่วมกันวิเคราะห์และแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับผลการวิจัย แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหารวมทั้งการสนับสนุนทางด้านสารเคมี และทุนสนับสนุนเพื่อการดำเนินงานวิจัย บริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป สำหรับความอนุเคราะห์ในการจัดหาสารเคมีบาง เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง XRD

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทรฉาย ทองปิ่น ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ แนะนำทางในการศึกษา วิเคราะห์ พร้อมให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งด้วยความเอาใจใส่มาโดยตลอด ผู้ศึกษาขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงและขอระลึกถึงพระคุณของท่านอาจารย์ตลอดไป

กราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คุณธรรมและศีลธรรมให้แก่ผู้ศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งคณาจารย์ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ให้ความเมตตา อบรม สั่งสอน แก่ผู้ศึกษาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณพินิจ เขียนระลึก และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการเบิกจ่ายวัสดุอุปกรณ์ และประสานงานในด้านต่างๆ ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่น้องชาวศิลปากร สำหรับการใช้ชีวิตอยู่ร่วมกันอย่างมีความสุขตลอดระยะเวลาในการศึกษาเล่าเรียน พระพุทธศาสนาที่คอยขัดเกลาจิตใจ ให้สงบยามที่มีทุกข์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบคุณครอบครัว ที่คอยส่งเสริมและให้อิสรภาพทางการศึกษา คอยเป็นที่ปรึกษาทางใจ ให้มีกำลังเข้มแข็งและพร้อมที่จะเผชิญกับปัญหา จนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ก
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
แนวคิดงานวิจัย	4
ขอบเขตของงานวิจัย	4
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป	5
ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เงิน โยบาย	
เชิงสาธารณะและการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์	7
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)	9
โครงสร้างยางธรรมชาติ	11
สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	12
การทำให้ยางธรรมชาติเกิดการคงรูป	14
เถ้าลอย (Fly ash)	17
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	17
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเถ้าลอย	18
การใช้ประโยชน์เถ้าลอย	19
แหล่งที่มาของเถ้าลอยภายในประเทศ	23
บทบาทของสารคู่ควบไซเลน (Silane)	23
โครงสร้างและลักษณะของนาโนเคลย์	26
การดอกร้าง (grafting) มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารคู่ควบไซเลน	31

บทที่		หน้า
2	โครงสร้างของนาโนคอมพอสิต.....	31
	การเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิต.....	33
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
	วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	40
	เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	41
	วิธีการดำเนินการทดลอง.....	42
	การตรวจสอบและวิเคราะห์ได้ลอยและมอนคัมอริลโรไนต์.....	43
	การปรับปรุงผิวได้ลอยโดยใช้สารคู่ควบไซเลน.....	44
	การเตรียมออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ (OMMT).....	44
	การเตรียมออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย HTMS (O-g-MMT).....	46
	การตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT และ OMMT.....	46
	การตรวจสอบผลของการปรับปรุงผิวได้ลอยและมอนคัมอริลโรไนต์.....	47
	การเตรียมยางผสม (compound rubber).....	47
	การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์.....	48
	การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	48
	การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน.....	50
	การตรวจสอบการแทรกของโมเลกุลยางในชั้นซิลิเกต.....	50
	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของยางคอมพอสิต.....	50
	การทดสอบการบวมตัว (Swelling ratio).....	50
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
	การศึกษาลักษณะทางกายภาพของได้ลอยและมอนคัมอริลโลไนต์.....	52
	การศึกษาการใช้มอนคัมอริลโลไนต์เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ.....	59
	การศึกษาผลของการปรับปรุงผิวมอนคัมอริลโลไนต์.....	59
	สมบัติการบ่มของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและ มอนคัมอริลโลไนต์.....	59
	สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์.....	62
	สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์.....	68

บทที่		หน้า
4	สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์.....	72
	การศึกษาผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT ..	73
	สมบัติการบ่มของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์ที่มีการเพิ่มเวลาในการบดผสมยางธรรมชาติกับออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์.....	73
	สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT ที่มีการเพิ่มเวลาในการบดผสมยางธรรมชาติกับออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์.....	75
	การศึกษาผลของการดอ์กิ้งออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ (O-g-MMT).....	79
	สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ที่มีการดอ์กิ้ง (O-g-MMT)	79
	สมบัติการบ่มของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ที่มีการดอ์กิ้ง (O-g-MMT).....	82
	สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ที่มีการดอ์กิ้ง (O-g-MMT).....	83
	การใช้สารตัวเติมแบบคู่ (hybrid filler) ระหว่างมอนคัมอริลโลไนต์และถั่วลันเตาในยางธรรมชาติ	87
	สมบัติการบ่มสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถั่วลันเตาที่มีการเติมมอนคัมอริลโลไนต์	87
	สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างมอนคัมอริลโลไนต์และยางธรรมชาติที่มีการเติมผงถั่วลันเตาในปริมาณต่างๆ.....	89
	สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถั่วลันเตาที่มีการเติมมอนคัมอริลโลไนต์.....	92
	การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถั่วลันเตาที่มีการเติมมอนคัมอริลโลไนต์.....	96
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	98
	สรุปผลการทดลอง.....	98
	ข้อเสนอแนะ.....	101

	หน้า
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก	107
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลองจากเทคนิคต่างๆ.....	108
ภาคผนวก ข การนำเสนอและตีพิมพ์งานวิจัยบางส่วนในงานประชุมวิชาการ	149
ประวัติผู้วิจัย.....	152

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สูตรยางคอมพาวด์ NR/OMMT (MMT).....	5
1.2	สูตรยางคอมพาวด์ NR/OMMT/FA.....	6
2.1	มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber, STR).....	11
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นล้อยแม่เมะ.....	17
2.3	การแบ่งชั้นคุณภาพของเส้นล้อยตามมาตรฐาน ASTM C618-96.....	19
2.4	การปริมาณใช้ประโยชน์และการกำจัดเส้นล้อยในยุโรป ปี ค.ศ. 1999.....	20
2.5	ปริมาณใช้ประโยชน์และการกำจัดเส้นล้อยในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1999.....	21
2.6	แสดงสูตรเคมีและลักษณะของโครงสร้างแบบ 2 : 1.....	27
3.1	ส่วนประกอบของยางคอมพาวด์.....	48
4.1	แสดงองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในเส้นล้อย.....	52
4.2	แสดงองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในมอนด์มอริล โลไนต์.....	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	12
2.2	15
2.3	15
2.4	19
2.5	25
2.6	28
2.7	29
2.8	30
2.9	30
2.10	31
2.11	32
2.12	33
3.1	40
3.2	40
3.3	41
3.4	43
3.5	45
3.6	45
3.7	46
3.8	47
3.9	49
3.10	49
3.11	49
4.1	53
4.2	54
4.3	56
4.4	57
4.5	58

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟ XRD ของ MMT และ OMMT	59
4.7 แบบจำลองการแทรกของโมเลกุล CTAB ในชั้นซิลิเกต.....	59
4.8 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ช ของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์.....	60
4.9 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและค่าสุดของสารประกอบ ยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์	61
4.10 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าการบวมตัวของวัสดุผสมระหว่าง ยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์	62
4.11 ภาพ SEM ของยางคอมพอสิต (x500).....	62
4.12 แบบจำลองการแทรกในชั้นซิลิเกตของโมเลกุลยาง.....	64
4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) แสดงสารเคมีที่แพร่ออกมา ที่ผิวหน้าของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์	64
4.14 กราฟ FTIR ของกำมะถัน และสารที่เคลื่อนที่ออกมาที่บริเวณผิวยาง.....	65
4.15 ลักษณะการบวมตัวของ MMT และ OMMT ปริมาณ 1 กรัม ในโทลูอิน 15 มิลลิตร	65
4.16 ผล XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการเติม MMT ในปริมาณต่างๆ.....	67
4.17 ผล XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการเติม OMMT ในปริมาณต่างๆ	67
4.18 แบบจำลองการแทรกของโมเลกุล CTAB ในชั้นซิลิเกต.....	68
4.19 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์.....	69
4.20 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่าง ยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์.....	70
4.21 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสม ระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์.....	71
4.22 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่าง ยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์.....	72

รูปที่	หน้า
4.23 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (T_{onset}) ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	73
4.24 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อเวลาในการคงรูปและเวลา สกอร์ชของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	74
4.25 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด ของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	75
4.26 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสของ วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	76
4.27 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสของ วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	77
4.28 แบบจำลองโครงสร้างการเสริมแรงของ OMMT ในยางซึ่งถูกดึงยึด	77
4.29 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดที่จุดขาด ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	78
4.30 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาด ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	78
4.31 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อความแข็งแรงที่ผิวของ วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	79
4.32 กราฟ FTIR ของ MMT, OMMT และ O-g-MMT	80
4.33 กราฟ XRD ของ MMT, OMMT และ O-g-MMT	81
4.34 แบบจำลองลักษณะการต่อกิ่ง (grafting) ของ HTMS บนผิวของ OMMT.....	81
4.35 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของ สารประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมมอนด์มอร์ริไลต์.....	82
4.36 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูงสุด และแรงบิดต่ำสุด (ΔS) ของสารประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติม มอนด์มอร์ริไลต์	83
4.37 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อมอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลต์.....	84
4.38 ภาพ SEM ของยางคอมพอสิตที่มีการเติม O-g-MMT 10 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	84

รูปที่	หน้า
4.39 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อความต้านทานแรงดึงยึดของวัสดุผสมระหว่าง ยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์.....	85
4.40 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์.....	85
4.41 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์.....	86
4.42 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์.....	88
4.43 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อแรงบดสูงสุดและค่าสุดท้ายของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์.....	89
4.44 ภาพ SEM ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์ (x1000)	89
4.45 ผล XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์	91
4.46 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าการบวมตัวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์	91
4.47 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์	92
4.48 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์	93
4.49 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์.....	94
4.50 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์	95
4.51 ภาพ SEM ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอริลโลไนต์ (x100)	95
4.52 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์.....	96

รูปที่	หน้า
4.53 ผลของแก๊สออกซิเจนที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (T_{onset}) ของวัสดุผสม ระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์อีไธเลนไคโนน 97	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุพอลิเมอร์ที่มีการนำมาใช้งานกันอย่างมากระหว่างอดีตจนถึงปัจจุบันคือยางธรรมชาติ โดยมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) มีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุล (entanglements) ที่สูง และมีความยืดหยุ่น (flexibility) สูง แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกดึงยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (stress induced crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางจะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดสี (abrasion resistance) สูง ดังนั้นจึงมีการนำยางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น ยางรถยนต์ รองเท้า และ ถุงมือยาง เป็นต้น

สำหรับยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิ โดยยางจะอ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูง แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังนั้นการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติด้วยการผสมสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม จะได้ยางคอมพาวด์นำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น [1]

สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติยางธรรมชาติ สารเสริมแรง (reinforcement) นับเป็นสารเติมแต่งที่มีความสำคัญ โดยทั่วไปสารเสริมแรงที่นิยมใช้กับยาง ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) และซิลิกา (silica) ซึ่งพบว่า ผงเขม่าดำจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าซิลิกา เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่างผงเขม่าดำกับยางธรรมชาติที่ดีกว่า ถึงแม้ว่าซิลิกาจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีน้อยกว่า ซิลิกาก็ยังคงได้รับความสนใจ เนื่องจากการใช้ซิลิกาทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีคุณสมบัติเหมือน

ผงเขม่าดำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีมันได้ เช่น รองเท้า เป็นต้น โดยอาจปรับปรุงแรงกระทำระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติได้โดยการใช้ออร์แกโนไซเลน (organosilane coupling agent) ช่วยในการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกา เพื่อปรับปรุงให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

ถึงแม้ว่าซิลิกาจะได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังมีสารเสริมแรงอื่นที่ได้รับความสนใจเช่นกัน คือ เถ้าลอย (fly ash) โดยมีแนวคิดที่จะนำมาใช้เพื่อทดแทนซิลิกา เนื่องจากมีส่วนประกอบของซิลิกาอยู่ประมาณกว่าร้อยละ 40 และมีราคาต่ำกว่าซิลิกา แหล่งวัตถุดิบของเถ้าลอยนั้นมาจากกากของเสียในโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อนจากการเผาถ่านหิน ซึ่งปลดปล่อยกากของเถ้าลอยออกมาจำนวนมากในระหว่างกระบวนการผลิตไฟฟ้า สำหรับประเทศไทยในปี ค.ศ. 2002 พบว่ามีมากถึง 3 ล้านตัน [2] ซึ่งยากต่อการกำจัด และปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมอย่างมาก จึงมีการลดปัญหาโดยการนำเถ้าลอยประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม เช่น นำไปผสมในปูนซีเมนต์และคอนกรีต การนำไปใช้เพื่อบำบัดน้ำเสีย นำไปเป็นสารเพิ่มเนื้อในสี การนำมาใช้ในการทำปุ๋ย และนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ [2, 3] เหล่านี้เป็นวิธีการบางส่วนที่สามารถช่วยลดปัญหาสำหรับการกำจัดเถ้าลอยได้อีกทางหนึ่ง

การนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับยางธรรมชาติได้มีการวิจัยมานานแล้ว พบว่าเถ้าลอยมีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ แต่ประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากแรงกระทำระหว่างเถ้าลอยกับยางธรรมชาติค่อนข้างต่ำ [4] ดังนั้นจึงมีงานวิจัยบางส่วนศึกษา การปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าลอย เพื่อให้มีแรงกระทำระหว่างเถ้าลอยกับยางธรรมชาติที่ดีขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติดีขึ้น เช่น ในงานวิจัยของ Nabil A. N. Alkadası และคณะ [5] ได้ปรับปรุงพื้นผิวของเถ้าลอยด้วยออร์แกโนไซเลน (silane-69) และผสมกับยางบิวตะไคอื่น พบว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น สำหรับข้อดีอีกประการหนึ่งของเถ้าลอย จากงานวิจัยของ N.Sombatsompop และคณะ [4] พบว่าเถ้าลอยสามารถลดพลังงานในการขึ้นรูป และทำให้ยางสามารถไหลได้ง่ายขึ้นส่งผลดีต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม

สำหรับสารเสริมแรงอีกชนิดหนึ่งที่มีความนิยมน้อยมากในปัจจุบันคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ซึ่งมีการนำมาใช้กับพอลิเมอร์อย่างกว้างขวาง มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินที่อยู่ในกลุ่มของสเมกไทต์ (smectite) ประกอบไปด้วยชั้นของซิลิเกต (silicate layer) ที่มีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร ความยาวประมาณ 200-300 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นสารเสริมแรงที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้ไอออนของสารอินทรีย์แลกเปลี่ยนกับไอออนของสารอนินทรีย์ที่อยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตโดยผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ทำให้สามารถชั้นซิลิเกตกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าสาร

เสริมแรงทั่วไป จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงความร้อนได้ดีมาก โดยทำให้วัสดุมีความแข็งตึง (stiffness) ความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact strength) อุณหภูมิการโค้งงอ (heat distortion temperature) ที่สูง ป้องกันต้องการผ่านของก๊าซ (gas barrier action) ได้ดี เป็นต้น จากงานวิจัยของ M. Arroyo และคณะ [6] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบระหว่างผงเขม่าดำกับออกแซโนมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT) ที่ผสมในยางธรรมชาติ พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมออกแซโนมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 10 phr จะให้สมบัติเชิงกลเทียบได้กับการใช้ผงเขม่าดำปริมาณ 40 phr จะเห็นได้ว่าการใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารเสริมแรงจะใช้สารในปริมาณที่น้อยกว่าสารเสริมแรงที่ใช้กันทั่วไปอย่างมากสำหรับการปรับปรุงสมบัติที่เท่ากัน ดังนั้นมอนต์มอริลโลไนต์จึงมีประโยชน์อย่างมากสำหรับงานทางด้านวัสดุคอมพอสิต

นอกจากการใช้เกลือแอมโมเนียมโมเนียม (alkyl ammonium salt) ในการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์แล้ว การดอกร้าง (grafting) ก็เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ จากงานวิจัยของ Sea-Fue Wang และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงการสังเคราะห์ clay-magadiite โดยการใช้ (hexadecyl trimethylammonium, CTAB) เข้าไปเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต ก่อน จากนั้นจึงทำการดอกร้างด้วย α -aminopropyltriethoxysilane (APTS) โดยจากงานวิจัยพบว่า การปรับปรุงด้วยวิธีดังกล่าวนี้ สามารถเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตจาก 1.53 เป็น 2.50 นาโนเมตร

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นถึงประโยชน์ของการเติมมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้เป็นสารเสริมแรงสำหรับวัสดุคอมพอสิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติกับเม็ดล่อนที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ เพื่อนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการนำมอนต์มอริลโลไนต์ มาปรับปรุงเมทริกซ์ของยางธรรมชาติที่มีการผสมเม็ดล่อนให้มีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่ดีขึ้น รวมทั้งช่วยลดต้นทุนของการผลิตยางธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพสูง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเม็ดล่อนที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และเม็ดล่อนต่างๆ

1.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเม็ดล่อนที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และเม็ดล่อนต่างๆ

1.2.3 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับมอนด์มอร์ริสไลน์และถั่วลันเตา เพื่อทำให้มีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติ ผงถั่วลันเตาและมอนด์มอร์ริสไลน์ที่ดีที่สุด

1.3 แนวคิดงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยทั่วไปนั้นสารเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ ผงเขม่าดำ และ ซิลิกา ซึ่งเป็นสารที่ช่วยเพิ่มเนื้อวัสดุ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต และยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลแก่วัสดุอีกด้วย สำหรับผงเขม่าดำนั้นมีการนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงอย่างมาก เนื่องจากมีราคาถูกและยังให้สมบัติเชิงกลที่ดี แต่ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะเป็นสีดำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีนั้นค่อนข้างทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีการนำซิลิกามาใช้ เนื่องจากสามารถปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีสีที่ง่ายขึ้น แต่ราคาของซิลิกานั้นค่อนข้างแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำถั่วลันเตาซึ่งมีส่วนประกอบของสารประกอบซิลิกาอยู่มากถึงร้อยละ 40 อีกทั้งถั่วลันเตาเป็นกากของเหลือที่ได้จากโรงงานผลิตไฟฟ้าพลังงานความร้อน และมีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้จึงนำถั่วลันเตามาเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าถั่วลันเตานั้นสามารถเติมได้ในปริมาณที่จำกัด เนื่องจากจะให้สมบัติเชิงกลที่ลดลง เมื่อปริมาณของถั่วลันเตามากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำสารเสริมแรงอีกชนิดหนึ่งมาใช้ คือ มอนด์มอร์ริสไลน์ เพื่อส่งเสริมอิทธิพลของถั่วลันเตาให้มีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่เพิ่มมากขึ้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การศึกษาอิทธิพลของมอนด์มอร์ริสไลน์ที่มีต่อยางธรรมชาติ ใช้ปริมาณของมอนด์มอร์ริสไลน์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 phr

1.4.2 เลือกอัตราส่วนของมอนด์มอร์ริสไลน์ที่ให้สมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่เหมาะสม ในการศึกษาอิทธิพลของถั่วลันเตาที่มีต่อวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริสไลน์ โดยใช้ปริมาณถั่วลันเตาผสมที่อัตราส่วนต่างๆ กัน คือ 10, 20, 30 และ 40 phr

1.4.3 การปรับปรุงมอนด์มอร์ริสไลน์ให้เป็นอ็อกโทมอนด์มอร์ริสไลน์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (hexadecyl trimethylammonium, CTAB) และเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซิลซิลาน (Hexadecyltrimethoxysilane, HTMS) เป็นตัวปรับปรุง

1.4.4 ถั่วลันเตาที่ใช้สำหรับงานวิจัย ถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วย silane-69 เพื่อเพิ่มแรงกระทำระหว่างยางธรรมชาติและถั่วลันเตา

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป

1.5.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง

1.5.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี

1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการผสมระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และเส้นใยในยางธรรมชาติ ด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) เพื่อปรับปรุงเมทริกซ์ของยาง และศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 7 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเตรียม OMMT ที่เหมาะสมกับเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ

ตอนที่ 2 ทำการเตรียม OMMT ผ่านปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange) โดยใช้ CTAB แลกเปลี่ยนประจุกับโซเดียมไอออนบวก ใน MMT หลังจากนั้นตรวจสอบผลของการปรับปรุงด้วยเทคนิค ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) และวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกตด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

ทำการเตรียม O-g-OMMT โดยนำ OMMT ที่เตรียมได้มาทำการดัดแปลงชั้นซิลิเกตด้วย HTMS หลังจากนั้นนำไปศึกษาผลของการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์เช่นเดียวกับ OMMT

ตารางที่ 1.1 สูตรยางคอมพาวด์ NR/OMMT (MMT) [4]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ เกรด STR 20	100
สังกะสีออกไซด์ (ZnO)	5
กรดสเตียริก	2
ซัลเฟอร์	3
เมอร์แคปโตเบนโซไทโอะโซล (MBT)	0.5
ไดฟีนิลทาร์ทาริก (DPG)	0.2
OMMT หรือ MMT	เปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิบ่มสุก	160 °C

ตอนที่ 3 ทำการเตรียมวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกนอมอนต์มอริลโลไนต์ (NR/OMMT) และ ผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ (NR/MMT) โดยการเตรียม

ยางคอมพาวด์ก่อนด้วยการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) สูตรการผสมยาง ดังตารางที่ 1.1 ที่ปริมาณ OMMT และ MMT ต่างๆ กัน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10 เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากเตรียมยางคอมพาวด์ได้ จะนำไปทดสอบคุณลักษณะการคงรูป (Cure characteristics) และสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR)

ตอนที่ 4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออกแกโนมอนคัมอริล โลไนต์ (NR/OMMT) และ ผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริล โลไนต์ (NR/MMT) โดยนำ ชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงยึด (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 สมบัติความแข็งที่ผิว (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 และสมบัติการฉีกขาด (tear properties) ตามมาตรฐาน ASTM D 624 เพื่อตรวจหาปริมาณ OMMT และ MMT ที่ให้สมบัติ เชิงกลที่เหมาะสม พร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว

วิเคราะห์หาปริมาณ OMMT ที่ทำให้มีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่ดี และเหมาะสม สำหรับการนำไปใช้เตรียมวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถ่านล้อยที่มีการเติมมอนคัมอริล โลไนต์

ตารางที่ 1.2 สูตรยางคอมพาวด์ NR/OMMT/FA [4]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ เกรด STR 20	100
สังกะสีออกไซด์ (ZnO)	5
กรดสเตียริก	2
ซัลเฟอร์	3
เมอร์แคปโตเบนโซไทโอะโซล (MBT)	0.5
ไดฟีนิลกัวนิดิน (DPG)	0.2
ถ่านลอย	เปลี่ยนแปลง
OMMT	จากตอนที่ 4
อุณหภูมิบ่มสุก	160 °C

ตอนที่ 5 ทำการเตรียมวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถ่านล้อยที่มีการเติมมอนคัมอริล โลไนต์ (NR/OMMT/FA) โดยใช้สูตรยางคอมพาวด์ตามตารางที่ 1.2 แต่ใช้ปริมาณของ

OMMT ที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลในตอนที่ 4 และผสมเข้าลวดยที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 10, 20, 30 และ 40 phr

ตอนที่ 6 ศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลวดยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ (NR/OMMT/FA) โดยนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดึงยึด (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 สมบัติความแข็งที่ผิว (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 และสมบัติการฉีกขาด (tear properties) ตามมาตรฐาน ASTM D 624 เพื่อตรวจหาปริมาณ OMMT และเถ้าลวดย (fly ash, FA) ที่ให้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสม พร้อมทั้งศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิคต่างๆ คือ Thermal Gravimetry Analysis (TGA)

ตอนที่ 7 ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุผสม NR/OMMT (MMT) และ NR/OMMT/FA ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

- เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) เพื่อดูระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ OMMT ในวัสดุผสม NR/OMMT (MMT) และ NR/OMMT/FA
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อดูลักษณะความเข้ากันได้ระหว่างพื้นผิวของสารเสริมแรงทั้งสองกับเมทริกซ์ยางธรรมชาติ
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของชั้นซิลิเกตใน NR/OMMT(MMT) และ NR/OMMT/FA

1.5.5 วิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

1.5.6 สรุปผลงานวิจัย

1.5.7 รายงานผลงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เงินนโยบาย เศรษฐาฐานะและการพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์

1.6.1 สามารถใช้ MMT ปรับปรุงเมทริกซ์ของยางธรรมชาติที่ผสมเถ้าลวดย เพื่อให้วัสดุคอมพอสิตระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลวดย มีสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนที่ดี

1.6.2 สามารถปรับปรุงสมบัติทางคานรีโอโลยีของยางได้ด้วยเถ้าลวดย ทำให้สามารถแปรรูปยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย

1.6.3 เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในการกำจัดเถ้าลวดย โดยนำเถ้าลวดยมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวัสดุคอมพอสิต เป็นการเพิ่มมูลค่าของเถ้าลวดย

1.6.4 เพื่อลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากเถ้าลวดยนั้นมีราคาที่ถูกกว่าการใช้สารเสริมแรงทั่วไป เช่น ซิลิกา สามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีตันได้

1.6.5 เพื่อส่งเสริมให้มีอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางที่มีมูลค่าสูงมากขึ้น เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับ 1 ของโลก แต่พบว่าอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางในประเทศมีปริมาณที่น้อย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) [8]

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้จากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Brazilliensis* ซึ่งเป็นไม้ป่าที่มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ต่อมาได้นำมาปลูกที่ทวีปยุโรปและเอเชีย เนื่องจากต้นยางพาราชอบอากาศร้อน ชื้น ดินทราย ร่วน ระบายน้ำดี จึงนิยมปลูกมากแถวเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งภาคใต้ และภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางทั้งสิ้นประมาณ 12 ล้านไร่ กระจายอยู่ในพื้นที่ 18 จังหวัด ซึ่งถือเป็นผู้ผลิตยางพารารายใหญ่ที่สุดของโลก น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แขนงลอยอยู่ในน้ำ ปริมาณของเนื้อยางขึ้นกับชนิดของพันธุ์ อายุ และฤดูกาลที่กรีดยาง โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆ ได้แก่

2.1.1 น้ำยาง (Latex)

เนื่องจากน้ำยางสดที่ได้มาจากการกรีดยางมีปริมาณน้ำที่มากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ และยังทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในน้ำยางสด จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 30 เป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางที่ได้นี้ว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) แต่เนื่องจากในน้ำยางมีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน และฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้สามารถถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ หรือเชื้อแบคทีเรีย ได้เป็นก๊าซชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน หรือสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้น น้ำยางจึงสามารถบูดเน่าส่งกลิ่นเหม็นได้ จึงต้องมีการเติมสารแอมโมเนียลงไป หรืออาจใช้แอมโมเนียร่วมกับสารเคมีอื่นๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นถึง 0.7 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า high ammonia latex (HA latex) และน้ำยางที่เติมปริมาณแอมโมเนียเข้มข้นเพียง 0.2 เปอร์เซ็นต์ จะเรียกว่า low ammonia latex (LA latex) อีกทั้งจำเป็นต้องใส่สารเคมีอื่นเพิ่มด้วย เช่น ZnO/TMTD 0.02 เปอร์เซ็นต์ หรือใช้กรอบอริค 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

2.1.2 ยางแห้ง

ยางแห้งเตรียมได้จากการนำน้ำยางสดที่กรีดได้มาเติมกรด เพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นจึงทำการไล่ความชื้นออกจากเนื้อยาง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อรา ยางแห้งมีหลายรูปแบบได้แก่

2.1.2.1 ยางแผ่น

ยางแผ่น เป็นการนำยางแห้งที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด แล้วทำให้แห้งโดยการนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น โดยเรียกยางที่ได้จากกระบวนการนี้ว่า ยางแผ่นไม่รมควัน (air dried sheet, ADS) หรือหากนำยางแผ่นที่ได้ไปอบรมควันต่อที่อุณหภูมิ 60-70°C จะเรียกว่า ยางแผ่น

2.1.2.2 ยางเครฟ

ยางเครฟ เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดในเครื่องเครฟ (creping machine) พร้อมกับทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อเอาสิ่งสกปรกออกจากยางในระหว่างการรีด จากนั้นจึงนำไปผึ่งลมให้แห้ง

2.1.2.3 ยางแท่ง

ยางแท่ง ได้จากการนำยางมาทำเป็นก้อนเล็กๆและอบให้แห้งด้วยอากาศร้อน และนำไปอัดเป็นแท่ง ยางแท่งจะมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นและยางเครฟ เนื่องจากผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ ซึ่งพิจารณาจากปริมาณสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในยาง โดยประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานยางแท่งซึ่งเรียกว่า Standard Thai Rubber (STR) ดังตารางที่ 2.1

2.1.2.4 ยางเกรดที่มีความหนืดคงที่หรือยาง CV (Constant Viscosity)

เนื่องจากยางแห้งเมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลานานๆ ยางจะเริ่มแข็งขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า storage hardening ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดจากหมู่อัลดีไฮด์ (aldehyde group) ที่มีอยู่ในยางธรรมชาติเข้าไปทำปฏิกิริยาควบนั่นกันเกิดเป็นโครงสร้างตามสถิติที่มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ดังนั้นจึงป้องกันโดยการสารเคมี เช่น ไฮดรอกซิลามีน (hydroxylamine) ลงไปในน้ำยางก่อนการเติมกรด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์นี้ ทำให้ยางที่ได้มีค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานยางแท่งของไทย (Standard Thai Rubber, STR) [8]

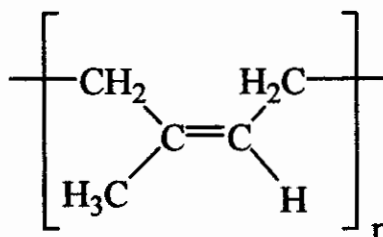
ข้อกำหนด	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรกที่เหลือยู่บน ร่องขนาด 44 ไมครอน(max%wt)	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า (max %wt)	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (max %wt)	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสารระเหยได้ (max %wt)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่า Plasticity เริ่มต้น (P0) (min.)	35	35	30	-	30	-	30	-
ค่า Plasticity Retention Index (PRI) (min.)	60	60	60	60	50	50	40	40
สี (Lovibond scale) (max.)	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืดมูนี่ ML 1+4@100°C	-	-	-	*	-	**	-	***
สีของเครื่องหมาย	น้ำเงิน บน พื้น ขาว	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	ขาว บน พื้น เขียว อ่อน	น้ำตาล บนพื้น ขาว	ขาวบน พื้น น้ำตาล	แดง บน พื้น ขาว	ขาว บน พื้น แดง
สีของแผ่นฟิล์ม โพลีเอทธิลีน (LDPE) ที่ใช้ห่อยาง	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาวใส	ขาวใส	ขาว ใส	ขาว ใส
สีของแถบ โพลีเอทธิลีน	ขาว ใส	ขาว ใส	ขาว ทึบ	ขาว ใส	ขาวทึบ	ขาวทึบ	ขาว ทึบ	ขาว ทึบ

* 70 (+7, -5), 60 (+7, -5) และ 50 (+7, -5) ** 60 (+7, -5) *** 65 (+7, -5)

2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ [8]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส 1,4 พอลิไอโซพรีน (cis 1,4 polyisoprene) ดังรูปที่ 2.1 กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาวแบบเส้นตรง โดยทั่วไปยางธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93

g/cm³ ที่อุณหภูมิ 20 °C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 °C



รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างยางธรรมชาติ

2.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [8]

ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติด้านความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกมากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม

ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติ มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความหนักสูงทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมากโดยไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสูงขึ้น

สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ขางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (fatigue resistance) ที่สูงมากด้วย

ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (*liquid and chemical resistance*) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เป็นต้น ความสามารถในการละลายนี้จะลดลงถ้ายางเกิดการคงรูป จากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติในยางคงรูปจะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น แต่ยางจะสามารถทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางยังสามารถทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดในดริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (*aging properties*) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนเป็นเวลานานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการยืดตัวของยาง

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (*low temperature flexibility*) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก

การยุบจม (*compression set*) ยางธรรมชาติมีการยุบจมค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางธรรมชาติจะมีค่าการยุบจมที่สูงขึ้น เนื่องจากอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ขณะที่เมื่ออุณหภูมิสูงยางธรรมชาติจะไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ค่าการยุบจมจึงสูงขึ้น

การกระเด้งกระดอน (*rebound resilience*) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเด้งกระดอนสูงและในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำ เมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางชนิดนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน เพราะหากใช้ยางที่มีความร้อนสะสมสูงก็อาจทำให้ยางเกิดการระเบิดได้ง่าย

อุณหภูมิการใช้งาน (*service temperature*) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55 ถึง 70°C อย่างไรก็ตาม หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นไป แต่ถ้าอุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆ ก็จะลดลง เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ ในการออกสูตรผสมสารเคมียางที่เหมาะสม ยางธรรมชาติอาจสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 หรือ 100°C

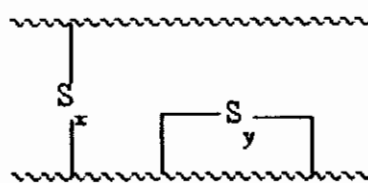
อย่างไรก็ตาม ยางดิบยังคงมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเมื่อได้รับความร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ จะเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย

2.4 การทำให้ยางธรรมชาติเกิดการคงรูป [9]

การทำให้ยางคงรูปหรือทำให้ยางสุก คือ การทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาวุลคาไนเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่อนข้างอ่อน มีความเป็นพลาสติกสูง ไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นดีและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียรและไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากนัก และทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้น จึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ปฏิกิริยาวุลคาไนเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำให้สารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้

2.4.1 ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน (sulphur vulcanization system)

เป็นระบบที่ใช้อย่างกว้างขวางกับยางที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว (unsaturation) ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (activator) เช่น ซิงค์ออกไซด์ และกรดสเตียริก สำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาของยาง ส่วนระหว่างการใช้กำมะถันกับสารตัวเร่งมีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่าระบบธรรมดา (conventional vulcanization, CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบพอลิซัลไฟด์ และแบบวงกลม (cyclic) แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะเคมีส่วนใหญ่เป็นแบบโมโนซัลไฟด์ เรียก系統นี้ว่าระบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV system) นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าวยังมีอีกระบบหนึ่งเรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้น คือใช้ปริมาณกำมะถันเท่ากับปริมาณสารตัวเร่ง



ระบบ EV ค่า x จะเท่ากับ 1 หรือ 2 (mono- or disulphide)

ระบบ CV ค่า x จะสูงส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 (polysulphide)

รูปที่ 2.2 พันธะเคมีหรือการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลยางด้วยกำมะถัน [9]

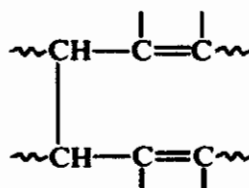
อย่างไรก็ตามพันธะเคมีแบบพอลิซัลไฟด์จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อนเนื่องจากพันธะ S-S เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง ในขณะที่ยางที่มีพันธะแบบโมโนซัลไฟด์หรือไดซัลไฟด์ จะให้สมบัติเชิงกลที่ดีน้อยกว่า แต่ยางจะเสถียรต่อความร้อนได้ดี

2.4.2 ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (sulphur donor vulcanization system)

นอกจากการใช้ธาตุกำมะถันเป็นสารคงรูปแล้ว สารประกอบอินทรีย์ที่สลายตัวให้กำมะถัน ที่อุณหภูมิการอบให้ยางคงรูปก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปได้ สารกลุ่มนี้ได้แก่ TMTD (tetramethyl thiuram disulphide) และอนุพันธ์ของมอร์โฟลีน (morpholine) เช่น DTDM (dithio dimorpholine) การใช้สารประกอบพวกนี้เป็นสารคงรูปมีข้อดีคือลดปัญหาการเกิดการบวม (bloomimg) และเนื่องจากปฏิกิริยาจะไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะสลายตัวออกมา ดังนั้นจึงลดปัญหาการเกิดสกอร์ช (scorch) สารพวกนี้ยังก่อให้เกิดพันธะเคมีแบบโมโนซัลไฟด์เป็นส่วนใหญ่ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีมาก

2.4.3 ระบบที่ทำให้ยางคงรูปด้วยสารที่ไม่มีกำมะถัน

เปอร์ออกไซด์ เป็นสารคงรูปที่สำคัญสำหรับยางที่มีโมเลกุลอิ่มตัว (saturate) หรือโมเลกุลที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยาในการสร้างพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุล เช่น ยาง EPM เป็นต้น ในทำนองเดียวกัน เปอร์ออกไซด์ก็สามารถใช้เป็นสารคงรูปสำหรับยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ ยาง SBR และยาง NBR ได้ และจะทำให้ยางเหล่านี้ทนต่อความร้อนได้ดี สารกลุ่มนี้ไม่ได้เข้าไปเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง แต่จะทำให้โมเลกุลของยางเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (radicals) แล้วเกิดเป็นพันธะเคมีแบบคาร์บอน-คาร์บอน ระหว่างสายโมเลกุลของยาง



รูปที่ 2.3 การเชื่อมโยงแบบพันธะคาร์บอน-คาร์บอนที่เกิดจากการใช้เปอร์ออกไซด์

โลหะออกไซด์ เช่น ZnO ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของยางนิโอพรีน โดยนิยมใช้ร่วมกับ MgO เพื่อเป็นตัวจับอะตอมคลอรีนที่เกิดขึ้น

สารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ หรือมากกว่า สามารถใช้เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปได้ เพราะหมู่ฟังก์ชันที่ปลายด้านหนึ่งของสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยาง (สายโซ่ที่ 1) ในขณะที่หมู่ฟังก์ชันอีกปลายด้านหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่โมเลกุลยางที่อยู่ใกล้เคียง (สายโซ่ที่ 2) สารประกอบเหล่านี้จึงมีหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมสายโซ่โมเลกุลยางเข้าด้วยกัน ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้ ได้แก่

ควิโนนไดออกไซด์ (Quinonedioxime) สารประกอบในกลุ่มควิโนนไดออกไซด์สามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้ง่าย จึงนิยมใช้เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูป เพราะจะทำให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วโดยไม่ต้องใช้กำมะถันและยางคงรูปที่ได้ก็จะมี ความคงทนต่อความร้อนและไอน้ำสูงเป็นพิเศษ ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบกลุ่มนี้ คือ เบนโซควิโนนไดออกไซด์ (p-benzo quinonedioxime, CDO) และไดเบนโซควิโนนไดออกไซด์ (dibenzo-CDO)

ไดไอโซไซยานาต (Diisocyanate) สารประกอบในกลุ่มไอโซไซยานาต ได้รับการพัฒนาให้สามารถใช้ในการคงรูปของยางธรรมชาติ ยางคงรูปที่ได้จะมีความคงทนต่อความร้อนสูง และยังมี ความแข็งแรงสูงกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบกำมะถันอีกด้วย เช่น บล็อกไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานาต (block diphenyl methanediisocyanate)

ไดเอมีน (Diamine) สารประกอบในกลุ่มไดเอมีน เช่น เฮกซะเมทิลีนไดเอมีน (hexamethylene diamine) ใช้ร่วมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือ ตะกั่วออกไซด์ (PbO) สามารถใช้ในการคงรูปยางฟลูออโรคาร์บอนได้ แต่ในปัจจุบันสารประกอบดังกล่าวนี้ไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีระยะเวลาสกรอว์ที่สั้นมาก จึงทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบาก ยางคงรูปที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำและยังมีสมบัติการเสถียรหลังการกวดอัดที่ไม่ดี ในปัจจุบันผู้ผลิตจึงนิยมใช้บิสฟีนอล เอ-เอฟ (bisphenol AF) ร่วมกับตัวจับกรด เช่น $\text{MgO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ แทน เพราะระบบการคงรูปแบบหลังนี้จะทำให้ยางมีระยะเวลาการสกรอว์ที่ยาวขึ้น นอกจากนี้ยางคงรูปที่ได้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและมีค่าการเสถียรหลังการอัดที่ดีกว่า

นอกจากการใช้สารเคมีดังกล่าวแล้ว การฉายรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ก็สามารถทำให้ยางคงรูปได้เช่นกัน โดยเมื่อถูกรังสีโมเลกุลของยางจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระและจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงแบบ คาร์บอน-คาร์บอนทำให้ยางที่ได้มีความเสถียรต่อความร้อน มีความบริสุทธิ์สูง เพราะไม่มีสารเคมีอื่นใดเจือปน จึงเหมาะสำหรับการผลิตอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนยางที่ใช้ทางการแพทย์

2.5 เถ้าลอย (Fly ash) [10-11]

เถ้าลอยเป็นของเหลือที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้า ประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ กัน พบว่ามีขนาดเฉลี่ยของซิลิกา อลูมินา (silica alumina glass spheres) ตั้งแต่ 5 ถึง 45 ไมโครเมตร หลังจากการจัดแบ่งประเภท โดยขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันนี้สามารถแยกได้โดยชุดของไซโคลน (cyclone) สำหรับในแอฟริกาใต้พบว่ามีปริมาณของเถ้าลอยเกิดขึ้นต่อปีประมาณ 30 ล้านตัน โดยหากที่เหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินประมาณร้อยละ 20 จะเป็นเถ้าของหม้อต้ม (bottom ash) และประมาณร้อยละ 80 คือเถ้าลอย ซึ่งเป็นปริมาณที่มาก ทำให้เกิดปัญหาต่างๆ มากมาย ทั้งปัญหาคอประชากรและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการกำจัดเถ้าลอย นั้นจะอาศัยการฝังกลบ จึงต้องใช้พื้นที่ในการจัดการที่มาก วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาคือการลดปริมาณเถ้าลอย โดยการนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์แก่โรงงานอุตสาหกรรม

2.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย [11]

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย จะประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) อลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) เฟอรัสออกไซด์ (Fe_2O_3) และ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะระหว่างปี 2533 – 2542 พบว่าสารประกอบที่มีจำนวนมากคือ SiO_2 และ Al_2O_3 ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะ [11]

สารประกอบ	ค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	9.4-17.4
SiO_2	37.3-52.8
Al_2O_3	18.0-28.1
Fe_2O_3	8.5-15.0
MgO	1.2-3.3
SO_3	1.7-3.9
Na_2O	0.6-1.3
K_2O	2-3.3
การสูญเสียเนื่องจากการเผา	0.1-0.9

2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของถ้ำลอย [11]

คุณสมบัติของถ้ำลอยจะขึ้นอยู่กับ ลักษณะและคุณสมบัติของถ้ำหิน ลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และความละเอียดของถ้ำลอย ดังนี้

2.7.1 ลักษณะและคุณสมบัติของถ้ำหิน

แบ่งตามคุณสมบัติและระยะเวลาการเกิดออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ พีท (peat) เกิดจากการทับถมของพืช มีลักษณะเป็นเนื้อไม้พรุนๆคล้ายฟองน้ำ สีน้ำตาลอ่อนไปจนถึงสีดำ และดูดซับน้ำไว้มาก ลิกไนต์ (lignite) หรือถ้ำหินสีน้ำตาล (brown Coal) มีสีน้ำตาลอ่อนจนสีน้ำตาลแก่ มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ความชื้นสูง บิทูมินัส (bituminous หรือ soft coal) ติดไฟง่าย กลิ่นแรง มีสารระเหยอยู่ระหว่างร้อยละ 18-45 โดยน้ำหนัก และแอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ้ำหินที่มีปริมาณคาร์บอนสูงประมาณร้อยละ 92-44 โดยน้ำหนัก เนื้อถ้ำหินสีดำ เป็นเงา มีความชื้นน้อยประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักถูกติดไฟช้าและนานกว่าถ้ำหินชนิดอื่นๆ ถ้ำหินที่พบในประเทศไทยส่วนใหญ่มีอายุประมาณ 50-70 ล้านปี จะเป็นถ้ำหินลิกไนต์ซึ่งมีคุณภาพต่ำกว่าชนิดอื่น แต่ก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์แทนน้ำมันเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี

2.7.2 ลักษณะทางกายภาพของถ้ำลอย

ขึ้นอยู่กับความละเอียดของถ้ำหินก่อนเผา และชนิดของถ้ำหิน อุณหภูมิเผาถ้ำหิน Lane, Best (1982) พบว่าถ้ำลอยส่วนใหญ่เป็นรูปทรงกลมตันและอาจเป็นรูปทรงกลมกลวงหรือรูเข็ม ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและระบบของเครื่องดักจับถ้ำลอย โดยทั่วไปจะเป็นเม็ดกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 0.15 มิลลิเมตร ส่วนถ้ำลอยที่มีขนาดใหญ่และอาจจะมีถ้ำลอยขนาดเล็กๆอยู่ภายในเรียกว่าถ้ำถ้ำหินกลวง (cenosphere) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและลอยน้ำได้ รูปที่ 2.4 แสดงภาพขยาย SEM ของอนุภาคถ้ำลอยที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน สีของถ้ำลอยโดยทั่วไปจะแตกต่างกันจากสีน้ำตาลอ่อน สีเทาและสีดำขึ้นอยู่กับสารประกอบภายในถ้ำลอย



รูปที่ 2.4 ภาพขยาย SEM ของอนุภาคถ้ำลอยที่มีลักษณะต่างๆกัน [11]

2.7.3 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอย จะมีค่าต่างกันในเรื่องปริมาณตามแหล่งหรือชนิดของถ่านหิน ที่มาของเถ้าลอย ขบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา มาตรฐาน ASTM C618-96 ได้แบ่งชั้นคุณภาพของ เถ้าลอยออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพได้แก่ชั้นคุณภาพ F และชั้นคุณภาพ C ตามตารางที่ 2.3 โดยใช้ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยที่ได้หลังจากการเผาถ่านหินเป็นตัวกำหนด

ตารางที่ 2.3 การแบ่งชั้นคุณภาพของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-96 [11]

คุณสมบัติ	ประเภทของเถ้าลอย	
	ชั้นคุณภาพ F	ชั้นคุณภาพ C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, min %	70.0	50.0
SO_3 , max %	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น, max %	3.0	3.0
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้, max %	6.0	6.0
อัลคาไลน์ ในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O), max %	1.5	1.5
ดัชนีกำลังรับแรงอัด, min %	75.0	75.0

เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์และบิทูมินัส จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 บางครั้งเรียกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (ส (low – calcium fly ash) เถ้าลอยชั้นคุณภาพ C เกิดจากการเผาถ่านหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัส และมีแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 15-23 บางครั้งเรียกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (high – calcium fly ash)

2.7.4 ความละเอียดของเถ้าลอย

ขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ่านหินที่จะนำไปเผา ชนิดของเครื่องบดและชนิดของเตาเผา คือถ้าบด ถ่านหินละเอียดมากขึ้น และเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ภายในเตาเผา จะทำให้ได้ถ่านหินที่มีความ ละเอียดสูงกว่าเมื่อใช้ถ่านหินที่บดหยาบกว่าหรือเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ เเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีถ่านหินปนอยู่จำนวนมาก

2.8 การใช้ประโยชน์เถ้าลอย [10-12]

รูปแบบของการใช้เถ้าลอยในยุโรป จากข้อมูลปี ค.ศ. 1999 มีการนำมาประยุกต์ใช้กับ อุตสาหกรรมด้านต่างๆ ดังตารางที่ 2.4 เป็นภาพรวมระดับการใช้ประโยชน์เถ้าลอยในยุโรป ประมาณร้อยละ 88 อย่างไรก็ตามอัตราการใช้งานในประเทศต่างๆ ยังแตกต่างกันอย่างชัดเจน ใน

สอลแลนค์ เซอร์มัน เบลเยียม อิตาลี และเคนมาร์ก มีอัตราการใช้ประโยชน์เข้าใกล้ร้อยละ 100 สำหรับในประเทศอื่นๆ อัตราการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยนั้นยังน้อยอยู่มาก ในประเทศอังกฤษซึ่งมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ระดับของการใช้ประโยชน์จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 ทั้งนี้แนวโน้มการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยนั้นมีเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้ประโยชน์ในด้านวัสดุก่อสร้าง

ตารางที่ 2.4 การปริมาณใช้ประโยชน์และการกำจัดเถ้าลอยในยุโรป ปี ค.ศ. 1999 [10]

การใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ	ปริมาณการใช้ (ล้านตัน)
Cement raw material	3.7
Blended cement	1.9
Concrete addition	5.4
Aerated concrete block	0.7
Non-Aerated concrete block	0.6
Lightweight aggregate	0.2
Grouting	0.5
Subgrade stabilization	0.3
General engineering fill	1.3
Structural fill	1.4
Infill	1.4
Other uses	0.7
Reclamation/restoration	15.4
Temporary stockpile	0.7
disposal	3.8
Total	38.0

ตารางที่ 2.5 ปริมาณใช้ประโยชน์และการกำจัดเถ้าลอยในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 1999 [10]

การใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ	ปริมาณการใช้ (ล้านตัน)
Cement/concrete/grout	10.3
Flow able fill	0.8
Structural fill	2.9
Road base/sub-base	1.1
Mineral filler	0.1
Mining applications	1.4
Waste stabilization/solidification	1.8
ด้านเกษตรกรรม	0.1
Miscellaneous และอื่นๆ	10.4
รวม	18.9
เปอร์เซ็นต์ที่ใช้ทั้งหมด	33.2%

ในสหรัฐอเมริกา พบว่ามีเถ้าลอยเกิดขึ้นประมาณ 56.9 ล้านตัน โดยปริมาณ 38.0 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 67 จะถูกกำจัดโดยการฝังกลบ ถือเป็นปริมาณที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับภาพรวมของยุโรป ดังตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยจะใช้ในส่วนของปูนซีเมนต์ และคอนกรีตเป็นส่วนใหญ่

การนำไปใช้ประโยชน์ในประเทศไทย ปัจจุบันเถ้าลอยนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา เสาเข็ม ท่อ พื้นสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด (Rolling Compact Concrete, RCC)

จากการศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในหน่วยงานต่างๆ ของ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เมื่อประมาณ 10 ปีที่ผ่านมา ได้แก่

การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาทำผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างคือการนำมาทำเป็นซีเมนต์บดลือกก่อผนังและซีเมนต์บดลือกปูพื้น ความเป็นมาในเรื่องนี้คือ ในปี พ.ศ. 2534 องคมนตรีพลเอกพิจิตร กุลละวณิชย์ ได้นำวัสดุคล้ายอิฐบดลือกมาจากประเทศฮังการี และนำขึ้นทูลเกล้าฯ ถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว เพื่อเป็นตัวอย่าง ต่อมาพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงมอบหมายให้ นายสุเมธ ตันติเวชกุล ดำเนินการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ ในขณะเดียวกัน พล

เอกพิจิตร กุลละวณิช ได้มีหนังสือถึง กฟผ. เพื่อทำการศึกษารื่องดังกล่าว ซึ่ง กฟผ. ได้ตั้งคณะทำงานเพื่อศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้าง จากผลของการศึกษาพบว่า สามารถนำเถ้าลอยลิกไนต์มาทดแทนซีเมนต์ได้

กฟผ. ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์ผสมน้ำประมาณร้อยละ 15-20 ทำการบดอัดชั้นละประมาณ 35 ซม. เพื่อแก้ไขปัญหารากทรุดของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 นอกจากนี้ ยังนำเถ้าลอยลิกไนต์ผสมน้ำประมาณร้อยละ 40-50 เทลงไปในบริเวณที่ทรุดตัวของดินระหว่างผนังดินและผนังคอนกรีตของคลองส่งน้ำจากเขื่อนแม่เมาะ

เหมืองแม่เมาะได้ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ 1 ส่วน ผสมกับซีเมนต์ 1 ส่วน และผสมรวมกับน้ำและเบนทูนไนท์ เพื่ออัดฉิมน้ำปูนเข้าไปตามรอยแยกต่างๆ ของผนังบ่อเหมือง เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยาสันดาปกับถ่านลิกไนต์บางส่วนที่มีอยู่ ซึ่งจะก่อให้เกิดการลุกไหม้ติดไฟเกิดขึ้น

สำหรับงานก่อสร้างถนน ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ทำชั้นรองพื้นทางของถนน โดยการผสมน้ำร้อยละ 15-20 แล้วทำการบดอัด การทำถนนคอนกรีต RCCP. (Roller Compacted Concrete Pavement) โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์และซีเมนต์เท่าๆ กันผสมกับทรายและหิน โดยใช้อัตราส่วนของน้ำต่อสารประสานประมาณ 0.30 พร้อมทั้งใส่ สารลดน้ำ (water reducing agent) ลงไปทำการผสมและนำไปเทลงบริเวณหน้างาน ทำการบดอัดเหมือนงานก่อสร้างทั่วไป นอกจากนี้ในงานถนนคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนที่เป็นสารประสาน จะใช้ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 65 และเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 35

ได้มีการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างเขื่อนหลายแห่ง เช่น งานก่อสร้างเขื่อนที่ปากมูล จะใช้ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 31 และเถ้าลอยลิกไนต์ประมาณร้อยละ 69 ในส่วนที่เป็นสารประสาน ทำการผสมกับทรายและหินแล้วทำการบดอัดชั้นละประมาณ 35 ซม. ทำการบดอัด 6 เที่ยวเพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบของเขื่อน ในงานก่อสร้างเขื่อนปากมูลนี้ ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะไปใช้ประมาณ 6,000 ตัน นอกจากนี้ ในงานก่อสร้างเขื่อนแม่ปิงตอนล่าง ก็ได้้นำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างเขื่อนด้วย สาเหตุที่นำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้เป็นส่วนผสมในการก่อสร้างเขื่อนนี้ เนื่องจากต้องการลดปริมาณความร้อนคอนกรีต ซึ่งมีประมาณมากในระหว่างการก่อสร้าง และช่วยให้คอนกรีตมีการแข็งตัวช้าลง เพื่อจะได้มีเวลาทำงานมากขึ้น และที่สำคัญคือป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับสารบางอย่างที่มีอยู่ในทรายและหิน ซึ่งจะทำให้เกิดสารใหม่ขึ้นและเกิดการขยายตัวทำให้เขื่อนแตกร้าวได้

กฟผ. แม่เมาะ ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ในงานคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่ง เช่น งานคอนกรีตเสริมเหล็กของรางระบบสายไฟในโรงไฟฟ้า ถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งโดยหลักการ

แล้ว การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในงานคอนกรีตนั้นเพื่อให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถในการใช้งานดีขึ้น เพราะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเป็นทรงกลม ช่วยให้คอนกรีตไหลไปตามจุดต่างๆ ของโครงสร้างได้ดีกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสั่นสะเทือนเข้าช่วย

นอกจากนี้ ยังมีการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้เป็นสารช่วยเร่งการตกตะกอน โดยนำไปผสมกับกรด และขณะนี้กำลังทำการวิจัยเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้เป็นปุ๋ย

2.9 แหล่งที่มาของเถ้าลอยภายในประเทศ [11]

ในปัจจุบันแหล่งของเถ้าลอยที่สำคัญในประเทศไทยมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ประมาณวันละ 40,000 ตัน การเผาถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าลอยประมาณ 8,000 ตัน โรงไฟฟ้าแม่เมาะได้ควบคุมคุณภาพถ่านหินก่อนเข้าโรงไฟฟ้า ให้มีปริมาณซัลเฟอร์ (SO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมตั้งแต่ พ.ศ. 2533 ถึงปัจจุบัน ก่อให้เกิดผลพลอยได้คือ เถ้าลอยลิกไนต์มีองค์ประกอบทางเคมีค่อนข้างสม่ำเสมอ และอยู่ในเกณฑ์ของสาร pozzolan class F ตามมาตรฐาน

ASTM C 618

2.10 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน (Silane) [13]

เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้จะทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) สูง ซิลิกาจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (ที่เรียกว่าแอกไกลเมอเรต) เพราะอันตรกิริยาหรือแรงดึงดูดที่ยึดกลุ่มก้อนซิลิกาเข้าด้วยกันคือพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว (disperse) และกระจายตัว (distribute) ในยางได้ยากกว่าเขม่าดำ สำหรับในกรณีที่เติมซิลิกาลงไปในยางในปริมาณค่อนข้างมาก กลุ่มก้อนของซิลิกาจะเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกาค้างกันเอง เกิดเป็นโครงข่ายคาข่ายที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า “โครงข่ายคาข่ายของสารตัวเติม (filler-filler network)” ซึ่งโครงข่ายคาข่ายของสารตัวเติมนี้อาจจะทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบากและทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมากยิ่งขึ้น การเติมสารบางชนิดที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลสามารถทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่ายยิ่งขึ้น ความหนืดของยางคอมพาวด์ก็จะลดลง ทำให้กระบวนการผสมและการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ตัวอย่างของสารเติมแต่งดังกล่าว ได้แก่

ซิงค์ออกโตเอต (zinc octoate) หรือ เฮกซะเมทิลดีนเตดรามีน (HEXA) รวมถึงสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปในกลุ่มกัวนิติน เช่น ไดฟีนิลกัวนิติน (DPG) เป็นต้น

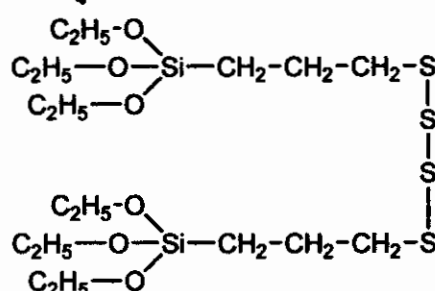
นอกจากนี้ หมูโซลานอลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี โดยในสภาพการเก็บรักษาทั่วไปแล้ว ซิลิกาจะมีความชื้นประมาณ 4-7 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาณความชื้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับความชื้นของสิ่งแวดล้อม) ซึ่งความชื้นที่จับอยู่กับหมูโซลานอลบนพื้นผิวซิลิกานั้นนอกจากจะทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อยแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาของยางของยางได้อีกด้วย โดยทั่วไป ถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางในระบบที่ใช้กำมะถัน (ทั้ง scorch time และ vulcanization time) ก็จะยาวขึ้น เพราะซิลิกาที่อึดตัวด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาของรูป ทำให้ต้องใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความชื้นบางส่วนจะถูกไล่ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมเคมียางเพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผลิตจะสูงมาก (มากกว่า 100°C) ทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไป ด้วยเหตุนี้ การผสมยางที่อุณหภูมิแตกต่างกันก็สามารถทำให้เกิดความแปรปรวนของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปได้เช่นกัน

อนึ่ง ปัญหาสำคัญอีกอย่างที่มีมักพบเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมคือปัญหาเรื่องการคงรูปยาง เพราะบนพื้นผิวซิลิกามีหมูโซลานอลที่สามารถดูดซับสารตัวเร่งปฏิกิริยาของรูปที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน การดูดซับดังกล่าวจะทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีมีปริมาณลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีระดับของการคงรูปลดลงด้วยเช่นกัน โดยทั่วไป ผู้ผสมเคมียางสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่มไกลคอลหรือ กลุ่มเอมีนลงไปเพราะสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมูโซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่ถูกดูดซับโดยหมูโซลานอลมีปริมาณลดลง ปฏิกิริยาของรูปก็จะเกิดได้เร็วขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญของสารประกอบเหล่านี้ ได้แก่ ไดเอทิลีนไกลคอล (DEG) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ไตรเอทิลเอมีน และ เฮกซะเมทิลดีนเตดรามีน (HEXA) เป็นต้น นอกจากการเติมสารประกอบดังกล่าวแล้ว การปรับลำดับการเติมสารเคมีลงไปในการผสม เช่น การเติม ZnO ลงไปในช่วงท้ายของการผสมก็จะช่วยลดปัญหาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีได้เช่นกัน

การเติมสารประกอบในกลุ่มดังกล่าวนอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปแล้ว สารประกอบเหล่านี้ยังช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาอีกด้วย ช่วยให้แรงกระทำระหว่างซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวได้ง่ายขึ้น ความหนืดของยางคอมพาวด์ก็จะลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ปริมาณของสารเคมีดังกล่าวที่แนะนำ

ให้ใช้นั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกา เช่น ใช้ PEG ประมาณ 8-10 ส่วนโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของซิลิกา

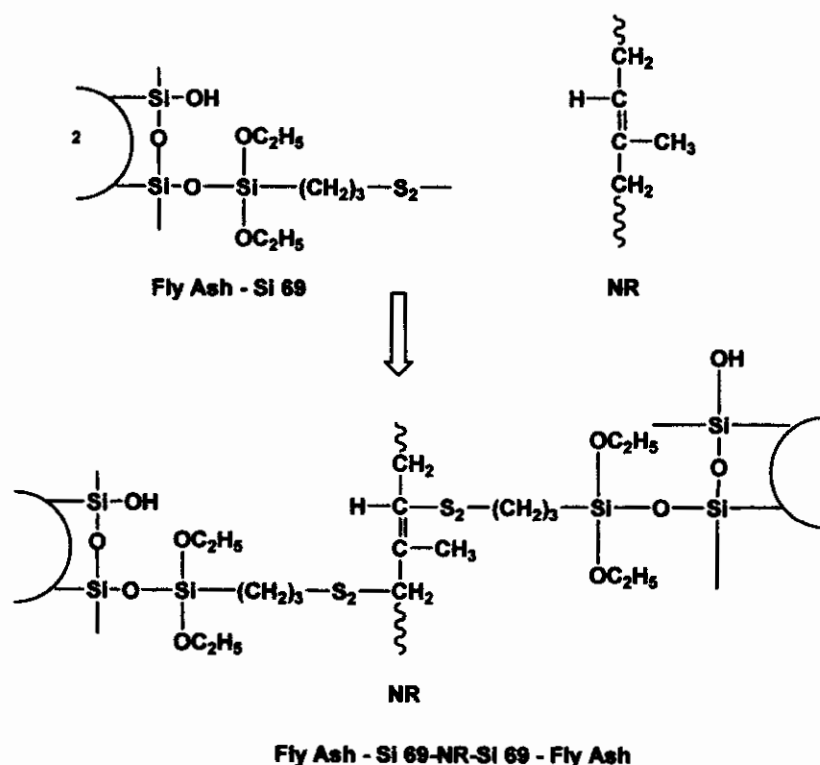
จากปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาและลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือการใช้สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) โดยทั่วไป การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้นเพราะสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือหมู่แอลคอกซี (alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี ($-\text{OCH}_3$) หรือ หมู่เอทอกซี ($-\text{OC}_2\text{H}_5$) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (organo-functional group) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน Si-69

เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่แอลคอกซีซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะซิลอกเซนที่มีความเสถียรและมีการปลดปล่อยแอลกอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลง ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ขางคอมพิวเตอร์ที่ได้ก็จะมีน้ำหนักลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสมเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ หมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ของสารคู่ควบไซเลนบางชนิดยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการอบคงรูป กำมะถันในสารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanization reaction) เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ด้วยเหตุนี้ สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขาด เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปปริมาณเล็กน้อยจะช่วยทำให้ยาง

คงรูปมีความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตก (cut growth resistance) สูงสุด แต่ในกรณีที่ต้องการยางคงรูปที่มีความต้านทานต่อการขัดถูสูงสุดก็จำเป็นต้องเติมสารตัวควบไซเลนลงไปเป็นปริมาณมากขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว สารตัวควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ของยางคงรูปอีกด้วยโดยเฉพาะการลดความร้อนสะสม (heat buildup) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างของสารตัวควบไซเลนที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ไตรเอทอกซีไฮลโรฟิเลตเตราซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69) เมอร์แคปโตไฮลโรฟิเลไตรเมทอกซีไฮเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) และไทโอไซยานาโตไฮลโรฟิเลไตรเอทอกซีไฮเลน (3-thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-264) เป็นต้น



ปฏิกิริยาที่ 2.1 ปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยที่ปรับปรุงด้วย Si69 แล้วกับยางธรรมชาติ [15]

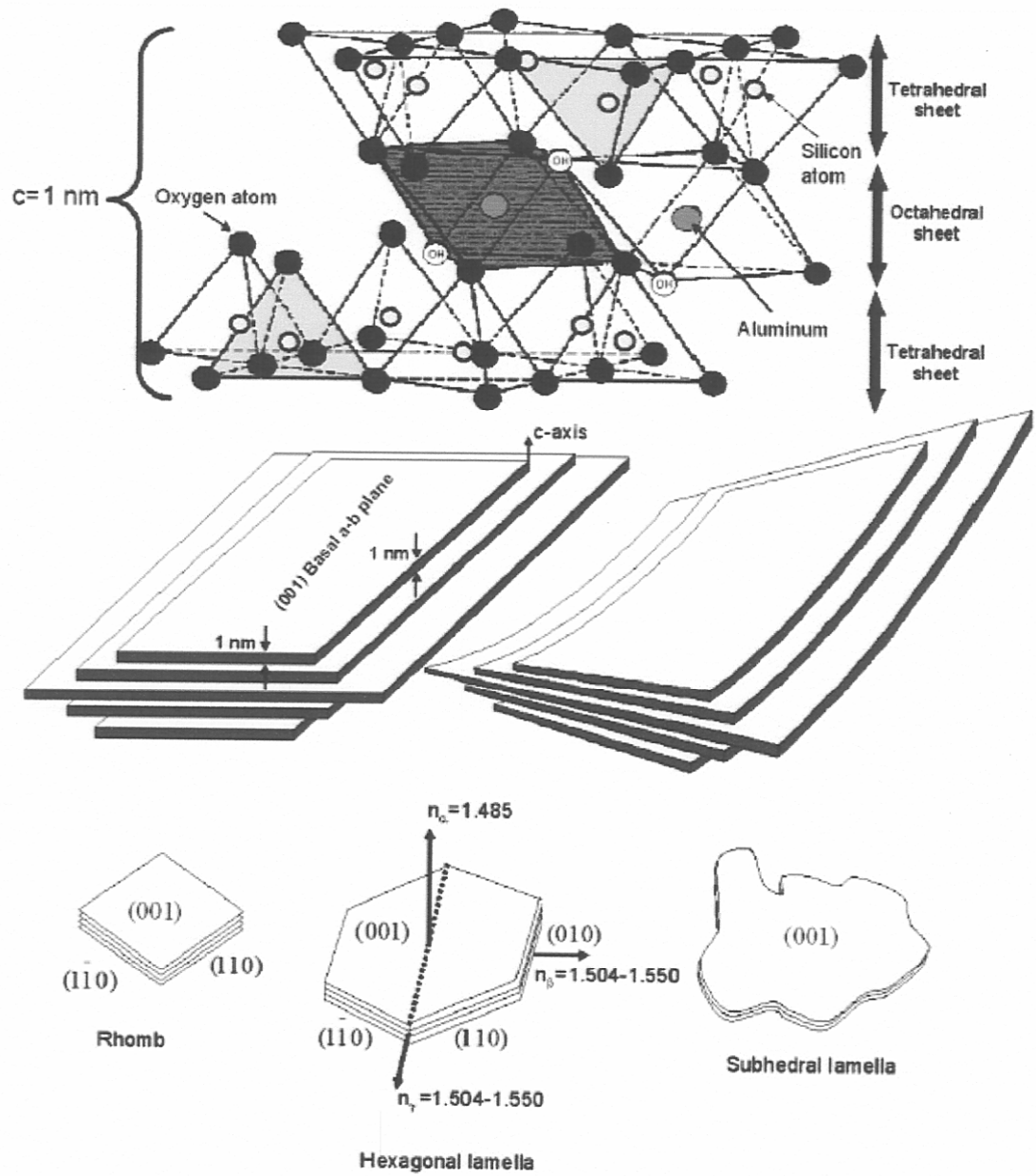
2.11 โครงสร้างและลักษณะของนาโนเคลย์ [17-19]

เคลย์เป็นสารเสริมแรงขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ประกอบไปด้วยชั้นซิลิเกต (layered silicates) ซึ่งถูกใช้ในเป็นสารเสริมแรงสำหรับวัสดุนาโนคอมพอสิตจะมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ 2:1 ฟิลาซิลิเกต (phyllosilicates) ผลึกจะประกอบด้วยโครงร่างผลึก 2 ชั้น ซึ่งส่วนกลางของชั้นออกตะฮีดรอลเป็น อลูมินา หรือแมกนีเซียมและมีชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรอล 2 ชั้นประกอบอยู่

ภายนอก โดยมีออกซิเจนไอออนของออกตะฮีดรอลเป็นตัวเชื่อมกับชั้นของเตตระฮีดรอล ชั้นเคลย์จะมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร และขนาดด้านข้างของชั้นเหล่านี้อาจเปลี่ยนแปลงจาก 30 นาโนเมตร ถึงหลายไมโครเมตร และจะมากขึ้นตามลักษณะชนิดของซิลิเกต ชั้นของซิลิเกตเหล่านี้จัดเรียงเป็นกองซ้อนกัน โดยระหว่างชั้นของซิลิเกตจะถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงวันเดอร์วาลส์ การแทนที่ของธาตุภายในชั้น เช่น Al^{3+} ถูกแทนที่โดย Mg^{2+} หรือ Fe^{2+} หรือ Mg^{2+} ถูกแทนที่โดย Li^+ ทำให้เกิดประจุลบขึ้น ซึ่งจะถูกทำให้สมดุลประจุโดยธาตุประจุบวกของหมู่ 1 และ 2 แทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกต เนื่องจากแรงซึ่งทำให้ชั้นของซิลิเกตสามารถรวมตัวกันได้นั้นเป็นแรงที่อ่อน ดังนั้นจึงสามารถแทรกโมเลกุลเล็กเข้าไประหว่างชั้นได้ง่าย เพื่อให้ไฮโดรฟิลิกไฟโรซิลิเกตมีความเป็นออร์แกโนฟิลิกมากขึ้น โดยธาตุประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นเคลย์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนด้วยสารลดแรงดึงผิวเช่น แอลคิลเอมโมเนียม หรือ แอลคิลฟอสโฟเนียม เคลย์ที่ถูกปรับปรุงหรือออร์แกโนเคลย์เป็นออร์แกโนฟิลิกนั้นพลังงานพื้นผิวจะลดลงและสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ชนิดอินทรีย์ได้มากขึ้น พอลิเมอร์เหล่านี้จะสามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกตได้ ภายใต้สภาวะของการทดลองที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.6 แสดงสูตรเคมีและลักษณะของ โครงสร้างแบบ 2 : 1 [16]

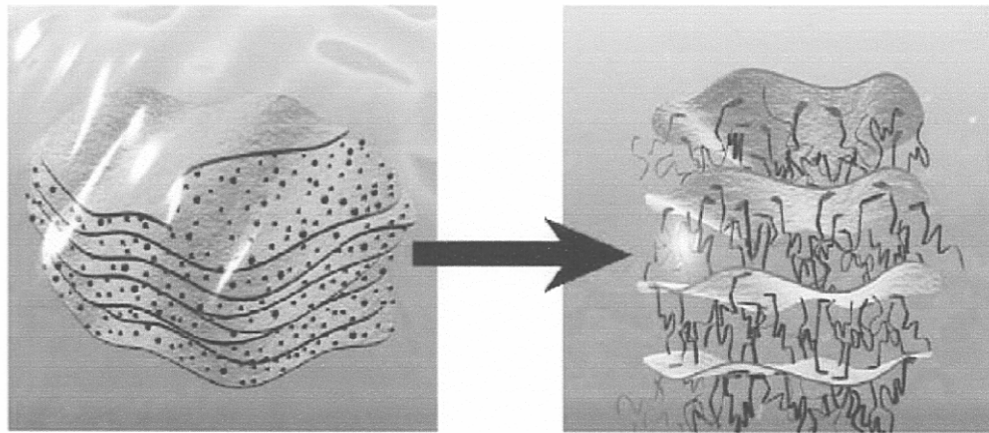
2:1 Phyllosilicate	สูตรเคมี	CEC (meq/100 g)	Particle length (nm)
มอนต์มอริลโลไนต์	$M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	110	100-150
เฮกไทไรต์	$M_x(Mg_{6-x}Li_x)Si_8O_{20}(OH)_4$	120	200-300
ซาฟอไนต์	$M_xMg_6(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(OH)_4$	86.6	50-60
* M= ธาตุประจุบวก x = ระดับของหมู่ที่แทนที่ อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.3)			



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของชั้นซิลิเกตแบบ 2 : 1 ฟิลาซิลิเกต [18]

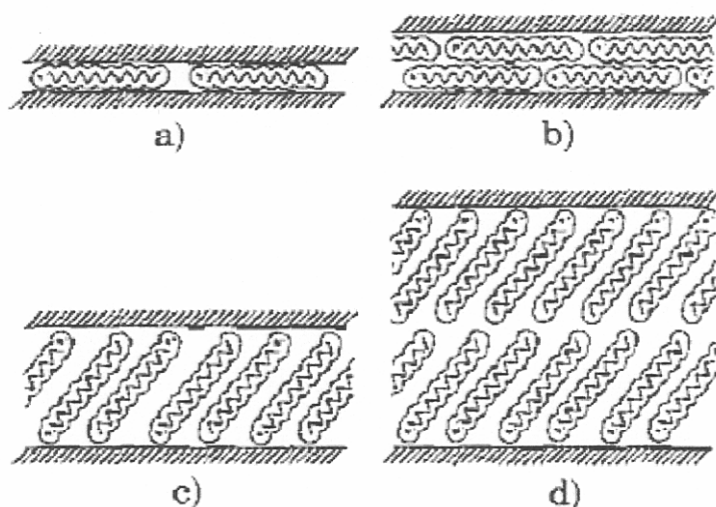
มอนต์มอริลโลไนต์ เฮกโตไนต์ และซาพอไนต์ มีลักษณะโครงสร้างของซิลิเกตดังที่กล่าวมาข้างต้น แสดงสูตรทางเคมีดังตารางที่ 2.6 ในรูปที่ 2.6

เคลย์แต่ละชนิดถูกตรวจสอบประจุบนพื้นผิวเพื่อหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, CEC) โดยแสดงหน่วยเป็น meq/100 g ประจุของชั้นซิลิเกตจะมีปริมาณที่ไม่แน่นอนและต้องพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยบนผลึกทั้งหมด แม้ว่าประจุบวกขนาดเล็กที่ทำหน้าที่สมดุลประจุจะมีอยู่ที่บริเวณภายนอกพื้นผิวของผลึก แต่โดยส่วนใหญ่ของการแลกเปลี่ยนประจุบวกนั้นจะเกิดขึ้นภายในชั้นซิลิเกต เมื่อประจุบวกถูกแลกเปลี่ยนด้วยออร์แกนิกไอออนบวก เช่น แอลคิลแอมโมเนียม ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้นของซิลิเกต ดังรูปที่ 2.7



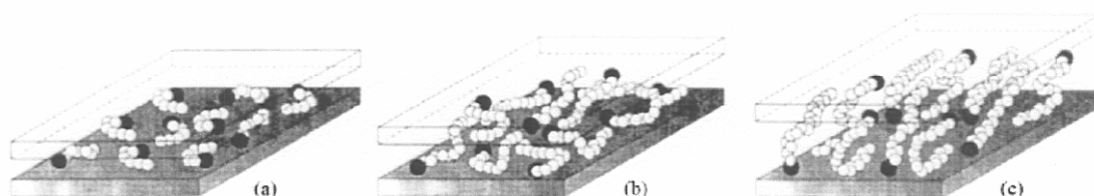
รูปที่ 2.7 ลักษณะการแทรกตัวของออร์แกนิกไอออนบวกระหว่างชั้นซิลิเกต [19]

เพื่อที่จะบรรยายโครงสร้างภายในออลไกโนเคลย์ สิ่งหนึ่งที่ต้องทราบ เนื่องจากประจุลบเกิดขึ้นบนพื้นผิวของชั้นซิลิเกต ดังนั้นหมู่ที่เป็นประจุบวกของแอลคิลแอมโมเนียมจะชอบอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของซิลิเกตมากกว่า โดยส่วนของออร์แกนิกโมเลกุลจะหันออกมาจากพื้นผิว ในช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสม มีปัจจัยสองปัจจัยที่กำหนดระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต ปัจจัยแรกคือความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกของชั้นซิลิเกตซึ่งเป็นปัจจัยทำให้สายโซ่โมเลกุลของออร์แกนิกสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกต ปัจจัยที่สองคือความยาวของสายโซ่ออร์แกนิก จากข้อมูลของ X-ray diffraction (XRD) สายโซ่ออร์แกนิกจะจัดวางตัวได้ทั้งในทิศทางขนานกับชั้นซิลิเกตเกิดเป็นชั้นเดี่ยวหรือชั้นคู่ ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการรวมตัวและความยาวของสายโซ่ หรือเกิดการจัดวางตัวแผ่ออกจากพื้นผิวเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พาราฟินแบบเดี่ยวหรือคู่ (paraffin-type) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการรวมตัวของชั้นซิติเกด (a) monolayer; (b) bilayer;
(c) paraffin-type monolayer และ (d) paraffin-type bilayer [16]

การทดสอบด้วย FTIR จะช่วยอธิบายได้เข้าใจมากขึ้น เกิดการเลื่อนของความถี่ที่แสดงการสั่นแบบยืดและที่ไม่สมมาตรของ CH_2 ซึ่งแสดงว่ามีการแทรกของสายโซ่โดยมีระดับของความเป็ระเบียบต่างกัน โดยทั่วไปความหนาแน่นของการรวมตัวหรือความยาวของสายโซ่ลดลง หรืออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้การแทรกของสายโซ่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งจะแสดงโครงสร้างคล้ายของเหลวเป็นผลมาจากอัตราส่วนของโครงสร้าง gauche/trans เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อจำนวนโมเลกุลอยู่ในช่วงที่แน่นอน สายโซ่โมเลกุลจะจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบที่ไม่สมบูรณ์ แต่จะรักษาลักษณะการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบไว้บางส่วนคล้ายกับอยู่ในสถานะผลึกเหลว ดังรูปที่ 2.9 เมื่อความยาวของสายโซ่เพิ่มขึ้น จะทำให้โครงสร้างเกิดการการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบมากขึ้น

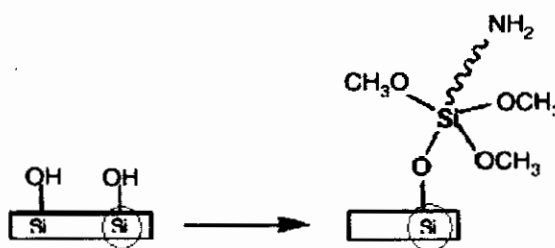


รูปที่ 2.9 รูปแบบการจัดวางตัวของสายโซ่แอลคิล

(a) ความยาวสายโซ่สั้น (b) ความยาวสายโซ่ปานกลาง (c) ความยาวสายโซ่ยาว [16]

2.12 การต่อกิ่ง (grafting) มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารกลุ่มซิลเลน [7]

เป็นการใช้สารที่มีหมู่ซิลเลน (silane group) เข้าไปเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกับหมู่ซิลานอล (silanol group) ที่บริเวณผิวของชั้นซิลิเกต (layered silicate) หรือเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่าปฏิกิริยา Silylation ซึ่งการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างสารที่มีหมู่ซิลเลนกับหมู่ซิลานอล เหมือนกับการใช้สารกลุ่มควบแน่นช่วยเพิ่มการเชื่อมติดระหว่างส่วนของชั้นซิลิเกตกับส่วนของพอลิเมอร์ ให้มีความเข้ากันได้มากขึ้นดังรูปที่ 2.10



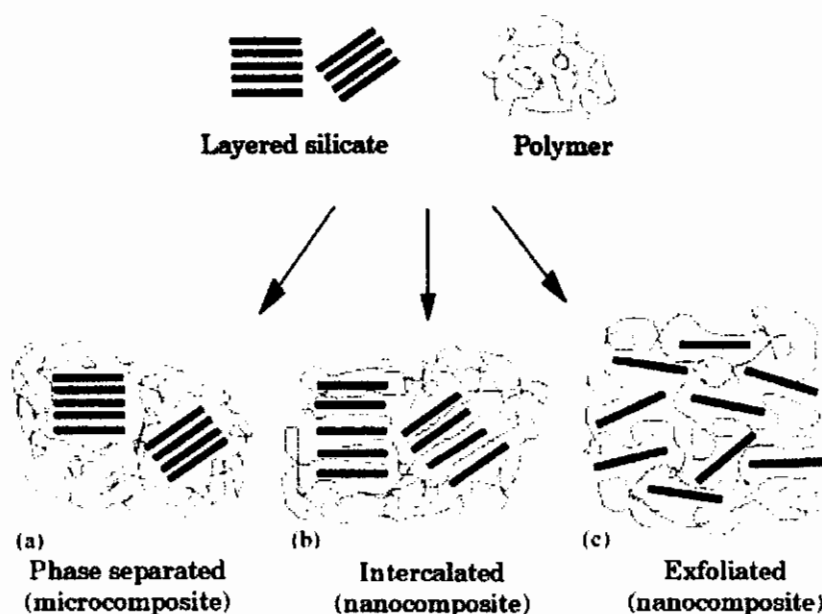
รูปที่ 2.10 การใช้สารกลุ่มควบแน่นในการปรับปรุงชั้นซิลิเกต [7]

การใช้สารที่มีหมู่ซิลเลน (silane group) ทำปฏิกิริยาควบแน่นกับหมู่ซิลานอล (silanol group) ที่บริเวณผิวของชั้นซิลิเกต พบว่าการเกิดปฏิกิริยา Silylation ดังกล่าวทำให้เกิดการสร้างพันธะที่แข็งแรงระหว่างสารที่มีหมู่ซิลเลนกับหมู่ซิลานอลที่บริเวณผิวของชั้นซิลิเกต ส่งผลให้สารกลุ่มควบแน่นแพร่ออกมาได้ยาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการต่อกิ่งด้วยสารกลุ่มควบแน่นซิลเลน ก่อให้เกิดความแข็งแรงต่อสิ่งแวดล้อมน้อย นอกจากนี้การปรับปรุงด้วยวิธีการต่อกิ่งมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารกลุ่มควบแน่นซิลเลนยังเป็นการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์กับมอนต์มอริลโลไนต์ เช่นเดียวกับการเติมสารกลุ่มควบแน่นลงในระบบพอลิเมอร์ที่ได้รับการเสริมแรงด้วยสารเสริมแรงทั่วไป

2.13 โครงสร้างของนาโนคอมพอสิต

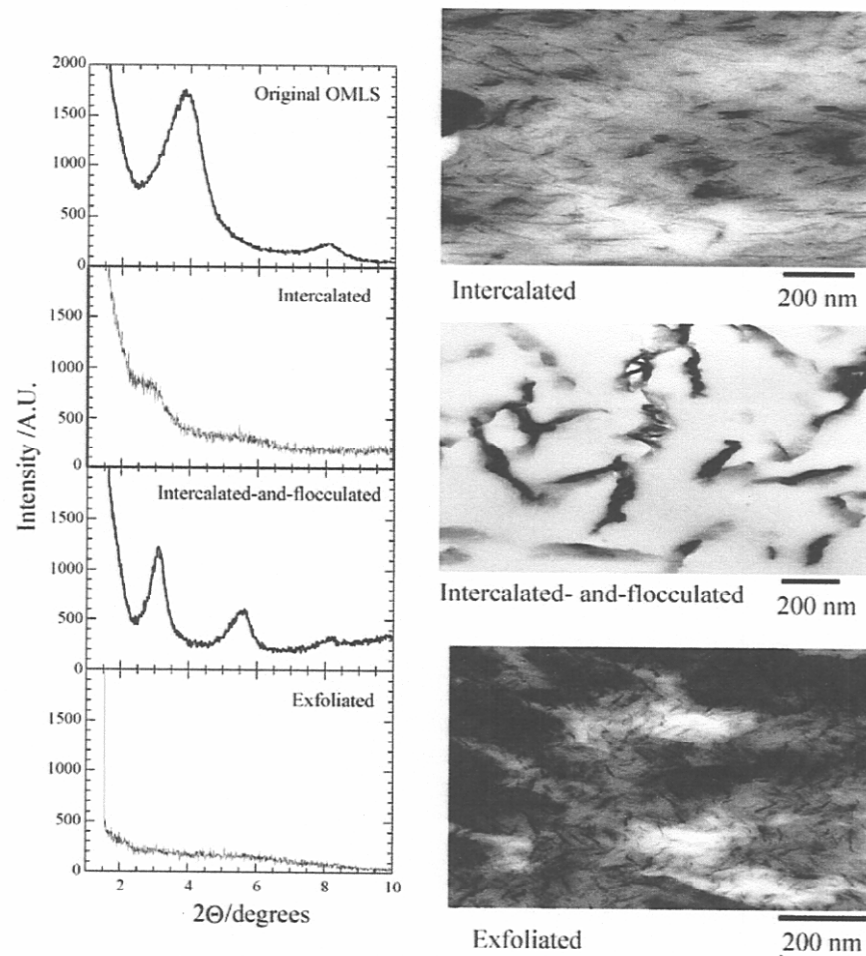
โครงสร้างของนาโนคอมพอสิตขึ้นกับธรรมชาติของสารประกอบที่ใช้ ไม่ว่าจะเป็นชั้นของซิลิเกต ออร์แกนิกแคลไออน และพอลิเมอร์เมทริกซ์ รวมทั้งวิธีการเตรียมวัสดุ ลักษณะคอมพอสิตที่อาจเกิดขึ้นเมื่อชั้นของซิลิเกตเข้าไปอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ดังรูปที่ 2.11 เมื่อพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกตจะเกิดการแยกเฟสระหว่างกัน ดังรูปที่ 2.11 (a) สมบัติของคอมพอสิตจะมีแนวโน้มเป็นแบบไมโครคอมพอสิต นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการกระจายตัวเป็นลักษณะของนาโนคอมพอสิตอีกสองรูปแบบ ดังรูปที่ 2.11 (b) พอลิเมอร์บางส่วนสามารถแทรก

เข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นของซิลิเกตได้มีผลทำให้โครงสร้างเกิดการจัดเรียงสลับกันระหว่างพอลิเมอร์และชั้น ซิลิเกตอย่างเป็นระเบียบ เมื่อชั้นซิลิเกตสามารถแยกออกได้อย่างสมบูรณ์และกระจายตัวอย่างไม่เป็นรูปแบบในพอลิเมอร์เมทริกซ์อย่างทั่วถึงเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า exfoliated ดังรูปที่ 2.11 (c)



รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของชั้นซิลิเกตในวัสดุคอมพอสิต (a) phase separated microcomposite; (b) intercalated nanocomposite และ (c) exfoliated nanocomposite [17]

การตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของชั้นซิลิเกตในวัสดุคอมพอสิต มีสองเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างเหล่านี้ เทคนิคแรกคือ XRD ถูกใช้ในการตรวจสอบการแทรกของพอลิเมอร์ในชั้นซิลิเกต เมื่อเปรียบเทียบกับออร์แกนิกเคลย์ พบว่ามุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะเกิดการเลื่อนไปที่มุมต่ำลง โดยมุมที่เกิดการเลี้ยวเบนจะสัมพันธ์กับสมการของ Bragg (Bragg's law equation) $\lambda = 2d \sin \theta$ นั่นคือพอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของซิลิเกตได้ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตกว้างมากขึ้น สำหรับอีกหนึ่งเทคนิคคือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) ถูกใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานของนาโนคอมพอสิต ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นว่า เทคนิคทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กันสามารถใช้ในการตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างที่เกิดขึ้นของชั้นซิลิเกตในพอลิเมอร์เมทริกซ์



รูปที่ 2.12 แสดง (a) รูปแบบ WAXD และ (b) รูป TEM ของวัสดุคอมพอสิตที่แตกต่างกัน [17]

2.14 การเตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิต [17-20]

ในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตสามารถเตรียมได้ 4 วิธีคือ

2.11.1 การเตรียมด้วยเทคนิคการผสมในสารละลาย (Solution blending)

นี่เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าเชื่อถือถึงแม้ว่าจะได้รับความสนใจน้อยสำหรับการนำไปใช้จริง ความน่าเชื่อถือในที่นี้หมายความว่าชั้นของซิลิเกตสามารถกระจายตัวได้ในพอลิเมอร์หลังจากระเหยตัวทำละลายออก มีงานวิจัยต่างๆ ได้ศึกษาการใช้ออร์แกโนเคลย์สำหรับเทคนิคการผสมในสารละลาย Ganter และคณะ พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์แกโนเคลย์เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อถูกละลายรวมกับยางสไตรีน บิวตะไดอิน (SBR) โดยใช้ไทลูอินเป็นสารละลาย

2.11.2 การเตรียมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (In situ polymerization)

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ตัวทำละลายโดยที่สามารถละลายพอลิเมอร์หรือพรีพอลิเมอร์ได้กับชั้นซิลิเกตทำให้เกิดการบวมตัวในตัวทำละลาย เมื่อพอลิเมอร์กับชั้นซิลิเกตผสมกันในสารละลาย สายโซ่พอลิเมอร์จะแทรกเข้าไปแทนที่ตัวทำละลายในระหว่างชั้นของซิลิเกต

2.11.3 การเตรียมด้วยเทคนิคการดูดซับให้เกิดการกระจายตัวผ่านลาเท็กซ์คอมพาวด์

(Exfoliation adsorption)

วิธีนี้ประกอบด้วยมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ ซึ่งโมเลกุลเหล่านี้จะแทรกตัวเข้าไปในชั้นของซิลิเกตที่ยังไม่มีการปรับปรุง โดยชั้นของซิลิเกตสามารถกระจายตัวได้ในน้ำ โดยน้ำจะเกิดการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของซิลิเกต ทำให้เกิดการบวมตัวของเคลย์ ซึ่งระดับของการบวมตัวจะขึ้นกับชนิดของเคลย์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก โดยปกติแล้วจะอยู่ในรูปของลาเท็กซ์ที่มีขนาดของอนุภาคที่ละเอียดอยู่ในช่วงต่ำกว่าไมโครเมตรจนถึงระดับไมโครเมตรขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต ดังนั้นการผสมลาเท็กซ์กับชั้นซิลิเกตโดยการจับให้เป็นก้อน (coagulation) เป็นวิธีที่ถูกคาดหวังว่าจะได้วัสดุยางนาโนคอมพอสิตเกิดขึ้น แต่พบว่าการทำด้วยเทคนิคนี้มีแนวโน้มที่โมเลกุลของยางจะแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นซิลิเกตได้น้อย เนื่องจากผลของความมีขั้วของชั้นซิลิเกต

2.11.4 การเตรียมด้วยเทคนิคการหลอมเหลว (Melt compounding)

เทคนิคนี้เป็นการผสมพอลิเมอร์ และออร์แกโนเคลย์ ภายใต้แรงเฉือน และได้รับความคาดหวังมากที่สุดในการนำไปใช้งานจริง เป็นวิธีได้รับการยอมรับสำหรับวัสดุเทอร์โมพลาสติกนาโนคอมพอสิต เนื่องจากพบว่าแรงเฉือนและอุณหภูมิในการผสมเทอร์โมพลาสติกสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.G. Hundiware และคณะ ในปี ค.ศ. 2001 [21] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่มีการเติมถั่วลันเตา โดยศึกษาเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่มีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต และผสมวัสดุยางคอมพอสิตด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding) ที่อุณหภูมิและเวลาการบ่ม 140 °C และ 40 นาที ตามลำดับพบว่าสมบัติเชิงกล ทั้งค่าความต้านทานการดึงยึด (tensile strength) โมดูลัส (modulus) ที่ 100, 200 และ 300 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติม (filler) มากขึ้น โดยถั่วลันเตาจะทำให้ค่าความต้านทานการดึงยึดที่ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากรูปทรงของถั่วลันเตาที่เป็นทรงกลมทำให้เฟสของยางสามารถเชื่อมติดกับเฟสของถั่วลันเตาได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีลักษณะรูปทรงที่เป็นแบบส้อม แต่ที่ปริมาณถั่วลันเตามากกว่าร้อยละ 50 โดยปริมาตร จะทำให้ความต้านทานการดึงยึดและโมดูลัสลดลง เนื่องจากผลการรวมตัวกันของสารตัวเติม สำหรับค่าความแข็งแบบ shore A (hardness shore-A) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณของถั่วลันเตาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารตัวเติมทั้งสองเป็นออกไซด์ของโลหะอนินทรีย์ (inorganic metal oxide) ซึ่งมีผลให้วัสดุผสมมีความแข็งมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 2003 Nabil A. N. Alkadasi และคณะ [5] ได้ศึกษาผลของสารคู่ควบ (coupling agent) ที่มีคุณสมบัติเชิงกลของเถ้าลอยที่เดิมในยางบิวตะไดอิน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่ไม่ได้ใช้สารคู่ควบ จากการทดลองพบว่า การเติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ลงไปในยางบิวตะไดอิน ช่วยทำให้เพิ่มค่ามอดูลัสที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ และค่าความแข็งแรงให้ดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบ Si-69 สามารถเกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่างสองเฟสนี้ ทำให้เถ้าลอยเป็นสารเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

S. Mishra และคณะ ในปี ค.ศ. 2004 [22] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนเปลวไฟ (flame-retarding properties) ของยางบิวตะไดอินที่มีการเติมด้วยเถ้าลอยและนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตอนุภาคระดับนาโน และแคลเซียมเกรดการค้าลงไปในยางบิวตะไดอินทำให้ทนแรงดึงสูงขึ้นถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเติมเถ้าลอย เนื่องจากการกระจายตัวได้สม่ำเสมอดีกว่า และยังพบว่าอัตราการคิดไฟของยางบิวตะไดอินที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับนาโนมีค่าน้อยกว่าการเติมแคลเซียมเกรดการค้า และเถ้าลอยด้วย

ในปี ค.ศ. 2004 N. Sombatsompop และคณะ [4] และ S. Thongsang และ N. Sombatsompop [23] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาจากเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวลงในยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ โดยวิธีการผสมให้เข้ากันบนเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และนำสารประกอบยางไปอัดขึ้นรูปร้อนให้ยางคงรูป เพื่อให้ได้เป็นแผ่นยางสำหรับนำไปเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ทางด้านความต้านทานแรงดึง การต้านแรงฉีกขาดและความแข็งแรงในส่วนของยางธรรมชาติ พบว่าการเติมซิลิกาจากเถ้าลอยลงไปในยางคอมพาวด์ที่ปริมาณ 0 ถึง 75 phr ทำให้เวลาในการคงรูปยาง และความหนืดของยางธรรมชาติลดลงเมื่อเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งโลหะออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นที่ช่วยให้ยางคงรูปเร็วขึ้น ส่วนสมบัติที่ได้หลังจากการวัลคาไนซ์ พบว่า การเติม ซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาจากเถ้าลอยในช่วงอัตราส่วนระหว่าง 0 ถึง 30 phr มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ค่ามอดูลัสของสารประกอบยางธรรมชาติที่ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดตัวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของซิลิกามากกว่า 30 phr พบว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า ทำให้ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรง และการต้านทานแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ซิลิกาจากเถ้าลอยมีแนวโน้มคงที่ ในส่วนของยางเอสปีอาร์ พบว่า พบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังจากการวัลคาไนซ์จะคล้ายคลึงกับระบบของยางธรรมชาติ ยกเว้นค่าความต้านทานแรงดึงและการต้านแรงฉีกขาด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ซิลิกาเกรดการค้าที่สูงขึ้น และมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของซิลิกาจากเถ้าลอย ปัจจัยที่ทำให้สารประกอบยางที่เติมซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาจากเถ้าลอยมีสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากแรง

กระทำระหว่างขนาดของอนุภาคสารเติมแต่งและปริมาณของสารประกอบเถ้าลอยที่อยู่ในยางคอมพาวด์ ซึ่งเมื่อปริมาณเถ้าลอยสูงขึ้นจะทำหน้าที่เป็นเหมือนสารตัวเติมในยางมากกว่าสารเสริมแรง

จากงานวิจัยในระยะแรก [4] สามารถเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในสารประกอบยางธรรมชาติได้ในปริมาณสูงถึง 60 phr เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนในการผลิตมากขึ้น แต่เนื่องจากสมบัติเชิงกลโดยรวมด้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า จึงนำไปสู่การปรับปรุงผิวเถ้าลอย พบว่า กระบวนการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสม โดยการนำเถ้าลอยเคลือบด้วยสารกลุ่มควาไซเลน (Si69) ที่ปริมาณความเข้มข้น 2 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลทางด้านมอดูลัสและการต้านแรงฉีกขาดเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางของสารประกอบยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวทางเคมี ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 S. Thongsang และ N. Sombatsompop [23] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเถ้าลอยด้วยสารกลุ่มควาไซเลน Si69 และสารละลายไฮดรอกซีซิลิกอนไฮดรอกไซด์ พบว่า สารกลุ่มควาไซเลน Si69 ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ผ่านการสร้างพันธะ C-S กับโมเลกุลของยางเชื่อมกับอนุภาคเถ้าลอยเกิดผ่านพันธะซิลอกเซน (siloxane linkage) ขณะที่การใช้สารละลายไฮดรอกซีซิลิกอนไฮดรอกไซด์ ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ ที่ปริมาณ Si69 2 – 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าสมบัติเชิงกลจะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณ Si69 เพิ่มขึ้นเป็น 6 – 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า สมบัติเชิงกลจะลดลง เป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) และการเกิดเป็นพอลิซิลอกเซน (polysiloxane) จากการควบแน่นของ Si69 อีกทั้งยังเป็นตัวขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ จากงานวิจัยนี้แนะนำให้ใช้ปริมาณของสารกลุ่มควาไซเลนในช่วง 2 – 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้สมบัติของวัสดุที่เหมาะสม ในเวลาต่อมาได้ศึกษา ผลของการเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ภายในประเทศ [24] โดยนำเถ้าลอยจากแม่เมาะ ระยอง และบ้านโป่ง มาปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วย Si69 ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วเติมลงไปในยางธรรมชาติปริมาณ 30-75 ส่วนในร้อยส่วน จากนั้นนำยางธรรมชาติทุกสูตรไปทดสอบสมบัติการคงรูปยาง สมบัติด้านการทนแรงดึงและแรงฉีกขาด ความแข็ง การกระดอน และการยุบตัวถาวร พบว่าเถ้าลอยทั้งสามแหล่งสามารถนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติได้ และสามารถทดแทนซิลิกาเกรดการค้าได้ในปริมาณซิลิกา 30 ส่วนในร้อยส่วน ซึ่งสมบัติเชิงกลด้านทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็งเทียบเท่ากัน นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยยังสามารถรักษาสมบัติความเป็นอีลาสติคของยางได้ดีกว่าซิลิกาเกรดการค้าด้วย โดยเฉพาะเถ้าลอยจากแม่เมาะซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะที่เป็นทรงกลมของเถ้าลอยจากแม่เมาะแตกต่างกับเถ้าลอยจากระยอง และบ้านโป่ง ที่มีลักษณะของรูปทรงที่ไม่แน่นอน

A. R. R. Menon และคณะ [25] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติที่มีการเติมเถ้าลอยที่ถูกปรับปรุงด้วยสารอนุพันธ์ของคาร์ดานอล (cardanol

derivatives) จากผลการทดลองพบว่า การปรับปรุงด้วยคาร์คานอลจะช่วยลดพลังงานในการผสม และทำให้เวลาการบ่มลดลง เป็นผลมาจากคาร์คานอลสามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (plasticizer) ได้ อีกทั้งช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานการดึงยึดและการต้านทานแรงฉีกขาด รวมทั้งมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้นด้วย

K.Grade และคณะ [26] ศึกษาการปรับปรุงผิวของเถ้าลอยเพื่อเป็นสารเสริมแรงในยางไอโซพรีน ในการปรับปรุงผิวของเถ้าลอยโดยใช้กรด เบส เกลือ พบว่า เมื่อปรับปรุงผิวแล้วทำให้มีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการปรับผิวด้วยสารละลายเบสแล้วตามด้วยสารละลายกรด ทำให้ผิวของเถ้าลอยมีพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกับลักษณะพื้นผิวของซิลิกา สามารถนำไปผสมเพื่อเป็นสารเสริมแรงในยางไอโซพรีนได้ดีด้วย สำหรับการใส่สารคู่ควบ bis(trithoxysilylpropyl) tetrasulphane: TEPT จะช่วยให้การกระจายของเถ้าลอยในยางไอโซพรีนได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งช่วยให้การกระเด็นกระดอนของยางลดลง เนื่องจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลบริเวณพื้นผิวของเถ้าลอยหายไป และทำให้สารประกอบยางพอลิไอโซพรีนมีสมบัติทางด้านความแข็งแรงลดลง และปริมาณการเกิดพันธะข้ามมีการเปลี่ยนแปลงน้อย

Da Costa, H.M. และคณะ [27] ศึกษาผลกระทบของสารคู่ควบและสารปรับปรุงผิวทางเคมีของเถ้าแกลบที่เติมลงในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง และได้ศึกษาสมบัติด้านการคงรูป สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่คงรูปแล้ว ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง การต้านแรงฉีกขาด การทนการขัดสี และค่าความแข็งที่ผิว นอกจากนี้ยังใช้เทคนิค FTIR เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาที่ตกตะกอนในเถ้าแกลบที่บดละเอียด และเถ้าแกลบที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮเลน Si69 ที่มีต่อสมบัติการคงรูปและสมบัติทางกายภาพของยางที่คงรูป งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบเถ้าแกลบที่ปรับปรุงผิวทางเคมีกับสารเติมแต่งซิลิกาเกรดการค้า และผงเขม่าดำ จากการทดลองพบว่า ผลของการใช้สารคู่ควบไฮเลน ไม่ส่งผลทำให้สมบัติดีขึ้น แต่เถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวที่อัตราส่วน 20 phr ให้สมบัติความแข็งแรงสูงกว่าสารประกอบยางที่เติมด้วยสารเติมแต่งประเภทซิลิกาและผงเขม่าดำ

Chuayjuljit, S. [28] ศึกษาการใช้ซิลิกาจากเถ้าเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยนำเถ้าที่ล้างน้ำแล้วไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดเป็นผงและผสมลงไปในยางธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่า สารประกอบยางธรรมชาติที่เติมด้วยซิลิกาจากเถ้ามีสมบัติความต้านทานการดึง การต้านแรงฉีกขาด การต้านการสึกหรอ และสมบัติการกระดอนที่ดีกว่าการเติมด้วยซิลิกาเกรดการค้า และใช้เวลาในการคงรูปยางที่น้อยกว่า

Magaraphan และคณะ ในปี ค.ศ. 2003 [29] ได้ศึกษาการปรับสภาพผิวของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย primary amine และ quaternary amine ซึ่งมีความยาวของโซ่คาร์บอน 12 ถึง 18 ตัว และสามารถทำให้เกิดนาโนคอมโพสิตแบบ exfoliated ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อใส่แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่ำกว่า 10 phr โดย primary amine สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของแร่ดินเหนียวได้ดีกว่า quaternary amine และเมื่อความยาวของโซ่คาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของแร่ดินเหนียวดีขึ้น ซึ่งการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย

Arroyo และคณะ ในปี ค.ศ. 2003 [6] ศึกษาผลของการใช้ออกตะเคิลดลามาไมด์ (octadecylamine) ในการปรับปรุงสภาพผิวของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับผลจากการใช้คาร์บอนแบล็ค จากเทคนิค DSC พบว่าทั้งออร์แกโนมอนโมริลโลไนต์ และผงเขม่าดำทำให้ปฏิกิริยาการเกิดวัลคาไนเซชันเร็ว แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางเพิ่มสูงขึ้น สำหรับด้านสมบัติเชิงกลพบว่าออร์แกโนมอนโมริลโลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr เป็นสารเสริมแรงที่ดี โดยทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นถึง 350 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติ และพบว่าเปรียบเทียบได้กับผงเขม่าดำที่ปริมาณ 40 phr

ในปี ค.ศ. 2004 Teh และคณะ [30] พบว่าการการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (epoxidized) ซึ่งทำให้ยางมีขี้วมมากขึ้น ลงไปบดผสมรวมกับยางแท่งจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของออร์แกโนเคลย์ได้ดียิ่งขึ้นโดยเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกไซด์ จะทำให้ออร์แกโนเคลย์มีการกระจายตัวแบบ exfoliated และจะทำให้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นมาก

Bala และคณะ [31] เตรียมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT) ที่ถูกปรับปรุงด้วยโดเดซิลเอมีน (dodecylamine) ผสมลงในยางธรรมชาติ คอมพาวด์ ด้วยวิธีการผสมหลอมเหลว จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าออร์แกโนมอนโมริลโลไนต์ที่ปริมาณ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความต้านทานต่อแรงดึงยืด และค่าการดึงยืดที่จุดขาดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามอดูลัสที่ 100 และ 200 เปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของออร์แกโนมอนโมริลโลไนต์มากขึ้นตั้งแต่ 1 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับการเติมมอนโมริลโลไนต์ที่ไม่ได้มีการปรับปรุง พบว่าจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

Siby Vaghese และ J. karger-Kocsis [32] ศึกษาเปรียบเทียบผลของมอนต์มอริลโลไนต์และออร์แกโนมอนโมริลโลไนต์ โดยผสมกับยางธรรมชาติ ด้วยวิธีการผสมหลอมเหลวที่ปริมาณเคลย์ 10 phr จากการทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์สามารถกระจายตัวแบบ exfoliated บางส่วน โดยบางส่วนเกิดการกระจายตัวแบบ intercalated และการรวมตัว (aggregate) ซึ่งขึ้นกับชนิดของออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ออร์

แก๊สโมโนคาร์บอนไดออกไซด์ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและเวลาในการบ่มสุกที่เร็วกว่าโมโนคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งพบเช่นเดียวกับงานวิจัยของ K. N. Madhusoodanan และ Siby Varghese [33]

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีแนวโน้มทำให้ทราบข้อดีของการนำโมโนคาร์บอนไดออกไซด์และเถ้าลอยมาใช้ในระบบคอมพอสิตของยางธรรมชาติ โดยเถ้าลอยสามารถลดพลังงานในการขึ้นรูปและให้สมบัติด้านการไหลที่ดี สำหรับโมโนคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถช่วยปรับปรุงเนื้อเมทริกซ์ของยางธรรมชาติให้แข็งแรงขึ้นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่มีการผสมทั้งโมโนคาร์บอนไดออกไซด์ และเถ้าลอย เพื่อให้สามารถทราบถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างโมโนคาร์บอนไดออกไซด์และเถ้าลอย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการยางธรรมชาติที่มีสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อนที่ดี

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

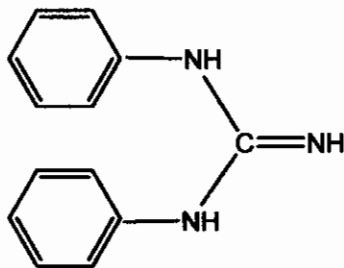
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 ยางธรรมชาติเกรด STR 20 CV จากบริษัทสินทองไทย รับเบอร์

3.1.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยาซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาร์ไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง จากบริษัทวิทยาสรม

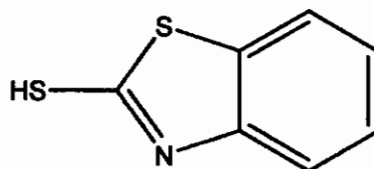
3.1.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยากรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาร์ไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป

3.1.4 สารเร่งปฏิกิริยาไดฟีนิลกวินิดีน (DPG) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาร์ไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป



รูปที่ 3.1 โครงสร้างเคมีของ DPG

3.1.5 สารเร่งปฏิกิริยาเมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (MBT) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาร์ไนซ์ ในกระบวนการผลิตยาง ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเคมีของ MBT

3.1.6 สารคงรูปยาง (curing agent) ซัลเฟอร์ (sulphur) ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป (Innovation Group)

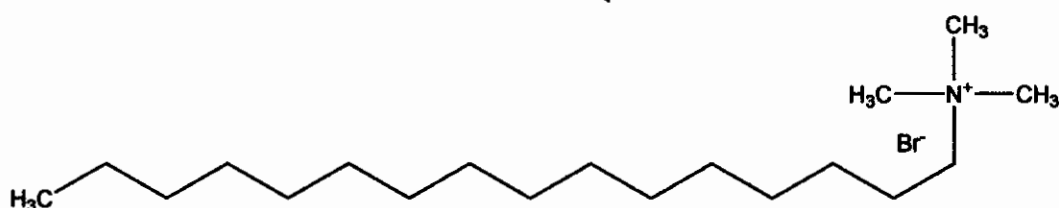
3.1.7 มอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+MMT) ชื่อทางการค้า Kunipia-F จากบริษัท Kunimine industries ประเทศญี่ปุ่น มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) 115 meq ต่อเคลย์ 100 กรัม

3.1.8 ถั่วลย จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร

3.1.9 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากบริษัท LAB SCAN Asica

3.1.10 ซิลเวอร์ไนเตรด (AgNO_3) เกรด p.a. จากบริษัท POCh S.A.

3.1.11 สารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงเคลย์ คือ เฮกซะเดซิลไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ (CTAB) เกรด purum 97 เปอร์เซ็นต์ (AT) น้ำหนักโมเลกุล 364.45 กรัมต่อโมล จากบริษัท Fluka



รูปที่ 3.3 โครงสร้างเคมีของ CTAB

3.1.12 สารคู่ควบ (coupling agents) ประเภทไฮเลน bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfane (Si69) ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทอินโนเวชั่นกรุ๊ป

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 เครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขนาด 150 x 400 มิลลิเมตร จากบริษัทหงส์ไทยขาว รุ่น XK 06

3.2.2 เครื่องมืออัดขึ้นรูปยาง ระบบไฮโดรลิก (compression molding) จากบริษัท Carver

3.2.3 เครื่องทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) จากบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70

3.2.4 เครื่องทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) 2 kW จากบริษัท JEOL รุ่น JDX-3530 และ XRD 18 kW จากบริษัท Rigaku รุ่น TTRAXIII

3.2.5 เครื่องทดสอบเอกลักษณ์การคงรูปของยาง Moving Die Rheometer (MDR) จากบริษัท Gotech รุ่น GT-M2000

3.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Universal Testing Machine จากบริษัท LLOYD Instruments ประเทศอังกฤษรุ่น LR50K

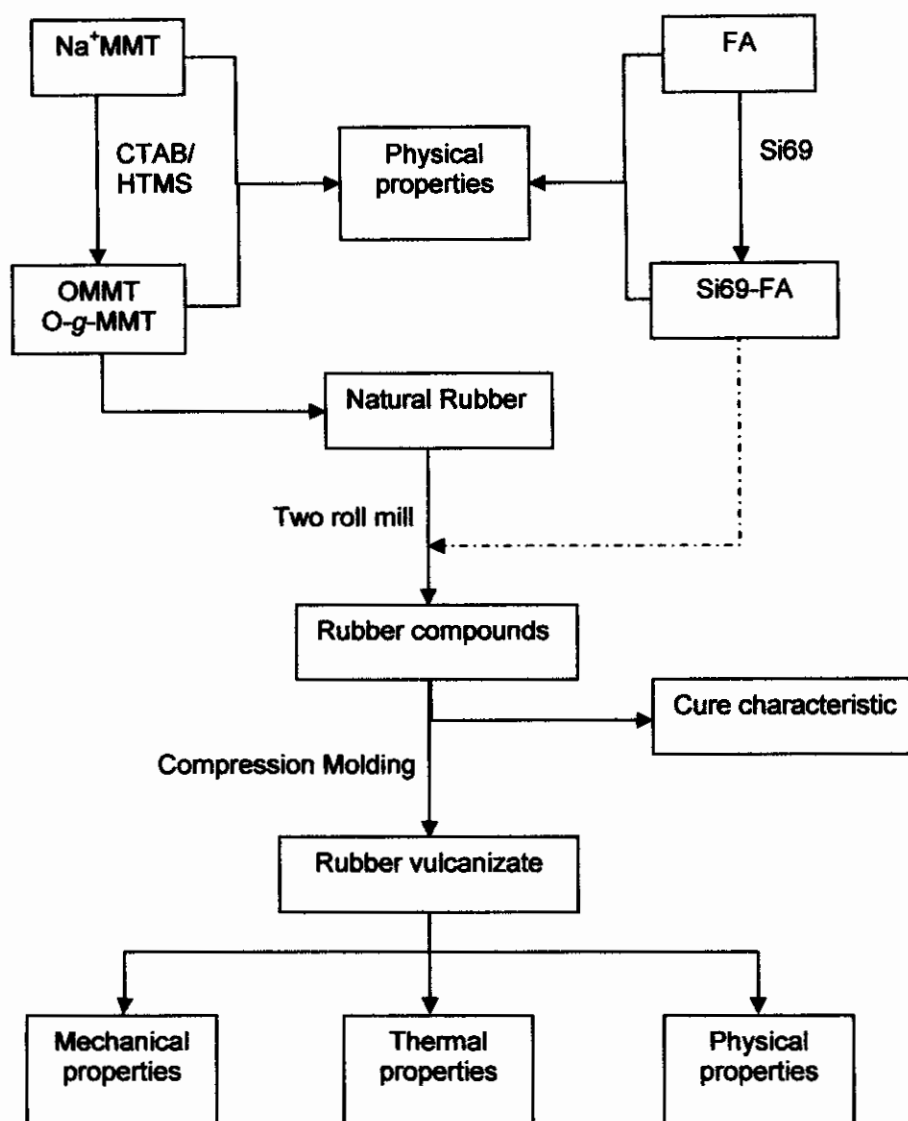
3.2.7 เครื่องทดสอบความแข็งที่ผิว Durometer จากบริษัท Pacific Transducer Corporation รุ่น model 473

3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงความร้อน Thermal Gravimetric Analyzer จากบริษัท Perkin-Elmer รุ่น TGA 7 HT

3.2.9 เครื่องทดสอบสัณฐานวิทยา Scanning Electron Microscope (SEM) จากบริษัท Cam Scan รุ่น MX 2000

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำเถ้าลอยและมอนต์มอริลโลไนต์มาผสมลงในยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ โดยในการทดลองจะทำการปรับปรุงผิวของมอนต์มอริลโลไนต์และเถ้าลอยก่อนทำการผสม สำหรับการผสมเป็นยางคอมพาวด์นั้นจะทำการผสมมอนต์มอริลโลไนต์ลงในยางธรรมชาติก่อนที่อัตราส่วนตั้งแต่ 0 ถึง 10 phr จากนั้นจะนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปขึ้นรูปและทดสอบสมบัติด้านต่างๆ และวิเคราะห์เพื่อหาว่าอัตราส่วนใดของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เหมาะสมกับยางมากที่สุด และเปรียบเทียบผลที่ได้กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้มีการปรับปรุง หลังจากนั้นนำอัตราส่วนที่เหมาะสมของมอนต์มอริลโลไนต์มาผสมร่วมกับเถ้าลอยลงในยางธรรมชาติ โดยผสมเถ้าลอยในอัตราส่วน 0 ถึง 40 phr และเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ที่ได้ ระหว่างยางธรรมชาติที่มีการผสมเถ้าลอย และยางธรรมชาติที่มีการผสมเถ้าลอยร่วมกับมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 3.4 แผนผังการดำเนินงานวิจัยโดยรวม

3.4.1 การตรวจสอบและวิเคราะห์แผ่นอลอยและมอนคัมมิลโรไนต์

นำแผ่นอลอยจาก จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และมอนคัมมิลโรไนต์จากบริษัท Kunimine ไปตรวจสอบคุณลักษณะด้านรูปร่างอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท Cam Scan รุ่น MX 2000 ก่อนทำการศึกษาผิวหน้า จะต้องนำแผ่นอลอยและมอนคัมมิลโรไนต์ไปเคลือบผิวหน้าด้วยทอง โดยใช้เครื่อง Sputter coater 108 เป็นเวลา 2 นาที จึงนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบ SEM ภายในสุญญากาศใน Chamber 0.001-0.0001 มิลลิบาร์ แล้วใช้สัญญาณในการจับภาพแบบ Secondary electron image

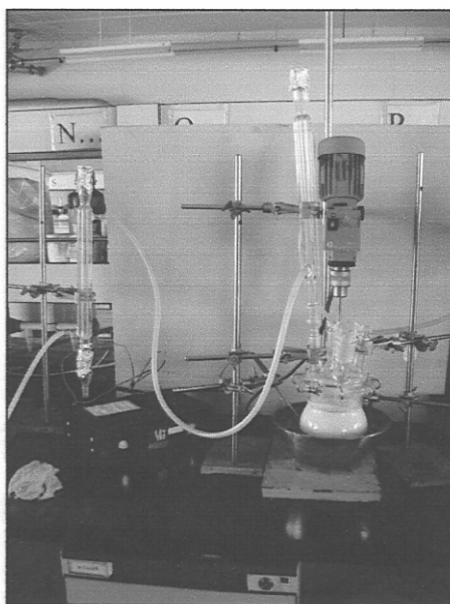
วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านลอยและมอนต์โมริลโลไนต์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ของบริษัท Cam Scan รุ่น MX 2000

3.4.2 การปรับปรุงผิวถ่านลอยโดยใช้สารก่อกวนไซเลน

คัดขนาดถ่านลอยด้วยอุปกรณ์คัดขนาดตะกอน (test sieve) จากบริษัท Retsch ให้ได้ขนาดอยู่ในช่วง 74 ถึง 105 ไมโครเมตร และปรับปรุงผิวด้วยสารก่อกวน Si69 เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างถ่านลอยกับเนื้อยาง โดยการนำ Si69 ปริมาณ 2 กรัม ละลายในเอทานอลปริมาณ 100 มิลลิลิตร กวนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำถ่านลอย 100 กรัม ผสมลงในสารละลายที่เตรียมไว้ที่ละน้อย แล้วใช้แท่งแก้วกวนอีกประมาณ 15 นาที เพื่อให้แน่ใจว่า Si69 กระจายตัวอยู่ทั่วบนผิวถ่านลอย จากนั้นนำถ่านลอยที่ได้ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อระเหยเอทานอลที่เกินพอออกไป

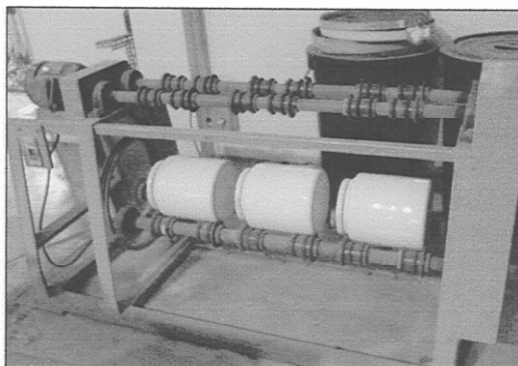
3.4.3 การเตรียมออร์แกนอมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT)

การเตรียมออร์แกนอมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT) สามารถทำได้โดยการนำมอนต์มอริลโลไนต์หรือ Kunipia- F จากบริษัท Kunimine Industrial ประเทศญี่ปุ่น ปริมาณ 10 กรัม ผสมลงในน้ำกลั่น 350 มิลลิลิตร ใส่ลงในเครื่องแก้วสำหรับทำปฏิกิริยา (reactor) ขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นให้ความร้อนในอ่างน้ำมันที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อยู่ที่ 80 °C พร้อมทั้งกวนให้เข้ากันด้วยใบพัดกวน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ให้สารละลายนี้เป็นของผสม A ในขณะที่ให้ความร้อนกับของผสม A อยู่ นั้น ทำการผสมเฮกซะเดซิลไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ (CTAB) ปริมาณ 1 CEC หรือ 4.2 กรัม ลงในน้ำกลั่นปริมาณ 250 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C พร้อมทั้งกวนให้เข้ากันด้วยแท่งแม่เหล็กกวน หลังจากนั้นหยดกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 10 มิลลิลิตร และกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที ให้สารละลายนี้เป็นสารละลาย B หลังจากนั้นเติมสารละลาย B ลงในของผสม A อย่างช้าๆ เมื่อผสมหมดแล้ว ให้ความร้อนต่อ พร้อมกับกวนต่อไปอีก 2 ชั่วโมง 30 นาที

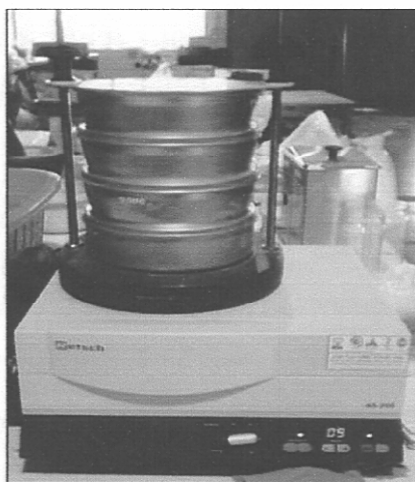


รูปที่ 3.5 ลักษณะการจัดตั้งการเตรียมออร์แกโนมอนต์มอริลโรไนต์

เมื่อครบตามเวลา นำของผสมที่ได้ไปกรอง เพื่อเก็บตะกอน จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำร้อน อุณหภูมิ 80 °C นำตะกอนที่กรองได้นี้ไปล้างด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C อีกครั้ง โดยกวนตะกอน ในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วกรอง ทดสอบน้ำที่กรองได้ว่า ไม่มี คลอไรด์ (Cl⁻) เหลืออยู่ สามารถตรวจสอบได้ด้วย AgNO₃ ความเข้มข้น 0.1 N ถ้าพบว่ามีคลอไรด์ เหลืออยู่สารละลายจะเกิดตะกอนสีขาวขุ่น จึงนำตะกอนที่กรองได้นี้ไปอบในตู้อบสุญญากาศที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำตะกอนแห้งที่ได้ (OMMT) ไปบดให้ละเอียดด้วยหม้อบดสาร (ball mill) ดังรูปที่ 3.7 และคัดขนาดตะกอนด้วยอุปกรณ์คัดขนาดตะกอน (test sieve) จากบริษัท Retsch ดังรูปที่ 3.8 ให้ได้ขนาดอยู่ในช่วง 74 ถึง 105 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.6 หม้อบดสาร (Ball mill)



รูปที่ 3.7 เครื่องคัดแยกขนาด (Sieve shaker)

3.4.4 การเตรียมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย HTMS (O-g-MMT)

การเตรียมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงผิวด้วย HTMS (O-g-MMT) สามารถทำได้โดยการนำออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.4.3 มาปรับปรุงผิวต่อโดยขั้นตอนนี้จะเริ่มจากการนำ OMMT ที่ได้จากการเตรียมในขั้นตอนปริมาณ 10 กรัม ผสมลงในสารละลายเอทานอล (โดยมีอัตราส่วนระหว่างเอทานอลต่อน้ำเป็น 75:25) ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ใส่ลงในเครื่องแก้วสำหรับทำปฏิกิริยา (reactor) ขนาด 1000 ml จากนั้นให้ความร้อนในอ่างน้ำมันที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งกวนให้เข้ากันด้วยใบพัดกวน ให้สารละลายนี้เป็นของผสม C เมื่อของผสม C มีความเข้ากันจึงค่อยๆหยดเฮกซะเดซิลเมทอกซีไซเลน (Hexadecyltrimethoxysilane, HTMS) 3 กรัม ลงในของผสม C จากนั้นปล่อยให้สารละลายทั้งสองทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงนำสารที่ได้มากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำตะกอนแห้งที่ได้ (O-g-MMT) ไปบดให้ละเอียดด้วยหม้อบดสาร (ball mill) และคัดขนาดตะกอนด้วยอุปกรณ์คัดขนาดตะกอน (test sieve) จากบริษัท Retsch ให้ได้ขนาดอยู่ในช่วง 74 ถึง 105 ไมโครเมตร

3.4.5 การตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT และ OMMT

การวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างของชั้น Silicate ของ MMT และ OMMT เพื่อศึกษาความสามารถในการเปิดชั้น MMT ด้วย CTAB สามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ด้วยเครื่อง X-ray diffraction 2 kW จากบริษัท JEOL รุ่น JDX-3530 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์จะมีลักษณะเป็นผง และใช้รังสีเอกซ์จาก $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) อัตราการ

ตรวจสอบที่ 0.02 องศาวินาที ในช่วง 3-10 องศา ในการคำนวณระยะห่างของชั้นซิลิเกตของ MMT และ OMMT สามารถคำนวณได้จาก Bragg's Law ดังสมการที่ 3.1

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

สมการที่ 3.1

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของรังสี CuK α และ d คือค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต

3.4.6 การตรวจสอบผลของการปรับปรุงผิวถั่วลันเตาและมอนต์มอริลโลไนต์

การตรวจสอบผลของการปรับปรุงผิวถั่วลันเตาและมอนต์มอริลโลไนต์สามารถตรวจสอบได้จากเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) จากบริษัท Bruker Optic รุ่น Vertex70 ดังรูปที่ 3.9 ช่วงของการวิเคราะห์คือ 4000-400 cm^{-1} ความละเอียดในการเก็บข้อมูล (Resolution) 4 cm^{-1} จำนวนรอบของการสแกน 16 รอบ โดยตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นใหม่ของการปรับปรุงผิวถั่วลันเตาและมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 3.8 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

3.4.7 การเตรียมยางผสม (compound rubber)

ทำการบดยางและผสมถั่วลันเตาหรือมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้เครื่องบดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) ตามส่วนประกอบของยางคอมพาวด์ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยเติมมอนต์มอริลโลไนต์ลงในยางคอมพาวด์ที่สัดส่วน 0, 1, 3, 5, 7 และ 10 phr สำหรับถั่วลันเตาเติมลงไปในส่วน 0, 10, 20, 30 และ 40 phr โดยใช้เวลาในการผสมยางคอมพาวด์ทั้งหมด 30 นาที ที่อุณหภูมิการผสม 50 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากการบดยางก่อนเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นผสมสารเคมีลงไปจนเย็นแล้วเติมสารตัวเติมทีละน้อย บดผสมต่อไปเป็นเวลา 25 นาที และอีก 5 นาทีสุดท้ายผสมซิลิเฟอร์ รวมเวลาในการผสมทั้งหมดเป็น 30 นาที ซึ่งจะเป็นเวลาผสมในการผสมยางผสมสูตรยางต่อไป หลังจากนั้นเตรียมขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบที่คงรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 160 $^{\circ}\text{C}$ แรงดันแม่พิมพ์ที่ 25,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยเวลาที่ได้จากการทดสอบหาเวลาคงรูปยางที่ 90 (t_{90}) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) จากบริษัท

Gotech รุ่น GT-M2000 จะได้ยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 250 x 250 มิลลิเมตรหนา 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำยางไปตัดเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติด้านต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของยางคอมพาวด์ [4]

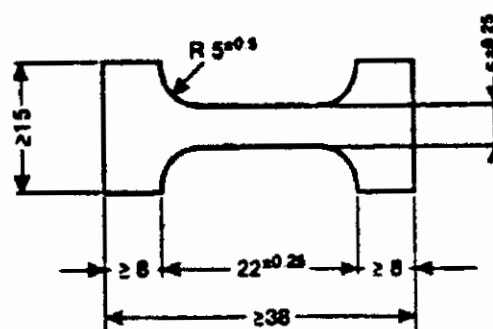
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติเกรด STR 20	100
สังกะสีออกไซด์ (ZnO)	5
กรดสเตียริก	2
ซัลเฟอร์	3
เมอร์แคปโตเบนโซไทอะโซล (MBT)	0.5
ไดฟีนิลทาร์ทราต (DPG)	0.2
OMMT หรือ MMT	เปลี่ยนแปลง
เถ้าลอย (FA)	เปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิบ่มสุก	160 °C

3.4 การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์

นำสารประกอบยางที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง ไปหาคุณลักษณะของการคงรูปของยางคอมพาวด์ เครื่อง Moving Die Rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 160 °C เพื่อตรวจสอบค่าแรงบิดสูงสุด และต่ำสุด (torque maximum and torque minimum) เวลาในการเกิดสกออร์ท (scorch time, t_{90}) และเวลาในการคงรูป (cure time, t_{90})

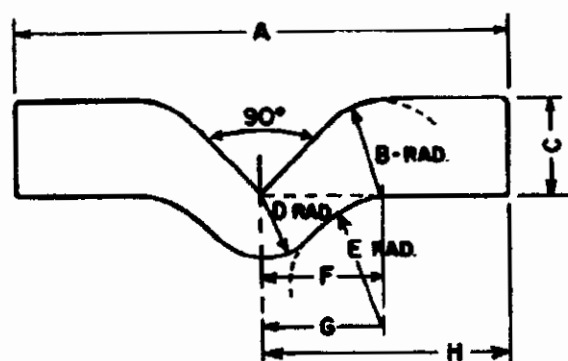
3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท LLOYD Instruments ประเทศอังกฤษรุ่น LR50K โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปคัมเบลล์ หนา 2 มิลลิเมตร ความยาวของเกต (Gauge length) 22.25 มิลลิเมตร ขนาดของ Load cell ที่ใช้คือ 1 กิโลนิวตัน ใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที



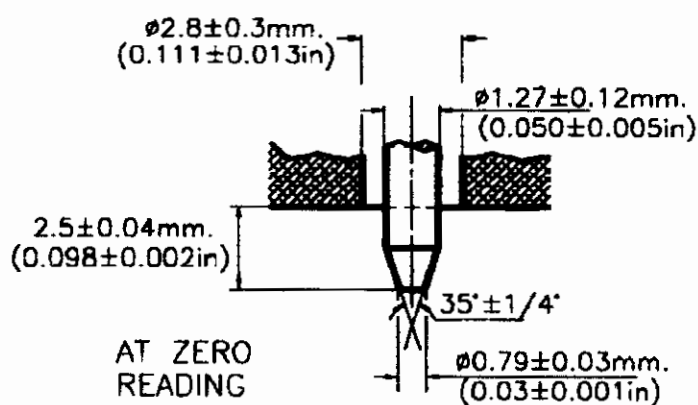
รูปที่ 3.9 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงดึง [34]

ทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D0624-00 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท LLOYD Instruments ประเทศอังกฤษ รุ่น LR50K โดยใช้ความเร็วในการดึงขึ้นทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.10 ลักษณะชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงฉีกขาด [35]

ทดสอบค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ของแผ่นยางคงรูป ตามมาตรฐาน ASTM D2240-97 ด้วยเครื่อง Durometer hardness จากบริษัท Pacific Transducer Corporation รุ่น model 473



รูปที่ 3.11 หัวกด shore A ที่ใช้สำหรับการทดสอบยาง [36]

3.6 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของยางคอมพอสิตสามารถศึกษาได้จากเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 °C อัตราเร็วการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ค่าอุณหภูมิที่ขงเริ่มต้นการสลายตัว (onset temperature) และค่าอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวเร็วที่สุด (maximum degradation temperature, T_d)

3.7 การตรวจสอบการแทรกของโมเลกุลยางในชั้นซิลิเกต

การตรวจสอบการแทรกของโมเลกุลยางในชั้นซิลิเกตสามารถตรวจสอบได้จากเทคนิค X-ray diffraction (XRD) 18 kW จากบริษัท Rigaku รุ่น TTRAXIII โดยในใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์เป็นแผ่นยางหนา 3 มิลลิเมตร ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร และใช้รังสี $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.154 \text{ nm}$) radiation, อัตราการสแกนที่ 0.02 องศาต่อวินาที ในช่วง 1-10 องศา ในการคำนวณระยะห่างของชั้นซิลิเกตจาก Bragg's Law ตามสมการที่ 3.1

3.8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของยางคอมพอสิต

ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของยางคอมพอสิตด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของบริษัท Cam Scan รุ่น MX 2000 เพื่อลักษณะการกระจายตัวของสารเสริมแรง และการเชื่อมต่อกันระหว่างเฟสของยางกับเฟสของสารเสริมแรง โดยทดสอบผิวหน้าชิ้นงานที่ทำให้แตกหัก หลังจากการแช่ในไนโตรเจนเหลว 30 นาที แล้วนำไปเคลือบเคลือบทองด้วยเครื่อง Sputter coater 108 เป็นเวลา 2 นาที จึงนำชิ้นงานที่ได้ไปเข้าเครื่องทดสอบ SEM ภายในสุญญากาศ ใน Chamber 0.001-0.0001 มิลลิบาร์ แล้วใช้สัญญาณในการจับภาพแบบ Secondary Electron Image (SEI) และ Back Electron Image (BEI)

3.9 การทดสอบการบวมตัว (Swelling ratio)

เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการเชื่อมขวางของพันธะที่เกิดขึ้น โดยการนำยางคอมพอสิตมาตัดให้เป็นรูวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 17 มิลลิเมตร นำมาชั่งน้ำหนักก่อนเกิดการบวมตัว โดยในการวิจัยนี้จะทำการทดสอบอัตราส่วนละ 5 ตัวอย่าง นำชิ้นงานแต่ละชิ้นบรรจุในขวดซิชา แล้วเติม โทลูอินปริมาตร 20 มิลลิลิตรลงไป ปิดฝาขวดแล้วเก็บไว้ให้ห่างจากแสงแดดเป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วจึงนำชิ้นงานตัวอย่างออกจากขวด ขับด้วยกระดาษ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาอัตราการบวมตัว (Q) ดังสมการที่ 3.2

$$Q = \frac{w_2}{w_1}$$

สมการที่ 3.2

เมื่อ Q คือค่าอัตราการรวมตัว โดย w_1 คือน้ำหนักยางเริ่มต้น และ w_2 คือน้ำหนักยางหลังการรวมตัว

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารตัวเติมสองชนิด คือ เถ้าลอยและมอนคัมอริลโรไนต์ โดยในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยและมอนคัมอริลโรไนต์ โดยศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะรูปร่าง และการปรับปรุงผิวของสารตัวเติม ตอนที่ 2 ศึกษาผลของมอนคัมอริลโรไนต์ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต โดยศึกษาผลของมอนคัมอริลโรไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว (MMT) ออร์แกโนมอนคัมอริลโรไนต์ (OMMT) และการต่อกิ่งออร์แกโนมอนคัมอริลโรไนต์ (O-g-MMT) ที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต ตอนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบคู่ (hybrid filler) ระหว่าง OMMT และเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติของยางคอมพอสิต

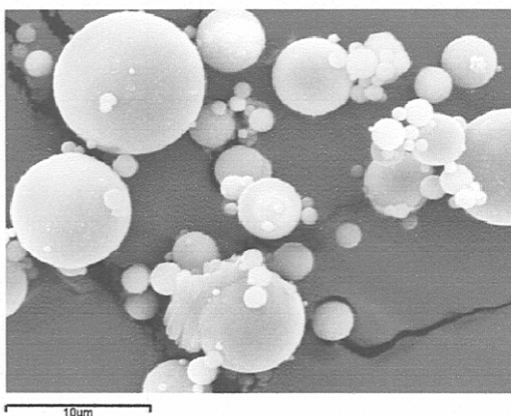
ตอนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเถ้าลอยและมอนคัมอริลโรไนต์

4.1 เถ้าลอย

การศึกษารูปร่างของสารตัวเติมจะทำให้สามารถคาดเดาผลของการเสริมแรงได้ โดยงานวิจัยนี้ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่าเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และมอนคัมอริลโรไนต์มีส่วนประกอบของซิลิกอน และกลุ่มโลหะอื่น เป็นส่วนประกอบ ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าเถ้าลอยมีตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในเถ้าลอย

ธาตุ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยมวล)
	Fly Ash
อะลูมิเนียม	24.49
เหล็ก	6.12
แคลเซียม	13.83
แมกนีเซียม	3.68
ซิลิกอน	41.17
โพแทสเซียม	3.31
โซเดียม	3.65
ซัลเฟอร์	3.75

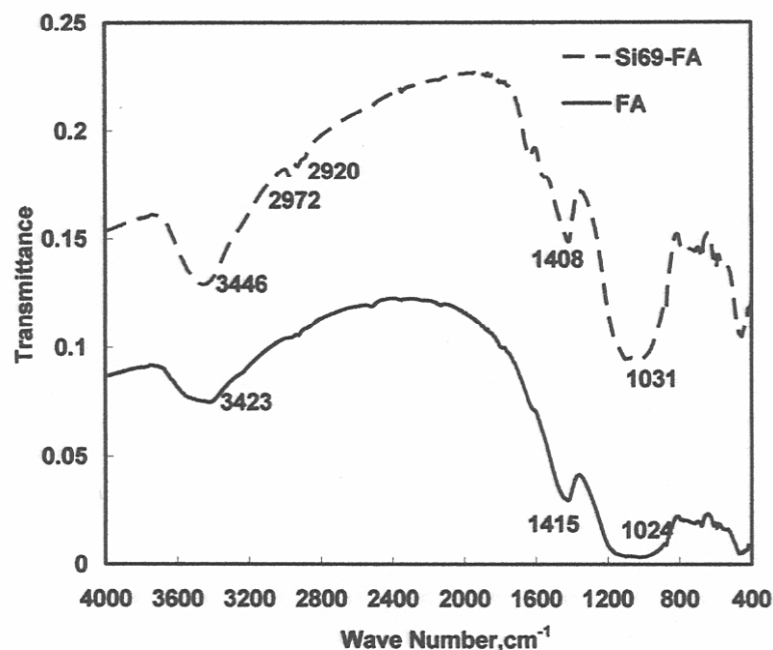
ส่วนประกอบของซิลิกอนอยู่เป็นส่วนใหญ่ในปริมาณมากถึง 41 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ส่วนประกอบที่สำคัญของเถ้าลอยได้แก่ ซิลิกอน อลูมิเนียม เหล็ก และ แคลเซียม และส่วนประกอบย่อยคือ แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม ซัลเฟอร์ และ ฟอสฟอรัส ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยสามารถศึกษาได้โดยใช้เทคนิค SEM จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีขนาดแตกต่างกันไป ซึ่งโดยรวมมีขนาดน้อยกว่า 250 ไมโครเมตร



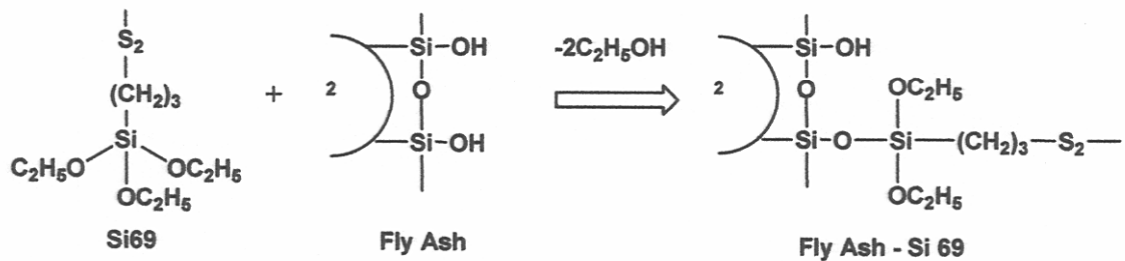
รูปที่ 4.1 ลักษณะของรูปร่างของเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หนึ่งที่จะนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารตัวเติมทดแทนซิลิกา เนื่องจากองค์ประกอบของเถ้าลอยนั้นมีซิลิกาอยู่ในปริมาณมาก แต่การนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับวัสดุพอลิเมอร์นั้นมีการศึกษาวิจัยค่อนข้างน้อย เนื่องจากบริเวณพื้นผิวเถ้าลอยมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นผิวของเถ้าลอยจึงมีความเป็นขี้ผึ้งที่สูง เมื่อนำเถ้าลอยไปผสมกับยางธรรมชาติทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมน้อย [39] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้สารคู่ควบ Si69 ลดความเป็นขี้ผึ้งบริเวณผิวเถ้าลอย เพื่อให้เกิดแรงกระทำระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติมที่มากขึ้น [5, 14] โดยโครงสร้างของ Si-69 จะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือส่วนหนึ่งจะประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและซัลเฟอร์ ซึ่งมีส่วนที่มีความเข้ากันได้กับวัสดุของยางธรรมชาติอีกทั้งอาจมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปของยางธรรมชาติอีกด้วย ส่วนหนึ่งของ Si-69 จะมีส่วนประกอบของ $\text{Si}-(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ Si-OH ของเถ้าลอย จากการปรับปรุงเถ้าลอยด้วย Si-69 ได้มีการพิสูจน์เอกลักษณ์ผิวของเถ้าลอยที่มีการปรับผิวแล้วด้วยเทคนิค FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของเถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยที่ถูกปรับปรุง (Si69-FA) จากการตรวจสอบพบว่าทั้ง FA และ Si69-FA แสดงแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 3440 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) บนพื้นผิวของเถ้าลอย แถบการดูดกลืนที่ 1410 cm^{-1}

แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ SO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่อยู่ในเถ้าลอย ขณะที่แถบการดูดกลืนที่ประมาณ 1030 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดของหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) [23] สำหรับแถบการดูดกลืนที่ 2972 และ 2880 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของ $-\text{C-CH}_3$ และ $-\text{CH}_2$ โดยแถบการดูดกลืนที่เกิดขึ้นเหล่านี้เป็นการสั่นของ CH_2 ใน Si69 ที่อยู่บนพื้นผิวของเถ้าลอย และพบว่าแถบการดูดกลืนของหมู่ซิลานอลมีการเลื่อนไปที่เลขคลื่นสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า เถ้าลอยมีการเกิดปฏิกิริยากับ Si-69 โดยหมู่แอลคอกซี (alkoxy) ของสารคู่ควบสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ซิลินอลบนผิวเถ้าลอย โดยแสดงผ่านปฏิกิริยาที่ 4.1



รูปที่ 4.2 กราฟ FTIR ของเถ้าลอย (FA) และเถ้าลอยที่ถูกปรับปรุงผิวด้วย Si69 (Si69-FA)



ปฏิกิริยาที่ 4.1 ปฏิกิริยาขึ้นในการปรับปรุงผิวของเถ้าลอยด้วย silane-69 [14]

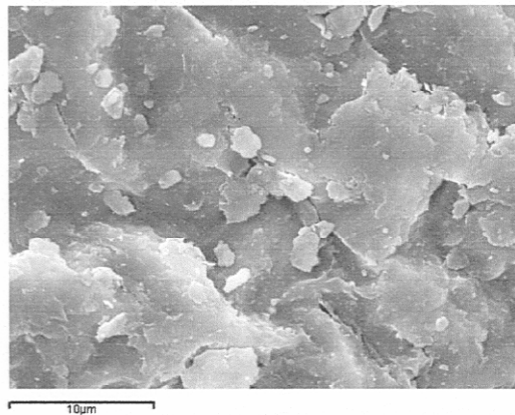
4.2 มอนต์มอริลโลไนต์

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์มีองค์ประกอบของธาตุซิลิกอนอยู่มากกว่า 60 % โดยโมล ส่วนประกอบที่สำคัญของมอนต์มอริลโลไนต์ ได้แก่ ซิลิกอน และอะลูมิเนียม และมีส่วนประกอบย่อยคือ โซเดียมแมกนีเซียม เหล็ก และแคลเซียม ดังนั้นถ้าลอยแม่เมาะและมอนต์มอริลโลไนต์นำที่จะนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงทดแทนซิลิกาที่มีราคาที่ค่อนข้างแพงได้ แต่สารเสริมแรงทั้งสองนี้มีลักษณะของรูปร่างที่แตกต่างกัน ด้วยลักษณะที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลทำให้ยางคอมพอสิตมีสมบัติที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในมอนต์มอริลโลไนต์

ธาตุ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยโมล)
	มอนต์มอริลโลไนต์
อะลูมิเนียม	22.55
เหล็ก	1.37
แคลเซียม	0.84
แมกนีเซียม	4.63
ซิลิกอน	65.69
โพแทสเซียม	0.00
โซเดียม	4.92
ซัลเฟอร์	0.00

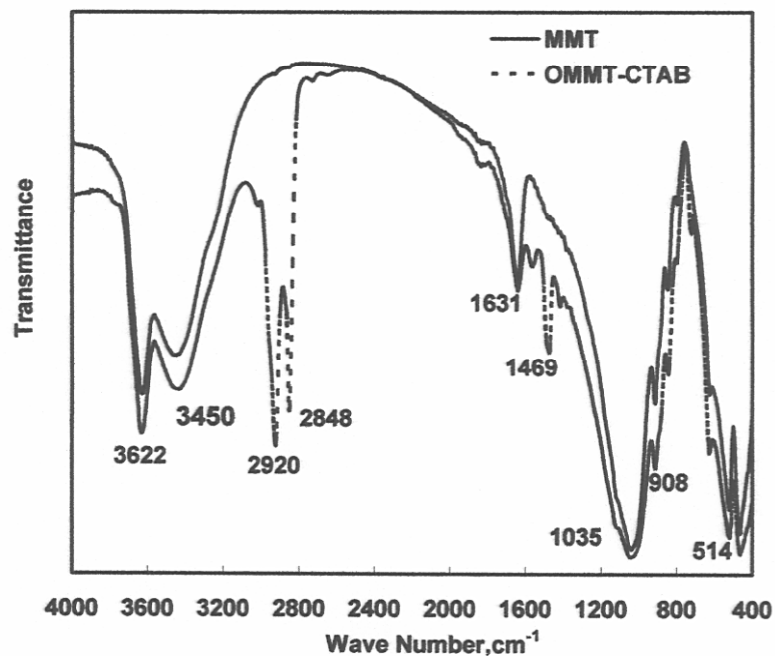
ลักษณะของมอนต์มอริลโลไนต์สามารถศึกษาได้โดยใช้เทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะเป็นแผ่น แสดงให้เห็นชั้นของซิลิเกตที่เกาะกลุ่มกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยขนาดของชั้นซิลิเกตนั้นจะมีขนาดเล็ก แต่เมื่อรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าถั่วลอ่ย ซึ่งประสิทธิภาพของการเสริมแรงของสารตัวเติมเสริมแรงนั้นจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณขนาดของอนุภาค และแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม [33] โดยอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์สามารถแตกออกเป็นชั้นของซิลิเกตได้ในระหว่างกระบวนการผสม ซึ่งจะทำให้มอนต์มอริลโลไนต์สามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงที่ดีได้



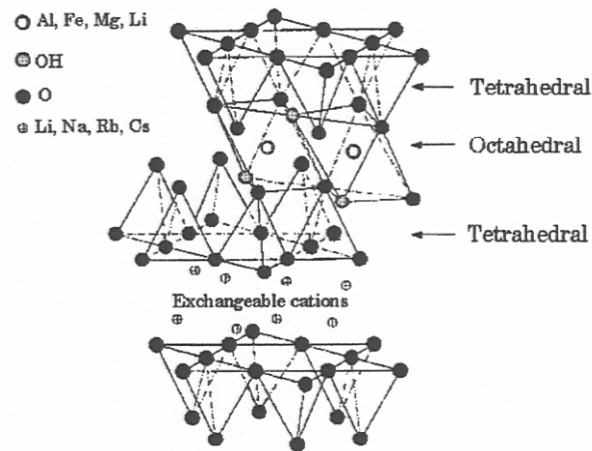
รูปที่ 4.3 ลักษณะของรูปร่างของมอนต์มอริลโลไนต์

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ทราบว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นขั้วสูง ขณะที่ทางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว การปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ให้ความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ประกอบไปด้วยชั้นซิลิเกตซึ่งมีประจุเป็นลบจากหมู่ของออกซิเจนที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งชั้นซิลิเกตเหล่านี้สามารถรวมตัวอยู่กันด้วยการสมดุลประจุของโลหะประจุบวก เช่น Na^+ และ Mg^{2+} โลหะประจุบวกเหล่านี้จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของซิลิเกต เนื่องจากโลหะประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นสามารถถูกแลกเปลี่ยนได้ด้วยออร์แกนิกไอออนบวก เพื่อลดความเป็นขั้วของมอนต์มอริลโลไนต์ [31] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย เฮกซะเดซิลไตรเมทิล แอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyl Trimethylammonium Bromide, CTAB) ผ่านปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออน ผลการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+MMT) สามารถตรวจสอบได้จากเทคนิค FTIR แสดงในรูปที่ 4.4 จากสเปกตรัมของมอนต์มอริลโลไนต์และออร์แกนิกมอนต์มอริลโลไนต์ (Organic modified MMT, OMMT) พบว่า โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์จะมีการดูดซับโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ภายใน เนื่องจากแถบการดูดกลืนที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 1631 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบงอของ H-O-H ของโมเลกุลน้ำ สำหรับแถบการดูดกลืนที่เกิดขึ้นที่ความถี่ 3622 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงหมู่ O-H ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยแบนด์นี้จะขึ้นกับชนิดของประจุบวกที่อยู่ภายในชั้นซิลิเกต จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า CTAB ไม่ส่งผลต่อหมู่ OH ในโครงสร้างของ Al-O(OH) ออกตะฮีดรอล สำหรับแบนด์ของการสั่นแบบยืดอย่างไม่สมมาตรของพันธะไฮโดรเจนของน้ำไม่พบในกรณีนี้ เนื่องจากแถบการดูดกลืนนี้เกิดการซ้อนทับกับแถบการดูดกลืนของการสั่นแบบยืดของหมู่ OH ในโครงสร้างของ Al-O(OH) ออกตะฮีดรอล

ขณะที่แถบการดูดกลืนที่ 3450 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดอย่างมีสมมาตรของพันธะไฮโดรเจนของน้ำ สำหรับแถบการดูดกลืนที่ความถี่ 1035 cm^{-1} แสดงการสั่นของ Si-O ซึ่งอยู่ในโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ในชั้นเตตระฮีดรอล และแถบการดูดกลืนที่ 908 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของ Al-OH-Al ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ในชั้นออกตะฮีดรอล [38] ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของ MMT ในรูปที่ 4.5 สำหรับสเปกตรัมของออกแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงแถบการดูดกลืนที่เกิดขึ้นใหม่คือที่ 2920 และ 2848 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดอย่างไม่สมมาตรและสมมาตรของ $-\text{CH}_2$ และแถบการดูดกลืนที่ 1469 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบงอของ $-\text{CH}_2$ แสดงให้เห็นว่ามี เฮกซะเดซิลไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ อยู่ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [38]

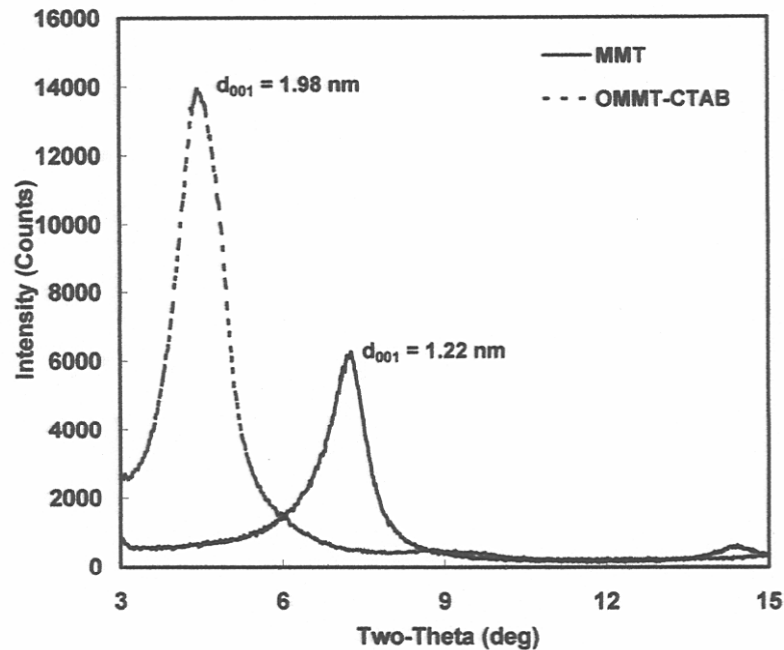


รูปที่ 4.4 กราฟ FTIR ของ MMT และ OMMT

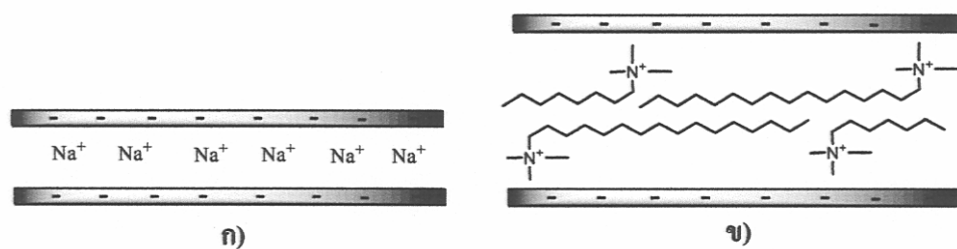


รูปที่ 4.5 ลักษณะ โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [17]

จากลักษณะทางโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ดังรูปที่ 4.5 ทำให้โลหะประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตสามารถแลกเปลี่ยนกับออร์แกนิกไอออนบวกได้ ด้วยขนาดโครงสร้างของโลหะประจุบวกและออร์แกนิกไอออนบวกที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกต (d_{001}) เพิ่มขึ้น โดยสามารถตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกตได้จากเทคนิค XRD โดยหาความสัมพันธ์จากสมการ Bragg's law: $d = \lambda / (2 \sin \theta)$ ที่ตำแหน่งของแบนด์ ดังรูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และ Intensity ของ Na^+MMT และ OMMT ในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 3 ถึง 10° จากผลการตรวจสอบแสดงระยะห่างระหว่างชั้นของ Na^+MMT พบว่ามีระยะระหว่างชั้นเป็น 1.22 นาโนเมตร ขณะที่ CTAB-OMMT มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นเป็น 1.98 นาโนเมตร จากงานวิจัยของ Weihong Xue และคณะ[38] พบว่ามีลักษณะการแทรกของโมเลกุลสารปรับปรุงเป็นแบบ lateral-bilayer แสดงให้เห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์สามารถรักษารูปแบบโครงสร้างของการเป็นชั้นซิลิเกตได้ เมื่อถูกปรับปรุงด้วยแอลคิล แอมโมเนียม แคทไอออน และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ กับ แอลคิล แอมโมเนียม แคทไอออน จึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองลักษณะการแทรกของโมเลกุลแอลคิล แอมโมเนียม แคทไอออน ในชั้นซิลิเกต



รูปที่ 4.6 กราฟ XRD ของ MMT และ OMMT



รูปที่ 4.7 แบบจำลองการแทรกของโมเลกุล CTAB ในชั้นซิลิเกต

ก) Na^+MMT ข) CTAB-OMMT

ตอนที่ 2 การศึกษาการใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ

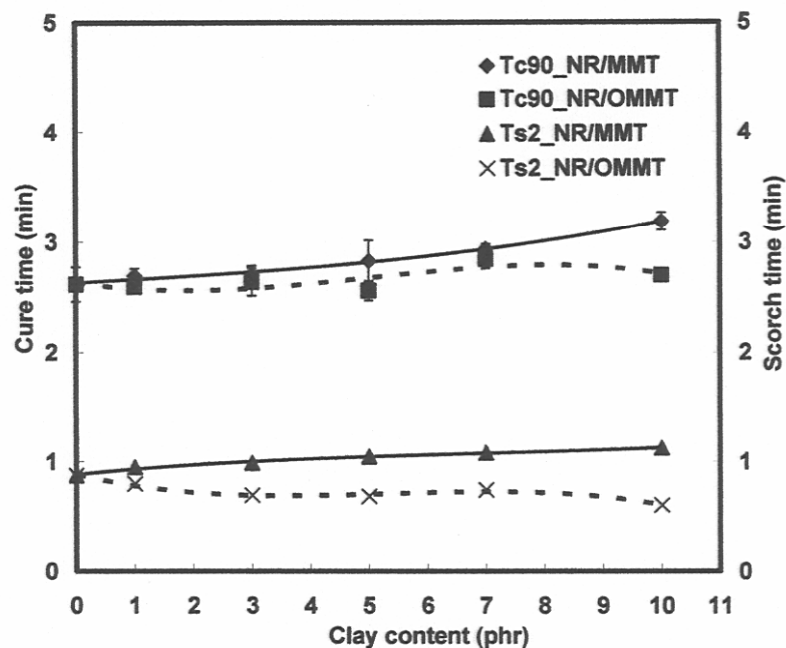
ตอนที่ 2.1 การศึกษาผลของการปรับปรุงผิวมอนต์มอริลโลไนต์

4.3 สมบัติการบ่มของยางคอมพาวด์ระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

ในงานวิจัยนี้ได้นำสารตัวเติมมอนต์มอริลโลไนต์ทั้งที่มีการปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิวมาใช้ในการผสมกับยางธรรมชาติ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางคอมพอสิตทั้งสอง

โดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติการบ่มของยางธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้น รวมไปถึงอุณหภูมิในการคงรูป สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อคุณลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์ โดยศึกษาด้วย

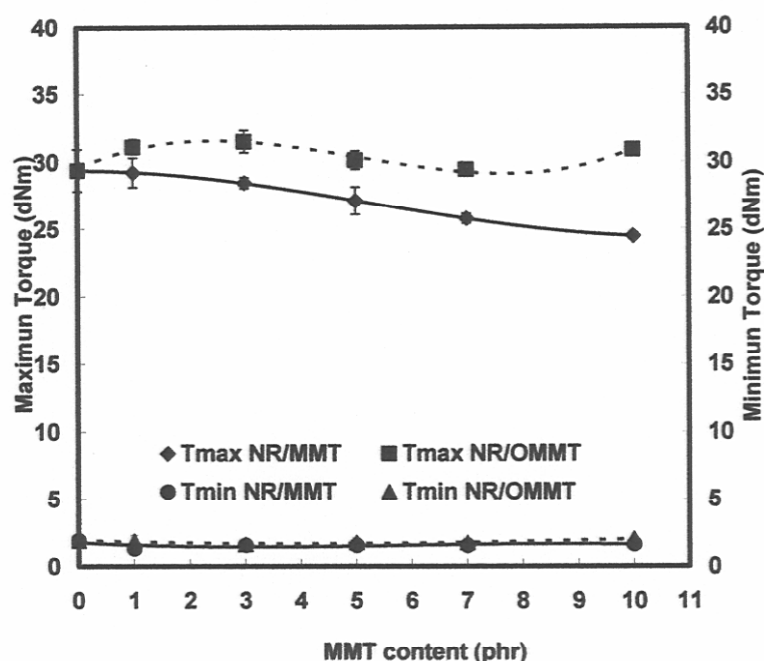
เทคนิค MDR ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า ปริมาณ MMT และ OMMT ไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชของยางคอมพาวด์มากนัก จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของเคลย์ที่ปริมาณ 1 ถึง 10 phr ส่งผลต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชน้อยมาก แต่ทั้งนี้พบว่าแนวโน้มของเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชจากผลของ OMMT มีค่าต่ำกว่าผลของ MMT เนื่องจากหมู่แอมโมเนียมของสารที่ใช้ในการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์มีฤทธิ์เป็นเบส จึงทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไรไนซ์ของยางธรรมชาติ [40]



รูปที่ 4.8 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

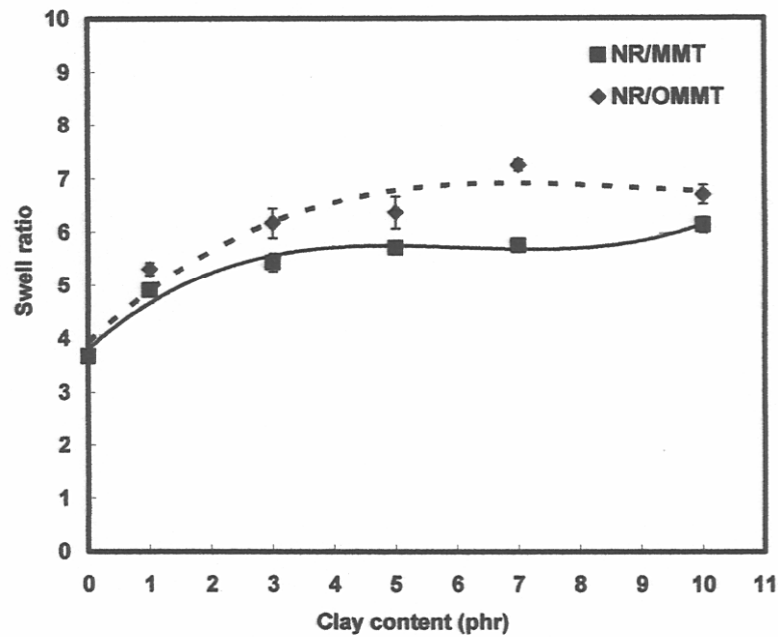
ค่าความแตกต่างของแรงบิด (ΔS) สามารถหาได้จากผลต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด จากงานวิจัยของ Lopez-Manchado และคณะ [41] พบว่าแรงบิดที่เกิดขึ้นนั้นสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง ดังนั้นในรูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงบิดของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่าค่า ΔS มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มมากขึ้น นั้นสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลสองประการคือ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง และความเข้ากันระหว่างเฟสของยางธรรมชาติกับมอนต์มอริลโลไนต์ จากงานวิจัยของ Pongdhorn Sae-ouia และคณะ [42] รายงานว่าค่าการบวมตัวของคอมพอสิตมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของวัสดุคอมพอสิต โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการบวมตัวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์พบว่า เมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง MMT และ OMMT เพิ่มขึ้น จะมีผลให้ค่าการบวมตัวของวัสดุคอมพอสิตทั้งสองเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางลดลง ทั้งนี้การลดลงของความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางเกิดขึ้น เนื่องมาจากการรวมตัวกันของชั้นซิลิเกตของ MMT มีผลต่อการลดลงของค่า ΔS อย่างไรก็ตาม กรณีของ OMMT ที่ปริมาณ 1-3 phr พบว่าค่า ΔS มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก OMMT มีการปรับปรุงให้มีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติได้มากกว่า สังเกตได้จากรูป SEM ที่ 4.11 ส่งผลให้สารประกอบผสมที่มีการเติม OMMT มีค่าแรงบิดสูงสุดมากกว่าสารประกอบผสมที่มีการเติม MMT ด้วย

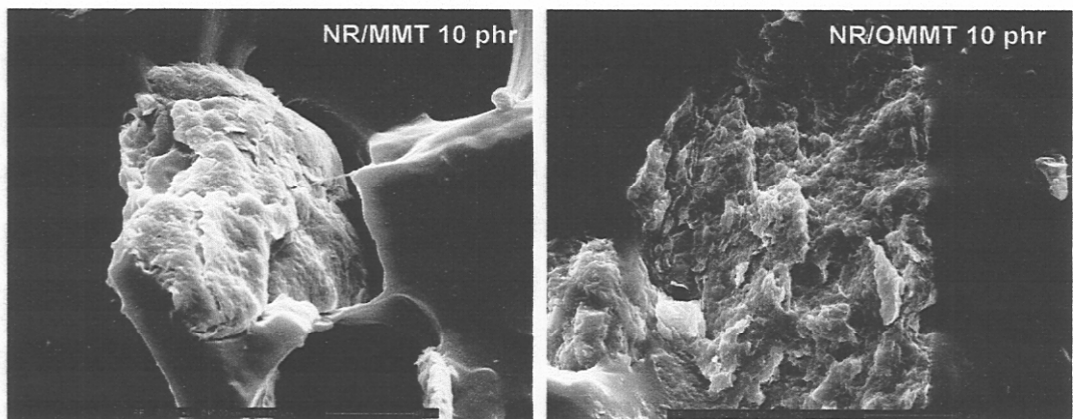


รูปที่ 4.9 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

ความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติต่างๆ ของวัสดุคอมพอสิต การศึกษาความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์สามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.11 จากผลการทดลองพบว่าการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์สามารถทำให้เกิดความเข้ากันได้ระหว่างเฟสทั้งสอง ซึ่งแสดงการเชื่อมติดที่ดี เนื่องจากการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ความเป็นขั้วของเคลย์ลดลง [16] ส่งผลให้มีความเข้ากันได้กับเฟสของยางธรรมชาติได้ดีมากขึ้น ขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงจะเกิดช่องว่างขึ้นระหว่างเฟสของยางและมอนต์มอริลโลไนต์ และจากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์จะเกิดการจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อน (agglomerate) แสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวของชั้นซิลิเกตบางส่วนยังคงเป็น intercalate



รูปที่ 4.10 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อการบวมตัวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

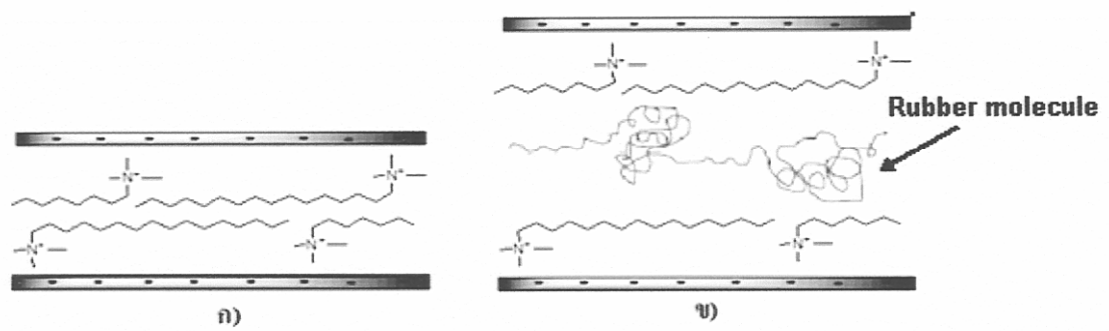


รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ของยางคอมพอสิต (x500)

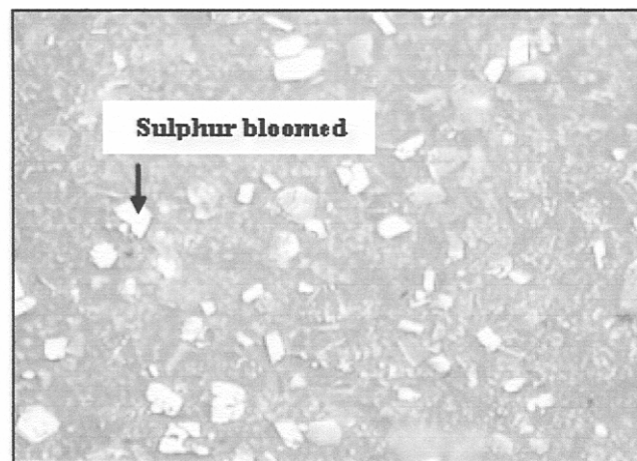
4.4 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญประการหนึ่งคือ การบวมตัว (swelling) จากงานวิจัยของ Pongdhorn Sae-ouia และคณะ [42] ได้ศึกษาการบวมตัวของยางคอมพอสิตพบว่ามีความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวาง ดังได้กล่าวแล้ว โดยอัตราการบวมตัวจะมีค่าแปรผกผันกับปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวาง จากรูปที่ 4.10 แสดงผลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อการบวมตัวของยางคอมพอสิต จากการทดลองพบว่า การบวมตัวของยางคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณ

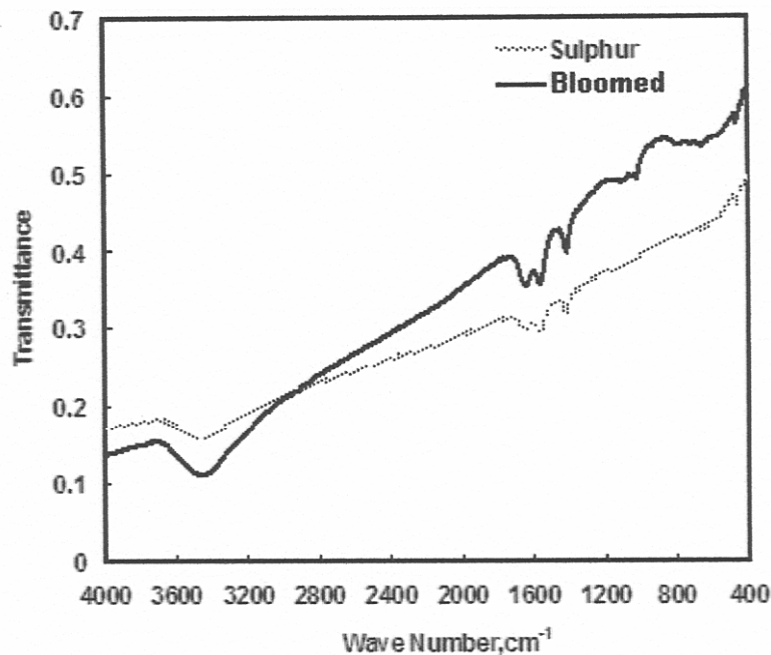
ของมอนต์มอริลโลไนต์มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมขวางลดลง ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบที่ทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถัน และเป็นระบบธรรมดา (conventional system) ซึ่งใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เมื่อทำการผสมยางธรรมชาติกับมอนต์มอริลโลไนต์ในระหว่างการผสม โมเลกุลยางธรรมชาติแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์แบบ intercalate ดังแสดงในแบบจำลองรูปที่ 4.12 ทำให้โมเลกุลของยางที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตถูกบังคับไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางด้วยกำมะถัน ได้ สำหรับอีกปัจจัยหนึ่งเนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการคงรูป เช่น ZnO กรดสเตียริก และตัวเร่ง สามารถถูกชั้นของซิลิเกตดูดซับไว้ เนื่องจากความมีเป็นขั้วของสารทั้งสอง [43] ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาพันธะเชื่อมขวางไม่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าจะเกิดการเคลื่อนที่ของสารเคมีกำมะถันออกมาอยู่ที่ผิว (blooming) ดังรูปที่ 4.13 จากการตรวจสอบสารเคมีที่พบด้วยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.14 พบว่าสารเคมีที่เกิดการเคลื่อนที่ออกมาที่บริเวณผิวคือกำมะถันจริง แสดงให้เห็นว่ามีสารเคมีบางส่วนไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางและแพร่ออกมาอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของยางคอมพอสิต ดังนั้นการรวมตัวของชั้นซิลิเกตจะเป็นตัวขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมขวาง สำหรับกรณีที่มี OMMT พบว่าอัตราการบวมตัวของยางคอมพอสิตจะมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลของ MMT ที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ตั้งแต่ 3 ถึง 10 phr คาดว่าปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางคอมพอสิตที่มีการเติม OMMT นั้นไม่ได้น้อยกว่าการเติม MMT แต่เนื่องมาจากการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้มีความเป็นสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มากขึ้น ซึ่งเพิ่มความสามารถในการบวมตัวในสารละลายที่ไม่มีขั้ว จากงานวิจัยของ Tushar Mandalia และ Faiza Bergaya [45] ได้ศึกษาการบวมตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่า MMT เป็นสารชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งการบวมตัวในน้ำที่เป็น โมเลกุลที่มีขั้ว น้ำจะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT ได้ดี ขณะที่สารละลายอินทรีย์จะไม่ทำให้ MMT บวมตัว แต่เมื่อ MMT ถูกปรับปรุงด้วยสาร surfactant เป็น OMMT จะทำให้พฤติกรรมการบวมตัวนั้นแตกต่างจากเดิม โดย OMMT จะสามารถบวมตัวได้ดีในสารละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว โดยระดับของการบวมตัวจะขึ้นกับปริมาณของ surfactant ที่ใช้ในการปรับปรุง MMT จากรูปที่ 4.15 แสดงการศึกษาการบวมตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในโทลูอีน ทั้งที่มีการปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว จะเห็นได้ว่าการบวมตัวของ OMMT มีการบวมตัวในโทลูอีนที่สูงกว่า MMT อย่างมาก ดังนั้นการบวมตัวของยางคอมพอสิตที่มีการเติม OMMT นั้น ส่วนหนึ่งได้รับอิทธิพลมาจากการบวมตัวของ OMMT



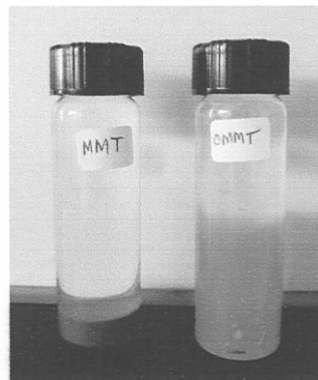
รูปที่ 4.12 แบบจำลองการแทรกในชั้นซิลิเกตของโมเลกุลยาง
ก) OMMT-CTAB ข) OMMT-CTAB ในเมทริกซ์ยางธรรมชาติ



รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) แสดงสารเคมีที่แพร่ออกมา
ที่ผิวหน้าของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์



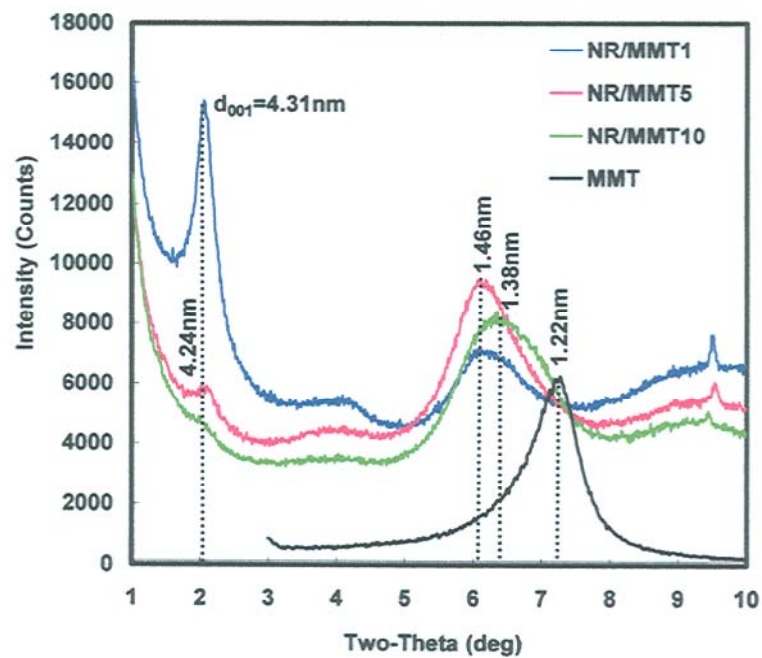
รูปที่ 4.14 กราฟ FTIR ของกำมะถัน และสารที่เคลื่อนที่ออกมาที่บริเวณผิวยาง



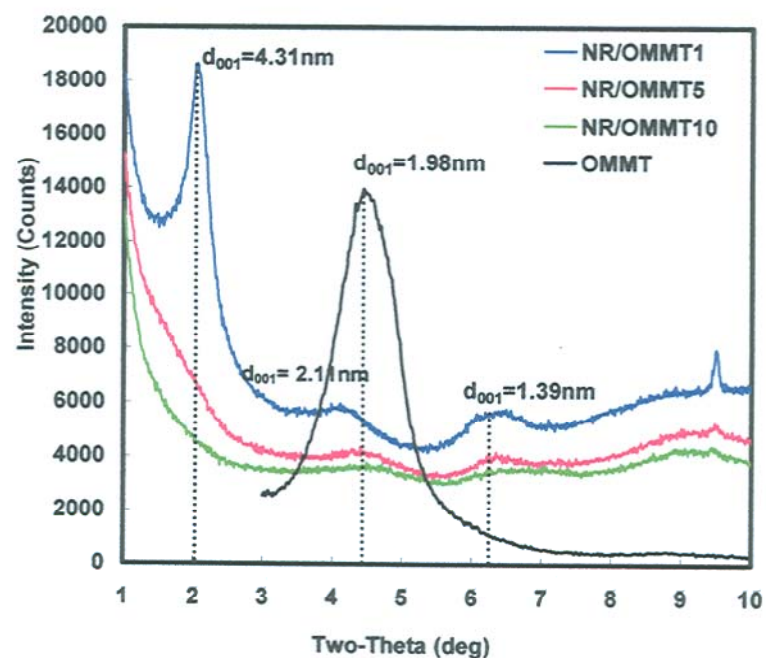
รูปที่ 4.15 ลักษณะการบวมตัวของ MMT และ OMMT ปริมาณ 1 กรัม ในโทลูอีน 15 มิลลิตร

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถศึกษาการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ได้จากเทคนิค XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ผลการทดลองสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตในเมทริกซ์ของยางได้จากสมการ Bragg's law ดังแสดงในบทที่ 3 ซึ่งแสดงค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตในรูปดังกล่าว อีกนัยหนึ่งหมายถึงความสามารถของโมเลกุลยางที่แทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตได้ จากการทดสอบพบว่า การเติม MMT ที่ปริมาณ 1 phr ในเมทริกซ์ยาง แสดงให้เห็นแบนด์เกิดขึ้น 2 แบนด์ที่มุม 2θ คือมุม 2 และ 6° สัมพันธ์กับค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตที่ 4.31 และ 1.46 นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของยางธรรมชาติบางส่วนสามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้น

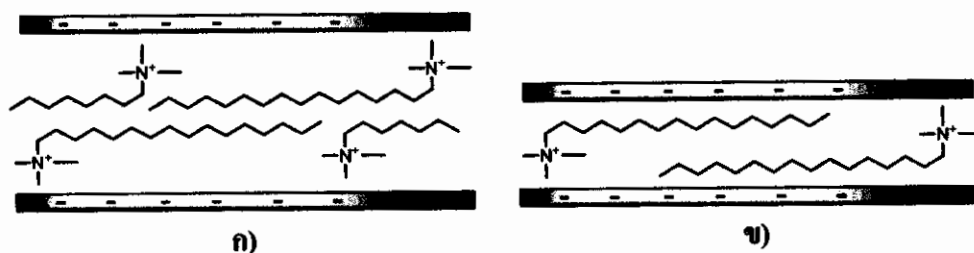
ซิลิเกตได้แบบ intercalate เนื่องจากแรงเฉือนในระหว่างการผสมทำให้โมเลกุลของยางแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตได้ ขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์บางส่วนเกิดการรวมตัวกันของชั้นซิลิเกต ซึ่งโดยธรรมชาติชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงผิวจะมีความเป็นขี้ที่มาก [16] และเกาะกลุ่มกันด้วยแรงระหว่างขี้ ดังนั้นจึงเป็นการยากที่โมเลกุลของยางธรรมชาติที่มีไม่มีขี้จะแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นซิลิเกต จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณของ MMT ในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติมากขึ้น พบว่า ตำแหน่งของแบนด์ที่เกิดขึ้นจะเลื่อนมาที่มุม 2 θ มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าความสามารถของโมเลกุลยางที่แทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตลดลง และเกิดการรวมตัวของชั้นซิลิเกตที่มากขึ้น สำหรับกรณีของ OMMT พบว่าการเติม OMMT ในปริมาณ 1 phr แสดงให้เห็นแบนด์ที่เกิดขึ้นที่มุม 2, 4.1 และ 6.3 $^{\circ}$ สัมพันธ์กับค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตที่ 4.31, 2.11 และ 1.39 นาโนเมตร ตามลำดับ การปรากฏของระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตที่ 4.31 และ 2.11 นาโนเมตร สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแทรกเข้าไปในชั้นซิลิเกตของ OMMT ได้ง่ายกว่าเมื่อเทียบกับ MMT เนื่องจากชั้นซิลิเกตถูกปรับปรุงให้เป็นขี้ที่ผิวลดลงเพื่อให้ความเข้ากันได้กับเฟสของยาง ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ OMMT จะมากกว่ากล่าวได้ว่าแรงกระทำระหว่างชั้นซิลิเกตจะลดลง ดังนั้นโมเลกุลของยางธรรมชาติจึงสามารถแทรกเข้าไปในชั้นของซิลิเกตได้ง่ายกว่ากรณีของ MMT การรวมตัวกันของชั้นซิลิเกตจึงลดลง จากงานวิจัยของ Konstantinos G และคณะ [43] พบว่า การใช้สารปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ชนิด primary amine จะมีหมู่เอไมด์ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา สามารถเกิดสารประกอบกับ ZnO ได้ ช่วยให้เกิดขึ้นระเชื่อมขวางขึ้นภายในชั้นซิลิเกต ซึ่งทำให้ชั้นซิลิเกตสามารถกระจายตัวได้อย่าง exfoliate ขณะที่การใช้สารปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์แบบ quaternary amine เช่น CTAB จะไม่เกิดเหตุการณ์ลักษณะนี้ขึ้น มีผลทำให้ชั้นซิลิเกตกระจายตัวแบบ exfoliated ได้ยากกว่า สำหรับแบนด์ที่เกิดขึ้นที่มุม 6.3 $^{\circ}$ สังเกตได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตจะมีค่าลดลงต่ำกว่า OMMT เนื่องจากแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการผสมทำให้โมเลกุลของ CTAB บางส่วนหลุดออกจากพื้นผิวของซิลิเกต และเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปแบบของการแทรกของโมเลกุล CTAB จาก lateral bilayer เป็น lateral monolayer ดังแบบจำลองรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาการเติมปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น พบว่า พีคที่เกิดขึ้นจะเลื่อนไปที่มุม 2 θ มากขึ้น นั่นคือความสามารถในการแทรกของโมเลกุลยางในชั้นซิลิเกตจะลดลง และมีการรวมตัวของชั้นซิลิเกตที่มากขึ้น เช่นเดียวกับกรณีของ MMT



รูปที่ 4.16 ผล XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์
ที่มีการเติม MMT ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.17 ผล XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์
ที่มีการเติม OMMT ในปริมาณต่างๆ



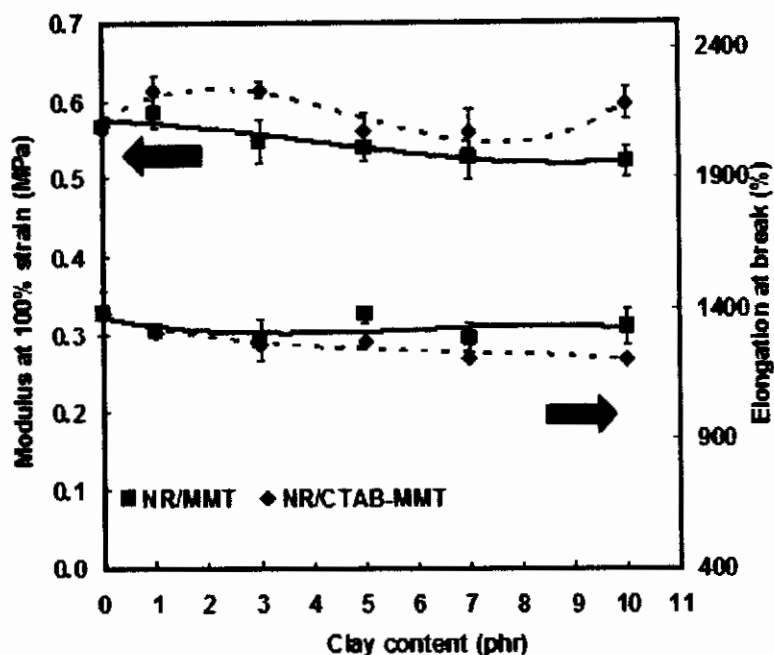
รูปที่ 4.18 แบบจำลองการแทรกของโมเลกุล CTAB ในชั้นซิลิเกต

ก) Lateral bilayer ข) Lateral monolayer

4.5 สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ ในงานวิจัยนี้จะทดสอบจากสมบัติความต้านทานแรงดึงยืด สมบัติความต้านทานแรงฉีกขาด และความแข็งแรงของยางคอมพอสิต

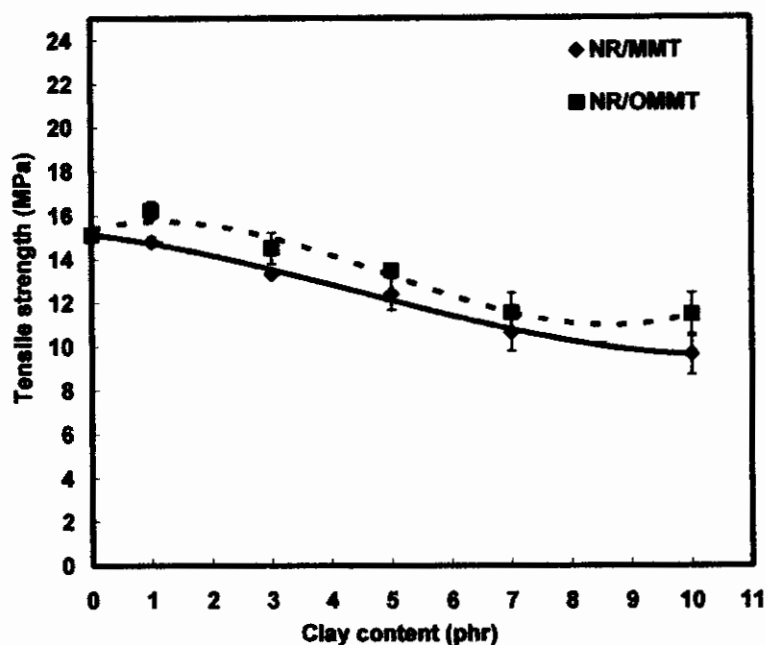
อิทธิพลของปริมาณ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัส ค่าความต้านทานการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 จากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงยืด เมื่อพิจารณาผลของการเติม MMT ที่มีต่อมอดูลัสของวัสดุผสม พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากการเติม MMT ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกันของชั้นซิลิเกต เนื่องจาก MMT เมื่อไม่ได้ถูกปรับปรุงผิวจะมีความเป็นขั้วสูง [16] ดังนั้นเมื่อนำ MMT มาผสมกับยางธรรมชาติ ซึ่งไม่มีความเป็นขั้ว ทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสทั้งสองน้อย ดังแสดงในผลการทดสอบด้วย SEM ในรูปที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีช่องว่าง (void) เกิดขึ้นระหว่างผิวภาคของ MMT และยางธรรมชาติ การไม่เข้ากันของสองวัสดุภาคนี้ ทำให้โอกาสที่โมเลกุลของยางธรรมชาติจะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตจึงค่อนข้างยาก อนุภาค MMT ส่วนใหญ่จึงชอบที่จะอยู่รวมกันมากกว่า เป็นผลทำให้ MMT ไม่แสดงสมบัติเป็นสารเสริมแรง จากงานวิจัยของ P. Bala และคณะ [31] พบว่า การเติม MMT ผสมลงในยางธรรมชาติเพียง 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มอดูลัสของยางคอมพอสิตลดลงเช่นกัน ขณะที่ OMMT นั้นถูกปรับปรุงให้มีความเป็นขั้วลดลง ทำให้เฟสของยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้กับ OMMT มาก โมเลกุลของยางธรรมชาติจึงสามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตได้มากกว่า เป็นผลให้ยางคอมพอสิตที่ถูกผสมด้วย OMMT มีมอดูลัสที่สูงกว่ายางคอมพอสิตที่ผสมด้วย MMT



รูปที่ 4.19 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

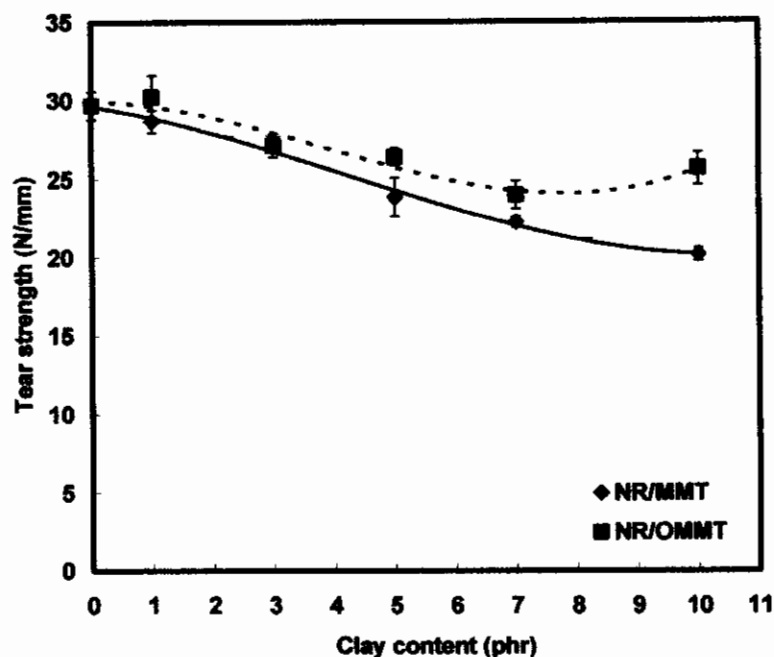
การศึกษาความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมพอสิตเป็นการทดสอบที่สำคัญอย่างมากสำหรับการศึกษาสารเสริมแรง เมื่อพิจารณาถึงความต้านทานแรงดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์นั้น จะมีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องหลายอย่างด้วยกัน ทั้งปริมาณการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ ระบบของการบ่ม สภาพการผสม ชนิดของยาง วิธีการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ ชนิดของตัวปรับปรุงผิว [44] จากรูปที่ 4.20 แสดงอิทธิพลของปริมาณ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่าเมื่อเติมปริมาณทั้ง MMT และ OMMT เพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง จากงานวิจัยของ P. Bala และคณะ [31] พบในลักษณะเช่นเดียวกันนี้ โดยพบว่าการเติมปริมาณ MMT 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความต้านทานแรงดึงของยางธรรมชาติลดลงจากเดิมที่ไม่ได้เติม MMT ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถในการกระจายตัวของชั้นซิลิเกตที่ต่ำ ซึ่งจากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD และ SEM จะเห็นได้ว่า ชั้นซิลิเกตของ MMT เกิดการรวมตัว (agglomerate) กันมาก เป็นผลให้ MMT ไม่สามารถแสดงสมบัติเป็นสารเสริมแรงได้ เช่นเดียวกันกับการศึกษาของคอมพอสิตที่มีการเติม OMMT พบว่า ที่ปริมาณ OMMT ตั้งแต่ 3 phr ขึ้นไป พบว่าความต้านทานแรงดึงยืคลดลง เนื่องจากผลของการรวมตัวกันของชั้นซิลิเกต อย่างไรก็ตาม OMMT ยังทำให้ยางคอมพอสิตนั้นมีความต้านทานเชิงกลที่ดีกว่าการเติม MMT เนื่องจาก OMMT มี

ความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติที่มากกว่า โมเลกุลของยางสามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของซิลิเกตแบบ intercalate ได้มากกว่า OMMT จึงทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงได้ดีกว่า MMT



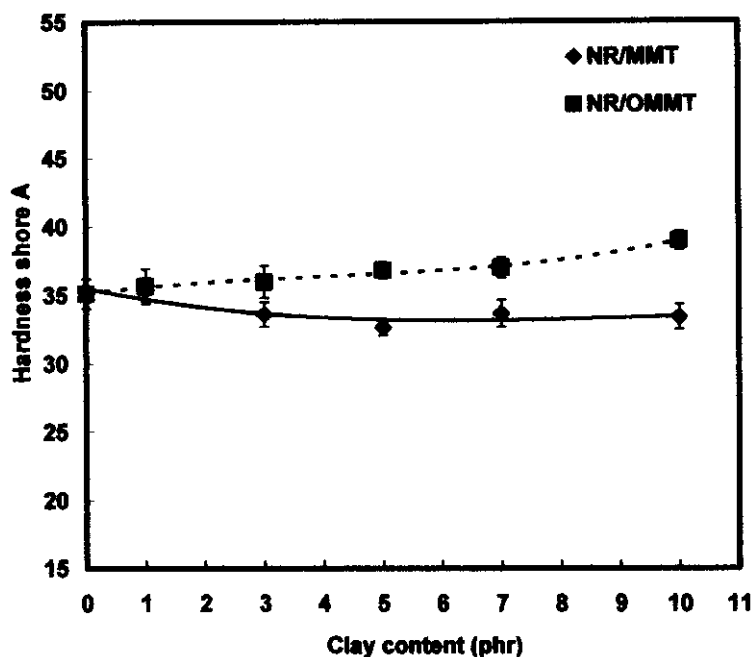
รูปที่ 4.20 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมบริลโลไนต์

เมื่อพิจารณาผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาด (รูปที่ 4.19) พบว่า เปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดมีค่าลดลงตามปริมาณการเติม MMT และ OMMT ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของยางบางส่วนสามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต ดังแสดงในการศึกษาด้วยเทคนิค XRD รูปที่ 4.16 และ 4.17 ชั้นซิลิเกตเหล่านี้จึงเป็นตัวขัดขวางให้การเลื่อนผ่านกันของโมเลกุลยางลดลง ทำให้ความยืดหยุ่นของยาง (elasticity) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดระหว่างการเติม MMT และ OMMT พบว่า การเติม OMMT ให้ผลเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดต่ำกว่า เนื่องจาก OMMT มีแรงกระทำ (interfacial adhesion) ต่อยางธรรมชาติที่ดีกว่า ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลึกเมื่อถูกดึงยึด (strain-induced crystallization) ที่เพิ่มขึ้น [30] ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยางลดลง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดจึงลดลงมากกว่า



รูปที่ 4.21 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

การศึกษาความต้านทานแรงฉีกขาด (tear strength) ของยางคอมพอสิต ซึ่งแสดงความต้านทานการแพร่ขยายของการฉีกขาด (crack propagation) ในยาง ความต้านทานแรงฉีกขาดของยางสามารถอธิบายได้จาก ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง การกระจายตัวของชั้นซิลิกา และความเข้ากันได้ระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และยางธรรมชาติ [33] ผลการทดลองจากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นผลของการเติม MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาด พบว่าการเติมปริมาณ MMT และ OMMT มากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดลดลง เมื่อพิจารณาผลของการเติม MMT พบว่าความต้านทานการฉีกขาดของยางลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ MMT ทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางลดลง และชั้นซิลิกาของ MMT เกิดการรวมตัวกัน (agglomerate) อีกทั้งความไม่เข้ากันระหว่าง MMT ที่มีความเป็นขี้ว กับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขี้ว ทำให้เกิดช่องว่าง (void) ระหว่างเฟสขึ้น ซึ่งเป็นจุดบกพร่องที่ทำให้เกิดการฉีกขาด (crack propagation) ต่อไปได้ง่าย สำหรับผลของการเติม OMMT พบเช่นเดียวกันว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ OMMT ทำให้ความต้านทานแรงฉีกขาดลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลระหว่าง OMMT และ MMT พบว่า ความต้านทานแรงฉีกขาดของยางคอมพอสิตที่มีการเติม OMMT จะมีค่าสูงกว่าการเติม MMT เนื่องมาจากการความเข้ากันได้ระหว่าง OMMT และยางธรรมชาติที่ดีกว่า



รูปที่ 4.22 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์

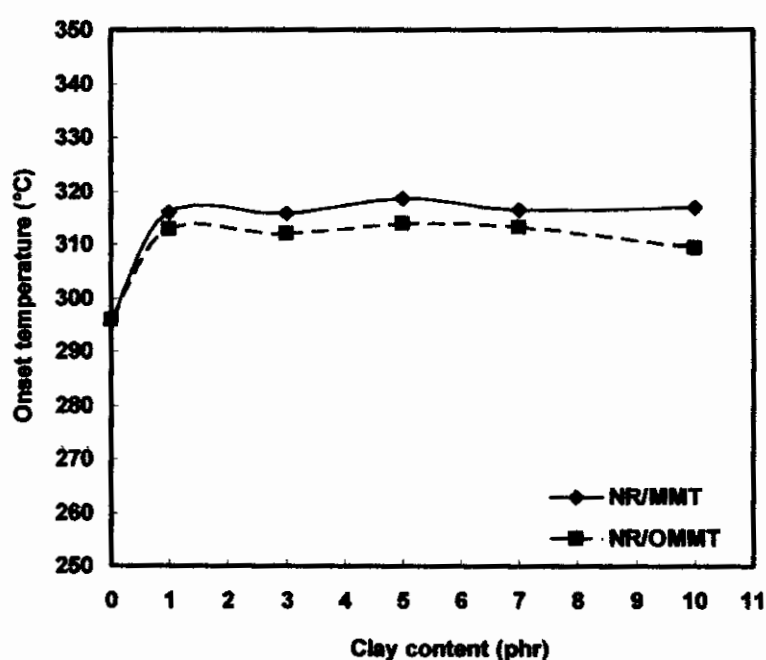
สำหรับการเติมสารตัวเติมโลหะอนินทรีย์ที่มีความแข็งสามารถเพิ่มความแข็งให้กับยางได้ จากผลการศึกษาความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าการเติม OMMT ทำให้ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายตัวของ OMMT ยังคงเป็นแค่ intercalate อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Yiqing Wang และคณะ [46] พบว่าการเติม OMMT สามารถทำให้ยางคอมพอสิตมีความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้นสูงมาก เนื่องมาจากการกระจายตัวอย่าง exfoliate ของซิลิกา

ในกรณีของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ MMT ไม่สามารถช่วยเพิ่มความแข็งที่ผิวได้ เนื่องจากความเป็นขี้ของ MMT ทำให้เฟสของยางธรรมชาติไม่เข้ากันกับเฟสของมอนด์มอริลโลไนต์ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.11 พบว่าเกิดช่องว่างระหว่างเฟสของมอนด์มอริลโลไนต์กับเมทริกซ์ยาง แสดงความไม่เข้ากันระหว่างเฟสทั้งสอง ซึ่งพบเช่นเดียวกับงานวิจัยของ M. Arroyo และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของการเติม MMT ผสมกับยางธรรมชาติที่ปริมาณ 10 phr พบว่า ความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิตมีค่าลดลงอย่างมาก

4.6 สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์

เสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมพอสิตที่มี MMT และ OMMT เป็นสารเสริมแรง ศึกษาได้จากได้จากเทคนิค TGA โดยพิจารณาจากอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว (T_{max}) ของวัสดุ

ผลระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มมากขึ้น อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัวของคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง โดยมอนต์มอริลโลไนต์จะทำหน้าที่ดูดซับความร้อนไว้และลดอัตราการแพร่ความร้อนไปสู่เมทริกซ์ของยาง ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ characteristic ของโมเลกุลยาง ทำให้ยางสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น [47] อย่างไรก็ตามผลของการปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมพอสิต มีค่า T_{onset} และ T_d ลดต่ำลง เนื่องจากเกลือแอลคิล แอมโมเนียม ที่แทรกอยู่ในระหว่างชั้นของซิลิเกตมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำ [48] และเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมพอสิตลดลง



รูปที่ 4.23 ผลของ MMT และ OMMT ที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (T_{onset}) ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

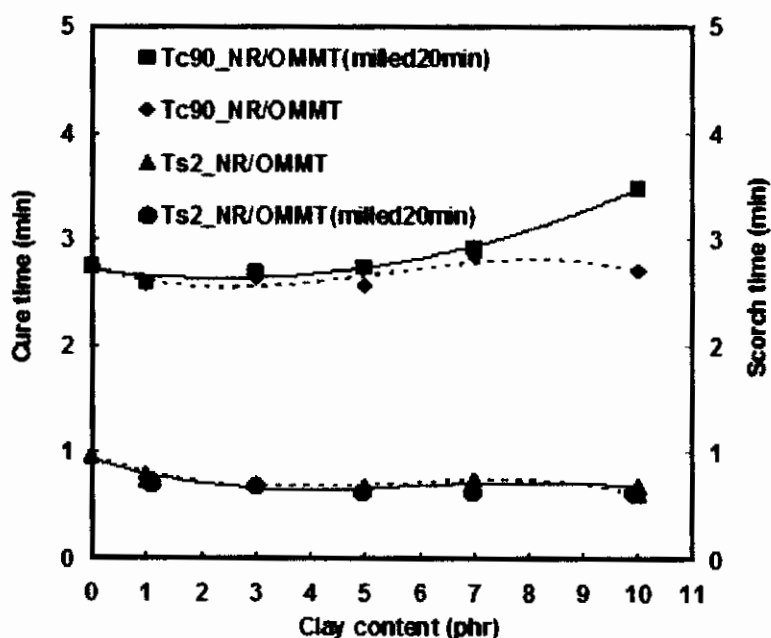
ตอนที่ 2.2 การศึกษาผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT

4.7 สมบัติการบ่มของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการเพิ่มเวลาในการบดผสมยางธรรมชาติกับออร์แกนมอนต์มอริลโลไนต์

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านมาพบว่าชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ยังมีการรวมกลุ่มกันและไม่เกิดการกระจายตัวแบบ exfoliate จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางคอมพอสิตไม่เพิ่มสูงขึ้นดังเช่น

งานวิจัยอื่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน ทั้งปริมาณการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ ระบบของการบ่ม สภาพการผสม ชนิดของยาง วิธีการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ ชนิดของตัวปรับปรุงผิว โดยสิ่งที่จะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่าย และไม่ยุ่งยากคือการเปลี่ยนสถานะของการผสม และจากงานวิจัยของ Konstantinos G. Gatos และ Jo'zsef Karger-Kocsis [43] พบว่าระยะเวลาในการบดผสมมีผลต่อการกระจายตัวของซิลิเกตอย่าง exfoliate ในยาง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทดลองนำยางธรรมชาติมาบดผสมกับ OMMT บน Two roll mill ก่อนเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นจึงนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปบดผสมกับสารเคมียาง โดยคาดหวังว่าซิลิเกตของ OMMT จะสามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น

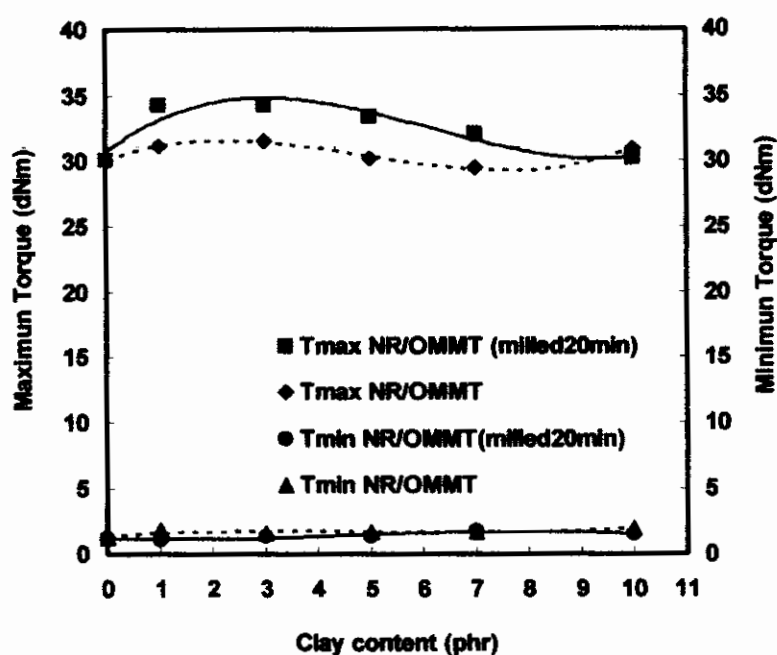
การศึกษาสมบัติการบ่มของยางคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของสารประกอบยางผสมที่เติม OMMT โดยมีการบดผสมก่อนเป็นเวลา 20 นาที มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตามกรณีที่มี OMMT 10 phr พบว่าเวลาในการคงรูปมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการใช้เวลาในการบดผสมที่มากขึ้น ทำให้สารตัวเร่ง และกำมะถัน ถูกชั้นซิลิเกตของ OMMT ครอบมากขึ้น



รูปที่ 4.24 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

เมื่อพิจารณาแรงบิดสูงสุดและค่าสุดของสารประกอบยาง ดังรูปที่ 4.25 พบว่า การเพิ่มเวลาในการบดผสมยางกับ OMMT นี้ ทำให้สารประกอบยางมีแรงบิดสูงสุดเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการผสมอาจจะทำให้ OMMT เกิดการกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น จาก

การศึกษาของ M.A. Lo'pez-Manchado และคณะ [40] พบว่าค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (ΔS) สัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT นอกจากจะทำให้ OMMT กระจายตัวดีขึ้น ยังมีผลทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางเพิ่มมากขึ้นด้วย [6] แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้น จะทำให้ OMMT เกิดการรวมตัวกัน (agglomerate) และอาจเกิดจากจากที่ OMMT ดูดซับสารตัวเร่ง และก่อกวนมากขึ้น จนทำให้การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางลดลง แรงบิดสูงสุดของยางคอมพาวด์จึงลดลง



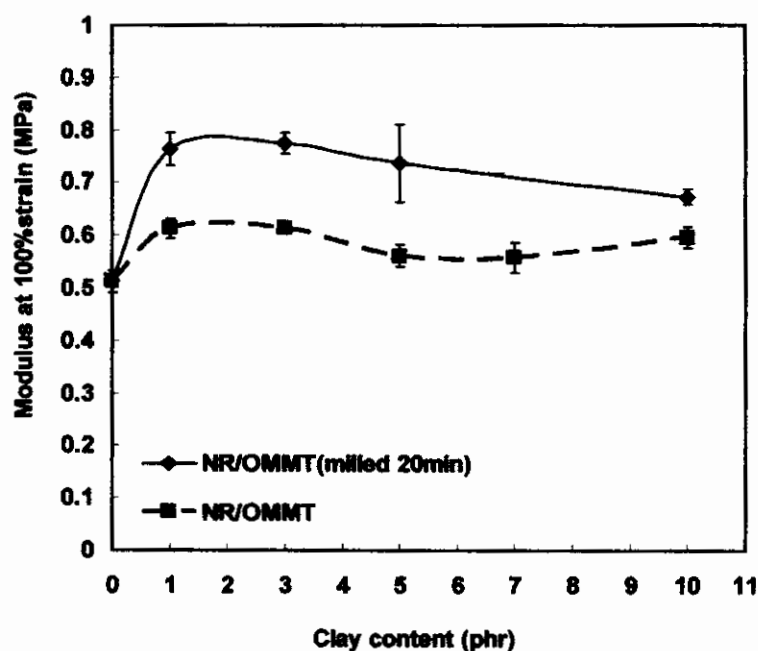
รูปที่ 4.25 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่าแรงบิดสูงสุดและต่ำสุดของสารประกอบยางธรรมชาติและมอนคัมอริโดไลน์

4.8 สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนคัมอริโดไลน์ที่มีการเพิ่มเวลาในการบดผสมยางธรรมชาติกับออร์แกโนมอนคัมอริโดไลน์

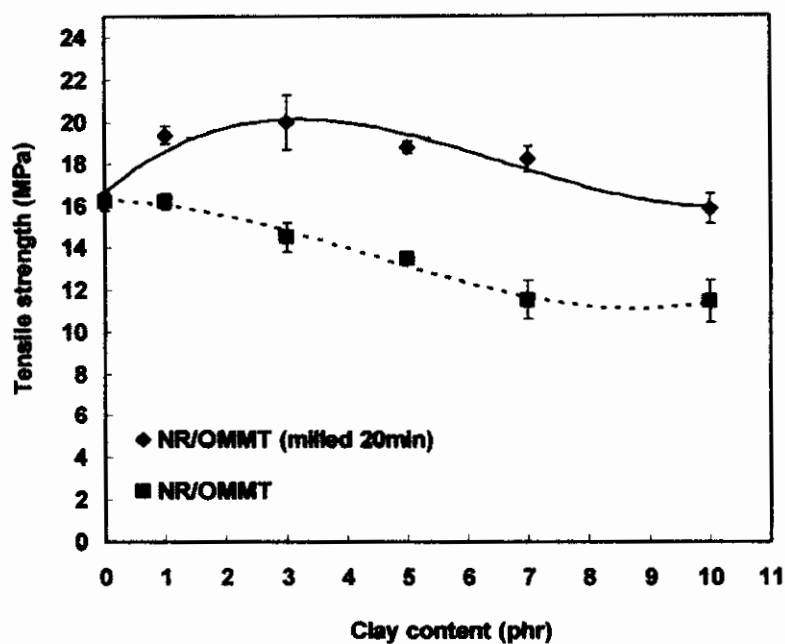
การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT ที่มีการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ OMMT ก่อนเป็นเวลา 20 นาที ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสมพบว่าโมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT ที่ไม่ได้บดผสมก่อนทำการผสมสารเคมียาง ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เนื่องจากให้เวลาในการบดผสมระหว่าง OMMT และยางธรรมชาติมากขึ้น เป็นการเพิ่มเวลาในการได้รับแรงเฉือน ทำให้ OMMT กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น จากงานวิจัยของ Konstantinos G. Gatos และ Jo'zsef Karger-Kocsis [43] พบว่าการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่าง OMMT กับยางธรรมชาติก่อนการเติมสารเคมี จะมี

ผลทำให้โมเลกุลของยางแทรกตัวเข้าไปแทรกระหว่างชั้นซิลิเกตของ OMMT ได้มากขึ้น และลดปริมาณการรวมตัวกันของ OMMT ซึ่งจะส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นอย่างมาก

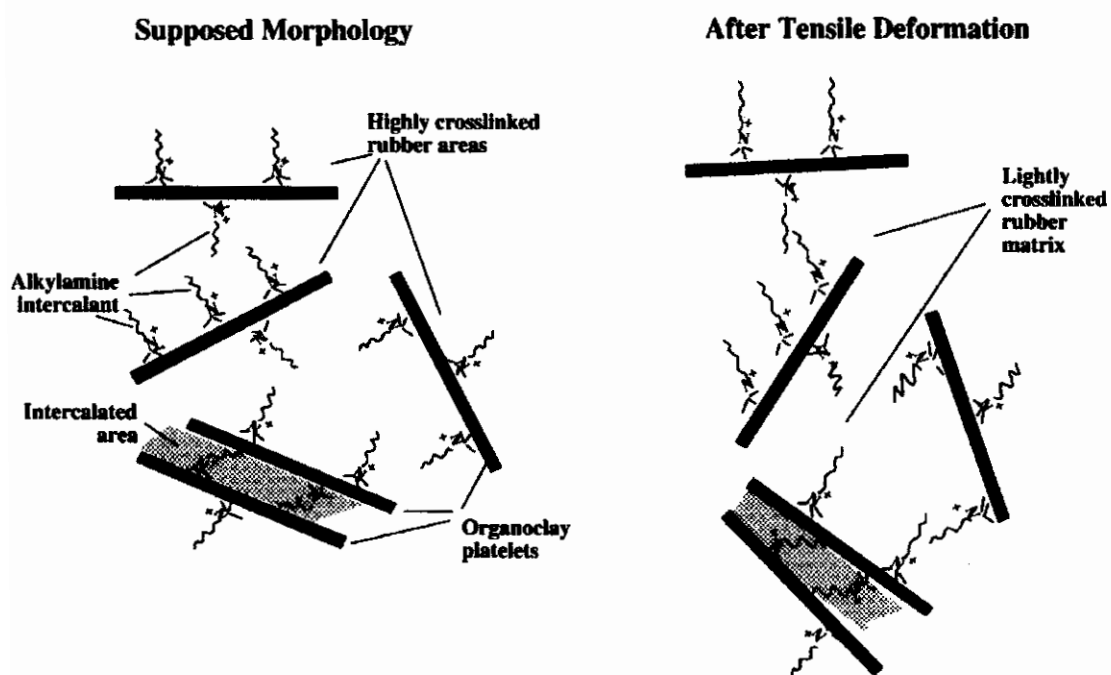
เมื่อพิจารณาความต้านทานแรงดึงของยางคอมพอสิต ดังรูปที่ 4.27 พบว่า การเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่าง OMMT กับยางธรรมชาติ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึง เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีขึ้นของ OMMT ทำให้ OMMT ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงที่ดีในยางธรรมชาติ ดังแสดงในแบบจำลองการทำหน้าที่เสริมแรงของ OMMT [20] รูปที่ 4.28 อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาณ OMMT จะทำให้ความต้านทานแรงดึง เนื่องมาจากการรวมกันของ OMMT สำหรับผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT กับยางธรรมชาติที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาด แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่าผลของเวลาในการบดผสมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาดของวัสดุมากนัก



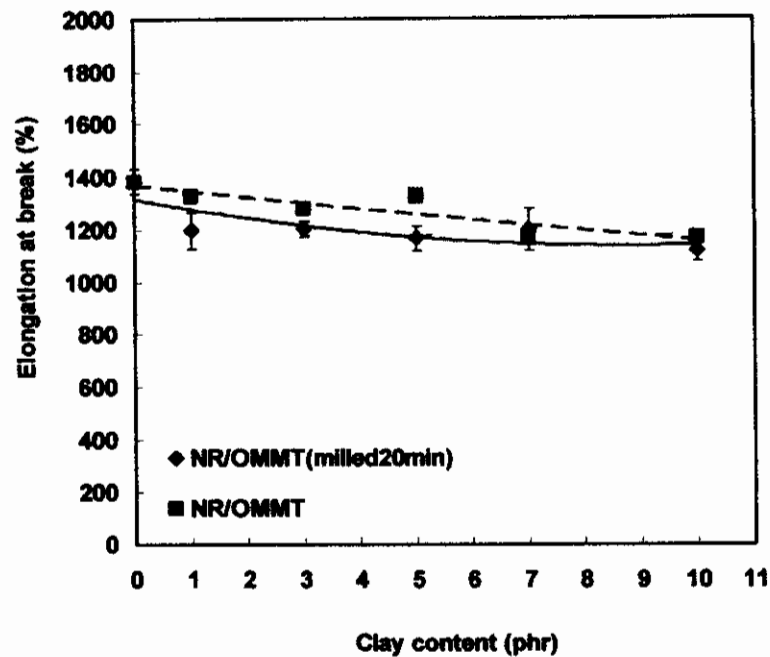
รูปที่ 4.26 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริไลนค์



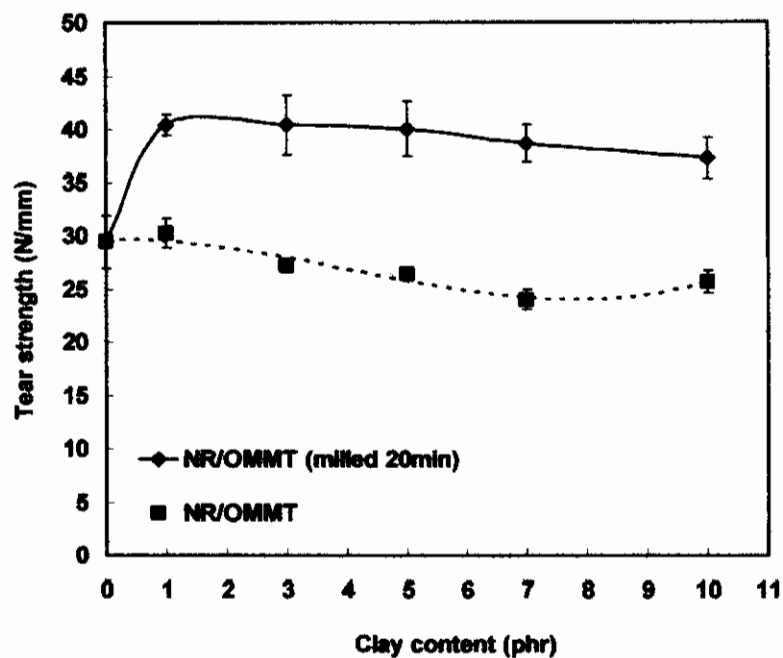
รูปที่ 4.27 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโลไนต์



รูปที่ 4.28 แบบจำลองโครงสร้างการเสริมแรงของ OMMT ในยางซึ่งถูกดึงยืด [20]



รูปที่ 4.29 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

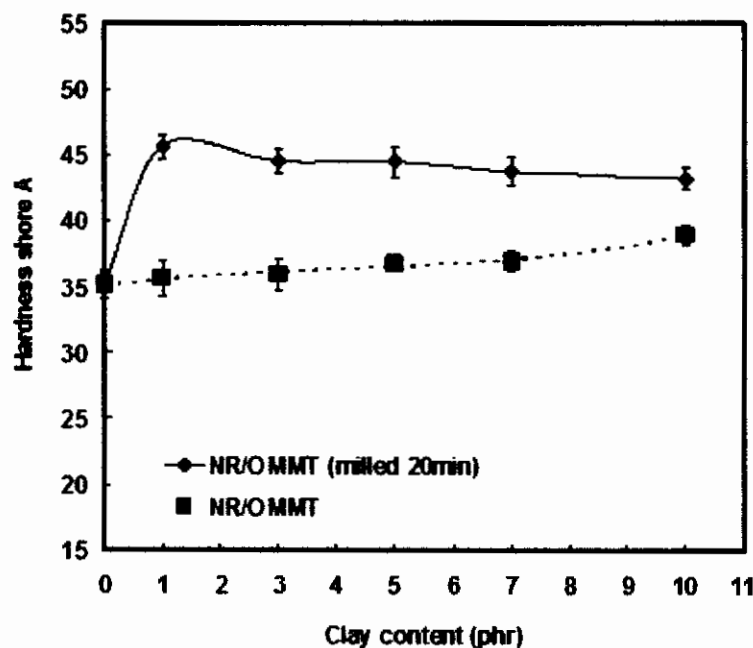


รูปที่ 4.30 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

สำหรับผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสมยางกับ OMMT ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางคอมพอสิต ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าความต้านทานแรงฉีกขาดของยางคอมพอสิตที่

มีการเพิ่มเวลาในการบดผสมยางนั้น มีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงของวัสดุ นั่นคือการกระจายตัวของ OMMT ที่ดีขึ้น สามารถชะลอการฉีกขาด (crack propagation) ได้

เมื่อพิจารณาถึงความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิตที่มีการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT เป็นเวลา 20 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่า ความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องมาจากการที่ OMMT นั้นมีความแข็งของโลหะอนินทรีย์ที่มีความแข็ง โดยธรรมชาติอยู่แล้ว ประกอบกับ OMMT สามารถกระจายตัวได้ดีในยางด้วย [46]



รูปที่ 4.31 ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสม OMMT ที่มีต่อความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์

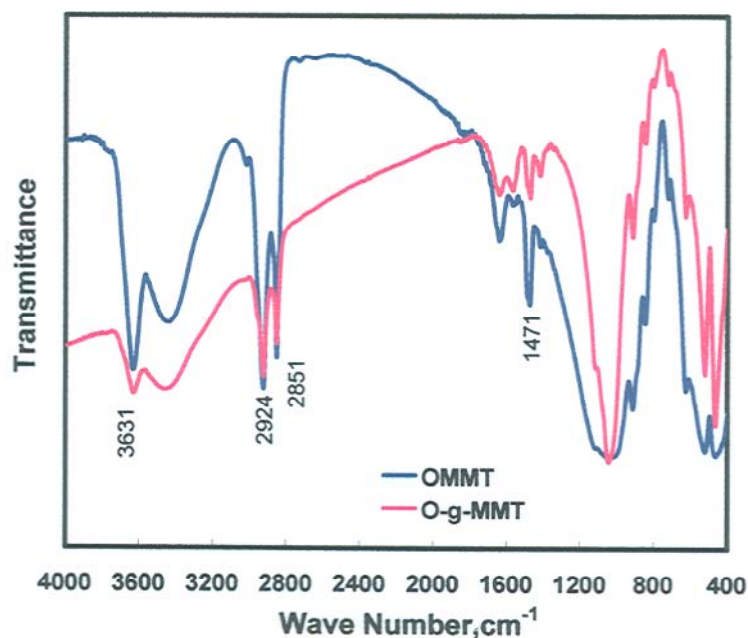
ตอนที่ 2.3 การศึกษาผลของการต่อกิ่งออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ (O-g-MMT)

4.9 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนต์ที่มีการต่อกิ่ง (O-g-MMT)

ในการศึกษาวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตที่มีการเติมมอนคัมอริลโลไนต์ โดยส่วนใหญ่จะทำการปรับปรุงด้วย เอลคิว แอมโมเนียม (alkyl ammonium) เพื่อที่จะเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตและลดความเป็นขั้วของ OMMT ลง ให้สามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี ถึงแม้ว่างานวิจัยต่างๆ [44] พบว่า OMMT จะมีความเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามแรงกระทำระหว่างทั้งสองเฟสยังคงเป็นแค่แรงแรงแคตอร์วาล์ว [49] งานวิจัยนี้จึงมีการปรับปรุงมอนคัมอริลโลไนต์ผ่านกระบวนการ

แลกเปลี่ยนไอออนด้วย CTAB ก่อน หลังจากนั้นนำ OMMT ที่ได้มาทำการดองด้วยสารคู่ควบ เฮกซะเดคิล ไตรเมทอไซเลน (Hexadecyl trimethoxysilane, HTMS) ซึ่งจะได้สารเสริมแรงใหม่ ซึ่งผู้วิจัยขอใช้คำว่า O-g-MMT สำหรับในส่วนของการวิจัยนี้ผู้วิจัยไม่ได้เพิ่มเวลาในการบดผสม อย่างธรรมชาติบน Two roll mill

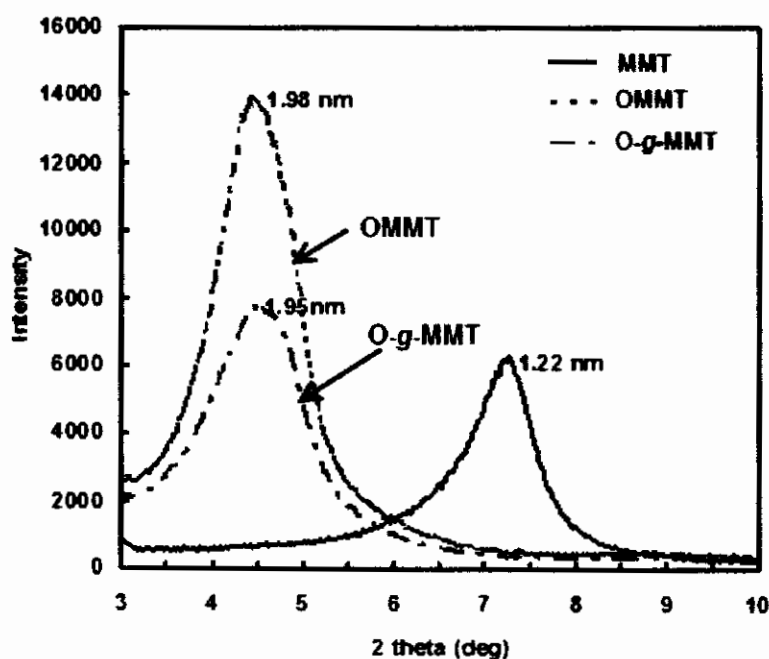
การศึกษาผลของการดอง OMMT นั้นสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FTIR เพื่อตรวจสอบ หมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงหลังจากการดอง จากผลการวิเคราะห์ O-g-MMT ด้วยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมที่ได้จาก OMMT และ O-g-MMT นั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยสเปกตรัมส่วนแรกเป็นการแสดงเอกลักษณ์ของมอนอเมอร์ไดโนลีน นั่นคือแถบการดูดกลืนที่ 1200 ถึง 1000 cm^{-1} และแถบการดูดกลืนที่ 1045 cm^{-1} เนื่องมาจากการสั่นแบบยืดของ Si-O ของชั้นซิลิเกตที่อยู่ในมอนอเมอร์ไดโนลีน สำหรับแถบการดูดกลืนใหม่ที่เกิดขึ้นที่ 2924 และ 2851 cm^{-1} แสดงการสั่นแบบยืดอย่างไม่สมมาตรของ $-\text{CH}$ และการสั่นแบบยืดอย่างสมมาตรของหมู่ $-\text{CH}_2$ ยืนยันการมีอยู่ของ CTAB และ HTMS บนผิวของเคลย์ นอกจากนี้ยังมีแถบการดูดกลืนใหม่ที่ 1471 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นแบบงอของ $-\text{CH}_2$ ขณะที่ความเข้มของแถบการดูดกลืนหมู่ $-\text{OH}$ ใน O-g-MMT ที่ 3631 cm^{-1} ลดลง ซึ่งอาจเป็นเหตุผลเนื่องมาจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของไซเลน และหมู่ $-\text{OH}$ บนผิวของเคลย์ [49]



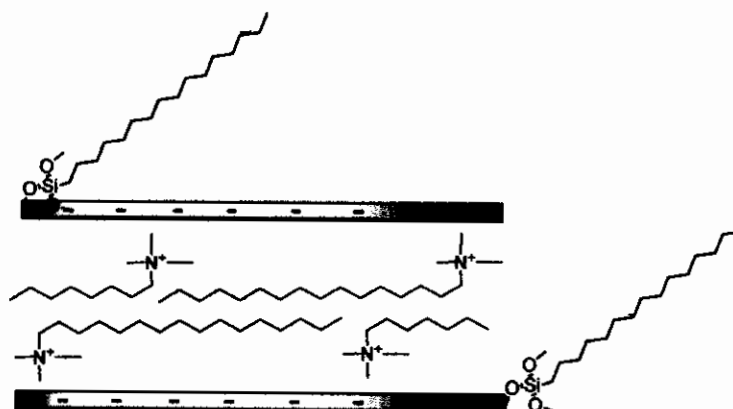
รูปที่ 4.32 กราฟ FTIR ของ MMT, OMMT และ O-g-MMT

การศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตสามารถศึกษาได้จากเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.33 แสดงผลการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของ MMT, OMMT และ O-g-MMT ในช่วง $2\theta = 3-10^\circ$

จากการคำนวณผ่านสมการ Bragg's law จะได้ค่า 1.22, 1.98 และ 1.95 นาโนเมตร ซึ่งแสดงระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT, OMMT และ O-g-MMT ตามลำดับ นั่นคือการต่อกิ่งด้วย HTMS ใน OMMT นั้นไม่ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ดังแสดงผลของการต่อกิ่งในแบบจำลองที่ 4.34 เนื่องจากหมู่ -OH ของมอนอเมอร์ไฮโดรเจนโดยส่วนใหญ่จะอยู่ที่บริเวณด้านข้างของชั้นซิลิเกต [18] ดังนั้นการต่อกิ่งของไฮเลน จึงนำเกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 4.33 กราฟ XRD ของ MMT, OMMT และ O-g-MMT

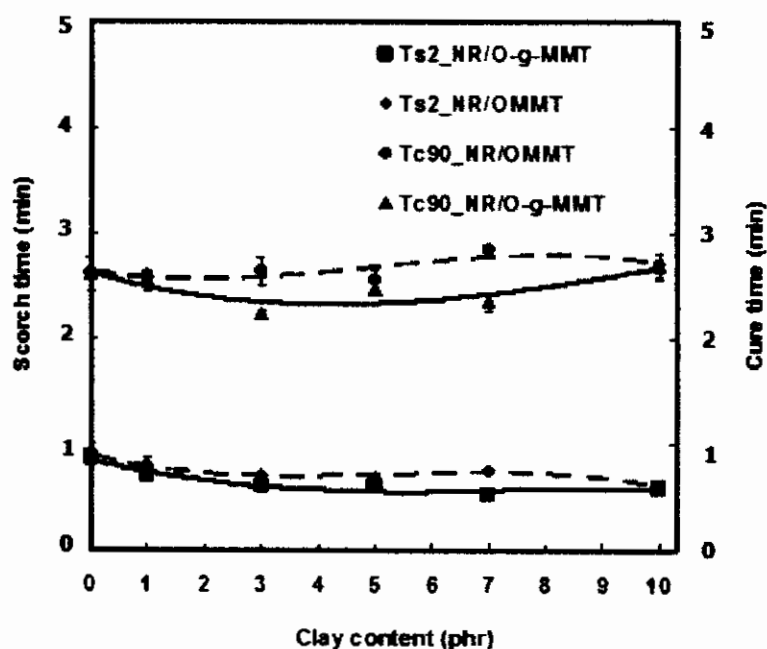


รูปที่ 4.34 แบบจำลองลักษณะการต่อกิ่ง (grafting) ของ HTMS บนผิวของ OMMT

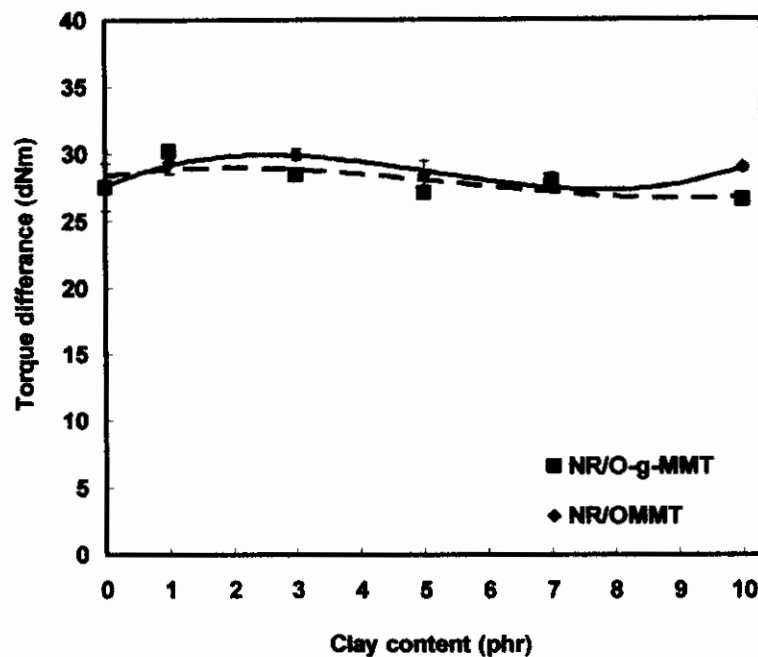
4.10 สมบัติการบ่มของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีการดอ์ก (O-g-MMT)

จากการศึกษาผลของการดอ์ก OMMT โดยทดสอบสมบัติการบ่มของสารประกอบยาง จากรูปที่ 4.35 แสดงผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของสารประกอบยางผสม พบว่าการเติม O-g-MMT ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูป เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเติม OMMT

สำหรับค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (ΔS) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.36 พบว่าการเติม O-g-MMT ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ΔS เมื่อเทียบกับผลของการเติม OMMT จากการศึกษาของ M.A. Lo'pez-Manchado และคณะ [40] พบว่าค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (ΔS) สัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง นั่นคือการใช้ O-g-MMT ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพันธะ อาจจะเป็นเพราะเวลาในการให้แรงเฉือนไม่เพียงพอต่อการทำให้ O-g-MMT เกิดการกระจายตัวที่ดีได้ ทำให้การดอ์กไม่ส่งผลต่อสมบัติการบ่มของสารประกอบยาง



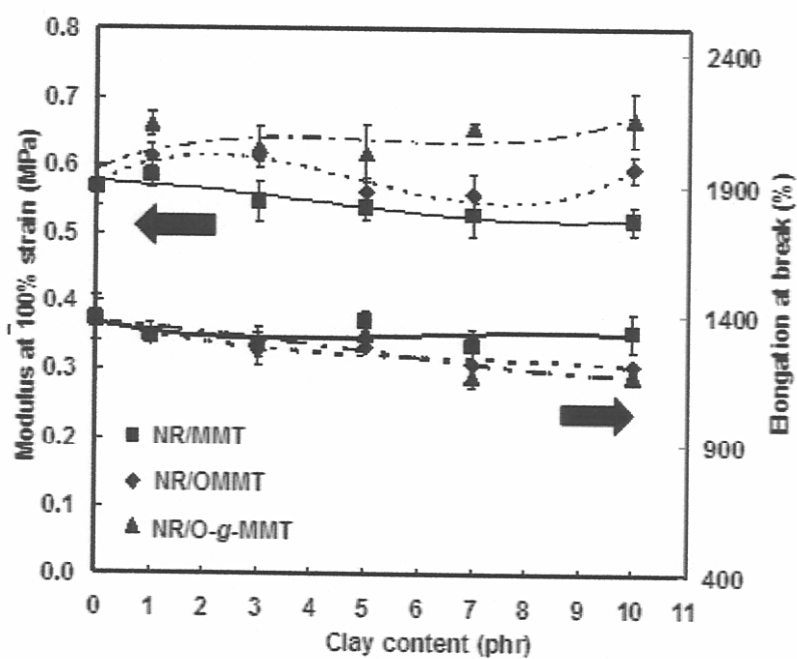
รูปที่ 4.35 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อเวลาสกอร์ชและเวลาในการคงรูปของสารประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์



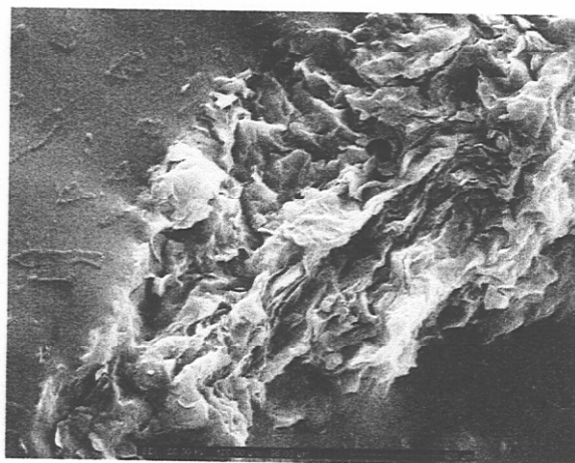
รูปที่ 4.36 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อค่าความแตกต่างระหว่างแรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุด (ΔS) ของสารประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมมอนอเมอร์อีไธน

4.11 สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและอีไธนมอนอเมอร์อีไธนที่มีการเติม O-g-MMT

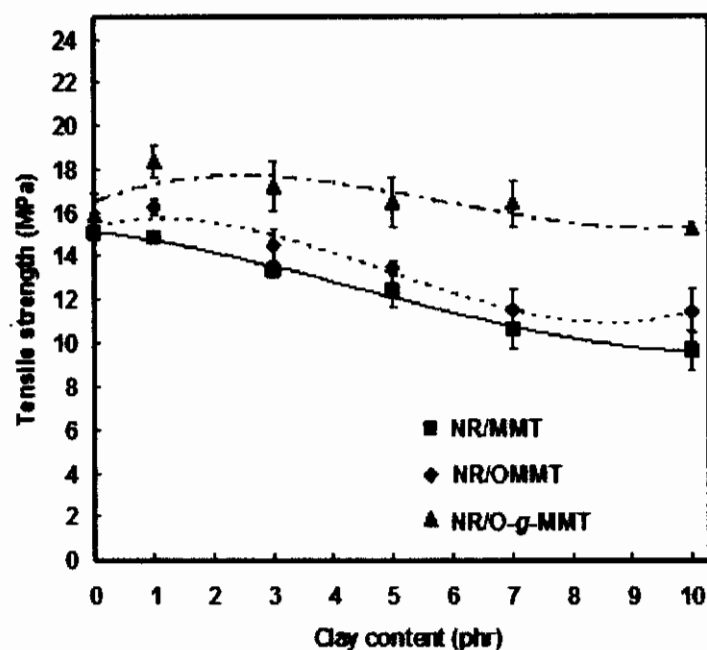
การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติที่มีการเติมมอนอเมอร์อีไธนที่มีการเติม O-g-MMT และ OMMT ที่เวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติเท่ากัน แสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.37 - 4.41 เมื่อพิจารณาสมบัติการดึงยืดของวัสดุ จากรูปที่ 4.37 แสดงผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อมอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์อีไธน พบว่าการเติม O-g-MMT ทำให้มอดูลัสของยางคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเติม OMMT เนื่องจากผลของการดักจับมอนอเมอร์อีไธนทำให้มีแรงกระทำระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์อีไธนที่เพิ่มมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นในรูป SEM ที่ 4.38 จะเห็นลักษณะของชั้นฟิล์มเกิดของมอนอเมอร์อีไธนที่มีการเชื่อมติดที่ดีกับยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการเติมปริมาณของ O-g-MMT มากขึ้น ส่งผลให้มอดูลัสของยางคอมพอสิตลดลง เนื่องจากการรวมตัวกันของชั้นฟิล์มเกิด เหมือนดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา



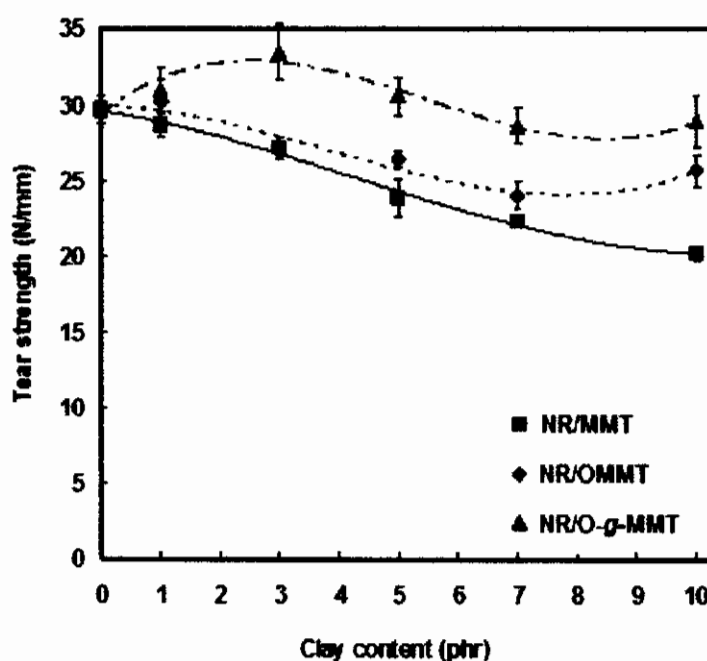
รูปที่ 4.37 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อมอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมบริลโกลไนต์



รูปที่ 4.38 ภาพ SEM ของยางคอมพอสิตที่มีการเติม O-g-MMT 10 phr ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



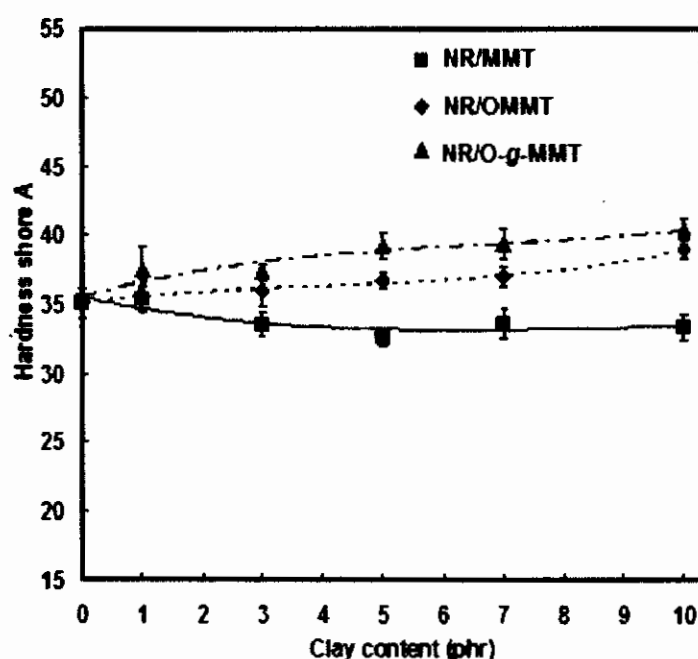
รูปที่ 4.39 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อความต้านทานแรงดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 4.40 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

เมื่อพิจารณาถึงความต้านทานการดึงยึดของยางคอมพอสิตที่มีการเติม O-g-MMT ดังแสดงในรูปที่ 4.39 พบว่าผลของ O-g-MMT ทำให้ยางคอมพอสิตมีความต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลของการเติม OMMT เช่นเดียวกับผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาด ดังรูปที่ 4.40 เนื่องจากผลของสารคู่ควบจะสนับสนุนให้การเชื่อมติดที่ดีขึ้นระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์ลอโนลีน พบเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Qing-Xiu Jia และคณะ [49] ได้ศึกษาผลของการต่อกิ่งมอนอเมอร์ลอโนลีนที่มีต่อยาง SBR พบว่าการต่อกิ่งมอนอเมอร์ลอโนลีนสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยาง SBR เพิ่มขึ้นได้

สำหรับการศึกษาความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.41 พบว่าผลของการเติม O-g-MMT ทำให้ความแข็งของยางคอมพอสิตเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของยางธรรมชาติ และ O-g-MMT มีมากขึ้น สอดคล้องกับค่ามอดูลัสของยางคอมพอสิต

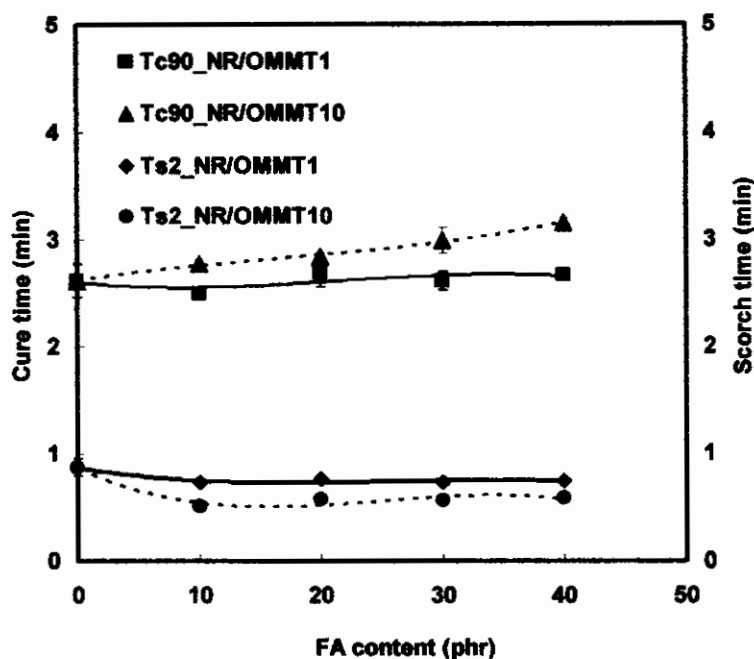


รูปที่ 4.41 ผลของ O-g-MMT และ OMMT ที่มีต่อความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนอเมอร์ลอโนลีน

ตอนที่ 3 การใช้สารตัวเติมแบบกู่ (hybrid filler) ระหว่างมอนคัมอริลโกลีนต์และเถ้าลอยในยางธรรมชาติ

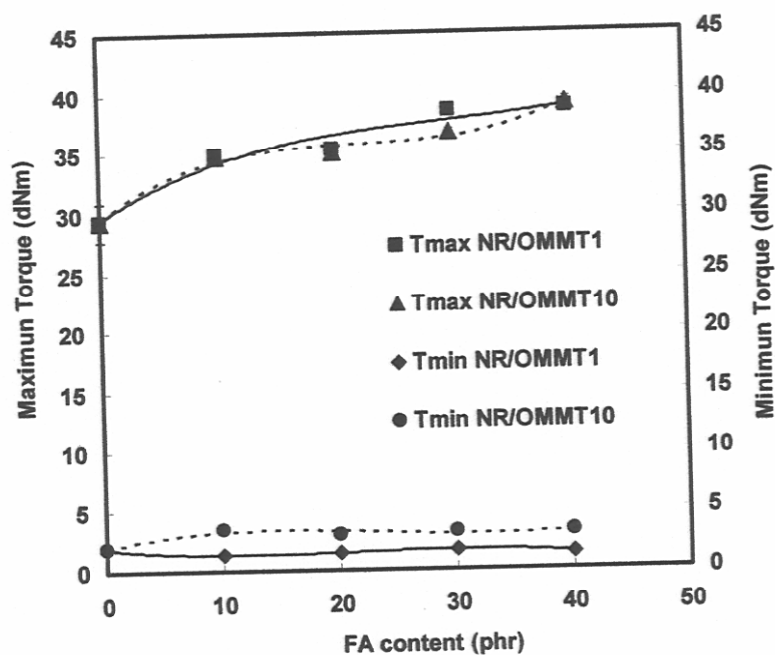
4.12 สมบัติการบ่มสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอริลโกลีนต์

จากงานวิจัยในตอนต้นที่ 1 พบว่า OMMT ที่ 1 phr ให้สมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางคอมพอสิตที่ดีที่สุด จึงนำมาศึกษาต่อร่วมกับเถ้าลอย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของการเติม OMMT ที่ปริมาณที่ 1 และ 10 phr ในวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอย เพื่อศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมแบบกู่ระหว่างมอนคัมอริลโกลีนต์และเถ้าลอย จากรูปที่ 4.42 แสดงอิทธิพลของ OMMT ที่มีต่อเวลาการคงรูปและเวลาสกอร์ชของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอริลโกลีนต์ (NR/OMMT/FA) จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยมากขึ้น เวลาการคงรูปและเวลาสกอร์ชของสารประกอบผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก จากงานวิจัยของศิรินทร ทองแสง และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติ สมภพ [24] พบเช่นเดียวกันว่า การเติมปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นจะไม่ทำให้เวลาในการคงรูปเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวเถ้าลอยไม่หนาแน่นมาก และอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะกลม จึงทำให้อนุภาคเถ้าลอยสามารถกระจายตัวแบบ disperse gel และไม่เกิดอัตรากิริยาระหว่างสารตัวเติมด้วยกันเอง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงการใส่สารตัวเติมแบบกู่ พบว่าการเติม OMMT จะมีผลทำให้เวลาสกอร์ชของยางคอมพาวด์ลดลง ตามปริมาณของ OMMT ที่มากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากหมู่แอมโมเนียมของออร์แกนิกไอออน ซึ่งมีความเป็นเบส [40]

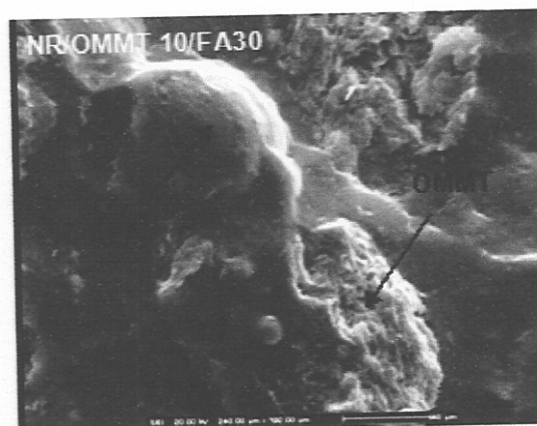
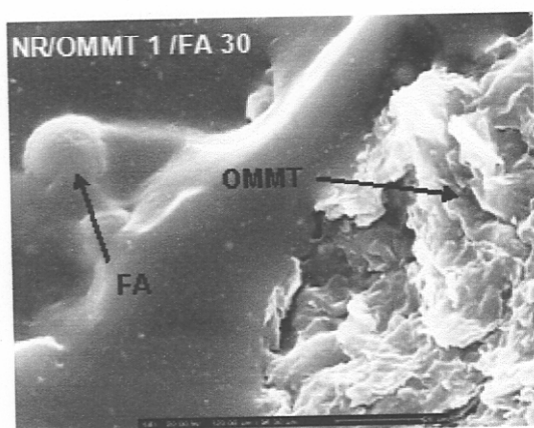


รูปที่ 4.42 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อเวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริลโลไนต์

แรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยที่มีการเติมมอนด์มอร์ริลโลไนต์ สามารถศึกษาได้จากเทคนิค MDR แสดงดังรูปที่ 4.43 เมื่อพิจารณาแรงบิดต่ำสุดของสารประกอบยางผสม ซึ่งแสดงถึงค่าความหนืดของสารประกอบยางที่ทำให้ยางเริ่มไหลตัวในแม่พิมพ์โดยไม่เกิดการคงรูป พบว่าการเติมปริมาณเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดต่ำสุดของสารประกอบยางธรรมชาติ เนื่องจากเถ้าลอยเกิดการกระจายตัวแบบ disperse gel สำหรับแรงบิดสูงสุดของสารประกอบยางที่มีการเติมเถ้าลอยและมอนด์มอร์ริลโลไนต์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย เนื่องจากเถ้าลอยและ OMMT มีความเข้ากันได้ดีกับเฟสของยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 อีกทั้งเถ้าลอยซึ่งมีลักษณะอนุภาคกลมสามารถทำให้ โมเลกุลของยางธรรมชาติไหลได้ง่ายขึ้น ทำให้ OMMT สามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.43 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อแรงบิดสูงสุดและต่ำสุด
ของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์



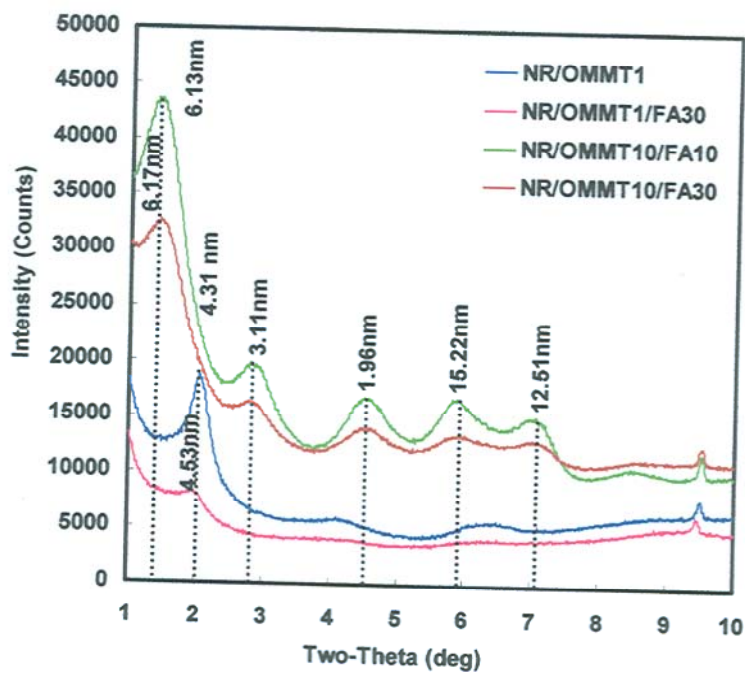
รูปที่ 4.44 ภาพ SEM ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอย
ที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ (x1000)

4.13 สมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์และยางธรรมชาติที่มีการเติมเถ้า ลอยในปริมาณต่างๆ

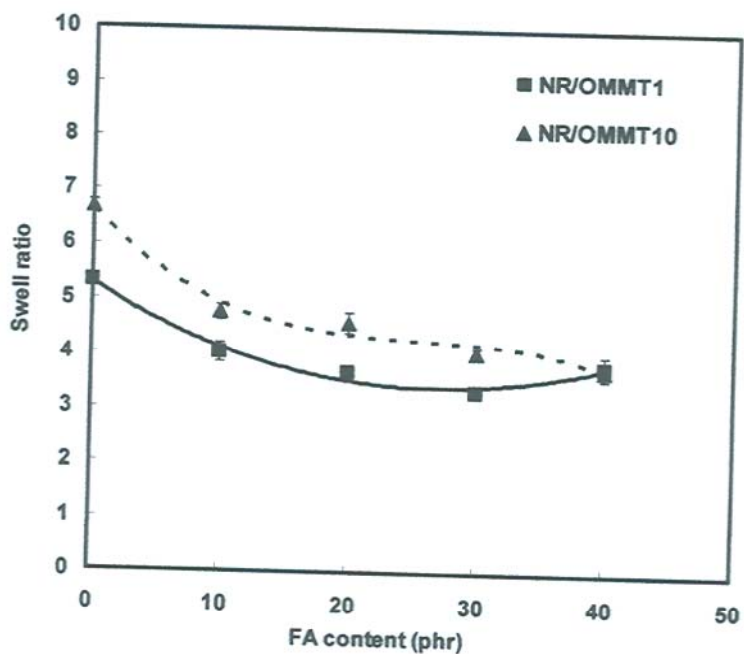
จากการศึกษาของ N. Sombatsompop และคณะ [4] พบว่าการเติมเถ้าลอยในปริมาณที่มาก
ขึ้นในยางธรรมชาติไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดของสารประกอบยาง เนื่องจาก

อนุภาคของเถ้าลอยเป็นสารตัวเดิมที่มีลักษณะกลม ทำให้โมเลกุลของยางสามารถไหลได้ง่าย ดังนั้นวัตถุประสงค์หนึ่งของงานวิจัยนี้คือการใช้เถ้าลอยช่วยการกระจายตัวของ OMMT โดยอาศัยความกลมของอนุภาคเถ้าลอย จากรูปที่ 4.45 แสดงผลจากการทดสอบด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอริตโลไนต์ เพื่อตรวจสอบระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต จากผลการทดลองพบว่า เกิดพีคขึ้นในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 1 ถึง 3° ซึ่งแสดงค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตคือ 4.31, 4.53, 6.13 และ 6.17 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของยางสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นของซิลิเกตได้มากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยซึ่งมีลักษณะอนุภาคกลมจะช่วยทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ง่ายมากขึ้นสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นซิลิเกตได้ง่ายในระหว่างการผลิต ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าการเติม OMMT มากขึ้นเป็น 10 phr นั้น จะส่งผลบางส่วนของชั้นซิลิเกตเกิดการรวมตัวกันสังเกตได้จากมุม 2θ ระหว่าง 4 ถึง 7° แสดงระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตจะมีค่าประมาณ 1.96 1.52 และ 1.25 นาโนเมตร

การศึกษาผลของการบวมตัวของยางคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.46 พบว่าเถ้าลอยไม่ส่งผลต่อค่าการบวมตัวของยาง แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง สอดคล้องกับผลการวิจัยของศิรินทร ทองแสง และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมบัติ [24] สำหรับผลของสารตัวเติมแบบกลุ่มพบว่า การบวมตัวของยางคอมพอสิตที่มีการเติมสารตัวเติมแบบกลุ่มระหว่าง OMMT และเถ้าลอยจะลดลงอย่างมาก เป็นการยืนยันให้เห็นว่าเถ้าลอยสามารถทำให้ OMMT กระจายตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของยางคอมพอสิต อย่างไรก็ตามการบวมตัวของยางคอมพอสิตที่มีการเติมสารตัวเติมแบบกลุ่มจะมีค่ามากกว่าการใช้เถ้าลอยเป็นสารตัวเติมชนิดเดียว เนื่องจากผลของ OMMT ที่มีการบวมตัวได้ดีในสารละลายอินทรีย์ ดังที่ได้กล่าวในตอนที 1



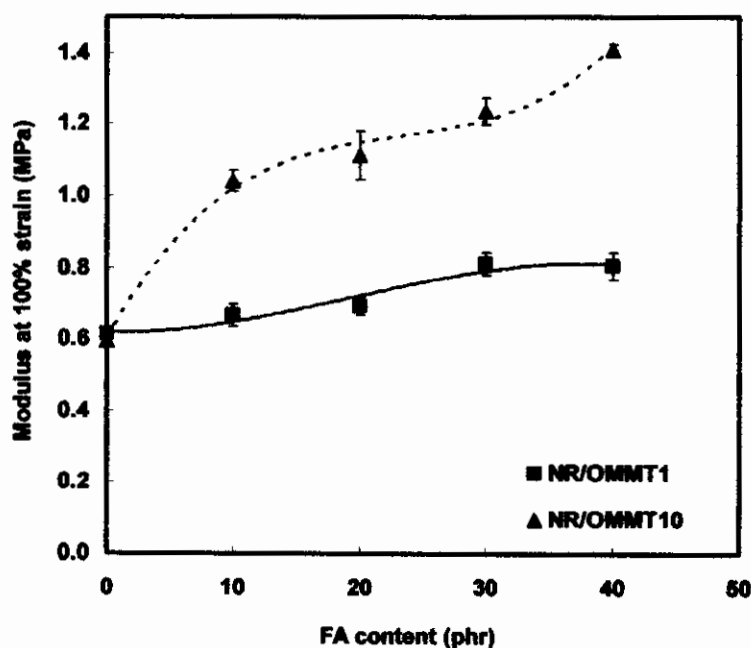
รูปที่ 4.45 ผล XRD ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอย
ที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์



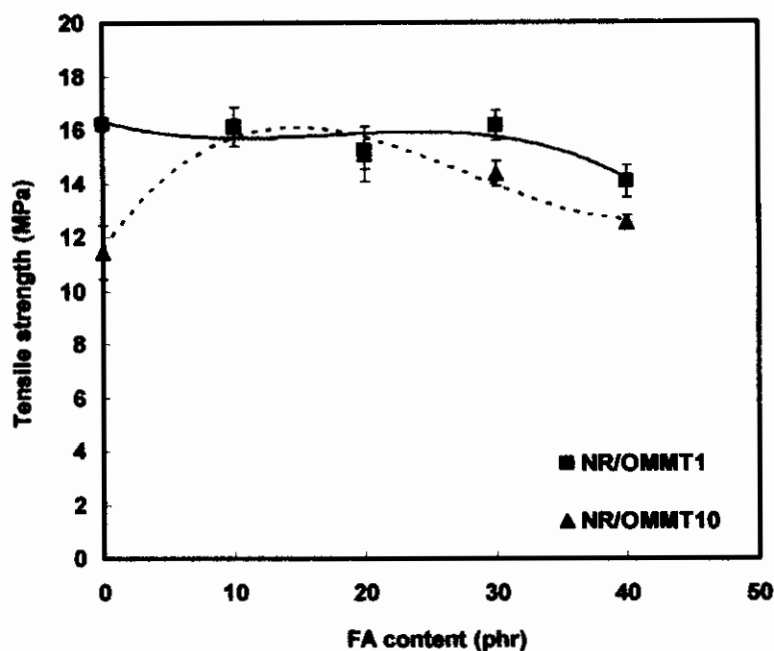
รูปที่ 4.46 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อการบวมตัวของ
วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

4.14 สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอร์ไลโดไนต์

จากงานวิจัยของศิริพร ทองแสง และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [24] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอย พบว่าการเติมเถ้าลอยที่มีการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า มอดูลัสของยางคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าลอย โดยมีค่าเทียบเท่ากับการใช้ซิลิกาเกรดการค้า ขณะที่ความต้านทานแรงดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่จุดขาด พบว่ายางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจะมีแนวโน้มลดลง สำหรับในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาถึงผลของเถ้าลอยและมอนคัมอร์ไลโดไนต์ที่มีต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสม แสดงในรูปที่ 4.47 พบว่าการเติมเถ้าลอยมากขึ้นจะส่งผลให้มอดูลัสมีค่ามากขึ้น เนื่องจากจากซิลิกาในเถ้าลอยมีความแข็งแรงสูง [24] และเถ้าลอยมีความเข้ากันได้ที่ดีกับยางธรรมชาติ เนื่องจากผลของการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 ทำให้วัสดุผสมมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปที่มากขึ้นตามปริมาณเถ้าลอย สำหรับการเติมสารตัวเติมแบบกู่พบว่ามอดูลัสของยางคอมพอสิตอย่างมาก เนื่องจากเถ้าลอยสามารถส่งผลให้ชั้นซิลิกาของมอนคัมอร์ไลโดไนต์สามารถเกิดการกระจายตัวในเมทริกซ์ของยางได้ดีขึ้น จึงทำให้มอดูลัสของการเติมสารตัวเติมแบบกู่ระหว่าง OMMT และเถ้าลอยสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติม OMMT 10 phr



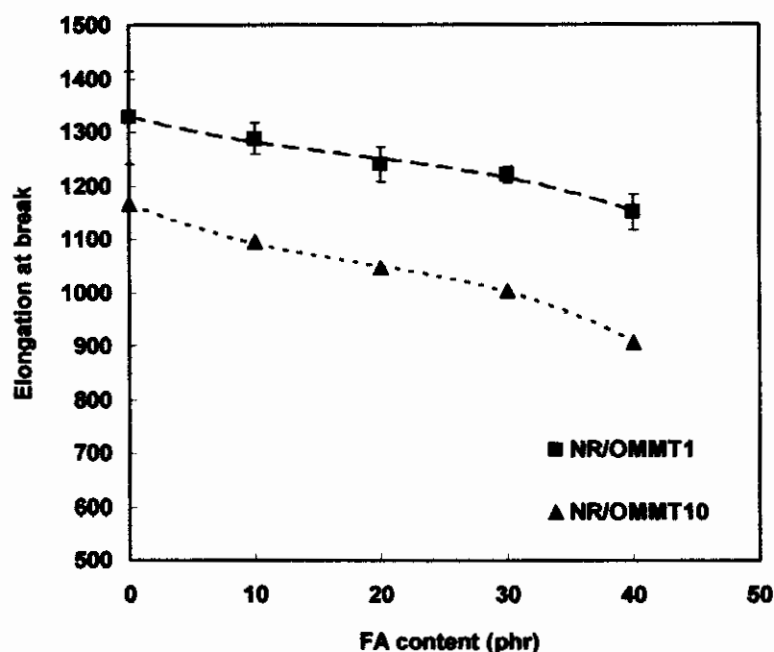
รูปที่ 4.47 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่ามอดูลัสของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอร์ไลโดไนต์



รูปที่ 4.48 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมบอร์ลโกลีนด์

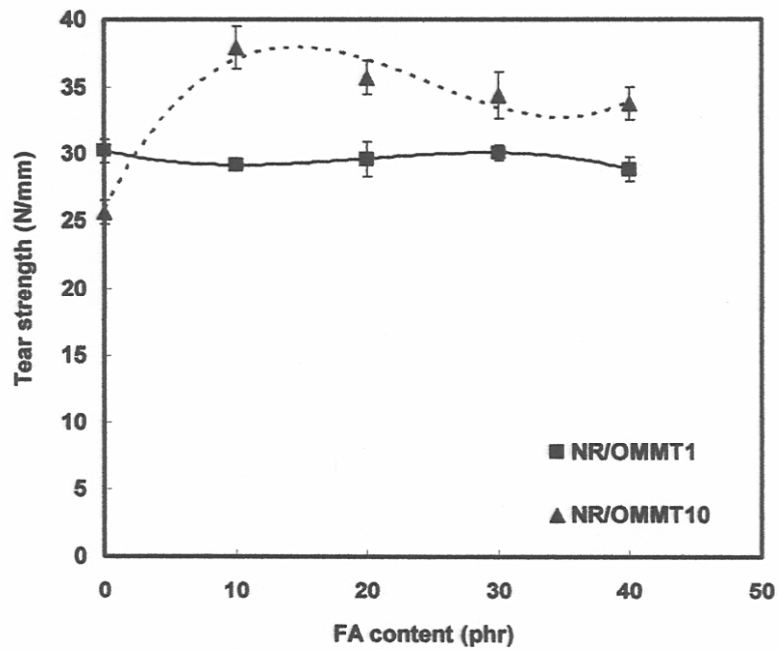
สำหรับผลของเถ้าลอยที่มีต่อความต้านทานแรงดึงยึดของยางคอมพอสิต แสดงดังรูปที่ 4.48 พบว่าเถ้าลอยจะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงยึด เนื่องจากเถ้าลอยไม่มีคุณสมบัติเป็นสารเสริมแรง [4] โดยที่ปริมาณเถ้าลอยตั้งแต่ 10 และ 20 phr จะมีค่าความต้านทานการดึงยึดที่ไม่เปลี่ยนแปลง และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 40 phr เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผสมจะทำให้อนุภาคของเถ้าลอยเกิดการแตกออก ส่งผลให้เถ้าลอยที่อยู่ภายในหลุดออกมา และเนื่องจากเถ้าลอยที่แตกออกมานี้ไม่ได้ถูกปรับปรุงผิว ดังนั้นเถ้าลอยจึงเกิดการกระจายตัวแบบ coherent gel เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวเถ้าลอยจะเกิดแรงกระทำระหว่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.51 เป็นผลทำให้ความต้านทานแรงดึงยึดลดลง ขณะที่ผลการใช้สารตัวเติมแบบคู่ที่ OMMT ปริมาณ 10 phr พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงยึด มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติม OMMT 10 phr ลงในยางธรรมชาติเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำให้ OMMT กระจายตัวได้ดีขึ้นในยาง สำหรับผลของเถ้าลอยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดของยางคอมพอสิต รูปที่ 4.49 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่จุดขาดจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นย่อมทำให้อนุภาคสารตัวเติมใกล้ชิดกันมากขึ้น จนทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลง [24] ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยึด

ที่จุดขาดลดลง จากการทดลองจะสังเกตเห็นว่า วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติม OMMT 10 phr จะมีแนวโน้มการลดลงของเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดอย่างมาก

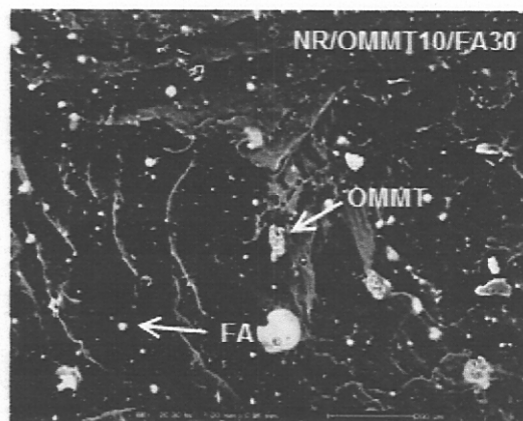


รูปที่ 4.49 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืดที่จุดขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์

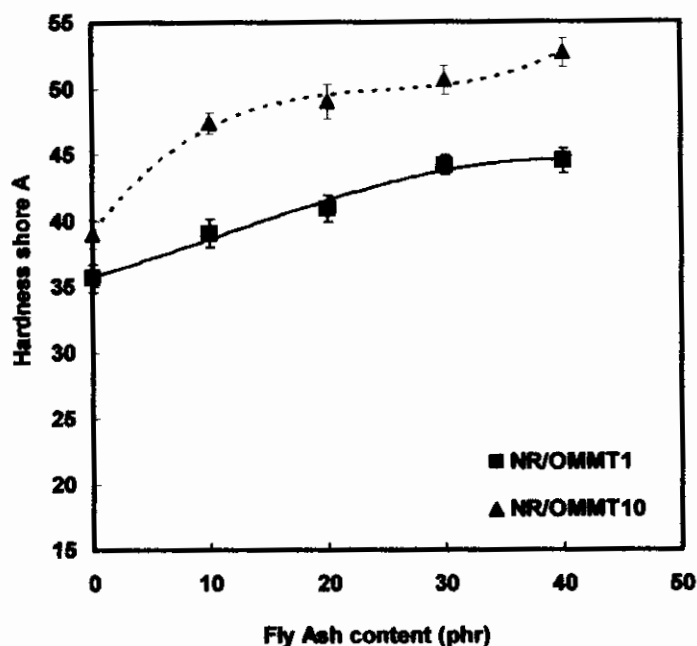
จากงานวิจัยของศิรินทร ทองแสง และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [24] พบว่า ความต้านทานแรงฉีกขาดของยางคอมพอสิตจะลดลงตามปริมาณของเถ้าลอย สอดคล้องกับความต้านทานแรงดึงยืดของวัสดุ สำหรับผลของปริมาณเถ้าลอยที่มีต่อความต้านทานแรงฉีกขาด แสดงในรูปที่ 4.50 พบว่าการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงฉีกขาดลดลงเล็กน้อย เช่นเดียวกับการเติมปริมาณ OMMT ที่ 1 phr ขณะที่การเติมปริมาณ OMMT ที่เพิ่มขึ้นเป็น 10 phr ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานแรงฉีกขาดอย่างมาก เป็นผลมาจากการกระจายตัวของ OMMT ที่ดีขึ้น ซึ่ง OMMT จะทำหน้าที่ขัดขวางการฉีกขาดของยางคอมพอสิตได้ดี



รูปที่ 4.50 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 4.51 ภาพ SEM ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ (x100)



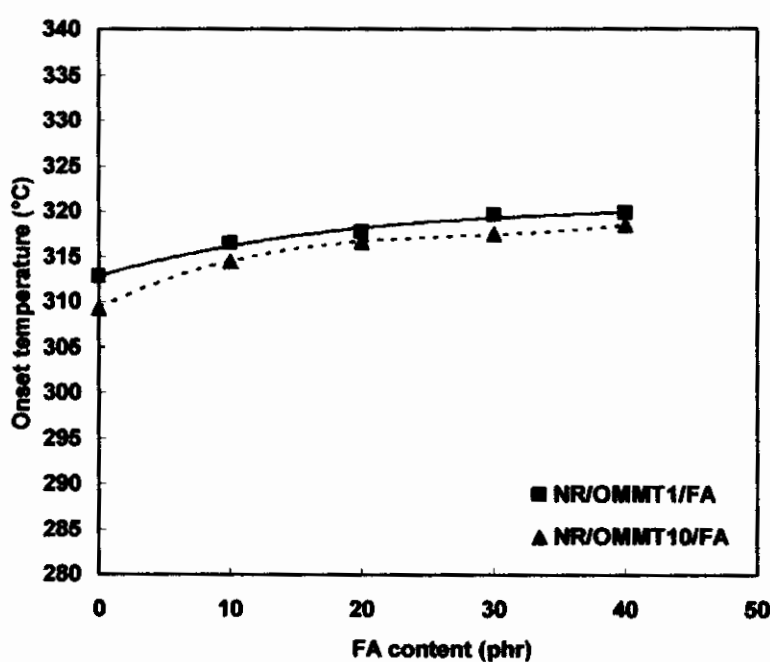
รูปที่ 4.52 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์

สำหรับผลของเถ้าลอยที่มีต่อความแข็งที่ผิวของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ จากการศึกษาของศิรินทร ทองแสง และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ [24] พบว่าความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิตจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเถ้าลอย ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับผลมอดูลัสที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากธรรมชาติของเถ้าลอยซึ่งมีโลหะออกไซด์อยู่มาก จากผลการทดลองความแข็งที่ผิวของยางคอมพอสิต ดังแสดงในรูปที่ 4.52 พบเช่นเดียวกัน คือการเติมเถ้าลอยในยางธรรมชาติมากขึ้น ทำให้ความแข็งที่ผิวของยางเพิ่มมากขึ้นด้วย ในกรณีของการใช้สารตัวเติมแบบกลุ่มพบว่า เถ้าลอยสามารถทำให้ OMMT กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ ความแข็งของยางคอมพอสิตที่มีการเติมสารตัวเติมแบบกลุ่มระหว่างเถ้าลอยและ OMMT ดีขึ้น โดยที่ปริมาณ OMMT 10 phr จะส่งผลต่อความแข็งของยางเป็นอย่างมาก

4.15 สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์

อุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงเถ้าลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงดังรูปที่ 4.53 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการสลายตัว (T_{onset}) พบว่าเมื่อปริมาณของเถ้าลอยเพิ่มมากขึ้น ยางคอมพอสิตจะมีค่า T_{onset} เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเถ้าลอยนั้นมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงเช่นเดียวกับ MMT สำหรับการเติม OMMT จะมีผลต่อเสถียรภาพทาง

ความร้อนของยางคอมพอสิต โดยที่ปริมาณ OMMT ที่ 1 phr จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากธรรมชาติของเคลย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง อย่างไรก็ตามการเติมปริมาณของ OMMT ที่เพิ่มขึ้นเป็น 10 phr ส่งผลให้ T_{onset} ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยมีค่าลดลง เป็นผลมาจาก เกลือเฮลคิว แอม โมเนียม [48] ดังนั้นการที่โมเลกุลของยางทางสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในชั้นของซิลิเกตได้มาก ทำให้เฟสของยางสัมผัสกับเกลือของออร์แกนิกไอออนที่มาก เสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมพอสิตจึงลดลง



รูปที่ 4.53 ผลของเถ้าลอยที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น (T_{onset}) ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริลโตไนต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งส่วนของการทดลองออกเป็น 3 ตอน ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์และผงถ่านลอย ตอนที่สองเป็นการศึกษาอิทธิพลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ โดยแบ่งออกเป็นสามส่วน คือการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+MMT) ที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (OMMT) ซึ่งถูกปรับปรุงผิวด้วยออร์แกนิกแคตไอออน คือ เฮกซะเดซิลไตรเมทิล แอมโมเนียม โบรไมด์ (CTAB) การเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT และการดักกิ่ง (grafting) ออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (O-g-MMT) ตอนสุดท้ายเป็นการศึกษาอิทธิพลของผงถ่านลอยที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถ่านลอย และวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและผงถ่านลอยที่มีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ งานวิจัยนี้สามารถสรุปผลการทดลองต่างๆ ได้ ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาปรับปรุงมอนต์มอริลโลไนต์และผงถ่านลอย

1. การเตรียมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ สามารถถูกเตรียมได้ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ กับ CTAB จากการพิสูจน์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า CTAB สามารถเข้าไปแทรกอยู่ในระหว่างชั้นของซิลิเกตได้ โดยทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.98 นาโนเมตร และมีลักษณะการแทรกของโมเลกุลสารปรับปรุงเป็นแบบ lateral-bilayer จากเดิมมอนต์มอริลโลไนต์มีระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต 1.22 นาโนเมตร

2. การปรับปรุงผิวของถ่านลอยด้วยสารคู่ควบ Si69 จากเทคนิค FTIR พบว่า หมู่แอลคอกซี (alkoxy) ของสารคู่ควบสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวถ่านลอยได้ในสารละลายผสมระหว่างเอทานอลและน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ Si-OH บนพื้นผิวถ่านลอยได้

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางธรรมชาติ

1. การศึกษาเปรียบเทียบผลระหว่าง MMT และ OMMT ที่มีต่อยางคอมพोजิต

1.คุณลักษณะการคงรูปของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่า ทั้ง MMT และ OMMT ให้ผลของเวลาในการคงรูปและเวลาสกออร์ทไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ในช่วง 1 ถึง 10 phr พบว่าให้ผลของเวลาในการคงรูปและเวลาสกออร์ทไม่แตกต่างกัน

2.แรงบิดจากการศึกษาคุณลักษณะการคงรูปของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์พบว่าผลของ OMMT จะให้แรงบิดสูงสุด สูงกว่าผลของ MMT เนื่องจากการเชื่อมติดกันระหว่างเฟสของมอนต์มอริลโลไนต์และยางธรรมชาติที่ไม่ดี และการลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมขวาง และเมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ พบว่าทั้ง MMT และ OMMT ทำให้ค่าแรงบิดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้เกิดการรวมตัวกันของมอนต์มอริลโลไนต์ (agglomerate)

3.ความเข้ากันได้ระหว่างออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์กับยางธรรมชาติมีความเข้ากันได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุง และพบว่าโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นซิลิเกตของออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ได้มากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุง ส่งผลให้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงเกิดการรวมตัวกันอยู่ในเฟสของยางธรรมชาติ

4.สมบัติเชิงกลทั้ง โมดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืด 100 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานแรงดึงยืด ความต้านทานการฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ มีค่าสูงกว่าวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้มีการปรับปรุง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น พบว่าทั้งมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงและออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์จะทำให้วัสดุผสมมีสมบัติเชิงกลที่ลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณการเติมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดคือปริมาณ 1 และ 3 phr

5.สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าการเติมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ โดยเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมไม่เพิ่มตามปริมาณการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในยางธรรมชาติ

2. การศึกษาผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT

1. ผลของการเพิ่มเวลาในการบดผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT พบว่าสมบัติการบ่มของสารประกอบยางผสมมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

2. สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT ที่มีการเพิ่มเวลาในการบดผสม พบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งมอดูลัส ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด และความแข็งที่ผิว เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT ที่ไม่ได้เพิ่มเวลาในการบดผสม เนื่องมาจากการเพิ่มเวลาในการบดผสมจะช่วยทำให้ OMMT สามารถกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีมากขึ้น

3. การศึกษาผลของ O-g-MMT ที่มีต่อยางคอมพอสิต

1. ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ O-g-MMT พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ OMMT อย่างไรก็ตามจากการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR พบว่า สารคู่ควบ HTMS ที่ใช้ในการดอ์ก OMMT สามารถเกิดปฏิกิริยากับผิวของชั้นซิลิเกตได้

2. การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ O-g-MMT พบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งมอดูลัส ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด และความแข็งที่ผิว เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและ OMMT เนื่องมาจาก O-g-MMT มีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติมากขึ้น ส่งผลให้มีแรงกระทำที่ดีระหว่างยางธรรมชาติและ O-g-MMT

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของผงเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนของยางธรรมชาติที่มีการเติมมอนคัมอร์ไลโดไลน์

1. การศึกษาสมบัติการบ่มของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอร์ไลโดไลน์พบว่าเวลาในการคงรูปและเวลาสกอ์ทไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการเติมเถ้าลอยและมอนคัมอร์ไลโดไลน์

2. แรงบิดจากการศึกษาสมบัติการบ่มของสารประกอบผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอร์ไลโดไลน์พบว่า แรงบิดต่ำสุดและแรงบิดสูงสุดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมออร์แกโนมอนคัมอร์ไลโดไลน์ปริมาณ 10 phr ลงในวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอย เนื่องจากผงเถ้าลอยทำให้วัสดุผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น และทำให้มอนคัมอร์ไลโดไลน์สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติได้ดีขึ้น

3. จากการศึกษาความเข้ากันได้ด้วยเทคนิค SEM พบว่ายางธรรมชาติมีความเข้ากันได้ดีกับทั้งออร์แกนอมอนคัมอริลโลไนต์ และผงเถ้าลอยที่มีการปรับปรุงผิว

4. สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยที่มีการเติมมอนคัมอริลโลไนต์ ทั้งมอดูลัส และความต้านทานที่ผิว มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย และความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และสูงที่สุดที่ปริมาณการเติมออร์แกนอมอนคัมอริลโลไนต์ และเถ้าลอยที่ปริมาณ 10 phr ขณะที่ความต้านทานแรงดึงยึดไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารตัวเติม

5. สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์มีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อปริมาณสารเพิ่มเนื้อมากขึ้นวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์มีแนวโน้มเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของมอนคัมอริลโลไนต์พบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนคัมอริลโลไนต์ไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปัญหาในเรื่องของการไม่กระจายตัวของชั้นซิลิเกตของมอนคัมอริลโลไนต์ในเมทริกซ์ของยางธรรมชาติ ซึ่งผู้ดำเนินงานวิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อให้ชั้นซิลิเกตสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของยางให้ดีขึ้น โดยเลือกชนิดของตัวปรับปรุงมอนคัมอริลโลไนต์ให้เหมาะสมกับยางธรรมชาติ เพื่อให้ตัวปรับปรุงเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติและทำให้มอนคัมอริลโลไนต์กระจายตัวในยางธรรมชาติได้ง่ายขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] หน่วยเทคโนโลยียาง, ชนิดของยางและการใช้งาน [ออนไลน์]. วันที่สืบค้น 16 เมษายน 2550.
สืบค้นจาก <http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/NR.htm>
- [2] อาภา สรณเสาวภาคย์, “การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ”, วารสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น 2 (2545) : 3-16.
- [3] Martin L Hall and William R Livingston, “Fly ash quality, past, present and future, and the effect of ash on the development of novel products”, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Vol. 77, (2002), 234-239.
- [4] N. Sombatsompop, S. Thongsang, T. Markpin and E. Wimolmala, “Fly Ash Particles and Precipitated Silica as Fillers in Rubbers. I. Untreated Fillers in Natural Rubber and Styrene Butadiene Rubber Compounds”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 93 (5) (2004), 2199-2130.
- [5] Nabil A. N. Alkadasi, D. G. Hundiware and U. R. Kapadi, “Effect of Coupling Agent on the Mechanical Properties of Fly Ash-Filled Polybutadiene Rubber”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 91 (2004), 1322-1328
- [6] M. Arroyo, M.A. Lo’pez-Manchado and B. Herrero, “Organo-montmorillonite as substitute of carbon black in natural rubber compounds”, Journal of Polymer, Vol. 44 (2003), 2447-2453.
- [7] Sea-Fue Wang, Ming-Liang Lin, Yaw-Nan Shieh, Yuh-Ruey Wang and Shea-Jue Wang, “Organic modification of synthesized clay-magadiite”, Journal of Ceramic International, Vol. 33 (2007), 681-685.
- [8] พงษ์ธร แสงอุย, ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2548
- [9] อธิพิณ แจ่มชัด, “เอกสารประกอบการสอนวิชา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง”, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
- [10] Martin L Hall and William R Livingston, “Fly ash quality, past, present and future, and the effect of ash on the development of novel products”, Journal Chemical Technology and Biology, Vol. 77 (2002), 234-239.

- [11] อภา สอนเสาวภาคย์, “การศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนของสารซิลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยหรือเถ้าแกลบ”, วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น 2, ฉบับพิเศษ (2545) 21-25
- [12] หน่วยงานสารสนเทศ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ, การนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปใช้ประโยชน์[ออนไลน์], วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2550, สืบค้นจาก <http://maemoh.egat.com/index.php>
- [13] พงษ์ธร แซ่ฮุย, การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง [ออนไลน์], วันที่สืบค้น 4 เมษายน 2550 , สืบค้นจาก <http://www.rubbercenter.org/rubbertech/Silica.pdf>
- [14] S. Thongsang and N. Sombatsompop, “Effect of Filler Surface Treatment on Properties of Fly Ash/NR Blends”, The Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference, SPE ANTEC Technical Papers, 1-5 May 2005, Boston USA, 51, 2248-2252.
- [15] S. Thongsang and N. Sombatsompop, “Dynamic Rebound Behaviour of Silica/Natural Rubber Composites: Fly Ash Particles and Precipitated Silica Fillers”, Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics, Vol. 46 (4) (2007), 825-840.
- [16] Suprakas Sinha Ray, Masami Okamoto, “Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing”, Progress in Polymer Science, Vol. 28 (2003), 1539-1641.
- [17] Michael Alexandre, Philippe Dubois, “Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials”, Materials Science and Engineering A, Vol. 28 (2000), 1-63.
- [18] B. Yalcin, M. Cakmak, “The role of plasticizer on the exfoliation and dispersion and fracture behavior of clay particles in PVC matrix: a comprehensive morphological study”, Polymer, Vol. 45 (2004), 6623–6638.
- [19] Hartmut Fischer, “Polymer nanocomposites: from fundamental research to specific applications”, Journal of Materials Science and Engineering C, Vol. 23 (2003), 763–772.
- [20] J. Karger Kocsis, “Thermoset Rubber/Layered Silicate Nanocomposites. Status and Future Trends”, Polymer Engineering and Science, Vol. 44 (6) (2004), 1083-1093.

- [21] D. G. Hundiware, U. R. Kapadi, M. C. Desai and S. H. Bidkar, "Mechanical Properties of Natural Rubber Filled with Flyash", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 85 (2002), 995–1001.
- [22] S. Mishra, S. H. Sonawane, N. Badgujar, K. Gurav and D. Patil, "Comparative Study of the Mechanical and Flame-Retarding Properties of Polybutadiene Rubber Filled with Nanoparticles and Fly Ash", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 96 (2005), 6–9.
- [23] S. Thongsang and N. Sombatsompop, "Effect of NaOH and Si69 Treatments on the Properties of Fly Ash Filled NR Composites", Polymer Composites, Vol. 27 (1) (2006), 30-40.
- [24] S. Thongsang and N. Sombatsompop, "Reinforcement of Natural Rubber with Fly Ash from Different Local Sources", Suranaree Journal of Science & Technology, Vol. 14 (1) (2007), 77-89.
- [25] A. R. R. Menon, T. A. Sonia and J. D. Sudha, "Studies on Fly-Ash-Filled Natural Rubber Modified with Cardanol Derivatives: Processability, Mechanical Properties, Fracture Morphology, and Thermal Decomposition Characteristics", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 102 (2006), 4801–4808.
- [26] K. Grade, W. J. McGill and C. D. Woolard, "Surface Modification of Fly Ash-Characterisation and Evaluation as Reinforcing Filler in Polyisoprene", Plastic, Rubber and composites, Vol. 28(1) (1999), 1-10
- [27] Da Costa, H.M., Visconte. L. L. Y., Nunes, R. C. R. and Furtado. C. R. G., "The Effect of Coupling Agent and Chemical Treatment on Rice Husk Ash-Filled Natural Rubber Composites", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 76 (2000), 1019-1027.
- [28] Chuayjuljit S., Eiumoh S., and Potiyaraj P., "Using Silica from Rice Husk as a Reinforcing Filler in Natural Rubber", Journal of Scientific Research Chulalongkorn University, Vol. 26 (2001), 127-138.
- [29] Magaraphan R., Thaijaroen W., and Lim-Ochakun R., "Structure and properties of natural rubber and modified montmorillonite nanocomposites", Polymer Chemistry and Technology, Vol. 76 (2003), 406-418.

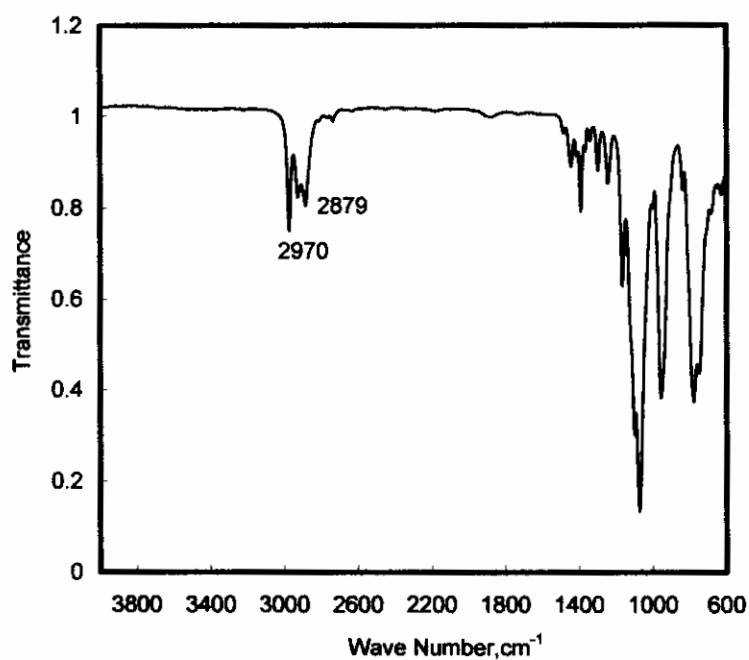
- [30] Teh, P.L., Ishak, Z.A.M., A.S., Karger-Kocsis, J., Ishiaku, U.S. "Effect of expoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites", European Polymer Journal, Vol. 40 (2004), 2513-2521.
- [31] P. Bala, B. K. Samantaray, S. K. Srivastava and G. B. Nando, "Organomodified Montmorillonite as Filler in Natural and Synthetic Rubber", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 92 (2004), 3583-3592.
- [32] Siby Varghese and J. Karger-Kocsis, "Melt-Compounded Natural Rubber Nanocomposites with Pristine and Organophilic Layered Silicates of Natural and Synthetic Origin", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 91 (2004), 813-819.
- [33] K. N. Madhusoodanan and Siby Varghese, "Technological and Processing Properties of Natural Rubber Layered Silicate-Nanocomposites by Melt Intercalation Process", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 102 (2006), 2537-2543.
- [34] Fluka, Laboratory chemicals and Analytical Reagents, 2005.
- [35] Annual Book of ASTM StandardsASTM, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics By Use of Microtensile Specimens", D1708-02, Vol. 08.01 (2005).
- [36] Annual Book of ASTM StandardsASTM, "Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers", D0624-00, Vol. 08.01 (2005).
- [37] Annual Book of ASTM StandardsASTM, "Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness", D2240-97, Vol. 08.01 (2005).
- [38] Weihong Xuea, Hongping Hea, Jianxi Zhua and Peng Yuan, "FTIR investigation of CTAB-Al-montmorillonite complexes", Spectrochimica Acta Part A, Vol. 67 (2007), 1030-1036.
- [39] Yang Yu-Fen, Gai Guo-Sheng, Cai Zhen-Fang and Chen Qing-Ru, "Surface modification of purified fly ash and application in polymer", Journal of Hazardous Materials, Vol. B133 (2006), 276-282.
- [40] M. A. Lo'pez-Manchado, M. Arroyo, B. Herrero and J. Biagiotti, " Vulcanization Kinetics of Natural Rubber-Organoclay Nanocomposites", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 89 (2003), 1-15.

- [41] Lopez-Manchado, M.A., B. Herrero, and M. Arroyo, "Preparation and characterization of organoclay nanocomposites based on natural rubber", Polymer International, Vol. 52 (7) (2003), 1070-1077.
- [42] Pongdhorn Sae-ouia, Chakrit Sirisinha, Kannika Hatthapanit and Uthai Thepsuwan, "Comparison of reinforcing efficiency between Si-69 and Si-264 in an efficient vulcanization system", Polymer Testing, Vol. 24 (2005), 439-446.
- [43] Konstantinos G. Gatos and Jo'zsef Karger-Kocsis, "Effects of primary and quaternary amine intercalants on the organoclay dispersion in a sulfur-cured EPDM rubber", Polymer, Vol. 46 (2005), 3069-3076.
- [44] Yiu-Wing Mai and Zhong-Zhen Yu, 1st. Polymer nanocomposites, England: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [45] Tushar Mandalia, Fai'za Bergaya, "Organo clay mineral-melted polyolefin nanocomposites Effect of surfactant/CEC ratio", Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 67 (2006), 836-845.
- [46] Yiqing Wang, Huifeng Zhang, Youping Wu, Jun Yang, and Liqun Zhang, "Structure and Properties of Strain-Induced Crystallization Rubber-Clay Nanocomposites by Co-coagulating the Rubber Latex and Clay Aqueous Suspension", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 96 (2005), 318-323.
- [47] Jamaliah Sharifa, Wan Md Zin Wan Yunusa, Khairul Zaman Hj. Mohd Dahlanb and Mansor Hj Ahmada, "Preparation and properties of radiation crosslinked natural rubber/clay nanocomposites", Polymer Testing, Vol. 24 (2005), 211-217.
- [48] J.Y. Lee and H.K. Lee, "Characterization of organobentonite used for polymer nanocomposites", Materials Chemistry and Physics, Vol. 85 (2004), 410-415.
- [49] Qing-Xiu Jia, You-Ping Wu, Yi-Qing Wang, Ming Lu and Li-Qun Zhang, "Enhanced interfacial interaction of rubber/clay nanocomposites by a novel two-step method", Composites Science and Technology, (2007).

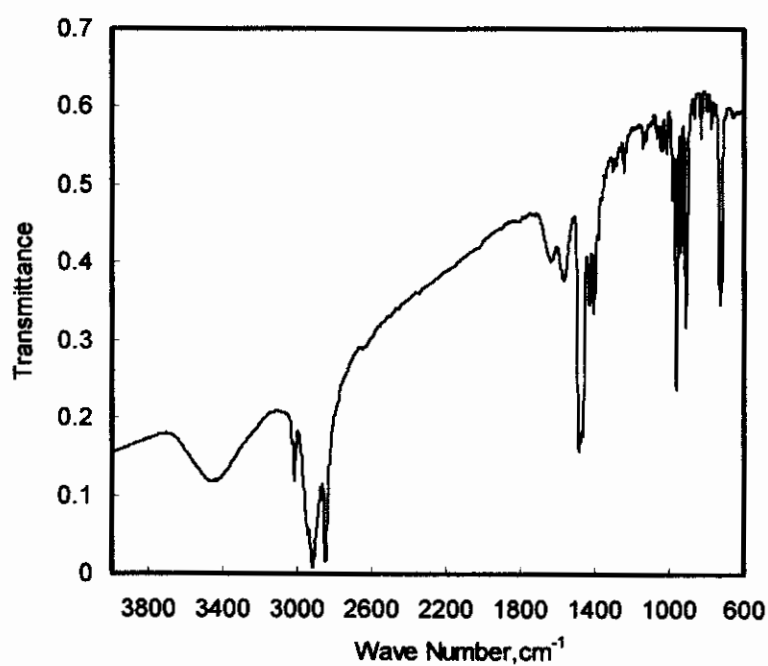
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลองจากเทคนิคต่างๆ

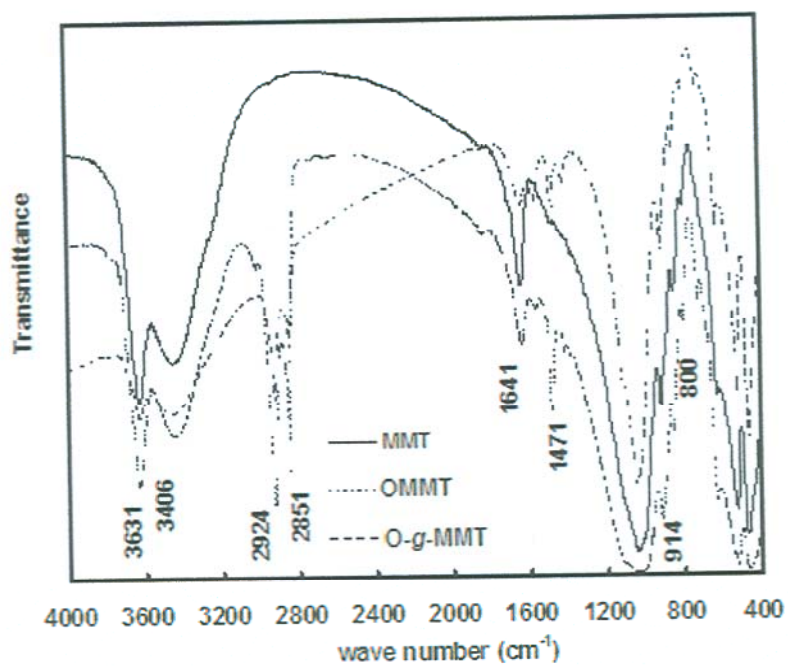
1. กราฟแสดงการตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ ก1 กราฟ FTIR ของ Si-69

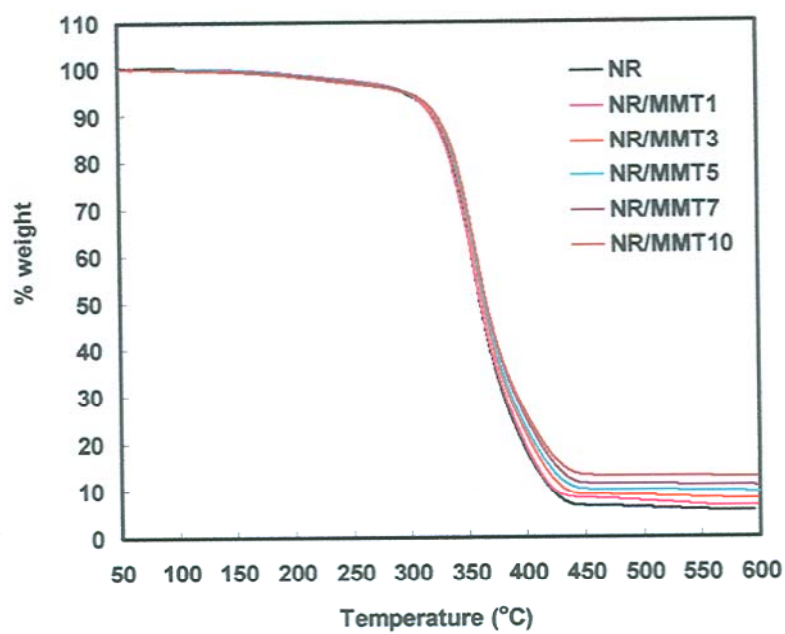


รูปที่ ก2 กราฟ FTIR ของ CTAB

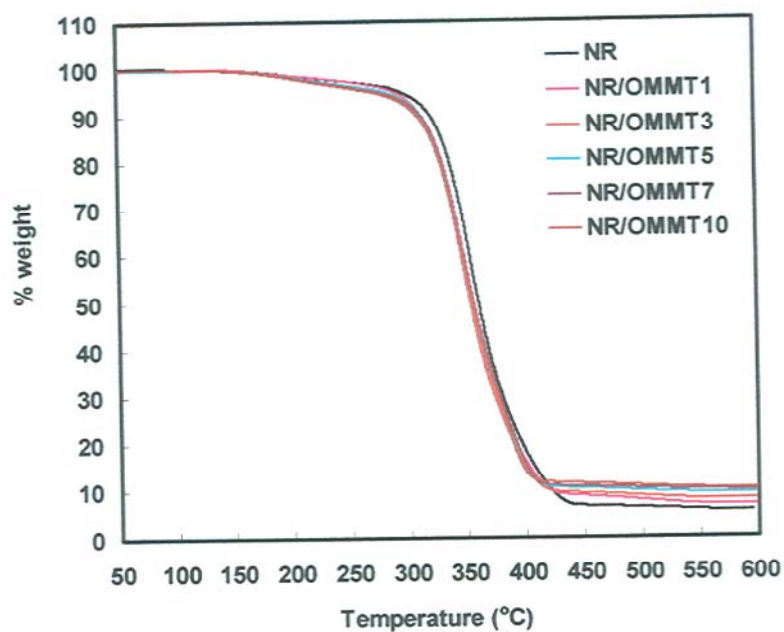


รูปที่ ก3 กราฟ FTIR ของ MMT, OMMT และ O-g-MMT

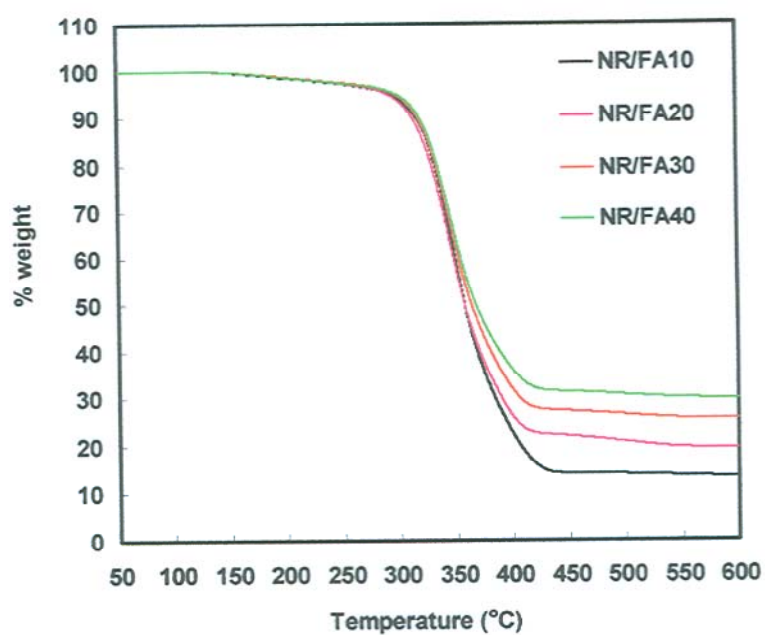
2. กราฟแสดงการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA



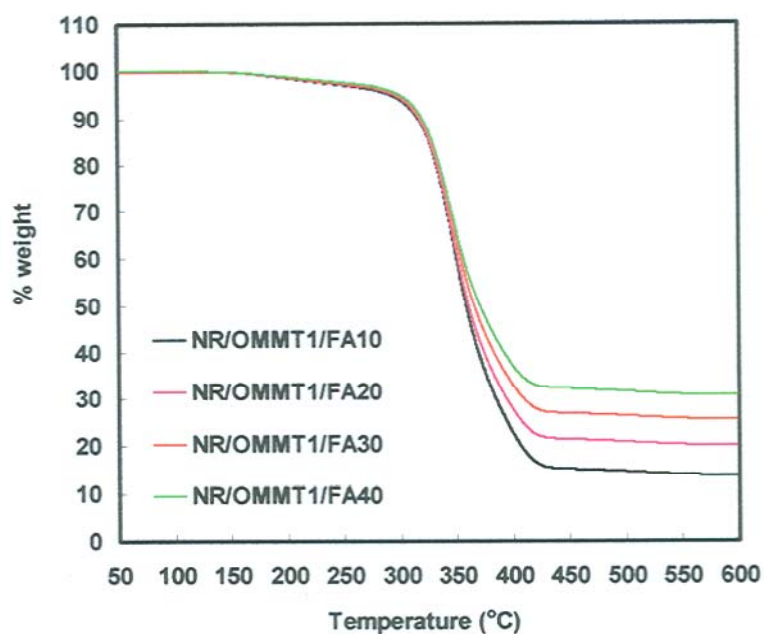
รูปที่ ก4 กราฟ TGA ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์



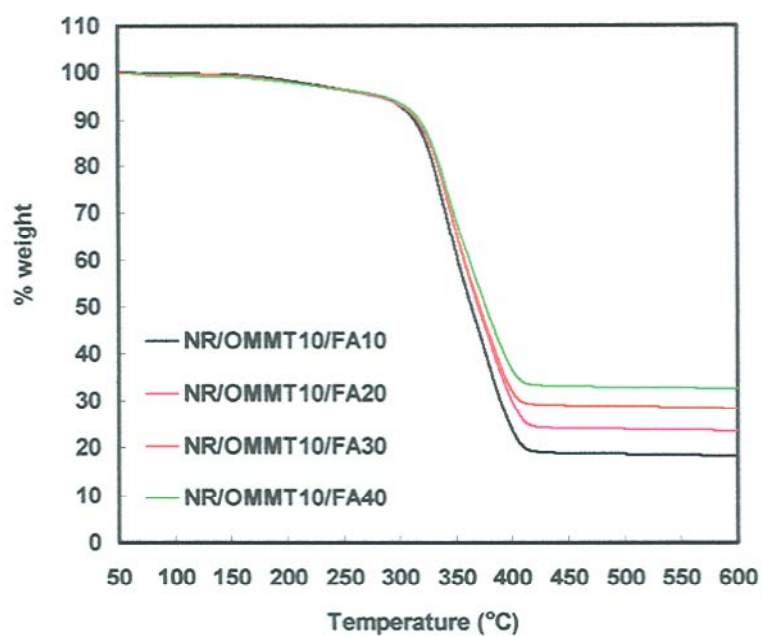
รูปที่ ๕ กราฟ TGA ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกนอมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ ๖ กราฟ TGA ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอย

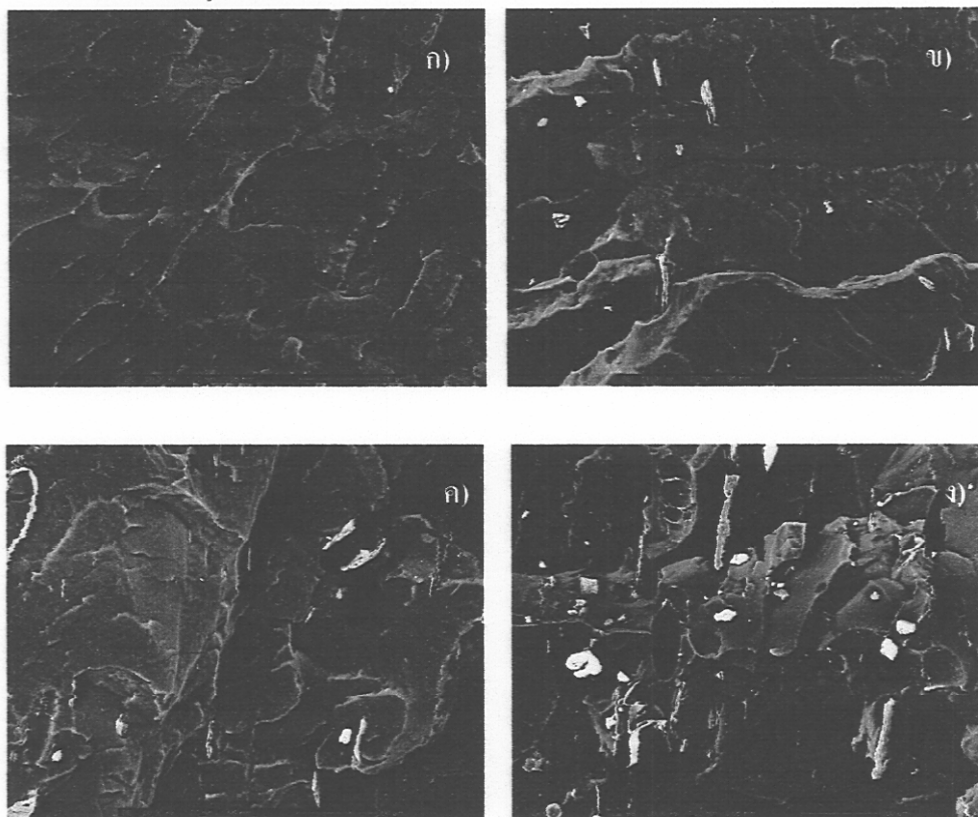


รูปที่ ก7 กราฟ TGA ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยที่มีการเติม
ออร์แกนออคมอร์ลิลโตนั้ปริมาณ 1 phr



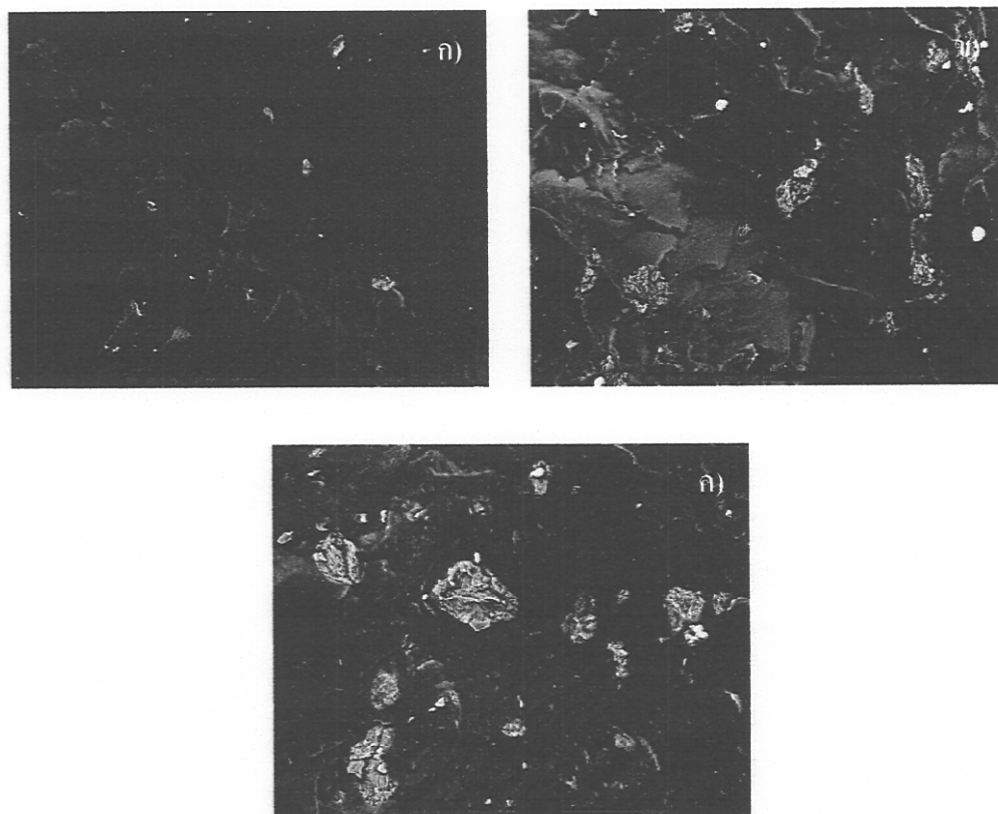
รูปที่ ก8 กราฟ TGA ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและเถ้าลอยที่มีการเติม
ออร์แกนออคมอร์ลิลโตนั้ปริมาณ 10 phr

3. ภาพ SEM ของวัสดุคอมพอสิต



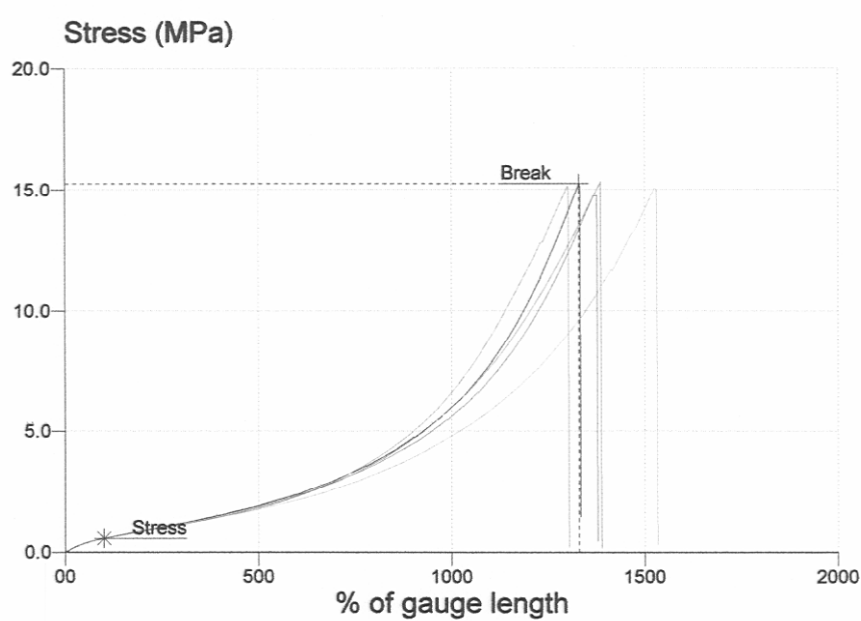
รูปที่ ก9 ภาพ SEM ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอร์ริลโลไนต์ที่ปริมาณ

ก) 0 phr ข) 1 phr ค) 5 phr ง) 10 phr กำลังขยาย 100 เท่า

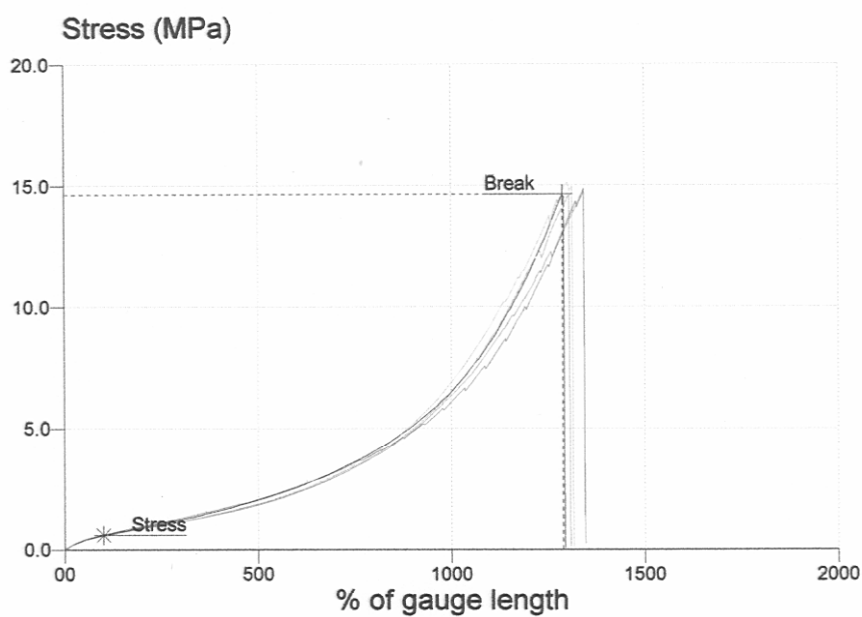


รูปที่ 10 ภาพ SEM ของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและออร์แกนอิมอนต์มอริลโลไนต์
ที่ปริมาณ ก) 1 phr ข) 5 phr ค) 10 phr กำลังขยาย 100 เท่า

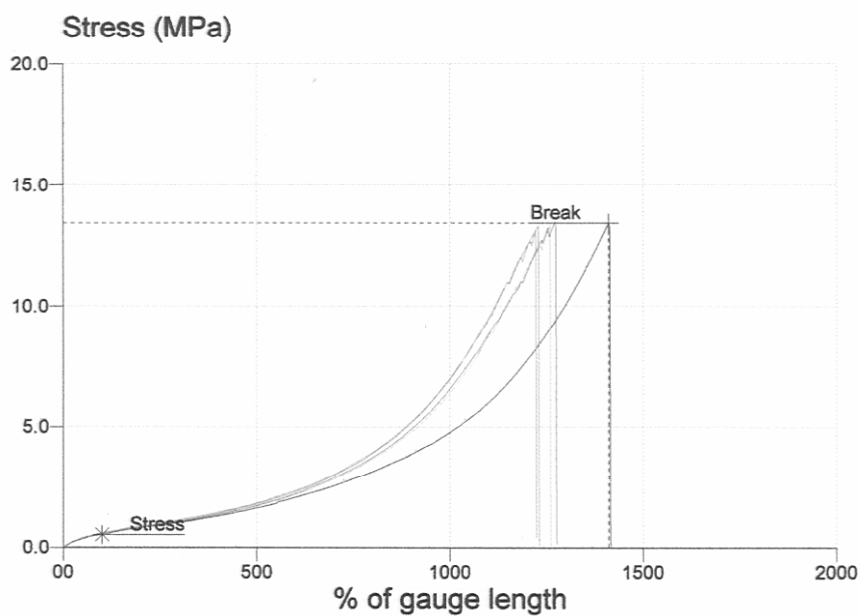
4. กราฟแสดงการทดสอบสมบัติการดึงยืด



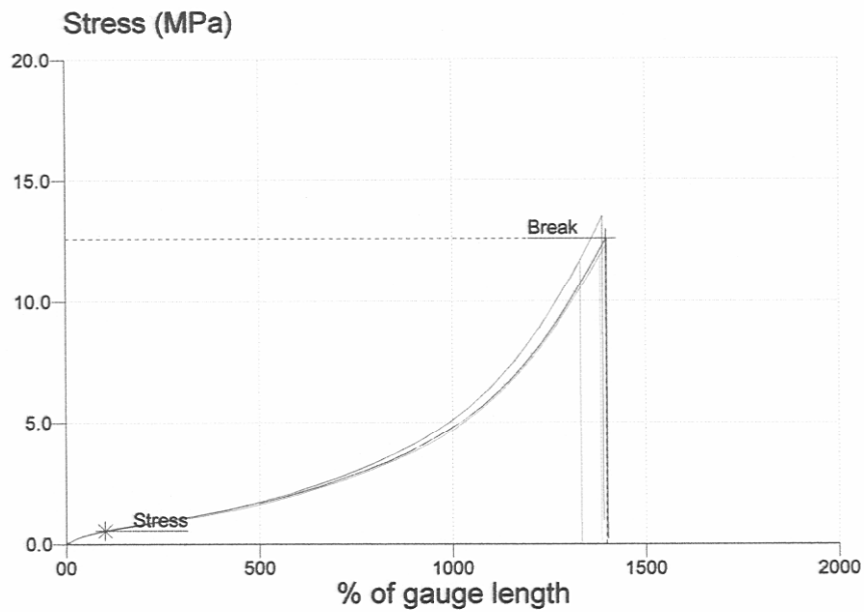
รูปที่ 11 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของยางธรรมชาติวัลคาร์ไนซ์



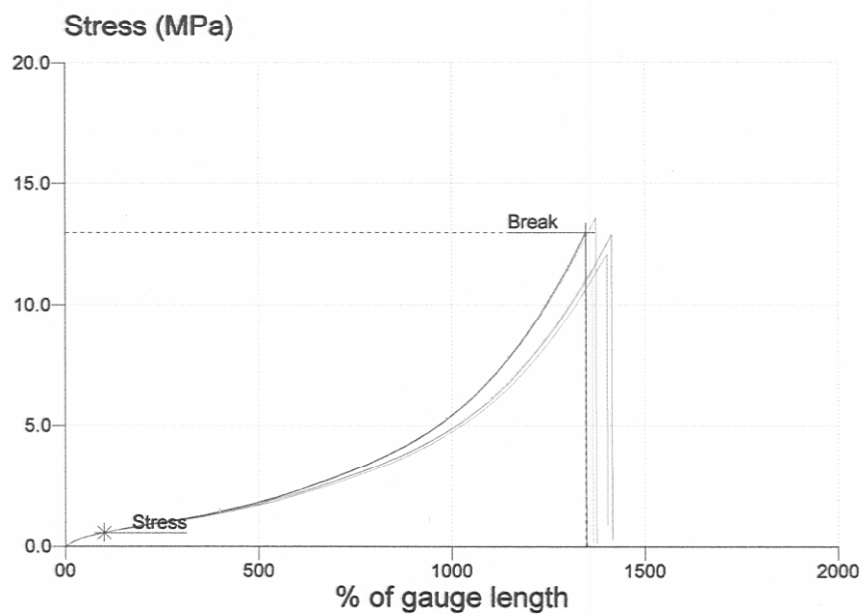
รูปที่ ก12 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



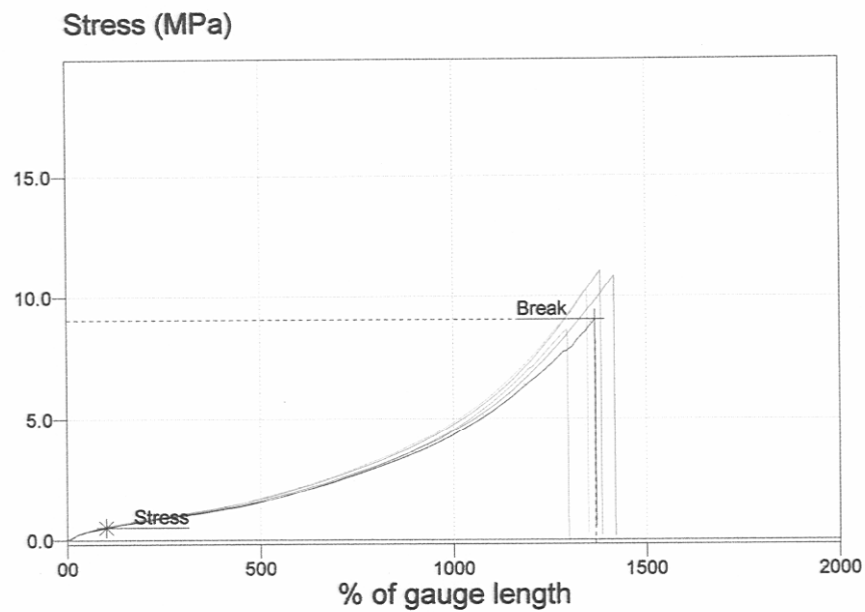
รูปที่ ก13 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 3 phr



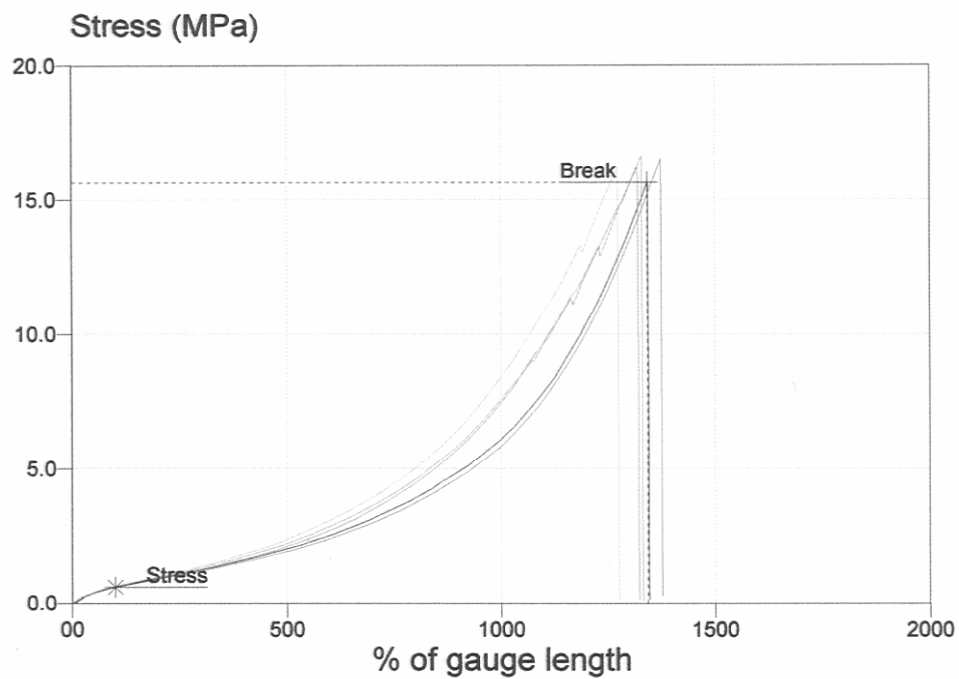
รูปที่ ก14 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 5 phr



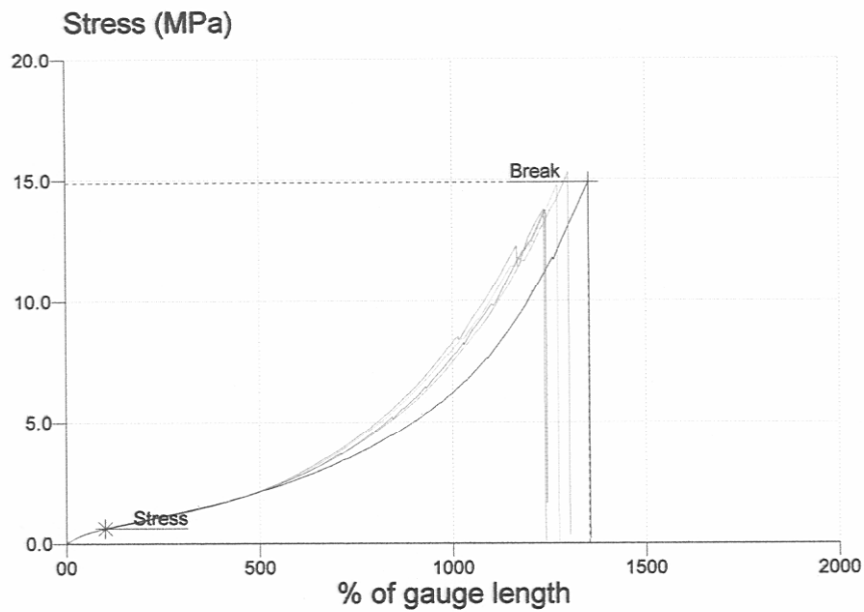
รูปที่ ก15 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 5 phr



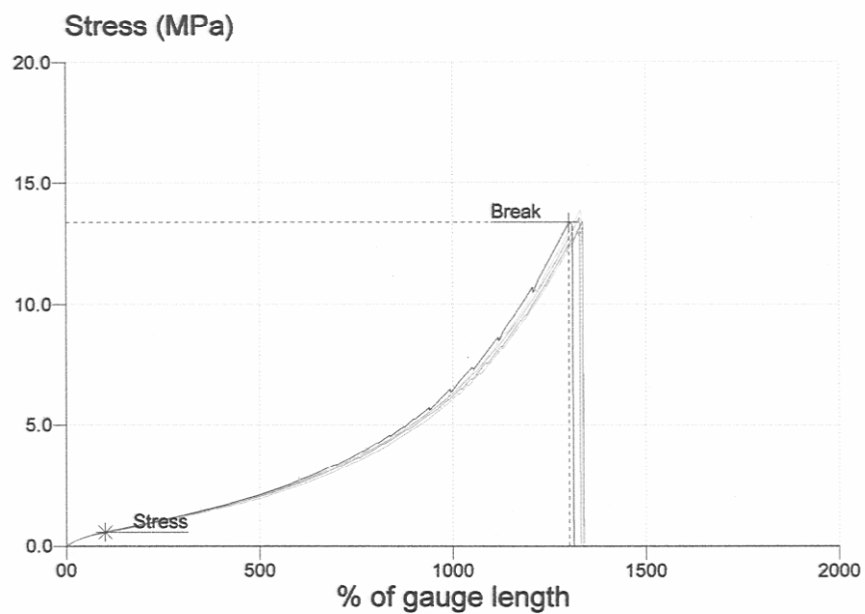
รูปที่ ก16 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนคัมมอร์ลิโกลไนต์ที่ปริมาณ 5 phr



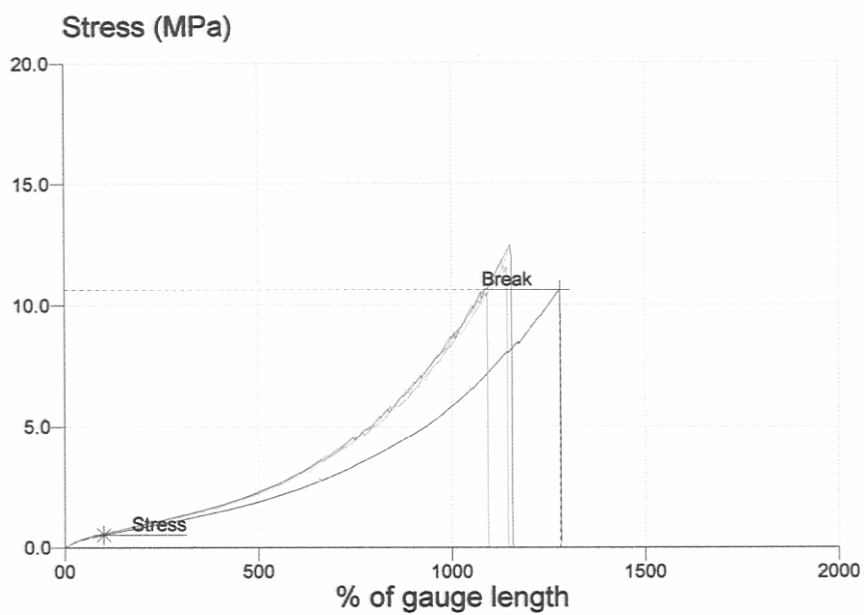
รูปที่ ก17 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกโนมอนคัมมอร์ลิโกลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



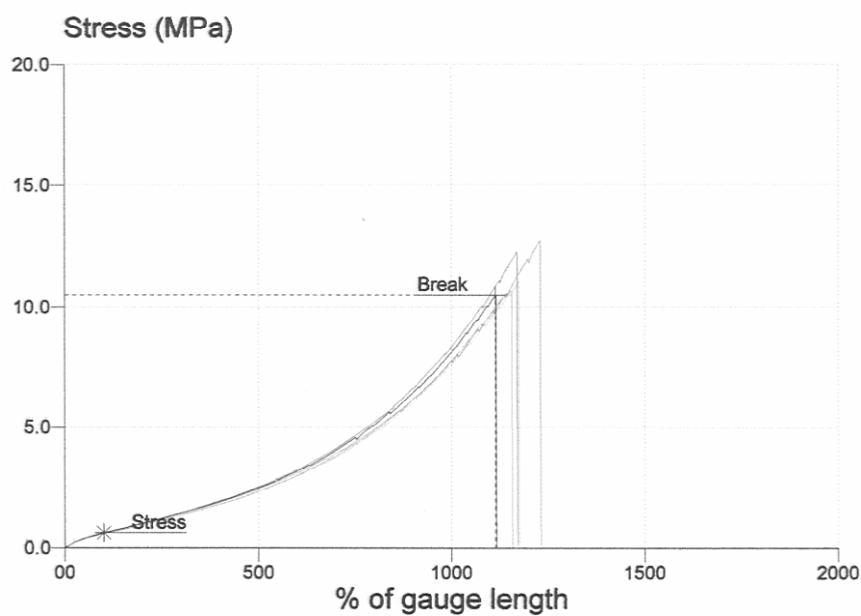
รูปที่ ก18 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนต์มอร์ไลโดไนต์ที่ปริมาณ 3 phr



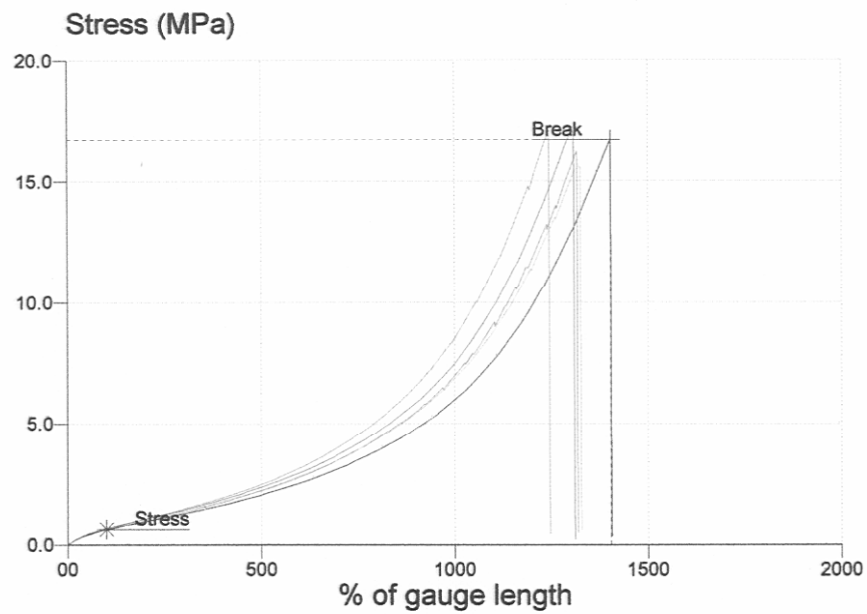
รูปที่ ก19 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนต์มอร์ไลโดไนต์ที่ปริมาณ 5 phr



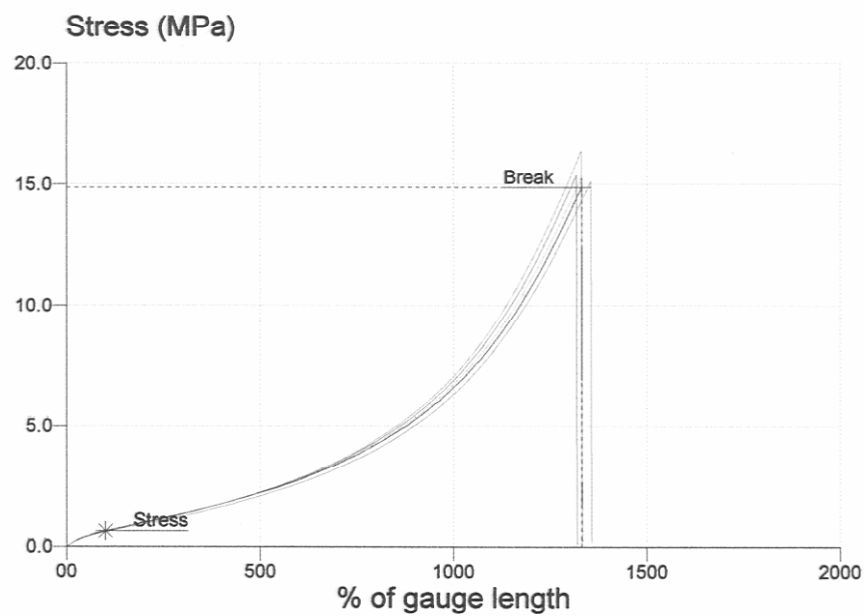
รูปที่ ก20 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนต์มอร์ลิไลไนต์ที่ปริมาณ 7 phr



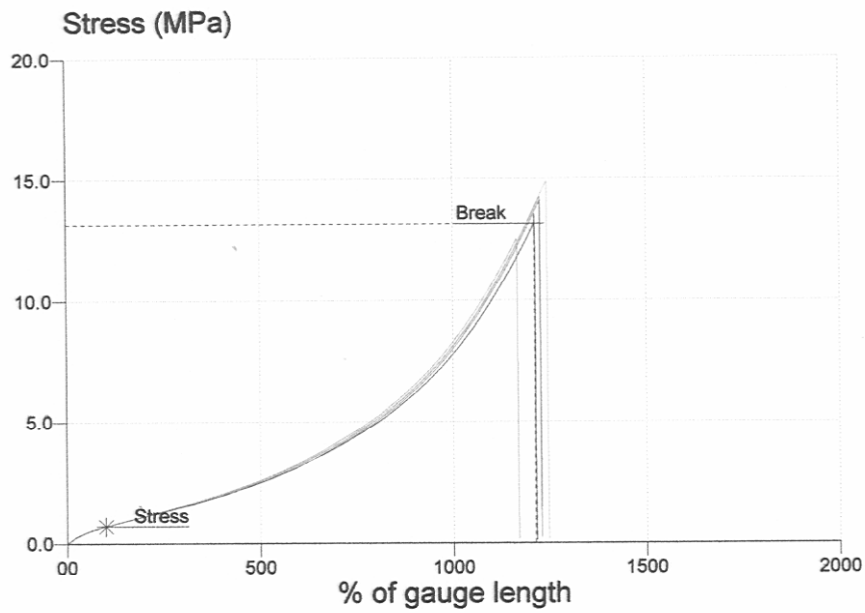
รูปที่ ก21 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนต์มอร์ลิไลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



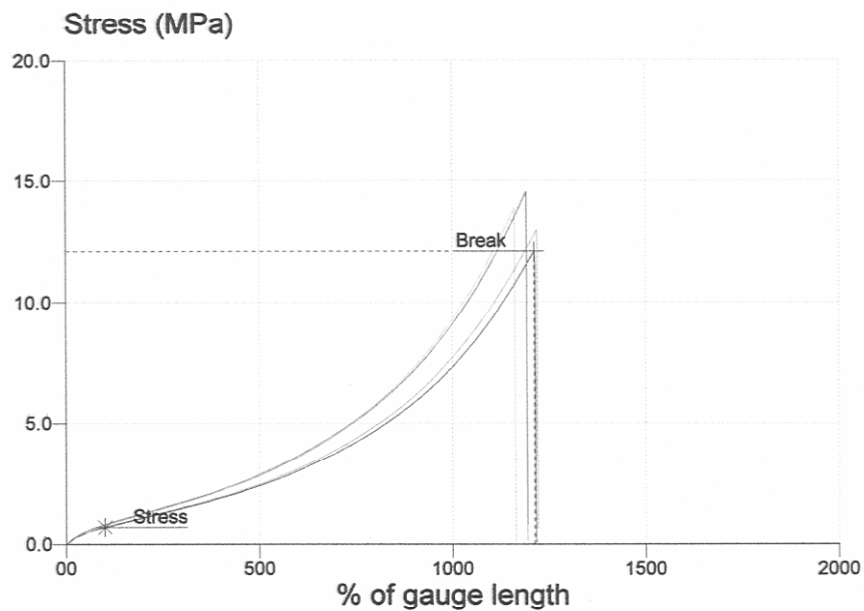
รูปที่ ก22 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 ถั่วลันเตาที่ปริมาณ 10 phr



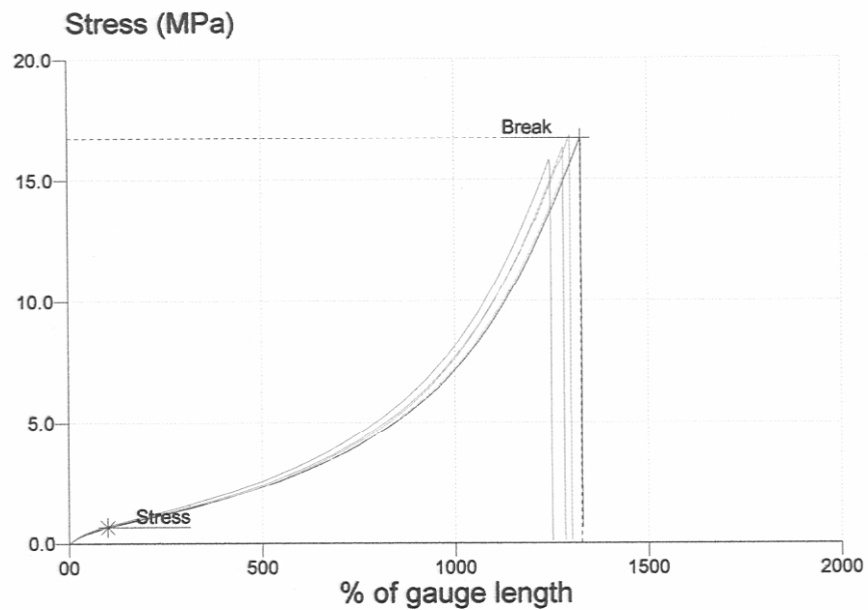
รูปที่ ก23 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 ถั่วลันเตาที่ปริมาณ 20 phr



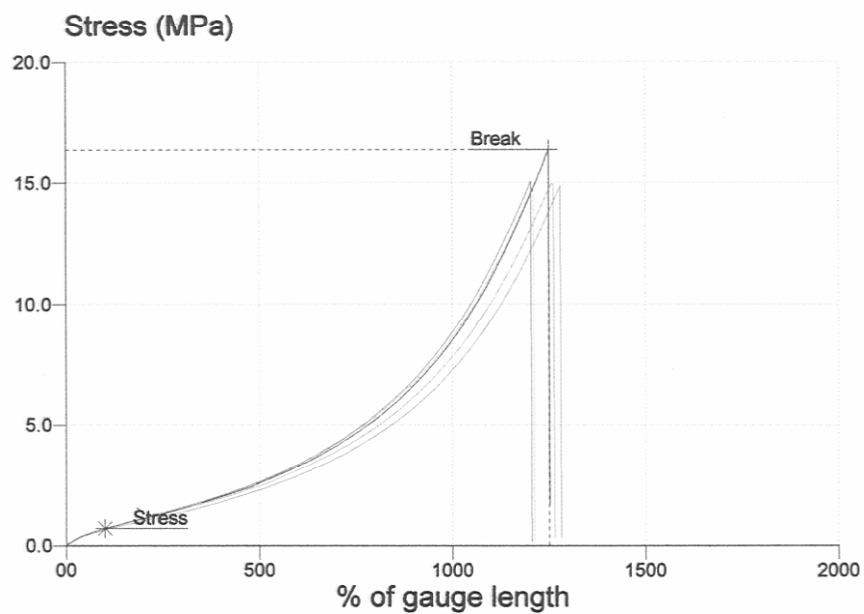
รูปที่ ก24 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 เถ้าถ่านที่ปริมาณ 30 phr



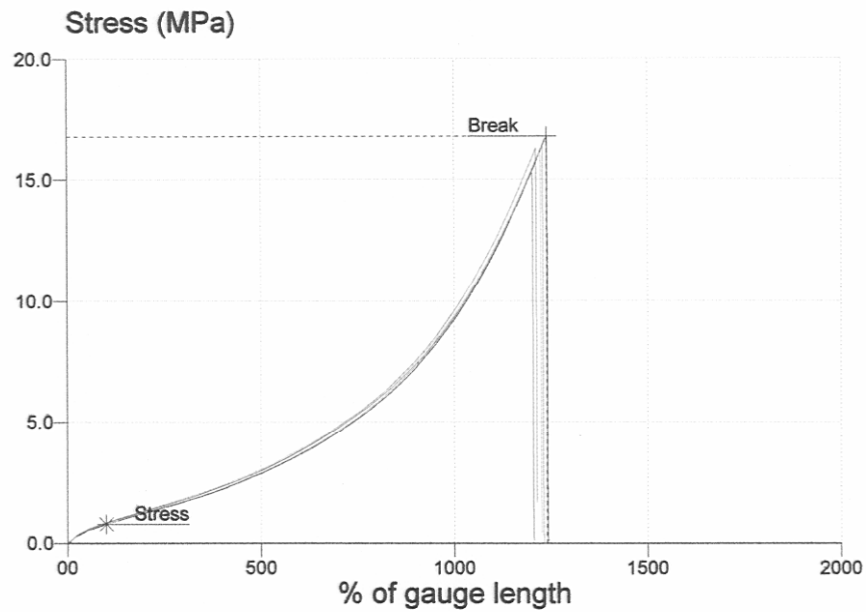
รูปที่ ก25 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 เถ้าถ่านที่ปริมาณ 40 phr



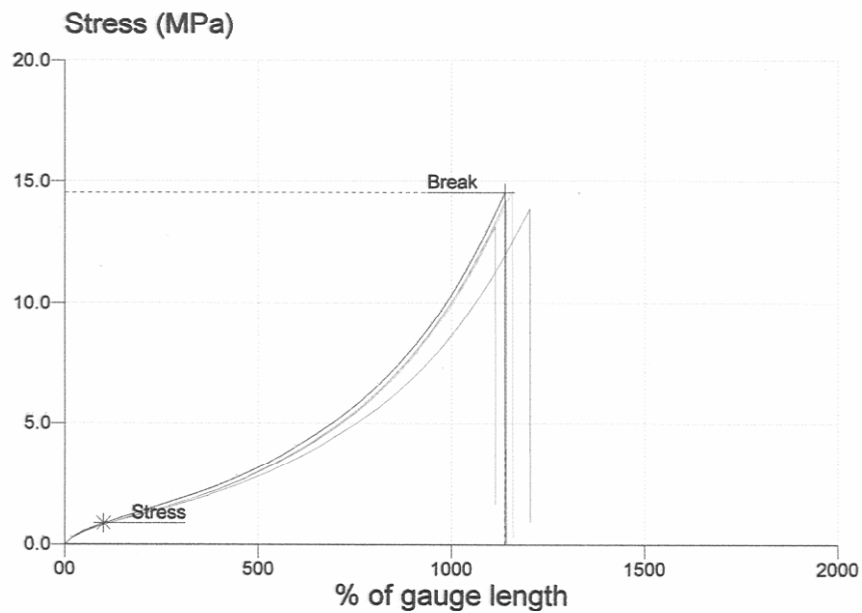
รูปที่ ก26 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 เถ้าลอยที่ปริมาณ 10 phr ที่มีการเติมออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนค์ที่ปริมาณ 1 phr



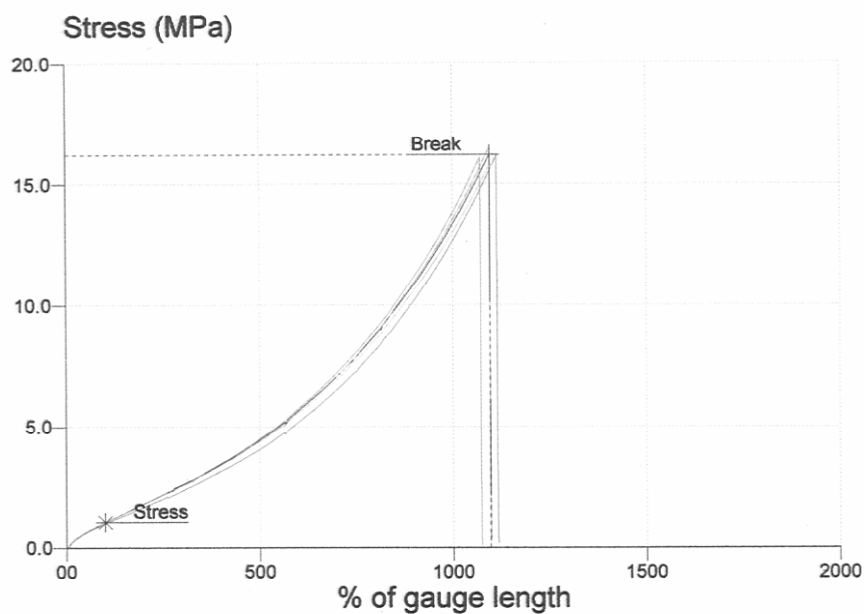
รูปที่ ก27 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยืดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 เถ้าลอยที่ปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมออร์แกโนมอนคัมอริลโลไนค์ที่ปริมาณ 1 phr



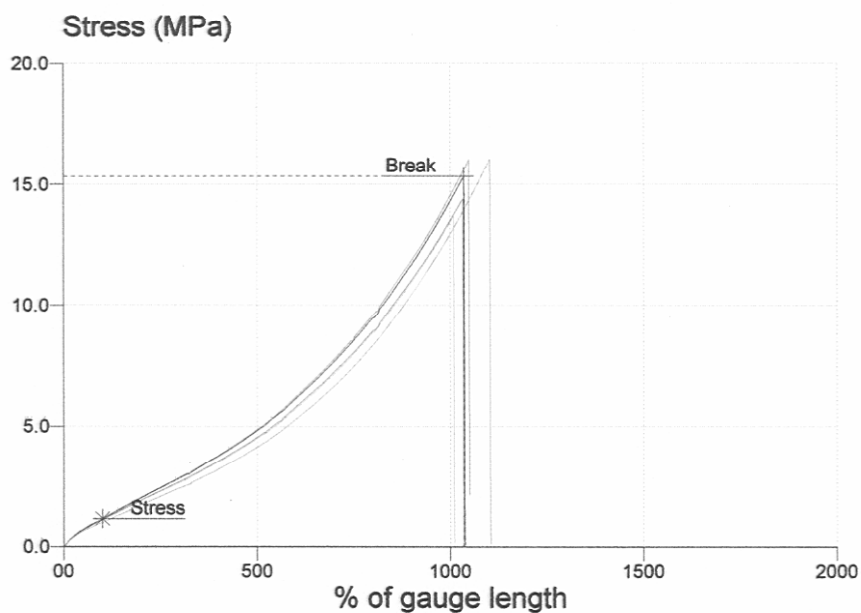
รูปที่ ก28 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 ถั่วลอ่ยที่ปริมาณ 30 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนต์มอร์ริสโกลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



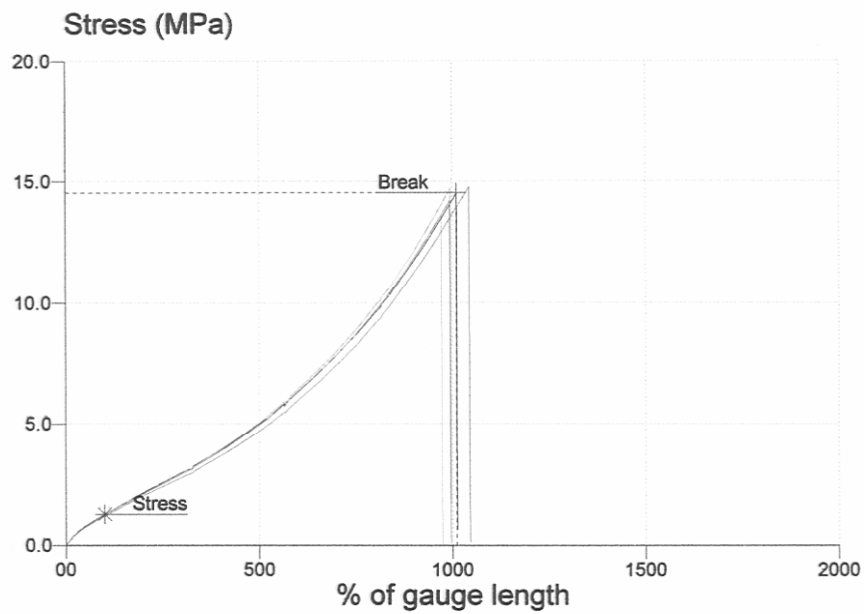
รูปที่ ก29 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 ถั่วลอ่ยที่ปริมาณ 40 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนต์มอร์ริสโกลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



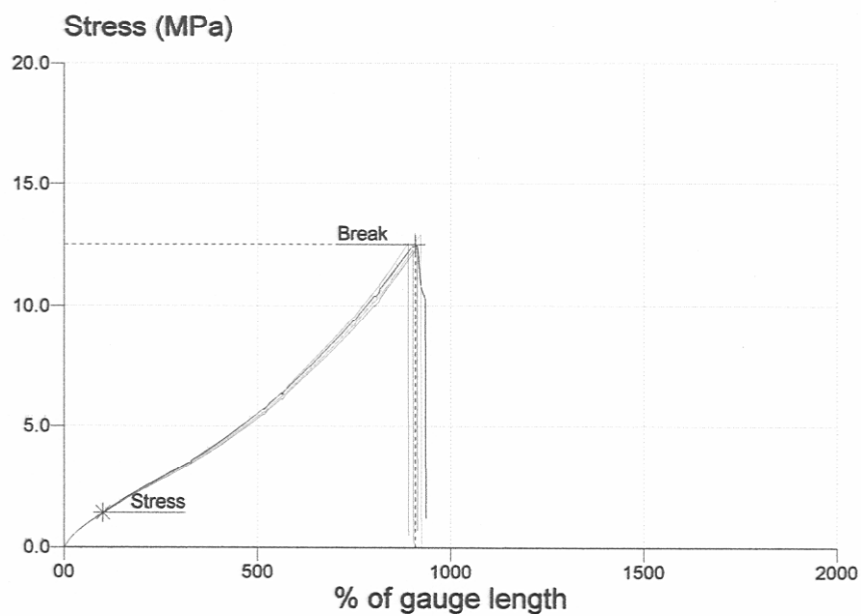
รูปที่ ก30 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 10 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนคัมมอร์ลโดไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ก31 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนคัมมอร์ลโดไนต์ที่ปริมาณ 10 phr

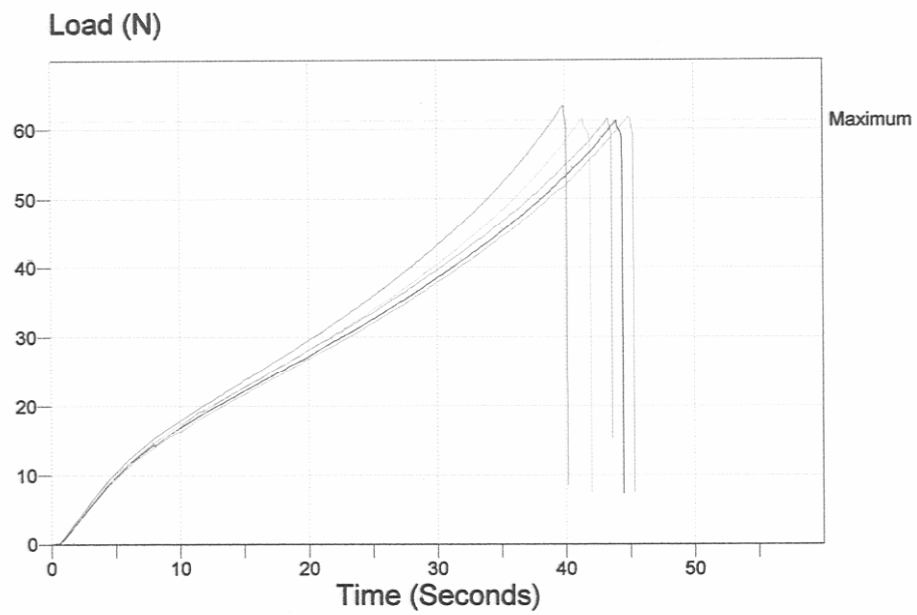


รูปที่ ก32 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 30 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนคัมอริลโกลีนที่ปริมาณ 10 phr

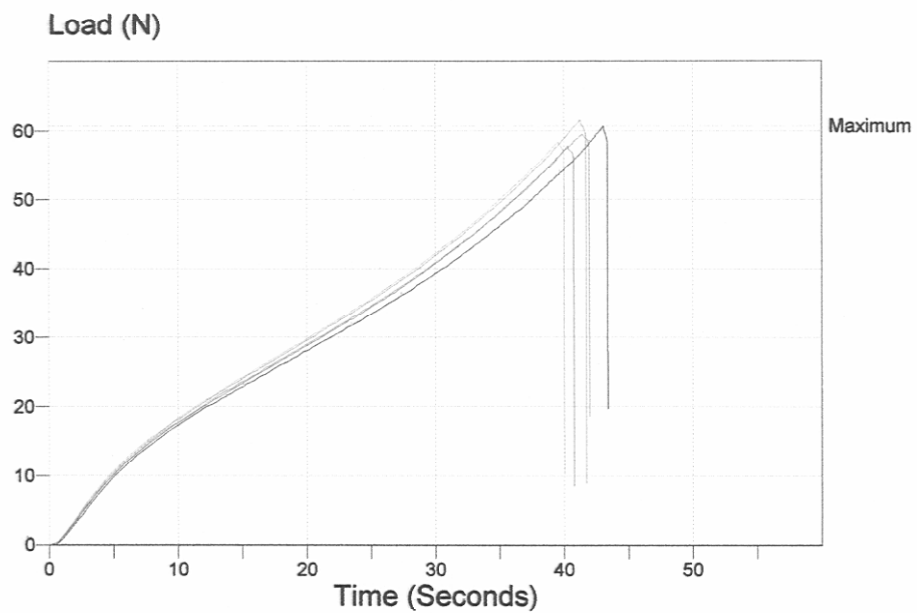


รูปที่ ก33 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 40 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนคัมอริลโกลีนที่ปริมาณ 10 phr

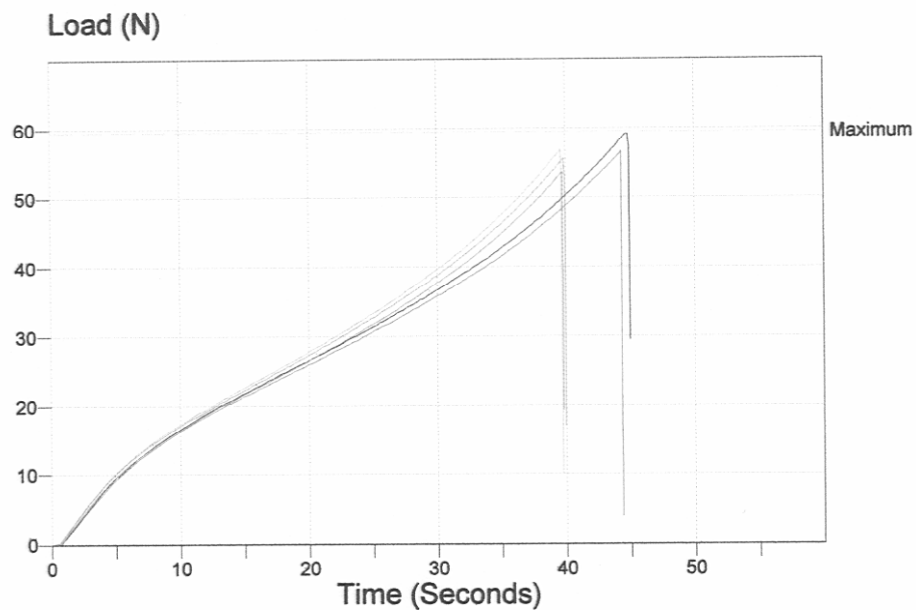
5. กราฟแสดงการทดสอบสมบัติการฉีกขาด



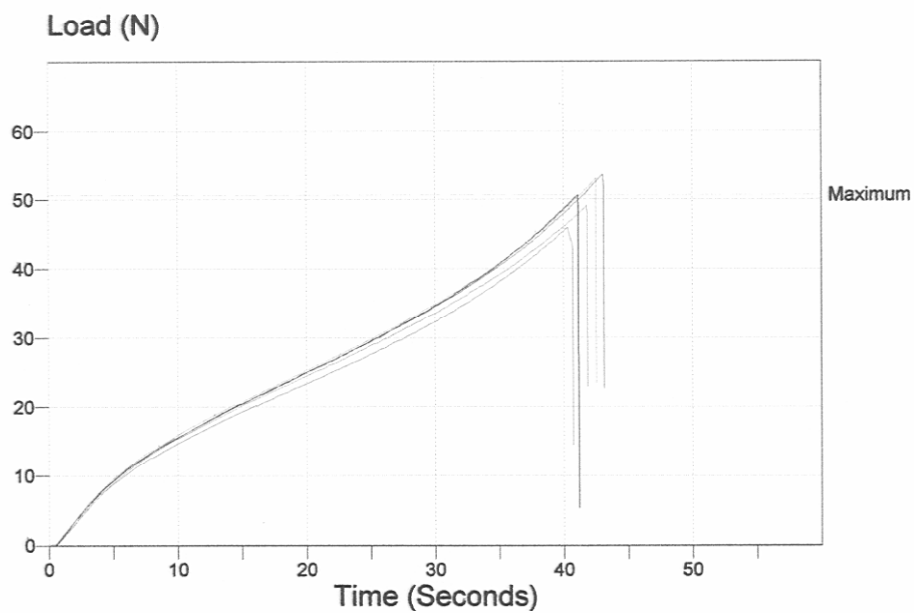
รูปที่ ก34 กราฟการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของยางธรรมชาติวัลคาร์ไนต์



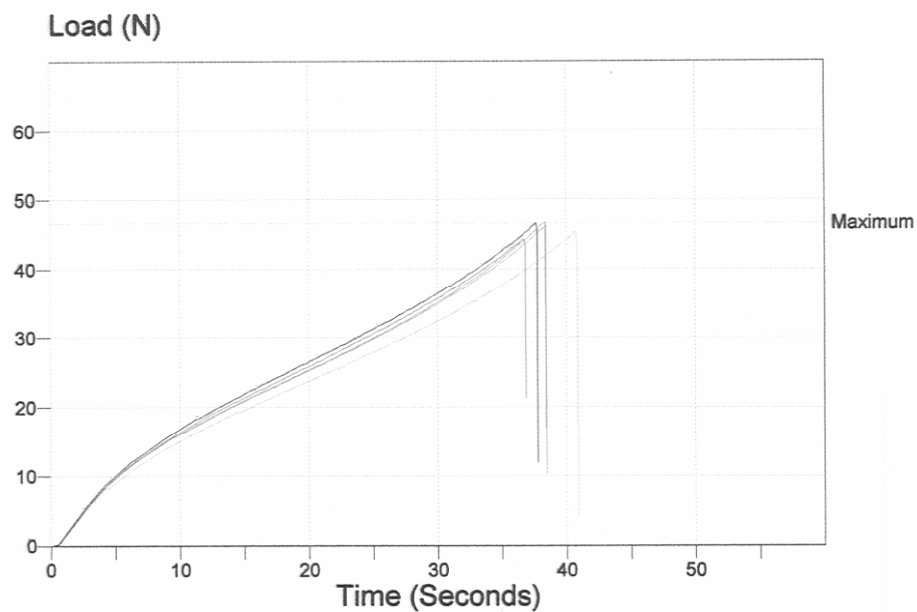
รูปที่ ก35 กราฟการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและมอนด์มอริล โลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



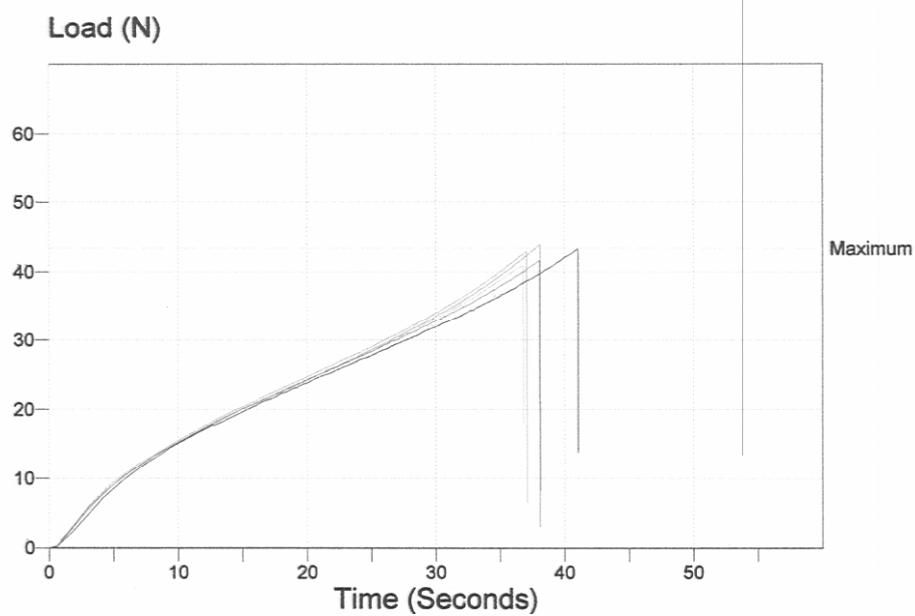
รูปที่ ก36 กราฟการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 3 phr



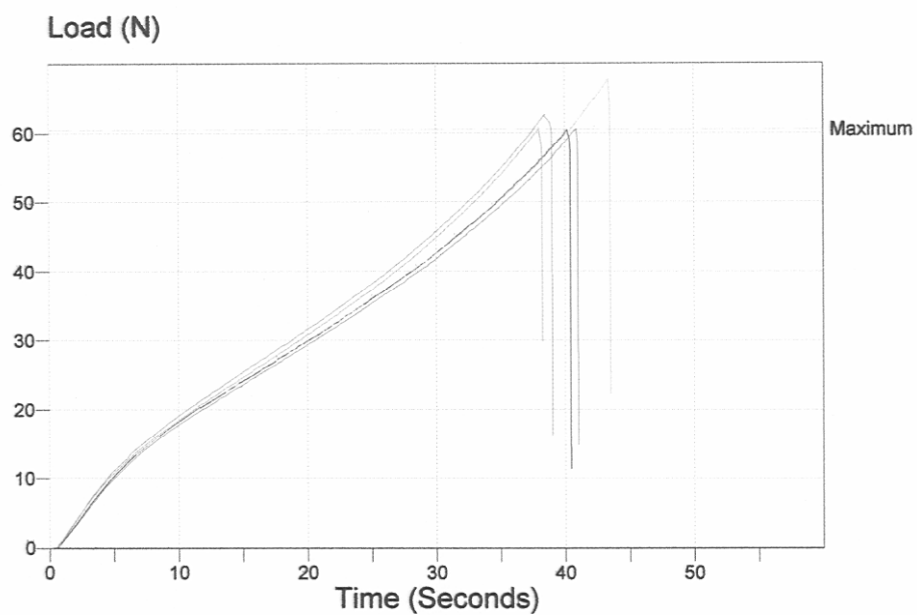
รูปที่ ก37 กราฟการทดสอบสมบัติการดึงยึดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 5 phr



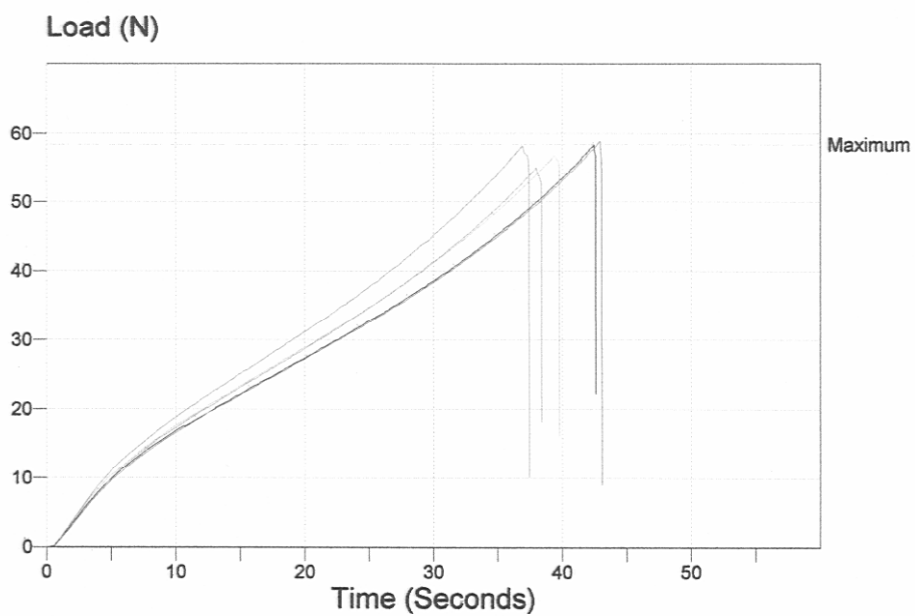
รูปที่ ก38 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนคัมบริล โลไนต์ที่ปริมาณ 7 phr



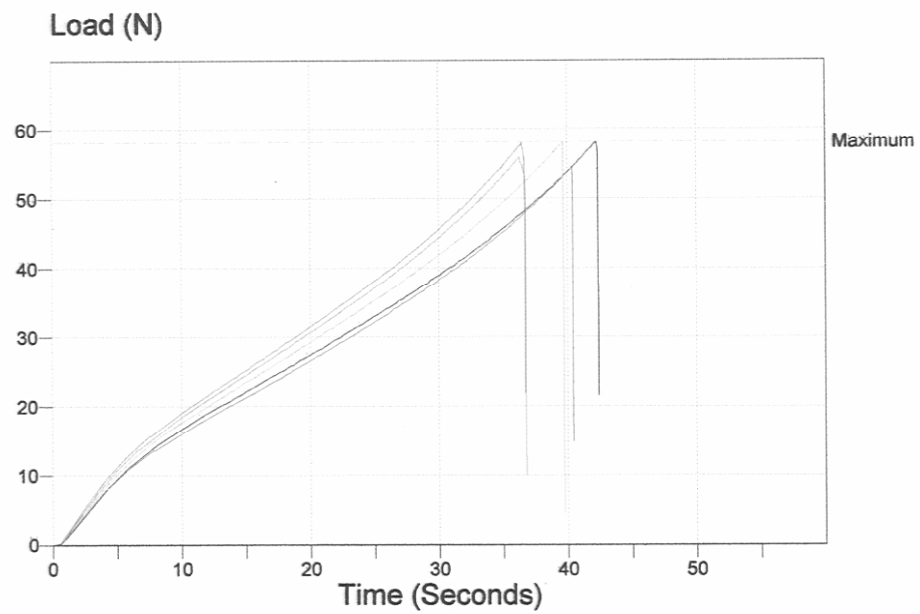
รูปที่ ก39 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
มอนคัมบริล โลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



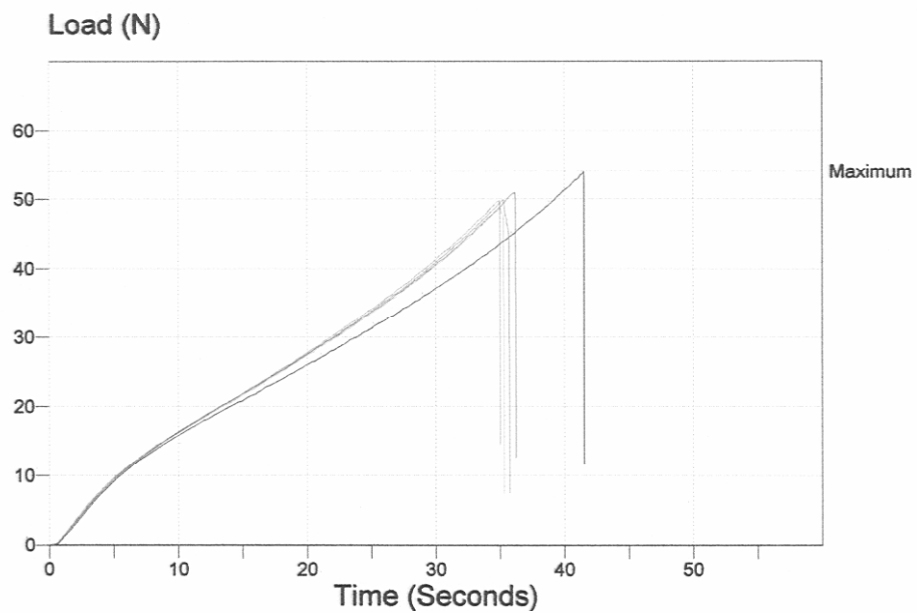
รูปที่ ก40 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกโนมอนด์มอร์ลโลไนค์ที่ปริมาณ 1 phr



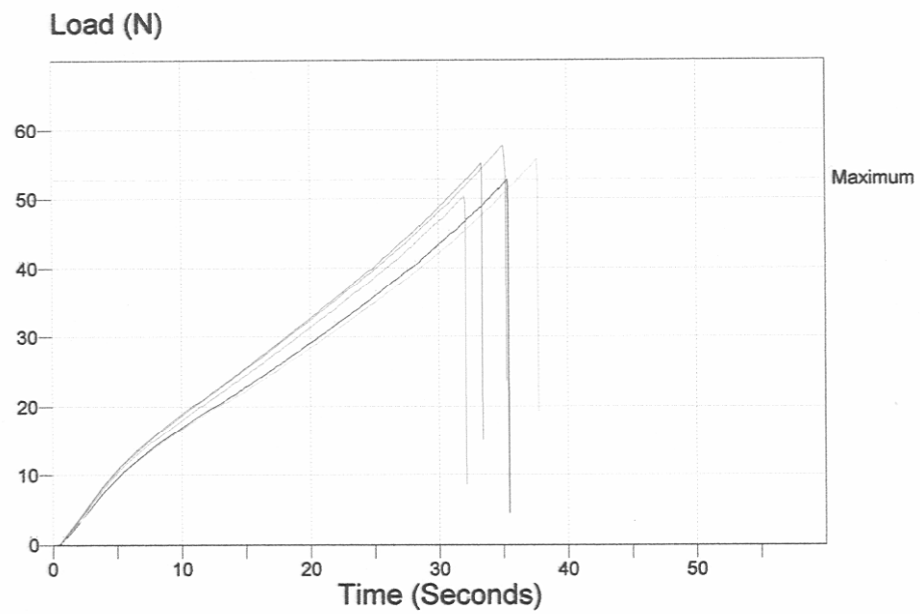
รูปที่ ก41 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกโนมอนด์มอร์ลโลไนค์ที่ปริมาณ 3 phr



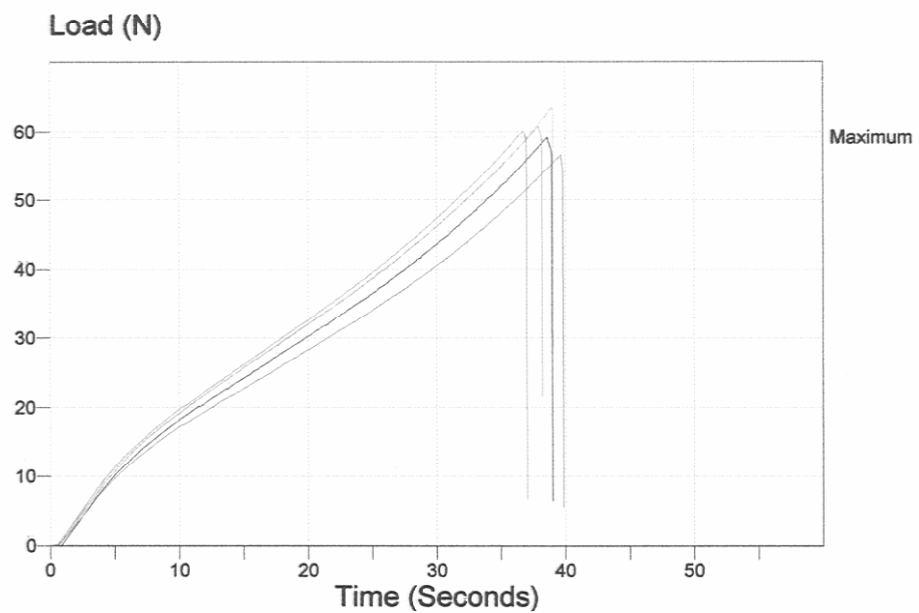
รูปที่ ก42 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนต์มอร์ริโลไนต์ที่ปริมาณ 5 phr



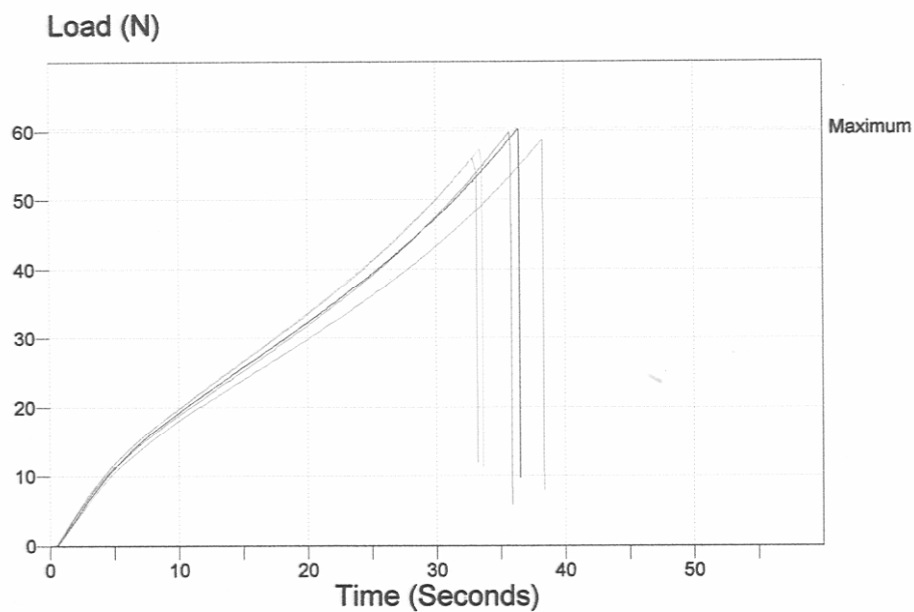
รูปที่ ก43 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนต์มอร์ริโลไนต์ที่ปริมาณ 7 phr



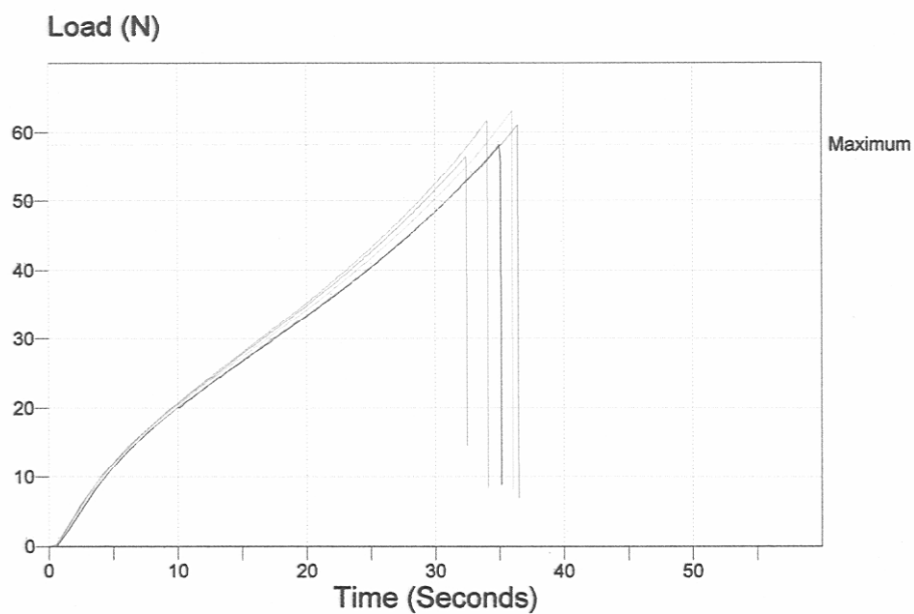
รูปที่ ก44 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
ออร์แกนอมอนคัมอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



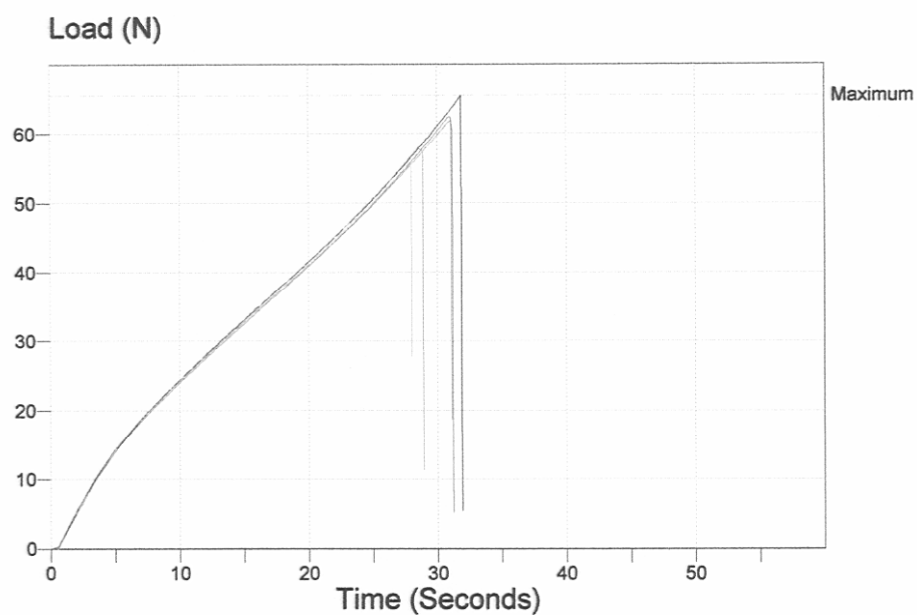
รูปที่ ก45 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เถ้าลอยที่ปริมาณ 10 phr



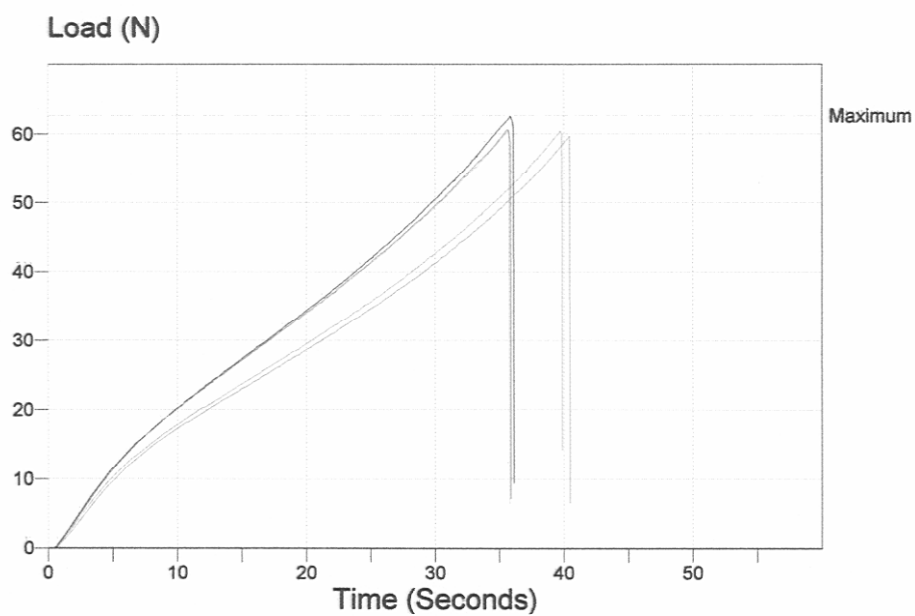
รูปที่ ก46 กราฟการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 ถ่านลอยที่ปริมาณ 20 phr



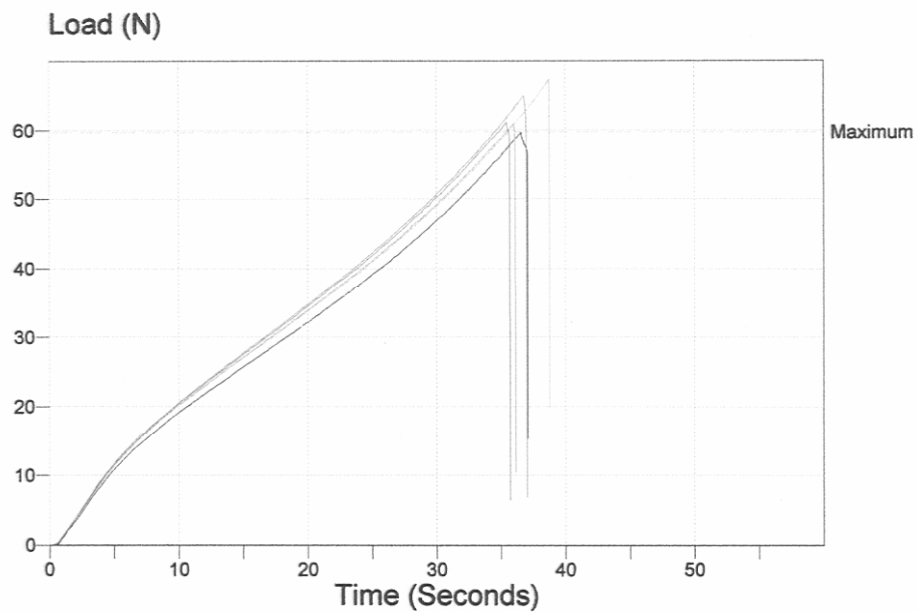
รูปที่ ก47 กราฟการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
 ถ่านลอยที่ปริมาณ 30 phr



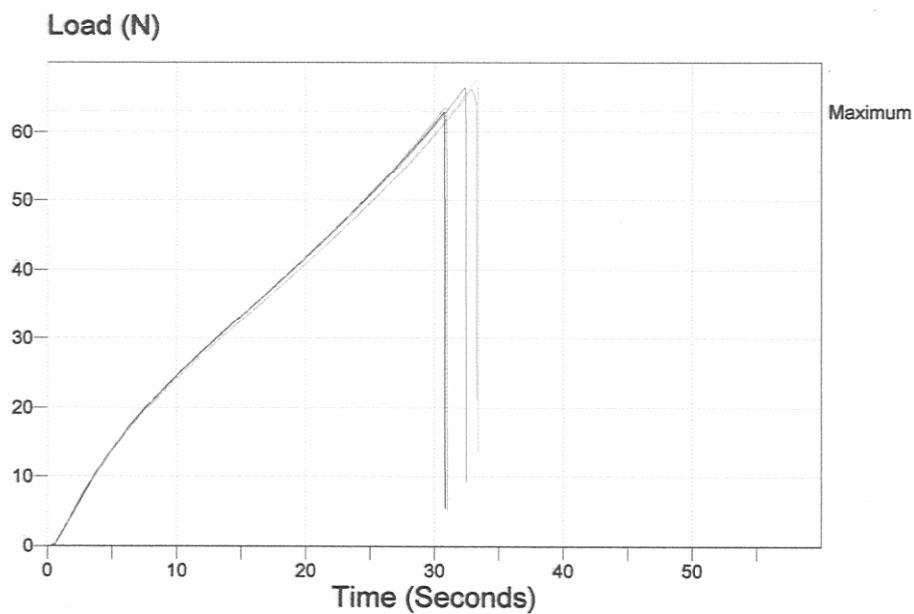
รูปที่ ก48 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นล่อยที่ปริมาณ 40 phr



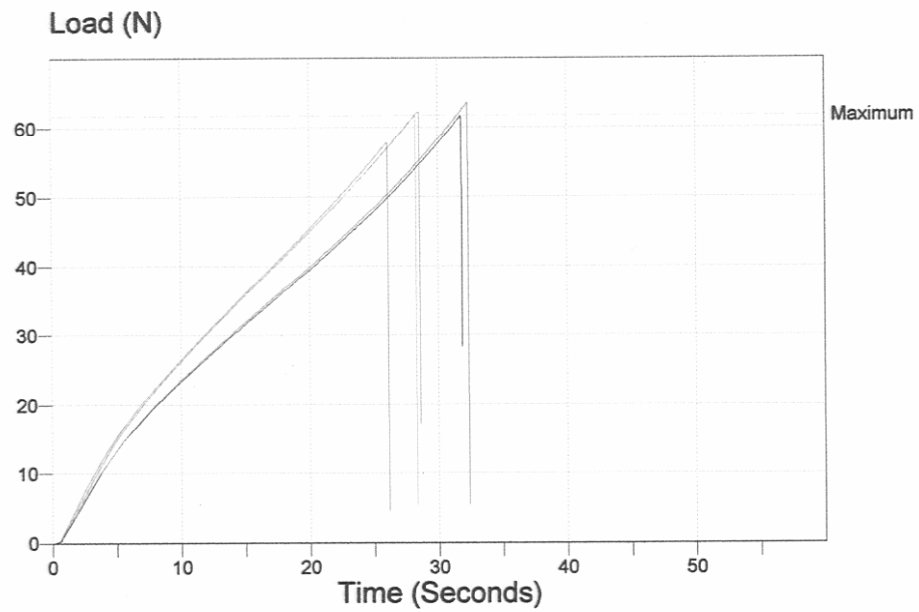
รูปที่ ก49 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นล่อยที่ปริมาณ 10 phr ที่มีการเติมออร์แกโนมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



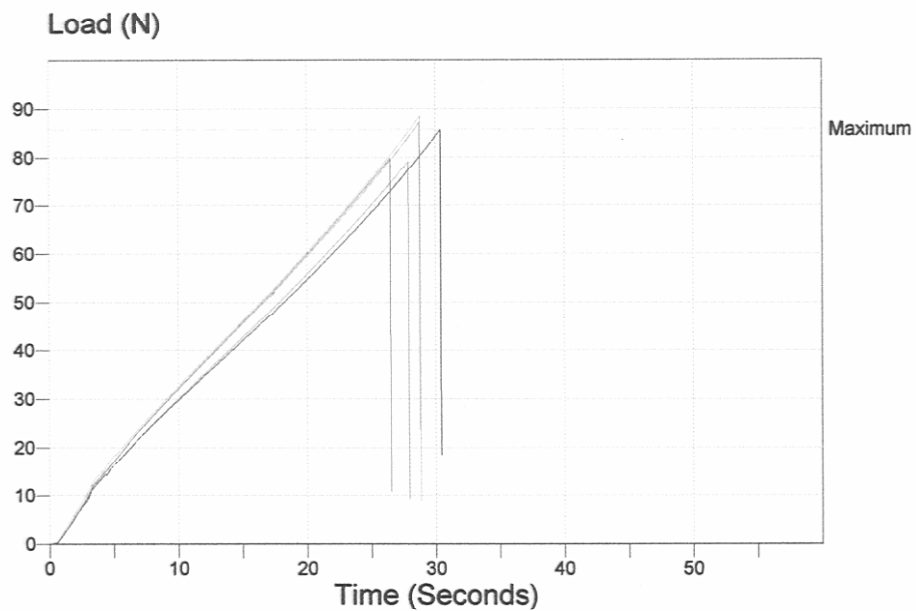
รูปที่ ก50 กราฟการทดสอบสมบัติการนํ้าหนักของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมออร์แกนอิมอนต์มอร์ริสโลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



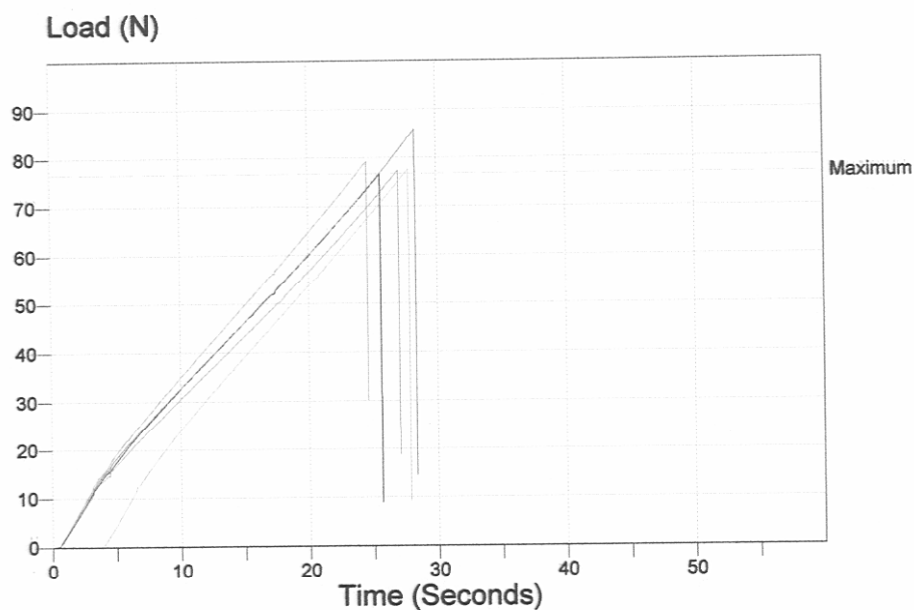
รูปที่ ก51 กราฟการทดสอบสมบัติการนํ้าหนักของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 30 phr ที่มีการเติมออร์แกนอิมอนต์มอร์ริสโลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



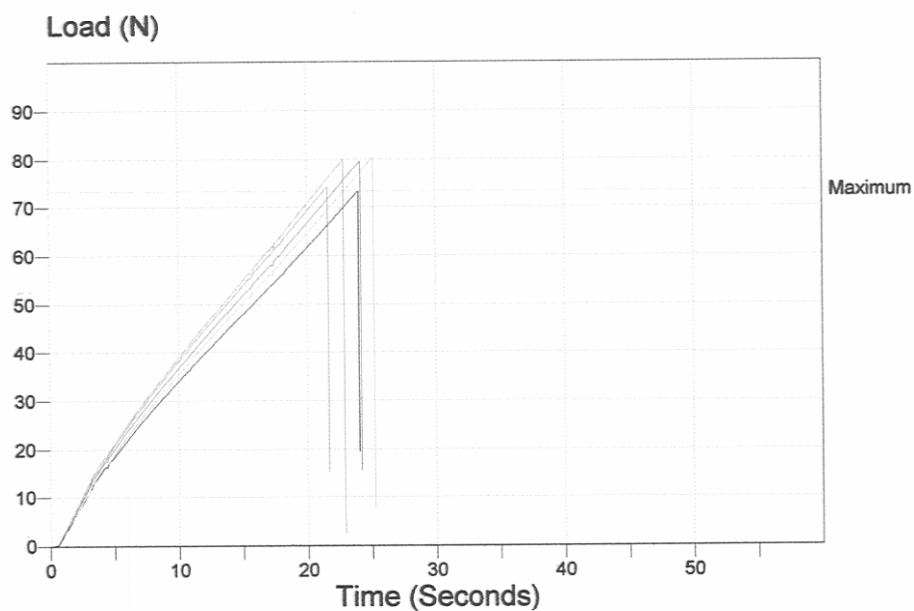
รูปที่ ก52 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 40 phr ที่มีการเติมออร์แกโนมอนต์มอร์ริลโลไนต์ที่ปริมาณ 1 phr



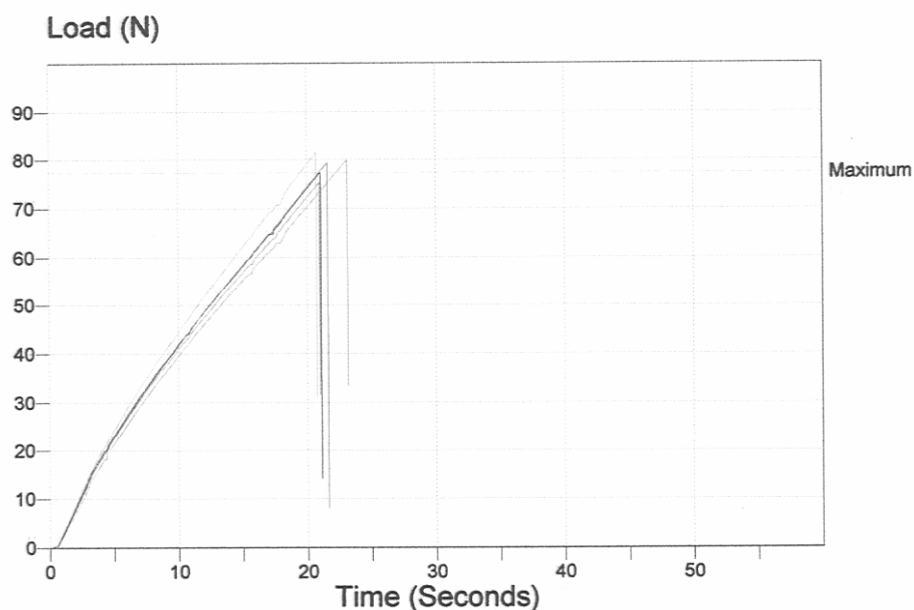
รูปที่ ก53 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 10 phr ที่มีการเติมออร์แกโนมอนต์มอร์ริลโลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ก54 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 20 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนต์มอร์ริส โลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ก55 กราฟการทดสอบสมบัติการนิกษาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 30 phr ที่มีการเติมออร์แกนอมอนต์มอร์ริส โลไนต์ที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ก56 กราฟการทดสอบสมบัติการฉีกขาดของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติและ
เส้นใยที่ปริมาณ 40 phr ที่มีการเติมออร์แกนอิมอนคัมบริลโดไนต์ที่ปริมาณ 10 phr

6. ข้อมูลการทดสอบคุณลักษณะการคงรูป

ตารางที่ ก1 แสดงข้อมูลการทดสอบคุณลักษณะการคงรูป

Material	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m	ts2 min	tc90 min
NR	28.214	2.108	26.105	0.78	2.58
NR	28.567	2.412	26.154	0.80	2.32
NR	27.321	1.814	25.507	0.83	2.68
NR	31.381	1.687	29.694	0.93	2.75
NR	30.459	1.667	28.792	0.95	2.72
NR	30.351	1.667	28.684	0.95	2.65
avg	29.38217	1.8925	27.48933333	0.88	2.62
sd	1.572963	0.305422	1.767136856	0.08	0.16
NR/MMT 1 phr	28.214	1.02	27.194	0.90	2.57
NR/MMT 1 phr	28.145	1.039	27.105	0.95	2.73
NR/MMT 1 phr	28.341	1.079	27.262	0.95	2.77
NR/MMT 1 phr	30.616	1.598	29.018	0.97	2.68
NR/MMT 1 phr	29.959	1.549	28.41	0.98	2.72
NR/MMT 1 phr	30.047	1.54	28.508	0.95	2.68
avg	29.22033	1.304167	27.91616667	0.95	2.69
sd	1.10627	0.284135	0.826513743	0.03	0.07

Material	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m	ts2 min	tc90 min
NR/MMT 3 phr	28.057	1.589	26.468	0.97	2.73
NR/MMT 3 phr	28.184	1.618	26.566	1.00	2.78
NR/MMT 3 phr	28.321	1.53	26.792	0.98	2.80
NR/MMT 3 phr	29.047	1.51	27.537	0.98	2.60
NR/MMT 3 phr	28.812	1.569	27.243	1.02	2.67
NR/MMT 3 phr	28.194	1.471	26.723	0.98	2.63
avg	28.43583	1.547833	26.88816667	0.99	2.70
sd	0.398405	0.054256	0.415632249	0.02	0.08
NR/MMT 5 phr	26.841	1.579	25.262	1.05	2.95
NR/MMT 5 phr	26.468	1.648	24.821	1.08	2.97
NR/MMT 5 phr	25.458	1.598	23.859	1.12	3.07
NR/MMT 5 phr	28.086	1.461	26.625	1.00	2.68
NR/MMT 5 phr	28.008	1.52	26.488	1.02	2.67
NR/MMT 5 phr	27.655	1.373	26.282	1.00	2.63
avg	27.086	1.529833	25.55616667	1.04	2.83
sd	1.026273	0.100458	1.09953907	0.05	0.19
NR/MMT 7 phr	26.115	1.569	24.546	1.02	2.85
NR/MMT 7 phr	26.203	1.569	24.634	1.05	2.95
NR/MMT 7 phr	25.85	1.657	24.193	1.07	2.95
NR/MMT 7 phr	25.556	1.422	24.134	1.12	2.97
NR/MMT 7 phr	25.497	1.461	24.036	1.12	2.97
NR/MMT 7 phr	25.272	1.393	23.879	1.10	2.93
avg	25.74883	1.511833	24.237	1.08	2.94
sd	0.36839	0.102357	0.294686274	0.04	0.04
NR/MMT 10 phr	24.379	1.569	22.81	1.10	3.17
NR/MMT 10 phr	24.703	1.677	23.026	1.12	3.30
NR/MMT 10 phr	24.33	1.569	22.761	1.13	3.18
NR/MMT 10 phr	24.683	1.579	23.104	1.12	3.12
NR/MMT 10 phr	24.526	1.687	22.84	1.15	3.27
NR/MMT 10 phr	24.016	1.549	22.467	1.12	3.10
avg	24.4395	1.605	22.83466667	1.12	3.19
sd	0.257375	0.060518	0.223781739	0.02	0.08

Material	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m	ts2 min	tc90 min
NR/OMMT 1 phr	31.528	1.814	29.714	0.77	2.57
NR/OMMT 1 phr	30.793	1.795	28.998	0.70	2.63
NR/OMMT 1 phr	31.979	1.853	30.126	0.78	2.60
NR/OMMT 1 phr	30.901	1.481	29.42	0.83	2.57
NR/OMMT 1 phr	30.469	1.549	28.92	0.87	2.60
NR/OMMT 1 phr	31.156	2.658	28.498	0.85	2.58
avg	31.13767	1.858333	29.27933333	0.80	2.59
sd	0.544511	0.420366	0.590646651	0.06	0.03
NR/OMMT 3 phr	31.656	1.912	29.743	0.68	2.48
NR/OMMT 3 phr	31.97	1.834	30.136	0.65	2.55
NR/OMMT 3 phr	31.842	1.824	30.018	0.67	2.57
NR/OMMT 3 phr	32.068	1.373	30.695	0.75	2.82
NR/OMMT 3 phr	29.861	1.314	28.547	0.68	2.70
NR/OMMT 3 phr	31.724	1.344	30.381	0.75	2.72
avg	31.52017	1.600167	29.92	0.70	2.64
sd	0.826908	0.283244	0.746440085	0.04	0.13
NR/OMMT 5 phr	29.93	2.128	27.802	0.60	2.48
NR/OMMT 5 phr	30.283	2.01	28.272	0.65	2.47
NR/OMMT 5 phr	30.704	2.04	28.665	0.67	2.48
NR/OMMT 5 phr	30.489	1.52	28.969	0.73	2.65
NR/OMMT 5 phr	30.548	1.363	29.184	0.73	2.63
NR/OMMT 5 phr	28.831	1.373	27.458	0.73	2.63
avg	30.13083	1.739	28.39166667	0.69	2.56
sd	0.690491	0.357395	0.673732489	0.06	0.09
NR/OMMT 7 phr	29.685	1.598	28.086	0.72	2.77
NR/OMMT 7 phr	29.841	1.579	28.263	0.73	2.82
NR/OMMT 7 phr	29.4	1.471	27.929	0.73	2.88
NR/OMMT 7 phr	29.037	1.922	27.115	0.75	2.83
NR/OMMT 7 phr	29.184	1.873	27.311	0.77	2.88
NR/OMMT 7 phr	29.43	1.932	27.498	0.77	2.88
avg	29.4295	1.729167	27.70033333	0.74	2.84
sd	0.299936	0.202691	0.458858439	0.02	0.05
NR/OMMT 10 phr	30.793	2.001	28.792	0.60	2.63
NR/OMMT 10 phr	31.165	2.148	29.018	0.63	2.83
NR/OMMT 10 phr	30.744	1.863	28.88	0.58	2.63
avg	30.90067	2.004	28.89666667	0.61	2.70
sd	0.230227	0.142524	0.113918099	0.03	0.12

Material	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m	ts2 min	tc90 min
NR/FA 10	32.332	1.5	30.832	0.87	2.65
NR/FA 10	32.666	1.481	31.185	0.88	2.58
avg	32.499	1.4905	31.0085	0.88	2.62
sd	0.236174	0.013435	0.249608694	0.01	0.05
NR/FA 20	32.479	1.657	30.822	0.98	2.88
NR/FA 20	32.891	1.638	31.254	1.00	2.92
NR/FA 20	31.263	1.824	29.439	1.02	2.88
avg	32.211	1.706333	30.505	1.00	2.89
sd	0.846442	0.102344	0.948115499	0.02	0.02
NR/FA 30	32.038	1.334	30.704	0.98	2.85
NR/FA 30	32.028	1.383	30.646	0.98	2.85
NR/FA 30	31.92	1.393	30.528	1.00	2.88
avg	31.99533	1.37	30.626	0.99	2.86
sd	0.065432	0.031575	0.089688349	0.01	0.02
NR/FA 40	33.411	1.795	31.616	1.03	3.05
NR/FA 40	32.832	1.481	31.352	1.02	2.97
NR/FA 40	33.186	1.598	31.587	1.02	2.98
avg	33.143	1.624667	31.51833333	1.02	3.00
sd	0.291885	0.158689	0.14477684	0.01	0.04
NR/OMMT 1 /FA10	34.804	1.373	33.431	0.72	2.48
NR/OMMT 1 /FA10	35.166	1.226	33.941	0.72	2.50
NR/OMMT 1 /FA10	34.823	1.383	33.441	0.75	2.52
avg	34.931	1.327333	33.60433333	0.73	2.50
sd	0.203738	0.0879	0.291604755	0.02	0.02
NR/OMMT 1 /FA20	35.716	1.491	34.225	0.73	2.65
NR/OMMT 1 /FA20	35.127	1.461	33.666	0.78	2.70
NR/OMMT 1 /FA20	35.166	1.402	33.764	0.77	2.70
avg	35.33633	1.451333	33.885	0.76	2.68
sd	0.329379	0.045281	0.298497906	0.03	0.03
NR/OMMT 1 /FA30	38.265	1.657	36.608	0.72	2.58
NR/OMMT 1 /FA30	38.452	1.765	36.686	0.73	2.62
NR/OMMT 1 /FA30	38.697	1.608	37.089	0.73	2.63
avg	38.47133	1.676667	36.79433333	0.73	2.61
sd	0.216648	0.080326	0.258151764	0.01	0.03
NR/OMMT 1 /FA40	38.991	1.344	37.648	0.73	2.65
NR/OMMT 1 /FA40	38.697	1.432	37.265	0.77	2.70
NR/OMMT 1 /FA40	38.344	1.334	37.01	0.73	2.65
avg	38.67733	1.37	37.30766667	0.74	2.67
sd	0.323948	0.053926	0.32113289	0.02	0.03

Material	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m	ts2 min	tc90 min
NR/OMMT10FA10	34.764	3.56	31.205	0.47	2.80
NR/OMMT10FA10	35.078	3.315	31.764	0.52	2.77
NR/OMMT10FA10	34.362	3.452	30.91	0.53	2.75
avg	34.73467	3.442333	31.293	0.51	2.77
sd	0.3589	0.122786	0.433747622	0.03	0.03
NR/OMMT10FA20	34.686	3.06	31.626	0.57	2.78
NR/OMMT10FA20	35.323	2.952	32.372	0.57	2.87
NR/OMMT10FA20	35.019	2.962	32.058	0.57	2.87
avg	35.00933	2.991333	32.01866667	0.57	2.84
sd	0.31861	0.059677	0.374552177	0.00	0.05
NR/OMMT10/FA30	36.765	3.256	33.509	0.53	2.87
NR/OMMT10/FA30	36.392	3.187	33.205	0.57	3.00
NR/OMMT10/FA30	36.941	3.138	33.803	0.58	3.10
avg	36.69933	3.193667	33.50566667	0.56	2.99
sd	0.280329	0.059282	0.299013935	0.03	0.12
NR/OMMT10/FA40	39.442	3.138	36.304	0.57	3.17
NR/OMMT10/FA40	39.315	3.246	36.069	0.60	3.18
NR/OMMT10/FA40	38.677	3.148	35.529	0.57	3.12
avg	39.14467	3.177333	35.96733333	0.58	3.16
sd	0.409959	0.059677	0.397376815	0.02	0.03

7. ข้อมูลการทดสอบการบวมตัว

ตารางที่ ก2 แสดงข้อมูลการทดสอบการบวมตัว

NR			NR/MMT 1phr			NR/MMT 3phr		
Weight (Wb)	W after	swell ratio	weight(Wb)	W after	swell ratio	weight(Wb)	W after	swell ratio
g	g		g	g		g	g	
0.6645	2.3813	3.5836	0.4690	2.3060	4.9168	0.4673	2.6375	5.6441
0.6650	2.4107	3.6251	0.4714	2.3312	4.9453	0.4724	2.6371	5.5823
0.6518	2.4771	3.8004	0.4546	2.2238	4.8918	0.4754	2.5053	5.2699
0.6446	2.4144	3.7456	0.4682	2.2829	4.8759	0.4687	2.4908	5.3143
0.6575	2.3742	3.6110	0.4634	2.2679	4.8940	0.4794	2.5539	5.3273
avg	3.6731		avg	4.9048		avg	5.4276	
sd	0.0944		sd	0.0269		sd	0.1722	

NR/MMT 5phr			NR/MMT 7phr			NR/MMT 10phr		
Weight (Wb)	W after	swell ratio	weight(Wb)	W after	swell ratio	weight(Wb)	W after	swell ratio
g	g		g	g		g	g	
0.4707	2.7016	5.7395	0.4625	2.6967	5.8307	0.4669	2.7565	5.9038
0.4639	2.6545	5.7221	0.4572	2.6187	5.7277	0.475	2.9628	6.2375
0.4603	2.6290	5.7115	0.4721	2.6952	5.7090	0.4664	2.9168	6.2539
0.4716	2.6861	5.6957	0.4621	2.5795	5.5821	0.4868	2.9654	6.0916
0.4574	2.5921	5.6670	0.4709	2.7830	5.9100	0.4811	2.9521	6.1361
avg	5.7072		avg	5.7519		avg	6.1246	
sd	0.0275		sd	0.1249		sd	0.1409	

NR/OMMT 1phr			NR/OMMT 3phr		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.4674	2.3937	5.1213	0.4602	2.9388	6.3859
0.4449	2.4189	5.4370	0.4648	2.7369	5.8883
0.4608	2.4792	5.3802	0.4544	2.8970	6.3754
0.4525	2.4037	5.3120	0.4455	2.8202	6.3304
0.4742	2.5028	5.2779	0.4688	2.7388	5.8422
avg		5.3057	avg		6.1645
SD		0.1200	SD		0.2744

NR/OMMT 5phr			NR/OMMT 7phr			NR/OMMT 10phr		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.4808	3.1273	6.5044	0.4751	3.4850	7.3353	0.4767	3.1490	6.6058
0.4596	2.8001	6.0925	0.4733	3.3543	7.0870	0.4754	3.3265	6.9973
0.4880	3.2780	6.7172	0.4712	3.4178	7.2534	0.4872	3.2508	6.6724
0.4482	2.6892	6.0000	0.4758	3.4376	7.2249	0.4742	3.1661	6.6767
0.4667	3.0290	6.4903	0.4657	3.4095	7.3212	0.4934	3.2151	6.5162
avg		6.3609	avg		7.2444	avg		6.6937
SD		0.3027	SD		0.0992	SD		0.1817

NR/FA10			NR/FA20		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.6321	2.3205	3.6711	0.6585	2.3448	3.5608
0.6737	2.2473	3.3358	0.6781	2.2092	3.2579
0.6362	2.1901	3.4425	0.6651	2.4627	3.7028
0.6378	2.2174	3.4766	0.6710	2.4599	3.6660
0.6288	2.4179	3.8453	0.6843	2.2855	3.3399
avg		3.5542	avg		3.5055
SD		0.2029	SD		0.1978

NR/FA30			NR/FA40		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.6678	2.1861	3.2736	0.6696	2.3311	3.4813
0.6726	2.2336	3.3208	0.6789	2.2420	3.3024
0.6496	2.2760	3.5037	0.6661	2.2490	3.3764
0.6469	2.2813	3.5265	0.6576	2.2327	3.3952
0.6600	2.2534	3.4142	0.6761	2.3139	3.4224
avg		3.4078	avg		3.3956
SD		0.1106	SD		0.0654

NR/OMMT 1phr/FA10			NR/OMMT 1phr/FA20		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.6469	2.4973	3.8604	0.6673	2.3679	3.5485
0.6357	2.4385	3.8359	0.6597	2.5125	3.8085
0.6155	2.5685	4.1730	0.6636	2.4834	3.7423
0.6201	2.6263	4.2353	0.6635	2.3849	3.5944
0.6230	2.4942	4.0035	0.6752	2.4435	3.6189
avg		4.0216	avg		3.6625
SD		0.1798	SD		0.1087

NR/OMMT 1phr/FA30			NR/OMMT 1phr/FA40		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.7116	2.3910	3.3600	0.6708	2.4662	3.6765
0.7127	2.3169	3.2509	0.6721	2.4372	3.6262
0.7178	2.3926	3.3332	0.6707	2.7265	4.0652
0.6877	2.3388	3.4009	0.6549	2.3964	3.6592
0.7191	2.3992	3.3364	0.6733	2.6993	4.0091
avg		3.3363	avg		3.8072
SD		0.0549	SD		0.2116

NR/OMMT 10phr/FA10			NR/OMMT 10phr/FA20		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.5153	2.3643	4.5882	0.5346	2.4281	4.5419
0.5163	2.4545	4.7540	0.5491	2.3766	4.3282
0.5203	2.4526	4.7138	0.5391	2.6327	4.8835
0.5243	2.5797	4.9203	0.5834	2.6693	4.5754
0.5205	2.5488	4.8968	0.5337	2.4486	4.5880
avg		4.7746	avg		4.5834
SD		0.1370	SD		0.1981

NR/OMMT 10phr/FA30			NR/OMMT 10phr/FA40		
Weight (Wb) g	W after g	swell ratio	Weight (Wb) g	W after g	swell ratio
0.5605	2.1943	3.9149	0.6428	2.3528	3.6602
0.6032	2.4989	4.1427	0.6391	2.4099	3.7708
0.6099	2.5015	4.1015	0.6549	2.4846	3.7939
0.5706	2.3023	4.0349	0.6331	2.4622	3.8891
0.5489	2.2217	4.0475	0.5924	2.1945	3.7044
avg		4.0483	avg		3.7637
SD		0.0862	SD		0.0879

8. ข้อมูลการทดสอบความแข็งที่ผิวของยางผสม

ตารางที่ ก3 แสดงข้อมูลการทดสอบความแข็งที่ผิวของยางผสม

NR			NR-MMT 1 phr			NR-MMT 3 phr		
Hardness			Hardness			Hardness		
38	36	34.5	37.5	36	35	34	33	35
36	36	34	37	36	35	33	34	35
36	36.5	35	36	35	35	33	34	34
33	36	34.5	36	36	35	34	33	33
34	35	33.5	35	35	34	34	33	34
34	36	34	36	36	34	34	34	34.5
34	35	36	35	36	34	33.5	32	35
35	35	34.5	35	36	35	33.5	32	33.5
34.5	36	35	36	35	35	35	32	34
35	36	36	36	35	34	33	32	34
Avg.	35.133		Avg.	35.383		Avg.	33.6	
Sd.	1.0662		Sd.	0.8477		Sd.	0.894427	

NR-MMT 5 phr			NR-MMT 7 phr			NR-MMT 10 phr		
Hardness			Hardness			Hardness		
33.5	33	33	34	32	33	33	33	33
33	34	33	34	32	33	34	34	34
32.5	32	33	35	31.5	34	34	33	34
33	32.5	33	32.5	35	34	34	33	33
33	32	33	34	34	33	33	33	34
33.5	32	32	34	33	35	34	32	34
32	32	32	33	34	33	34	32	34
33	32.5	32	33.5	35	33	34	32	34
32	32.5	33	34	35	33	33	31.5	35
32	32.5	32	35	35	33	33	31.5	35
Avg.	32.61667		Avg.	33.65		Avg.	33.36667	
Sd.	0.567562		Sd.	1.001292		Sd.	0.91852	

NR-OMMT1 phr			NR-OMMT 3 phr			NR-OMMT 5phr		
Hardness			Hardness			Hardness		
35	35	37	37	38	37	36	37	37
35	36.5	37	36	37	35	37	38	37
37	34	38	36.5	36	35	36	38	37
34.5	34	36	36	37	34	36	38	37.5
36.5	35	36	36.5	37	35	37	37	37
36	35	36.5	35	37	34	37	37	36
34	36	38	35	38	35	37	37	36.5
34	36	37	36	36	35	37	37	36
35	34	37	37	37.5	35	36.5	36	36.5
36	33	36	35	37	34	36	37	36.5
Avg.	35.667		Avg.	35.98333		Avg.	36.81667	
Sd.	1.2821		Sd.	1.170642		Sd.	0.594273	

NR-OMMT 7 phr			NR-OMMT 10 phr		
Hardness			Hardness		
35	38	38	40	38.5	39.5
36	36.5	37.5	39	39	39
37	37.5	37	39	40	38
37	37	37.5	39	40	38
37	36	37.5	39	40	39
37.5	37	37.5	38.5	39	39
35	37.5	37	38.5	40	38.5
37	38	37.5	39	39	37.5
36.5	37	37.5	39.5	39	38
36	37	37.5	38.5	40	38.5
Avg.	37		Avg.	38.98333	
Sd.	0.765641		Sd.	0.675729	

NR-FA 10			NR-FA 20		
Hardness			Hardness		
39	39	38.5	39	40	39
39	38	38	38.5	39	38.5
38	39	37.5	39	39	38.5
38	38.5	37.5	39.5	38	39
38	39	38.5	39.5	39	38.5
36.5	38.5	38.5	39.5	38.5	38
37	39	38.5	39	38.5	37
37	37.5	38.5	39	38.5	37.5
39	39	37	38.5	39	37.5
38.5	39	38.5	37.5	39.5	37.5
Avg.	38.25		Avg.	38.633	
Sd.	0.7281		Sd.	0.7184	

NR-FA 30			NR-FA 40		
1	2	3	1	2	3
40	41	41	40	43	44
40	42.5	42	41	44.5	45
40	41.5	40	41	44.5	45
40	42	41.5	41.5	44	45
41	42	42	41.5	43	45
41.5	41.5	42	42	43	46
42	41.5	41.5	41.5	43	45
42	42	42	42	43.5	45
42.5	42	42	42	44.5	45.5
40	42	42	42	45	45.5
Avg.	41.43333		Avg.	43.45	
Sd.	0.8172		Sd.	1.662725	

NR-OMMT1-FA 10			NR-OMMT1-FA 20		
Hardness			Hardness		
38	38	40	41	40.5	41.5
37.5	38.5	40.5	42	42	41.5
36	39.5	40	41	42	41.5
38	38.5	40.5	42	42	39
39	38	40.5	41	42	39
38.5	39	39.5	40	42	40
39	39	39.5	40.5	40.5	39
39.5	38.5	40	42	41.5	39
38.5	39	40.5	41.5	40.5	40
37.5	40	40	42	41.5	40
38	39.5	40	42	40.5	40
Avg.		39.03	Avg.		40.924
Sd.		1.0602	Sd.		1.0241

NR-OMMT1-FA 30			NR-OMMT1-FA 40		
Hardness			Hardness		
43	43	45	45	45	45
44	44.5	45	44	45.5	45
43.5	43.5	45	45	44	44
44.5	44.5	45	45.5	45	44
44	44.5	44	45.5	44	43
44.5	45	43	45	44.5	42
44.5	45	43	45.5	45	42
44	45	43	45	45	43
44.5	45	44	44	46	44
44	44.5	43	44	45	44
44	45	44	44	45	45
Avg.		44.18182	Avg.		44.4697
Sd.		0.716089	Sd.		0.951474

NR-OMMT10-FA 10			NR-OMMT10-FA 20		
Hardness			Hardness		
48	48	48	45	49	49
47	48	48	47	50	49
48	48	48	47	49	49
48	47	48	48	48	48
48	45	48	49	49	48
46	47	46	50	48	50
47	48	47	51	49	49
48	47	47	51	50	49
47	46	47	51	51	49
48	47	48	49	50	49
Avg.		47.367	Avg.		49
Sd.		0.8087	Sd.		1.3131

NR-OMMT10-FA 30			NR-OMMT10-FA 40		
Hardness			Hardness		
51	51	50	52	52	53
51	50	50	51	51	52
52	51	50	51	51	53
53	51	51	53	52	53
52	52	51	51	53	53
50	50	49	53	54	53
50	49	50	54	54	52
49	50	51	54	54	51
49	51	52	54	53	53
49	51	52	54	53	53
Avg.	50.6		Avg.	52.66667	
Sd.	1.069966		Sd.	1.061337	

ภาคผนวก ข**การนำเสนอและตีพิมพ์งานวิจัยบางส่วนในงานประชุมวิชาการ**

ผลงานการนำเสนอ Oral Presentation ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร Advanced Materials Research จากการเข้าร่วมประชุมวิชาการในงาน International Conference on Smart Materials-Smart/Intelligent Materials and Nano Technology & 2nd International Workshop on Functional Materials and Nanomaterials (SmartMat-'08 & IWOFM-2) ที่โรงแรม The Imperial Mae Ping จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 22-25 เมษายน 2551

The Effect of Organic Modification Method onto Montmorillonite on Mechanical Properties of Natural Rubber

C. Thongpin^{1,a}, N. Tangchantra^{1,b}, P. Kaewpetch, J. Dejkun and A. Chartsiriwattana

¹Materials Science and Engineering Department, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakornpathom, 73000, Thailand

^achanchai@su.ac.th, ^bcmaterials@hotmail.com, ^cnantavatt@gmail.com

Keywords: Mechanical Properties, Thermal properties, NR/clay composites, Montmorillonite, Organophilic montmorillonite.

Abstract. Montmorillonite is a type of clays that has been used to reinforce polymer including rubber. Therefore this research is aimed to modify mechanical properties of natural rubber (NR) using montmorillonite (MMT) comparing with the organic modified montmorillonite (CTAB-MMT) and organic molecule grafted MMT. The affect of MMT, CTAB-MMT and HTMS-g-CTABMMT on cure characteristics of NR were studied. It was found from the research that the increase of MMT content could prolong the scorch time whereas CTAB-MMT and HTMS-g-CTABMMT could shorten the scorch time. The cure times of the compounds in all cases were not much different. In term of mechanical properties, modulus, tensile strength and tear strength of NR/HTMS-g-CTABMMT vulcanizate were higher than those of NR/MMT and NR/CTAB-MMT vulcanizates. Meanwhile, elongation at break of the NR/ HTMS-g-CTABMMT vulcanizate decreased more than the latter cases.

Introduction

Nanoclay, having been used as filler for rubber and plastic, often encounters the particles agglomeration during processing leading to poor reinforcing effect. [1]. Internal and external cations can be exchanged by other inorganic or by organic ion, such as quaternary alkyl ammonium ions [2], for its compatibility with the polymers. Organoclay (OMMT) has been mainly used with engineering plastic [3], but, up to now there are only few studies on rubber-clay nanocomposite. M. Arroyo et al. [4] showed, for natural rubber, that only 10 phr organoclay were necessary to achieve tensile strength comparable to compounds load with 40 phr carbon black. Siby Varghese and J. Karger Kocsis [5] produced composites based on natural rubber (NR) which contains 10 phr organic modified and pristine layered silicates of natural and synthetic origin by melt compounding and sulphur curing. The property improvements caused by the fillers were ranked as follows: organic modified clays > pristine synthetic layersilicate (Sodium fluorohectorite) > pristine clay (purified sodium bentonite) > precipitated nonlayer silica. Organic alkylammonium salts greatly increases the compatibility between rubber and inorganic clay dispersion, nonetheless the interfacial interaction between two phases is still weak due to the nature of vander walls force [6]. This research is aimed to promote the adhesion between clay and rubber by using silane coupling agent as it can form strong, primary interfacial bond with both polymer and inorganic substrate [7]. This work is therefore to modify MMT by cation exchanging with Hexadecyltrimethyl ammonium (CTAB) giving rise to CTAB-MMT. CTAB-MMT was following grafted with Hexadecyl trimethoxysilane obtaining HTMS-g-CTAB-MMT. The mechanical properties of NR/modified MMT composite were studied.

Experimental

Materials: The materials used are as follow: Natural rubber (NR, STR 20) was supplied by Sintong Thai (Thailand). Kunipia F supplied by Kunimine Ind. Co., is a Na⁺ type montmorillonite (MMT), with a cation exchange capacity of 115 meq/100 g. Hexadecyltrimethyl ammonium (CTAB) and Hexadecyltrimethoxysilane (HTMS) were provided from Fluka.

Preparation of OMMT: The CTAB-MMT was prepared by dispersion Na⁺MMT (10 g) was dispersed in 350 ml 80 °C water and stirred continuously. Meanwhile, CTAB (100% CEC) and 1M HCl 10 ml

were dissolved together in 250 ml 80 °C water. This latter solution was poured into the hot clay slurry under vigorous stirring and leave to stir for 2.5 hrs. to flocculate the clay. The precipitate was then filtered and washed with hot water of 80 °C to remove chloride anion. The CTAB-MMT was then grafted with HTMS in a mixed solvent of ethanol/water with the ratio of 75/25. 10 g of CTAB-MMT was firstly dispersed in 1000 ml mixed solvent, and then 3 g of HTMS was introduced into the mixture, stirred for 8 h at 80 °C. The obtained precipitate was washed using the mixture of ethanol/water in order to remove the residual silane and dried at 60 °C in a vacuum oven.

Table 1. Materials formulation of NR compounds

Materials	Content [phr]
Natural Rubber Grade STR 20	100
Zinc oxide	5
Stearic acid	2
Mercaptobenzothiazole (MBT)	0.5
Diphenyl guanidine (DPG)	0.2
Sulphur	3
Filler (MMT or OMMT)	Varying from 0-10

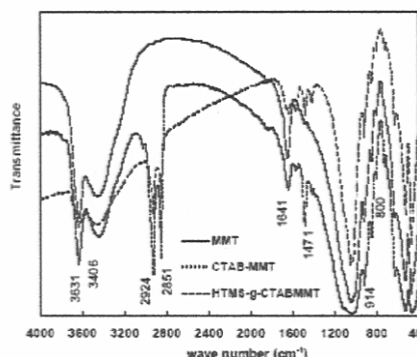


Figure 1. FTIR spectra of MMT and OMMT.

Results and Discussion

Fig. 1 displays the FT-IR broad peak over the range of 1200 to 1000 cm^{-1} with the peak maximum at 1045 cm^{-1} due to the Si-O stretching of silicates present in the clay. The new peaks at 2924 and 2851 cm^{-1} of the -CH asymmetric and symmetric stretching of -CH₂ groups confirm the presence of the CTAB and HTMS on the surface. Also, new peaks at 1471 that correspond to the -CH₂ bending vibrations further support this conclusion. The peak intensity of -OH group in HTMS-g-CTAB-MMT at 3631 cm^{-1} are slightly decreased which may be attributed to the hydrogen-bonding interaction between the hydrolyzed silane and the -OH group on the surface of MMT.

Mixing Vulcanization and Testing: The rubber formulation is stated in Table 1. NR was masticated on a laboratory two-roll mill (Hong Thai Yow Co., Ltd., Thailand) for 5 min and was then mixed with a specified content of OMMT for another 15 min. The fillers stated in Table 1 were compounded simultaneously on the two-roll mill for another 10 min. The rubber compound obtained was characterized at 160 °C for their cure characteristic in a Moving Die Rheometer (Model MDR GT-M2000), GOTECH Testing Machine, Inc., Taiwan. The rubber compounds were then compressed with hydraulic pressure of 25000 *pound/sqinch*. The rubber vulcanizate slabs were cut for tensile and tear testing according to ASTM D 412 with dumbbell-shaped samples and ASTM D 624 with angle-shaped samples, respectively. Both the tensile and tear properties were tested at a speed of 500 mm/min. Hardness durometer (Shore A, model 473, PTC Instruments, Boylston, MA) was used for the hardness testing with the test conditions in accordance with ASTM D 2240. Swelling of the vulcanizate was carried out in Toluene, at ambient temperature, and calculated using equation 1. Where w_1 and w_2 is sample weight before and after immersion into Toluene.

$$\text{swell ratio} = \frac{w_2 - w_1}{w_1} \quad (1)$$

Characterization: XRD analyses of various samples were carried out on a Rigaku X-ray diffractometer with Cu-K α radiation under scattering angle range of 3–10°. Infrared spectra of pristine and modified clay were recorded from Vertex70 FTIR spectrometer (Bruker Optic, Germany) using using pressed clay mixed with KBr.

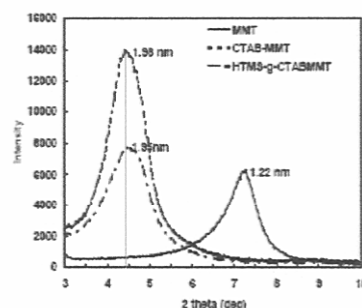


Figure 2. X-ray diffraction patterns of MMT and OMMT

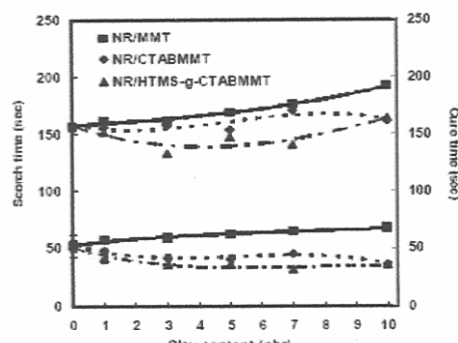


Figure 3. The Scorch time and cure time of NR/clay compound.

The basal spacing (d_{001}) from XRD measurement was calculated from Bragg's law: $d = \lambda / (2 \sin \theta)$. Fig. 2 shows the XRD pattern of primary Na-MMT, CTAB-MMT and HTMS-g-CTAB-MMT in the range of the diffraction angle $2\theta = 3-10^\circ$. The basal spacing was found to be 1.22 nm, 1.98 nm and 1.95 nm which are the spacing of Na-MMT, CTAB-MMT and HTMS-g-CTABMT respectively. The higher-order peaks of CTAB-MMT indicate that MMT can keep its layered structure upon the cation exchange with alkylammonium cation.

Fig. 3 shows the effect of clay loading on the scorch time and cure times for NR/clay compounds, showing the addition of clay effected the scorch and

cure times. The cure time appeared to increase with unmodified clay content, while scorch time hardly varies, probably due to a poor compatibility between the unmodified clay and hydrophobic polymer. However, the cure time and scorch time was slightly reduced in presence of the organoclay. Thus, the organoclay behaves as an effective accelerant agent for NR vulcanisation. This effect is attributed to the ammonium groups of the organic cations. The difference torque values (ΔS), measured as the difference between the maximum and minimum torques, as shown in Fig. 4. ΔS slightly decreased with the amount of the unmodified clay, probably due to a poor interaction at the filler-matrix interphase. Whereas the torque for organoclay filled rubber was nearly unchanged. This probably would lead to misunderstanding that the present of OMMT has no effect on the compound. However, the swell ration of the vulcanizates shown in Figure 5 evident that the present of organoclay result in the decreasing the crosslink density of NR. Meanwhile the great interaction between organoclay and rubber could also be performed as shown by SEM micrographs of NR/OMMT composites in Figure 10.

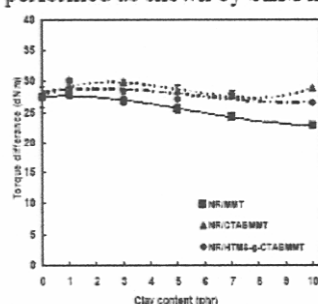


Figure 4. The torque difference (ΔS) of NR/clay compound.

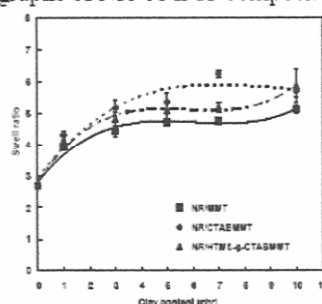


Figure 5. The swell ratio of NR/clay composites.

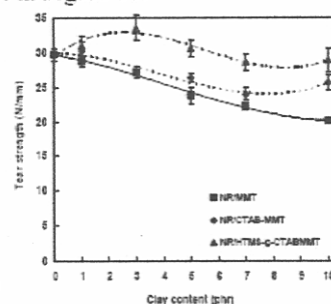


Figure 6. The tear strength of NR/clay composites.

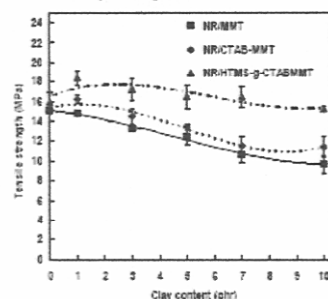


Figure 7. The tensile strength of NR/clay composites.

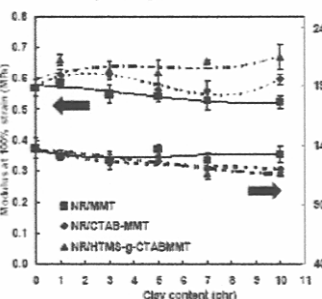


Figure 8. The modulus at 100% strain and elongation at break of NR/clay composites.

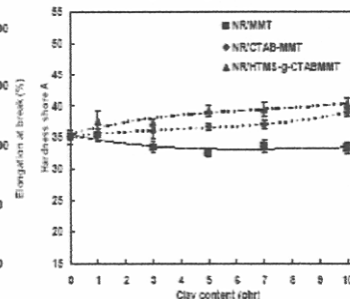


Figure 9. The hardness of NR/clay composites.

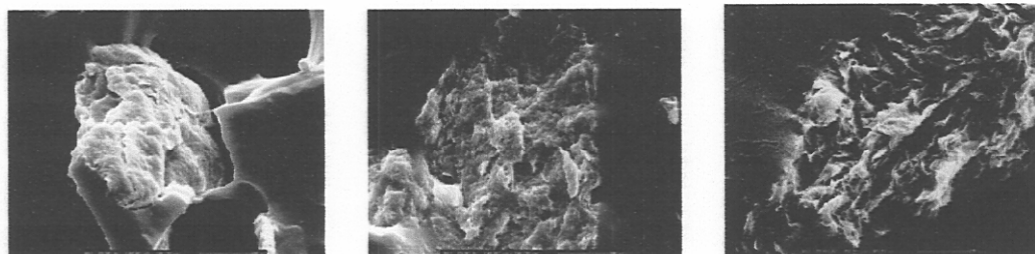


Figure 10. SEM micrograph of NR/clay composites ($\times 500$)

Tear strength, modulus at 100% strain and tensile strength of the rubber vulcanizates shown in Figure 6 and 7 indicated that addition of HTAB-g-CTAB-MMT into the rubber would improve rubber properties better than addition of MMT and CTAB-MMT. It can also be noticed that both tensile and tear strength of NR/clay composites decrease with increasing clay content. This is due to the effect of crosslink density which was lowered by the presence of clay and the aggregation of clay, as mentioned previously. However, the tensile and tear strength of both the NR/CTAB-MMT and NR/HTMS-g-CTABMMT composites higher than the NR/MMT composites since a better compatibility between organic modified clay and the rubber phase lead to good adhesion between each other phase confirmed by SEM micrograph in Fig. 10. The evidence also showed that the addition HTMS-g-CTAB-MMT into rubber could increase mechanical properties as silane coupling agents promote strong adhesion between rubber and layered silicate.

The incorporation of rigid inorganic fillers could bring up the hardness of rubber as shown in Figure 9. However, for the NR/MMT composites case, the presence of unmodified clay did not harden the rubber which due to the poor compatibility between unmodified clay and the aggregation of the particles in natural rubber matrix as confirmed by SEM micrograph in Fig. 10 showing void in NR/MMT composites.

Summary

FT-IR and XRD results indicated the presence of the CTAB and HTMS on the surface of modified clay and the widening of the layers in the MMT. The addition of clay had small effect on the scorch and cure times. The cure time appeared to slightly increase with unmodified clay content, while scorch time hardly varies, probably due to a poor compatibility between the unmodified clay and hydrophobic polymer. However, the cure time and scorch time was slightly reduced in presence of the organoclay. In term of mechanical properties, modulus, tensile strength and tear strength of NR/HTMS-g-CTABMMT composite were higher than those of NR/MMT and NR /CTAB-OMMT composite. Meanwhile, elongation at break of the NR /HTMS-g-CTABMMT composite decreased more than the latter cases. SEM micrograph confirmed better compatibility between organic modified clay and the rubber phase.

References

- [1] M. A. Lopez-Manchado, M. Arroyo, B.Herrero and J. Biagiotti: *J. App. Polym. Sci. Forum* Vol. 89 (2003), p. 1.
- [2] Rajkiran R Tiwari, Kartic C Khilar and Upendra Natarajan: *App. Clay Sci.*, (2007).
- [3] La'szlo' Sza'zdi, Andra's Pozsgay and Be'la Puka'nszky: *Eur. Polym. J. Forum* Vol. 43 (2007), p. 345.
- [4] M. Arroyo, M. A. Lo'pez-Manchado and B. Herrero: *Polymer Forum* Vol. 44 (2003), p. 2447.
- [5] Siby Varghese and J. Karger-Kocsis: *J. App. Polym. Sci. Forum* Vol. 91 (2004), p. 813.
- [6] Qing-Xiu Jia, You-Ping Wu, Yi-Qing Wang, Ming Lu and Li-Qun Zhang: *Comp. Sci. Tech.* (2007), in press.
- [7] Jing Cao Dai and Ji Tai Huang: *App. Clay Sci. Forum* Vol. 15 (1999), p. 51.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นายนันทวัฒน์ แดงจันทร์

ที่อยู่

144 ซอยประชากรราษฎร์บำเพ็ญ 14
ถนนประชากรราษฎร์บำเพ็ญ เขตห้วยขวาง
กทม. 10310

E-mail: nantavat@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุ
พอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร

พ.ศ. 2551

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการและ
วิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2548

ฝึกการปฏิบัติงานฝ่ายวิจัยและพัฒนา องค์การสวนยาง
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

พ.ศ. 2549-2550

ผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร