

ผลของการจัดเรียงออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและ
สมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต

EFFECTS OF ORGANOCCLAY ORIENTATION ON
MECHANICAL AND GAS BARRIER PROPERTIES OF
NATURAL RUBBER/ORGANOCCLAY COMPOSITES

พลอย ยโสวัตต์

PLOY YASOWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-014-010

**EFFECTS OF ORGANOCLAY ORIENTATION ON
MECHANICAL AND GAS BARRIER PROPERTIES OF
NATURAL RUBBER/ORGANOCLAY COMPOSITES**

PLOY YASOWAN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2013

KMITL-2013-SC-M-014-010

COPYRIGHT 2013

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของการจัดเรียงออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติ
 ด้านการซึมผ่านก๊าซของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต
 Effects of Organoclay Orientation on Mechanical and
 Gas Barrier Properties of Natural Rubber/Organoclay
 Composites

นักศึกษา

นางสาวพลอย โยโสวันต์

รหัสประจำตัว

52651203

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.บุญณมา	ศิริพันธ์โนน	
ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลธี	
รศ.ดร.สมบัติ	ชนะวันต์	
รศ.ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	
รศ.ดร.อิทธิพล	แจ่มชัด	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 1 เมษายน พ.ศ. 2556 เวลา 9.30 - 12.30 น.
 สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

 (รองศาสตราจารย์ ดร.คุณหญิง อาริษา ธีระพัฒน์)
 คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่.....23.....เดือน.....พ.ศ.....56.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการจัดเรียงออร์กาโนเคลย์ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต
นักศึกษา	นางสาวพลอย ยโสวันต์
รหัสประจำตัว	52651203
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติและออร์กาโนเคลย์เพื่อศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของออร์กาโนเคลย์ ที่มีต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเพื่อพัฒนาสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุคอมโพสิต ได้แก่ ชนิดของเคลย์ ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ปริมาณเคลย์ (0 – 20 phr) และผลของการจัดเรียงตัวของเคลย์โดยการนำยางธรรมชาติผสมสูตรผ่านลูกกลิ้งจำนวนรอบต่างๆ (0-20 รอบ) โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation) การเตรียมวัสดุคอมโพสิต โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) จากนั้นทำการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจน จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการผสมยางธรรมชาติกับ Claytone[®] จะทำให้เกิดประสิทธิภาพการเชื่อมโยงที่ดีกว่า รวมทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของคอมโพสิตที่ได้มีค่าสูงกว่าคอมโพสิตที่ใช้ Calcined clay และ MMT จากการศึกษาปริมาณ Claytone[®] พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ Claytone[®] (0-20 phr) ความสามารถในการกระจายตัวของเคลย์ดีทั่วทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตเพิ่มสูงขึ้น ทำให้สมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนลดลง 2 เท่าเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติม Claytone[®] และจากผล XRD ทำให้ทราบว่า วัสดุคอมโพสิตที่เตรียมได้จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nano composites) ในการศึกษาการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] พบว่าทั้ง 2 วิธี คือ การนำยางผสมสูตรผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0 – 20 รอบ และการคลายแรงเค้น สามารถปรับปรุงการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ให้ดีขึ้น แต่สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของคอมโพสิตที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องจาก Claytone[®] มีการจัดเรียงตัวดีอยู่แล้ว การเพิ่ม

การจัดเรียงตัวทั้งสองวิธี อาจเพิ่มการจัดเรียงให้ดีขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการกระจายตัวและการแตกตัวของ Claytone[®] ซึ่งสังเกตได้จากภาพ SEM

คำสำคัญ : ขางธรรมชาติ, ออร์กาโนเคลย์, การเรียงตัวของเคลย์, การซึมผ่านก๊าซ

Thesis Title	Effects of organoclay orientation on mechanical and gas barrier properties of natural rubber/organoclay composites
Student	Miss Ploy Yasowan
Student ID	52651203
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud
Thesis co-Advisor	Assoc.Prof.Dr. Taweechai Amornsakchai

ABSTRACT

This work was focused on effects of organoclay orientation on mechanical and gas barrier properties of natural rubber/organoclay composites. Factors affecting NR/organoclay composites were investigated including types (i.e., Claytone[®], Calcined clay and Montmorillonite (MMT)), clay loading (0 – 20 phr) and clay orientation by two-roll mill (0 – 20 times) and stress relaxation. Samples were prepared by mixing NR (STR-5L) with additives by using a two-roll mill and shaped into rubber sheets by a compression molding machine. The samples were then characterized for cure characteristics, mechanical properties, morphology and gas barrier properties. It was found that the curing efficiency was increased with the addition of Claytone[®]. Mechanical properties and gas barrier properties were also better than of those of Calcined clay and MMT. By adding Claytone[®] up to 20 phr, it was found that Claytone[®] still exhibited good dispersion with increasing Claytone[®] loading, resulting in mechanical and gas barrier properties. Oxygen permeability was decreased about twice compared with NR. And the result of XRD patterns NR/organoclay composites, it may be concluded that structures exhibit the intercalated nanocomposites. By studying clay orientation, both methods, i.e., two-roll mill and stress relaxation, could improve clay orientation. However, mechanical and gas barrier properties of the NR/organoclay composites were not significantly changed. This might be

derived from good Claytone[®] orientation. Both methods could slightly change in clay orientation, but similar clay dispersion as observed by SEM.

Keywords : natural rubber, organoclay, clay orientation, gas barrier properties

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และความเอาใจใส่เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งการอนุเคราะห์ออ์กาไนเคิลย์และเครื่องทดสอบสมบัติด้านการซึมผ่านของก้ำซอออกซิเจน

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์ โนน ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ รศ.ดร.สมบัติ ธารวันต์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ไทยรับเทค จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารเคมีสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ คุณสุจิต สอนสะอาด คุณปราณี บุญวัฒน์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้อง R4/5 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (สาธิต) ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องทดสอบ

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้อง ชาวพอลิเมอร์ทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะ และเป็นกำลังใจและบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณคุณพ่อและคุณแม่ ที่เป็นกำลังใจอันยิ่งใหญ่ คอยช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่อง และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน ทำให้ผู้วิจัยมีทุกสิ่งทุกอย่างจนถึงทุกวันนี้

พลอย ยโสวันต์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูปภาพ	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	7
2.1.1 สมบัติทางเคมี	7
2.1.2 สมบัติทางกายภาพ	8
2.1.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	9
2.2 ยางแท่ง	11
2.2.1 กระบวนการผลิตยางแท่ง	11
2.2.1.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง	11
2.2.1.2 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง	12
2.2.2 สมบัติมาตรฐานยางแท่ง	12
2.3 สารเติมแต่ง (Additives)	14
2.3.1 สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents)	14
2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)	15
2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators)	16
2.3.4 สารช่วยในกระบวนการผลิต (Processing aids)	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 สารตัวเติม (Fillers)	16
2.4 เคลย์ (Clay)	17
2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของเคลย์	17
2.4.2 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์	19
2.4.3 นาโนเคลย์หรือออร์กาโนเคลย์ (Nanoclay หรือ Organoclay)	20
2.5 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer nanocomposites)	21
2.6 สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต	24
2.6.1 คำจำกัดความของสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	24
2.6.2 การคำนวณสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	31
3.1 แผนการดำเนินงาน	31
3.2 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	31
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	34
3.4 วิธีการทดลอง	35
3.5 การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิตที่ได้	38
3.5.1 ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)	38
3.5.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล	39
3.5.3 ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density, n)	40
3.5.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)	40
3.5.5 วิเคราะห์ปริมาณ Claytone® ในชิ้นงานด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)	41
3.5.6 วิเคราะห์ระยะห่างของระนาบแผ่นเคลย์ (D-spacing) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffraction, XRD)	41
3.5.7 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.8 ศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	43
4.1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone [®] , Calcined clay และ MMT ที่ 10 และ 20 phr	45
4.1.1 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อลักษณะการเชื่อมโยง	45
4.1.2 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อมโยง (n)	48
4.1.3 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสัณฐานวิทยา	49
4.1.4 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล	52
4.1.5 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	55
4.1.6 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติความร้อนเชิงกล	57
4.1.7 สรุปผลของชนิดและปริมาณเคลย์	59
4.2 ศึกษาผลของปริมาณ Claytone [®] เท่ากับ 0 – 20 phr ที่มีต่อสมบัติของยาง	59
4.2.1 ผลของปริมาณ Claytone [®] ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อมโยง (n)	59
4.2.2 ผลของปริมาณ Claytone [®] ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone [®]	61
4.2.3 ผลของปริมาณ Claytone [®] ที่มีต่อสัณฐานวิทยา	62
4.2.4 ผลของปริมาณ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติเชิงกล	63
4.2.5 ผลของการวิเคราะห์ปริมาณ Claytone [®] ในชิ้นงาน	65
4.2.6 ผลของปริมาณ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	66
4.2.7 สรุปผลของปริมาณ Claytone [®]	67
4.3 ศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®]	68
4.3.1 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] โดยการนำยางผสมสูตรมาผ่านลูกกลิ้ง	69
4.3.1.1 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone [®] ที่ปริมาณ 20 phr	69
4.3.1.2 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสัณฐานวิทยา ที่ปริมาณ 20 phr	71
4.3.1.3 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ที่ปริมาณ 20 phr	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1.4 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจน ที่ปริมาณ Claytone [®] 20 phr	74
4.3.1.5 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone [®] ที่ปริมาณ 5 phr	76
4.3.1.6 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า ที่ปริมาณ 5 phr	78
4.3.1.7 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ที่ปริมาณ 5 phr	80
4.3.1.8 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจน ที่ปริมาณ Claytone [®] 5 phr	82
4.3.2 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] โดยการคลายแรงเค้น	83
4.3.2.1 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone [®]	85
4.3.2.2 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า	86
4.3.2.3 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติเชิงกล	88
4.3.2.4 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®] ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจน	90
สรุปผลของการจัดเรียงตัว Claytone [®]	91
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	92
5.1 สรุปผลการทดลอง	92
5.1.1 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์	92
5.1.2 ผลของปริมาณ Claytone [®]	92
5.1.3 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone [®]	93
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารอ้างอิง	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติทางความร้อน	98
ภาคผนวก ข การทดสอบความหนาแน่นเชื่อมโยง	101
ภาคผนวก ค การทดสอบสมบัติเชิงกล	106
ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน	108
ภาคผนวก จ การคำนวณปริมาณ Claytone [®]	109
ภาคผนวก ฉ การคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซิลิเกต	110
ภาคผนวก ช การทดสอบค่าความหนืดมูนนี่	112
ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกยางธรรมชาติของประเทศไทย ปี 2547-2554	1
1.2 มูลค่าการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทย (ล้านบาท) ปี 2548-2552	2
1.3 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของยางแต่ละชนิด	4
1.4 การเปรียบเทียบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของยางแต่ละชนิด	4
2.1 การระบุคุณภาพมาตรฐานของยางแท่งไทยเอสทีอาร์	13
2.2 การเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของกำมะถันทั้งสองชนิด	15
3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR 5L)	32
3.2 สมบัติของออร์กาโนเคลย์ เกรด Claytone [®]	33
3.3 สมบัติบางประการของแคลไซน์ เคลย์ (Calcined clay, Iceberg [®])	33
3.4 สมบัติบางประการของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	33
3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ	36
4.1 อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย	43
4.2 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของ Claytone [®] และยางธรรมชาติที่ผสมสูตรที่ปริมาณ Claytone [®] ต่างๆ	62
4.3 ปริมาณ Claytone [®] ที่แน่นอนในชิ้นงานตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีการเติม Claytone [®] ในปริมาณต่างๆ	66
4.4 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของ Claytone [®] สูตร NR5CT, NR10CT, NR15CT และ NR20CT	67
4.5 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรที่ปริมาณ Claytone [®] 20 phr เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ	70
4.6 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรที่ปริมาณ Claytone [®] 5 phr เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ	77
4.7 เปอร์เซ็นต์ระยะหดที่ลดลงของยางผสมสูตรที่ความหนาเริ่มต้น 0.3, 0.5 และ 1.0 cm	84
4.8 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ผลของการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone [®] 5 phr โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm	86

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า	
1.1	เส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซตามทฤษฎี Tortuous path (a) เมตริกซ์ ที่ไม่มีเคลย์ และ (b) เมตริกซ์ ที่มีเคลย์	3
1.2	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กักอากาศ	3
2.1	โครงสร้างยางธรรมชาติ Cis-1, 4-polyisoprene	7
2.2	โครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์	18
2.3	ตัวอย่างแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	19
2.4	(ซ้าย) เคลย์ที่มีชั้นซิลิเกตและประจุบวก (ขวา) แสดงออร์กาโนเคลย์ที่ประจุเดิมถูกแทนที่ด้วยประจุบวกของสารอินทรีย์	20
2.5	ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโมเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์	21
2.6	โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง	23
2.7	โครงสร้างของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายอนุภาคอยู่ในนาโนคอมโพสิตเพื่อสกัดกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ (Tortuous path)	25
3.1	กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตร แสดงเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) และเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2})	38
4.1	พฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง เมื่อทำการผสมเคลย์ในปริมาณ 10 phr	45
4.2	ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) ของยางผสมสูตร	46
4.3	ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อเวลาเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางผสมสูตร	47
4.4	ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อดัชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) ของยางผสมสูตร	47
4.5	ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่า Plateau modulus (M_{HP}) ของยางผสมสูตร	48
4.6	ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ที่แตกต่างกันในปริมาณต่างๆ	49
4.7	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) Claytone [®] (c) Calcined clay และ (d) MMT	50
4.8	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) (a1) NR10CT (b1) NR10IB และ (c1) NR10MMT (ขวา) ร่วมกับ (a2) NR20CT (b2) NR20IB และ (c2) NR20MMT	51

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเคลย์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 20 phr	52
4.10 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร	54
4.11 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร	54
4.12 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร	55
4.13 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร	55
4.14 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของยางผสมสูตร	56
4.15 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเคลย์ ปริมาณ 20 phr (ก) ค่ามอดุลัสสะสม (E') และ (ข) ค่า $\tan \delta$	58
4.16 ความหนาแน่นเชื่อม โยง (Crosslink density) ของยางธรรมชาติที่ผสม Claytone [®] ในปริมาณ 0-20 phr	60
4.17 พฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ของยางธรรมชาติที่ผสม Claytone [®] ในปริมาณ 0-20 phr	60
4.18 XRD patterns ของ Claytone [®] กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone [®] ในปริมาณ 0-20 phr	62
4.19 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ (a) NR5CT (b) NR10CT (c) NR15CT และ (d) NR20CT	63
4.20 ผลของปริมาณ Claytone [®] ต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร	64
4.21 ผลของปริมาณ Claytone [®] ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร	64
4.22 ผลของปริมาณ Claytone [®] ต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร	65
4.23 ผลของปริมาณ Claytone [®] ต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร	65
4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางธรรมชาติที่ผสมด้วย Claytone [®] ปริมาณ 0 – 20 phr	67
4.25 XRD patterns ของ Claytone [®] กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone [®] 20 phr เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ	70

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 20 phr ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) (a) NR20CT0 (b) NR20CT5 (c) NR20CT10 (d) NR20CT15 และ (e) NR20CT20	72
4.27 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร NR20CT	73
4.28 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร NR20CT	73
4.29 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร NR20CT	74
4.30 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร NR20CT	74
4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางผสมสูตร NR20CT ที่ผ่านลูกกลิ้งจำนวนรอบต่างๆ	75
4.32 XRD patterns ของ Claytone® กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone® 5 phr เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ	77
4.33 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr (ซ้าย) ในทิศทางตามแนวขวางเครื่องจักร (TD) (a1) NR5CT0 (b1) NR5CT5 (c1) NR5CT10 (d1) NR5CT15 และ (e1) NR5CT20 (ขวา) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) (a2) NR5CT0 (b2) NR5CT5 (c2) NR5CT10 (d2) NR5CT15 และ (e2) NR5CT20	80
4.34 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร NR5CT	81
4.35 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร NR5CT	81
4.36 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร NR5CT	82
4.37 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร NR5CT	82
4.38 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางผสมสูตร NR5CT ที่ผ่านลูกกลิ้งจำนวนรอบต่างๆ	83

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที) เมื่อนำยางผสมสูตรที่ไม่ได้ทำการเชื่อมโยงมาทดสอบโดยการวัดแรงที่ได้โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm	85
4.40	XRD patterns ผลของการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone [®] 5 phr โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm	86
4.41	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone [®] 5 phr (ซ้าย) ผลของก่อนการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง (a1) NR5CT 0.3 cm (b1) NR5CT 0.5 cm และ (c1) NR5CT 1.0 cm (ขวา) ผลของหลังการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง (a2) NR5CT 0.3 cm (b2) NR5CT 0.5 cm และ (c2) NR5CT 1.0 cm	88
4.42	ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร	89
4.43	ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร	89
4.44	ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยึดของยางผสมสูตร	90
4.45	ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร	90
4.46	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางผสมสูตร NR5CT ที่ไม่ผ่าน และผ่านการคลายแรงเค้นในระดับความหนาที่แตกต่างกัน	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติอันดับ 1 ของโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 ในปี พ.ศ. 2554 มีปริมาณการผลิตรวม 3.31 ล้านตัน และมีพื้นที่ปลูกยาง 18.09 ล้านไร่ ส่งออกยาง 2.79 ล้านตัน (3.88 แสนล้านบาท) [1] มีการส่งออกยางดิบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และมีการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางที่แบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ตามประเภทการใช้งานเป็นจำนวนมาก ดังตารางที่ 1.2 เนื่องจากในการใช้งานบางประเภทต้องการสมบัติที่เฉพาะตัว เช่น ยางในรถยนต์, ซีล (Seal), ปะเก็น (Gaskets) และ โอริง (O-ring) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวต้องการสมบัติที่เฉพาะตัว คือ สมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซ ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้วัตถุดิบ สารตัวเติม ซึ่งถือว่าเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตให้เหมาะสม

ตารางที่ 1.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกยางธรรมชาติของประเทศไทย ปี 2547-2554 [1]

ปี พ.ศ.	ปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติ (ล้านตัน)	มูลค่า (แสนล้านบาท)
2547	3.10	1.42
2548	3.01	1.53
2549	3.23	2.18
2550	3.13	2.06
2551	3.03	2.41
2552	3.20	1.75
2553	3.20	2.96
2554 (ม.ค.-ต.ค.)	2.80	3.88

ที่มา : ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

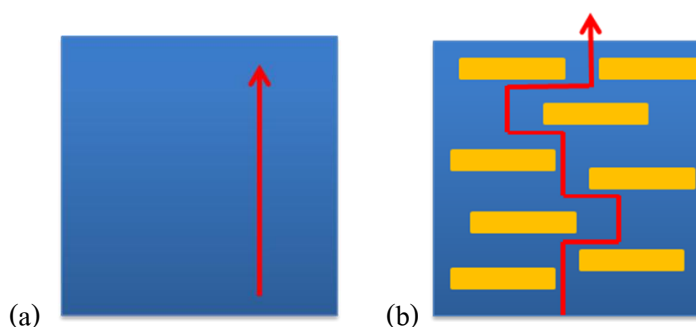
ตารางที่ 1.2 มูลค่าการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางของประเทศไทย (ล้านบาท) ปี 2548-2552 [1]

ประเภท	2548	2549	2550	2551	2552
ยางยานพาหนะ	3,978.27	5,155.17	6,794.40	6,809.02	7,503.06
ท่อยาง	2,556.51	2,807.35	2,929.66	3,678.04	2,665.93
สายพาน	1,302.04	1,620.57	864.92	906.78	864.97
ยางคอมพาวด์	826.86	888.01	1,273.78	1,278.43	858.79
ยางปูพื้น	121.61	119.29	89.90	818.79	730.10
ยางใน	459.22	709.80	732.31	768.58	711.79
ถุงมือยาง	476.46	671.26	625.39	738.46	646.97
ปะเก็น/ซีลยาง	725.73	643.36	668.27	715.63	628.67
ยางรีเครม	99.28	129.40	149.37	192.24	123.05
ผ้ายาง	187.61	193.47	176.52	141.92	98.05
ยางลบ	38.54	30.18	35.62	29.13	40.67
ยางวัลคาไนซ์	532.54	217.06	151.97	31.54	33.71
ยางยืด	55.98	65.30	37.36	9.5	19.14
ยางรัดของ	45.39	26.14	9.14	9.68	6.73
อื่นๆ	10,712.05	11,499.43	12,309.67	12,263.83	9,100.49
รวม	22,118.09	24,791.55	26,871.62	28,430.78	24,059.12

ที่มา : ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร

เนื่องจากยางธรรมชาติ มีลักษณะเด่นหลายประการ อาทิเช่น ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ความทนทานต่อการขีดถู (Abrasion resistance) ความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง มีสมบัติการเหนียวติด (Tack) ที่ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซเมื่อเทียบกับยางชนิดอื่นๆ เช่น ยางบิวทิล (Butyl rubber) ดังตารางที่ 1.3 ทำให้เป็นปัญหาในการนำยางธรรมชาติมาใช้งานในบางประเภทที่ต้องการสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซ จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซในยางธรรมชาติให้มีค่าสูงขึ้นกว่าเดิมหรือสูงขึ้นจนถึงระดับที่ใกล้เคียงกับยางบิวทิล ดังตารางที่ 1.4 โดยการนำสารตัวเติมที่เรียกว่า เคลย์ หรือดินขาว (Clay mineral) บางชนิดมาใช้ในงานวิจัย เนื่องจากเคลย์มีโครงสร้างที่เป็นผลึกมีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมซ้อนกันเป็นชั้นๆ ขนาดใหญ่แต่ละชั้นยึดกันด้วยแรงพันธะไฮโดรเจน และแรงแรงแคววาล์ ในบางกระบวนการผลิตอาจมีการแยกชั้นของโครงสร้างให้แยกออกจากกันเป็น

แผ่น (Layer, Stacks หรือ Platelets) ส่งผลทำให้มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูงขึ้นจะช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซได้ เนื่องจาก มีพื้นที่ที่ก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้ลดลง การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ โดยก๊าซต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดเคี้ยวรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ตามทฤษฎี Tortuous path ดังรูปที่ 1.1 จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านของก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวเป็นการเพิ่มทางเลือกในการนำวัสดุดิบมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายมากขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการผลิตยางขึ้นส่วนอุปกรณ์ทางการกีฬา เช่น จุกยางกันซึม ลูกบอล วัสดุที่เป่าลมได้ ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.1 เส้นทางเคลื่อนที่ของก๊าซตามทฤษฎี Tortuous path (a) เมตริกซ์ ที่ไม่มีเซลล์ และ (b) เมตริกซ์ ที่มีเซลล์ [2]



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กักอากาศ [3]

จากสมบัติของยางธรรมชาติและเซลล์ ที่กล่าวไว้ข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านของก๊าซในยางธรรมชาติให้มีค่าสูงขึ้น เป็นการเพิ่มมูลค่าและความสามารถในการใช้งานยางธรรมชาติให้มีความหลากหลายขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติม ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT ผลของปริมาณ Claytone[®] ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] โดยการนำยางผสมสูตรมาผ่าน

ลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบต่างๆ และผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation) และเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต สมบัติที่ศึกษาได้แก่ สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) สัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยเทคนิค SEM และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Gas barrier property)

ตารางที่ 1.3 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของยางแต่ละชนิด [3]

สมบัติ	ชนิดของยาง							
	NR	IR	SBR	BR	NBR	CR	IIR	EPDM
ทนต่อแรงดึง (ไม่มีสารเสริมแรง)	1	2	5	6	5	3	4	5
ทนต่อการขีดถู	4	4	3	1	2	3	4	3
ทนต่อความร้อน	5	5	4	4	3	3	3	2
ทนต่อแสง UV	4	4	3	3	3	2	2	1
ทนต่อโอโซน	4	4	4	3	3	2	2	1
ทนต่อน้ำมัน	6	6	5	6	1	2	6	4
ทนต่อกรดและด่าง	3	3	3	3	4	2	2	1
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	1	1	2	2	5	4	2	2
การซึมผ่านของก๊าซ	5	5	4	4	2	3	1	4

หมายเหตุ 1 : ดีมากที่สุด 6 : ต่ำที่สุด

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR), ยางไอโซพรีน (Isoprene rubber, IR), ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene-butadiene rubber, SBR), ยางบิวทาไดอิน (Butadiene rubber, BR), ยางบิวทาไดอินอะคริโลไนไตรล์ (Butadiene-acrylonitrile rubber, NBR), ยางคลอโรพรีน (Chloroprene rubber, CR), ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR) และยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene-propylene rubber, EPDM)

ตารางที่ 1.4 การเปรียบเทียบสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของยางแต่ละชนิด [3]

ชนิดของยาง	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ 25°C ([cm ³ . cm]/[cm ² . s (cm.Hg)] x 10 ¹⁰)
ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR)	23.3
ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR)	1.3

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาวัสดุยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต โดยเฉพาะสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนและสมบัติเชิงกล โดยเน้นศึกษาผลของปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุ ได้แก่ ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ ผลของปริมาณ Claytone® และผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone®

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการเตรียมอัตราส่วนระหว่างเคลย์และยางที่เหมาะสม โดยศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone®, Calcined clay และ MMT ที่ 10 และ 20 phr
2. ศึกษาผลของปริมาณ Claytone® เท่ากับ 0 – 20 phr ที่มีต่อสมบัติของยาง
3. ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ได้แก่

- ศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone®

วิธีที่ 1 ศึกษาผลของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรเมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

วิธีที่ 2 ศึกษาผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation)

ศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยทำการทดสอบสมบัติของยางที่เตรียมได้ ได้แก่

- ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) ได้แก่ เวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2}), เวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$), ดัชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) และ Plateau modulus (M_{HF})
- สมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break), ค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (Rubber modulus, M_{100}) และความแข็งกด (Hardness)
- การหาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ด้วยเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvent swelling method)
- ทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลด้วยเทคนิค Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)
- วิเคราะห์ปริมาณ Claytone® ในชิ้นงานด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)
- วิเคราะห์ระยะห่างของระนาบแผ่นเคลย์ (D-spacing) ด้วย X-ray diffractometer (XRD)
- สันฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM)
- สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Gas barrier property)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาความรู้เกี่ยวกับผลของออร์กาโนเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของวัสดุคอมโพสิต
2. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เช่น จุกยางกันซึมลูกบอล วัสดุที่เป่าลม หรือพองตัว เป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้งานของยางธรรมชาติ

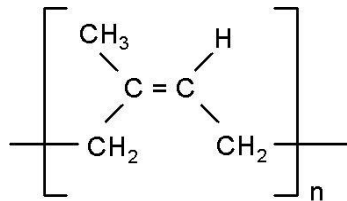
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

2.1.1 สมบัติทางเคมี [4]

ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหน่วยย่อยของแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรเคมีคือ C_5H_8 เรียกชื่อทางเคมีว่า ไอโซพรีน (Isoprene) โครงสร้าง 1 โมเลกุลประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีนที่ต่อกันเป็นสายเส้นตรงแบบซิส (Linear cis- 1,4 polyisoprene) ประมาณ 3,000 ถึง 5,000 หน่วย ไอโซพรีนมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 400,000 มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีลักษณะกระบวนการแปรรูปที่ดี อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปยางธรรมชาตินอกจากมีสารไฮโดรคาร์บอนแล้ว ยังมีสิ่งเจือปนอื่นประมาณ 5% ได้แก่ สารโปรตีน เถ้า สารที่สกัดได้ด้วยอะซิโตน (Acetone extractables) และความชื้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างยางธรรมชาติ Cis-1, 4-polyisoprene [4]

เนื่องจากแต่ละหน่วยไอโซพรีนของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (Double bond) และหมู่แอลฟา-เมทิลีน (α -methylene group) ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงเชื่อมโยงด้วยกัมมะถัน คือพันธะคู่ของยางเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการเชื่อมโยงด้วยกัมมะถัน อย่างไรก็ตามพันธะคู่ดังกล่าวไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน หรือ โอโซน ซึ่งเป็นผลให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ เช่น ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิด Hydrogenated rubber กับคลอรีนเกิด Chlorinated rubber กับไฮโดรเจนคลอไรด์เกิด Hydrochlorinated rubber และยังสามารถทำให้เกิดยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นวง (Cyclized rubber) โดยปฏิกิริยา Cyclization นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อการบวมพองในตัวทำละลายต่างๆ เช่น Aliphatic, Aromatic และ Halogenated hydrocarbon

2.1.2 สมบัติทางกายภาพ [5]

ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20°C มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ประมาณ -70°C คือยางจะเปลี่ยนจากมีความยืดหยุ่นเป็นแข็งและเปราะคล้ายแก้ว สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้เมื่อเกิดการเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขูดสูงขึ้นไป มีสมบัติเด่นด้านความเหนียวติดกันที่ดี สมบัติด้านการขึ้นรูปที่ดี ความร้อนสะสมในขณะการใช้งานต่ำ ยางธรรมชาติมีสายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นดี และมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง

ยาง มีสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ที่มีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือส่วนที่ไหลได้คล้ายของเหลวหนืด (Viscous liquid) และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น (Elastic solid) โดยในสภาพที่ยังไม่เชื่อมโยง ยางยังคงสามารถไหลได้อยู่ หมายถึงยางมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่องค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นมีสัดส่วนที่ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อยางได้รับการเชื่อมโยงเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของโมเลกุลยางจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและทำให้ยางไม่สามารถไหลได้อีก นั่นคือยางที่เชื่อมโยงแล้วจะมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเชื่อมโยงจะทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดมีสัดส่วนลดลง แต่ไม่สามารถทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดนี้หายไปจากเนื้อยางได้หมด ดังนั้น ยางจึงไม่ใช่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้ยางเชื่อมโยงที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นระยะเวลาต่างๆ และเมื่อแรงกระทำจากภายนอกหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างที่ใกล้เคียงเดิมเท่านั้นแต่จะไม่กลับคืนสู่รูปร่างเดิมอย่างสมบูรณ์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบางส่วนจะได้กลับคืนมาแต่บางส่วนจะอยู่ตัวอย่างถาวร การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของยางเชื่อมโยงนี้เป็นผลมาจากองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่ยังหลงเหลืออยู่ สมบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเป็นวิสโคอีลาสติกของยาง ได้แก่ การเสีรูปร่างถาวร (Permanent set หรือ Set) การคลายแรงเค้น (Stress relaxation) และการคืบ (Creep) สมบัติเหล่านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของยางแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติม สารทำให้ยางนิ่ม ระบบการเชื่อมโยงและกระบวนการผลิต [6]

การเสีรูปร่างถาวร (Permanent set หรือ Set) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยังคงอยู่หลังปลดปล่อยแรงจากภายนอกที่มากระทำ ถ้ายางถูกยืดภายใต้สภาวะที่กำหนดและปล่อยให้หดตัวกลับ ระยะยืดที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการหดตัวกลับเรียกว่า การเสีรูปร่างถาวรหลังการดึง (Tension set) ซึ่งมีหน่วยเป็นร้อยละของความยาวตั้งต้น แต่ถ้ายางถูกกดภายใต้สภาวะที่กำหนด การลดลงของความหนาหลังจากที่ได้รับการกดเมื่อเทียบกับความหนาตั้งต้นเรียกว่า การเสีรูปร่างถาวรหลังการกด (Compression set) ซึ่งมีหน่วยเป็นร้อยละเมื่อเปรียบเทียบกับระยะที่กด

การคลายแรงเค้น (Stress relaxation) หมายถึงการลดลงของความเค้นตามเวลาในขณะที่ยังได้รับความเครียดคงที่ ขอบเขตของการลดลงของความเค้นตามเวลาจะแปรผันโดยตรงกับองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในยางหลังการเชื่อมโยง กล่าวคือ หากยางมีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ (ไม่มีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหลงเหลืออยู่) ค่าความเค้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ถ้ายางเชื่อมโยงมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหลงเหลืออยู่มาก ค่าความเค้นจะลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลา

การคืบ (Creep) หมายถึงการเพิ่มขึ้นของความเครียดตามเวลาเมื่อได้รับความเค้นหรือแรงคงที่ ขอบเขตของการเพิ่มขึ้นของความเครียดตามเวลาจะแปรผันโดยตรงกับองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในยางหลังการเชื่อมโยง (เช่นเดียวกับสมบัติการคลายตัวของความเค้น) กล่าวคือหากยางมีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ (ไม่มีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหลงเหลืออยู่เลย) ค่าความเครียดจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ถ้ายางเชื่อมโยงมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหลงเหลืออยู่มาก ค่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเวลา

2.1.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [3]

ความยืดหยุ่น (Elasticity)

สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ กล่าวคือยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงแล้ว จะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

ความเหนียวติดกัน (Tack)

ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่เชื่อมโยง) มีสมบัติในด้านความเหนียวติดกันได้ดีเยี่ยม ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้ง่าย เมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใส่สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย

ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถดกผลึกได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties)

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี ยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานต่อการล้า (Fatigue resistance) สูง

สมบัติต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังมีค่าน้อยกว่ายางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) เล็กน้อย

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulation)

ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance)

ยางดิบละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ความสามารถในการละลายจะลดลงถ้าเกิดการเชื่อมโยงเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ จะไปขัดขวางกระบวนการละลายของยาง จึงทำให้ยางเกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้เท่านั้น การบวมตัวของยางดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ด้วยเหตุนี้ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดในตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties)

ยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางอ่อนไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน) โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยืดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility)

ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก

การเสีรูปร่างหลังการกด (Compression set)

ยางธรรมชาติมีค่าการเสีรูปร่างหลังการกด ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตาม ค่าการเสีรูปร่างหลังการกด ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติการเสีรูปร่างหลังการกดด้อยลง

การกระด้างกระดอง (Rebound resilience)

ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดองสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆทั้งหมด ยกเว้นยาง BR) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนมี Hysteresis ต่ำ

ในทางอุตสาหกรรมยาง วัตถุดิบ “ยางธรรมชาติ” หมายถึงเฉพาะยางที่ได้มาจากต้นยางพารา ซึ่งผลผลิตจากต้นยางพาราที่นำยางสดจะถูกนำไปแปรรูปเบื้องต้นเป็นยางธรรมชาติรูปแบบ และเกรดต่างๆ ได้แก่ ยางแท่งต่างๆ เช่น ยางแผ่นรมควัน ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางเครพ ยางแท่ง ยางสกิม และในรูปของเหลวคือน้ำยางข้น

2.2 ยางแท่ง

2.2.1 กระบวนการผลิตยางแท่ง [7-8]

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเป็นยางแท่ง สามารถใช้ตั้งแต่วัตถุดิบที่สะอาด คือน้ำยางสด (Fresh or field latex) ไปจนถึงวัตถุดิบยางแห้ง คือยางที่จับตัวกันแล้ว (Field coagulum material)

2.2.1.1 การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง

เริ่มต้นจากการรวบรวมน้ำยางสดลงในถังรวมน้ำยาง ทำการกรองน้ำยางให้สะอาดแล้ว ทำให้น้ำยางจับตัวโดยใช้กรดฟอร์มิค หรือกรดอะซิติก หรือสารเคมีอื่นๆ เมื่อได้ยางที่จับตัวแล้วนำไปผ่านเครื่องตัด ซึ่งจะตัดหรือย่อยยางเป็นชิ้นเล็กๆ ในขณะที่ยางกำลังผ่านเครื่องตัดนี้จะต้องฉีดน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรกที่อาจติดมากับยาง ในการผ่านยางเข้าเครื่องตัดหากก้อนยางที่ได้มีลักษณะจับตัวอย่างหลวมๆ คือ ลักษณะของก้อนยางเป็นรูพรุนคล้ายๆ ฟองน้ำ อาจนำยางเข้าเครื่องตัดชนิดที่เรียกว่า แกรนูลเลเตอร์ (Granulator) ได้ แต่หากว่าก้อนยางจับตัวกันแน่นให้นำก้อนยางเข้าเครื่องเครพเพื่อรีดยางออกให้เป็นแผ่นเสี้ยก่อน และในขณะที่รีดยางเป็นแผ่นยางจะถูกฉีดด้วยน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรก จากนั้นจึงนำแผ่นเครพที่ได้ไปผ่านเครื่องตัดยาง ซึ่งอาจเป็นชนิดแฮมเมอร์มิล (Hammermill) หรือแกรนูลเลเตอร์ หรือ เซรีดเดอร์ (Shredder) เมื่อได้ยางอยู่ในลักษณะเป็นเม็ด หรือชิ้นเล็กๆ แล้ว รวบรวมยางเหล่านี้ลงกระบะอบนำเข้าเครื่องอบใช้ลมร้อนอุณหภูมิประมาณ 100-110 °C ใช้เวลาอบจนแห้งประมาณ 4 ชั่วโมง แล้วจึงใช้ลมเย็นเป่ายางที่แห้งแล้วให้เย็นลง อุณหภูมิประมาณ 60 °C นำยางที่อบแห้งแล้วมาชั่งน้ำหนัก และอัดเป็นแท่ง แท่งละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 670 × 330 × 170 mm³ หรือขนาดอื่นๆ และห่อแท่งยางด้วยพลาสติก แล้วบรรจุใส่ลัง

2.2.1.2 การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง

ยางแห้งที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตยางแท่ง ได้แก่ ยางแผ่นดิบ (Unsmoked sheet; USS) ยางก้อนถ้วย (Cup lump) และเศษยางอื่นๆ โดยปกติผู้ผลิตมักใช้วิธีการผสมระหว่างยางที่มีความสะอาดพอควร ซึ่งยางเหล่านี้จะมีราคาสูง ได้แก่ ยางแผ่นดิบผสมกับยางที่มีความสกปรกกว่าชิ้นแรกของการผลิตยางที่มีความสกปรกอันเนื่องจากการมีสารอื่นเจือปนจะถูกรวบรวมลงในถังแช่ด้วยน้ำเพื่อปล่อยให้สิ่งสกปรกต่างๆ มีโอกาสตกตะกอนไปก่อน แล้วจึงผ่านยางที่แช่น้ำแล้ว ไปยังเครื่องตัดย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งจำนวนครั้งและจำนวนเครื่องที่ใช้ขึ้นอยู่กับความสกปรกของยาง จากนั้นยางจะถูกนำผ่านเครื่องเครพ จะมีการผสมยางแผ่นที่มีความสะอาดลงไปโดยจะปล่อยให้ยางแผ่นผสมคลุกเคล้ากับเศษยางในบ่อรวม แล้วนำยางผสมผ่านเครื่องรีดเครพ และเครื่องตัดย่อย ตามลำดับ ในกรณีของการใช้ยางแห้งทำเป็นยางแท่งทุกขั้นตอนจะอาศัยน้ำฉีดชะล้างยางอย่างมาก เมื่อได้ยางอยู่ในลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ แล้วขั้นตอนต่อไปทำเช่นเดียวกับกรณีของการใช้น้ำยางผลิตยางแท่ง

2.2.2 สมบัติมาตรฐานยางแท่ง [9]

การระบุมาตรฐานสมบัติยางแท่งของแต่ละประเทศส่วนใหญ่จะอิงการกำหนดมาตรฐานตามมาตรฐานขององค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) ดังตารางที่ 2.1 แสดงรายการกำหนดมาตรฐานสมบัติต่างๆ ของยางแท่งไทย

ตารางที่ 2.1 การระบุคุณภาพมาตรฐานของยางแท่งไทยเอสทีอาร์ [9]

สมบัติ	ชั้นยาง							
	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5CV	STR 10	STR 10CV	STR 20	STR 20CV
ปริมาณสิ่งสกปรก, %ไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า, %ไม่เกิน	0.40	0.40	0.60	0.06	0.06	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน, %ไม่เกิน	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย, %ไม่เกิน*	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po), ไม่ต่ำกว่า	35	35	30	-	30	-	30	-
ดัชนีความอ่อนตัวยาง (PRI), ไม่ต่ำกว่า	60	60	60	60	50	50	40	40
สี วัดด้วยโลวิบอนด์สเกลไม่เกิน	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืด ML(I'+4'), 100°C	-	-	-	**	-	**	-	**
รหัสชั้นใช้สี	ฟ้า	เขียวอ่อน	เขียวอ่อน	ตัวอักษร ขาวบนพื้น เขียวอ่อน	น้ำตาล	ตัวอักษร ขาวบนพื้น น้ำตาล	แดง	ตัวอักษรขาว บนพื้นแดง

* เป็นขีดจำกัดสำหรับผู้ใช้ กรณีของผู้ผลิตต้องมีปริมาณสิ่งระเหย ไม่เกิน 0.50%

** ขีดจำกัดของผู้ผลิต คือ : STR 5CV มีค่าความหนืด 70 (+7, -5), 60 (+7,-5) และ 50 (+7,-5)

STR 10CV มีค่าความหนืด 60 (+7,-5) และ STR 20CV มีค่าความหนืด 65 (+7,-5)

2.3 สารเติมแต่ง (Additives) [10-13]

สารเติมแต่ง (Additives) ของยางหมายถึงสารเคมีต่างๆ ที่ผสมลงไปในการยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ การให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางสามารถเร่งได้โดยการให้ความร้อนยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีเรียกว่า ยางดิบหรือยางไม่เชื่อมโยง (Green rubbers หรือ Uncured rubbers) ส่วนยางที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมีแล้วเรียกว่า ยางเชื่อมโยง (Vulcanized rubbers) สารเคมีต่างๆ ที่ใช้ผสมลงไปในการยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการอาจจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.3.1 สารเชื่อมโยง (Crosslinking agents)

สารเชื่อมโยงที่สำคัญสำหรับยาง ได้แก่ กำมะถัน (Sulfur) เปอร์ออกไซด์ (Peroxides) และสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงผสมเข้ากับยาง แล้วให้อุณหภูมิสูงภายหลังการขึ้นรูปเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลยางแล้วเปลี่ยนโครงสร้างเส้นตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีเสถียรภาพของรูปร่าง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การเชื่อมโยงทำให้งายมีสมบัติเปลี่ยนไป กล่าวคือ

- มีค่าความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent set) ลดลง หรือมีเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่ออุณหภูมิ แสง และการใช้งานนานขึ้น

ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

ระบบเชื่อมโยงด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การเชื่อมโยงเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม) และยางเชื่อมโยงที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้วยเหตุนี้ระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการเชื่อมโยงยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล อย่างไรก็ตามระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันมีข้อจำกัดหลักคือ ไม่สามารถใช้ในการเชื่อมโยงยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล (เช่น ยางซิลิโคนหรือยาง EPDM) ทั้งนี้เนื่องจากพันธะคู่เป็นตำแหน่งที่กำมะถันจะเข้าไป

ทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราเร็วของการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จึงกับปริมาณพันธะคู่ที่มีอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของยาง

ชนิดของกำมะถัน แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. กำมะถัน rombik (Rhombic sulfur) เป็นกำมะถันที่ใช้กันมากที่สุด มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนที่มีกำมะถันอยู่ 8 อะตอม (S_8) สามารถตกผลึกได้ (Crystalline) เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ได้ในระดับหนึ่ง บางครั้งจึงเรียกกำมะถันชนิดนี้ว่า กำมะถันละลายได้ (Soluble sulfur) ระดับความสามารถในการละลายของกำมะถันชนิดนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาการบวม (Bloom) ได้ การบวมดังกล่าวจะทำให้สมบัติความเหนียวติดกัน (Tack) ของยางคอมพาวด์เสียไป ในกรณีนี้จำเป็นต้องแก้ไขด้วยการนำตัวทำละลายที่เหมาะสมไปเช็ดเพื่อกำจัดกำมะถันส่วนที่บวมออกมานี้ทิ้งไป นอกจากนี้ปรากฏการณ์กำมะถันบวมนี้ยังพบได้ในยางที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ หรือในยางที่ใส่กำมะถันในปริมาณที่มากเกินไป

2. กำมะถันอสัณฐาน (Amorphous sulfur) เกิดจากอะตอมของกำมะถันจำนวนมากมาเรียงต่อกัน จึงมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีคล้ายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (100,000 - 300,000) เนื่องจากกำมะถันชนิดนี้ไม่ละลายในยางและในตัวทำละลายส่วนใหญ่จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กำมะถันที่ไม่ละลาย (Insoluble sulfur) กำมะถันชนิดนี้นิยมใช้ในการป้องกันการบวมของกำมะถันมาที่พื้นผิวของยางคอมพาวด์ ทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติพื้นฐานของกำมะถันทั้งสองชนิด [10-13]

สมบัติ	กำมะถัน	
	rombik	อสัณฐาน
น้ำหนักอะตอม	32.06	32.06
ลักษณะภายนอก	ผงสีเหลือง	ผงสีเหลือง
ความถ่วงจำเพาะ	2.07	1.92*
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	112.8 - 119	> 110
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (mm)	< 30	< 30

*ความถ่วงจำเพาะจะลดลงตามปริมาณน้ำมันที่มีอยู่ในกำมะถัน

2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันเพราะปฏิกิริยาระหว่างกำมะถันและยางจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก การเติมสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงลงไป ปริมาณเพียงเล็กน้อยจะช่วยเร่งให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเร็วขึ้น ลดระยะเวลาที่ใช้

ในการเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจน และกำมะถัน เป็นองค์ประกอบ หลักเกณฑ์ทั่วไปในการเลือกใช้สารเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

1. สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้มีระยะเวลาสกรูชที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาตายในระหว่างกระบวนการผลิต
2. เมื่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเริ่มเกิดขึ้น สารเร่งปฏิกิริยาที่เลือกจะต้องทำให้ยางคอมพาวด์มีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงที่สูงและยางที่ได้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงด้วยเช่นกัน
3. สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องเหมาะสมกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่จะใช้ในการเชื่อมโยง
4. สารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบวม

2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงคือสารเคมีที่เติมลงไปในการเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เพราะสารเคมีในกลุ่มนี้จะเข้าไปกระตุ้นสารเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น โดยซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ผสมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาจะสูงขึ้นหากใช้ซิงก์ออกไซด์ร่วมกับกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก เพราะเมื่อสารเคมีทั้งสองทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นสารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ง่าย (ซิงก์สเตียเรต) จึงทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

2.3.4 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยกระบวนการผลิตเป็นองค์ประกอบที่เติมลงไปในการเชื่อมโยงเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตในขั้นตอนต่างๆ เป็นไปได้อย่างง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการผลิต นอกจากนี้สารบางตัวในกลุ่มนี้ยังส่งผลทำให้ยางนิ่มมากขึ้นซึ่งช่วยทำให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น เช่น น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมของคาร์บอนต่อกันแบบอะลิฟาติก (Aliphatic) คือ เรียงต่อกันเป็นสายโซ่ตรงหรือมีกิ่งสาขาด้วยพันธะเดี่ยวเท่านั้น

2.3.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นหนึ่งในสารเติมแต่งที่สำคัญอย่างหนึ่งของยาง เนื่องจากมีราคาถูก ซึ่งสามารถใช้ผสมในยางผสมสูตร หรือผลิตภัณฑ์ยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางตัวยังสามารถทำหน้าที่เสริมแรงให้กับยางส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

- สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น สารตัวเติมชนิดนี้ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) เป็นต้น

- สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตอย่างเดียว สารตัวเติมชนิดนี้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นต้น

2.4 เคลย์ (Clay)

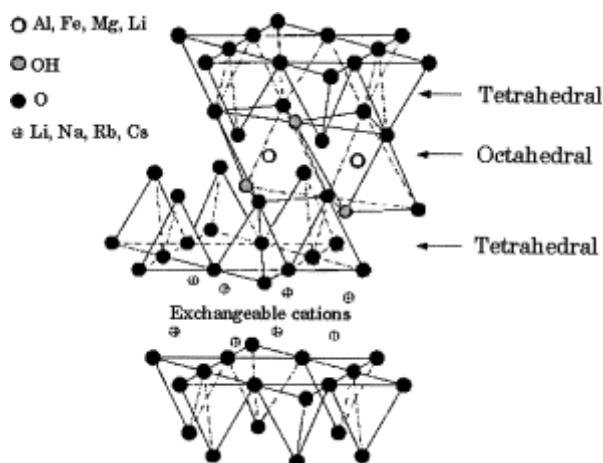
2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของเคลย์

เคลย์ (Clay) หมายถึงแร่ดินเหนียวหรือดินขาว ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matters) และความชื้น [14] แร่ดินเหนียวมีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่ซับซ้อนและมีขนาดอนุภาคเล็ก ส่วนใหญ่เล็กกว่า $2 \mu\text{m}$ และสามารถแบ่งออกได้อีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างผลึก เป็นต้น ลักษณะเด่นของแร่ดินเหนียวที่นำไปสู่เทคโนโลยีของวัสดุประกอบนาโนคือ มีโครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นและเรียงซ้อนกันเป็นชั้น เรียกว่า Layer silicate clay เนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นของเคลย์ ทำให้เคลย์สามารถขยายตัวและหดตัวได้ ทำให้สารอื่นๆ เช่น น้ำหรือสารอินทรีย์สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ได้

แร่ดินเหนียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือชนิดไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานและชนิดที่เป็นผลึก [15] แร่ดินเหนียวที่มีความสำคัญต่อวัสดุประกอบนาโนคือแร่ดินเหนียวที่เป็นผลึก สำหรับแร่ดินเหนียวที่เป็นผลึกที่สำคัญคือ สเมกไทต์เคลย์ (Smectite clay) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 คือประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ต่อแผ่นอะลูมินา 1 แผ่นในหนึ่งหน่วย โดยที่แร่ดินเหนียวประเภทนี้จะมีการยึดและหดตัวได้มาก และแร่ดินเหนียวที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้คือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไป คือ $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ จัดอยู่ในแร่ตระกูลไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น และฝรั่งเศส

มอนต์มอริลโลไนต์มีโครงสร้างชั้นผลึก [16] ประกอบด้วยชั้น 3 ชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Octahedral) ซึ่งมีประจุเป็นบวก ที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีประจุเป็นลบ จึงมีลักษณะโครงสร้างของชั้นผลึกอะลูมินาต่อซิลิกาเป็น 2:1 ความหนาแน่นของชั้นผลึกมีค่าประมาณ 0.7 - 1.0 nm ในขณะที่ความยาวของแผ่นผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตร ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความ

กว้าง (Aspect ratio : L/D) สูง และมีประจุสุทธิเป็นลบจึงมักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และธาตุอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ (ไม่มีประจุ) แสดงดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นจึงทำให้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่พื้นผิวด้วยไอออนที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 0.98 nm เป็น 1.2 – 2.5 nm



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ [16]

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้ว ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (Hydrophillic) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก (โดยทั่วไปพบว่าความหนาของชั้นผลึกสามารถขยายได้ถึง 1.2 nm เมื่อมีความชื้น) จึงเป็นที่รู้จักดีและนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ และเครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่นในภาคปฏิภูลของสัตว์เลี้ยง รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย แต่ในเรื่องของการนำมอนต์มอริลโลไนต์มาผสมกับพอลิเมอร์จะมีปัญหาในเรื่องของการผสมและการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับพอลิเมอร์ได้ยากคือ เมื่อนำมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุประกอบกับพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่มีขั้วจะมีปัญหาในเรื่องของความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับมอนต์มอริลโลไนต์ จึงมีความจำเป็นที่ต้องดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Modified montmorillonite) ให้เป็นสารที่มีความเป็นขั้วลดน้อยลง หรือไม่มีขั้วก่อนนำมาใช้งาน และทำให้โครงสร้างของเคลย์เกิดการแยกชั้นขึ้น เพื่อให้มอนต์มอริลโลไนต์สามารถยึดติดกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติบางประการของพอลิเมอร์ดีขึ้น

ข้อดีของมอนต์มอริลโลไนต์

- สามารถใช้มอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วนเพียง 2-10 % โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์

- รักษาความโปร่งแสงของพลาสติก
- ผสมร่วมกับพอลิเมอร์ได้ง่ายทั้งในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization) หรือเตรียมคอมพาวด์ (Compounding)
- ปลอดภัยต่อการใช้งาน
- สามารถผสมร่วมกับสารเติมแต่งอื่น ๆ
- ราคาไม่แพง



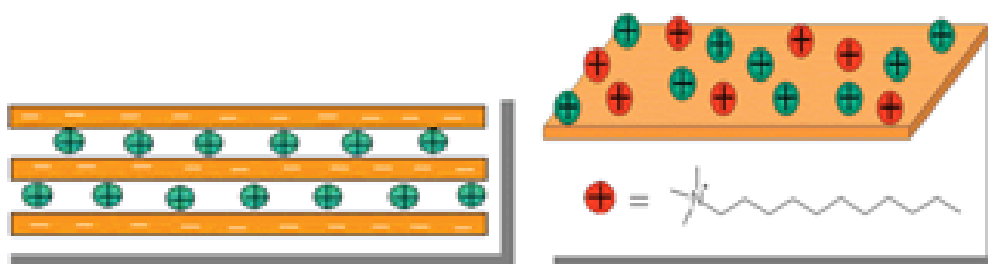
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ [16]

2.4.2 การตัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

การตัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนนำมาใช้งานทำได้โดยการใช้เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ (Quaternary ammonium salt) หรือเกลือฟอสโฟเนียม (Phosphonium salt) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กับโซเดียมไอออน (Na^+) หรือพวกไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline or alkaline earth ions) ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X - ray diffractometer, XRD) พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์มีระยะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของชั้นซิลิเกตซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าไอออนของโซเดียม หรือไอออนของอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ โดยการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างชั้นของซิลิเกตนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของหมู่อัลคิลในเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์

2.4.3 นาโนเคลย์หรือออร์กาโนเคลย์ (Nanoclay หรือ Organoclay) [17]

เมื่อมอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือชอบสารอินทรีย์แทนโดยการแทนที่ประจุต่างๆ ของสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะได้เคลย์ที่เรียกว่า เคลย์ชนิดดัดแปร (Modified clay) หรือออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ สามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์ เนื่องจากความมีขั้วลดลง โดยวิธีในการพัฒนาออร์กาโนเคลย์ไปใช้โดยอาศัยสมบัติความชอบสารอินทรีย์คือการเตรียมเป็นคอมโพสิตกับสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สำคัญคือ พอลิเมอร์ ซึ่งจะสามารถแทรกตัวเข้าไปในพื้นที่ระหว่างชั้นซิลิเกตได้ง่าย แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกซิลิเกตขยายตัวกว้างออก ส่งผลให้ชั้นของซิลิเกตผลึกเกาะกันอย่างหลวมๆ มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น หรือแยกห่างจากกันมากขึ้น จนถึงขั้นแตกออกจากกันโดยอิสระ (Exfoliation) ถ้าพอลิเมอร์แทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตได้มาก และมีขนาดความยาวของสายโซ่มากพอ ชั้นของซิลิเกตแต่ละชั้นอาจแยกออกจากกันได้ ทำให้มีขนาดอนุภาคเสริมแรงอยู่ในระดับนาโนเมตร เพราะชั้นของซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 nm



รูปที่ 2.4 (ซ้าย) เคลย์ที่มีชั้นซิลิเกตและประจุบวก (ขวา) แสดงออร์กาโนเคลย์ที่ประจุเดิมถูกแทนที่ด้วยประจุบวกของสารอินทรีย์ [17]

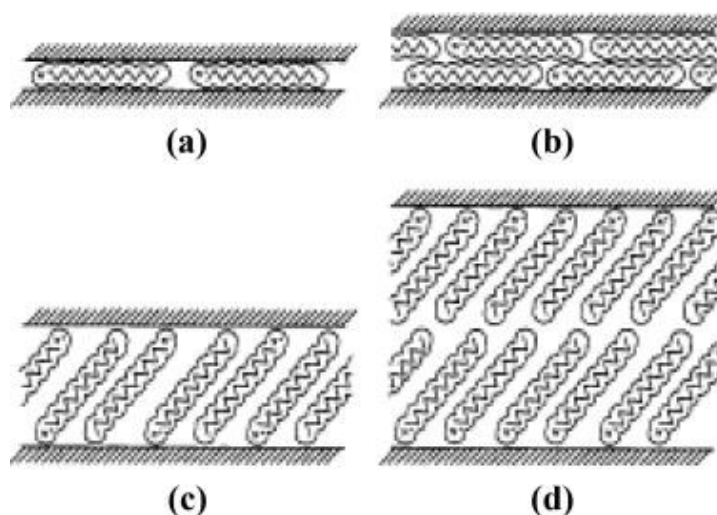
การแทรกตัวของเกลือกวอเทอร์โมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไปในชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ [18] แบ่งตามลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเกลือกวอเทอร์โมเนียมของสารอินทรีย์ได้ 4 แบบ คือ

1. Lateral monolayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือกวอเทอร์โมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตเพียง 1 ชั้น ไม่มีการซ้อนกันของสายโซ่ และสายโซ่จัดเรียงตัวในลักษณะแนวอนที่ขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.5 (a)

2. Lateral bilayers เกิดจากการแทรกตัวของเกลือกวอเทอร์โมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตโดยเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ในแนวอนที่ขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.5 (b)

3. Paraffin type monolayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอร์รีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต 1 ชั้น ในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิลิเกต ทำให้ระยะห่างของชั้นมีค่าเท่ากับความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอร์รีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ แสดงดังรูปที่ 2.5 (c)

4. Paraffin type bilayers เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอร์รีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิลิเกต โดยเกลือควอเทอร์รีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์จะเรียงต่อกันเป็น 2 ชั้น ทำให้ระยะห่างของชั้นซิลิเกตมีค่าเท่ากับ ความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอร์รีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ 2 สายโซ่รวมกัน แสดง ดังรูปที่ 2.5 (d)



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโมเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์ (a) Lateral monolayer, (b) Lateral bilayers, (c) Paraffin type monolayer และ (d) Paraffin type bilayers [19]

2.5 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer nanocomposites) [19]

คอมโพสิต (Composites) คือวัสดุที่เกิดจากวัสดุสองชนิดขึ้นไปและมีโครงสร้างในแบบต่างๆ โดยที่เนื้อของคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกันมีสมบัติร่วมของวัสดุที่นำมาอยู่ร่วมกันและไม่สามารถหาได้จากวัสดุเพียงชนิดเดียว โดยวัสดุหนึ่งจะทำหน้าที่เสริมแรง (Reinforcement) และองค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งคือ เมทริกซ์ (Matrix)

นาโนคอมโพสิต (Nanocomposites) คือ วัสดุประกอบที่เกิดจากวัสดุสองชนิดขึ้นไปโดยมีวัสดุที่เป็นองค์ประกอบอย่างน้อยหนึ่งชนิดที่เป็นของแข็งขนาดเล็กมากในช่วงนาโนเมตร

(10^9 เมตร) ปกติแล้วนาโนคอมโพสิตมีส่วนเสริมแรงขนาดเล็กในช่วง 1-20 nm อาจอยู่ในสถานะที่เป็นได้ทั้งอสัณฐาน (Amorphous) กึ่งผลึก (Semi-crystalline) หรือเป็นผลึก (Crystalline) มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนได้แก่

1. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีค่าความแข็งแรง และโมดูลัสที่สูง โดยส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนที่รับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรง ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เชม์คาร์บอน เคลย์ เป็นต้น

2. เมตริกซ์ (Matrix) คือ วัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดทานเนื่องจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ และความชื้น โดยเมตริกซ์จัดเป็นองค์ประกอบที่มีวิฤภาคที่ต่อเนื่องซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทแรงไปสู่สารเสริมแรง ตัวอย่างของเมตริกซ์ ได้แก่ พอลิเมอร์ เป็นต้น

วัสดุนาโนคอมโพสิตได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อลดข้อด้อยของวัสดุคอมโพสิตทั่วไปที่มักจะเปราะ ขุ่น และมีสมบัติขึ้นอยู่กับการกระจายรวมทั้งการเรียงตัวของส่วนเสริมแรงวัสดุนาโนคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นมานั้น มีสมบัติที่ถือว่าเป็นสมบัติเด่นของวัสดุคอมโพสิตเหนือกว่าวัสดุพลาสติกเสริมแรงทั่วไป คือ

- มีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแรง (Stiffness) เทียบเท่ากับวัสดุพลาสติกเสริมแรงที่มีส่วนเสริมแรงมากกว่า 30 % โดยน้ำหนักโดยไม่เสียความเหนียวไป

- เหมาะในงานอุณหภูมิสูง เช่น ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ เนื่องจากวัสดุนาโนคอมโพสิตมีอุณหภูมิการอ่อนตัวภายใต้น้ำหนัก (Heat deflection temperature, HDT) สูง

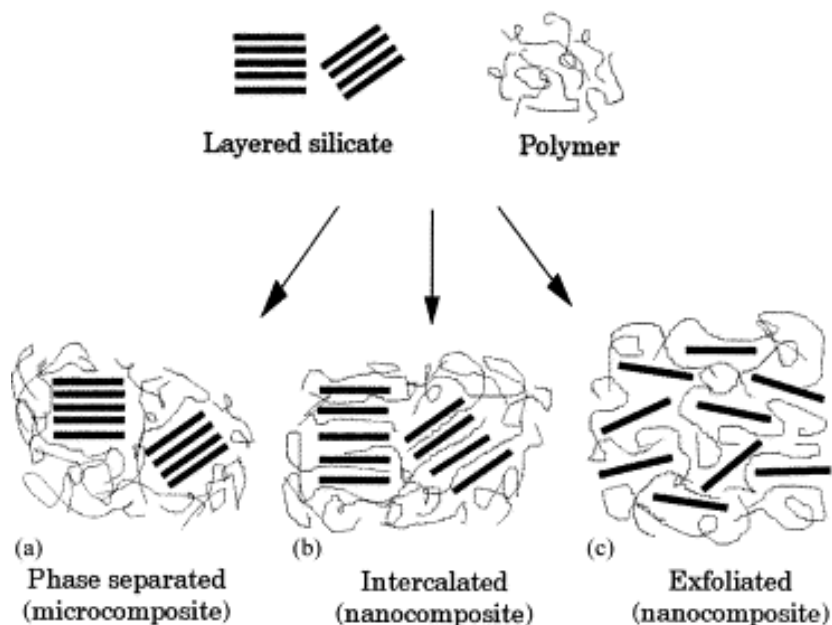
- มีการหดตัวในแม่พิมพ์ต่ำเนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กขวางการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์กระจายอยู่ในเนื้อพลาสติกจึงเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูง

- มีสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (Barrier) ของความชื้น ก๊าซและไอระเหยต่างๆ เนื่องจากโครงสร้างภายในขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่าน

- แสดงสมบัติการหน่วงไฟโดยมีสมมุติฐานว่าเกิดการก่อตัวของพลาสติกไหม้ (Char formation) รอบๆ อนุภาคตัวเสริมแรง ซึ่งพลาสติกไหม้เป็นฉนวนความร้อนและ/หรืออนุภาคขนาดเล็กที่กระจายอยู่ จะขวางการซึมผ่านของไอระเหยที่ติดไฟง่าย ที่ได้จากการสลายตัวภายในวัสดุเมื่อถูกเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ไม่ลุกลาม

เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เมื่อนำมาผสมกับออร์กาโนเคลย์ที่สามารถเข้ากันได้ดีส่งผลให้ชั้นซิลิเกตขยายออกห่างจากกันเรียกว่านาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์-เคลย์ (Polymer-clay nanocomposites : PNC) หรือนิยมเรียกให้ชัดเจนเป็นนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์ชั้นซิลิเกต (Polymer-layered silicate nanocomposites) เพราะมีอนุภาคนาโนเมตรผสมทั่วไปในเนื้อพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตประเภทนี้ยังคงมีโครงสร้างของชั้นซิลิเกตที่เรียงซ้อนอย่างหลวมๆ

ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้นแต่มีระเบียบเรียกว่านาโนคอมโพสิตแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) เมื่อผ่านเทคนิคการเตรียมที่ดีจะสามารถทำให้ชั้นซิลิเกตแตกกระจายออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยวๆ กระจายอย่างอิสระในเนื้อพอลิเมอร์ได้ จึงเรียกว่าเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตแตกกระจาย (Exfoliated nanocomposites) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง [21]

- (a) วัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์กระจายแบบแยกวิภูภาค (Phase separated microcomposite)
- (b) นาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposite)
- (c) นาโนคอมโพสิตชนิดแตกกระจาย (Exfoliated nanocomposite)

ประโยชน์ของนาโนคอมโพสิต

- ได้วัสดุประกอบที่มีค่า Aspect ratio มากกว่า 100
- เพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นซิลิเกต
- เพิ่มความเสถียรทางด้านรูปร่าง (Dimensional stability) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น
- ทำให้มีการปรับปรุงความมันเงา (Surface gloss) ดีขึ้น
- ทำให้มีความสามารถในการยึดติดพื้นผิวที่ดี
- เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของอีลาสโตเมอร์ (Elastomer)

- ปรับปรุงสมบัติความหน่วงต่อการติดไฟ (Flame retardant) ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะ ซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี
- ลดการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวเนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นและมีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาสูงทั้งสองมิติ จึงขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ และของเหลว ได้
- ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) และสมบัติทางแสง (Optical properties)
- ลดการหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กขวางการจัดเรียงโมเลกุลของ พอลิเมอร์
- มีความใสเพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงยูวี และคลื่นแสงที่มองเห็นได้จึงไม่ทำให้แสงแตกกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส

2.6 สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต [22-24]

การสกัดกั้นการซึมผ่านก๊าซของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต สามารถนำไปใช้ประยุกต์ในงานอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งการป้องกันการซึมผ่านก๊าซทำได้โดยการเติมวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ เช่น เคลย์ ไมก้า ทัลคัม ที่มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นแผ่นจะช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซได้ เนื่องจาก

1. พื้นที่ที่ก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้มีพื้นที่ลดลง
2. การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ โดยก๊าซต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดเคี้ยวรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้

2.6.1 คำจำกัดความของสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

1. อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas transmission rate : OTR) คือปริมาตรของก๊าซออกซิเจนที่ผ่านพื้นที่ผิวของฟิล์มพลาสติกต่อหน่วยเวลาภายใต้สภาวะการทดสอบ
2. การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeance : OP) คืออัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความดันของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกันของฟิล์มทั้งสองด้าน
3. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability coefficient : OP) คือการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความหนาของฟิล์ม

2.6.2 การคำนวณสมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

- การคำนวณอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

$$OTR = \frac{[(E_c - E_0) \times Q]}{A \times R_L} \quad (2.1)$$

เมื่อ E_c คือ ระดับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่คงที่ (Steady-state voltage)

E_0 คือ ระดับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ศูนย์ (Zero voltage)

Q คือ ค่าคงที่การตรวจสอบ (Calibration constant)

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน (Specimen area)

R_L คือ ค่าของภาวะการต้านทาน (Load resistance)

- การคำนวณการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

$$OP = OTR / P \quad (2.2)$$

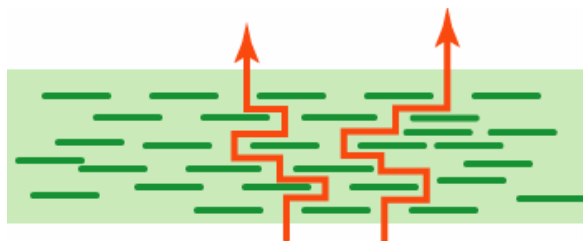
เมื่อ P คือ ความดันของก๊าซออกซิเจนหรืออัตราส่วนโดยโมลของก๊าซออกซิเจนจากความดันรวม โดยความดันของก๊าซออกซิเจนในด้านที่เป็นก๊าซนำพาให้พิจารณาเป็นศูนย์ ($P = 0$)

- การคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

$$OP = OP \times t \quad (2.3)$$

เมื่อ t คือ ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน

สมบัติที่เป็นประโยชน์ยิ่งของนาโนคอมโพสิตต่ออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ คือความสามารถในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ จากโครงสร้างของเคลย์ที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบาง ทำให้เกิดเส้นทางคดเคี้ยวสำหรับการเข้าออกของก๊าซต่างๆ หรือเรียกว่า “Tortuous path” ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายอนุภาคอยู่ในนาโนคอมโพสิตเพื่อสกัดกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ (Tortuous path) [25]

การศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต โดยมีพื้นฐานมาจากทฤษฎี Tortuosity กล่าวคือเส้นทางการผ่านของก๊าซต้องเป็นไปตามชั้นซิติเลตที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Tortuosity factor (τ) คือ สัดส่วนระหว่างระยะทางจริงของเส้นทางการผ่านเข้าออกของก๊าซ (d') กับระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเส้นทางการผ่านเข้าออกของก๊าซที่ไม่มีชั้นซิติเลตกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่ (d) หรือสามารถอธิบายในเทอมของความยาว (L), ความกว้าง (W) และสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของซิติเลต (Φ_s) แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \Phi_s \right] \quad (2.4)$$

- เมื่อ d' คือ ระยะทางจริงของเส้นทางการผ่านเข้าออกของก๊าซ
 d คือ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเส้นทางการผ่านเข้าออกของก๊าซที่ไม่มีชั้นซิติเลตกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่
 L คือ ความยาวของแผ่นซิติเลต
 W คือ ความกว้างของแผ่นซิติเลต
 Φ_s คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิติเลต

และสามารถคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซดังสมการที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์การซึมผ่านของก๊าซในรูปอัตราส่วนของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิติเลตนาโนคอมโพสิต ต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (P_s/P_p)

$$\frac{P_s}{P_p} = \frac{(1 - \Phi_s)}{\tau} \quad (2.5)$$

- เมื่อ τ คือ Tortuosity factor
 P_s คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิติเลตนาโนคอมโพสิต
 P_p คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Y. Liang และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติของยางไอโซบิวทิลีนไอโซพรีน (Isobutylene isoprene rubber, IIR) เคลย์นาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้จากเทคนิคการใช้สารละลายและหลอมเหลว ในขั้นตอนการเตรียมโดยเทคนิคการใช้สารละลาย เริ่มจากนำเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยสารอินทรีย์มากระจายตัวในโทลูอีนโดยใช้เครื่องปั่นกวน จากนั้นนำเคลย์ที่ได้มาใส่โทลูอีนที่มียางไอโซบิวทิลีนไอโซพรีนบรรจุอยู่ ทำการผสมโดยวิธีการปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเมื่อโทลูอีนระเหยจนหมด จึงนำยางที่ผสมด้วยเคลย์มาเข้าสู่ขั้นตอนการผสม โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ต่อไปในส่วนของเทคนิคการหลอมเหลว เริ่มจากนำเคลย์มาผสมกับยางไอโซบิวทิลีนไอโซพรีนโดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งแล้วเข้าสู่กระบวนการผสมในขั้นตอนถัดไป จากผลการทดลอง พบว่า ยางไอโซบิวทิลีนไอโซพรีนเคลย์นาโนคอมโพสิตที่ได้จากเทคนิคการใช้สารละลายนั้น เคลย์มีการกระจายตัวแบบ Exfoliated และ Intercalated ส่งผลทำให้มีค่า Aspect ratio ที่สูง และจากผล XRD พบว่า ระยะห่างของชั้นเคลย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 2.2 nm เป็น 4.2 nm เป็นผลมาจากการกระจายตัวของเคลย์ที่มีการกระจายตัวได้ดี ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น และช่วยปรับปรุงในเรื่องของสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซได้ดีกว่ากระบวนการผสมโดยใช้เทคนิคการหลอมเหลว

P.L. Teh และคณะ [27] ศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติออร์กาโนเคลย์นาโนคอมโพสิตโดยใช้ยางธรรมชาติอีพอกซิไดซ์ (Epoxidized natural rubber, ENR) เป็นสารช่วยผสม โดยในขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากนำออร์กาโนเคลย์ (มอนต์มอริลโลไนต์) ที่ถูกตัดแปรด้วยเกลือออกตะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม) ที่ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 phr ผสมกับยางธรรมชาติโดยใช้เครื่อง Internal mixer จากนั้นใส่ยาง ENR 50 ในปริมาณ 10 phr เพื่อใช้เป็นสารช่วยผสมระหว่างออร์กาโนเคลย์กับยางธรรมชาติในขั้นตอนต่อไป นำยางที่ผสมได้มาเข้าเครื่องผสมสองลูกกลิ้งแล้วเข้าสู่กระบวนการผสมในขั้นตอนถัดไปจากผลการทดลอง พบว่า เวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{2}), เวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{(90)}$) มีค่าลดลงเมื่อมีการผสมออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากออร์กาโนเคลย์เป็นเคลย์ชนิดตัดแปรที่มีหมู่เอมีนอยู่ในโครงสร้าง ส่งผลทำให้ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการเชื่อมโยงที่เร็วขึ้น และยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และในการเติม ENR 50 ช่วยปรับปรุงในเรื่องของการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในยางธรรมชาติให้มีการกระจายตัวได้ดีขึ้น

M. Kato และคณะ [28] ศึกษาและเตรียมยางไอโซบิวทิลีนไอโซพรีน (Isobutylene isoprene rubber, IIR) เคลย์นาโนคอมโพสิตโดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์ไอโซบิวทิลีนไอโซพรีน (Maleic anhydride grafted isobutylene isoprene: MA-g-IIR) ในขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากนำปริมาณเคลย์ (มอนต์มอริลโลไนต์) ที่ถูกตัดแปรด้วยเกลือออกตะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียม) ที่

ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr มาผสมกับ MA-g-IIR โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 110 °C ทำการผสมโดยใส่สารตัวเติม สารเชื่อมโยงลงไปในการผสม จากผลการทดลองพบว่าไอโซบิวทิลีน ไอโซพรีนเคลย์ นาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้ ระยะห่างของชั้นเคลย์เกิดการกระจายตัวออกจากกัน อย่างอิสระเป็นแบบ Exfoliated และมีการกระจายตัวออกเป็นชั้นบางๆ ทั่วทั้งชิ้นงาน และพบว่าเมื่อเติมปริมาณออร์กาโนเคลย์ 15 phr ส่งผลทำให้สมบัติต้านทานการซึมผ่านของก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 40 % เมื่อเปรียบเทียบกับยางไอโซบิวทิลีน ไอโซพรีนที่ไม่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ นอกจากนี้การเติมออร์กาโนเคลย์ยังส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็นผลมาจากเคลย์มีการกระจายตัวที่ดีในยาง

M. Razzaghi-Kashani และคณะ [29] ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางบิวทิล (Butyl rubber) โดยการผสมออร์กาโนเคลย์ (Cloisite 15A) ในขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากนำปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่ 3, 7, 11 และ 15 phr ผสมกับยางบิวทิลโดยใช้เครื่อง Internal mixer จากนั้นนำยางที่ผสมได้มาเข้าเครื่องผสมสองลูกกลิ้งแล้วเข้าสู่กระบวนการผสมในขั้นตอนถัดไป จากผลการทดลอง พบว่าที่ปริมาณออร์กาโนเคลย์ 3 phr สายโซ่ยางสามารถเข้าไปแทรกระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ส่งผลทำให้ระยะห่างของชั้นออร์กาโนเคลย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 4.5 nm มีการกระจายตัวแบบ Intercalated ผลของการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติต้านทานการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเพิ่มมากขึ้น และในการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ ทำให้สมบัติต้านทานการซึมผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็นผลมาจากออร์กาโนเคลย์มีค่า Aspect ratio ที่สูง จึงช่วยเพิ่มเส้นทางการเดินทางของก๊าซในชิ้นงานตามทฤษฎีของ Tortuosity

Y. Liang และคณะ [30] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติต้านทานการซึมผ่านก๊าซของยางไอโซบิวทิลีน ไอโซพรีน (Isobutylene isoprene rubber, IIR) เคลย์นาโนคอมโพสิต โดยมีขั้นตอนการเตรียม 2 ขั้นตอน คือ การนำเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์มาบวมตัวในสารละลายบิวทิล แอลกอฮอล์ แล้วทำการผสมโดยใช้เครื่อง High-speed mixer จากนั้นจึงนำเคลย์ได้มาผสมกับยางไอโซบิวทิลีน ไอโซพรีน โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งแล้วเข้าสู่กระบวนการผสมในขั้นตอนถัดไป จากผล XRD ระยะห่างของชั้นเคลย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 4.2 nm เป็น 6.2 nm เคลย์มีการกระจายตัวแบบ Exfoliated ที่มากขึ้น ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น และสมบัติต้านทานการซึมผ่านก๊าซมีค่าเพิ่มมากขึ้น พบว่าเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มมากขึ้น จะให้ค่าสมบัติเชิงกล และสมบัติต้านทานการซึมผ่านก๊าซเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากเคลย์มีค่า Aspect ratio ที่สูง จึงช่วยเพิ่มเส้นทางการเดินทางของก๊าซให้มากขึ้นตามทฤษฎีของ Tortuosity

P. Li และคณะ [31] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายตัวแบบ Exfoliated ของออร์กาโนเคลย์ในยางธรรมชาติออร์กาโนเคลย์นาโนคอมโพสิต ในขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากนำ

ออร์กาโนเคลย์มาผสมกับยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งแล้วเข้าสู่กระบวนการผสมในขั้นตอนถัดไป จากผลการทดลอง พบว่า ออร์กาโนเคลย์มีการกระจายตัวแบบ Exfoliated ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณออร์กาโนเคลย์ 3 phr พบว่า สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าผลจากการเติมปริมาณออร์กาโนเคลย์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงให้แก่วัสดุนาโนคอมโพสิต และเมื่อมีการเติมปริมาณออร์กาโนเคลย์ ส่งผลทำให้ค่าน้ำหนักการบวมตัวในวัสดุนาโนคอมโพสิตมีค่าลดลงอย่างมาก เพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำมันให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อน และยังช่วยปรับปรุงในเรื่องของสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น

Y. Zhang และคณะ [32] ศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซของยางธรรมชาติเคลย์คอมโพสิตที่เตรียมได้จากเทคนิคการหลอมเหลว โดยทำการเตรียมวัสดุคอมโพสิต 3 ประเภท คือ เคลย์ที่ปรับปรุงโดยใช้ไซเลน (Si69) (SMK), ซิลิกาชนิดคตกตะกอน (PS) และนำสารทั้ง 2 ชนิดข้างต้นมารวมกัน (SMK+PS) ในขั้นตอนการเตรียมเคลย์ที่ปรับปรุงโดยใช้ไซเลนเริ่มจากนำเคลย์มากระจายตัวในน้ำแล้วใส่ไซเลน 0.7 % ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองแล้วอบที่อุณหภูมิ 110°C จากนั้นนำเคลย์ดังกล่าวมาผสมกับยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งแล้วเข้าสู่กระบวนการผสมในขั้นตอนถัดไป จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมด้วย SMK ให้ผลดีกว่ายางธรรมชาติที่ผสมด้วย SMK+PS และ PS เนื่องจาก SMK ช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้มีค่าเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น และยังส่งผลทำให้สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 20-40 % ทั้งนี้เนื่องมาจากอนุภาคของเคลย์มีความสามารถในการกระจายตัวในยางได้ดีจึงส่งผลทำให้สามารถยังยั้งการแพร่ผ่านของก๊าซในชิ้นงานได้ดีกว่าซิลิกา

A. Khamkhreung [33] ศึกษาสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านก๊าซของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์ คอมโพสิต โดยมีวิธีการเตรียมยางธรรมชาติกับออร์กาโนเคลย์ (Claytone®) 2 วิธี คือ การผสมในสารละลาย และการผสมโดยตรง ในส่วนของการผสมโดยตรงนั้นได้ศึกษาอิทธิพลของน้ำมัน และสารช่วยผสม (NR grafted maleic anhydeide, NR-g-MA) พบว่า ในระบบสารละลายจะมีการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในยางได้ดีส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงกว่าการผสมแบบตรงซึ่งมีการกระจายตัวไม่ดีนัก และพบว่าการเติมน้ำมันไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลในส่วนของสารช่วยผสมจะช่วยให้การกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในยางได้ดี แต่ยังคงต่ำกว่าระบบสารละลาย และเมื่อนำชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมในระบบสารละลายมาทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลงประมาณร้อยละ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมออร์กาโนเคลย์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า

- เคลย์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารอินทรีย์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเข้ากันได้ดีกับยางไอโซพรีนอิพรีนไอโซพรีน (Isobutylene isoprene rubber, IIR) ส่งผลทำให้เกิดอันตรกิริยาที่ดี ทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซ มีค่าเพิ่มขึ้น
- การเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์มีผลทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{2}), เวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) มีค่าลดลง ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าออร์กาโนเคลย์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซของวัสดุคอมโพสิตได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและพัฒนาสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของยางธรรมชาติโดยการเลือกใช้เคลย์ที่มีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาด รูปร่าง และความมีขี้ว ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT มาใช้ในงานวิจัย ทั้งนี้เนื่องจากเคลย์แต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ได้แก่ Claytone[®] ที่มีลักษณะเป็นแผ่น และเป็นเคลย์ชนิดดัดแปรทำให้ความมีขี้วลดลง ในส่วนของ Calcined clay มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อน เป็นเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้โมเลกุลของน้ำที่ติดอยู่ในโครงสร้างของเคลย์หลุดออก เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางทั่วไป และ MMT เป็นเคลย์ที่ได้จากธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกที่เป็นแผ่นและเรียงซ้อนกันเป็นชั้น มีความมีขี้วสูง จากข้อมูลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการนำเคลย์ทั้ง 3 ชนิดมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของยางธรรมชาติให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมวัสดุยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต โดยเน้นศึกษาผลของปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนและวิธีดำเนินการของงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT ที่ 10 และ 20 phr

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณ Claytone[®] เท่ากับ 0 – 20 phr ที่มีต่อสมบัติของยาง

ตอนที่ 3 ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ศึกษาการจัดเรียงตัวของ Claytone[®]

วิธีที่ 1 ศึกษาผลของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรเมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

วิธีที่ 2 ศึกษาผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation)

3.2 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR 5L) บริษัท เอ็ม.บี.เจ. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด สมบัติบางประการของยางแท่งเอสทีอาร์ 5L สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

2. ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) เกรด Claytone[®] บริษัท เซ้าท์เทิร์น เคลย์ โปรดักส์ จำกัด สมบัติบางประการของ Claytone[®] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

3. แคลไซน์ เคลย์ (Calcined clay) ชื่อการค้า Iceberg[®] บริษัท เบอร์เจส พิกเมนต์ จำกัด สมบัติบางประการของ Iceberg[®] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

4. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) บริษัท ไบเออร์ไทย จำกัด สมบัติบางประการของ Montmorillonite สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

5. ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเทอร์เน็ต บิสซิเนส จำกัด

6. กรดสเตียริก (Stearic acid) เกรดการค้า บริษัท ยูนิตี้ อินเทอร์เน็ต บิสซิเนส จำกัด

7. น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) เกรด P-150 บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ จำกัด

8. กำมะถัน (Sulfur, S) เกรด S poland บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
9. ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะโซลซัลเฟนไมด์ (N-Cyclohexyl-2benzothiazole-sulfenamide, CBS) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
10. เทตระเมทิลไทูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram disulfide, TMTD) เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด
11. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เอเพกซ์เคมีคัล จำกัด
12. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เคมีคัล เอ็กซ์เพรส จำกัด
13. 85% กรดออร์โทฟอสฟอริก (85% Orthophosphoric acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เคมีคัล เอ็กซ์เพรส จำกัด
14. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เคมีคัล เอ็กซ์เพรส จำกัด
15. โทลูอิน (Toluene) เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
16. ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) บริษัท แล็บ โซลูชั่น แอนด์ เอ็นจิเนียริง จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5L (STR 5L)

สมบัติ	ค่า
เปอร์เซ็นต์สิ่งสกปรก (Dir) (% wt)	0.04
เปอร์เซ็นต์เถ้า (Ash) (%wt)	0.40
ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter; V.M.) (%wt)	0.80
ปริมาณไนโตรเจน (%wt)	0.60
ค่าพลาสติกซิตี (Plasticity number; P ₀)	35
ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity retention index; PRI)	60
ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity (ML1+4) 100 °C)	-

หมายเหตุ ข้อมูลจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร

ตารางที่ 3.2 สมบัติของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone®

สมบัติ	หน่วย	Claytone®
สารอินทรีย์ที่ใช้ดัดแปร	-	n/a
ความเข้มข้นของสารดัดแปร	Meq/100g clay	n/a
ความชื้น	%	2
สี	-	ครีม
ความหนาแน่น	g /cc	1.6
Dry sieve size	%-450 M	98
Weight loss on ignition	%	43
Loose bulk density	lbs/ft ³	18
ระยะห่างระหว่างชั้น	Å	70, 35 ¹

หมายเหตุ¹ คือ ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของแคลไซน์เคลย์ (Calcined clay, Iceberg®)

สมบัติ	ค่าที่ได้
ความสว่าง (GE brightness)	92 %
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size)	1.4 µm
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	2.63
ค่าดัชนีการหักเห (Refractive index)	1.62
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH @ 20 % solids)	5.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

สมบัติ	ค่าที่ได้
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size)	0.5 mm
at 20% relative humidity	>12%
Bulk density	>980
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH @ 20 % solids)	7±0.5

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) รุ่น LRM 200 บริษัท แล็บ เทค เอ็นจิเนียร์ จำกัด
2. เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น FOR LP-2020 บริษัท แล็บ เทค เอ็นจิเนียร์ จำกัด
3. เครื่องวัดความหนืดมูนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-201 บริษัท ซิมัดซี จำกัด
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้งานหมุน (Moving die rheometer, MDR) รุ่น II F 150 บริษัท นิชิโกโซจิ จำกัด
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) รุ่น LR 5K บริษัท ลอยด์ อินสทรูเมนต์ จำกัด
6. เครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) รุ่น SE-104DC บริษัท เอทีเอส ฟาร์เอส พี เอ จำกัด
7. เครื่องทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกล (Dynamic mechanical thermal analyzer, DMTA) รุ่น DMTA-V บริษัท รีโอเมทริกส์ ไซดท์ฟิฟ จำกัด
8. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น 851e บริษัท เพอร์กินเอลเมอร์ จำกัด
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น S-3400N บริษัท ฮิทาชิ ไฮ-เทค โนโลยี ยุโรป จีเอ็มบีเอช จำกัด
10. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เครื่อง Oxygen permeability tester รุ่น 8003 บริษัท แลปดิง อินสทรูเมนต์ จำกัด
11. เครื่องไมโครโทม
12. ตู้อบ
13. เครื่องชั่ง
14. อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.4 วิธีการทดลอง

การผสมสูตรยางและการเชื่อมโยง (Rubber compounding and vulcanization)

1. ตัดและชั่งยางธรรมชาติ รวมทั้งสารเคมีต่างๆ ดังตารางที่ 3.5
2. ใส่ยางธรรมชาติ ในเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เพื่อทำการบดย่อยหรือมาสติเคชัน (Mastication) ให้ยางนํ้าที่อุณหภูมิประมาณ 50°C และสามารถพันรอบลูกกลิ้งได้ แล้วทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางนํ้าใช้เวลา 3 นาที
3. ทำการใส่สารเติมแต่ง ยกเว้นสารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาโดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง และทำการผสมโดยการกรีดและพับยาง (Cut-and-fold) เพื่อให้สารตัวเติมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เป็นเวลา 10-15 นาที แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนา 3 - 5 mm
4. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2×2 in² จำนวน 2 แผ่นนำไปวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมือนี้วิสโคมิเตอร์ กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100°C โดยหาความหนืด ML 1+4 (100°C)
5. เมื่อตัดตัวอย่างยางเพื่อใช้ทดสอบความหนืดมูนนี่แล้ว จึงเติมสารเชื่อมโยงและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงโดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้งทำการผสมโดยการกรีดและพับยางต่อจนกระทั่งสารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกับยาง เป็นเวลา 5 นาที
6. รีดยางออกเป็นแผ่นหนาประมาณ 2-3 mm ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2×2 in² แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR ที่อุณหภูมิ 150°C เพื่อหาเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$)
7. ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น (6×6 in²) แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูป เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงที่ได้จากกราฟเชื่อมโยง ใช้เวลาเพิ่มเป็น $t_{c(90)} \times 1.2$ สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและชิ้นงานยาง

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

สารเคมี	ตอนที่ 1						ตอนที่ 2				ตอนที่ 3		
											วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	
STR 5L	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
P-150	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
ZnO	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sulfur	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
CBS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TMTD	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Claytone®	10	20	-	-	-	-	5	10	15	20	20	5	5
Calcined clay	-	-	10	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MMT	-	-	-	-	10	20	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ

ตอนที่ 1 และ 2 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติของยาง ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 - 7 เปลี่ยนแต่ชนิดของสารตัวเติมเป็นปริมาณต่างๆ ที่กำหนดดังตารางที่ 3.5

ตอนที่ 3 ศึกษาการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone®

วิธีที่ 1 ศึกษาผลของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรเมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้งทำการทดลองข้อ 1 – 6 จากนั้นทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

6.1 รีดยางออกเป็นแผ่นหนา 1 mm แล้วตัดยางเป็นแผ่นขนาด $15 \times 15 \text{ in}^2$ ยางผสมสูตรที่ได้มีจำนวนรอบเท่ากับ 0 รอบ

6.2 นำยางที่เหลือหมุนผ่านลูกกลิ้งออกมาแล้วพับยางตามแนวเครื่องจักร

6.3 ทำการทดลองข้อ 5.1-5.2 ซ้ำโดยทำการตัดยางผสมสูตรที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 รอบ ตามลำดับ

6.4 ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น $6 \times 6 \text{ in}^2$ แล้วนำแม่แบบ ใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูป เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงที่ได้จากกราฟเชื่อมโยง ใช้เวลาเพิ่มเป็น $t_{(90)} \times 1.2$ สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและชิ้นงานยาง

ในกรณีการผสม Claytone® ในปริมาณ 5 phr เมื่อได้ยางผสมสูตรจากข้อ 6.1 ที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 0 รอบ และข้อ 6.3 ที่ได้ยางผสมสูตรที่มีจำนวนรอบต่างๆ ให้มีการกำหนดทิศทางยางผสมสูตรได้แก่ ทิศทางตามแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) และแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) จากนั้นทำการผสมเหมือนกับข้างต้น

วิธีที่ 2 ศึกษาผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation) โดยกำหนดความหนาเริ่มต้นของยางผสมสูตรที่ความหนา 0.3, 0.5 และ 1.0 cm จากนั้นใช้เครื่องกดอัดให้เหลือความหนา 0.1 cm ทำการทดลองข้อ 1 – 6 จากนั้นทำตามขั้นตอนต่อไปนี้ เพื่อพิจารณาเวลาการคลายแรงเค้นที่เหมาะสมของยางธรรมชาติ

6.1 รีดยางออกเป็นแผ่นหนา 1 mm ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ขนาด $1 \times 1 \text{ in}^2$

6.2 นำยางผสมสูตรแต่ละแผ่นมาวางเรียงซ้อนกันโดยให้มีความหนาเริ่มต้นต่างกันตามที่กำหนดไว้คือ 0.3, 0.5 และ 1.0 cm

6.3 นำยางที่เตรียมได้มาทำการวัดแรงที่เปลี่ยนไปเมื่อกำหนดให้มีระยะกดที่ 1 mm โดยมี % ระยะกดที่ลดลงเท่ากับ 67%, 80% และ 90% เมื่อเทียบกับความหนาเริ่มต้นโดยใช้เครื่อง Universal testing machine โดยใช้หัวกดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm

6.4 จากนั้นตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้ขนาด $5 \times 5 \text{ in}^2$ นำยางผสมสูตรแต่ละแผ่นมาวางเรียงซ้อนกันโดยให้มีความหนาเริ่มต้นต่างกันตามที่กำหนดไว้คือ 0.3, 0.5 และ 1.0 cm

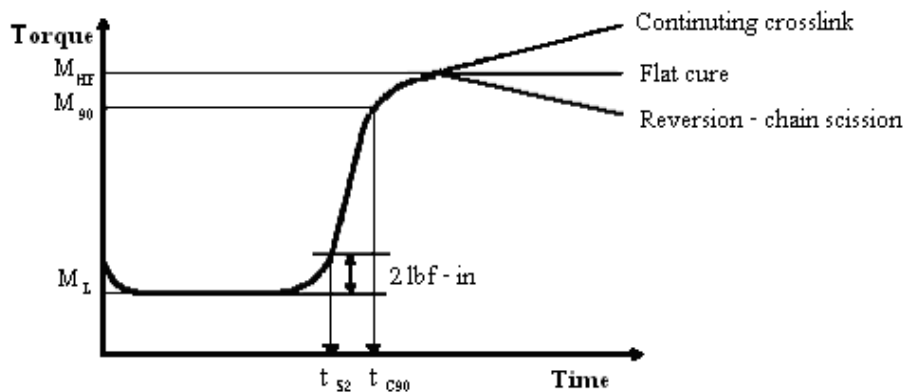
6.5 นำยางที่เตรียมได้มาใส่แม่แบบสำหรับอัดเป็นแผ่น $6 \times 6 \text{ in}^2$ แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องกดอัดขึ้นรูป เพื่อทำการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น โดยทำการกดอัดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง ไม่มีการให้ความร้อน

6.6 เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดจึงทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาเชื่อมโยงที่ได้จากกราฟเชื่อมโยง ใช้เวลาเพิ่มเป็น $t_{c(90)} \times 1.2$ สำหรับเวลาในการถ่ายเทความร้อนผ่านแม่แบบและชิ้นงานยาง

3.5 การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนคลอไรด์คอมพอลิเมอร์ที่ได้

3.5.1 ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)

นำชิ้นงานตัวอย่างยางผสมสูตรเป็นรูปแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ $2 \times 2 \text{ in}^2$ หนาประมาณ 2-3 mm มาทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยง MDR ที่อุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 3.1 กราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ของยางผสมสูตร แสดงเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) และเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2}) [34]

- เมื่อ
- M_L คือ ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
 - M_{HF} คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
 - M_{90} คือ ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อมโยง สามารถคำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L) \quad (3.1)$$

ผลการทดลองที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2}) หรือเวลาสกอร์ช เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 หน่วยแรงบิด (เช่น lb-in หรือ kgf.cm) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด
- เวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90% (M_{90}) นิยามเท่ากับเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมโยงยาง (Optimum cure time)

- ดัชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) คำนวณได้จากสมการ

$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100 / (t_{c(90)} - t_{s2})$$

- Plateau modulus (M_{HF}) คือ ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด

3.5.2 ศึกษาสมบัติเชิงกล

การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D 412 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปร่างดัมเบลล์ (Dumbbell shape) กำหนดสภาวะเครื่องทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยึด (Cross head speed)	500	mm/min
ความยาวเกจ หรือความยาวเริ่มต้น (Gauge length)	60	mm
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	kN
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	10	ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

- ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาได้จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F / A \quad (3.2)$$

เมื่อ $F =$ แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (mm^2)

- ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) หาได้จากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = \frac{(l - l_0)}{l_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ $l =$ ความยาวสุดท้าย ณ จุดขาดของชิ้นงาน (mm)

$l_0 =$ ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (mm) หรือความยาวเกจ

- ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยึด (Rubber modulus, M100) คือ ค่าความเค้นดึง (Tensile stress) ที่ค่าความเครียด 100 เปอร์เซ็นต์ (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่)

การทดสอบความแข็งกด (Hardness test) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องที่ทำการกดชิ้นงานที่หนาน้อย $\frac{1}{4}$ in โดยสามารถซ้อน

ชิ้นงานทดสอบเพื่อให้ได้ความหนาตามต้องการ ค่าความแข็งกดอ่านได้หลังจากกดเป็นระยะเวลา 5 วินาที ใช้ชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชิ้น ในแต่ละสูตรโดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง คือ 10 จุดการกด ต่อหนึ่งชิ้นงานทดสอบ

3.5.3 ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density, n)

หาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (n) ที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว จากเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย โดยการแช่ชิ้นงานขนาด $10 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ ในสารละลายโทลูอีน 30 ml เป็นเวลา 4 วัน ทดสอบ 5 ชิ้นต่อสูตร ทำการวัดขนาดชิ้นงาน 2 ตำแหน่งทั้งก่อนและหลังการแช่ นำผลที่ได้มาคำนวณจากสมการของฟลอรี-ไรเนอร์ [35] ดังสมการที่ 3.3

$$-\ln(1 - v_r) + v_r + \chi_1 v_r^2 = V_s n [v_r^{1/3} - v_r/2] \quad (3.4)$$

เมื่อ n = ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง (mol/cm^3)
 V_s = ปริมาตรโมลาร์ (Molar volume) ของตัวทำละลาย (cm^3/mol)
 v_r = สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของยางในเจลยางที่บวมตัว (Swollen gel) (ไม่มีหน่วย)
 χ_1 = ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (Polymer - Solvent interaction parameter) (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.39 [36]

3.5.4 ศึกษาสมบัติความอ่อนเชิงกลด้วยเทคนิค Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA)

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมโยงมาตัดเป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วนำไปเข้าเครื่อง DMTA โดยใช้สภาวะในการทดลองดังนี้

ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ	6 x 25 x 2	mm^3
รูปแบบในการทดสอบ	Single cantilever bending geometry	
ขนาดของกรอบยึดชิ้นงาน (Frame)	Medium Frame	
ความถี่	1.0	Hz
อุณหภูมิ	-150 ถึง 25	$^{\circ}\text{C}$
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	3	$^{\circ}\text{C}/\text{min}$

โดยค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) และค่า $\tan \delta$ สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 E' &= E^* \times \cos \delta \\
 E'' &= E^* \times \sin \delta \\
 \tan \delta &= E'' / E'
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

เมื่อ	E'	=	มอดุลัสสะสม (Storage modulus)
	E''	=	มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus)
	E^*	=	มอดุลัสเชิงซ้อน (Complex modulus)
	$\tan \delta$	=	ความสามารถในการกระจายพลังงานต่อความสามารถในการสะสมพลังงาน

3.5.5 วิเคราะห์ปริมาณ Claytone® ในชิ้นงานด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis, TGA)

ทำการศึกษาปริมาณ Claytone® โดยชั่งน้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40-800°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 20°C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศออกซิเจนตามมาตรฐาน ASTM E 1131

3.5.6 วิเคราะห์ระยะห่างของระนาบแผ่นเคลย์ (D-spacing) ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเชื่อมโยง ขนาด 30 x 30 x 1 mm³ มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์จากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law โดยใช้ Step size 0.04° Step time 5 sec/25°C และเริ่มที่ 2θ เท่ากับ 0.5 - 1 องศา

3.5.7 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

เตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องไมโครโทม (Microtome) โดยใช้ใบมีดแก้วตัดชิ้นงาน โดยเริ่มแรกจะมีการสกัดพื้นผิวชิ้นงานโดยการใช้สารละลาย A คือเปอร์แมงกานิก-เอซิด รีเอเจนท์ (Permanganic-acid reagent) เตรียมสารละลาย A โดยนำโพแทสเซียมเปอร์แมงกานेट 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาผสมลงในสารละลายผสมมีความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid), 85% กรดออร์โทฟอสฟอริก (85% Orthophosphoric acid) และน้ำ ในอัตราส่วน 10:4:1 โดยปริมาตรตามลำดับ หลังจากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างสกัดโดยใช้สารละลาย A เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเตรียมสารละลาย B มีส่วนประกอบของกรดซัลฟิวริกต่อน้ำ (2:7) โดยปริมาตร สารละลาย B จะถูกผสมด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)

ในอัตราส่วน 1:10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร แล้วทำให้เย็นลง จากนั้นนำสารละลาย B และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มาหยดในสารละลาย A เพื่อหยุดปฏิกิริยา แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างล้างด้วย น้ำกลั่น แล้วจึงนำไปเคลือบทองเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่างและขนาด รวมทั้งการจัดเรียงตัวและประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในยางที่มีต่อสมบัติของยาง

3.5.8 ศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนด้วยเครื่อง Oxygen permeability analyzer โดยวางชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนาประมาณ 1 mm ขนาด 13 x 13 cm² ทดสอบ 3 ชิ้นต่อสูตร โดยระหว่างเซลล์ ปล่องก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจนโดยก๊าซไนโตรเจนจะเป็น ตัวนำก๊าซออกซิเจนที่สามารถผ่านแผ่นชิ้นงานตัวอย่างไปยังด้านที่มีออกซิเจนต่ำกว่า เครื่องจะทำการบันทึกและอ่านค่าปริมาณก๊าซออกซิเจนที่ผ่านออกจากผิวชิ้นงานตัวอย่างด้านหนึ่งไปยัง อีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของชิ้นงานตัวอย่างภายใต้สภาวะคงที่ รายงานผลเป็นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas transmission rate : OTR) มีหน่วยเป็น cc/m².day และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability coefficient : OP) มีหน่วยเป็น mm.cc/m².day ตามมาตรฐาน ASTM D 3985

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะวิทยาด้วยเทคนิค SEM และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ซึ่งงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT ที่ 10 และ 20 phr

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณ Claytone[®] เท่ากับ 0 – 20 phr ที่มีต่อสมบัติของยาง

ตอนที่ 3 ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®]

วิธีที่ 1 ศึกษาผลของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรเมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน

0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)

วิธีที่ 2 ศึกษาผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation)

จากการทดลองทั้ง 3 ตอนดังกล่าวข้างต้นเมื่อได้ยางผสมสูตรในแต่ละตอนที่ศึกษา ในขั้นตอนต่อไปนำยางผสมสูตรที่ได้มาศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต สำหรับอักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อของสูตรที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	สูตร	อักษรย่อ
1	ยางธรรมชาติ STR 5L	NR
2	ยางธรรมชาติ + Montmorillonite	NRMMT
3	ยางธรรมชาติ + Calcined clay (Iceberg [®])	NRIB
4	ยางธรรมชาติ + Claytone [®]	NRCT
5	ยางธรรมชาติ + Montmorillonite 10 phr	NR10MMT
6	ยางธรรมชาติ + Montmorillonite 20 phr	NR20MMT
7	ยางธรรมชาติ + Calcined clay (Iceberg [®]) 10 phr	NR10IB
8	ยางธรรมชาติ + Calcined clay (Iceberg [®]) 20 phr	NR20IB
9	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr	NR5CT
10	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 10 phr	NR10CT

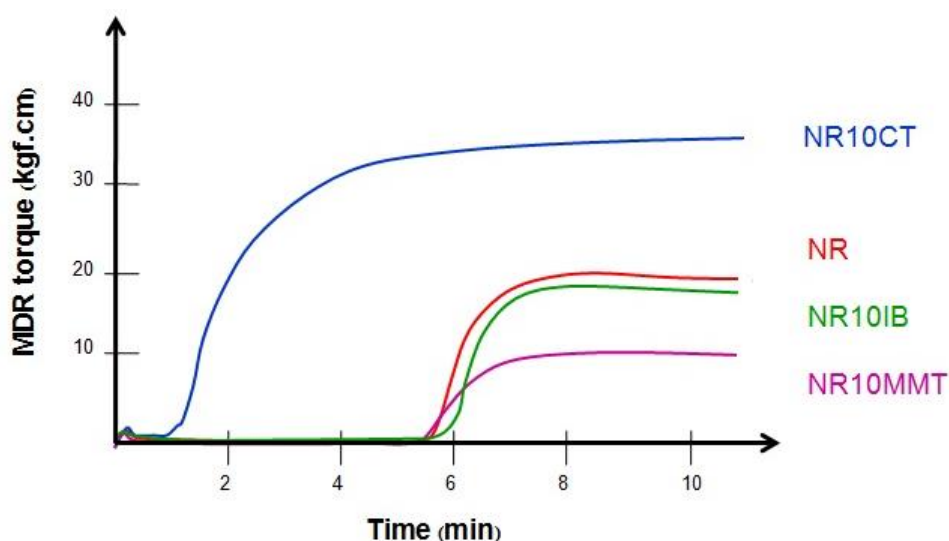
ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

11	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 15 phr	NR15CT
12	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 20 phr	NR20CT
13	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr 0 รอบ	NR5CT0
14	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr 5 รอบ	NR5CT5
15	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr 10 รอบ	NR5CT10
16	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr 15 รอบ	NR5CT15
17	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr 20 รอบ	NR5CT20
18	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 20 phr 0 รอบ	NR20CT0
19	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 20 phr 5 รอบ	NR20CT5
20	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 20 phr 10 รอบ	NR20CT10
21	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 20 phr 15 รอบ	NR20CT15
22	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 20 phr 20 รอบ	NR20CT20
23	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr กัดอัด10 ชั่วโมง ความหนาเริ่มต้น 0.3 cm	NR5CT 0.3 cm
24	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr กัดอัด10 ชั่วโมง ความหนาเริ่มต้น 0.5 cm	NR5CT 0.5 cm
25	ยางธรรมชาติ + Claytone [®] 5 phr กัดอัด10 ชั่วโมง ความหนาเริ่มต้น 1.0 cm	NR5CT 1.0 cm

4.1 ศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT ที่ 10 และ 20 phr

4.1.1 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อลักษณะการเชื่อมโยง

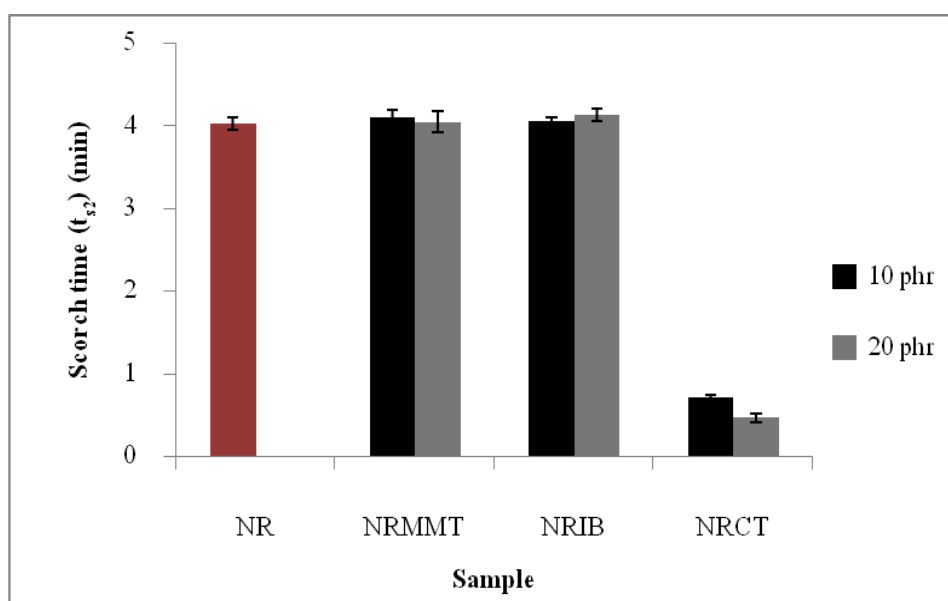
จากการศึกษาพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยาง ได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องเอ็มดีอาร์ (Moving die rheometer, MDR) ที่อุณหภูมิ 150°C ซึ่งใช้หาเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง (Scorch time, t_{s2}) และเวลาเชื่อมโยงของยาง (Cure time, $t_{c(90)}$) ดังรูปที่ 4.1 พบว่าพฤติกรรมการเชื่อมโยงของยางแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารตัวเติมแต่ละชนิด ในกรณีของ NR10CT พบว่ามีเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยางที่สั้น และเวลาเชื่อมโยงของยางที่เร็วกว่า อาจกล่าวได้ว่ามีลักษณะช่วยเร่งการเชื่อมโยงเมื่อเปรียบเทียบกับ NR10IB และ NR10MMT เนื่องจาก Claytone[®] เป็นเคลย์ชนิดดัดแปรที่มีสารอินทรีย์จำพวกเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary ammonium salt) ที่ใช้ในการปรับปรุงเคลย์ ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของเอมีน มีฤทธิ์เป็นด่าง และมีการใส่สารช่วยกระจายหรือสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ปริมาณมากจึงช่วยทำให้ยางมีอัตราของการเชื่อมโยงเร็วขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [37] ในส่วนของ NR10IB และ NR10MMT มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง และเวลาเชื่อมโยงของยางที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ



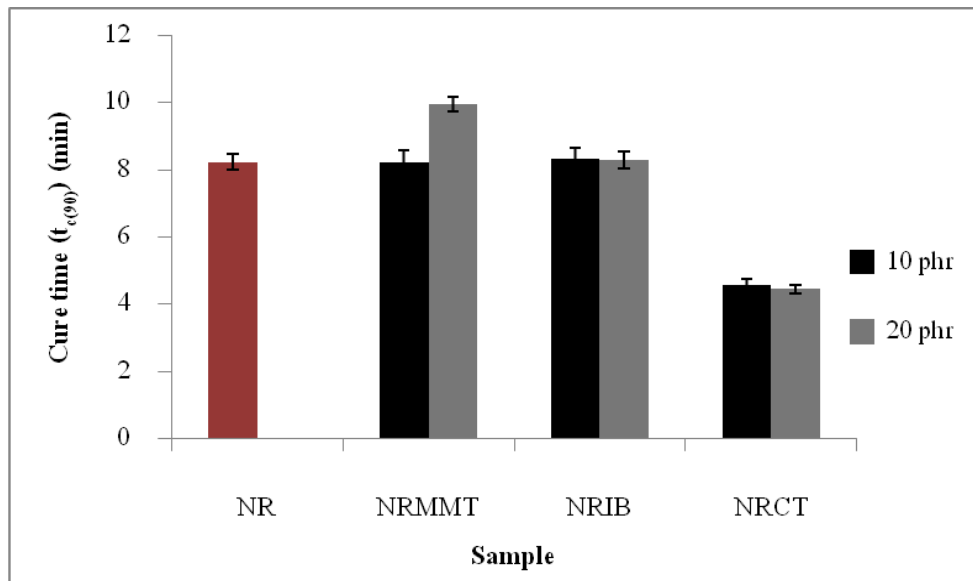
รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการเชื่อมโยง เมื่อทำการผสมเคลย์ในปริมาณ 10 phr

จากผลการศึกษาลักษณะการเชื่อมโยงแสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ของชนิดเคลย์เทียบกับเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง, เวลาเชื่อมโยงของยาง, ดัชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) และ Plateau modulus (M_{HP}) ดังรูปที่ 4.2 – 4.5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า NR10CT มีลักษณะช่วยเร่งการเชื่อมโยง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงส่งผลทำให้ได้ค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง,

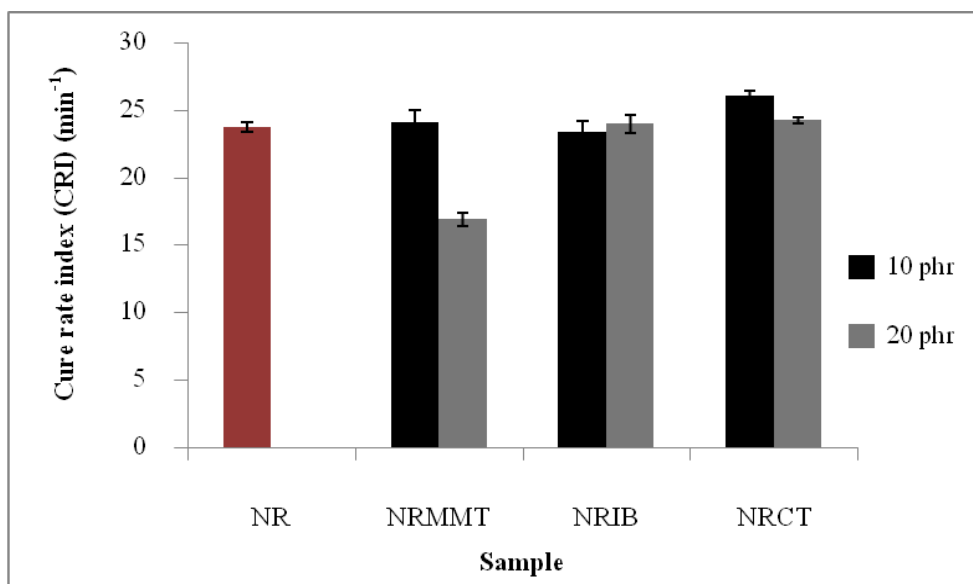
เวลาเชื่อมโยงของยาง, คัดชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง และ Plateau modulus (M_{HF}) ที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับ NR10IB และ NR10MMT ในส่วนของ NR10IB มีค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง, เวลาเชื่อมโยงของยาง, คัดชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง และ Plateau modulus (M_{HF}) ที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ เนื่องจาก Calcined clay เป็นเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้โมเลกุลของน้ำที่ติดอยู่ในโครงสร้างของเคลย์หลุดออก ทำให้ความมีขั้วลดลงส่งผลทำให้เมื่อนำ Calcined clay มาผสมกับพอลิเมอร์บางประเภทที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ ทำให้สามารถเข้ากันได้ดีกว่า MMT และในส่วนของ NR10MMT มีค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง, เวลาเชื่อมโยงของยาง, คัดชนีอัตราเร็วในการเชื่อมโยง และ Plateau modulus (M_{HF}) ที่น้อยสุด เนื่องจาก MMT เป็นเคลย์ที่มีโมเลกุลน้ำติดอยู่ในโครงสร้างจึงมีความมีขั้วสูงส่งผลทำให้มีความสามารถในการดูดสารเคมีบางชนิด เช่น สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงลดลง เกิดการหน่วงการเชื่อมโยง [38] และเมื่อเพิ่มปริมาณการใส่เคลย์จาก 10 เป็น 20 phr พบว่า NR20CT และ NR20MMT มีอัตราของการเชื่อมโยงลดลงเนื่องจากอนุภาคเคลย์มีขนาดเล็กเมื่อใส่ในปริมาณมากอาจเกิดปัญหาการเกาะกลุ่มก้อนเป็นแอกโกลเมอเรต (Agglomerates) ทำให้เกิดเป็นช่องว่างระหว่างก้อนแอกโกลเมอเรตกับยางธรรมชาติส่งผลทำให้เกิดแรงอันตรกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ระหว่างยางธรรมชาติกับเคลย์ และอีกสาเหตุมาจากการที่โครงสร้างของ MMT มีโมเลกุลน้ำติดอยู่ในโครงสร้างจึงทำให้มีความสามารถดูดน้ำ และความชื้น จึงส่งผลทำให้อัตราของการเชื่อมโยงที่ได้มีค่าลดลง ในส่วนของ NR20IB มีอัตราของการเชื่อมโยงที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์ เป็น 20 phr



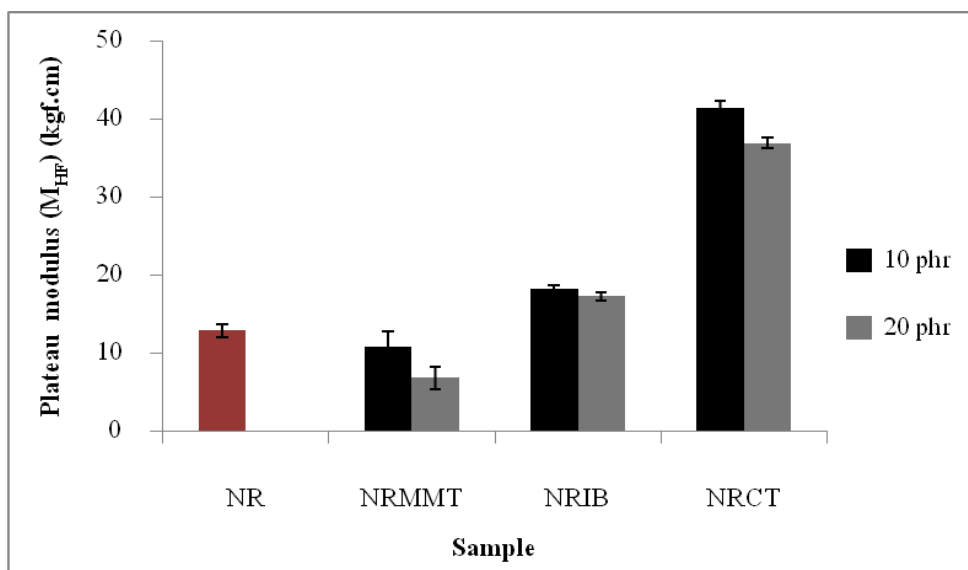
รูปที่ 4.2 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) ของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.3 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อเวลาเชื่อม โยง (Cure time, $t_{c(90)}$) ของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.4 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อดัชนีอัตราเร็วในการเชื่อม โยง (Cure rate index, CRI) ของยางผสมสูตร

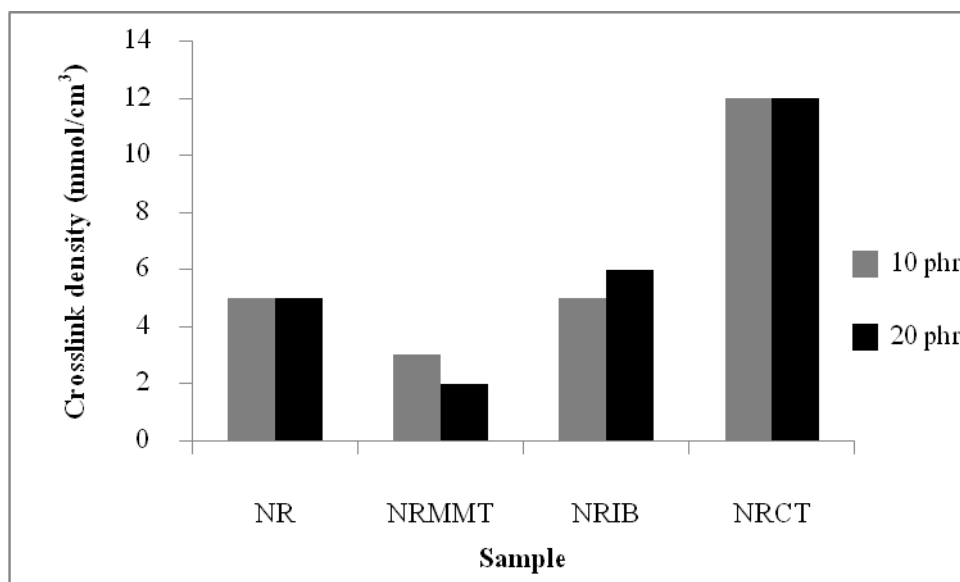


รูปที่ 4.5 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่า Plateau modulus (M_{HF}) ของยางผสมสูตร

4.1.2 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อมโยง (n)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงด้วยเทคนิคการบวมตัวด้วยตัวทำละลาย (Solvent swelling method) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 วัน โดยเลือกใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย (Solvent) โดยค่าความหนาแน่นเชื่อมโยง เป็นสมบัติที่ใช้บ่งบอกถึงสมบัติการเสีรูปร่างของยาง โดยยางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงจะทำให้ยางคงสมบัติของยาง ได้แก่ ความยืดหยุ่น แข็งแรง มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ดังนั้นเมื่อยางได้รับแรงกระทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง และเมื่อปล่อยแรงกระทำจะทำให้ยางสามารถคืนสู่รูปร่างเดิมได้ดีกว่ายางที่มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบยางธรรมชาติ กับยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมที่แตกต่างกันในปริมาณต่างๆ จะเห็นได้ว่ายางที่มีการผสม Claytone® จะให้ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางธรรมชาติ เป็นผลมาจาก Claytone® เป็นเคลย์ชนิดคัดแปรที่มีสารอินทรีย์ในกลุ่มของเอมีนที่ใช้ในการปรับปรุงเคลย์มีฤทธิ์เป็นด่าง จะช่วยทำให้ยางมีอัตราของการเชื่อมโยงเร็วขึ้น เวลาเชื่อมโยงของยางลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของลักษณะการเชื่อมโยงจากหัวข้อก่อนนี้ ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์กลายเป็นโครงสร้างร่างแหแบบ 3 มิติ ในส่วนของยางที่มีการผสม Calcined clay จะให้ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางธรรมชาติเพียงเล็กน้อยแต่มีค่าน้อยกว่า Claytone® เนื่องจาก Calcined clay เป็นเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการให้ความร้อนทำให้โมเลกุลของน้ำที่ติดอยู่ในโครงสร้างของเคลย์หลุดออก (Bound water) ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลทำให้มีความสามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับเคลย์ชนิดที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง และในส่วนของยางที่มีการผสม MMT พบว่าค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงมีค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติและมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิด เนื่องจาก

MMT มีความมีขั้วสูงส่งผลทำให้มีความสามารถในการดูดสารเคมีบางชนิด ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงลดลง เกิดการหน่วงการเชื่อมโยง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนนี้ ทำให้ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงที่ได้มีค่าต่ำมาก โดยค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงทั้งหมดที่คำนวณได้ ได้แสดงใน ภาคผนวก ข

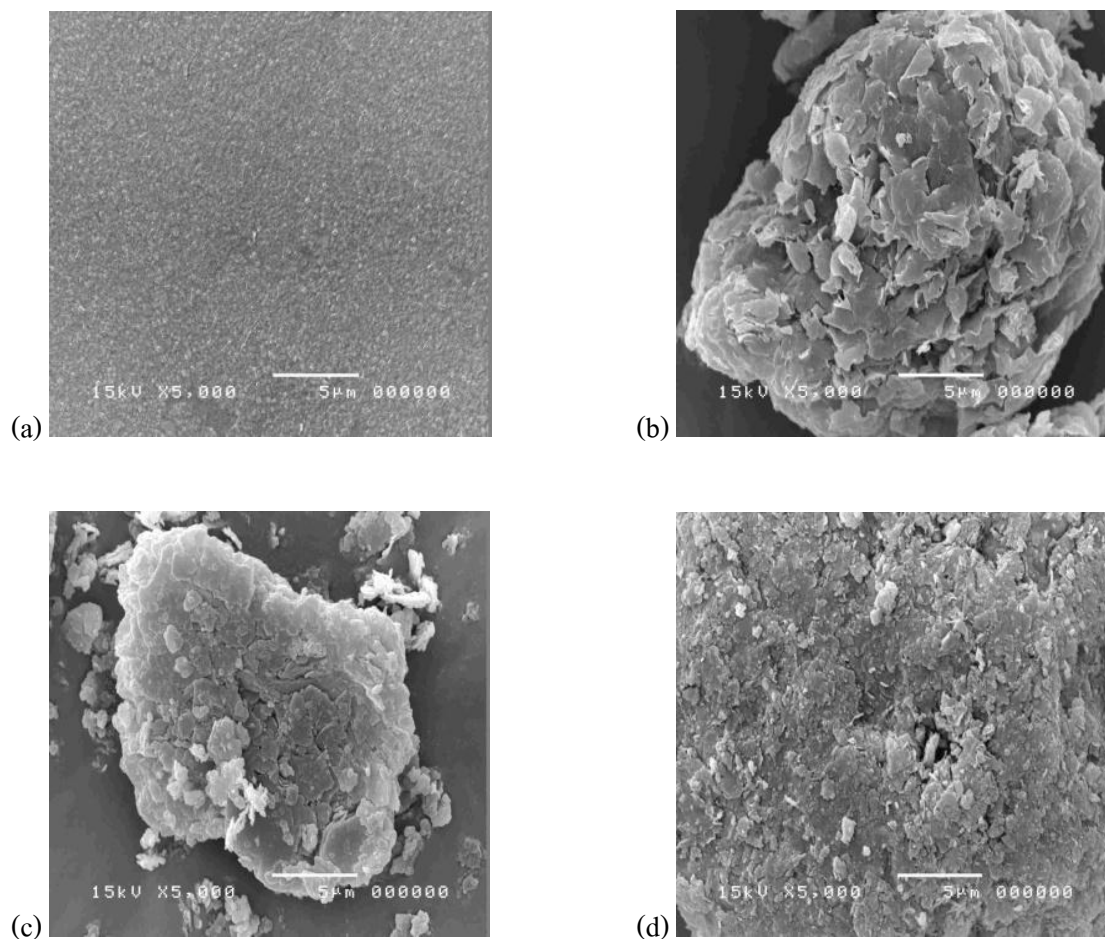


รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ที่แตกต่างกันในปริมาณต่างๆ

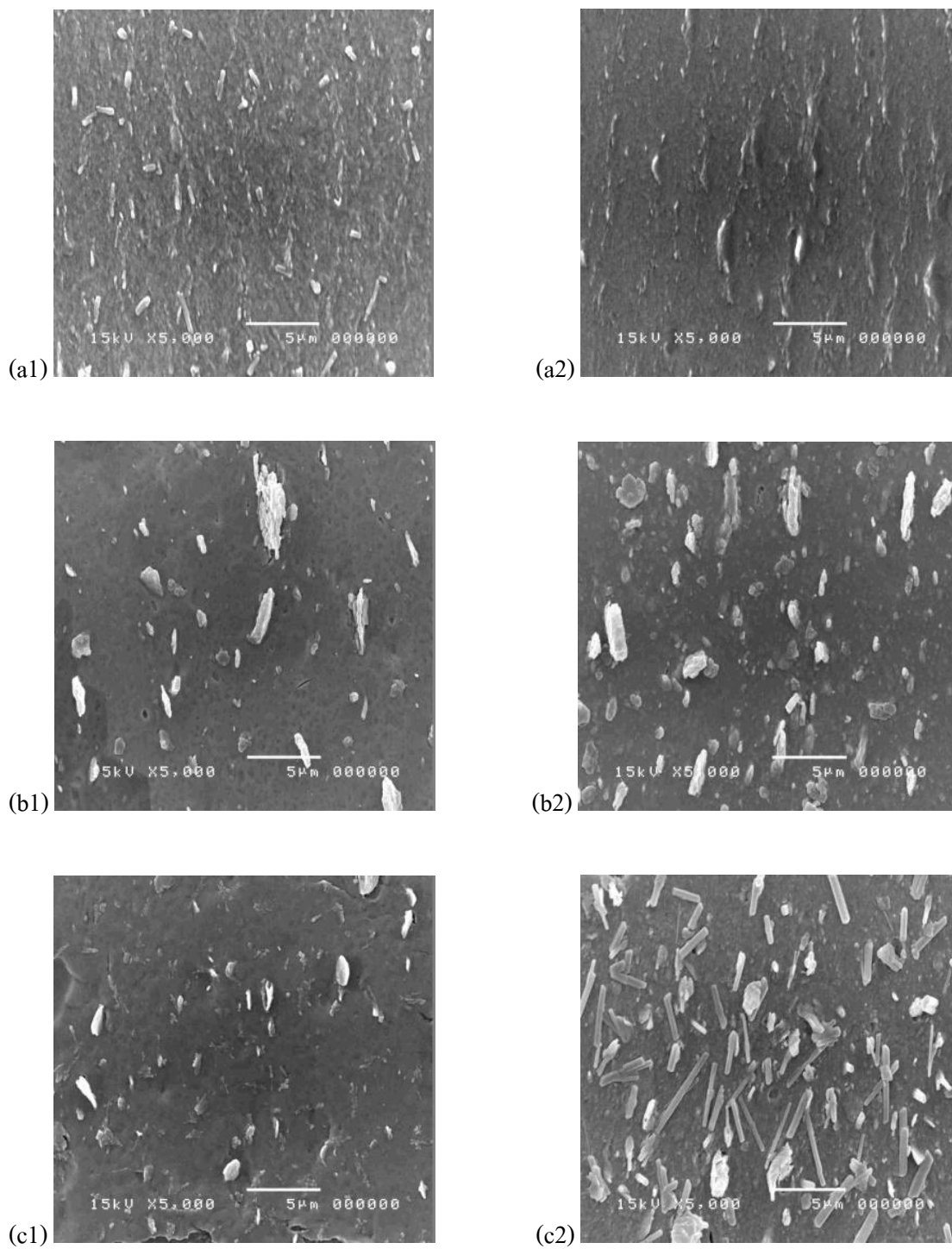
4.1.3 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยการตัดชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครโทม และมีการสกัดพื้นผิวชิ้นงานโดยใช้สารละลายกรด จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง พบว่า รูปที่ 4.7 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) Claytone[®] (c) Calcined clay และ (d) MMT จะเห็นได้ว่าเคลย์ทั้ง 3 ชนิดนั้นมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal platelets) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยขอบที่จะจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต รูปที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone[®], Calcined clay และ MMT ที่ปริมาณ 10 และ 20 phr ตามลำดับ พบว่า Claytone[®] มีการกระจายตัวได้ดีทั่วทั้งชิ้นงาน ไม่จับตัวรวมกันเป็นก้อน เนื่องจาก Claytone[®] เป็นเคลย์ชนิดคัดแปรหรือออร์กาโนฟิลลิกเคลย์เป็นเคลย์ที่ถูกปรับปรุงให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือชอบสารอินทรีย์ทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ (ไม่มีขั้ว) เกิดการกระจายออกเป็นชั้นเดี่ยวๆ กระจายในยางธรรมชาติได้ดี ในส่วนของ Calcined clay เป็นเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงทำให้มีความสามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำ

ที่ติดอยู่ในโครงสร้างของเคลย์หลุดออก แต่การกระจายตัวของ Calcined clay ไม่ดีนัก เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ และในส่วนของ MMT เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความมีขี้สูงเนื่องจากเคลย์มีโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้ ติดอยู่ในโครงผลึก จึงก่อให้เกิดปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ไม่ดีกับยางธรรมชาติ ซึ่งเคลย์อาจก่อให้เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือ แอกลอเมอร์ต ส่งผลทำให้เกิดการกระจายตัวได้ไม่ดี



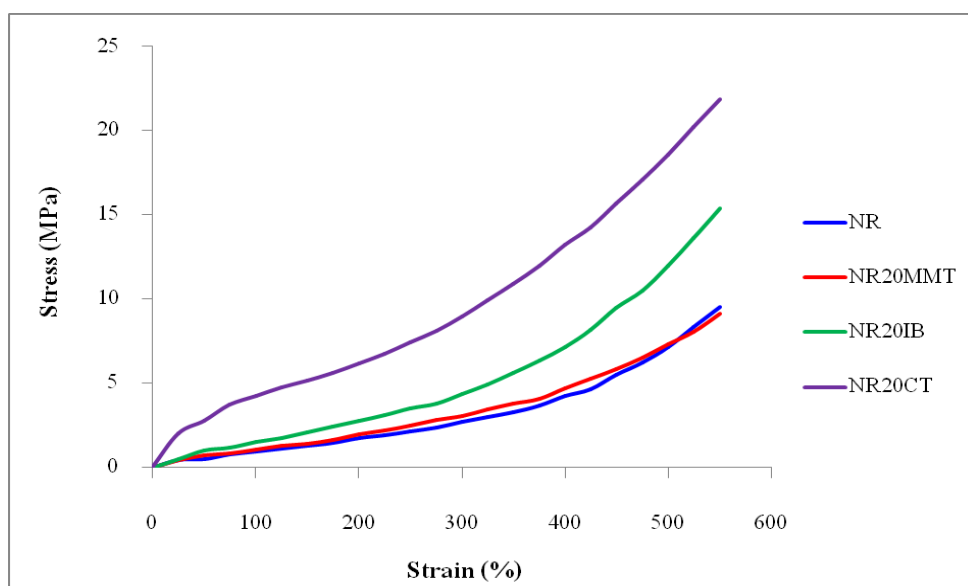
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ (a) ยางธรรมชาติ (b) Claytone® (c) Calcined clay และ (d) MMT



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (ซ้าย) (a1) NR10CT (b1) NR10IB และ (c1) NR10MMT (ขวา) (a2) NR20CT (b2) NR20IB และ (c2) NR20MMT

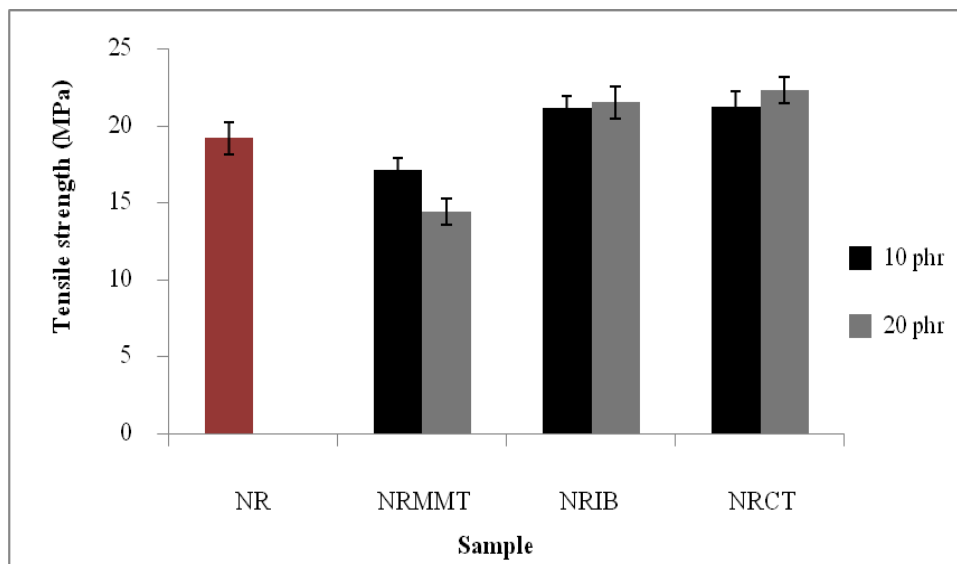
4.1.4 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล โดยศึกษาทางธรรมชาติ และทางธรรมชาติผสมเคลย์ ปริมาณ 20 phr จากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเคลย์ ปริมาณ 20 phr จะเห็นได้ว่าตลอดช่วงที่ทำการทดสอบยางที่มีเคลย์ต่างชนิดกันจะแสดงพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยยางธรรมชาติจะมีความสามารถในการรับแรงที่ต่ำ เมื่อทำการผสม MMT ลงไปในยางธรรมชาติ พบว่าพฤติกรรมของยางไม่เปลี่ยนแปลงทั้งนี้เนื่องจาก MMT มีความมีขั้วสูง ส่งผลทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ และความสามารถในการกระจายตัวในยางธรรมชาติไม่ดี ดังรูปที่ 4.8 จึงจัดได้ว่า MMT เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงจึงส่งผลทำให้มีความสามารถในการรับแรงที่ไม่แตกต่างกับยางธรรมชาติ เมื่อผสม Calcined clay ลงไปในยางธรรมชาติ พบว่าส่งผลกระทบบ้างเล็กน้อยต่อพฤติกรรมของยางเนื่องจาก Calcined clay เป็นเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้โมเลกุลของน้ำที่ติดอยู่ในโครงสร้างของเคลย์หลุดออก ส่งผลทำให้มีความสามารถเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติเป็นผลทำให้มีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อผสม Claytone® ลงไปในยางธรรมชาติ พบว่าพฤติกรรมของยางเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้เนื่องจาก Claytone® เป็นเคลย์ชนิดตัดแปรที่ส่งผลทำให้ความมีขั้วลดลง มีลักษณะเป็นแผ่น มีความสามารถในการเข้ากันได้ดีและเกิดการกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการรับแรงมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเคลย์ทั้ง 2 ชนิด

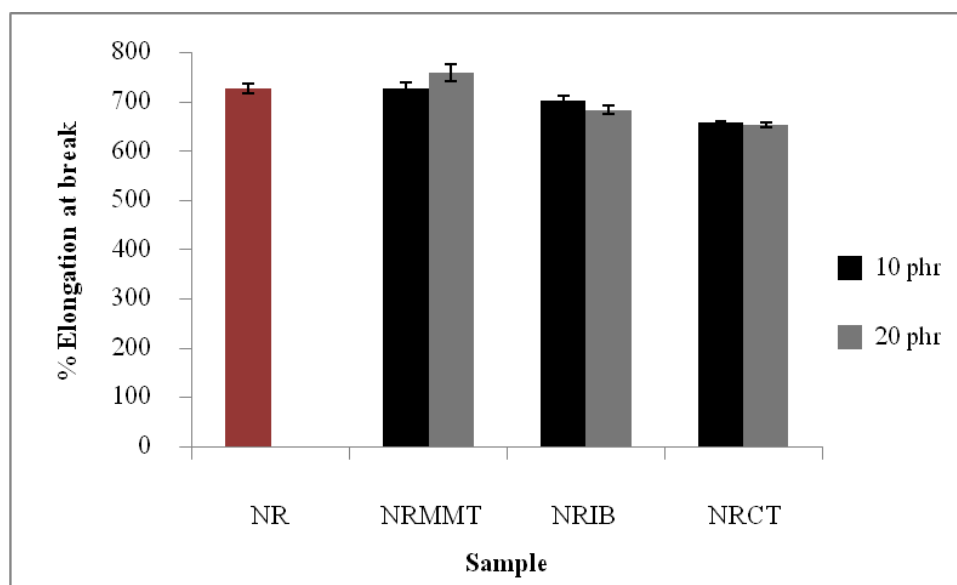


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น-ความเครียดของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเคลย์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 20 phr

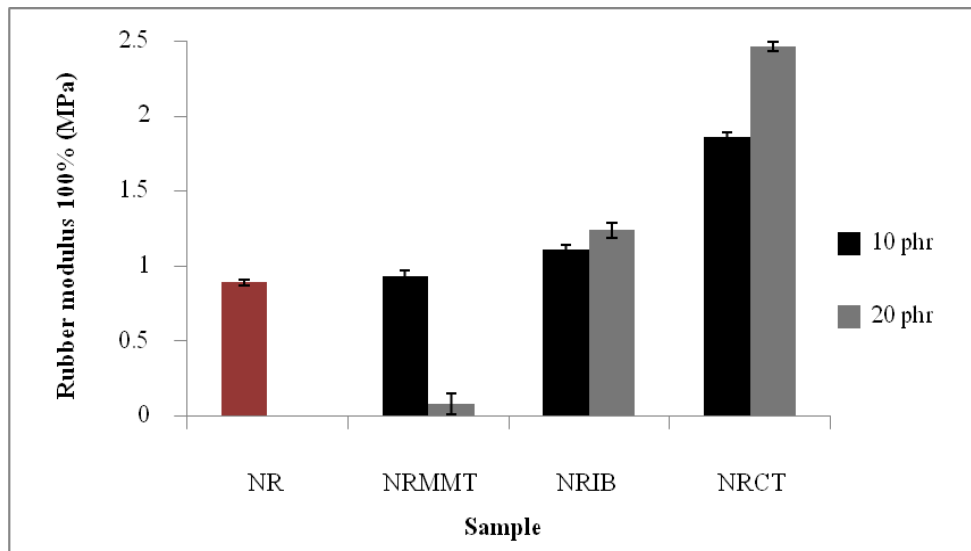
จากผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 412 พบว่ายางธรรมชาติมีสมบัติเด่นในเรื่องการยืดหด (Elastic) ยืดหยุ่น (Flexible) เหนียว (Tough) ที่แข็งแรงสามารถรับแรงดึงและเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อรับแรง เมื่อมีการเติมเคลย์ต่างชนิดกัน พบว่า ยางที่ผสม Claytone® ให้ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (Rubber modulus, M100) และค่าความแข็งแรงที่สูงกว่ายางที่ผสม Calcined clay และ MMT ตามลำดับ เนื่องจาก Claytone® เป็นเคลย์ชนิดดัดแปรที่มีสารอินทรีย์ในกลุ่มของเอมีนมาใช้ในการปรับปรุงเคลย์ จะช่วยทำให้เร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์กลายเป็นโครงสร้างร่างแหแบบ 3 มิติส่งผลทำให้มีอัตราของการเชื่อมโยงเร็วขึ้น เวลาเชื่อมโยงของยางลดลง ดังรูปที่ 4.2 – 4.5 และอีกเหตุผลในเรื่องของการกระจายตัวดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ Claytone® มีประสิทธิภาพการเสริมแรงในยางธรรมชาติสูงกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณการใส่เคลย์จาก 10 เป็น 20 phr พบว่า สมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น ตามลำดับ [39-40] ในส่วนของ ยางที่ผสม Calcined clay ให้ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (Rubber modulus, M100) และค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า MMT เนื่องจาก Calcined clay เป็นเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงทำให้ให้โมเลกุลของน้ำที่ติดอยู่ในโครงสร้างของเคลย์หลุดออก ส่งผลทำให้มีความสามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติเป็นผลทำให้มีความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับ MMT แต่ความสามารถในการเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติไม่ด้นักเมื่อเปรียบเทียบกับ Claytone® เห็นได้จากผลของความหนาแน่นเชื่อมโยงที่กล่าวไว้ข้างต้น และในส่วนของยางที่ผสม MMT ให้ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด (Rubber modulus, M100) และค่าความแข็งแรงที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมอีก 2 ชนิด มีเหตุผลมาจาก MMT มีการกระจายตัวที่ไม่ดีในยางธรรมชาติ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ส่งผล ทำให้เวลาขึ้นรูปขึ้นงานเกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defects) ในตัวชิ้นงานส่งผลทำให้เมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลทำให้ค่าที่ได้มีค่าลดน้อยลง



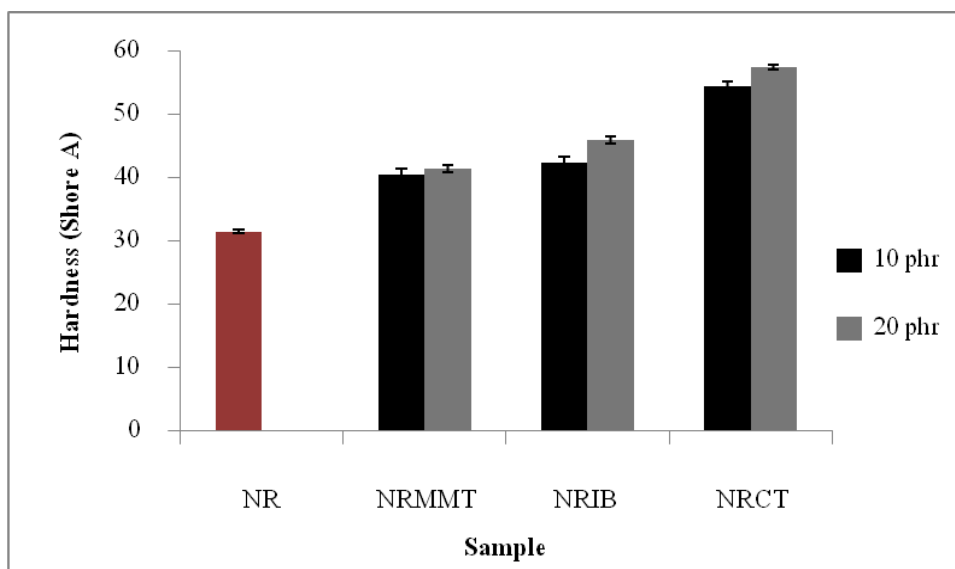
รูปที่ 4.10 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.11 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.12 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร

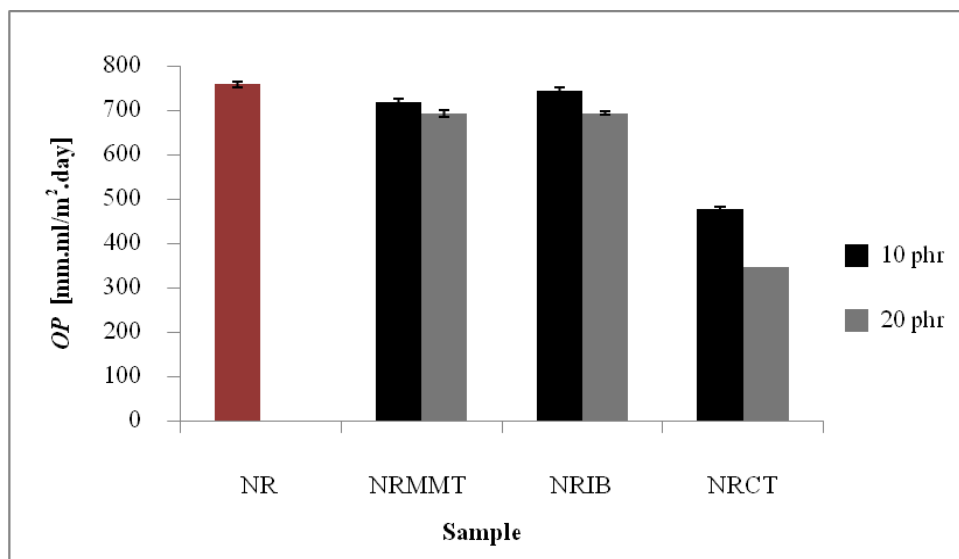


รูปที่ 4.13 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร

4.1.5 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ยางธรรมชาติมีข้อจำกัดในเรื่องความสามารถในการกักอากาศได้ไม่ดี ส่งผลทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability coefficient, *OP*) ที่สูง (760 mm.ml/m².day) เมื่อนำชิ้นงานที่ผสมด้วย Claytone[®] ปริมาณ 10 และ 20 phr มาทดสอบพบว่า ได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ลดลงเกือบ 2 เท่า (470 และ 368 mm.ml/m².day ตามลำดับ) หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 38.2 % และ 51.6 % เมื่อเทียบ

กับกรณีไม่ผสมเคลย์และกรณีผสม Calcined clay และ MMT เนื่องจาก Claytone® เกิดการกระจายตัวทั้งชิ้นงาน (ยื่นยื่นจากรูปสัณฐานวิทยา) สอดคล้องกับทฤษฎี Tortuosity กล่าวคือ เส้นทางการผ่านของก๊าซออกซิเจนต้องเป็นไปตามชั้นเคลย์ที่กระจายกันขวางอยู่ในเมตริกซ์ กรณีที่อนุภาคเคลย์วางตัวในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ผ่านของ โมเลกุลก๊าซ ส่งผลทำให้ระยะทางที่โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ โดยก๊าซจะต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดเคี้ยวรอบๆ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น

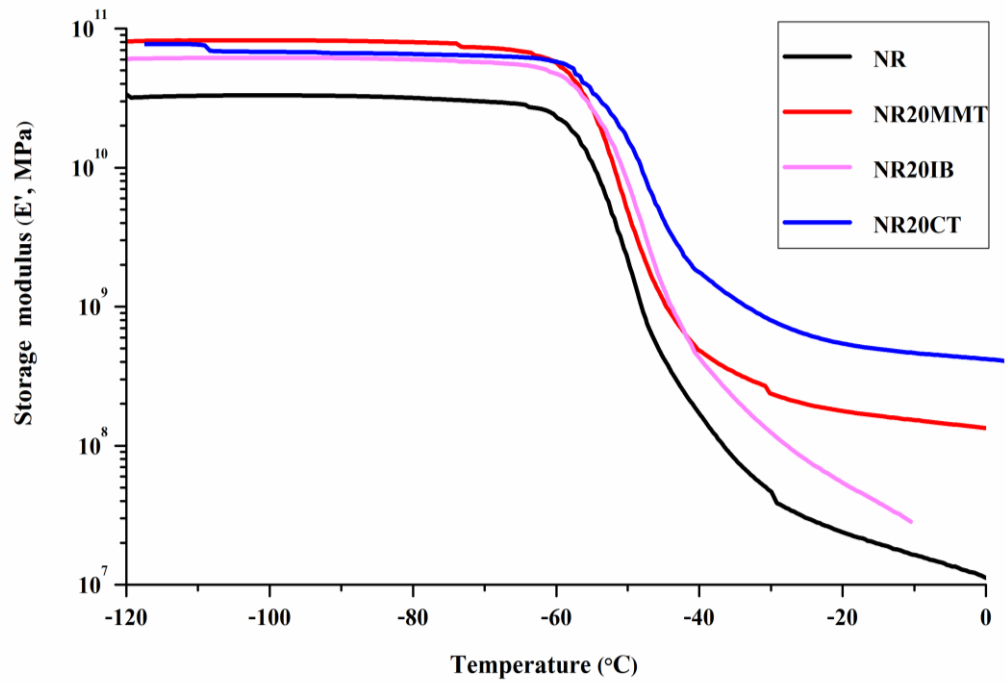


รูปที่ 4.14 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของยางผสมสูตร

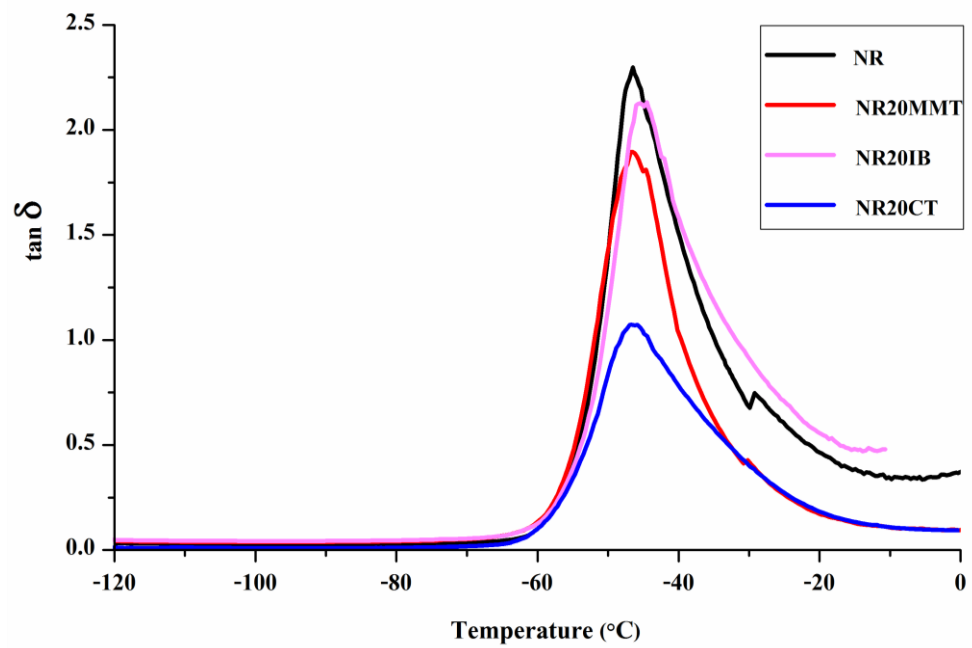
ในกรณีที่ไม่ผสม Calcined clay และ MMT ในยางธรรมชาติ พบว่าให้ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ไม่ต่างจากยางธรรมชาติมากนัก เนื่องมาจากเคลย์ทั้ง 2 ชนิด มีการกระจายตัวของอนุภาคเคลย์ในยางที่ไม่ดี ดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าอนุภาคของเคลย์เกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือแอกโกลเมอเรต ทำให้มีระยะทางที่โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนสามารถเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้นเคลย์ที่จะสกัดกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซมีจำนวนน้อย จึงทำให้โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนสามารถวิ่งผ่านชิ้นงานได้อย่างอิสระ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนต่ำ

4.1.6 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์ที่มีต่อสมบัติความร้อนเชิงกล

ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA ซึ่งเป็นการศึกษาความร้อนเชิงกลของวัสดุเมื่อได้รับแรงสั่นอย่างต่อเนื่อง ที่ใช้หาค่ามอดุลัสสะสม (E') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (E'') ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่กับอุณหภูมิ และจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสียและค่ามอดุลัสสะสม (Loss modulus/ Storage modulus; E''/E') ซึ่งได้เป็นค่า $\tan \delta$ สามารถหาอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของวัสดุได้ ซึ่งหาได้จากจุดสูงสุดของกราฟ $\tan \delta$ จากการศึกษาสมบัติความร้อนเชิงกลด้วยเทคนิค DMTA ของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเคลย์ กับยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ต่างชนิดกันที่ปริมาณ 20 phr ดังรูปที่ 4.15 พบว่าค่ามอดุลัสสะสมยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติม เช่น Claytone[®], Calcined clay และ MMT ให้ค่าสูงกว่ายางธรรมชาติตลอดช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา -120°C ถึง 0°C เนื่องจากสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดนี้เพิ่มความแข็งให้แก่ยางธรรมชาติให้มีค่าสูงเพิ่มขึ้น พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมที่แตกต่างกันจะส่งผลทำให้ความแข็งแตกต่างกันด้วยซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ได้ ยางธรรมชาติที่ผสมด้วย Claytone[®] มีความแข็งมากสุดในส่วนของยางธรรมชาติผสมด้วย Calcined clay หรือ MMT มีความแข็งที่ใกล้เคียงกันแต่มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ เมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติที่มีการเติมเคลย์ต่างชนิดกัน พบว่า Claytone[®] ความสูงของค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดนั้นแสดงให้เห็นถึง Claytone[®] สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ดี ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น โอกาสในการสูญเสียพลังงานในส่วนที่เป็นมอดุลัสสูญเสียมีค่าน้อยลง ค่า $\tan \delta$ จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนในการเติม Calcined clay หรือ MMT ความสูงของค่า $\tan \delta$ มีค่าไม่แตกต่างกับยางธรรมชาติมากนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติได้ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าการเติมเคลย์ต่างชนิดกันในยางธรรมชาติ ค่า T_g ปรากฏที่อุณหภูมิ -44 ถึง -46°C ซึ่งเป็น T_g ของยางธรรมชาติไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรม DMTA ของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเคลย์ ปริมาณ 20 phr
 (ก) ค่ามอดุลัสสะสม (E') และ (ข) ค่า $\tan \delta$

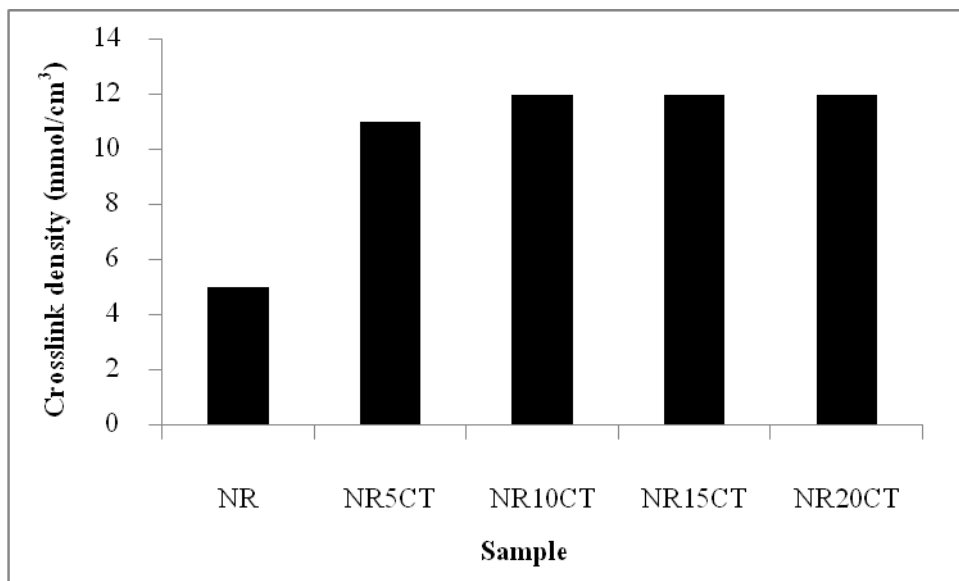
4.1.7 สรุปผลของชนิดและปริมาณเคลย์

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT ที่ปริมาณ 10 และ 20 phr พบว่า ยางที่ผสม Claytone[®] ให้ค่าลักษณะการเชื่อมโยง, สมบัติเชิงกล และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ต่ำกว่ายางที่ผสม Calcined clay และ MMT เนื่องมาจากเป็นเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรให้มีสมบัติความมีขั้วลดลงสามารถเกิดความเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ และมีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกัน มีค่า Aspect ratio ที่สูง เมื่อเกิดความเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ ส่งผลทำให้ Stack ของเคลย์เกิดการกระจายตัวออก เป็นการเพิ่มระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของโมเลกุลก๊าซ ส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าลดต่ำลงเมื่อผสม Claytone[®] ปริมาณ 20 phr (470 mm.ml/m².day) ดังนั้นจึงนำ Claytone[®] มาทำการศึกษาในหัวข้อถัดไปโดยศึกษาผลของปริมาณ Claytone[®] ที่มีต่อสมบัติยาง

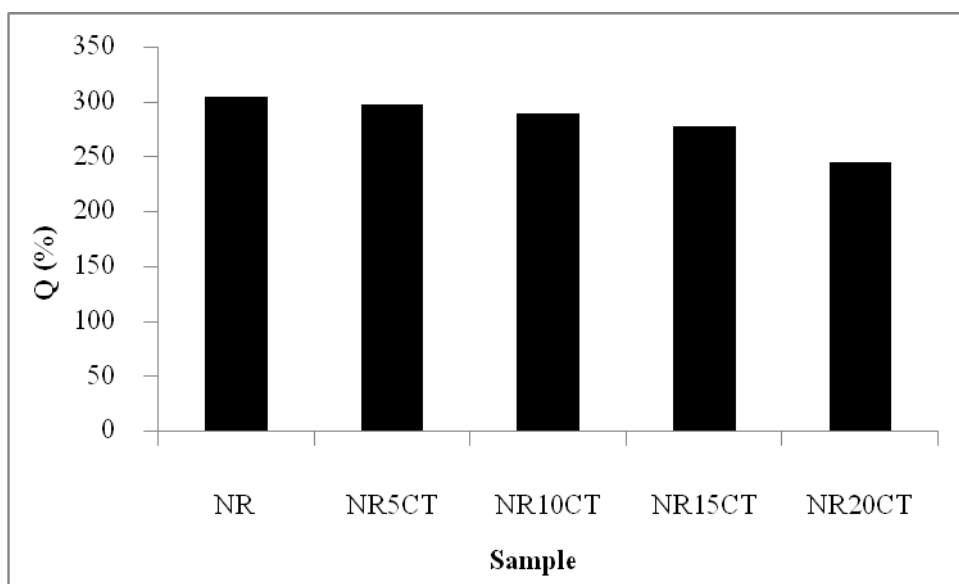
4.2 ศึกษาผลของปริมาณ Claytone[®] เท่ากับ 0 – 20 phr ที่มีต่อสมบัติของยาง

4.2.1 ผลของปริมาณ Claytone[®] ที่มีต่อความหนาแน่นเชื่อมโยง (n)

จากการศึกษาค่าความหนาแน่นเชื่อมโยง เมื่อทำการเปรียบเทียบยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] ในปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 phr พบว่ายางที่มีการเติม Claytone[®] จะให้ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางธรรมชาติดังที่อธิบายในหัวข้อก่อนนี้ และเมื่อปริมาณ Claytone[®] ที่ใช้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก Claytone[®] เป็นเคลย์ชนิดตัดแปรที่มีสารอินทรีย์จำพวกเกลือคอลลอยด์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาในการเชื่อมโยงทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์กลายเป็นโครงสร้างร่างแหแบบ 3 มิติ ทำให้ได้ค่าเวลาเริ่มเชื่อมโยงของยาง และเวลาเชื่อมโยงของยางที่เร็ว แต่เมื่อปริมาณ Claytone[®] มากพอถึงจุดจุดหนึ่งค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากระบบมีความเป็นด่างมากพอทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงถึงจุดสมดุล ดังรูปที่ 4.16 โดยค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงทั้งหมดที่คำนวณได้แสดงในภาคผนวก ข ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า Claytone[®] สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงของยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่เติม Claytone[®] จากเหตุผลดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ของยางธรรมชาติ กล่าวคือเมื่อนำยางธรรมชาติที่ไม่ผสม Claytone[®] กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] ในปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 phr ดังรูปที่ 4.17 พบว่าการเพิ่มปริมาณ Claytone[®] ทำให้สัดส่วนของยางในวัสดุลดลง ทำให้ปริมาณยางที่เป็นวัฏภาคที่เกิดการบวมตัวเปลี่ยนขนาดลดลง ส่งผลทำให้การบวมตัวลดลง เนื่องมาจากเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์กลายเป็นโครงสร้างร่างแหแบบ 3 มิติ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น [41]



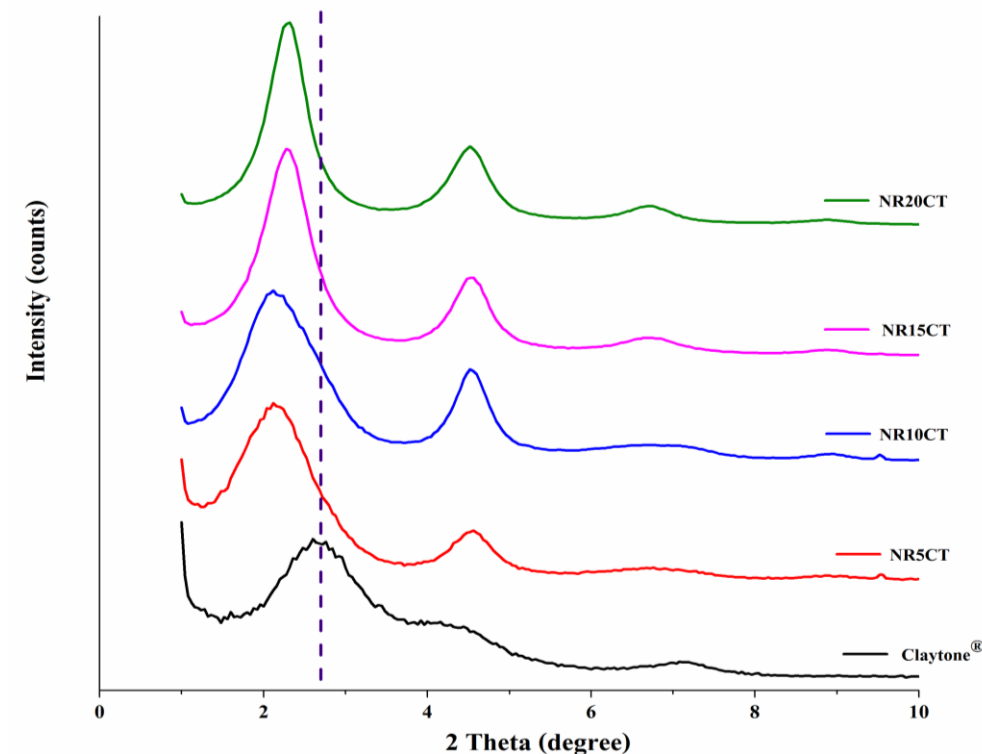
รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] ใน ปริมาณ 0-20 phr



รูปที่ 4.17 พฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ของยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] ใน ปริมาณ 0-20 phr

4.2.2 ผลของปริมาณ Claytone[®] ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®]

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ด้วยเทคนิค XRD พบว่า Claytone[®] ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.7 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] เท่ากับ 3.3 nm ดังรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.2 เมื่อทำการศึกษาค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ในชิ้นงานตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone[®] ปริมาณ 5 และ 10 phr พบว่า Claytone[®] ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.1 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] เพิ่มขึ้นเป็น 4.1 และ 4.2 nm ตามลำดับ เนื่องจาก Claytone[®] เป็นเคลย์ที่ผ่านการคัดแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์มาแล้ว ดังนั้นจึงมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นเคลย์แต่ขอบนอกของแผ่นเคลย์ยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติจึงสามารถเกิดอันตรกิริยาและเกิดการแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของ Claytone[®] จึงเกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ที่เพิ่มสูงขึ้น จึงจัดได้ว่ายางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone[®] ที่ได้จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ Claytone[®] ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งทำให้ความหนืดของยางผสมสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือน (Shear force) ขณะผสมมากขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวออกของแผ่นเคลย์ ส่งผลทำให้ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] มีค่าเพิ่มสูงขึ้น [42] แต่เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone[®] ปริมาณ 15 และ 20 phr พบว่า Claytone[®] ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ลดลงเป็น 3.9 nm ทั้งนี้เนื่องจาก Claytone[®] มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อใส่ในปริมาณมากแรงเฉือนขณะผสมอาจไม่เพียงพอที่ทำให้ Claytone[®] แยกตัวเป็น Stack ได้ทั้งหมดส่งผลทำให้ความสามารถในการแตกตัวเป็น Stack ของ Claytone[®] ลดลง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ในการกระจายตัวของ Claytone[®] จากสาเหตุดังกล่าวเป็นผลทำให้แผ่นเคลย์มีโอกาสกลับมารวมตัวกันเป็น Stack ทำให้ความหนาของ Stack เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ลดลง



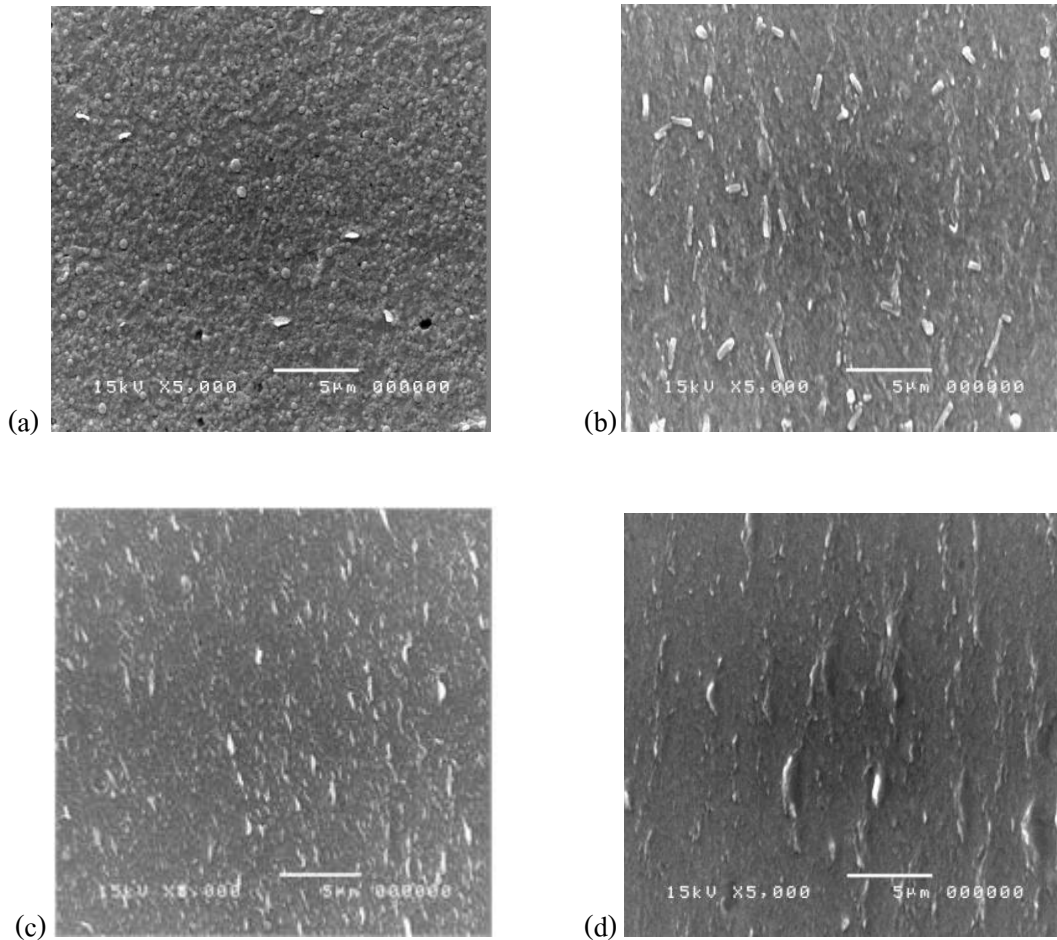
รูปที่ 4.18 XRD patterns ของ Claytone[®] กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] ในปริมาณ 0-20 phr

ตารางที่ 4.2 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของ Claytone[®] และยางธรรมชาติที่ผสมสูตรที่ ปริมาณ Claytone[®] ต่างๆ

สูตร	2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างชั้น (nm)
Claytone [®]	2.7	3.3
NR5CT	2.1	4.1
NR10CT	2.1	4.2
NR15CT	2.3	3.9
NR20CT	2.3	3.9

4.2.3 ผลของปริมาณ Claytone[®] ที่มีต่อสัณฐานวิทยา

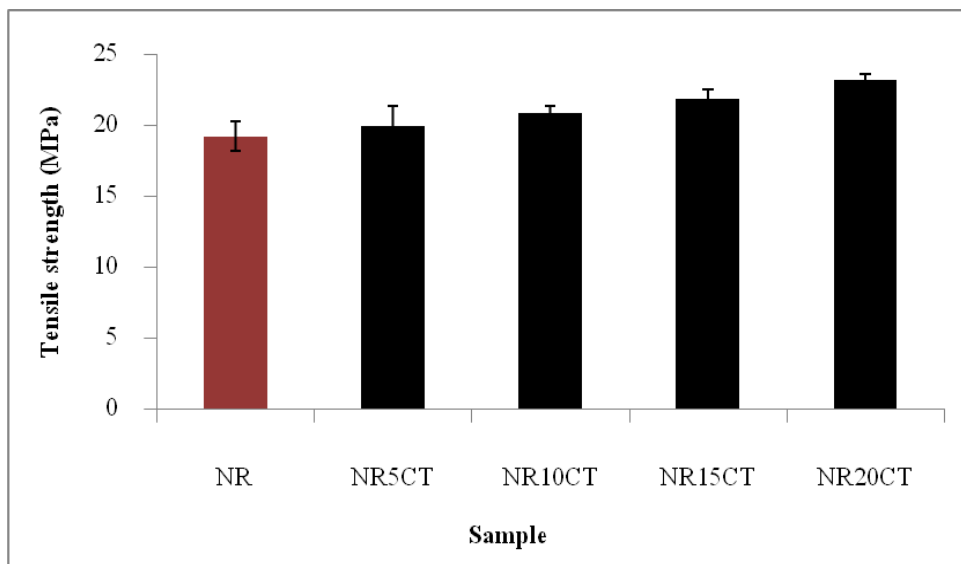
รูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ (a) NR5CT (b) NR10CT (c) NR15CT และ (d) NR20CT พบว่า Claytone[®] เป็นเคลย์ชนิดคัตแปรทำให้ความมีขั้วลดลงจึงส่งผลทำให้ Claytone[®] มีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการกระจายตัว Claytone[®] ในยางธรรมชาติขึ้นกับปริมาณ Claytone[®] ที่ใช้ในยางผสมสูตร



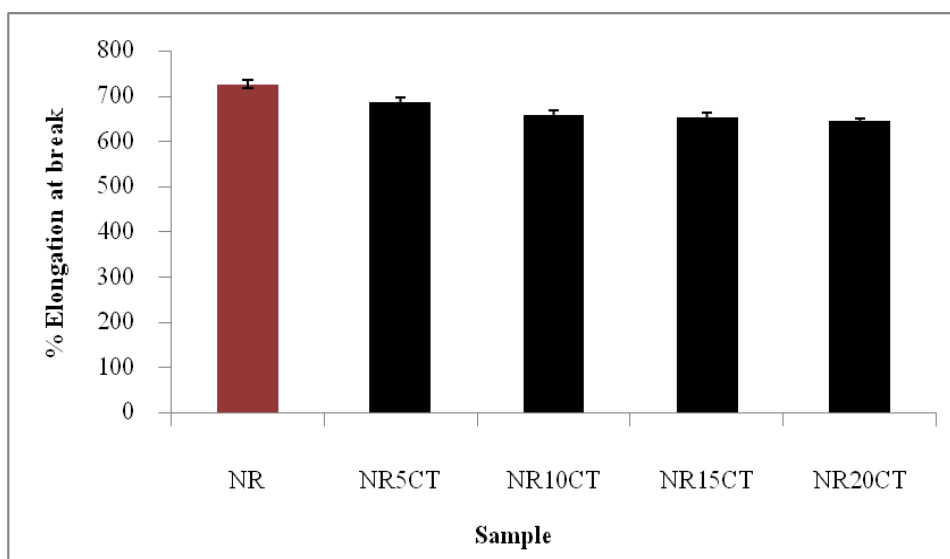
รูปที่ 4.19 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ (a) NR5CT (b) NR10CT (c) NR15CT และ (d) NR20CT

4.2.4 ผลของปริมาณ Claytone® ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

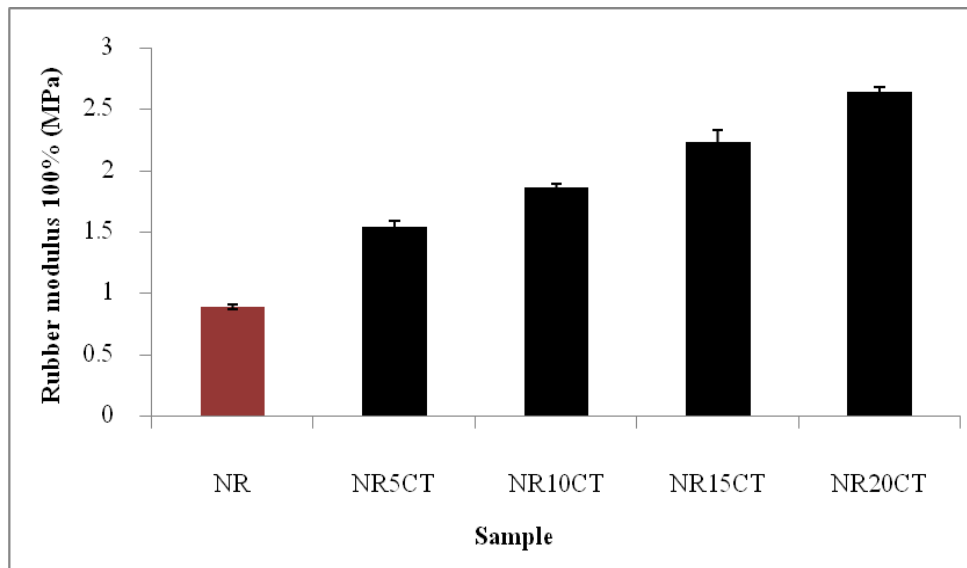
จากผลการศึกษาผลของปริมาณ Claytone® โดยศึกษาที่ปริมาณการผสมเท่ากับ 5, 10, 15 และ 20 phr พบว่า เมื่อปริมาณ Claytone® เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืด และค่าความแข็งกด ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.20 - 4.23 เนื่องจาก Claytone® เป็นเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรทำให้ความมีขั้วลดลง ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาที่ดีกับยางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ อีกทั้งเกิดปรากฏการณ์เสริมแรง (Reinforcing effect) ของ Claytone® เนื่องจาก Claytone® เป็นอนุภาคระดับนาโนที่มีค่า Aspect ratio ที่สูง มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ส่งผลทำให้ในระหว่างกระบวนการผสมเมื่อได้รับแรงเฉือนจากเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง Claytone® เกิดแรงอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างชั้นเคลย์กับสายโซ่ของยางธรรมชาติ [42,43] จึงจัดได้ว่า Claytone® สามารถเป็นสาร ตัวเติมที่เสริมแรงให้แก่ยางธรรมชาติได้



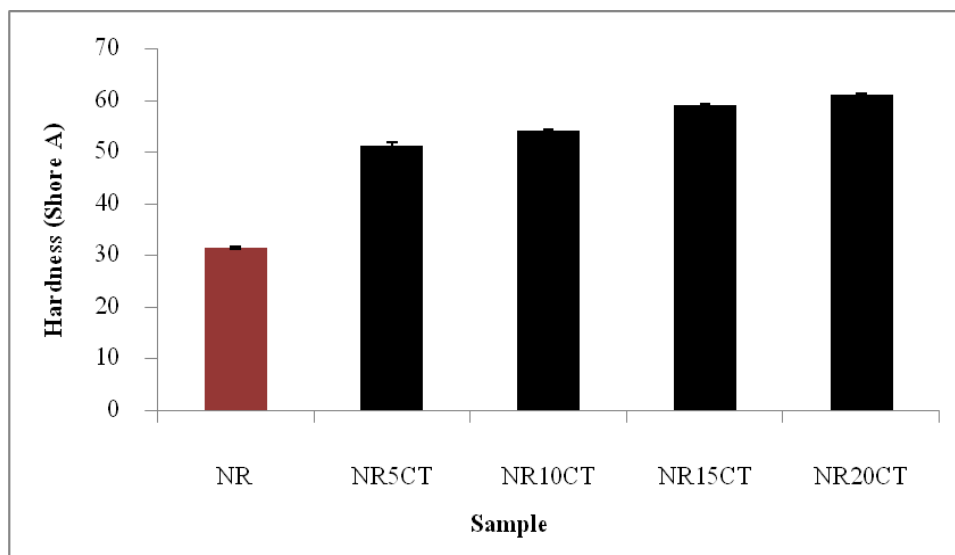
รูปที่ 4.20 ผลของปริมาณ Claytone® ต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.21 ผลของปริมาณ Claytone® ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.22 ผลของปริมาณ Claytone® ต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.23 ผลของปริมาณ Claytone® ต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร

4.2.5 ผลของการวิเคราะห์ปริมาณ Claytone® ในชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณ Claytone® ที่แน่นอนในชิ้นงานตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone® ปริมาณ 5, 10, 15 และ 20 phr ดังตารางที่ 4.3 และภาคผนวก จ พบว่าปริมาณ Claytone® ที่แน่นอนในชิ้นงานตัวอย่างยางธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าที่กำหนดเล็กน้อย อาจเนื่องจากในขั้นตอนการผสมเมื่อใส่ Claytone® ลงไปในยางธรรมชาติ สารเติมแต่ง สารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาโดยค่อยๆ ไล่ระหว่างลูกกลิ้งของเครื่อง

ผสมชนิดสองลูกกลิ้งอนุภาคบางส่วนของ Claytone® จะติดค้างอยู่ในร่องระหว่างลูกกลิ้ง อีกทั้ง Claytone® มีลักษณะเป็นผงจึงเกิดการฟุ้งกระจายในขั้นตอนการผสมได้ง่าย ส่งผลทำให้ปริมาณ Claytone® ที่พบในชิ้นงานตัวอย่างมีค่าน้อยกว่าที่กำหนด

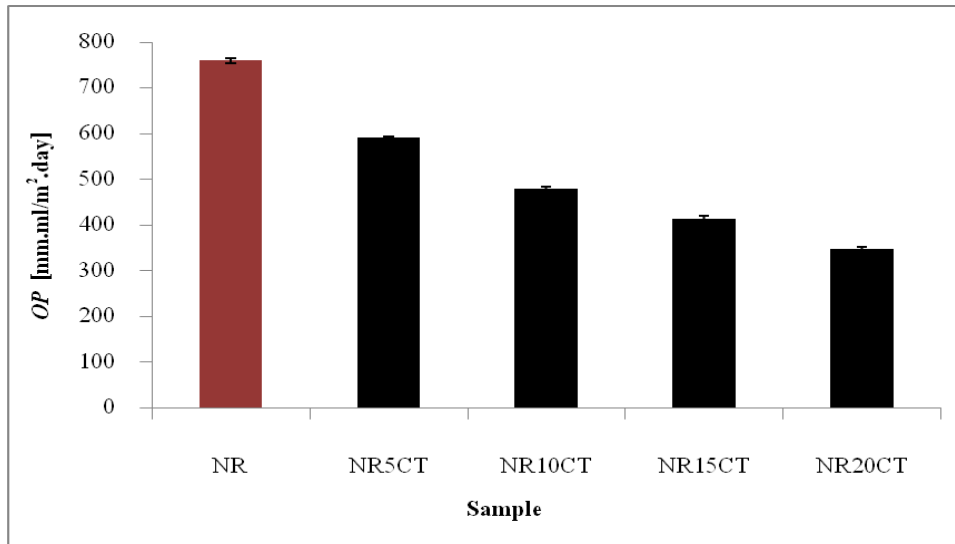
ตารางที่ 4.3 ปริมาณ Claytone® ที่แน่นอนในชิ้นงานตัวอย่างยางธรรมชาติที่มีการเติม Claytone® ในปริมาณต่างๆ

สูตร	ปริมาณ Claytone® ที่กำหนด (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณ Claytone® ที่แน่นอน (% โดยน้ำหนัก)
ยางธรรมชาติ	-	-
NR5CT	5	3.32
NR10CT	10	7.65
NR15CT	15	12.77
NR20CT	20	18.96

4.2.6 ผลของปริมาณ Claytone® ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากผลการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางธรรมชาติที่ผสมด้วย Claytone® โดยพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability coefficient, *OP*) สูตร NR5CT, NR10CT, NR15CT และ NR20CT ดังรูปที่ 4.24 พบว่ายางธรรมชาติที่ผสมด้วย Claytone® มีค่า *OP* ลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติม Claytone® ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากทฤษฎี Tortuosity กล่าวว่ายางธรรมชาติที่เกิดที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางอยู่ในเมตริกซ์จะจัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังรูปที่ 2.7 จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อปริมาณ Claytone® เพิ่มขึ้น Tortuosity factor เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้มีค่า *OP* ลดลง หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดลงการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 26.32%, 38.16%, 44.61% และ 51.58% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติม Claytone® ดังรูปที่ 4.24 เป็นผลมาจากประสิทธิภาพการกระจายตัวของ Claytone® เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในชิ้นงาน ซึ่งจากผลการศึกษาค่า *OP* ในชิ้นงานในปริมาณต่างๆ นำไปสู่การศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาโดยการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภาคผนวก ข ทำให้ทราบว่าอนุภาคซิลิกาในชิ้นงานที่มีปริมาณ Claytone® เพิ่มสูงขึ้นนั้นมีค่า Aspect ratio ที่ลดลงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ Claytone® เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกระจายตัวของ Claytone® ไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นตาม เนื่องจาก Claytone® มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อใส่ในปริมาณมากแรงเฉือนขณะผสมอาจไม่เพียงพอที่ทำให้ Claytone® แยกตัวเป็น Stack ได้ทั้งหมด ส่งผลทำให้ความสามารถในการแตกตัวเป็น Stack ของ Claytone® ลดลง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดใน

เรื่องของพื้นที่ในการกระจายตัวของ Claytone® จากสาเหตุดังกล่าวเป็นผลทำให้แผ่นเคลือบมีโอกาสกลับมารวมตัวกันเป็น Stack ทำให้ความหนาของ Stack เพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า OP ที่ได้มีค่าไม่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณ Claytone® เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางธรรมชาติที่ผสมด้วย Claytone® ปริมาณ 0 – 20 phr

ตารางที่ 4.4 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของ Claytone® สูตร NR5CT, NR10CT, NR15CT และ NR20CT

สูตร	P_s/P_p	Tortuosity factor	Aspect ratio
NR5CT	70/100	1.39	38
NR10CT	55/100	1.73	32
NR15CT	50/100	1.85	23
NR20CT	45/100	1.98	18

4.2.7 สรุปผลของปริมาณ Claytone®

จากผลการศึกษาผลของปริมาณ Claytone® โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 0-20 phr พบว่าการเพิ่มปริมาณ Claytone® ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลงโดยพบว่าที่ปริมาณการผสม Claytone® 20 phr มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 51.58% เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติม Claytone® อาจกล่าวได้ว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่ลดลงไปตามที่

คาดหวังทั้งนี้เห็นได้จากผลของ XRD รูปที่ 4.18 และค่า Aspect ratio ดังตารางที่ 4.3 ที่คำนวณได้ มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าแผ่นเคลย์มีโอกาสกลับมารวมตัวกันเป็นแผ่นเคลย์ใหม่อีกครั้งจึงทำให้ความหนาของแผ่นเคลย์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก Claytone[®] มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเมื่อใส่ในปริมาณมากแรงเฉือนขณะผสมอาจไม่เพียงพอที่ทำให้ Claytone[®] แยกตัวเป็น Stack ได้ทั้งหมด ส่งผลทำให้ความสามารถในการแยกตัวเป็น Stack ของ Claytone[®] ลดลง อาจกล่าวได้ว่าวัสดุที่เตรียมได้จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ในการกระจายตัวของ Claytone[®] ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการแยกตัวของ Claytone[®] ยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นในการศึกษาหัวข้อถัดไปจึงทำการศึกษาถึงผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ในปริมาณ 20 phr เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนให้มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น

4.3 ศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®]

จากการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในวัสดุยางธรรมชาติ/ออร์กาโนเคลย์คอมโพสิต โดยพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ซึ่งมีแนวคิดมาจากทฤษฎี Tortuosity กล่าวคือ เส้นทางผ่านของก๊าซออกซิเจนต้องเป็นไปตามระหว่างชั้นเคลย์ที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่ โครงสร้างของเคลย์ที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางทำให้เกิดเส้นทางคดเคี้ยวสำหรับการเข้าออกของก๊าซต่างๆ หรือเรียกว่า “Tortuous path” โดยระยะทางที่โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ โดยก๊าซจะต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดเคี้ยวรอบๆ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น จากทฤษฎีดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการจัดเรียงตัวของเคลย์มีผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากแนวคิดดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] มี 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 ศึกษาผลของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรเมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ โดยใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง ที่ปริมาณ Claytone[®] 20 phr เนื่องจากผลการทดลองจากตอนที่ 2 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ได้มีค่าลดลงไม่เป็นตามที่คาดหวังเนื่องจาก Stack ของเคลย์เกิดการรวมตัวกันใหม่ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้ค่า Aspect ratio ที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นจึงเป็นที่มาในการเลือกปริมาณ Claytone[®] ที่ 20 phr มาศึกษาในประเด็นนี้ โดยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้งมีอัตราเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งเป็น 1:1.2 เท่า (รอบต่อวินาที) ทำให้เกิดแรงเฉือนที่สูงขณะผสมยางส่งผลทำให้เมื่อนำยางผสมสูตรนำมาผ่านลูกกลิ้งทำให้เกิดแรงเฉือนที่สูงและเมื่อจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งมากขึ้นทำให้เกิดแรงเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้นคาดว่า

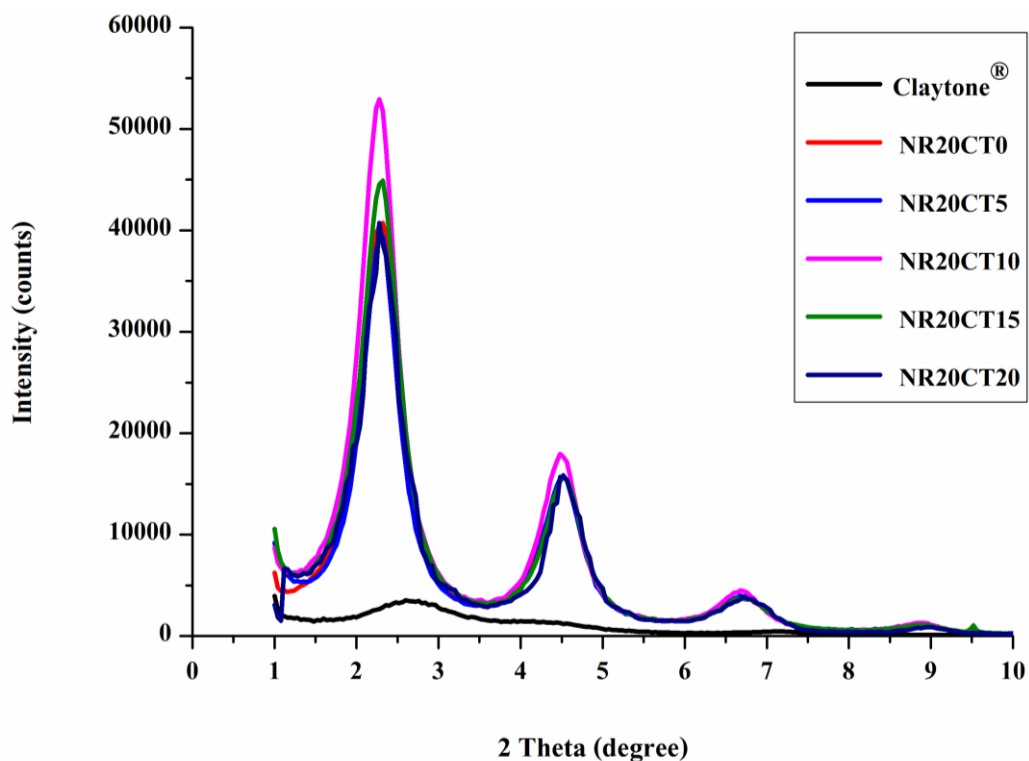
น่าจะทำให้ Claytone[®] เกิดการกระจายอนุภาคเป็นแผ่น และเกิดการจัดเรียงตัวในแนวระนาบยาง ได้ดีขึ้น

วิธีที่ 2 ศึกษาผลของการคลายแรงเค้น (Stress relaxation) ที่ปริมาณ Claytone[®] 5 phr โดย กำหนดความหนาเริ่มต้นของยางผสมสูตรที่ความหนา 0.3, 0.5 และ 1.0 cm จากนั้นใช้เครื่องกดอัด ให้เหลือความหนา 0.1 cm เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการเชื่อมโยงยางในขั้นตอนถัดไป โดยแนวคิดดังกล่าวมีพื้นฐานมาจากการที่ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นในเรื่อง สมบัติความยืดหยุ่น กล่าวคือยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการให้แรงกดอัดอย่างต่อเนื่อง เป็นระยะที่คงที่ เป็นเวลานานๆ อาจทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการ คลายแรงเค้น (Stress relaxation) ไม่สามารถที่จะหดตัวกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อทำการปล่อยแรง คาดว่าน่าจะส่งผล ทำให้ Claytone[®] เกิดการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยาง ได้เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากสมบัติอิลาสติกของยางลดลง

4.3.1 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] โดยการนำยางผสมสูตรมาผ่านลูกกลิ้ง

4.3.1.1 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ที่ปริมาณ 20 phr

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ด้วยเทคนิค XRD พบว่า Claytone[®] ปรากฏฟีก 2 θ ที่ตำแหน่ง 2.7 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] เท่ากับ 3.3 nm เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] ในยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone[®] ในปริมาณ 20 phr แล้วนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ แทนสูตรด้วย NR20CT0, NR20CT5, NR20CT10, NR20CT15 และ NR20CT20 ตามลำดับ พบว่าค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง โดยยางทุกสูตรที่ผสม Claytone[®] ปรากฏฟีก 2 θ ที่ตำแหน่ง 2.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] เท่ากับ 3.9 nm พบว่า วัสดุที่เตรียมได้ จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) จะเห็นได้จากรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนรอบลูกกลิ้งของยางผสมสูตรที่จำนวนรอบต่างๆ ไม่มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone[®] เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Stack ของเคลย์ไม่ได้แตกกระจายออกเป็นอนุภาคแผ่นเดี่ยวๆ อย่างอิสระในชิ้นงาน โดยกระบวนการผสมด้วยวิธีนี้เป็นเพียงการบังคับทิศทางการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ให้เป็นไปตามระนาบของยาง และพบว่าเมื่อนำยางมารีดผ่านเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบมากขึ้น สัญญาณที่วัดได้ (Intensity) โดยส่วนใหญ่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอันเป็นผลมาจากการที่ Claytone[®] เกิดการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยาง ได้ดีขึ้น



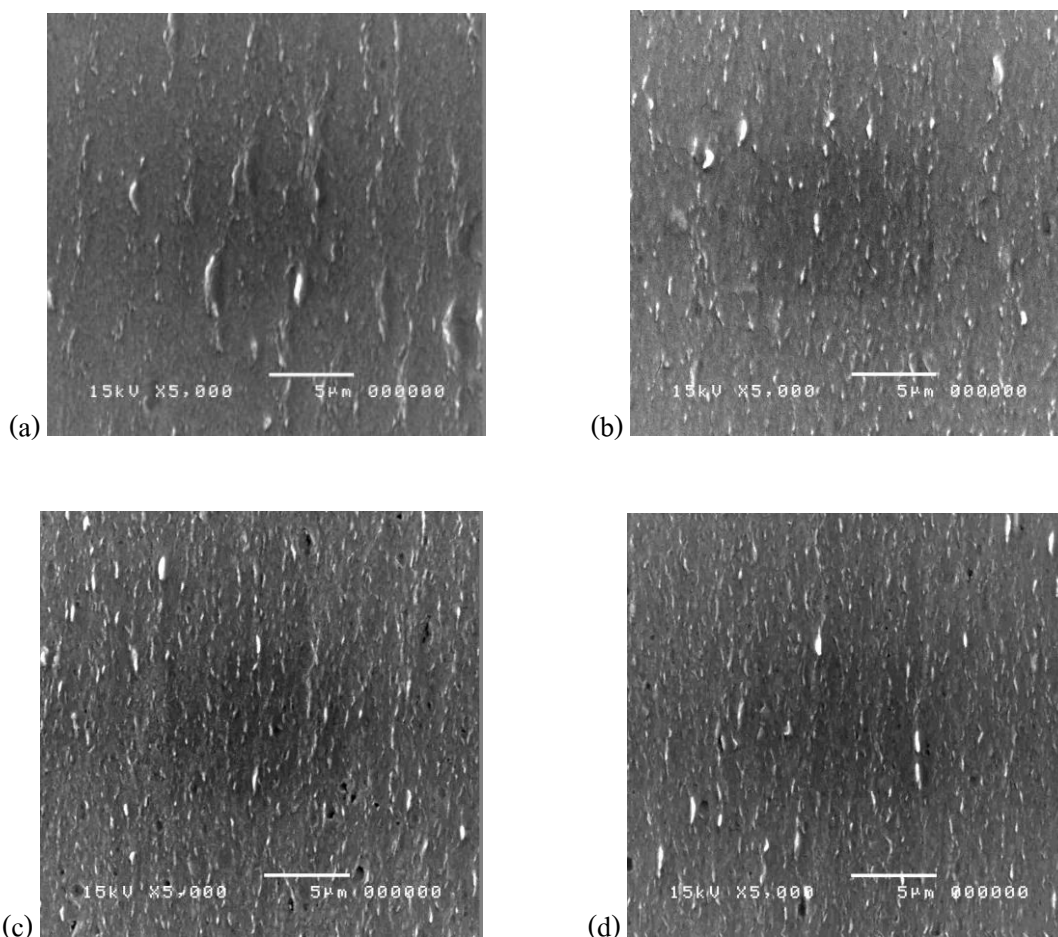
รูปที่ 4.25 XRD patterns ของ Claytone[®] กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] 20 phr เมื่อนำมาผ่าน ลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ

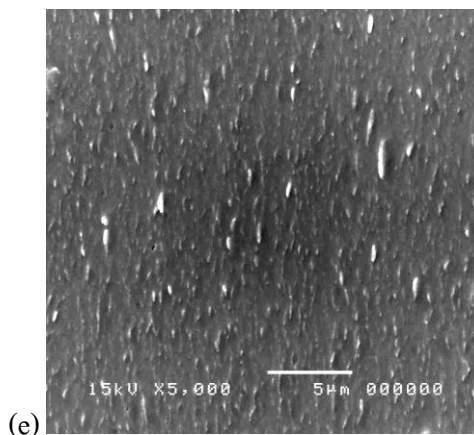
ตารางที่ 4.5 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรที่ปริมาณ Claytone[®] 20 phr เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ

สูตร	2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างชั้น (nm)
Claytone [®]	2.7	3.3
NR20CT0	2.3	3.9
NR20CT5	2.3	3.9
NR20CT10	2.3	3.9
NR20CT15	2.3	3.9
NR20CT20	2.3	3.9

4.3.1.2 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ที่มีต่อสัณฐานวิทยา ที่ปริมาณ 20 phr

รูปที่ 4.26 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่าเมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone[®] 20 phr ในทิศทาง MD เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบตามลำดับ พบว่า Claytone[®] เกิดการกระจายตัวได้ดีในยางธรรมชาติและมีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางที่ไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ยังคงเป็นไปตามแนวระนาบของยาง อาจเป็นผลมาจากการใช้ Claytone[®] ในปริมาณ 20 phr ซึ่งจัดว่าเป็นปริมาณที่สูง จึงทำให้ความเป็นอิลาสติกของยางลดลง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ Claytone[®] มีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางไม่เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน

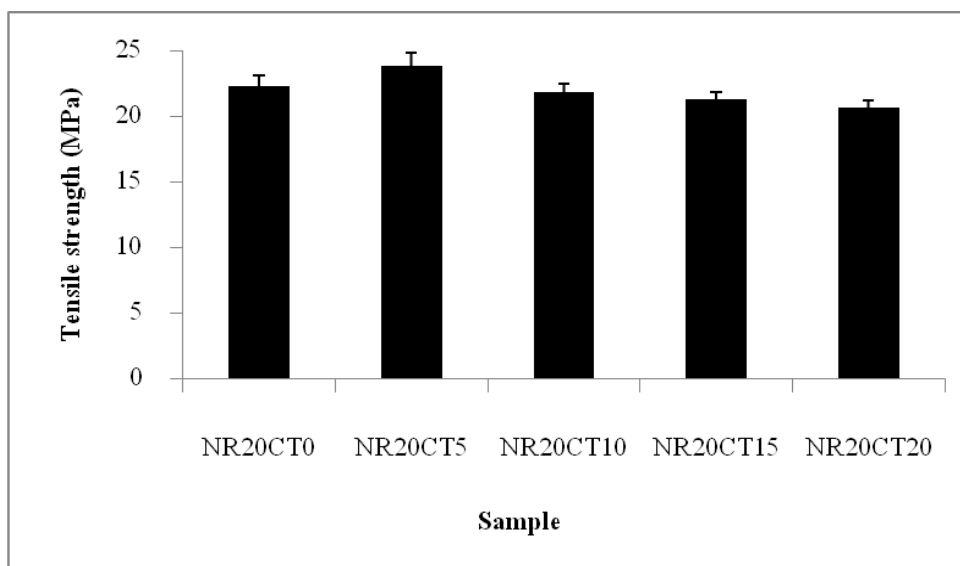




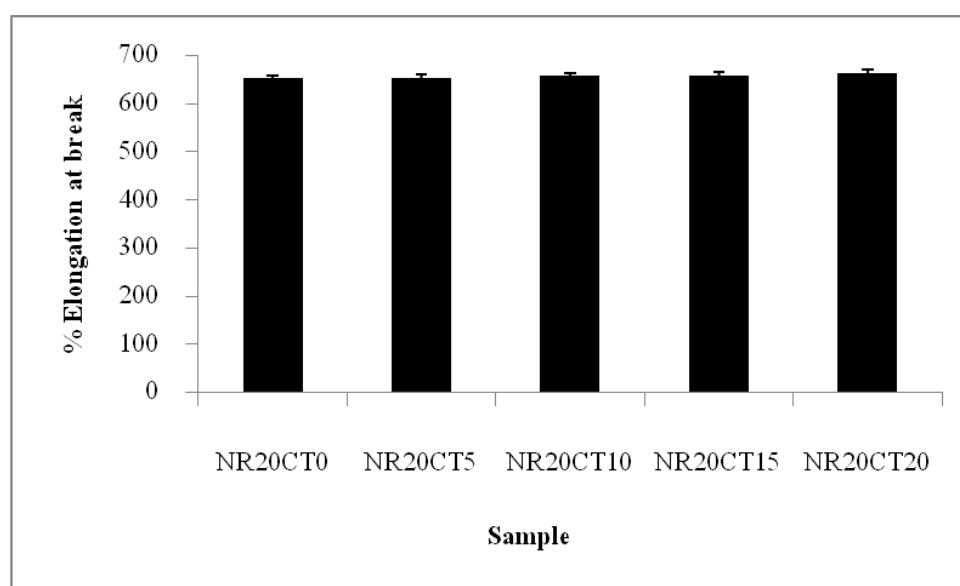
รูปที่ 4.26 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 20 phr ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) (a) NR20CT0 (b) NR20CT5 (c) NR20CT10 (d) NR20CT15 และ (e) NR20CT20

4.3.1.3 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ที่ปริมาณ 20 phr

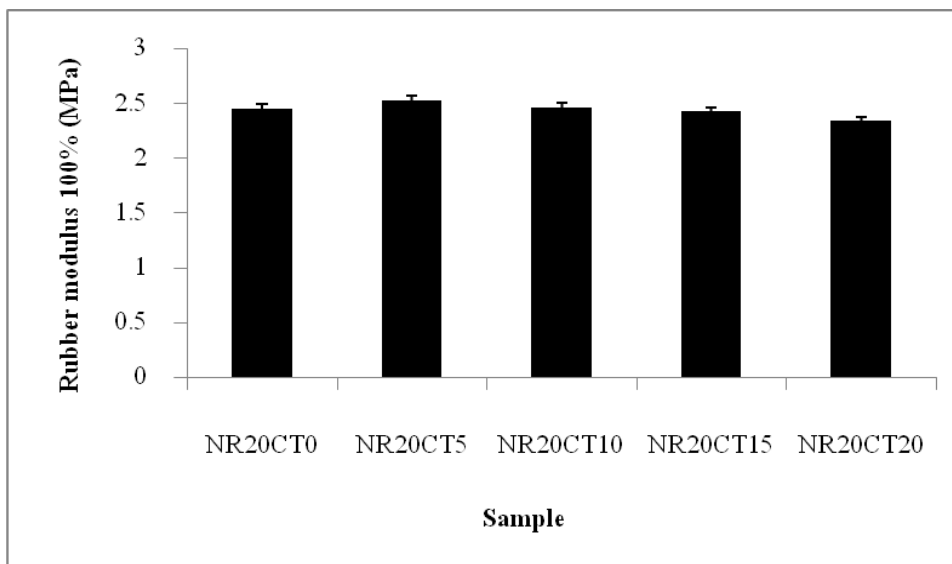
ในการศึกษาการจัดเรียงตัวของ Claytone® ในยางผสมสูตรโดยวิธีผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบต่างๆ (0 – 20 รอบ) ดังรูปที่ 4.27 – 4.30 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด และค่าความแข็งกด พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันเป็นผลมาจากการที่ Claytone® มีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก ดังรูปที่ 4.26 และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งในจำนวนที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากการที่ยางธรรมชาติได้รับแรงเฉือนขณะนำยางผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางบางส่วนถูกตัดออก (Mastication) ส่งผลทำให้ความหนืดของยางมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี้ที่ได้มีค่าลดลง แสดงผลในภาคผนวก ข



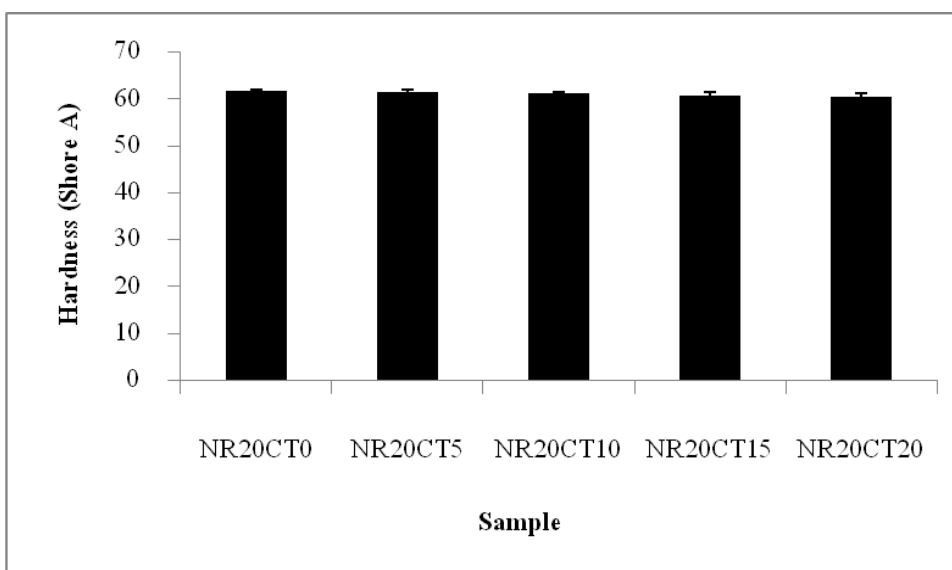
รูปที่ 4.27 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร NR20CT



รูปที่ 4.28 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร NR20CT



รูปที่ 4.29 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่ามอดูลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร NR20CT

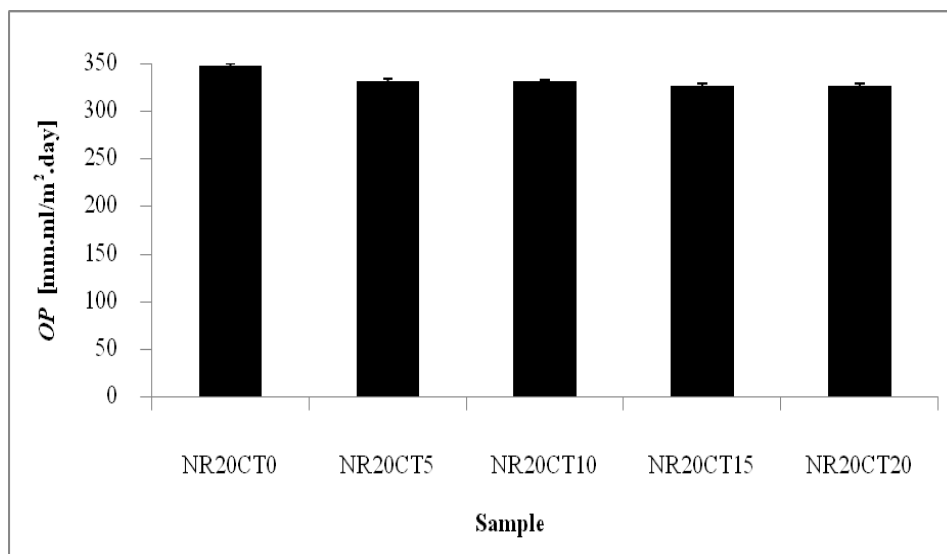


รูปที่ 4.30 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งกคของยางผสมสูตร NR20CT

4.3.1.4 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ที่ปริมาณ Claytone® 20 phr

จากการทดลองพบว่าการนำยางธรรมชาติที่มีการเติม Claytone® ในปริมาณ 20 phr แล้วนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ ตามลำดับ ความสามารถในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าใกล้เคียงกันหรือมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก Claytone® มีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก และเมื่อจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งเพิ่มขึ้นการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่ได้ยังคงเป็นไปตามระนาบของยาง ดังรูปที่ 4.26 ทำให้เส้นทางการผ่านของก๊าซออกซิเจนต้องเป็นไปตามชั้นเคลือบที่กระจายกันขวางอยู่ในเมตริกซ์มีค่าเท่าเดิม ประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจึงไม่แตกต่างกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มจำนวนในการผ่านลูกกลิ้งในงานวิจัยนี้ไม่สามารถที่จะปรับปรุงทิศทางการจัดเรียงตัวของเคลือบได้

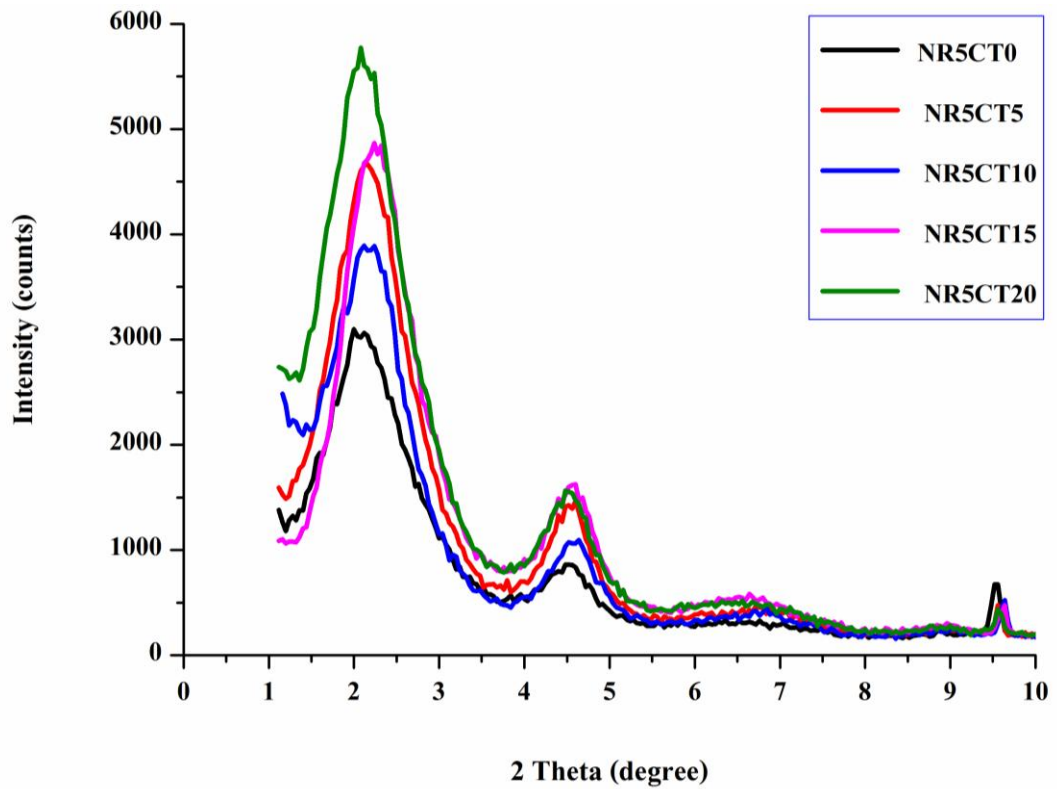


รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางผสมสูตร NR20CT ที่ผ่านลูกกลิ้งจำนวนรอบต่างๆ

จากการทดลองข้างต้นที่ใช้ปริมาณ Claytone® ที่ 20 phr แล้วนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบต่างๆ ผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถเห็นการปรับปรุงการจัดเรียงตัวที่ชัดเจนได้ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ Claytone® ที่ใช้มีปริมาณมากเกินไป ทำให้ยางมีความเป็นอิลาสติกที่น้อยกว่ายางธรรมชาติผสมสูตรที่ไม่มีการเติม Claytone® ส่งผลทำให้ Claytone® มีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทางผู้วิจัยจึงเลือกปริมาณ Claytone® ที่ 5 phr เนื่องจากมีปริมาณน้อยและทำให้ระบบมีความเป็นอิลาสติกที่สูงกว่า คาดว่าน่าจะสามารถบังคับ Claytone® ให้มีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางได้ จากนั้นทำการศึกษาการจัดเรียงตัวทั้ง 2 ทิศทางได้แก่ ทิศทางตามแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) และแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD)

4.3.1.5 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® ที่ปริมาณ 5 phr

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® ด้วยเทคนิค XRD พบว่า Claytone® ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.7 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เท่ากับ 3.3 nm เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® ในยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone® ในปริมาณ 5 phr แล้วนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ แทนสูตรด้วย NR5CT0, NR5CT5, NR5CT10, NR5CT15 และ NR5CT20 ตามลำดับ พบว่า ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยที่จำนวนการผ่านลูกกลิ้งที่ 0 รอบ Claytone® ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.2 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เท่ากับ 3.9 nm เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งเป็น 5 และ 10 รอบ Claytone® ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.1 องศา มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เท่ากับ 4.0 nm และเมื่อจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งเป็น 15 และ 20 รอบ Claytone® ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.0 องศา มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เท่ากับ 4.3 nm และ 4.2 nm ตามลำดับ พบว่า วัสดุที่เตรียมได้ จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) จะเห็นได้จากรูปที่ 4.32 และตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำยางผสมสูตรมาผ่านรอบลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบต่างๆ ไม่ส่งผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Stack ของเคลย์ไม่ได้แตกกระจายออกเป็นแผ่นๆ เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® มีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่า สัญญาณที่วัดได้ (Intensity) โดยส่วนใหญ่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอันเป็นผลมาจากการที่ Claytone® เกิดการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางได้ดีขึ้น



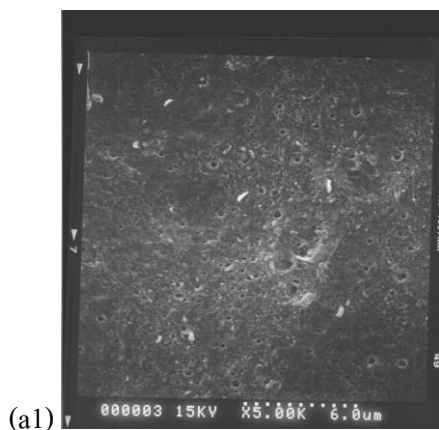
รูปที่ 4.32 XRD patterns ของ Claytone[®] กับยางธรรมชาติที่ผสม Claytone[®] 5 phr เมื่อนำมาผ่าน ลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ

ตารางที่ 4.6 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของยางธรรมชาติที่ผสมสูตรที่ปริมาณ Claytone[®] 5 phr เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง เป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ

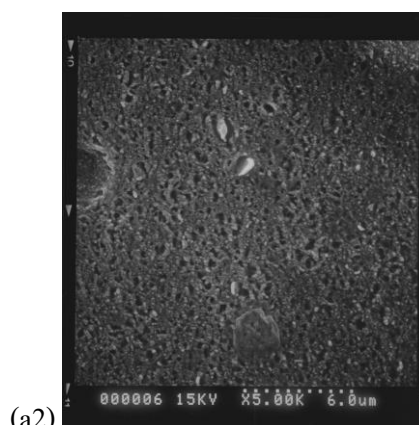
สูตร	2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างชั้น (nm)
Claytone [®]	2.7	3.3
NR5CT0	2.2	3.9
NR5CT5	2.1	4.0
NR5CT10	2.1	4.0
NR5CT15	2.0	4.3
NR5CT20	2.0	4.2

4.3.1.6 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ที่มีต่อสัณฐานวิทยา ที่ปริมาณ 5 phr

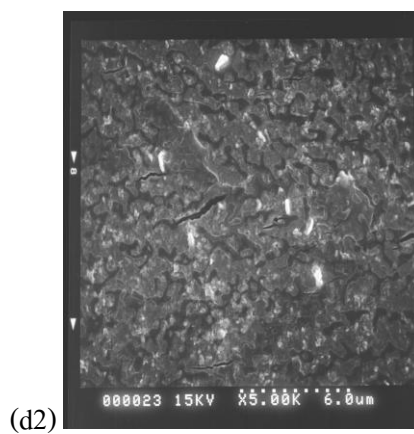
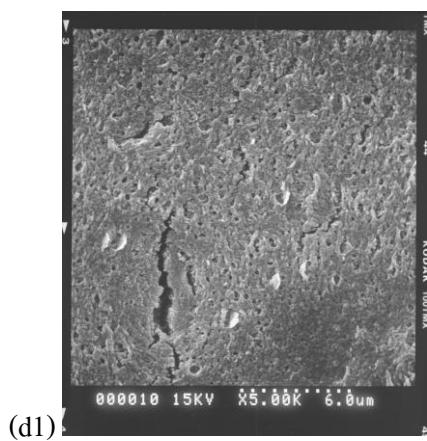
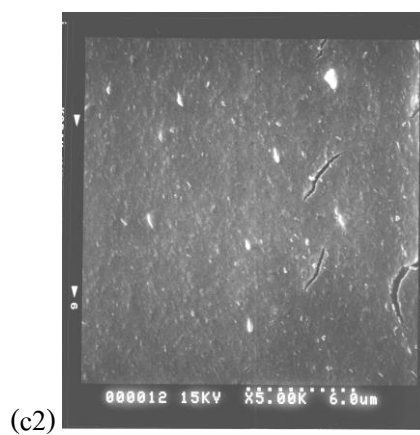
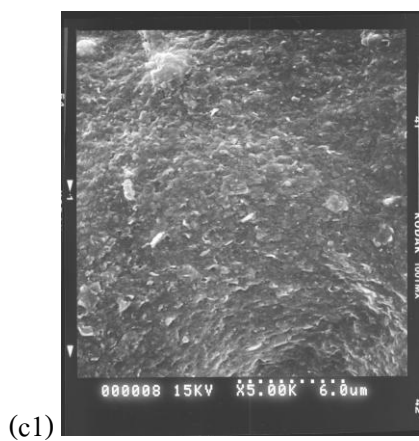
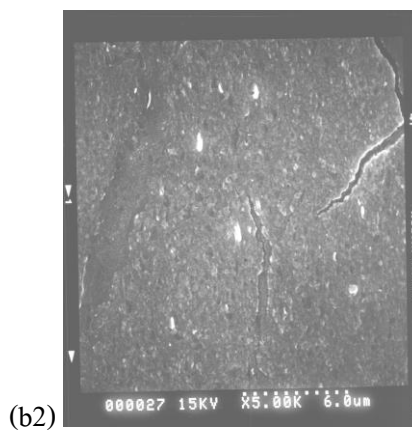
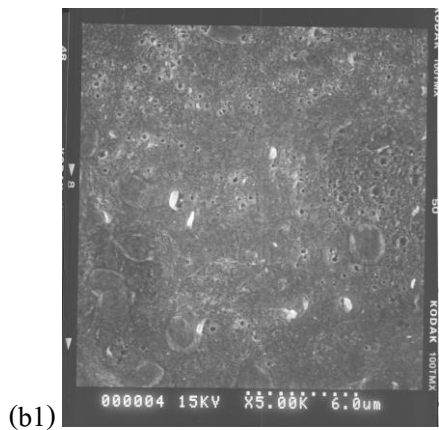
รูปที่ 4.33 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 5,000 เท่าเมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone[®] 5 phr ในทิศทาง TD และ MD เมื่อนำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ แทนสูตรด้วยในทิศทาง TD (a1) NR5CT0 (b1) NR5CT5 (c1) NR5CT10 (d1) NR5CT15 และ (e1) NR5CT20 ในทิศทาง MD (a2) NR5CT0 (b2) NR5CT5 (c2) NR5CT10 (d2) NR5CT15 และ (e2) NR5CT20 เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวใน 2 ทิศทาง พบว่าการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] ใน 2 ทิศทางไม่แตกต่างกัน อาจมีสาเหตุมาจากระบบมีความเป็นอิลาสติกที่สูง กล่าวคือยางธรรมชาติ มีสมบัติเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่น เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดที่ใกล้เคียงเดิมได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อพิจารณาที่จำนวนการผ่านลูกกลิ้งที่ 0 รอบ Claytone[®] มีการกระจายตัวดี แต่มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางต่างๆ เมื่อมีการเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งมากขึ้น จะสังเกตได้ว่าการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] เป็นไปตามระนาบของยางได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากระบบมีความเป็นอิลาสติกที่สูง ทำให้เมื่อนำยางผสมสูตรผ่านรอบลูกกลิ้ง ความเป็นอิลาสติกของยางสามารถบังคับให้เคลย์บางส่วนมีการจัดเรียงตัวของ Claytone[®] เป็นไปตามระนาบของยางได้ ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ที่ได้ พบว่าโดยส่วนใหญ่สัญญาณที่วัดได้จากชิ้นงานตัวอย่างเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งมากขึ้น ค่าสัญญาณที่วัดได้ (Intensity) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอันเป็นผลมาจากการที่ Claytone[®] เกิดการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางได้ดีขึ้น

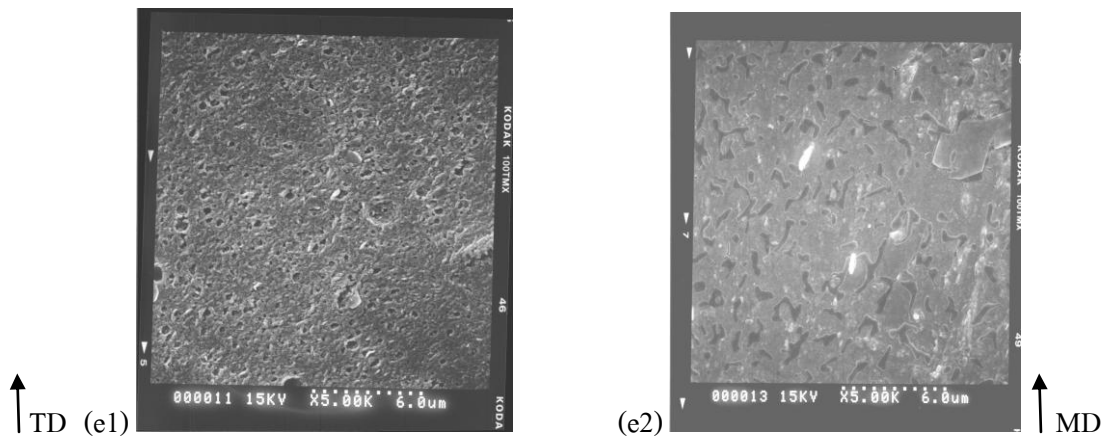


(a1)



(a2)

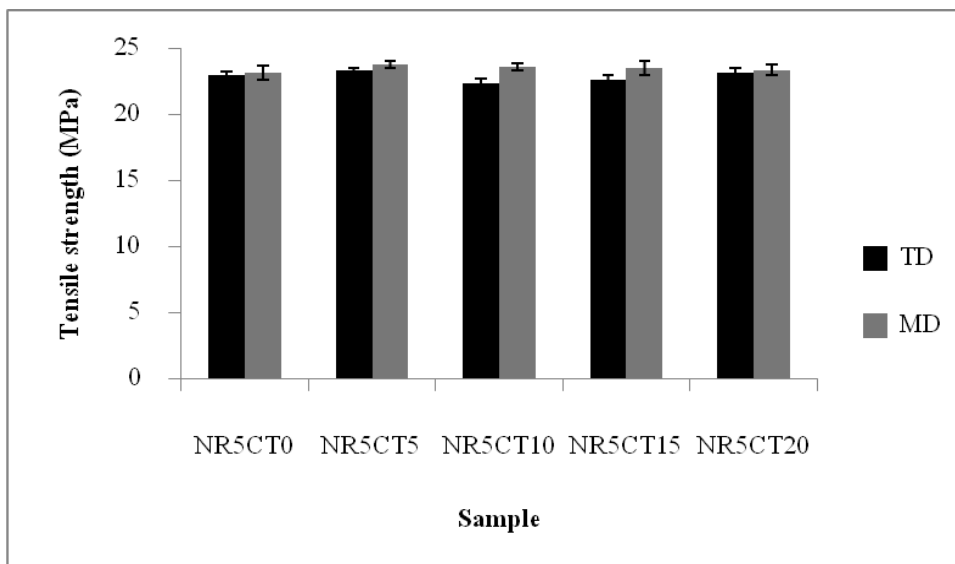




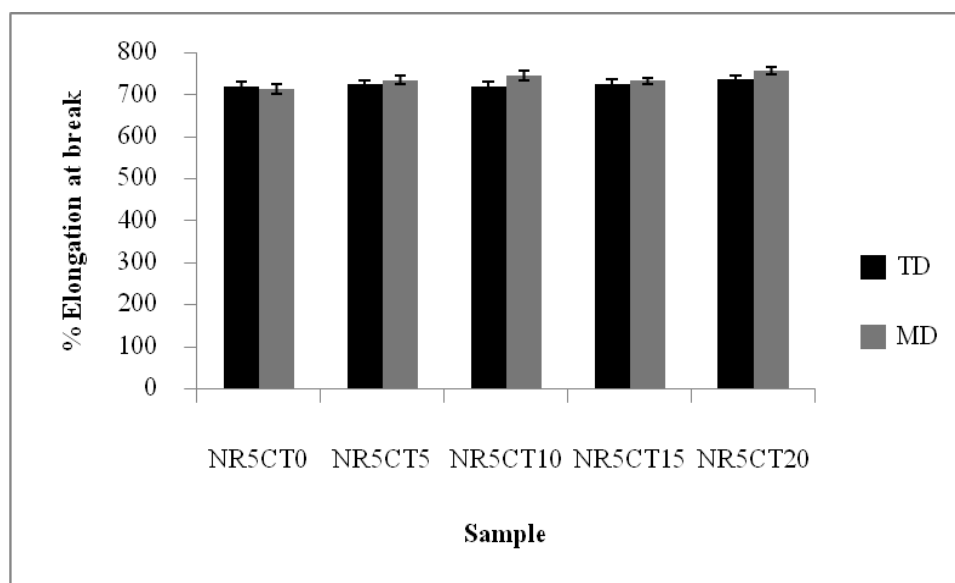
รูปที่ 4.33 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อเติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr (ซ้าย) ในทิศทางตามแนวขวางเครื่องจักร (TD) (a1) NR5CT0 (b1) NR5CT5 (c1) NR5CT10 (d1) NR5CT15 และ (e1) NR5CT20 (ขวา) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) (a2) NR5CT0 (b2) NR5CT5 (c2) NR5CT10 (d2) NR5CT15 และ (e2) NR5CT20

4.3.1.7 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ที่ปริมาณ 5 phr

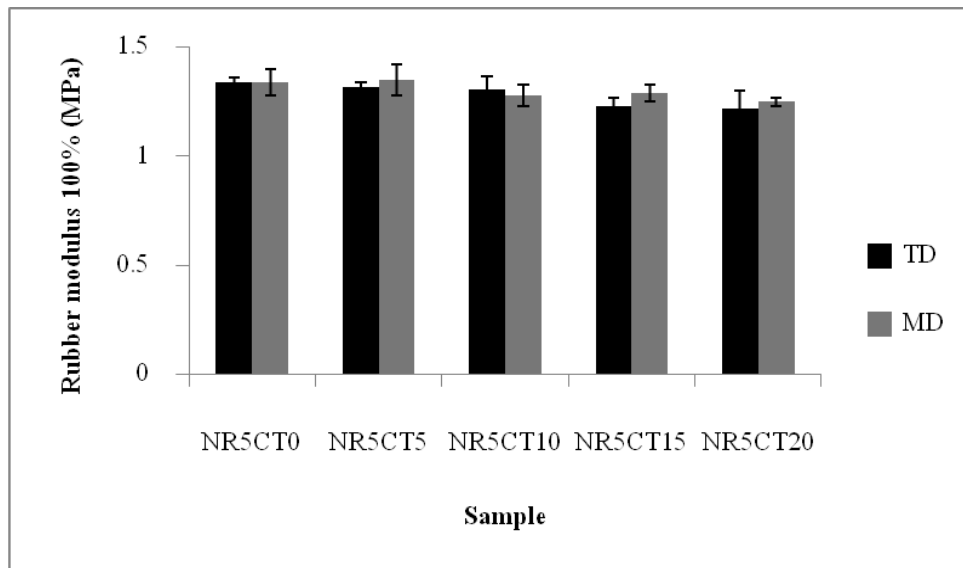
จากการการศึกษาการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่ 5 phr นำมาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบต่างๆ มาทดสอบในทิศทาง TD และ MD ดังรูปที่ 4.34 – 4.37 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด และค่าความแข็งกด พบว่าการจัดเรียงตัวของ Claytone® ใน 2 ทิศทางให้ค่าสมบัติเชิงกลที่มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากระบบมีความเป็นอิลาสติกที่สูง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการผ่านลูกกลิ้งในจำนวนที่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย อาจมีสาเหตุมาจากการที่ยางธรรมชาติได้รับแรงเฉือนขณะนำยางผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้นทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางบางส่วนถูกตัดออก (Mastication) ส่งผลทำให้ความหนืดของยางมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี้ที่ได้มีค่าลดลง แสดงผลในภาคผนวก ข



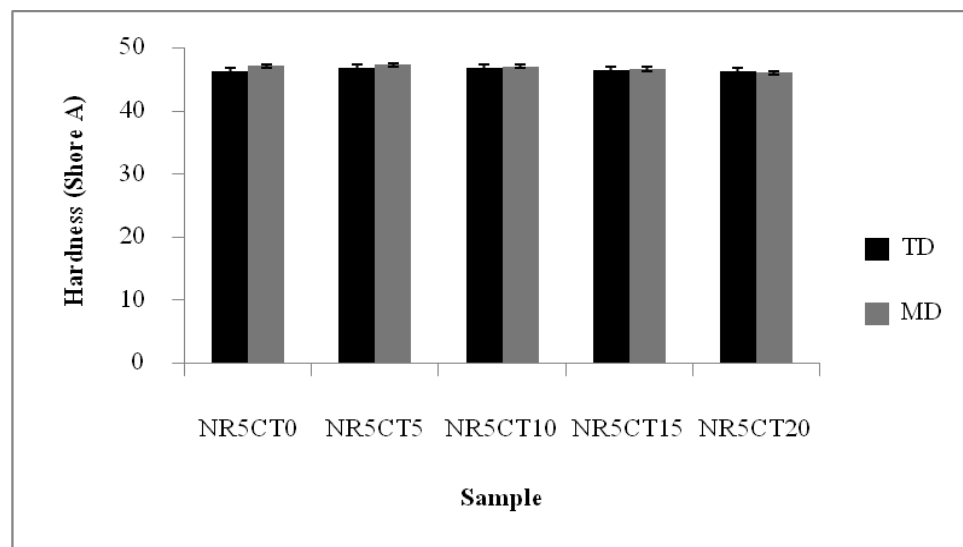
รูปที่ 4.34 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร NR5CT



รูปที่ 4.35 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร NR5CT



รูปที่ 4.36 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร NR5CT

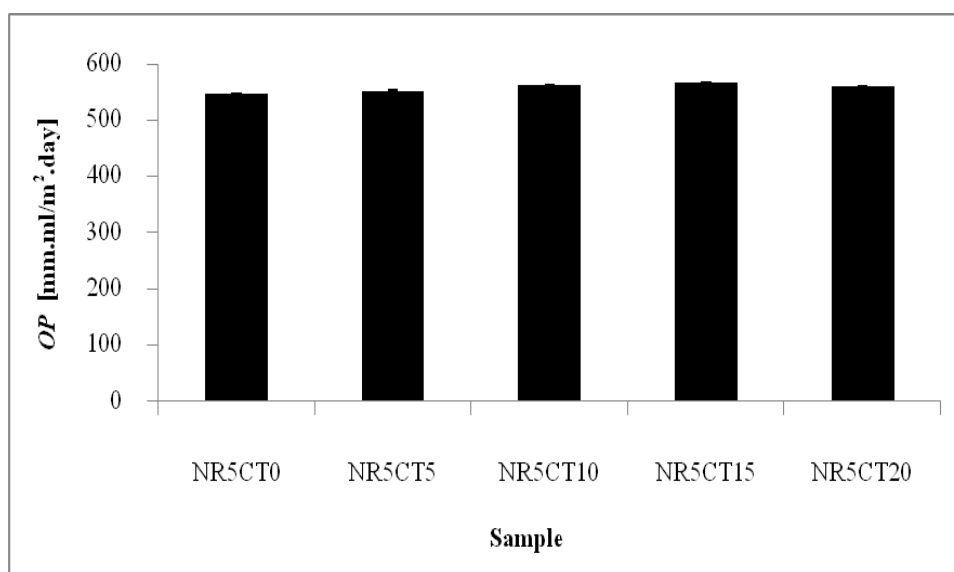


รูปที่ 4.37 ผลของจำนวนรอบผ่านลูกกลิ้งที่มีต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร NR5CT

4.3.1.8 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ที่ปริมาณ Claytone® 5 phr

เมื่อนำยางธรรมชาติที่ผสมด้วย Claytone® ที่ปริมาณ 5 phr มาผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0, 5, 10, 15 และ 20 รอบ ความสามารถในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปัญหาในเรื่องของ Stack ของเคลย์ไม่ได้แตกกระจายออกเป็นอนุภาคแผ่นเดี่ยวๆ อย่างอิสระในชิ้นงาน โดยกระบวนการผสมด้วยวิธีนี้เป็นเพียงการบังคับทิศทาง

การจัดเรียงตัวของ Claytone® ให้เป็นไปตามระนาบของยางได้ดีขึ้น แต่ทำให้ Stack ของเคลย์ที่ได้มีการวางตัวที่ห่างจากกัน สังเกตได้จาก รูปที่ 4.33 พบว่ามีพื้นที่ว่างมากพอที่ทำให้โมเลกุลของก๊าซสามารถวิ่งทะลุผ่านได้ โดยไม่มีเคลย์ที่กระจายกันขวางอยู่ในเมตริกซ์ และจากทฤษฎี Tortuosity เส้นทางการผ่านของก๊าซออกซิเจนต้องเป็นไปตามชั้นเคลย์ที่กระจายกันขวางอยู่ในเมตริกซ์ ส่งผลทำให้ระยะทางที่โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มจำนวนในการผ่านลูกกลิ้งในงานวิจัยนี้สามารถที่จะปรับปรุงทิศทางการจัดเรียงตัวของ Claytone® ให้เป็นไปตามระนาบของยางได้ดีขึ้น แต่ไม่ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.38 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางผสมสูตร NR5CT ที่ผ่านลูกกลิ้งจำนวนรอบต่างๆ

4.3.2 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® โดยการคลายแรงเค้น

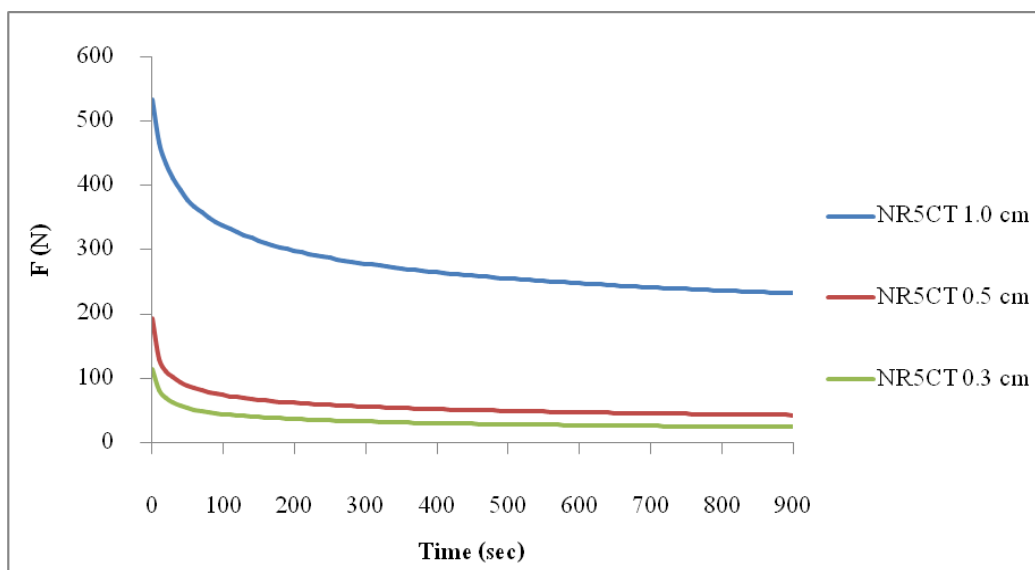
จากการศึกษาผลของการคลายแรงเค้น โดยกำหนดให้ความหนาเริ่มต้นของยางผสมสูตรที่ความหนา 0.3, 0.5 และ 1.0 cm จากนั้นใช้เครื่องกดอัดให้เหลือความหนา 0.1 cm ดังตารางที่ 4.7 การที่ให้ความหนาเริ่มต้นของยางผสมสูตรที่แตกต่างกันมีเหตุผลมาจากการที่ต้องการให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการคลายตัวออกให้ได้มากที่สุด เพื่อที่จะนำพาแผ่นเคลย์ให้เกิดการจัดเรียงตัวในระนาบของยางให้ได้มากที่สุด เมื่อแผ่นเคลย์เกิดการจัดเรียงตัวในระนาบของยางได้ดี จะส่งผลทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่เพิ่มสูงขึ้น และได้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ลดต่ำลง โดยคาดหวังว่าที่ความหนาเริ่มต้น 1.0 cm ทำให้แผ่นเคลย์มีการจัดเรียงตามระนาบของยางได้ดีที่สุด

เนื่องจากมีปริมาณยางมากส่งผลทำให้เมื่อผ่านการกดอัดสายโซโม่เลกุลของยางเกิดการคลายตัวออกได้มาก เป็นการนำพาแผ่นเคลือบให้เกิดการจัดเรียงตัวในระนาบของยางได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ระยะกดที่ลดลงของยางผสมสูตรที่ความหนาเริ่มต้น 0.3, 0.5 และ 1.0 cm

ความหนาเริ่มต้น (cm)	ความหนาสุดท้าย (cm)	เปอร์เซ็นต์ระยะกดที่ลดลง
0.3	0.1	67
0.5	0.1	80
1.0	0.1	90

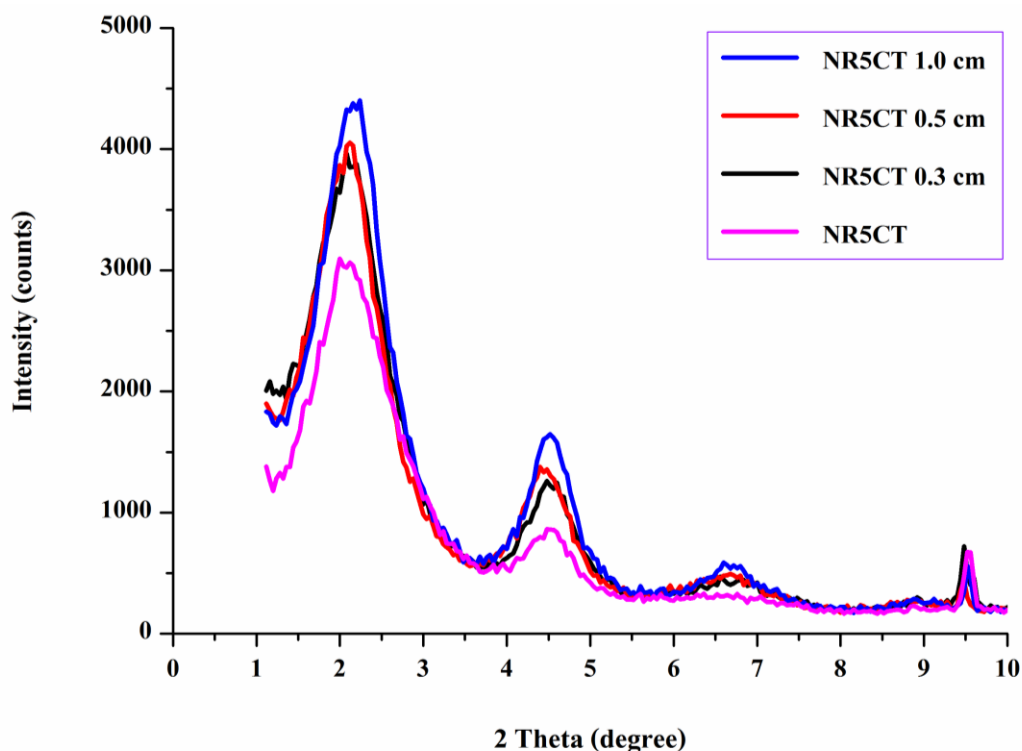
รูปที่ 4.39 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที) เมื่อนำยางผสมสูตรที่ไม่ได้ทำการเชื่อมโยงมาทดสอบโดยการวัดแรงที่ได้ โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm พบว่าในช่วงเริ่มแรกแรงที่วัดได้จะมีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากสมบัติวิiskoอิลาสติกของยางธรรมชาติ กล่าวคือ มีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วนคือส่วนที่ไหลได้คล้ายของเหลวหนืดและส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น โดยยางมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูงในขณะที่องค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นมีสัดส่วนที่ค่อนข้างต่ำโดยสภาพยางที่ยังไม่เชื่อมโยง ยางยังคงสามารถไหลได้อยู่ แต่เมื่อเวลาผ่านไปแรงที่วัดได้จะมีค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ เนื่องจากองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหมดไป ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่า NR5CT 1.0 cm มีแรงในการกดอัดที่สูงกว่า NR5CT 0.5 cm และ NR5CT 0.3 cm เนื่องจากมีปริมาณยางตอนเริ่มต้นที่มากทำให้มีส่วนที่เป็นเหลวหนืดและส่วนที่เป็นของแข็งที่มากกว่า เมื่อมีแรงที่มากกระทำจึงออกแรงต้านทำให้แรงที่วัดได้มีค่าสูงที่สุด จะเห็นได้ว่ายางธรรมชาติที่ผ่านการกดอัดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยมี % ระยะกดที่ค่าต่างๆ จะพบว่ามีความการคลายแรงคืนที่เร็วมาก (ประมาณ 800 วินาที)



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที) เมื่อนำยางผสมสูตรที่ไม่ได้ทำการเชื่อมโยงมาทดสอบโดยการวัดแรงที่ได้ โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm

4.3.2.1 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone®

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® ด้วยเทคนิค XRD โดยทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® ในยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone® ในปริมาณ 5 phr พบว่า Claytone® ปรากฏที่ 2θ ที่ตำแหน่ง 2.2 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่า มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เท่ากับ 3.9 nm แล้วนำยางผสมสูตรที่ผ่านการกดอัดเป็นเวลา 10 ชม. โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm สูตร NR5CT 0.3 cm, NR5CT 0.5 cm และ NR5CT 1.0 cm พบว่า ค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® มีค่าไม่แตกต่างกัน โดย Claytone® ปรากฏที่ 2θ ที่ตำแหน่ง 2.1 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่า มีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Claytone® เท่ากับ 4.0 nm, 4.1 nm และ 4.2 nm ตามลำดับ พบว่า วัสดุที่เตรียมได้ จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) จะเห็นได้จากรูปที่ 4.40 และตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโดยกระบวนการผสมด้วยวิธีนี้เป็นเพียงการบังคับทิศทาง การจัดเรียงตัวของ Claytone® ให้เป็นไปตามระนาบของยาง และจากการสังเกตรูปที่ 4.40 พบว่าสัญญาณที่วัดได้ (Intensity) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการที่ Claytone® เกิดการจัดเรียงตัวในระนาบของยางได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.40 XRD patterns ผลของการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm

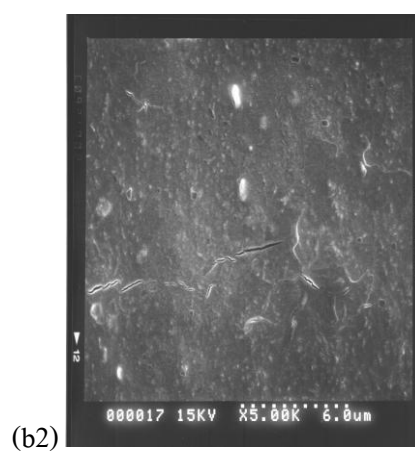
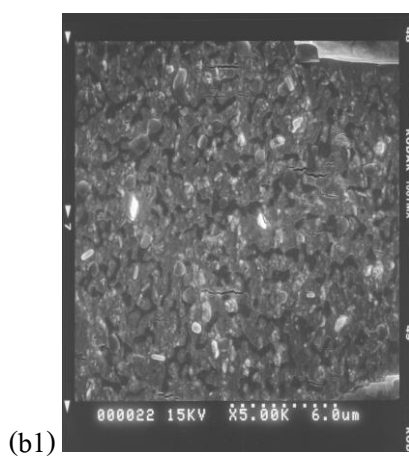
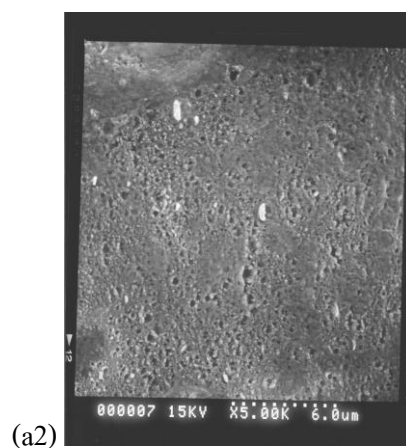
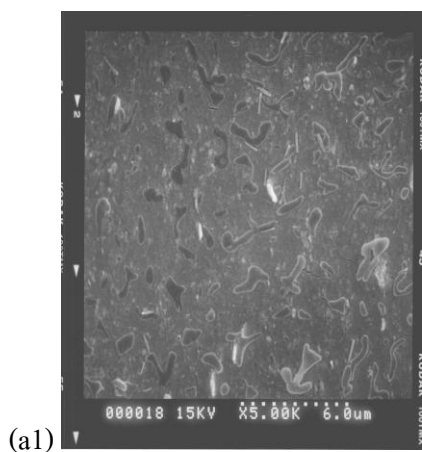
ตารางที่ 4.8 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ผลของการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm

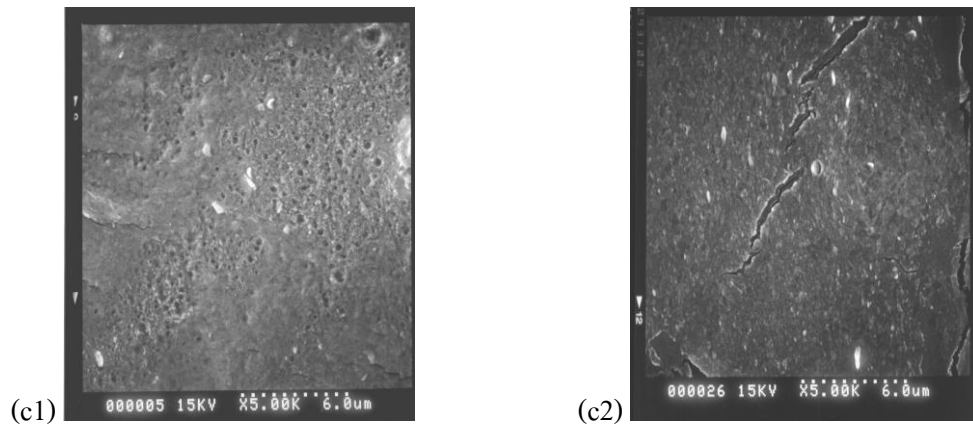
สูตร	2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างชั้น (nm)
NR 5CT	2.2	3.9
NR5CT 0.3 cm	2.1	4.0
NR5CT 0.5 cm	2.1	4.1
NR5CT 1.0 cm	2.1	4.2

4.3.2.2 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.41 แสดงสัณฐานวิทยาที่กล้องขยาย 5,000 เท่า เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr (ซ้าย) ผลของก่อนการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง รูป (a1) NR5CT 0.3 cm (b1) NR5CT 0.5 cm และ (c1) NR5CT 1.0 cm พบว่า Claytone® เกิดการกระจายตัวดีในยางธรรมชาติ แต่มีทิศทางการจัดเรียงตัวที่ไม่แน่นอน และ (ขวา) ผลของหลังการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง รูป (a2) NR5CT 0.3 cm (b2) NR5CT 0.5 cm และ (c2) NR5CT 1.0 cm พบว่า Claytone®

มีการกระจายตัวไม่แตกต่างไปจากเดิม เนื่องจากการที่ให้ความแรงกดที่ระยะคงที่เป็นเวลานานๆ เมื่อแรงกระทำจากภายนอกหมดไป ทำให้ยางไม่สามารถที่จะเกิดการหดตัวกลับได้ ความเป็นอริสติกของยางลดน้อยลง ส่งผลทำให้ Claytone[®] มีการจัดเรียงตัวในระนาบของยางได้ดีขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ที่ได้

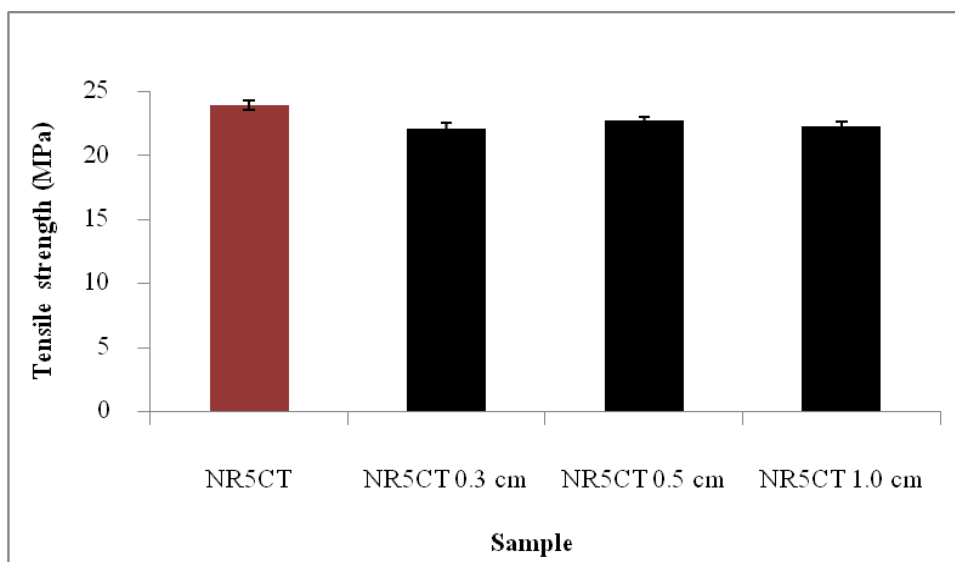




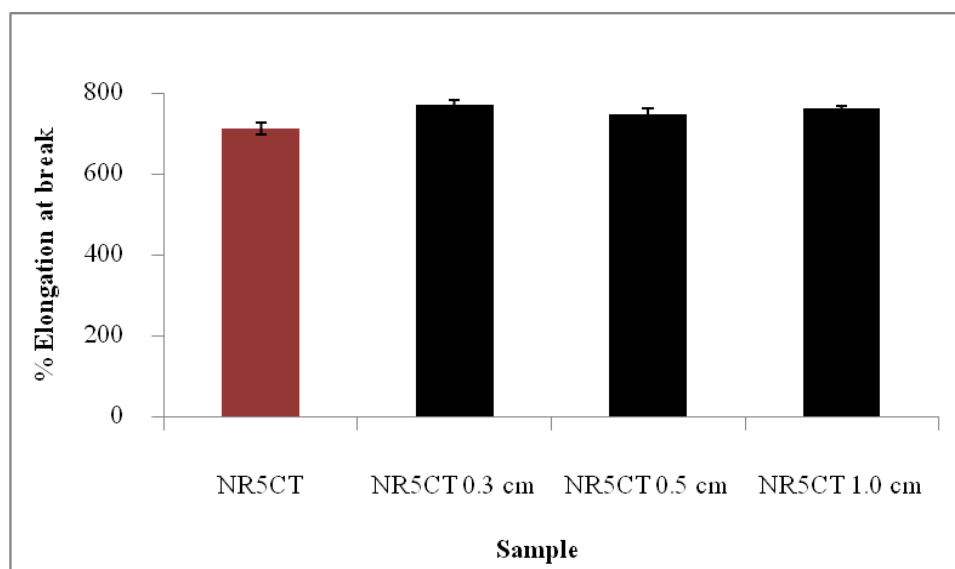
รูปที่ 4.41 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า เมื่อผสมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr (ซ้าย) ผลของก่อนการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง (a1) NR5CT 0.3 cm (b1) NR5CT 0.5 cm และ (c1) NR5CT 1.0 cm (ขวา) ผลของหลังการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง (a2) NR5CT 0.3 cm (b2) NR5CT 0.5 cm และ (c2) NR5CT 1.0 cm

4.3.2.3 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

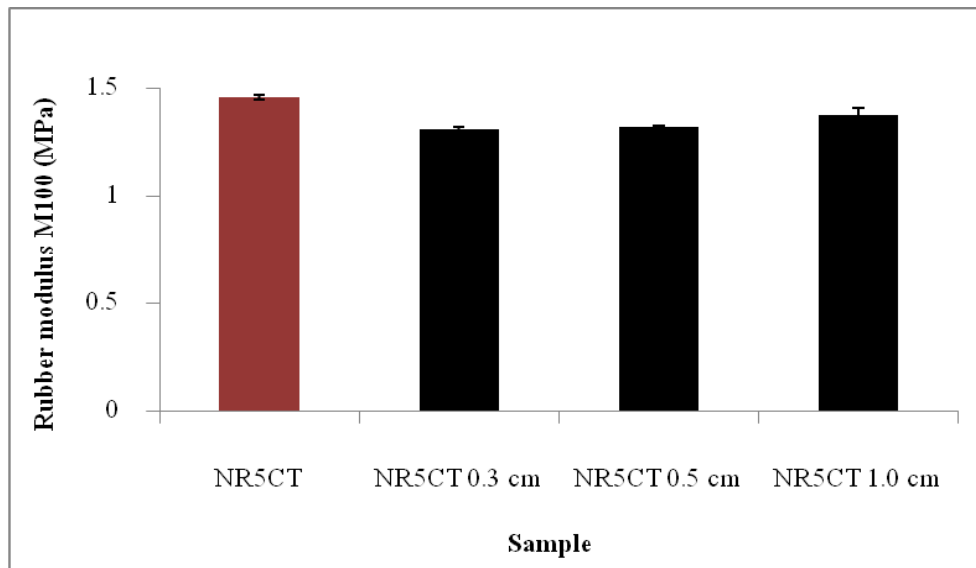
จากการศึกษาการจัดเรียงตัวของ Claytone® โดยศึกษาผลของการคลายแรงเค้น 10 ชั่วโมง ที่เติมยางธรรมชาติร่วมกับ Claytone® 5 phr โดยกำหนดให้ความหนาสุดท้ายเป็น 0.1 cm พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืด และ ค่าความแข็งกด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.42 – 4.45 เนื่องจากก่อนและหลัง ทำการกดอัด การกระจายตัวของ Claytone® มีลักษณะที่ไม่แตกต่างไปจากเดิม และยังคงเห็น Stack ของเคลย์ที่ไม่ได้แตกกระจายออกเป็นอนุภาคแผ่นในชิ้นงาน จะเห็นได้จากรูปที่ 4.41 จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้ไม่แตกต่างกัน



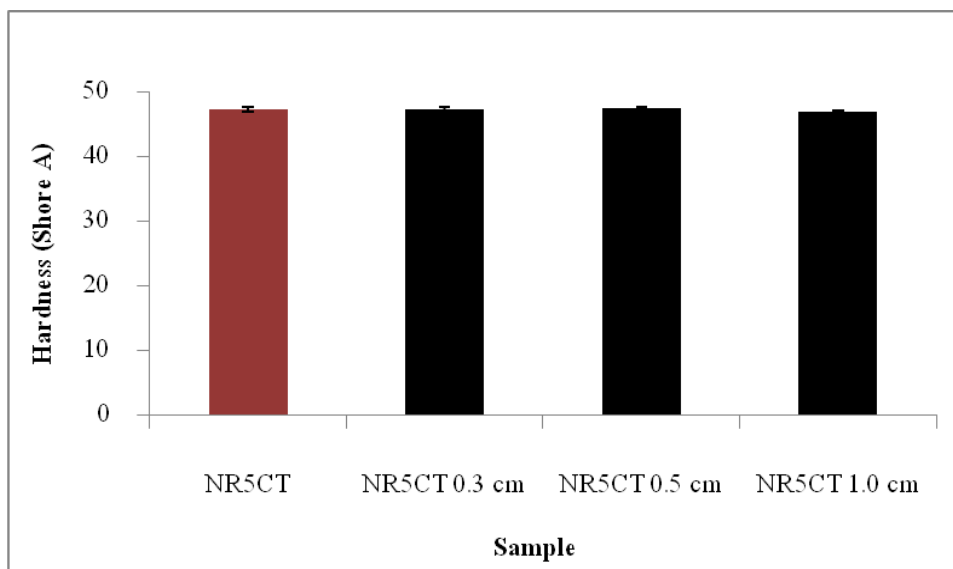
รูปที่ 4.42 ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.43 ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร



รูปที่ 4.44 ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่ามอดุลัสของยางที่ 100% ดึงยืดของยางผสมสูตร

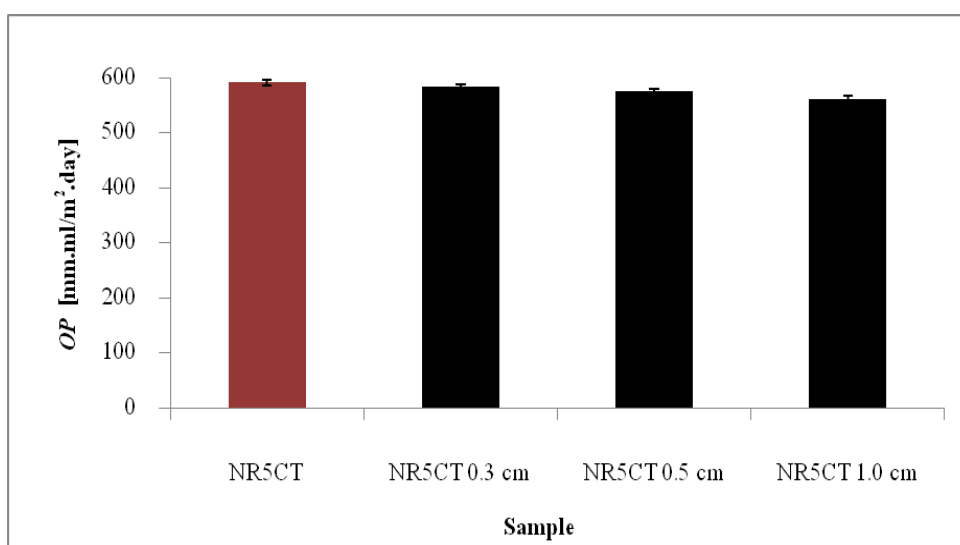


รูปที่ 4.45 ผลของการคลายแรงเค้นที่มีต่อค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร

4.3.2.4 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ที่มีต่อสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

เมื่อนำยางผสมสูตร NR5CT ที่ไม่ผ่านและผ่านการคลายแรงเค้นในระดับความหนาที่แตกต่างกัน มาทดสอบความสามารถในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากก่อนและหลังทำการกดอัด การกระจายตัวของ Claytone® และ Stack ของเคลย์ไม่ได้แตกกระจายออก ดังที่กล่าว

ไว้ข้างต้น และสังเกตได้จากรูปที่ 4.41 Stack ของเคลย์อยู่ห่างออกจากกัน ทำให้มีพื้นที่ว่างระหว่าง Stack เป็นจำนวนมาก ซึ่งพื้นที่ว่างเหล่านี้ทำให้โมเลกุลของก๊าซสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้อย่างอิสระ ไม่มีอนุภาคมาปิดกั้นเส้นทางการผ่านของโมเลกุลก๊าซ เป็นผลทำให้ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการด้านการซึมผ่านก๊าซของออกซิเจนได้ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการศึกษาผลของการคลายแรงเค้นในงานวิจัยนี้สามารถที่จะปรับปรุงทิศทางการจัดเรียงตัวของ Claytone® ให้เป็นไปตามระนาบของยางได้ดียิ่งขึ้น แต่ไม่ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.46 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในยางผสมสูตร NR5CT ที่ไม่ผ่านและผ่านการคลายแรงเค้นในระดับความหนาที่แตกต่างกัน

สรุปผลของการจัดเรียงตัว Claytone®

จากการศึกษาผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone® ทั้ง 2 วิธี พบว่าเมื่อใช้ Claytone® ในปริมาณ 5 phr สามารถที่จะช่วยปรับปรุงให้ Claytone® มีการจัดเรียงตัวในแนวระนาบของยางได้ดียิ่งขึ้น แต่สมบัติเชิงกลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งมีสาเหตุมาจากการกระจายตัวของ Claytone® และ Stack ของเคลย์ไม่ได้แตกกระจายออกเป็นอนุภาคแผ่นเดี่ยวๆ อย่างอิสระในชิ้นงาน และเมื่อพิจารณาสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซของออกซิเจนพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 532 mm.ml/m².day หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านก๊าซของออกซิเจนเท่ากับ 70% ซึ่งมีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ลดต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ [33] เนื่องจากใช้ Claytone® ในปริมาณ 4 phr พบว่า Claytone® มีการจัดเรียงตัวที่มีทิศทางที่ไม่แน่นอน ส่งผลทำให้มีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านก๊าซของออกซิเจนเท่ากับ 80%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุยางธรรมชาติ/ออร์แกนอเคลย์คอมโพสิต ได้แก่ สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) สัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยเทคนิค SEM และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซ (Gas barrier property) โดยงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองเป็น 3 ตอน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ผลของชนิดและปริมาณเคลย์

จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณเคลย์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Claytone[®], Calcined clay และ MMT ที่ 10 และ 20 phr พบว่า Claytone[®] ให้ค่าลักษณะการเชื่อมโยง, สมบัติเชิงกล, สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ต่ำกว่า Calcined clay และ MMT เนื่องจากเป็นเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรให้มีสมบัติความมีขั้วลดลงสามารถเกิดความเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติ และมีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกัน มีค่า Aspect ratio ที่สูง ส่งผลทำให้แผ่นเคลย์เกิดการกระจายตัวออกเป็นการปิดกั้นเส้นทางการเดินทางของโมเลกุลก๊าซส่งผลทำให้โมเลกุลก๊าซเกิดการเคลื่อนที่ด้วยระยะทางที่เพิ่มมากขึ้นจึงส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลง เมื่อผสม Claytone[®] ปริมาณ 20 phr (470 mm.ml/m².day)

5.1.2 ผลของปริมาณ Claytone[®]

จากผลการศึกษาผลของปริมาณ Claytone[®] โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมเท่ากับ 0-20 phr พบว่า ยางธรรมชาติที่มีการผสม Claytone[®] ที่ได้ จัดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) การเพิ่มปริมาณ Claytone[®] ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลง โดยพบว่าที่ปริมาณการผสม Claytone[®] 20 phr มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 51.58% เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติม Claytone[®] อาจกล่าวได้ว่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่ลดลงไปตามที่คาดหวังทั้งนี้เนื่องจากแผ่นเคลย์เกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่อีกครั้ง จึงทำให้ความหนาของแผ่นเคลย์ที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่า Aspect ratio จึงลดลง

5.1.3 ผลของการจัดเรียงตัวของ Claytone®

จากการศึกษาปริมาณ Claytone® 5 phr พบว่า Claytone® มีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยเราสามารถปรับปรุงการจัดเรียงตัวของ Claytone® ให้เป็นไปตามในระนาบของยางได้ 2 วิธี คือ การนำยางผสมสูตรผ่านลูกกลิ้งเป็นจำนวน 0-20 รอบ และการคลายแรงเค้น เนื่องจากยางยังคงมีความยืดหยุ่นที่สูงเป็นผลทำให้เมื่อได้รับแรงเฉือน หรือการกดอัดเป็นเวลานาน ส่งผลทำให้ Claytone® มีการจัดเรียงตัวในระนาบของยางได้ดีขึ้น ในขณะที่ปริมาณ Claytone® สูงๆ การจัดเรียงตัวของ Claytone® ไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามจากการทดลองทั้ง 2 วิธีดังกล่าวข้างต้น ใช้ได้ดีกับปริมาณ Claytone® น้อยๆ ส่งผลทำให้ Claytone® มีการจัดเรียงตัวในระนาบของยางได้ดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นในเรื่องของความยืดหยุ่นเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไปยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัวของ Claytone® ในยางธรรมชาติ ทำให้แผ่นเคลย์ที่แตกกระจายเป็นแผ่นๆ เกิดการกลับมารวมกันใหม่ ดังนั้นในการ ศึกษาต่อไปควรใช้สารช่วยผสมเข้าไปในระบบเพื่อบล็อกแผ่นเคลย์ที่เกิดการกระจายตัวออกไม่ให้เกิดการรวมตัวกันใหม่

2. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาประสิทธิภาพในการจัดเรียงตัวของ Claytone® โดยผสมยางผสมสูตรผ่านเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) หากทำการผสมด้วยเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนที่สูงกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (Banbury mixer) จะเป็นการพัฒนาระบบการผสมส่งผลทำให้ค่า Aspect ratio ของ Claytone® มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต

เอกสารอ้างอิง

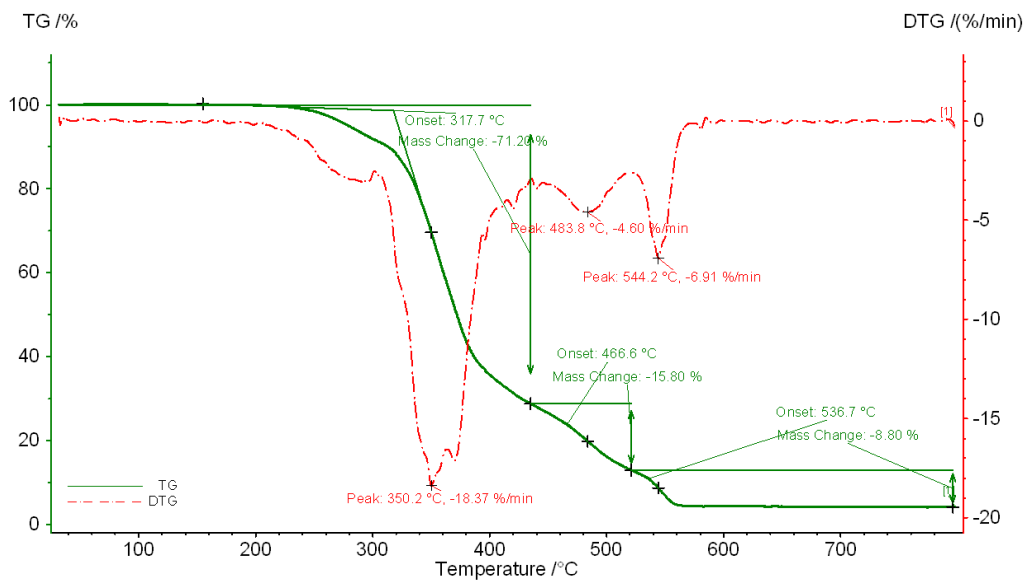
- [1] สมาคมยางพาราไทย. “ปริมาณและมูลค่าการส่งออกยางธรรมชาติปี 2547 – 2554.” [Online]. Available : <http://www.thainr.com/th/detail-stat.php?statID=207>. 2554.
- [2] P.C. LeBaron, Z. Wang and T.J. Pinnavaia. “**Polymer-layered silicate nanocomposites : an overview.**” Applied Clay Science Journal 15 (1999) 11-289.
- [3] พงษ์ธร แซ่อู๋. การบรรยายทางวิชาการเรื่อง การพัฒนาคุณภาพใบพัตยางและยางกันกระแทกทำเรือ. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2553.
- [4] Wikipedia, the free encyclopedia. “**Natural rubber.**” [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Natural_rubber. 2554.
- [5] พงษ์ธร แซ่อู๋. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.
- [6] พงษ์ธร แซ่อู๋ และชาคริต สิริสิงห. ยางกระบวนการผลิตและการทดสอบ. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2550.
- [7] F.W. Barlow. “**Lecture Note for RRIM Short Course on Natural Rubber Processing.**” Kuala Lumpur : Rubber Research Institute of Malaysia. 1978.
- [8] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. อุตสาหกรรมการผลิตยางธรรมชาติ เอกสารประกอบการบรรยาย **หลักสูตร Process and Cleaner Technology in the Rubber Industry.** สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2554.
- [9] สถาบันวิจัยยาง. **คู่มือมาตรการยางแท่งเอสทีอาร์.** กรมวิชาการเกษตร. 2538.
- [10] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต. กรุงเทพมหานคร : ส่วนอุตสาหกรรมยางสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2541.
- [11] พรพรรณ นิธิอุทัย. **สารเคมีสำหรับยาง.** ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2528.
- [12] พงษ์ธร แซ่อู๋. **สารเคมียาง.** กรุงเทพมหานคร : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2548.
- [13] กฤษณา คงศิลป์. **สารเคมีประกอบยาง.** สงขลา : ศูนย์วิจัยยางสงขลา. 2526.
- [14] รัตนาวรรณ มกรพันธุ์. “**นาโนเคลย์ / นาโนคอมพอสิต.**” [online]. Available : <http://www.thaiscience.com/lab-vol/p18/18 นาโนเคลย์.html>. 2548.

- [15] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. “แร่.” [online]. Available : http://www.environment.in.th/evbd/info/soil/download/111_soil/1113.doc. 2555.
- [16] M. Alexandre and P. Dubois. “**Polymer-layered silicate nanocomposites : preparation, properties and uses of a new class of material.**” *Materials Science and Engineering* 28 (2000) 1-63.
- [17] รัตนาวรรณ มกรพันธุ์. **นาโนเคลย์ / นาโนคอมพอสิต**. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [18] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. “**วัตถุต้นกำเนิดดิน.**” [Online]. Available : <http://www.environment.in.th/evdb/info/soil/soil107/html>. 2555.
- [19] MTEC และNSTDA. “**ข่าว&สาระน่ารู้.**” [Online]. Available : <http://www.mtec.or.th/th/news/qa42.html/>. 2011.
- [20] Dainichi. “**Montmorillonite.**” [calcearthminerals.com/Calcium Montmorillonite.com/2012](http://calcearthminerals.com/Calcium%20Montmorillonite.com/2012).
- [21] W. Hofmann. “**Rubber Technology Handbook.**” Germany : Hanser Publishers. 1980.
- [22] วรณี ฉินศิริกุล และ นภดล เกิดดอนแฝก. **เทคโนโลยีกาวหนานาสาระในโพลีเอทิลีน กลุ่มวิศวกรรมพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**. 2547.
- [23] R.K. Bharadwaj. “**Modeling the Barrier Properties of Polymer-Layered Silicate Nanocomposites.**” *Macromolecules* 34 (2001) 9189-9192.
- [24] American Standard for Testing and Material. “**Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor.**” ASTM D 3985-95794. Committee on standard. 1992.
- [25] Special Chem. “**gas & vapor barrier.**” [Online]. Available : <http://www.specialchem4polymers.com/tc/aluminum-pigment.html/>. 2012.
- [26] Y. Liang, Y. Wang, Y. Wu, Y.Lu, H. Zhang and L. Zhang. “**Preparation and properties of isobutylene-isoprene rubber (IIR)/clay nanocomposites.**” *Polymer Testing Journal* 24 (2005) 12–17.

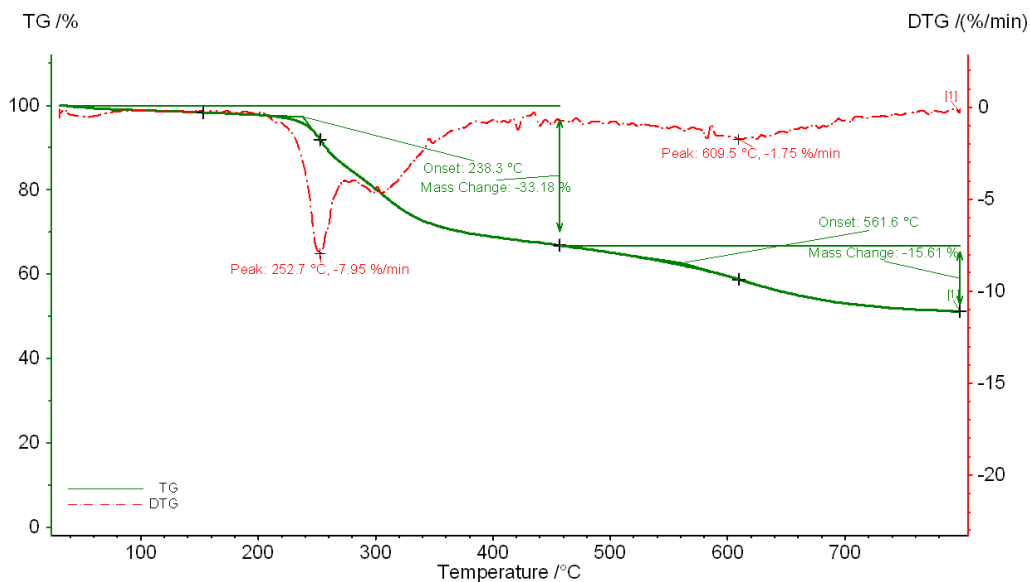
- [27] P.L. Teh, Z.A. Mohd Ishak, A.S. Hashim, J. Karger-Kocsis and U.S. Ishiaku. **“Physical properties of natural rubber/organoclay nanocomposites compatibilized with epoxidized natural rubber.”** Applied Polymer Science Journal 100 (2006) 1083-1092.
- [28] M. Kato, A. Tsukigase, H. Tanaka, A. Usuki and I. Inai. **“Preparation and Properties of isobutylene isoprene rubber/clay nanocomposites.”** Polymer Science Journal 44 (2006) 1182-1188.
- [29] M. Razzaghi-Kashani, H. Hasankhani and M. Kokabi. **“Improvement in physical and mechanical properties of butyl rubber with montmorillonite organoclay.”** Polymer Iranian Journal 16 (2007) 671-679.
- [30] Y. Liang, W. Cao, Z. Li, Y. Wang, Y. Wu and L. Zhang. **“A new strategy to improve the gas barrier property of preparation isobutylene-isoprene rubber/clay nanocomposites.”** Polymer Testing Journal 27 (2008) 270–276.
- [31] P. Li, L. Wang, G. Song, L. Yin, F. Qi and L. Sun. **“Characterization of highperformance exfoliated natural rubber/organoclay nanocomposites.”** Applied Polymer Science Journal 109 (2008) 3831-3838.
- [32] Y. Zhang, Qi. Liu, Q. Zhang and Y. Lu. **“Gas barrier properties of natural rubber/kaolin composites prepared by melt blending.”** Applied Clay Science Journal 50 (2010) 255-259.
- [33] A. Khamkhreung. **“Mechanical and barrier properties of natural rubber/organoclay composites.”** M.Sc. Thesis in Polymer Science and Technology. School of Graduated Studies. Mahidol University. 2011.
- [34] M. Morton. **“Rubber Technology.”** 3rd Edition. New York.1987.
- [35] Sperling. **“Introduction to Physical Polymer Science.”** 2nd Edition. New York. 1992.
- [36] J. Brandru, E.H. Immergut and E.A. Grulke. **“Polymer Handbook.”** 4th Edition. New York. 1999.
- [37] H. Ismail and H.H. Chia. **“The Effects of Multifunctional Additive and Epoxidation in Silica Filled Natural Rubber Compounds.”** Polymer Testing Journal 17 (1998) 199-210.

- [38] M. Arroyo, M.A. Manchado, J.L. Valent and J. Carretero. **“Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blends.”** Composites Science and Technology Journal 67 (2007) 1330-1339.
- [39] Azonano, the A to Z of nanotechnology. **“Polymer silicate nanocomposite.”** [online]. Available : <http://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=1410>
- [40] S. Janak. **“Influence of clay Modification on Curing Kinetics of Natural Rubber Nanocomposites.”** M.Sc. Thesis in Materials Science. Tampere University of Technology. Finland. 2011.
- [41] M. Noraiham, M. Andanastuti, J.G. Mariyam, H.M. Dahlan and H.A. Che. **“The Effect of Filler on Epoxidised Natural Rubber-Alumina Nanoparticles Composites.”** European Journal 4 (2008) 538-547.
- [42] Y. Wang, F.B. Chen, Y.C. Li and K.C. Wu. **“Melt processing of polypropylene/clay nanocomposites modified with maleated polypropylene compatibilizers.”** Reinforced Plastics Composites Journal 35 (2004) 111-124.
- [43] H. Ismail and R. Ramli. **“Organoclay filled natural rubber nanocomposites : The effects of filler loading and mixing method.”** Reinforced Plastics Composites Journal 27 (2007) 1-15.

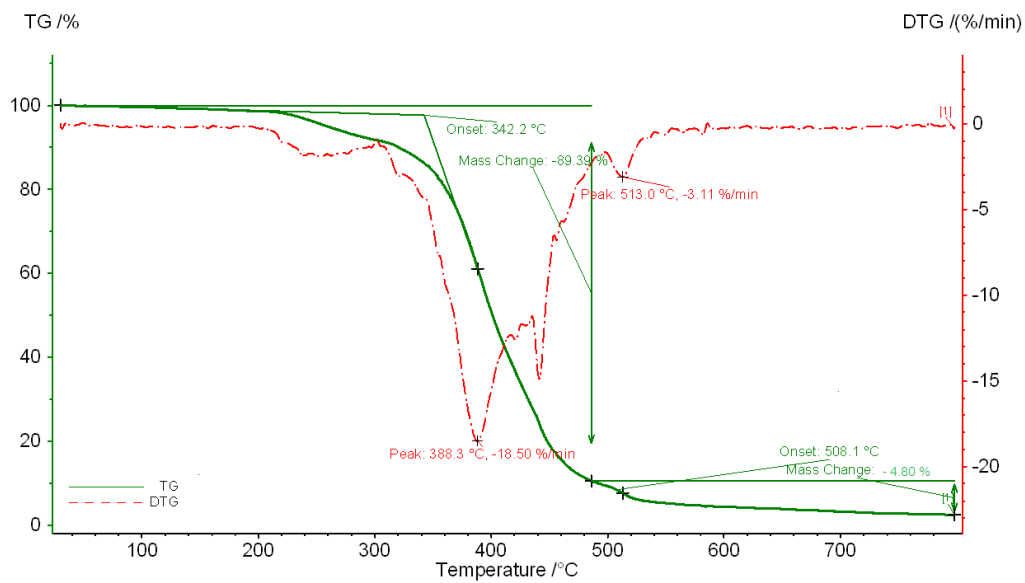
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติทางความร้อน



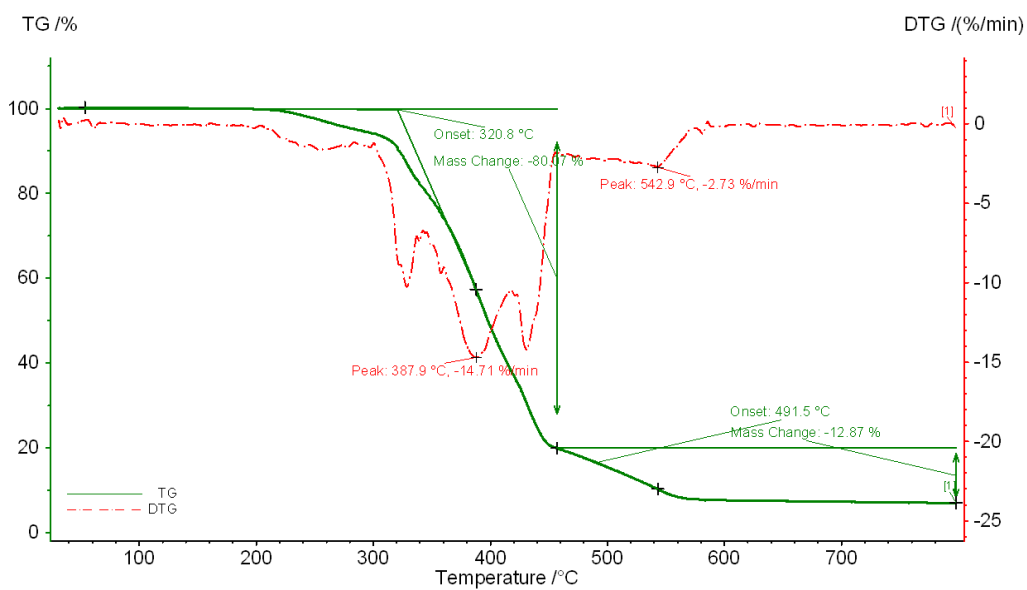
รูปที่ ก-1 TGA thermogram ของยาง NR ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



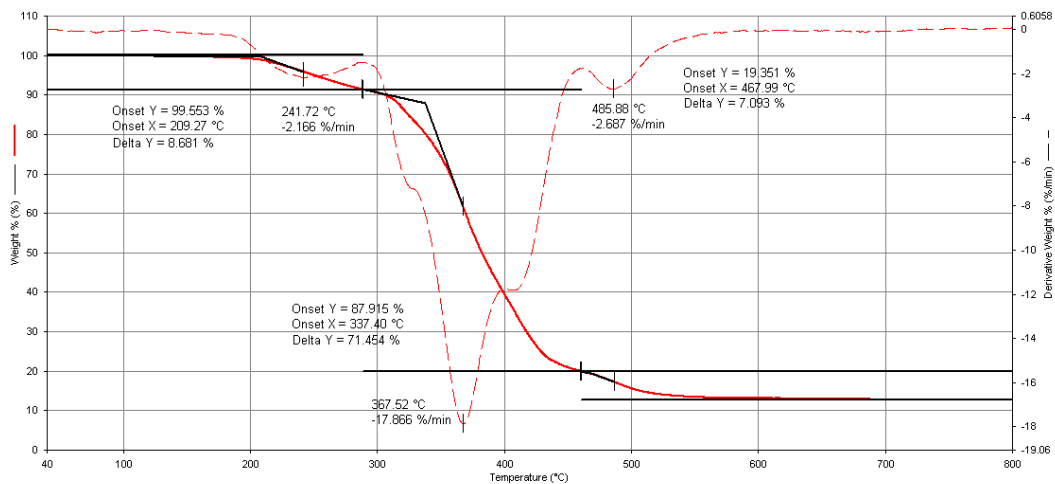
รูปที่ ก-2 TGA thermogram ของ Claytone® ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



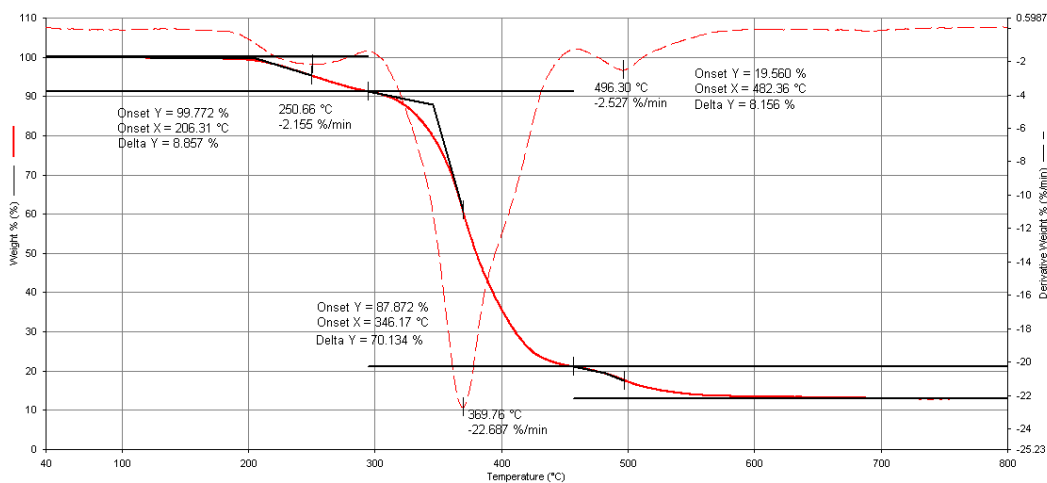
รูปที่ ก-3 TGA thermogram ของ NR5CT ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



รูปที่ ก-4 TGA thermogram ของ NR10CT ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



รูปที่ ก-5 TGA thermogram ของ NR15CT ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



รูปที่ ก-6 TGA thermogram ของ NR20CT ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน

ภาคผนวก ข

การทดสอบความหนาแน่นเชื่อมโยง

ข-1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าปริมาตรโมลาร์ (Molar volume, V_s)

จากสมการฟลอรี-ไรเนอร์ (Flory-Rehner equation) [35]

$$-\ln(1 - v_r) + v_r + \chi_1 v_r^2 = V_s n [v_r^{1/3} - v_r/2]$$

- เมื่อ n = ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง (mol/cm^3)
 V_s = ปริมาตรโมลาร์ (Molar volume) ของตัวทำละลาย (cm^3/mol)
 v_r = สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของยางในเจลยางที่บวมตัว (Swollen gel) (ไม่มีหน่วย)
 χ_1 = ตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย (Polymer-Solvent interaction parameter) (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.39 [36]

จากการทดลองใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลาย (Solvent) ซึ่งมีค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, Mw)	=	92.14 g/mol
ความหนาแน่น (Density, ρ)	=	0.87 g/mol
การทดลอง โทลูอิน 30 ml มีน้ำหนัก	=	25.39 g

การคำนวณ

โทลูอิน	92.14 g	=	1 mol
	25.39 g	=	25.39/92.14 mol
		=	0.28 mol
โทลูอิน	0.28 mol	=	30 ml
	1 mol	=	30/0.28 ml/mol
		=	108.89 ml/mol
		=	108.89 cm^3/mol

ข้อมูลผลการทดลองหาความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density)

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลก่อนแช่สารละลายโทลูอีน

สูตร	ชั้น	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	ปริมาตร	
					(mm ³)	(cm ³)
NR	1	20.80	24.62	1.12	573.55	0.57
	2	20.50	24.22	1.11	551.13	0.55
	3	20.90	24.82	1.15	593.96	0.59
	4	22.10	26.42	1.08	630.59	0.63
	5	22.10	24.80	1.12	613.85	0.61
NR10MMT	1	10.10	23.20	1.12	262.44	0.26
	2	11.10	23.60	1.13	296.01	0.30
	3	10.10	24.30	1.13	277.34	0.28
	4	10.10	23.10	1.08	251.97	0.25
	5	10.30	24.10	1.09	270.57	0.27
NR20MMT	1	11.30	22.10	1.13	282.19	0.28
	2	12.10	21.10	1.13	288.50	0.29
	3	11.10	21.10	1.12	262.32	0.26
	4	12.10	21.10	1.15	293.61	0.29
	5	12.10	22.30	1.15	310.30	0.31
NR10IB	1	11.30	22.10	1.08	269.71	0.27
	2	11.40	22.30	1.08	274.56	0.27
	3	12.10	23.50	1.10	312.79	0.31
	4	12.20	22.30	1.08	293.82	0.29
	5	11.70	23.60	1.10	303.73	0.30
NR20IB	1	11.10	22.10	1.13	277.20	0.28
	2	9.40	22.30	1.11	232.68	0.23
	3	11.30	21.40	1.11	268.42	0.27
	4	11.10	22.30	1.11	274.76	0.27
	5	10.30	22.20	1.14	260.67	0.26

ตารางที่ ข-1 (ต่อ)

สูตร	ชั้น	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	ปริมาตร	
					(mm ³)	(cm ³)
NR5CT	1	10.40	23.70	1.29	317.96	0.32
	2	11.10	23.10	1.28	328.20	0.33
	3	10.20	22.80	1.29	300.00	0.30
	4	9.70	23.50	1.27	289.50	0.29
	5	10.40	23.10	1.28	307.51	0.31
NR10CT	1	10.10	23.10	1.41	327.80	0.33
	2	10.10	23.10	1.40	326.63	0.33
	3	10.40	21.70	1.37	309.18	0.31
	4	10.40	22.30	1.41	325.85	0.33
	5	10.40	22.50	1.41	329.94	0.33
NR15CT	1	10.71	23.10	1.41	348.84	0.35
	2	11.80	23.10	1.40	381.61	0.38
	3	10.51	23.10	1.40	339.89	0.34
	4	11.30	23.10	1.41	368.05	0.37
	5	10.40	23.20	1.39	334.17	0.33
NR20CT	1	11.40	23.10	1.48	388.43	0.39
	2	11.20	23.20	1.21	314.41	0.31
	3	11.40	23.30	1.41	373.20	0.37
	4	10.71	23.20	1.20	298.17	0.30
	5	12.01	23.10	1.03	285.75	0.29

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลหลังเข้สารละลายโทลูอิน 4 วัน

สูตร	ชั้น	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	ปริมาตร	
					(mm ³)	(cm ³)
NR	1	28.10	32.60	1.42	1300.81	1.30
	2	32.60	38.01	1.36	1685.21	1.69
	3	33.10	39.10	1.40	1811.89	1.81
	4	36.20	42.10	1.28	1950.75	1.95
	5	34.50	39.20	1.36	1839.26	1.84
NR10MMT	1	16.10	37.10	1.36	812.34	0.81
	2	18.10	38.40	1.30	903.55	0.90
	3	17.10	41.20	1.41	993.37	0.99
	4	17.10	40.30	1.34	923.43	0.92
	5	18.10	41.10	1.36	1011.72	1.01
NR20MMT	1	19.10	37.10	1.38	977.88	0.98
	2	21.10	36.10	1.27	967.37	0.97
	3	20.10	36.40	1.41	1031.61	1.03
	4	20.10	37.10	1.40	1043.99	1.04
	5	20.50	39.10	1.40	1122.17	1.12
NR10IB	1	18.10	34.10	1.25	771.51	0.77
	2	18.30	34.50	1.23	776.56	0.78
	3	19.35	38.30	1.19	881.91	0.88
	4	19.30	34.10	1.16	763.43	0.76
	5	18.60	38.10	1.29	914.17	0.91
NR20IB	1	17.20	33.20	1.26	719.51	0.72
	2	15.30	35.10	1.29	692.77	0.69
	3	17.10	34.10	1.35	787.20	0.79
	4	17.10	35.10	1.30	780.27	0.78
	5	17.10	35.10	1.35	810.28	0.81

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

สูตร	ชั้น	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	หนา (mm)	ปริมาตร	
					(mm ³)	(cm ³)
NR5CT	1	11.20	35.60	2.12	845.29	0.85
	2	16.60	35.10	2.10	1223.59	1.22
	3	15.35	34.30	1.98	1042.48	1.04
	4	19.10	35.60	2.14	1455.11	1.46
	5	16.20	35.40	2.14	1227.25	1.23
NR10CT	1	15.10	35.30	2.4	1279.27	1.28
	2	16.40	35.10	2.41	1387.29	1.39
	3	16.70	34.50	2.24	1290.58	1.29
	4	16.20	35.40	2.43	1393.56	1.39
	5	16.30	35.20	2.45	1405.71	1.41
NR15CT	1	16.10	35.20	2.00	1133.44	1.13
	2	17.20	36.10	2.05	1272.89	1.27
	3	16.60	36.00	2.34	1398.38	1.40
	4	17.40	36.20	2.05	1291.25	1.29
	5	16.10	36.10	2.43	1412.34	1.41
NR20CT	1	17.40	35.10	2.20	1343.63	1.34
	2	17.20	34.40	2.23	1319.45	1.32
	3	18.00	36.60	2.24	1475.71	1.48
	4	16.40	35.20	2.21	1275.79	1.28
	5	18.20	36.20	2.36	1554.86	1.55

ภาคผนวก ค
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค-1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ค่ามอดุลัสของยาง (Rubber modulus, M100) และค่าความแข็งกด (Hardness)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งกด
NR	19.22 ± 1.07 ^a	728 ± 8	0.89 ± 0.02	31.5 ± 0.2
NR10MMT	17.15 ± 0.80	727 ± 11	0.93 ± 0.04	40.5 ± 0.9
NR20MMT	14.43 ± 0.84	759 ± 17	0.08 ± 0.07	41.5 ± 0.6
NR10IB	21.17 ± 0.78	702 ± 11	1.11 ± 0.03	42.5 ± 0.8
NR20IB	21.56 ± 1.06	684 ± 8	1.24 ± 0.05	46.0 ± 0.6
NR5CT	19.95 ± 1.37	687 ± 11	1.54 ± 0.05	51.3 ± 0.5
NR10CT	20.82 ± 0.57	661 ± 7	1.86 ± 0.03	54.3 ± 0.2
NR15CT	21.83 ± 0.69	654 ± 9	2.23 ± 0.07	59.1 ± 0.1
NR20CT	23.17 ± 0.42	648 ± 3	2.64 ± 0.04	61.1 ± 0.4
NR20CT0	22.34 ± 0.84	654 ± 5	2.46 ± 0.04	61.8 ± 0.2
NR20CT5	23.94 ± 0.98	655 ± 8	2.53 ± 0.05	61.6 ± 0.4
NR20CT10	21.89 ± 0.62	658 ± 6	2.47 ± 0.04	61.3 ± 0.3
NR20CT15	21.35 ± 0.56	660 ± 5	2.43 ± 0.04	60.8 ± 0.7
NR20CT20	20.70 ± 0.52	665 ± 7	2.35 ± 0.03	60.6 ± 0.5
NR5CT0: TD	23.02 ± 0.27	721 ± 10	1.34 ± 0.02	46.3 ± 0.4
NR5CT0:MD	23.20 ± 0.55	715 ± 11	1.34 ± 0.06	47.2 ± 0.2
NR5CT5: TD	23.36 ± 0.21	726 ± 10	1.32 ± 0.02	46.8 ± 0.6
NR5CT5: MD	23.86 ± 0.27	736 ± 9	1.35 ± 0.07	47.3 ± 0.2

a = ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

สูตร	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งกด
NR5CT10: TD	22.38 ± 0.34	722 ± 10	1.31 ± 0.06	46.8 ± 0.6
NR5CT10: MD	23.65 ± 0.30	748 ± 11	1.28 ± 0.05	47.1 ± 0.2
NR5CT15: TD	22.63 ± 0.36	727 ± 11	1.23 ± 0.04	46.5 ± 0.5
NR5CT15: MD	23.54 ± 0.52	735 ± 7	1.29 ± 0.04	46.7 ± 0.2
NR5CT20: TD	23.23 ± 0.33	737 ± 10	1.22 ± 0.08	46.3 ± 0.4
NR5CT20: MD	23.41 ± 0.41	759 ± 8	1.25 ± 0.02	46.1 ± 0.2
NR5CT 0.3 cm	22.12 ± 0.49	771 ± 12	1.31 ± 0.01	47.2 ± 0.2
NR5CT 0.5 cm	22.75 ± 0.27	747 ± 14	1.32 ± 0.01	47.3 ± 0.2
NR5CT 1.0 cm	22.27 ± 0.37	762 ± 7	1.38 ± 0.03	46.8 ± 0.2

a = ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ง

การทดสอบสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ตารางที่ ง-1 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP)

สูตร	ความหนา (mm)	อัตราการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (cc/m ² .day)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (mm.cc/m ² .day)
NR	1.29 ± 0.05 ^a	588 ± 4	759 ± 5
NR5CT	1.33 ± 0.01	442 ± 2	591 ± 4
NR10CT	1.29 ± 0.08	369 ± 6	479 ± 4
NR15CT	1.37 ± 0.04	301 ± 3	414 ± 5
NR20CT	1.44 ± 0.05	240 ± 2	348 ± 4
NR20CT0	1.34 ± 0.07	245 ± 2	330 ± 5
NR20CT5	1.36 ± 0.02	243 ± 2	331 ± 2
NR20CT10	1.39 ± 0.05	237 ± 2	331 ± 2
NR20CT15	1.40 ± 0.03	232 ± 2	327 ± 2
NR20CT20	1.29 ± 0.07	251 ± 2	326 ± 2
NR5CT0	1.13 ± 0.10	479 ± 8	546 ± 3
NR5CT5	1.17 ± 0.04	470 ± 2	552 ± 3
NR5CT10	1.18 ± 0.03	473 ± 5	561 ± 3
NR5CT15	1.17 ± 0.08	480 ± 7	566 ± 3
NR5CT20	1.19 ± 0.05	469 ± 6	560 ± 3
NR5CT 0.3 cm	1.31 ± 0.07	551 ± 1	582 ± 4
NR5CT 0.5 cm	1.33 ± 0.03	430 ± 1	574 ± 3
NR5CT 1.0 cm	1.24 ± 0.08	451 ± 2	561 ± 4

a = ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาปริมาณ Claytone®

การคำนวณหาปริมาณ Claytone® ที่แน่นอนโดยวิธีศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ Claytone® ที่แน่นอน} &= \frac{[(\text{ปริมาณสารที่เหลือในตัวอย่างที่ผสม Claytone®} - \\ &\quad \text{ปริมาณสารที่เหลือในตัวอย่าง NR}) \times 100]}{\text{ปริมาณ Claytone® ที่เหลือ}} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณ Claytone® ที่แน่นอนโดยวิธีศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ในตัวอย่าง NR5CT

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณ Claytone® ที่แน่นอน} &= \frac{[(4.48 - 3.14) \times 100]}{51.21} \\ &= 3.32 \text{ wt\%} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซิลิเกต

ฉ-1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Tortuosity factor (τ)

$$\frac{P_s}{P_p} = \frac{(1 - \phi_s)}{\tau}$$

- เมื่อ τ คือ Tortuosity factor
 P_s คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกต
 นาโนคอมโพสิต
 P_p คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์
 ϕ_s คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต

ฉ-2 ตัวอย่างการคำนวณหาสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซิลิเกต

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \phi_s \right]$$

- เมื่อ d' คือ ระยะทางจริงของเส้นทางสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซ
 d คือ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเส้นทางสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซที่ไม่มีชั้นซิลิเกตกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่
 L คือ ความยาวของแผ่นซิลิเกต
 W คือ ความกว้างของแผ่นซิลิเกต

ตารางที่ ๑-1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Tortuosity factor (T)

สูตร	P_s/P_p ^a	Claytone [®] (% โดยน้ำหนัก)	ϕ_s ^b	Tortuosity factor	Aspect ratio ^c
NR5CT	70/100	3.32	0.02	1.39	38
NR10CT	55/100	7.65	0.04	1.73	32
NR15CT	50/100	12.77	0.07	1.85	23
NR20CT	45/100	18.96	0.10	1.98	18

หมายเหตุ ^a คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซีลิกเตนาโนคอมโพสิตต่อ

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

^b คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซีลิกเต

^c คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซีลิกเต

ภาคผนวก ข
การทดสอบค่าความหนืดมูนนี่

ตารางที่ ข-1 ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาความหนืด ML 1+4 (100°C)

สูตร	ค่าความหนืดมูนนี่
NR	12
NR5CT0	16
NR5CT5	16
NR5CT10	14
NR5CT15	14
NR5CT20	12
NR20CT0	21
NR20CT5	21
NR20CT10	18
NR20CT15	17
NR20CT20	14

หมายเหตุ : เวลาทดสอบสำหรับการให้ความร้อนก่อนการทดสอบ (Preheat time) ตามมาตรฐาน 1 นาที

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นางสาวพลอย ยโสวันต์
วัน เดือน ปีเกิด	7 ตุลาคม 2529
ที่อยู่	157/2 หมู่ 8 แขวงหนองจอก เขตหนองจอก จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2551	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2551	การสังเคราะห์กาวจากกลีเซอรอลและกรดอะซิติก เพื่อใช้ในการผลิตแผ่น ปาร์ติเกิลปราศจากฟอร์มัลดีไฮด์ (The Synthesis of Free-Formaldehyde Adhesive for Particle Board from Glycerol and Acetic acid)
ผลงานวิชาการ	
พ.ศ. 2554	อิทธิพลของชนิดเคลย์ที่มีผลต่อสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซในยาง ธรรมชาติ (Effects of Clay Types on Gas Barrier Properties of Natural Rubber) การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน ครั้งที่ 8 สาขาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ระหว่างวันที่ 8-10 ธันวาคม 2554 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน