



สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์
Properties of Natural Rubber Mixed with Carbon Nanotube and Nanoclays

วีระชัย แสงฉาย

Weerachai Sangchay

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษิตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณทิต
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Materials Engineering
Prince of Songkla University**

2551

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์
ผู้เขียน นายวีระชัย แสงฉาย
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.วิรัช ทวีปรีดา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง)

.....
(รองศาสตราจารย์กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ สมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์
ผู้เขียน นายวีระชัย แสงฉาย
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ โดยขั้นตอนของการทำวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

ส่วนแรก เป็นการทดลองเพื่อเลือกกระบวนการในการเตรียมยางธรรมชาติผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ ซึ่งตัวแปรสำหรับการทดลองเพื่อหากระบวนการได้แก่ ชนิดของยางธรรมชาติ ชนิดของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ และกระบวนการในการผสม เป็นต้น พบว่ากระบวนการเตรียมที่เตรียมจากน้ำยางข้นผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบแห้ง และผสมเคลย์ในรูปสเลอรี จะเป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการทำวิจัยนี้ นั่นคือในการผลิตวัสดุผสมยาง-ท่อนาโนคาร์บอน จะเตรียมจากการทำน้ำยางข้นให้แห้ง แล้วนำมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ในขณะที่ในการผลิตวัสดุผสมยาง-เคลย์ จะเตรียมเคลย์สเลอรีก่อนแล้วนำมาผสมกับน้ำยางข้นจากนั้นก็ทำให้แห้ง แล้วนำยางแห้งผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ในกรณีที่ผลิตวัสดุผสมยาง-ท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ จะเตรียมเคลย์สเลอรีแล้วผสมกับน้ำยางข้น ทำให้ง่ายจับตัวแล้วทำให้แห้งก่อนที่ผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง

ส่วนที่สอง เมื่อได้กระบวนการเตรียมที่เหมาะสมแล้ว ก็ดำเนินการเตรียมยางผสมท่อนาโนคาร์บอน ยางผสมเคลย์ และยางผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ โดยแปรผันปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและปริมาณของเคลย์ พบว่าท่อนาโนคาร์บอนหรือเคลย์มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางผสม นั่นคือ การเติมท่อนาโนคาร์บอนหรือเคลย์หรือการเติมสารทั้งสองชนิดในปริมาณที่เหมาะสม เช่น การเติมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr หรือ เคลย์ 10 phr จะส่งผลให้การทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 54.64% หรือ 58.16% ตามลำดับ ในขณะที่เติมสารทั้งสองชนิดในปริมาณ 5 phr เท่ากัน จะทำให้การทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 46.01% นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้งสองชนิดเข้าไปในยางธรรมชาติจะทำให้ ค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งมอดูลัส การเสียรูปหลังการกด และอุณหภูมิ T_g เพิ่มขึ้น แต่ทำให้ค่าร้อยละการบวมตัวทั้งในน้ำมัน

และโทลูอิน และ ค่า Scorch time และ Cure time ลดลง การผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ทั้งสองชนิดเข้าไปในยางธรรมชาติ มีข้อดีว่าการผสมท่อนาโนคาร์บอนหรือเคลย์อย่างเดียว คือ ทำให้ค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง โมดูลัส และการเสียรูปหลังการกด เพิ่มขึ้น ลดการบวมตัวในน้ำมันและโทลูอิน ลดค่า Scorch time และ Cure time ทั้งนี้เพราะว่าการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนแทรกอยู่ในเนื้อยางที่อยู่ระหว่างเคลย์อย่างดี และเกิด โครงสร้างเชื่อมโยงที่มากขึ้น ทำให้สามารถเสริมความแข็งแรงของเนื้อยางได้มากขึ้น

Thesis Title Properties of Natural Rubber Mixed with Carbon Nanotube and Nanoclays
Author Mr. Weerachai Sangchay
Major Program Materials Engineering
Academic Year 2007

Abstract

This research have been studied the properties of natural rubber (NR) mixed with carbon nanotube and clays which the experimental method consists of two parts as the following.

Firstly, this part is to find the proper process for prepared NR mixed with carbon nanotube, NR mixed with clays and the proper process for preparation of NR mixed with carbon nanotube and clays. The main factors for finding proper process of this experiment such as type of NR, type of filler (Carbon nanotube and clay) and mixed process etc. It was found that the process for preparation of NR composites prepared from NR latex by mixing dry carbon nanotube and clay slurry into NR were the proper processes for this research. Therefore, the preparation of NR-carbon nanotube composites was done by mixing of dry NR latex, carbon nanotube and chemicals ingredient using two-roll mills. The process for preparation of NR-clay composites, clay slurry needs to be prepared at first, then mixed it with NR latex and dried, after that the dried NR composite is mixed with chemicals ingredient by two-roll mill. In case of the preparation of NR-carbon nanotube and clay composites, clay slurry needs to be prepared then mixed it with NR latex, solidified by using acid and dried it before mixing with carbon nanotube and chemicals ingredient by two-roll mill.

Secondly, the preparation of NR mixed with carbon nanotube, NR mixed with clays and NR mixed with carbon nanotube and clays by variation of amount of carbon nanotube and clays. It was found that carbon nanotube or clays affected NR composites properties. In consequence, the proper addition of carbon nanotube or clays or both of them in the proper amount, for instance the addition of 5 phr of carbon nanotube or 10 phr of clays could increase tensile strength up to 54.64% or 58.16% respectively. Moreover, the equal addition of 5 phr of

both substances could increase tensile strength up to 46.01%. Besides, it was found that the addition of either or both fillers into NR will increase tear resistance, hardness, modulus, compression set and T_g but will decrease %swelling in oil and toluene, scorch and cure time. The mixing of NR with both carbon nanotube and clays shows better advantage than that of either carbon nanotube or clays because of the increase of tear resistance, hardness, modulus, compression set and the decrease of %swelling in oil and toluene, scorch and cure time. Because the carbon nanotubes are well dispersed in the matrix of NR-clays composites and they promote also crosslink structure.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณผู้ที่เกี่ยวข้องกับทุกท่านเป็นอย่างสูง ทั้งที่ออกนามและมีได้ออกนาม ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกด้านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.เล็ก สีคง ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. กัลยาณี คุปตานนท์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำที่ดีเสมอมาตลอดจนช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่เอื้อประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ดร.วิรัช ทวีปรีดา และ ผศ.ดร.สุฤกษ์ คงทอง ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบและตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการทุนก้นกุฏิระดับนักศึกษาปริญญาโทของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนค่าลงทะเบียนเรียนและค่าครองชีพในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ ศูนย์เครือข่ายความเป็นเลิศทางด้านนาโนเทคโนโลยีของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้เงินทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และบริการทดสอบชิ้นงานเพื่อการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและร่วมมือต่างๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยประสานงาน และใช้ความช่วยเหลืองานต่างๆ เป็นอย่างดี

และสุดท้ายขอขอบพระคุณพ่อ จรัส แสงฉาย คุณแม่ อารี แสงฉาย คุณวีระพงษ์ แสงฉาย และ คุณสุกัญญา คงนุ่น ที่ได้ให้กำลังใจและส่งเสริมเรื่องต่างๆในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์นี้

วีระชัย แสงฉาย

สารบัญ

รายการ	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูป	(12)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	39
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	40
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	40
2 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย	41
2.1 วัสดุ	41
2.2 วิธีการวิจัย	45
3 ผลและการอภิปรายผลการทดลอง	74
3.1 ผลของกระบวนการผสมสารตัวเติม	74
3.2 ผลของปริมาณสารตัวเติม	78
4 สรุป	121
4.1 สรุปผล	121
4.2 ข้อเสนอแนะ	123
บรรณานุกรม	124
ภาคผนวก	132
ก. ขนาดอนุภาคของเคลย์	133
ข. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน (กระบวนการ)	135
ค. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมเคลย์ (กระบวนการ)	138
	(8)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ง. คุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป	143
จ. สมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ ประวัตินผู้เขียน	145 164

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ส่วนประกอบของน้ำยางสด	5
1.2	ส่วนประกอบของเม็ดยาง	5
1.3	ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำยางข้นไทย	8
1.4	ส่วนประกอบพื้นฐานของส่วนผสมสูตรยางทั่วไป	11
1.5	ประเภทการทดสอบยางและมาตรฐานในการทดสอบบางส่วน	14
1.6	ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน	17
1.7	สรุปกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน 3 วิธีหลัก	20
1.8	สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	24
1.9	ลักษณะสำคัญของวัสดุผสมพอลิเมอร์-นาโนเคลย์	31
2.1	สมบัติของน้ำยางข้น	42
2.2	สารเคมีผสมในยางที่ใช้ในการทำวิจัย	43
2.3	สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	44
2.4	องค์ประกอบทางเคมีของเคลย์ (มอนต์มอริโลไนต์)	44
2.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษางานวิจัย	46
2.6	ลำดับการเติม ปริมาณ และเวลาที่ใช้ในการผสมของสารเคมีที่ใช้	46
3.1	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน	75
3.2	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมเคลย์	78
3.3	ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง TGA	86
3.4	ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยเคลย์ด้วยเครื่อง TGA	98
3.5	ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ด้วยเครื่อง TGA	113
3.6	เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางผสมในงานวิจัยต่างๆ	118
ข.1	ผลการทนทานต่อแรงดึง	136
ข.2	ผล % Elongation	136

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.3	ผลมอดูลัส	137
ข.4	ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด	137
ค.1	ผลการทนทานต่อแรงดึง	139
ค.2	ผล % Elongation	140
ค.3	ผลมอดูลัส	141
ค.4	ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด	142
ง.1	ผล Scorch time และ Cure time	144
จ.1	ผลร้อยละการบวมตัวในโทลูอินและน้ำมัน	146
จ.2	ผลความหนาแน่นการเชื่อมโยง	148
จ.3	ผลการทนทานต่อแรงดึง	150
จ.4	ผล % Elongation	152
จ.5	ผลมอดูลัส	154
จ.6	ผลความแข็ง	156
จ.7	ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด	158
จ.8	ผลการเสียรูปหลังการกด	160
จ.9	ผลสภาพการนำไฟฟ้า	162

รายการรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	มาตราส่วนหน่วยวัดขนาด	1
1.2	สูตรโครงสร้างของยางธรรมชาติ	4
1.3	ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ	4
1.4	ขั้นตอนการผลิตน้ำยางข้น	9
1.5	โครงสร้างของคาร์บอนแบบต่างๆ	15
1.6	ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	15
1.7	ภาพชนิดของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว	16
1.8	ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	16
1.9	เปรียบเทียบขนาดของโครงสร้างของคาร์บอนแบบต่างๆ	17
1.10	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบยิงด้วยอิเล็กตรอน	18
1.11	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบยิงด้วยเลเซอร์	19
1.12	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบวิธีดีโพลีชันทางเคมี	19
1.13	การวัดค่าสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอน	22
1.14	การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของแท่งนาโนคาร์บอน	23
1.15	โครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรอลหนึ่งหน่วย และการเกิดพันธะระหว่างโครงสร้างของแผ่นเตตระฮีดรอล	25
1.16	โครงสร้างแผ่นเฮกซะโกนอลและช่องว่าง	26
1.17	ลักษณะโครงสร้างของชั้นดินเหนียว	27
1.18	การจัดเรียงโครงสร้างแบบแผ่นออกตะฮีดรอล	27
1.19	การจัดโครงสร้างแบบ 2 : 1 ของมอนต์โมริลโลไนต์	28
1.20	ลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 ของมอนต์โมริลโลไนต์	29
1.21	ชนิดของโครงสร้างวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์-นาโนเคลย์	30
2.1	น้ำยางข้น	41
2.2	ยางแท่งเกรด STR 5L	42
2.3	ภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่กำลังขยายต่างๆ	43
2.4	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเปรียบเทียบเคลย์ที่ไม่บดเปียกกับบดเปียก 100 ชั่วโมง	45

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.5	กระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 1 ถึงกระบวนการที่ 10	47
2.6	เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง	49
2.7	ตัวอย่างของยางคอมปาวด์ ของยางที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม	50
2.8	เครื่อง MDR 2000	50
2.9	เครื่องอัดแม่พิมพ์ยางไฮโดรลิก	50
2.10	แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม	51
2.11	ตัวอย่างชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร สำหรับยางที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม	51
2.12	เครื่องกวนแบบใช้ใบพัด	51
2.13	การจับตัวอย่างในอ่างกรดน้ำส้ม	52
2.14	เครื่องรีดยางแผ่น	52
2.15	ตัวอย่างยางแห้งจากน้ำยางข้น	52
2.16	ตัวอย่างยางคอมปาวด์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน	53
2.17	ตัวอย่างชิ้นงานยางที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนหนา 1 มิลลิเมตร	53
2.18	กระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 4 กับกระบวนการที่ 10	54
2.19	กระบวนการผสมเคลย์ลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 13	56
2.20	กระบวนการผสมเคลย์ลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 11 กับ กระบวนการที่ 14	58
2.21	การกวนเคลย์ด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด	59
2.22	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณต่างๆ	60
2.23	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ	61
2.24	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ	62
2.25	ชิ้นงานหนา 6 มิลลิเมตร	63
2.26	การทดสอบร้อยละการบวมตัว	63
2.27	หัวกดแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง	67

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.28	เครื่องมือทดสอบการเสียรูปหลังการกด	68
2.29	เครื่องมือทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า	69
2.30	ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัสดุตามกฎของแบรค	70
3.1	ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่เตรียมจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 11	76
3.2	ภาพ SEM ของท่อนาโนคาร์บอน	76
3.3	ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ที่เตรียมจาก กระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 14	79
3.4	ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเปรียบเทียบเคลย์บดเปียก 100 ชั่วโมง แล้วนำเคลย์มา กวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก 30 นาที และเคลย์ที่กวนด้วยเครื่องกวนแบบใช้ ใบพัด 5 ชั่วโมง	79
3.5	ลักษณะการทำให้ยางคงรูปของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณ ต่างๆ	80
3.6	ร้อยละการบวมตัวของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	81
3.7	ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	81
3.8	การทนทานต่อแรงดึงและ %Elongation ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	82
3.9	มอดูลัสและการต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ใน ปริมาณต่างๆ	83
3.10	ความแข็งของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	84
3.11	การเสียรูปหลังการกด ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	84
3.12	สภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	85
3.13	การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณ ต่างๆ	86
3.14	ผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อค่ามอดูลัสสะสม	87
3.15	ผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อค่า $\tan \delta$	88

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.16	ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ	89
3.17	ผลการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 1 phr	90
3.18	ผลการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr	90
3.19	ผลการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 10 phr	90
3.20	ผลการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 15 phr	90
3.21	ผลการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr	90
3.22	ผล FTIR ของยางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม	91
3.23	ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr	92
3.24	ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr	92
3.25	การตรวจสอบโครงสร้างด้วย TEM ของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณ 5 phr	93
3.26	ลักษณะการทำให้ยางคงรูป ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	93
3.27	ร้อยละการบวมตัวในโทลูอินและในน้ำมัน ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	94
3.28	ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	94
3.29	การทนทานต่อแรงดึงและ %Elongation ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	95
3.30	มอดูลัสและการต้านทานต่อการฉีกขาด ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	96
3.31	ความแข็งของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	96
3.32	การเสีรูปหลังการกด ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	97
3.33	สภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	98
3.34	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติผสมด้วยเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ	99
3.35	ผลของปริมาณเคลย์ต่อค่ามอดูลัสสะสม	100
3.36	ผลของปริมาณเคลย์ต่อค่า $\tan \delta$	100

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.37	ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ	101
3.38	ผลการกระจายตัวของเคลย์ เมื่อผสมเคลย์ 5 phr ลงในยางธรรมชาติ	101
3.39	ผลการกระจายตัวของเคลย์ เมื่อผสมเคลย์ 10 phr ลงในยางธรรมชาติ	102
3.40	ผลการกระจายตัวของเคลย์ เมื่อผสมเคลย์ 15 phr ลงในยางธรรมชาติ	102
3.41	ผลการกระจายตัวของเคลย์ เมื่อผสมเคลย์ 20 phr ลงในยางธรรมชาติ	102
3.42	ผลการกระจายตัวของเคลย์ เมื่อผสมเคลย์ 25 phr ลงในยางธรรมชาติ	102
3.43	ผลการกระจายตัวของเคลย์ เมื่อผสมเคลย์ 30 phr ลงในยางธรรมชาติ	102
3.44	ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ 10 phr	103
3.45	ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ 25 phr	104
3.46	การตรวจสอบโครงสร้างด้วย TEM ของยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ ที่ปริมาณ 10 phr	104
3.47	ลักษณะการทำให้ยางคงรูป ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณท่อนานาโนคาร์บอน	105
3.48	ลักษณะการทำให้ยางคงรูป ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณเคลย์	106
3.49	ร้อยละการบวมตัวในโทลูอินและในน้ำมัน ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณท่อนานาโนคาร์บอน	106
3.50	ร้อยละการบวมตัวในโทลูอินและในน้ำมัน ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณเคลย์	107
3.51	ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติมท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์	107
3.52	การทนทานต่อแรงดึงและ %Elongation ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณท่อนานาโนคาร์บอน	108
3.53	การทนทานต่อแรงดึงและ %Elongation ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณเคลย์	109

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.54	มอดูลัสของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติม ท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ 109
3.55	การต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติมท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ 110
3.56	ภาพแนวความคิดการเข้าไปแทรกตัวของสารตัวเติมในเนื้อยาง 110
3.57	ความแข็งของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัว เติมท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ 111
3.58	สภาพการนำไฟฟ้าของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณ สารตัวเติมท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ 112
3.59	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนานโนคาร์บอน และเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ 112
3.60	ผลของปริมาณสารตัวเติมต่อค่ามอดูลัสสะสม 114
3.61	ผลของปริมาณสารตัวเติมต่อค่า $\tan \delta$ 114
3.62	ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ เมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน และเคลย์ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ ลงในยางธรรมชาติ 115
3.63	ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ เมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน และเคลย์ 20 phr และ 30 phr ตามลำดับ ลงในยางธรรมชาติ 115
3.64	ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ ที่ปริมาณ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ 115
3.65	ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนานโนคาร์บอนและเคลย์ ที่ปริมาณ 20 phr และ 30 phr ตามลำดับ 116
ก.1	ขนาดอนุภาคเคลย์บดเปียกที่เวลาต่างๆ 134
ก.2	ขนาดอนุภาคของเคลย์ที่ผ่านการบดเปียก 100 ชั่วโมง และนำมาควนด้วยสภาวะ ต่างๆ 134

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

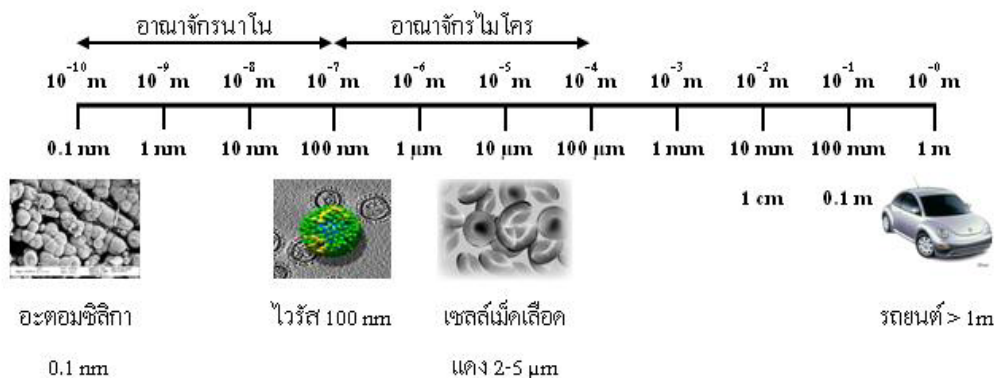
CNT	Carbon nanotube
CVD	Chemical vapor deposition
DRC	Dry rubber content
E'	Storage modulus
HA	High ammonia
LA	Low ammonia
MBTS	Benzothiazyl disulfide
MMT	Montmorillonite
MWNT	Multi wall carbon nanotube
nm	Nanometer (10^{-9} m)
phr	Part per hundred of rubber
PVP	Polyvinylpyrrolidone
S	Sulfur
SA	Stearic acid
STR	Standard Thai Rubber
SWNT	Single wall carbon nanotube
tan δ	Damping factor
TMTD	Tetramethyl thiuram disulfide
T _d	Thermal degradation temperature
T _g	Glass transition temperature
ZnO	Zinc Oxide
μm	Micrometer (10^{-6} m)
\emptyset	Diameter

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

“นาโน” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกโบราณ แปลว่า “แคระ” แต่ในปัจจุบันคำว่านาโนมักใช้กับหน่วยที่แสดงถึงขนาดเล็กเป็นพันส่วน เช่น 1 nm มีขนาดเท่ากับหนึ่งในพันล้านส่วนของเมตรหรือมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมของคนประมาณหนึ่งแสนเท่า ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) นาโนมีขนาดเล็กจัดอยู่ในระดับอะตอม ซึ่งเล็กมากจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าหรือกล้องจุลทรรศน์ เมื่อเทียบสัดส่วนขนาดของนาโนจะเริ่มตั้งแต่อะตอมขนาดของซิลิกาขึ้นไป ซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 0.1 nm จนถึงขนาดไวรัสซึ่งมีขนาดประมาณ 100 nm เพราะเมื่อมีขนาดใหญ่กว่าหน่วยนาโนจะใช้หน่วยวัดที่ใหญ่ขึ้นตามลำดับ เช่น μm , mm, cm และ m เป็นต้น มาตรฐานหน่วยวัดขนาดแสดงในรูปที่ 1.1 (รอฮีม, 2547)



รูปที่ 1.1 มาตรฐานหน่วยวัดขนาด (ดัดแปลงจาก รอฮีม, 2547)

การพัฒนาวัสดุผสมระดับนาโน (Nanocomposite material) กำลังได้รับความสนใจทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีการหนึ่งในการควบคุมโครงสร้างและสมบัติของวัสดุใหม่ที่ได้ เพื่อการผลิตวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งนำไปสู่การพัฒนานาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ในอนาคต โดยคำว่า “วัสดุผสมระดับนาโน” หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยเฟส 2 เฟส โดยที่เฟสชนิดหนึ่งมีการกระจายตัวในอีกเฟสหนึ่งในระดับนาโนเมตร (10^{-9}) ซึ่งในปัจจุบันคำๆ นี้ มักใช้กันโดยทั่วไปในการศึกษาด้านวัสดุศาสตร์ เช่น เซรามิก และพอลิเมอร์ วัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์ที่เสริมแรงโดยใช้สารเติมระดับนาโน (Nanofiller) ชนิดต่างๆ ได้แก่ เม็ดซิลิกา (Silica bead) และเคลย์ (Clay) (นิธิมา, 2549) พงซิลิกา

(Precipitated silica) (Motomatsu et al., 1997) และท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) กำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย โดยสำหรับตัวเติมระดับนาโนที่เสริมแรงในวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์ที่จะกล่าวต่อไปนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอน กับ นาโนเคลย์ (Nanoclay)

วัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์กับเคลย์หรือวัสดุผสมพอลิเมอร์นาโนเคลย์นั้นได้รับการกล่าวถึงกันมากในช่วง 10 กว่าปีมานี้เมื่อนักวิจัยของศูนย์วิจัยกลางบริษัทโตโยต้า ได้รายงานการเตรียมวัสดุผสมพอลิเมอร์นาโนเคลย์ชนิดแรก คือวัสดุผสมระดับนาโนของไนลอน-เคลย์ (Nylon-clay nanocomposite) โดยวัสดุผสมระดับนาโนชนิดนี้มีสมบัติเชิงกล สมบัติการขวางกั้น และการต้านทานความร้อนที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งๆ ที่มีองค์ประกอบของเคลย์เพียง 4.7 % โดยน้ำหนักเท่านั้นเอง (นิธิมา, 2549) และนอกจากนี้ยังมีการเตรียมวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์กับเคลย์อีกหลายชนิดเช่น การเตรียมวัสดุผสมระดับนาโนของยางกับเคลย์ โดยในการทดลองได้ใช้ยาง 4 ชนิดผสมกับเคลย์ได้แก่ ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (Styrene butadiene rubber, SBR) ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางไนไตรล์บิวทาไดอิน (Nitrile butadiene rubber, NBR) และยางคาร์บอกซิเลตอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอิน (Carboxylated acrylonitrile butadiene rubber, XNBR) ซึ่งผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระดับนาโนของยางทั้ง 4 ชนิด กับเคลย์มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมระดับไมโคร (Microcomposite material) ของพอลิเมอร์กับเคลย์นั้นๆ (Wu et al., 2005) ในส่วนของวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์กับท่อนาโนคาร์บอนนั้นจากการรายงานถึงสมบัติอันพิเศษของท่อนาโนคาร์บอน ได้แก่ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่สูงมากกว่า 1 TPa เมื่อเทียบกับเพชรซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.2 TPa และมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้าถึง 10-100 เท่า เป็นต้น กระตุ้นให้นักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการศึกษาถึงการกระจายตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกันในเมทริกที่เป็นพอลิเมอร์ และกลศาสตร์ของวัสดุผสมจากท่อนาโนคาร์บอน (เกตุศิริ, 2546) จึงเป็นที่มาของงานวิจัยมากมาย เช่น งานวิจัยที่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในเรื่องยางพบว่าค่า มอดูลัสยืดหยุ่น การนำความร้อนและไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับยางที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอน (Kim et al., 2006) และยังมีการศึกษาลักษณะของวัสดุผสมระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิสไตรีน โดยพบว่าการผสมท่อนาโนคาร์บอนเพียง 1 % โดยน้ำหนักหรือประมาณ 0.5 % โดยปริมาตร ทำให้ค่าความเหนียวของวัสดุผสมเพิ่มขึ้น 36-42% และการทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 25% (เกตุศิริ, 2546)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าการเสริมแรงพอลิเมอร์ด้วยท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ของวัสดุผสมมีค่าสูงขึ้นดังนั้นก็เป็นที่มาในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ที่จะปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ โดยการผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์ เพื่อให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้ยางพารา ซึ่งเป็นพืช

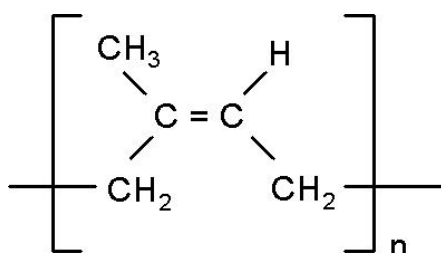
เศรษฐกิจของทางภาคใต้ และเพื่อให้สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในการผลิตสามารถใช้งานได้กว้างมากขึ้น

1.2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 ความรู้พื้นฐาน

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) การเติมแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรด อนุภาคยางจับตัวกันเป็นก้อนแยกตัวออกจากน้ำ จากนั้นกรี๊ดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ก็จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้วยังมียางแท่ง

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-Polyisoprene) กล่าวคือประกอบด้วยไอโซพรีน (Isoprene, C_5H_8) เมอร์ โดยที่จำนวนเมอร์ (n) มีค่าตั้งแต่ 15,000-20,000 ดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน และเฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystalline) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีการทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว (พงษ์ธร, 2548; พรพรรณ, 2540; www.rubber.sc.mahidol.ac.th)



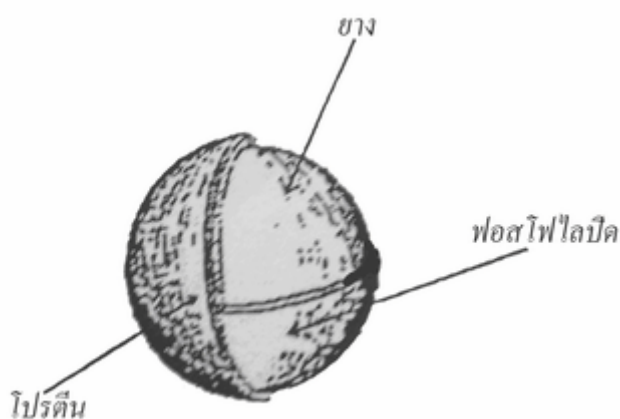
รูปที่ 1.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ (พงษ์ธร, 2548)

1.2.2 น้ำยางสด

1.2.2.1 สมบัติของน้ำยางสด

น้ำยางสดจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม โดยมีอนุภาคยางแขวนลอย อยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ อนุภาคยางมีรูปร่างกลมหรือรูปลูกแพร์ (ดังรูปที่ 1.3) มีขนาด 0.05 - 5 ไมครอน ความหนาแน่น 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีความเป็นกรด - ด่างประมาณ 6.5 - 7.0 โดยทั่วไปปริมาณเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติอาจแปรปรวนตั้งแต่ 25 - 45% (วราภรณ์, 2549) แต่โดยเฉลี่ยมีส่วนประกอบดังตารางที่ 1.1

ผิวของอนุภาคยางมีเยื่อหุ้ม (Membrane) ที่ประกอบด้วยไขมันและโปรตีน โดยแต่ละอนุภาคอยู่รอบนอกทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคยาง ซึ่งมีผลให้น้ำยางสามารถคงสภาพเป็นของเหลวได้ ดังนั้นเมื่อมีการทำลายเยื่อหุ้มอนุภาคหรือมีการสะเทินอนุภาคลง จะทำให้อนุภาคยางที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลางเกิดการรวมตัวจับกันเป็นก้อน (บุญธรรม และคณะ, 2539) เมื่อนำอนุภาคของเม็ดยางมาวิเคราะห์หาคู จะพบว่ามีส่วนประกอบโดยประมาณดังตารางที่ 1.2



รูปที่ 1.3 ลักษณะที่เป็นไปได้ของอนุภาคยางธรรมชาติ (Blackley, 1999)

ตารางที่ 1.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด (บุญธรรม และคณะ, 2539)

ส่วนประกอบ	ร้อยละ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36
เนื้อยางแห้ง	33
โปรตีน	1 - 1.5
เรซิน	1 - 2.5
เถ้า	จนถึง 1
น้ำตาล	1
น้ำ (ในปริมาณที่รวมกับสารอื่นๆ)	100

ตารางที่ 1.2 ส่วนประกอบของเม็ดยาง (บุญธรรม และคณะ, 2539)

ส่วนประกอบ	ปริมาณร้อยละ
เนื้อยางไฮโดรคาร์บอน	86
น้ำที่เจือติดเข้าไปในอนุภาค	10
สารโปรตีน	1
สารพวก Lipid ไขมัน	3
พวกโลหะ เช่น แมกนีเซียม โปตัสเซียม จะปนไปกับอนุภาคเม็ดยางด้วย	ไม่เกิน 0.05

1.2.2.2 ส่วนประกอบของน้ำยาง

1) เนื้อยางมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้คือ

- อนุภาคยาง อนุภาคยางถูกหุ้มด้วยสารจำพวกโปรตีนและไขมัน โดยโปรตีนนี้จะอยู่ชั้นนอก และอาจมีโลหะบางชนิด เช่น แมกนีเซียม โปตัสเซียม และเหล็ก ปะปนอยู่เล็กน้อย ประมาณ 0.5% โดยปกติอนุภาคยางจะแขวนลอยอยู่ในน้ำ ประกอบด้วยสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ลักษณะอนุภาคยางเป็นรูปทรงค่อนข้างกลม มีขนาดแตกต่างกันมาก คืออยู่ระหว่าง 0.04 ถึง 4 ไมครอน อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเกิน 0.4 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 1.2 ไมครอน เมื่อนำน้ำยางสดมาปั่นด้วยความเร็วสูงพบว่า อนุภาคยางที่มีขนาดใหญ่จะแยกตัวออกจากชั้นน้ำขึ้นมาอยู่ด้านบนซึ่งสามารถแยกเป็นน้ำยางชั้น ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะปนอยู่กับหางน้ำยาง (Skim latex) (เสาวนีย์, 2546)

2) ส่วนที่ไม่ใช่ยาง ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆดังนี้

- โปรตีน (Protein) โปรตีนทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำยาง จะแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ห่อหุ้มอยู่ตรงผิวรอบนอกของอนุภาคยางซึ่งมีประมาณ 25% ส่วนที่อยู่ในชั้นน้ำซึ่งมีประมาณ 50% และส่วนของสารลูทอยด์ซึ่งมีประมาณ 25% โปรตีนหลักๆที่มีอยู่ในน้ำยางมีอยู่ 2 ประเภท คือ ประเภทแรกเรียกว่า แอลฟา-โกลบูลิน (α – globulin) โปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 200000 ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีสมบัติเป็น Surface-active จะอยู่บนรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ และน้ำมันกับน้ำ ไม่ละลายในน้ำกลั่น แต่ละลายในน้ำกรด ต่าง และเกลือ ที่มีค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ที่ pH 4.8 ส่วนโปรตีนอีกประเภทหนึ่งที่เรียกว่า ฮีวิน เป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10000 โปรตีนชนิดนี้จะอยู่ที่อนุภาคของเนื้อยาง และละลายอยู่ในชั้นน้ำที่มีค่าจุดไอโซอิเล็กทริกที่ pH 4.5 ส่วนประกอบของฮีวิน มีกำมะถันอยู่ราว 5% และเป็นประเภท Crystalline disulphide linkage เวลาน้ำยางบูดเน่า โปรตีนส่วนนี้จะสลายตัวเป็นสารพวก ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน ซึ่งทำให้มีกลิ่นเหม็นได้ ฮีวิน มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ในโมเลกุล ขึ้นอยู่กับค่า pH ของตัวกลาง โปรตีนชนิดนี้จัดเป็นสารลดความตึงผิว (Surfactant) ชนิด Amphoteric stabilizer ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงประจุของโปรตีนตามสภาวะแวดล้อม (เสาวนีย์, 2546)

- ไขมัน (Lipid) ไขมันที่มีอยู่กับอนุภาคของเม็ดยาง ส่วนใหญ่เป็นพวกฟอสโฟไลปิด Eicosyl alcohol พวกสเตียรอล และเอสเทอร์ของสเตียรอล ฟอสโฟไลปิดนี้จะอยู่ระหว่างชั้นของโปรตีนและอนุภาคยางโดยตัวมันเองทำหน้าที่ยึดโปรตีนให้เกาะติดอยู่กับอนุภาคของเม็ดยาง ฟอสโฟไลปิดที่สำคัญของน้ำยางเป็นชนิดเลซิทีน (Lecithin) (เสาวนีย์, 2546)

- น้ำหรือเซรัม เซรัมของน้ำยางมีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ คือ คาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารพวกแป้งและน้ำตาล ที่มีอยู่ในน้ำยางประมาณ 1% น้ำตาลส่วนใหญ่เป็นชนิด คิวบาคิทอล (Quebarchitol) ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ ลูทอยด์เป็นอนุภาคค่อนข้างกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5-3.0 ไมครอน หุ้มด้วยเนื้อเยื่อชั้นเดียวสามารถเกิดการออสโมซิสได้ง่าย ดังนั้นการเติมน้ำลงในน้ำยางสด จะทำให้ลูทอยด์บวมและแตกง่าย (เสาวนีย์, 2546)

1.2.3 การผลิตยาง

น้ำยางสดที่ได้จากต้นยาง จะจับตัวเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับกระบวนการจับรวมตัวกันของอนุภาคยาง และสภาพแวดล้อม ซึ่งปัจจัยที่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เกิดจากตัวน้ำยางเอง เกลือและสารแทนนิน (Tannins) จากเปลือกต้นยาง หรือเกิดจากการเติมกรดลงไปในน้ำยาง การจับตัวของน้ำยางก่อนกำหนดไม่เป็นผลดีต่อการแปรรูป รวมทั้งทำให้ยางราคาไม่ดี เช่น เมื่อฝนตก

ชาวสวนไม่สามารถเก็บยางใส่ภาชนะได้ทันทำให้สูญเสียยางได้ และเมื่อถึงช่วงฤดูหนาวน้ำยางที่ได้ไม่ค่อยเสถียร จึงมีการใช้สารป้องกันการจับตัวของน้ำยาง (Anti-coagulation) ซึ่งอาจจะเป็นแอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ ฟอรัมาลีน ซึ่งสารแต่ละตัวจะมีผลต่อคุณภาพของยาง ขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณที่ใช้และสภาวะแวดล้อมของน้ำยางเช่น พันธุ์ยาง ฤดูกาล เป็นต้น

1.2.3.1 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางข้น ผลิตขึ้นจากการนำน้ำยางสด จากส่วนที่มีปริมาณเนื้อยาง (Dry rubber content) เฉลี่ยประมาณ 35% สารละลายที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber solid) 5% และน้ำ (Water) มาผ่านกระบวนการแปรรูปให้อยู่ในรูปของน้ำยางข้นที่มีเนื้อยางแห้งอย่างน้อย 60% โดยใช้วิธีการปั่นแยกด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง เพื่อแยกน้ำ และสารอื่นๆ ที่ละลายอยู่ออกไปบางส่วน น้ำยางที่ได้จะเรียกว่า Centrifuged latex ซึ่งมีน้ำยางข้น 60% กับหางน้ำยาง จากนั้นจะต้องทำการรักษาสภาพด้วยการเติมแอมโมเนีย เพื่อป้องกันมิให้น้ำยางจับตัว ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่

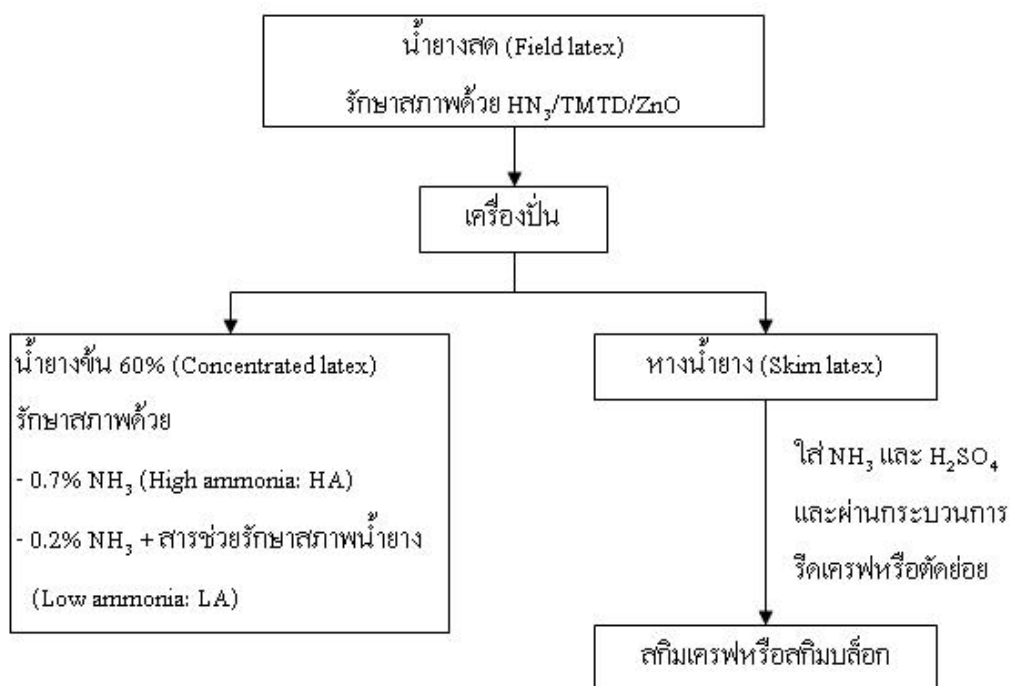
- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High ammonia, HA) จะใช้แอมโมเนีย 0.7% โดยน้ำหนัก
- น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ (Low ammonia, LA) จะใช้แอมโมเนีย 0.2% โดยน้ำหนัก

อาจเติมสารละลายอื่นๆ ซึ่งทำให้ได้น้ำยางที่เหมาะสมสำหรับการเก็บไว้ใช้ประโยชน์ หรือเข้าสู่กระบวนการผลิตเพื่อทำผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามความต้องการของผู้ใช้น้ำยางข้นภายใต้มาตรฐานคุณภาพตามข้อกำหนดมาตรฐานน้ำยางข้นไทย (มอก. 980-2533 แสดงดังในตารางที่ 1.3) และมาตรฐาน ISO1997 (E) ที่กำหนดมาตรฐานคุณภาพและวิธีการตรวจสอบคุณภาพของน้ำยางไว้ อย่างชัดเจนทั้งนี้ทางสมาคมน้ำยางข้นได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำยางข้นมีคุณสมบัติที่สูงกว่ามาตรฐาน ISO เพื่อยกระดับมาตรฐานน้ำยางข้นของประเทศให้เป็นที่ยอมรับทั่วโลก ซึ่งได้รับการรับรองจากสถาบันวิจัยยาง (www.afet.or.th/thai/product/latex/index.php?page=1) โดยกระบวนการผลิตน้ำยางข้นสามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 1.4

ตารางที่ 1.3 ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำยางข้นไทย (มอก. 980 - 2533) (www.rubberthai.com)

สมบัติ	ขีดจำกัดน้ำยางข้นชนิดปั่น	
	HA	LA
ปริมาณของแข็งทั้งหมด ^{1/} , %(มวล/มวล), ต่ำสุด	61.5	61.5
ปริมาณเนื้อยางแห้ง, %(มวล/มวล), ต่ำสุด	60.0	60.0
ปริมาณของแข็งที่ไม่ใช่เนื้อยาง ^{2/} , %(มวล/มวล), สูงสุด	1.8	1.8
ความเป็นด่าง (ในรูปแอมโมเนีย), %(มวล/มวล) ของน้ำยาง, ต่ำสุด	0.60	0.29
เวลาความคงตัวต่อเครื่องกล ^{3/} , วินาที, ต่ำสุด	650	650
ปริมาณของยางจับตัว, %(มวล/มวล) สูงสุด	0.05	0.05
ปริมาณธาตุทองแดง, มก./กก. ของปริมาณของแข็งทั้งหมด, สูงสุด	8	8
ปริมาณแมงกานีส, มก./กก. ของปริมาณของแข็งทั้งหมด, สูงสุด	8	8
ปริมาณตะกอน, %(มวล/มวล) สูงสุด	0.10	0.10
จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (VFA No.)	ตามที่ตกลง (ไม่เกิน 0.15)	
จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ^{4/} (KOH No.)	ตามที่ตกลง (ไม่เกิน 1.0)	
การตรวจสีด้วยสายตา	ไม่เป็นสีฟ้าหรือสีเทา	
การตรวจกลิ่นภายหลังการทำให้เป็นกลางโดยกรดบอริก	ไม่มีกลิ่นบูดเน่า	

^{1/} ปริมาณของแข็งทั้งหมดเลือกได้ตามที่ต้องการ, ^{2/} ผลต่างระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดกับปริมาณเนื้อยางแห้ง, ^{3/} เวลาความคงตัวต่อเครื่องกลต่ำสุดอาจเป็นค่าที่สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ได้, ^{4/} ถ้า น้ำยางประกอบด้วยกรดบอริก จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อาจเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ได้ โดยปริมาณที่เกินไปนั้นมีสมมูลย์เท่ากับกรดบอริก ซึ่งทดสอบหาได้โดยวิธีของ ISO 1802



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการผลิตน้ำยางข้น

(ดัดแปลงจาก www.afet.or.th/thai/product/latex/index.php?page=1)

1.2.3.2 ยางแผ่น (Rubber sheet)

เมื่อเก็บสะสมน้ำยางได้ปริมาณมากแล้ว ต้องนำน้ำยางไปแปรรูปเพื่อความสะดวกในการขนส่ง โดยใช้วิธีทั่วไป คือ การทำเป็นยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoke sheet) ซึ่งวิธีการผลิตยางแผ่นนี้มีข้อดีคือ สามารถเก็บยางได้ค่อนข้างนานและยางที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง (Flexibility) ขั้นตอนการทำยางแผ่นคือ การจับตัวน้ำยาง (Coagulation) การรีดยาง (Sheeting) การทำให้แห้ง (Drying) และการห่อ (Baling) โดยขั้นตอนการจับตัวน้ำยาง ทำโดยการเติมกรดฟอร์มิกลงในน้ำยางที่เจือจางแล้ว ปริมาณที่ใช้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยาง อาจใช้เวลาให้น้ำยางเกิดการจับตัวประมาณ 3 ชั่วโมง การรีดยางทำโดยการนำยางที่จับตัวแล้วผ่านลูกกลิ้งเรียบประมาณ 2-3 รอบ จากนั้นนำไปผ่านลูกกลิ้งที่มีลวดลายเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจะทำให้ยางแห้งได้เร็วขึ้น การที่จะให้ได้ยางแผ่นคุณภาพดี ต้องคำนึงถึงความหนาของแผ่นยาง และความสะอาด โดยในขั้นตอนการรีดยางรวมทั้งการเจือจางน้ำยาง ต้องใช้น้ำที่มีความสะอาด และต้องมีการฉีดน้ำเหนือลูกกลิ้งระหว่างการรีดแผ่นยาง ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยสำคัญ ที่มีผลต่อความสะอาดของยางแผ่น ส่วนขั้นตอนการทำยางให้แห้งทำโดยการแขวนยางที่รีดแล้วในที่โล่งเป็นเวลา 2-3 วัน และถ้าทำเป็นยางแผ่นรมควันในตอนหลัง จะนำยางมารมควันในห้องที่มีควันไว้ประมาณ 3 วัน ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียสแล้วจึงทำการห่อบรรจุ

1.2.3.3 ยางเครฟ (Crepe rubber)

ยางเครฟจะผลิตโดยวิธีการเฉือน (Shearing) หรือการบดยาง (Creping) ยางก้อนผ่านลูกกลิ้ง ซึ่งจะมีอัตราการหมุนด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้ยางเกิดการเฉือนระหว่างเนื้อยางที่ผิวนอกเกิดการเปิดออกโดยเครื่องมาซิเรเตอร์ (Macerator) ซึ่งลูกกลิ้งจะมีขนาดใหญ่ มีร่องลึก และมีอัตราการหมุนต่อรอบต่ำ จากนั้นจึงเข้าเครื่องรีดเครฟ (Intermediate crepe) ซึ่งลูกกลิ้งจะมีร่องตื้นกว่า และมีแรงเฉือนสูง อัตราการใช้น้ำเพื่อทำความสะอาดมีความจำเป็นมาก โดยน้ำที่ใช้ในการทำเครฟ ควรมีอย่างน้อย 10 ลิตรต่อน้ำหนักยางที่ได้ 1 กิโลกรัม วัตถุดิบที่ใช้ทำยางเครฟโดยมากเป็นยางก้อนถ้วย (Cup lump) เศษยาง (Scrap) และยางแผ่นที่มีคุณภาพต่ำ ซึ่งมีสิ่งเจือปนค่อนข้างสูง ดังนั้นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการผลิตยางเครฟ คือ การนำยางดิบมาผ่านลูกกลิ้งในเครื่องมาซิเรเตอร์ และเครื่องรีดเครฟหลาย มาแขวนตามแนวยวบบนชั้นแขวนในห้องที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก และมีหน้าต่างที่ออกแบบให้สามารถป้องกันแสงแดดได้ โดยใช้เวลาทำให้แห้งตามธรรมชาติ ประมาณ 10 วัน แต่ถ้าต้องการให้แห้งเร็วขึ้นก็ใช้วิธีให้ความร้อนผ่านทางท่อที่ร้อน มีการใช้วิธีการทำให้แห้งโดยใช้อากาศร้อนซึ่งใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ยางที่ผลิตเสร็จแล้วจะทำการหีบห่อให้มีน้ำหนักประมาณ 102 กิโลกรัม

1.2.3.4 ยางแท่ง (Block rubber)

หลักสำคัญในการผลิตยางแท่ง คือ กระบวนการทำให้ยางเป็นชิ้นเล็กๆ โดยมีการตัดและรีด และย่อยยางก้อนให้เป็นเม็ดหรือชิ้นเล็กๆ ล้างให้สะอาด แล้วนำมาอบให้แห้งอัดเป็นแท่งสี่เหลี่ยมแล้วห่อด้วยพลาสติกพอลิทีน ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้อาจเป็น น้ำยางสด ยางก้อนแข็ง หรือเศษยาง (พิชัย, 2527) ก่อนปี พ.ศ. 2508 ยางธรรมชาติส่วนใหญ่ถูกผลิตอยู่ในรูปยางแผ่นรมควัน หรือยางเครฟ ยางเหล่านี้ถูกนำไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางเป็นเวลาหลายปี มีการดัดสีสมบัติของยางแผ่นทำด้วยสายตา (Visual grading) ทำให้สมบัติที่ได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอมากนัก ตลอดจนน้ำหนักหีบห่อมีน้ำหนักมาก ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งาน สิ่งเหล่านี้คือข้อจำกัดของยางแผ่นรมควัน

1.2.4 ขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

1.2.4.1 การออกสูตรยาง

การออกสูตรยางเป็นสิ่งสำคัญมากต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ การออกสูตรยางจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับสมบัติของยาง หน้าทีและความจำเป็นของการใช้สารเคมีผสมยาง รวมทั้งต้องพิจารณาถึงราคาของสารเคมีที่จะใช้ว่าเหมาะสมหรือคุ้มกับการผลิตผลิตภัณฑ์

นั้นๆ เพราะต้นทุนการผลิตก็เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (พงษ์ธร, 2550) โดยปกติการใช้สารเคมีต่างๆ ต่อยาง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก และเรียกเป็น phr (Part per hundred of rubber) ส่วนประกอบพื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ดังตารางที่ 1.4 แสดงรายละเอียด และปริมาณสารที่ใช้ในแต่ละชนิด พร้อมทั้งตัวอย่างสารเคมีในแต่ละกลุ่มด้วย

สัดส่วนการใช้สารต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดและประสิทธิภาพของสารเคมี กระบวนการที่จะขึ้นรูปคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการออกสูตรยางที่ถูกต้องเหมาะสมนั้นจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในสมบัติ หน้าที่และปริมาณของทั้งยางและสารเคมีต่างๆ เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามสูตรยางที่ดีเพียงอย่างเดียวไม่ได้หมายความว่า จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีเสมอไปเพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ต้องศึกษาและทำความเข้าใจอีกหลายประการ ดังจะกล่าวต่อไป (วรารักษ์, 2530)

ตารางที่ 1.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของส่วนผสมสูตรยางทั่วไป (พงษ์ธร, 2548)

ส่วนประกอบ	หน้าที่	ตัวอย่าง	ปริมาณ (phr)
ยาง (Rubber)	เป็น Matrix รับการส่งถ่ายแรง	STR 5L	100
สารทำยางคงรูป (Vulcanizing agent)	ทำให้เกิดการวัลคาไนเซชัน คือ จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง	Sulfur	2.5-3.5
สารกระตุ้น/สารเร่งปฏิกิริยา (Activator)	จะช่วยเสริมให้สารเร่งการคงรูป เพื่อให้เกิดการคงรูปเร็วขึ้น	Stearic acid	1.0-5.0
สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator)	ช่วยลดเวลาในการเกิดวัลคันไนเซชัน ทำให้เกิดเร็วขึ้น	TMTD, MBT, CBS	0.5-2.0
สารตัวเติม (Filler)	ช่วยเสริมแรง (Reinforcing) หรือลดต้นทุนในการผลิต	เขม่าดำ ซิลิกา	ตาม ต้องการ
สารทำให้ยางนิ่ม (Plasticizer)	ทำให้ยางอ่อนตัวส่งผลให้สามารถเติมสารตัวเติมได้มากขึ้นกว่าไม่ใช้สาร	Paraffinic	5.0-10.0
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Antidegradent)	ยืดอายุการใช้งานของยาง	IPPD, TMQ, BHT	1.0-2.0

1.2.4.2 การบดขยงให้หั่น (Mastication)

การบดผสมสารเคมีต่างๆ ให้เข้ากับเนื้อยาง สมบัติของยางที่สำคัญสำหรับการบดผสมคือความหนืด (Viscosity) ถ้ายางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดขยงให้หั่น โดยทั่วไปการบดขยงจะกระทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดระบบปิด (Internal mixer) หรือเครื่องบดระบบเปิด (Two-roll mill) ขั้นตอนนี้ยางถูกทำให้หั่นโดยโมเมนต์ของยางถูกทำให้หักขาด เพราะแรงเฉือนจากเครื่องบดและจะใช้ระยะเวลาในการบดนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับความหนืดเริ่มต้นของยาง ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก (โดยเฉพาะยางธรรมชาติ) ก็ต้องบดนาน อุณหภูมิของการบดควรต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันยางเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm)

1.2.4.3 การขึ้นรูปยาง (Forming)

เทคนิคหลักๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปยางให้เป็นผลิตภัณฑ์มี 3 วิธี ได้แก่ การใช้แม่พิมพ์แบบ การอัดผ่านตาย และการใช้เครื่อง Calender (พงษ์ธร, 2544) มีรายละเอียดดังนี้

1) การใช้แม่พิมพ์แบบ (Moulding)

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยาง เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยาของรูป โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด แม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปยางมีหลายแบบ ได้แก่ แบบอัด (Compression mould) แบบกึ่งฉีด (Transfer mould) และแบบฉีด (Injection mould) โดยแม่พิมพ์แบบอัด เป็นแม่พิมพ์แบบง่าย ราคาถูก ใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำผลิตภัณฑ์ทั่วไป ลักษณะของแม่พิมพ์แบบอัดประกอบด้วยฝา 2 ชั้นที่ยึดติดกันด้วยสลักฝาด้านหนึ่งจะเป็นช่องรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเวลาอัดจะใส่ยางลงในฝานี้ เมื่ออีกฝานึงมาปิดลงและวางพิมพ์ในเครื่องอัดพร้อมทั้งให้ความร้อน ยางจะไหลเต็มช่องของแม่พิมพ์ ส่วนแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดนั้นมีส่วนประกอบของแม่พิมพ์มากกว่า 2

ส่วน ยางจะถูกอัดจากส่วนของแม่พิมพ์ที่เรียกว่า Pot เข้าไปยังช่องของแม่พิมพ์ที่เป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ โดยแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีดนี้สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่ซับซ้อนได้ แม่พิมพ์แบบฉีดเป็นแบบที่ได้รับการพัฒนาจาก 2 แบบแรก ซึ่งจะประกอบด้วยเครื่องที่เป็นส่วนทำให้ยางนิ่มแล้วฉีดเข้าแม่พิมพ์ เครื่องฉีดและแม่พิมพ์นี้ราคาสูงมาก แต่จะให้อัตราเร็วในการผลิตสูง เหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่ซับซ้อนและมีปริมาณการผลิตสูง

2) การอัดผ่านคายน (Extrusion)

การอัดผ่านคายน (Die) ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ ต้องอาศัยเครื่องอัดหรือคั่นขาง ซึ่งเครื่องอัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่อาศัยแรงอัดจากแรม (Ram) และชนิดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของสกรู (Screw) ชนิดหลังเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางและเรียกกันว่า Extruder โดยปกติขางที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้จะต้องผ่านการอบให้ยางคงรูปในหม้ออบไอน้ำ หลังจากคั่นขางออกจากคายนแล้ว

3) การใช้เครื่อง Calender

เครื่อง Calender คือเครื่องที่ประกอบด้วยชุดของลูกกลิ้งจำนวน 2 หรือ 3 หรือ 4 ลูก ที่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวขัดเรียบ ปกติจะใช้เครื่อง Calender ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบ มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอ หรือเพื่อการฉาบยางบางๆ ลงบนผ้าหรือแผ่นใยลวด (Coating) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้เทคนิคนี้ในการผลิต เช่น สายพานลำเลียง ยางบุถัง เป็นต้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบให้ยางคงรูปก่อนนำไปใช้งาน

1.2.4.4 การทดสอบ

การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมยางแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ การทดสอบคุณภาพยางดิบ การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต (Processibility) และการทดสอบสมบัติของขางที่คงรูปแล้ว (Vulcanization properties) ดังตารางที่ 1.5

1.2.5 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube, CNT)

1.2.5.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับท่อนาโนคาร์บอน

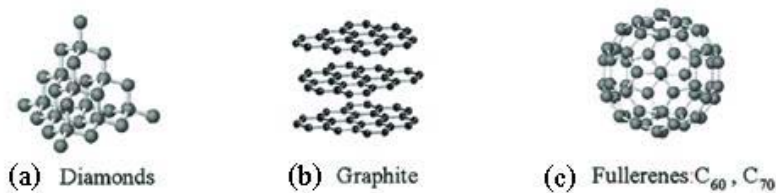
คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุหลักหนึ่งในสี่แห่งสิ่งมีชีวิต (ธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลกคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน) สิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกใบนี้ถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตในรูปแบบ Carbon-based คือ มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานของชีวิต หรืออาจกล่าวได้ว่า โมเลกุลที่ได้ชื่อว่าเป็นสารอินทรีย์ทุกชนิดนั้น มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และหากจะพูดกลับกัน สิ่งมีชีวิตทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียที่ซุกตัวอยู่ลึกหลายกิโลเมตรจากผิวโลก จุลินทรีย์ขังก้าน้ำพุร้อนหรือปล่องน้ำร้อนใต้สมุทรที่ร้อนกว่าอุณหภูมิน้ำเดือด หรือแม้แต่ชีวิตเล็กจิ๋วที่เคยชินอยู่แต่กับความเย็นกลางก้อนน้ำแข็งบริเวณขั้วโลก ล้วนแล้วแต่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ คาร์บอนยังมีอยู่ในอาหารที่เรารับประทาน เสื้อผ้าที่เราสวมใส่ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถยนต์ และในสิ่งอื่นๆ อีกมากมาย ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงบทบาทบางส่วนของคาร์บอนเท่านั้น

ตารางที่ 1.5 ประเภทการทดสอบยางและมาตรฐานในการทดสอบบางส่วน

(www.rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm)

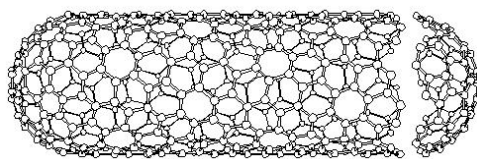
การทดสอบคุณภาพยางดิบ	การทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต	การทดสอบสมบัติของยางคงรูป
<ul style="list-style-type: none"> - ความอ่อนตัว - ดัชนีการอ่อนตัว - ค่าความหนืดมูนี่ (ASTM D1646) - ISO ของยางแท่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความนิ่มของยาง - ความแข็งของยาง (ASTM D2240) - ลักษณะการคงรูปของยาง (ASTM D2084) - สมบัติการไหลของยาง 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าการทนทานแรงดึง (ASTM D412) - ค่ามอดูลัส - ค่าความยืดสูงสุด - ค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด (ASTM D624) - ค่าความแข็ง (ASTM D2240) - การหักงอ และการล้าตัว (ASTM D430) - การกระเด็ง และการยุบตัว

โมเลกุลของท่อนาโนคาร์บอนประกอบขึ้นจากธาตุคาร์บอนเช่นเดียวกับเพชรแกรไฟต์ (Graphite) ถ้ำถ่าน และบอลนาโนคาร์บอนหรือฟูลเลอร์รีน (Fullerene, C₆₀ หรือ C₇₀) แต่มีโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เพชรมีโครงสร้างของอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่ 4 ตัวดังรูปที่ 1.5 (a) เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติจากการเชื่อมโยงของพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนจึงทำให้เพชรแข็งแรงแรงและคงทนมาก ขณะที่แกรไฟต์มีอะตอมคาร์บอนล้อมรอบอะตอมอื่นอยู่เพียง 3 ตัว พันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งหรือตาข่าย เรียงกันเป็นแผ่นในระนาบเดียวกันเรียกว่าแผ่นกราฟีน (Graphene) และมีพันธะเชื่อมต่อระหว่างระนาบเป็นชั้นๆ ดังรูปที่ 1.5 (b) พันธะของคาร์บอนในระนาบเดียวกันของแผ่นแกรไฟต์นั้นแข็งแรงมาก แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงมากนักและเลื่อนไหลได้ ส่วนถ้ำถ่านจากการเผาไหม้จะมีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์แต่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือเรียกว่าอสัณฐานของคาร์บอน (Amorphous carbon) และฟูลเลอร์รีนมีโครงสร้างของคาร์บอนที่จัดเรียงตัวเป็นทรงกลมคล้ายลูกฟุตบอล ดังรูปที่ 1.5 (c) (สุรวุฒิ และคณะ, 2548)



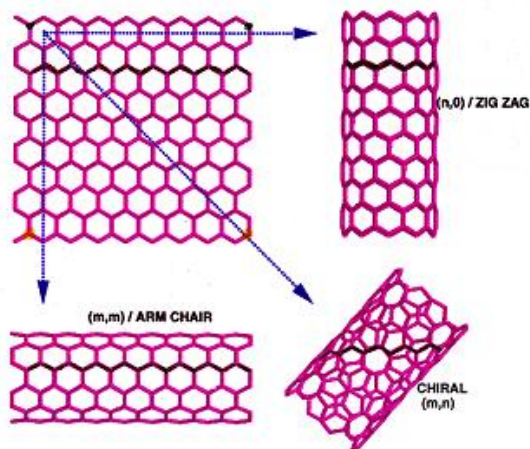
รูปที่ 1.5 โครงสร้างของคาร์บอนแบบต่างๆ โดย (a) เพชร (b) แกรไฟต์ และ (c) ฟูลเลอร์รีน
(คัดแปลงจาก www.thaiscience.com/lab_vol/p22/nanotech.asp)

โครงสร้างของวัสดุที่กล่าวมาข้างต้นต่างจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่คล้ายกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง ท่อนาโนคาร์บอนจึงมีผนังของอะตอมคาร์บอนที่จัดเรียงพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมและอาจมีบริเวณปลายท่อปิดด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยมของคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายครึ่งหนึ่งของฟูลเลอร์รีน ดังรูปที่ 1.6 ท่อนาโนคาร์บอนประเภทนี้เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single wall carbon nanotube, SWNT) (สุรวุฒิ และคณะ, 2548)



รูปที่ 1.6 ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว
(<http://www.godunov.com/bucky/nanotube.html>)

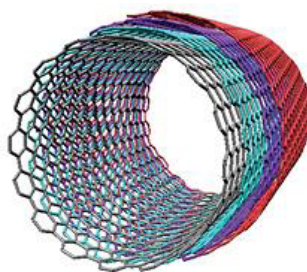
โดยลวดลายตามผนังของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวนั้นอาจมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันได้ 3 แบบ ตามการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดที่ต่างกัน คือ โครงสร้างแบบ Armchair ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรของแกนตั้ง โครงสร้างของท่อแบบ Zigzag ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ตามแนวสมมาตรของแกนนอน และโครงสร้างท่อแบบ Chiral ที่เกิดจากการม้วนแผ่นแกรไฟต์ด้วยมุมบิดอื่นๆ ต่างจากสองแบบแรกซึ่งโครงสร้างท่อนาโนทั้ง 3 แบบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.7 และโครงสร้างที่แตกต่างกันนี้มีผลต่อสมบัติหลายๆ อย่างของท่อนาโนคาร์บอน (สุรวุฒิ และคณะ, 2548)



รูปที่ 1.7 ภาพชนิดของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว

(<http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html#>)

นอกจากท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวที่กล่าวมาข้างต้นยังท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น (Multi wall carbon nanotube, MWNT) ซึ่งผนังท่อมักมีลักษณะซ้อนกันคล้ายกับการซ้อนท่อเล็กในท่อใหญ่ โดยมีจุดศูนย์กลางภาคตัดขวางของท่อเป็นจุดเดียวกัน (สุรวุฒิ และคณะ, 2548) ดังแสดงในรูปที่ 1.8



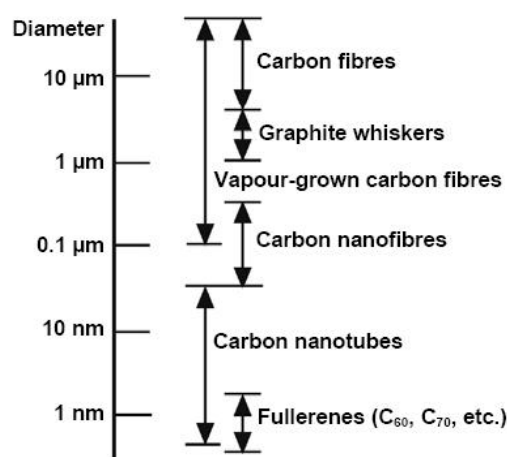
รูปที่ 1.8 ภาพท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น

(<http://www.pharmacy.uwaterloo.ca/research/foldvari/about/index.html>)

และสามารถสรุปรายละเอียดของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว กับผนังหลายชั้นได้ดังตารางที่ 1.6 พร้อมทั้งรูปที่ 1.9 แสดงถึงขนาดของท่อนาโนคาร์บอนกับโครงสร้างของคาร์บอนแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 1.6 ชนิดของท่อนาโนคาร์บอน (สุรวุฒิ และคณะ, 2548; www.thaiscience.com)

ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว	ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น
มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่น กราเฟม (Grapheme sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นมีขนาดประมาณ 0.4-2.0 nm	เป็นการซ้อนกันของท่อหลายๆ ชั้น โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น นั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้นมีขนาดประมาณ 2.5-30 nm



รูปที่ 1.9 เปรียบเทียบขนาดของโครงสร้างของคาร์บอนแบบต่างๆ (Shaffer et al.)

1.2.5.2 การค้นพบท่อนาโนคาร์บอน

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอนครั้งแรกเกิดขึ้นด้วยความบังเอิญในปี ค.ศ. 1991 (Iijima, 1991) ภายหลังจากค้นพบฟูลเลอร์รีน 6 ปี โดยนักวิจัยของบริษัท เอ็นอีซี (NEC) ในห้องทดลองที่เมืองสึกุบา (Tsukuba) ประเทศญี่ปุ่น ขณะที่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงมากตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟูลเลอร์รีนจากกระบวนการยิงด้วยอิเล็กตรอน (Electron arc discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายรากไม้ เป็นเส้นยาว บาง และจับกันอยู่เป็นกลุ่ม แต่ที่น่าสนใจคือ วัสดุนี้มีโครงสร้างของอะตอมที่เป็นระเบียบและสมมาตร ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ค้นพบครั้งแรกนั้นคือ ท่อชนิดผนังหลายชั้น จากนั้นในปี ค.ศ. 1993 ได้มีการนำเสนอรายงานวิจัยร่วมกันของนักวิจัยบริษัทเอ็นอีซี และบริษัทไอบีเอ็ม (IBM) ว่าสามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวได้ โดยการเติมโลหะเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อป้องกันการม้วนตัวด้วยตัวเองของแผ่นแกรไฟต์ และป้องกันการเกิดเป็นฟูลเลอร์รีน ขนาดเล็ก จากนั้นท่อนาโนคาร์บอนก็ได้รับความสนใจศึกษามากยิ่งขึ้น

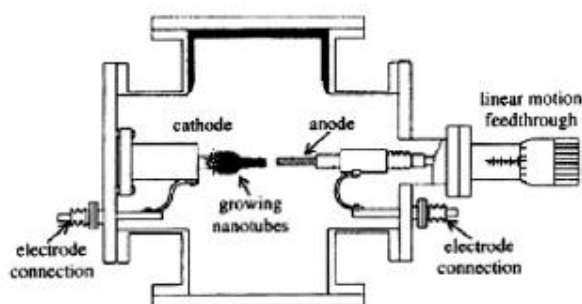
โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างท่อนาโนคาร์บอนให้มีขนาดและสมบัติตามต้องการ รวมทั้งการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อีกด้วย (สุรวุฒิ และคณะ, 2548)

1.2.5.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

จากการศึกษารายงานวิจัยพบว่าเทคนิคการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีความคล้ายวิธี ขึ้นอยู่กับสมบัติของท่อนาโนที่ต้องการ แต่สำหรับวิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี (สุรวุฒิ และคณะ, 2548; Bokobza 2007; Merkoci et al., 2006; Paradis, al., 2007; Yeetsorn et al., 2004; www.thaiscience.com) โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังสรุปในตารางที่ 1.7

1) เทคนิคการยิงด้วยอิเล็กตรอน (Electron arc discharge)

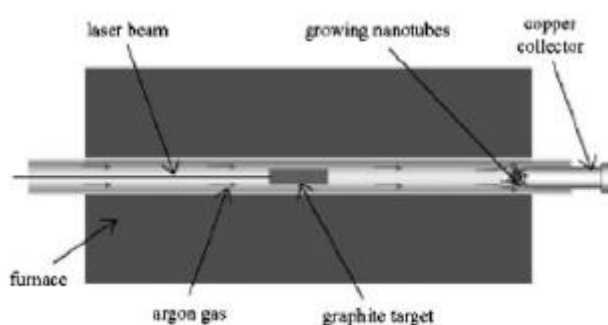
เทคนิคนี้เป็นวิธีเริ่มแรกในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งแต่เดิมใช้ในการสังเคราะห์ฟูลเลอร์รีน โดยใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 100 แอมแปร์ และศักย์ไฟฟ้าประมาณ 20 กิโลโวลต์ ที่ระหว่างขั้วคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ประมาณ 2000-3000 องศาเซลเซียส ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน จากนั้นคาร์บอนที่แตกตัวจะเกิดการควบแน่นและก่อตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนที่ขั้วแคโทด ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นี้ อาจเป็นท่อชนิดผนังหลายชั้นหรือผนังชั้นเดียวก็ได้ ขึ้นอยู่กับว่าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ (ถ้าใช้โลหะเร่งปฏิกิริยาจะได้ท่อชนิดผนังชั้นเดียว) วิธีการสังเคราะห์วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูก แต่ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปน เช่น อนุภาคของคาร์บอน และซีแก่ก่อนข้างมาก (สุรวุฒิ และคณะ, 2548)



รูปที่ 1.10 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบยิงด้วยอิเล็กตรอน (Paradise et al., 2007)

2) เทคนิคการยิงด้วยเลเซอร์ (Laser ablation)

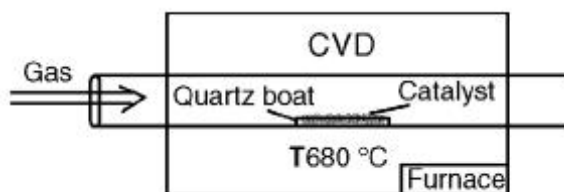
ถูกคิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของ Smalley วิธีนี้ใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูง กระแทกกับแท่งคาร์บอนผสมโลหะที่อยู่ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200-1500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดคาร์บอนก๊าซและคาร์บอนอะตอมที่ร้อนขึ้นและให้ก๊าซเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือไนโตรเจน ไปกวาดเอาท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นออกจากเตาเผาแล้วนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บที่ทำจากทองแดงด้านนอกเตาเผา การสังเคราะห์วิธีนี้ดีกว่าการยิงด้วยอิเล็กตรอนตรงที่ให้อัตราการผลิตคาร์บอนที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าแต่มีค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ค่อนข้างสูง (สุรวุฒิ และคณะ, 2548)



รูปที่ 1.11 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบยิงด้วยเลเซอร์ (Paradise et al., 2007)

3) วิธีดีโพสิชันทางเคมี (Chemical vapor deposition, CVD)

คือการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมาเข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ท่อให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ (www.thaiscience.com)



รูปที่ 1.12 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบวิธีดีโพสิชันทางเคมี (Zhang et al., 2005)

ตารางที่ 1.7 สรุปกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน 3 วิธีหลัก

(www.thaiscience.com/lab.vol/p13cabon%20nanotubes.htm)

วิธี	Arc discharge	Laser ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ใช้กระแสไฟสูงประมาณ 100 แอมแปร์ ระหว่างแท่งกราฟิต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิดพลาสมาร้อนขึ้น CNT จะก่อตัวขึ้นจาก C ที่แตกตัว (ส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ ซีเลียม)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่ง C ที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของ C จากนั้น CNT ก็ก่อรูปขึ้นโดยส่วนมากสังเคราะห์ใน บรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิ ~ 1200 องศาเซลเซียส	เป็นการแยกก๊าซที่มี C เป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมาเข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่ง (อุณหภูมิ ~400-1200 องศาเซลเซียส)
ประสิทธิภาพ	30~90%	มากกว่า 70%	20~90%
SWNT	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6~1.4 nm	- ขนาดยาว (5~20 nm) - Ø: 1~2 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: 0.6~4 nm
MWNT	- ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1~3 nm (นอก) ~10 nm	ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNT	- ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10~200 nm
ข้อดี	- วิธีที่ง่าย ค่าใช้จ่ายถูก - มีรอยตำหนิน้อย - สามารถสังเคราะห์ MWNT ได้โดยไม่ต้องใช้โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ในควมดันบรรยากาศห้อง	- ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWNT - ความบริสุทธิ์สูง - ท่อที่ได้มีรอยตำหนิ น้อย	- สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWNT ยาว - กำหนดทิศทางตำแหน่งของท่อได้ง่าย - สังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้
ข้อเสีย	- ความยาวของท่อสั้น และขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก	- เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง	- เมื่อเทียบกับวิธีอื่นด้วยเลเซอร์ ท่อที่ได้มีรอยตำหนิอยู่บ้าง

1.2.5.4 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ในส่วนสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของท่อ เช่น ชนิด เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนของท่อ เป็นต้น (สุรวุฒิ และคณะ, 2548) มีดังต่อไปนี้ และสามารถสรุปสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไปได้ตารางที่ 1.8

1) สมบัติทางกายภาพ

ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.7 และ 2 นาโนเมตร และล่าสุดในปี 2004 ที่ผ่านมามีนักวิทยาศาสตร์รายงานว่าสามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวขนาดเล็กที่สุดได้ถึง 3 อังสตรอม ส่วนท่อนาโนคาร์บอนชนิดหลายผนัง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในช่วง 10-300 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อประมาณ 0.34-0.36 นาโนเมตร ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนโดยทั่วไปอยู่ในระดับไมโครเมตร แต่สามารถทำให้ยาวถึง 20 เซนติเมตรได้ และล่าสุดในปี 2004 มีรายงานว่านักวิทยาศาสตร์ในกลุ่มของลิ (Li) สามารถสร้างท่อนาโนคาร์บอนที่มีความยาว 100 เมตรได้สำเร็จ ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหรือการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้งานบางอย่างได้โดยตรง

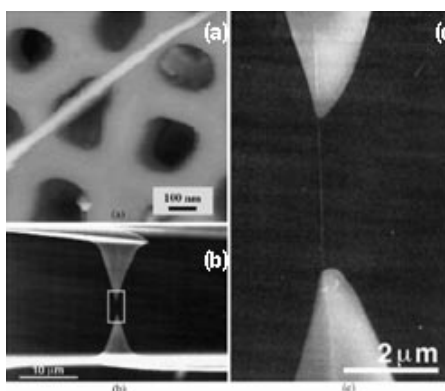
ท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบา โดยมีค่าความหนาแน่นเพียง 1.33-1.40 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1250 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าคาร์บอนที่อวบน้ำปฏิบัติ (Action carbon) ถึง 2 เท่า

2) สมบัติเชิงกล

เนื่องจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนและพันธะของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตรเท่านั้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ กล่าวคือมีความยืดหยุ่นหรือค่ามอดูลัสของยังสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (TPa) และมีการทนทานต่อแรงดึงสูงถึง 150 จิกกะปาสคาล (GPa) ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าอัลลอยที่มีค่าเพียง 2 จิกกะปาสคาลเท่านั้น นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวยังสามารถถูกดึงยืดได้ถึง 10-13 เปอร์เซ็นต์ ก่อนที่จะขาดอีกด้วย

การวัดค่าสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การวัดค่ามอดูลัสของยังโดยอาศัยเครื่องจุลทรรศน์แรงอะตอมหรือเครื่อง AFM (Atomic force microscope) จอตรงกลางท่อนาโนที่วางพาดอยู่บนรูระดับนาโน

(Nanopores) ดังรูปที่ 1.13 (a) หรือใช้เข็มของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาดหรือ SPM (Scanning probe microscope, SPM) ไปงอท่อนาโนที่ยึดปลายด้านหนึ่งไว้แล้ววัดการสั่นสะเทือนของท่อในสนามไฟฟ้า หรืออาจวัดการสั่นโมเลกุลเนื่องจากความร้อน (Thermal vibration) ก็ได้ ส่วนการวัดค่าการทนทานต่อแรงดึงนั้นทำได้โดยการใช้เข็มของเครื่อง AFM จับทั้งสองข้างของท่อนาโนคาร์บอนแล้วดึงจนขาด ดังแสดงในรูปที่ 1.13 (b) และ 1.13 (c)



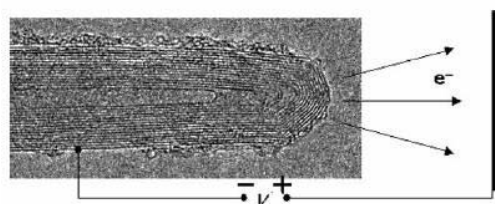
รูปที่ 1.13 การวัดค่าสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอน (a) ภาพจากเครื่อง AFM ของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นวางผ่านรูระดับนาโนเพื่อวัดค่ามอดูลัสของยัง (b) และ (c) ภาพจากเครื่องจุ SEM ของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่อยู่ระหว่างปลายเข็มของเครื่อง AFM เพื่อวัดค่าการทนทานต่อแรงดึง (<http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html#>)

3) สมบัติทางไฟฟ้า

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวนำไฟฟ้าทุกชนิด และมีสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดในบางสภาวะได้ด้วย ซึ่งท่อนาโนคาร์บอน 1 มัด สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ขณะที่ทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้สูงสุดเพียง 10^6 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนจะแสดงสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าแล้วยังสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนซิลิกอนได้ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ เช่น การที่ท่อนาโนคาร์บอนมีผลเฉลยของผนังท่อที่แตกต่างกันทำให้การนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนต่างกัน โดยโครงสร้างท่อแบบ Armchair จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า ขณะที่โครงสร้างแบบ Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกึ่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนโครงสร้างแบบ Chiral จะมีสมบัติอยู่ระหว่างสองแบบแรก นอกจากนี้ การบิดท่อนาโนคาร์บอนไม่ให้มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบแนวตรงก็สามารถเปลี่ยนท่อนาโนคาร์บอนให้มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้ด้วย

สมบัติทางไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งของท่อนาโนคาร์บอนที่น่าสนใจคือ มีสมบัติเป็นควอนตัม (Quantum) สามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นกลุ่มหรือ

อิเล็กตรอนที่ละลายตัวได้ และสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายท่อนาโนคาร์บอนที่วางอยู่ในสนามไฟฟ้าภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ ดังรูปที่ 1.14 โดยที่ศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนนั้นมีค่าต่ำกว่าขั้วที่ทำจากวัสดุอื่น เช่น สามารถกระตุ้น สารเรืองแสง (Phosphors) ที่วางไว้ห่าง 1 มิลลิเมตร ได้โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 โวลต์ ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 โวลต์ กับปลายขั้วโมลิบดีนัม



รูปที่ 1.14 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของแท่งนาโนคาร์บอน

(<http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue4/covers/cover1.html#>)

4) สมบัติทางความร้อน

การนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงประมาณ 200 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน (W/m.K) และบางรายงานกล่าวว่ามีค่าการนำความร้อนสูงถึง 6000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ ซึ่งมีค่าประมาณ 2000 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน หลายท่านนอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ และ 2800 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วย

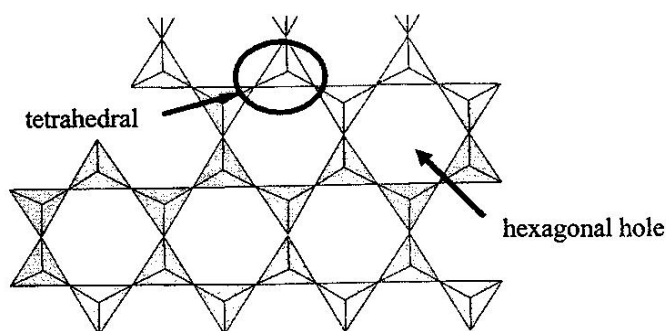
1.2.6 นาโนเคลย์ (Nanoclay)

“เคลย์” ภาษาไทยแปลว่า ดินเหนียว ประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิด ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ซึ่งแร่ดินเหนียวที่นำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ และวัสดุผสมระดับนาโน เป็นแร่ที่มีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ ก็คือแร่ดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเบนโทไนต์ (Bentonite หรือ Bentone) (www.thaiscience.com/lab_vol/htm)

ตารางที่ 1.8 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน (สุรวุฒิ และคณะ, 2548; Paradise et al., 2007; www.thaiscience.com)

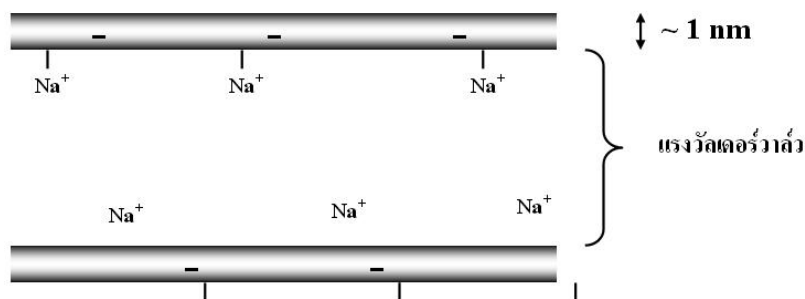
สมบัติ	ท่อนาโนคาร์บอน	เปรียบเทียบกับสมบัติกับวัสดุอื่นๆ
สมบัติทางกายภาพ	<ul style="list-style-type: none"> - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง SWNT = 0.7-2 นาโนเมตร MWNT = 10-300 นาโนเมตร - ความยาวเฉลี่ย : อยู่ในช่วง ร้อยไมโครเมตร - ความต่างกันในแต่ละทิศทางสูง - พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface) มาก 1250 ตารางเมตร/กรัม - ความหนาแน่นต่ำ : 1.33-1.40 g/cm³ 	<ul style="list-style-type: none"> - พื้นที่ผิวมากกว่าคาร์บอนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active carbon : 600 ตารางเมตร/กรัม) - ความหนาแน่นต่ำมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียม (2.7 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
สมบัติเชิงกล	<ul style="list-style-type: none"> - การทนทานต่อแรงดึง : 150 GPa - ค่ามอดูลัสของยัง : 1 TPa 	<ul style="list-style-type: none"> - การทนทานต่อแรงดึงสูงเป็น 300 เท่าของโลหะทั่วไป - ค่ามอดูลัสของยังสูงเป็น 6 เท่าของโลหะ - ค่ามอดูลัสของยังสูงเป็น 2 เท่าของเส้นใยคาร์บอน
สมบัติทางไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าการนำไฟฟ้า : 10^{-4} วัตต์เซนติเมตร - ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุด : 10^6 แอมแปร์/ตารางเซนติเมตร - มีสมบัติเป็นได้ทั้งตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้า - สมบัติกึ่งโลหะ (Semi-Metallic) : 0 อิเล็กตรอนโวลต์ - สมบัติกึ่งตัวนำ (Semi-Conductor) : 0.5 อิเล็กตรอนโวลต์ 	<ul style="list-style-type: none"> - สมบัติทางไฟฟ้าเหมือนกับทองแดงแต่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าประมาณพันเท่า - สมบัติทางไฟฟ้าดีกว่าสารตัวนำไฟฟ้าทั่วไป
สมบัติความร้อน	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าการนำความร้อน : > 3000 วัตต์/เมตรเคลวิน 	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุทั่วไปมีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 3000 กรัม/เมตรเคลวิน

แรงดึงดูดระหว่างพันธะ Si-O ที่เกิดขึ้นในซิลิกาเตตระฮีดรอลจะมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นเมื่อเกิดการเชื่อมโยงระหว่างพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีความแข็งแรงสูง ตามลักษณะโครงสร้างของพันธะจะพบว่า ออกซิเจนอะตอมภายในโครงสร้างยังคงเหลือประจุ -1 ตกค้างอยู่ (Si-O เป็นพันธะเดี่ยว ออกซิเจนอะตอมมีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 2) ดังนั้นถ้าประจุดังกล่าวไม่ได้เกิดพันธะกับแคโทไอออนอื่นใด ประจุลบนั้นสามารถดึงดูดยึดกับ Si^{4+} ซึ่งเป็นหน่วยโครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรอลอีกหน่วยที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างพันธะเตตระฮีดรอลสองหน่วยเข้าหากันด้วยพันธะ Si-O-Si โดยใช้ ออกซิเจนร่วมกันเกิดเป็นโครงสร้างแผ่นหกเหลี่ยม (Hexagonal pattern) และภายในแผ่นหกเหลี่ยมมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อกันของพันธะ (Hexagonal hole) เกิดขึ้นดังรูปที่ 1.16 การเชื่อมต่อนี้ทำให้ดินเหนียวมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น การสลายตัวของโครงสร้างจึงเกิดขึ้นได้ยาก และในแต่ละหน่วยของเตตระฮีดรอลอาจมีการใช้ออกซิเจนในการเกิดพันธะเพียง 1, 2, 3 หรือทั้ง 4 แอนไอออนร่วมกับหน่วยข้างเคียงได้ แต่ถ้าแอนไอออนของออกซิเจนใดไม่เกิดพันธะกับหน่วยข้างเคียงแอนไอออนนั้นจะแสดงประจุ -1 เพราะออกซิเจนอะตอมมีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 2 แต่มีการเกิดพันธะเพียงพันธะเดียวกับอะตอมกลาง ยังคงเหลืออะตอมที่ไม่ได้เกิดพันธะกับหน่วยข้างเคียงทำให้บริเวณผิวหน้าของชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอลแสดงประจุลบ (ฉัฐวุฒิ, 2549)



รูปที่ 1.16 โครงสร้างแผ่นหกเหลี่ยมและช่องว่าง (ฉัฐวุฒิ, 2549; Sivakugan, 2001)

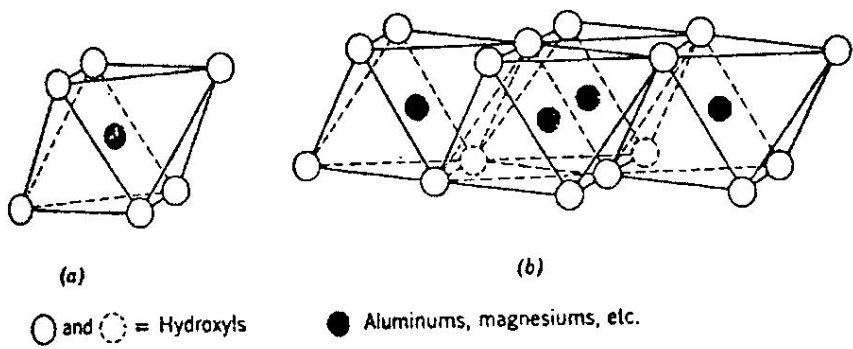
พันธะเชื่อมต่อนี้จะทำให้ชั้นของดินเหนียวเป็นแผ่นยาวต่อเนื่องกัน โดยมีความยาวตั้งแต่ 300 Å จนถึงหลาย μm และชั้นของดินเหนียวเกิดการซ้อนทับกันหลายๆ ชั้น โดยเชื่อมยึดระหว่างชั้นด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์อ่อนๆ (Alexandre et al., 2000) ดังรูปที่ 1.17



รูปที่ 1.17 ลักษณะโครงสร้างของชั้นดินเหนียว (ดัดแปลงจาก Sivakugan, 2001)

2) หน่วยของอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล (*Aluminium octahedral, Al(OH₄⁻³)*)

อะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลประกอบด้วยอะลูมิเนียม 1 อะตอม และออกซิเจน 6 อะตอม อะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลหนึ่งหน่วยจะมีอิเล็กตรอนที่เหลือของออกซิเจน ทำให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงกับอิเล็กตรอนของออกซิเจนในอะลูมิเนียมข้างเคียงได้ เกิดการเชื่อมต่อนั่นเป็นแผ่นยาวต่อเนื่อง เรียง โครงสร้างนั้นว่า แผ่นออกตะฮีดรอล (Octahedral) โครงสร้างของแผ่นอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล ประกอบด้วยออกซิเจนและไฮดรอกซีแอนไอออน (Hydroxyl anion (OH)) มีอะตอมกลางคือ Al³⁺, Mg²⁺, Fe³⁺ หรือ Fe²⁺ อยู่ในโครงสร้าง แต่ละแผ่นของออกตะฮีดรอลเชื่อมติดกันด้วยอิเล็กตรอนของออกซิเจนที่ไม่ได้เกิดพันธะ ดังรูปที่ 1.18 การจัดเรียงโครงสร้างแบบแผ่นออกตะฮีดรอลอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่า แผ่นกิปไซต์ (Gibbsite sheet) (ฉัฐวุฒิ, 2549)

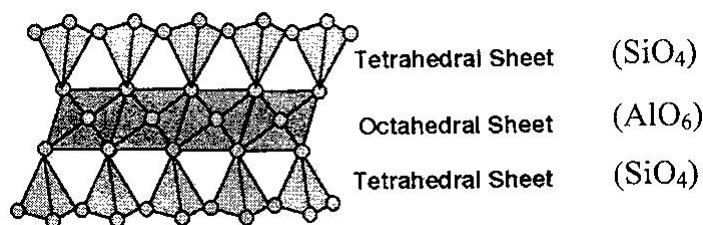


รูปที่ 1.18 การจัดเรียงโครงสร้างแบบแผ่นออกตะฮีดรอล (a) หน่วยของอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอลหนึ่งหน่วย (b) การเกิดพันธะระหว่างแผ่นออกตะฮีดรอล (ฉัฐวุฒิ, 2549)

1.2.6.4 ชนิดและรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้าง

ดินเหนียวกลุ่มฟิลโลซิลิเกตโดยปกติสามารถจำแนกได้ 2 กลุ่มหลัก แบ่งตามจำนวนชั้นของโครงสร้างการจัดเรียงตัวระหว่างแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอล และแผ่นอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอล คือ การจัดเรียงโครงสร้างแบบ 1:1 และแบบ 1:2

ดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนต์จัดอยู่ในการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 แต่ละชั้นของดินเหนียวประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอลสองแผ่นมีสูตรคือ $(\text{Si}_8\text{O}_{20})^{8-}$ ต่อหน่วยเซลล์ ประกบเชื่อมติดกับอะลูมิเนียมออกไซด์รอลจำนวนหนึ่งแผ่น ซึ่งอยู่ระหว่างกลางแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอลสองแผ่น ในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างกันพบว่า แต่ละหน่วยของแผ่นเตตระฮีดรอลจะใช้เอพิคอลลอกซิเจน (Apical O) ไปแทนที่ไฮดรอกซีแอนไอออน (OH) ของแผ่นเตตระฮีดรอลส่งผลให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นยึดติดกันอย่างแข็งแรง และบริเวณของชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอลยังคงแสดงประจุลบที่เกิดขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนของออกซิเจนอะตอมในแผ่นเตตระฮีดรอลที่ไม่ได้เกิดพันธะกับอะตอมใกล้เคียง (ฉัฐวุฒิ, 2549) ลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างแบบ 2:1 แสดงในรูปที่ 1.19



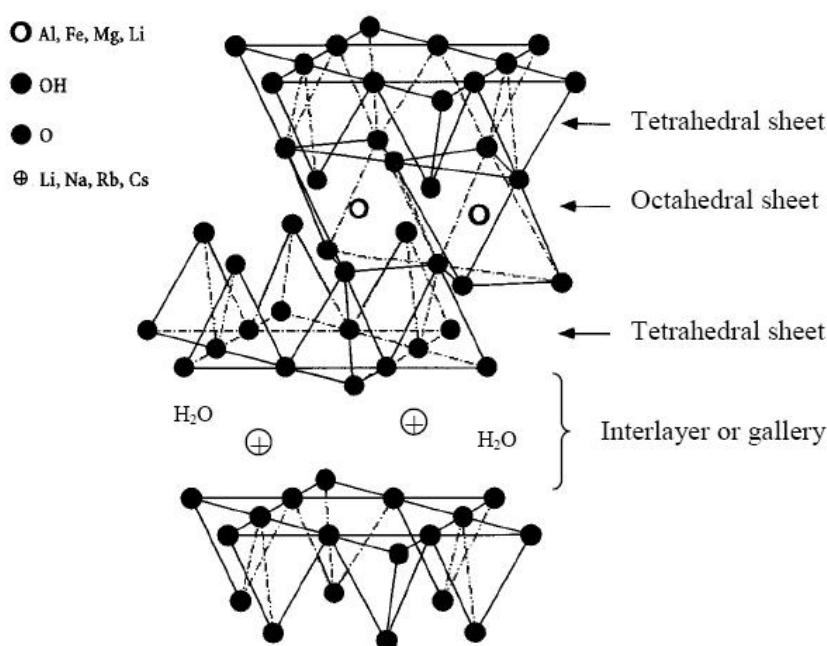
รูปที่ 1.19 การจัดโครงสร้างแบบ 2 :1 ของมอนต์โมริลโลไนต์ (ฉัฐวุฒิ, 2549; Sivakugan, 2001)

การจัดเรียงโครงสร้างแบบ 2 :1 ของดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนต์ มีสมบัติพิเศษอีกด้านหนึ่งคือ โครงสร้างเป็นแบบขยายตัวได้อิสระ (Freely expanding type) โดยผลรวมของประจุลบทั้งในแผ่นเตตระฮีดรอล และแผ่นออกไซด์รอลมีปริมาณต่ำสุดในบรรดาดินเหนียวประเภท 2:1 ด้วยกัน คือ อยู่ในช่วงประมาณลบ 0.5-1.2 ต่อเซลล์หน่วย ทำให้แรงดึงดูดระหว่างประจุลบดังกล่าวกับแคทไอออนภายในชั้นเป็นแรงที่อ่อนมาก จากแรงดึงดูดที่อ่อนมากในโครงสร้างดังกล่าวนี้ ทำให้ชั้นของดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนต์สามารถยืดหดตัวและขยายตัวได้อย่างอิสระเต็มที่และระยะห่างระหว่างชั้น (d-spacing) มีได้หลายค่าขึ้นอยู่กับชนิดของแคทไอออนและหมู่แทนที่แคทไอออน (ฉัฐวุฒิ, 2549)

1.2.6.5 สมบัติทางกายภาพ

มอนต์โมริลโลไนต์โดยโครงสร้างมีขนาดอนุภาคเล็กมากในระดับนาโนเมตร และมีพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งภายในและภายนอกระหว่างชั้นสูงประมาณ $800 \text{ m}^2/\text{g}$ พื้นที่ผิวสัมผัสบริเวณผิวหน้าของดินเหนียวแสดงประจุลบ ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับแคทไอออนของสารอื่นๆ ได้ สูตรโครงสร้างทางเคมีของมอนต์โมริลโลไนต์อย่างง่ายมีดังนี้ $\text{M}_x(\text{Al}_{4-x}\text{M}_{x})\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ เมื่อ x คือระดับขั้นของการแทนที่ (Degree of isomorphous substitution) (มีค่าระหว่าง 0.5-1.3) และ M คือ

แคโทดของอะตอมกลาง (Alexandre et al., 2000; Ray et al., 2003; Tantatherdtam, 2003; Tjong, 2006) โดยน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 540.46 g/mol ความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.35 g/cm³ (www.READE.com) โครงสร้างอนุภาคมีความหนาประมาณ 1 nm มีความยาวประมาณ 1 μm ทำให้อนุภาคมีอัตราส่วนขนาด (Aspect ratio) สูงมากโดยมีค่าประมาณ 1000 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นผลึกซ้อนทับกันหลายๆ ชั้นระหว่างชั้นยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ลักษณะทางกายภาพเป็นผงดินสีขาว (ณัฐวุฒิ, 2549) โครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 ของมอนต์โมริลโลไนต์แสดงในรูปที่ 1.20



รูปที่ 1.20 ลักษณะโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 ของมอนต์โมริลโลไนต์ (Alexandre et al., 2000; Ray et al., 2003; Tantatherdtam, 2003)

1.2.6.6 ชนิดของโครงสร้างวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์-นาโนเคลย์

โครงสร้างของชั้นดินเหนียวมีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นประมาณ 1 nm เมื่อดินเหนียวกระจายตัวภายในเนื้อพอลิเมอร์ โครงสร้างของชั้นดินเหนียวสามารถเกิดขึ้นได้หลายแบบ อาจมีโครงสร้างแบบกระจายสม่ำเสมอทั่วเนื้อพอลิเมอร์ หรือชั้นดินเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงขยายระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าภายในระหว่างชั้นดินเหนียวได้ หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินเหนียวเกิดขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในระหว่างชั้นได้ สามารถแบ่งชนิดของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากนาโนเคลย์ได้ 3 แบบ ตามลักษณะการจัดเรียงอนุภาคดินเหนียว (เกตุศิริ, 2546; ณัฐวุฒิ, 2549; Alexandre et al., 2000; Ray et al., 2003; Tjong, 2006) คือ

1) วัสดุผสมระดับจุลภาค (Micro composite)

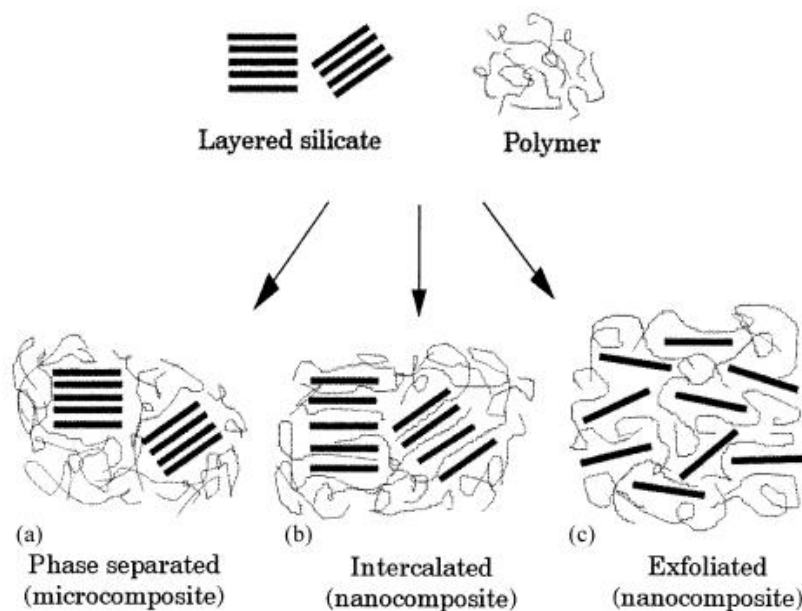
วัสดุผสมระดับจุลภาค (รูปที่ 1.21a) เป็นวัสดุผสมที่พอลิเมอร์ไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่าง ระหว่างชั้นของเคลย์ได้ โดยเคลย์ทำหน้าที่เป็นเพียงสารเติม (Filler) ในพอลิเมอร์เท่านั้น

2) อินเตอร์คาลเตต (Intercalated)

อินเตอร์คาลเตต (รูปที่ 1.21b) เป็นวัสดุผสมที่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ได้ ทำให้ชั้นของเคลย์ขยายตัว แต่ชั้นเหล่านี้ไม่ได้แยกออกจากกัน

3) เอกโฟลิเอตเตต (Exfoliated)

เอกโฟลิเอตเตต (รูปที่ 1.21c) เป็นวัสดุผสมที่ชั้นของเคลย์ซึ่งมีความหนาประมาณ 1 nm แยกตัวออกจากกันและกระจายอยู่ในพอลิเมอร์ ในการเกิดวัสดุผสมชนิดนี้พอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยากันได้ดีที่สุด และทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุใหม่ที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากที่สุด (Alexandre et al., 2000)



รูปที่ 1.21 ชนิดของโครงสร้างวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์-นาโนเคลย์

(a) Microcomposite (b) Intercalated และ (c) Exfoliated (Alexandre et al., 2000)

1.2.6.7 สมบัติของวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์-นาโนเคลย์

สมบัติของวัสดุผสมระดับนาโนของพอลิเมอร์-นาโนเคลย์ ที่โดดเด่นมีหลายด้าน เช่น ความแข็งแรงและมอดูลัสที่สูง ทนความร้อนได้สูง และสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังตารางที่ 1.9

ตารางที่ 1.9 ลักษณะสำคัญของวัสดุผสมพอลิเมอร์-นาโนเคลย์

ลักษณะ	รายละเอียด
มีความใส	อนุภาคนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV- VIS มาก จึงไม่ทำให้แสงแตกกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
ความแข็งแรงและมอดูลัสสูง	เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต ซึ่งเป็นวัสดุผสมระดับนาโนของยางธรรมชาติกับนาโนเคลย์ ที่ปริมาณนาโนเคลย์ ต่างๆ จะเห็นว่าใช้ปริมาณนาโนเคลย์ เพียง 1 ส่วนในร้อยส่วนของยางธรรมชาติก็สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้กว่า 25 MPa
ทนความร้อนสูงได้ดี	เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้จะให้ถ่าน ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟและไฟดับรวดเร็ว (ดินเหนียวก็ใช้เป็นสารทนไฟมานานแล้ว)
สกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซ	เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น และมีอัตราส่วนขนาดสูงทั้งสองมิติจึงเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ
นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น	เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในสถานะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมามากกว่าจะขดตัว ทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.1 ท่อนาโนคาร์บอน

จากสมบัติที่เชื่อมโยงในหลายด้านของท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองชนิด (SWNT และ MWNT) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย เช่น การเสริมแรงในวัสดุผสม ถึงบรรจุไฮโดรเจน Field emission sources ซุปเปอร์แคปาซิเตอร์ เครื่องรับรู้ระดับโมเลกุล และ Scanning probe tips (Sangchay et al., 2007) โดยการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้งานที่สำคัญและมีงานวิจัยจำนวนมากก็คือ การนำมาเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุโดยวัสดุที่เสริมแรงด้วยท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นนั้นมีอยู่หลายกลุ่ม หลายประเภท ดังตัวอย่างต่อไปนี้ซึ่งเป็นเพียงแค่ส่วนหนึ่งเท่านั้น เช่น การนำท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุกลุ่มอะลูมิเนียม

(Chunfeng et al., 2007; Chunfeng et al., 2007; Esawi et al., 2007; Deng et al., 2007) ซึ่งผลการทดสอบสมบัติของวัสดุผสมนั้นพบว่าสามารถเพิ่มค่าการทนทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังได้ (Chunfeng, et al. 2007; Deng et al., 2007) การนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุกลุ่มต่อไปก็คือ วัสดุกลุ่มเซรามิก (Duszova et al., 2007; Zha et al., 2007; Xia et al., 2008) โดยการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปนั้นสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุผสมให้ดีขึ้น และการการนำท่อนาโนคาร์บอนมาประยุกต์เป็นตัวเสริมแรงที่สำคัญมากที่สุด และที่นักวิทยาศาสตร์ดำเนินงานวิจัยกันอย่างต่อเนื่องก็คือ การนำมาประยุกต์เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ (Chen et al., 2006; Guo et al., 2005; Kim et al., 2006; Kim et al., 2006; Kueseng et al., 2006; Lu et al., 2006; Shanmugaraj et al., 2007; Xiao et al., 2007; Yue et al., 2006)

กระบวนการเตรียมวัสดุผสมพอลิเมอร์-ท่อนาโนคาร์บอน จากรายงานวิจัยของ Moniruzzaman และคณะ (2006) นั้นมีวิธีการเตรียมหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมด้วยกัน 3 วิธี ก็คือ การทำเป็นสารละลาย (Solution) การหลอม (Melt) และ In situ polymerization โดยแต่ละวิธีมีรายละเอียดพอสรุปดังนี้

1) การทำเป็นสารละลาย

เป็นวิธีที่นิยมกัน เพราะว่าตัวอย่างที่ใช้เตรียมจะมีขนาดเล็กและเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการของวิธีนี้สามารถสรุปได้ดังนี้ ขั้นแรกทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวในสารละลายและนำมาผสมกับพอลิเมอร์ โดยการผสมกันนั้นอาจจะผสมที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าก็ได้ จากนั้นก็นำมาหล่อเป็นฟิล์มบางก็จะได้เป็นชิ้นงานตามต้องการ (การทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวนั้นอาจจะใช้เครื่องกวนผสมหรืออัลตราโซนิกช่วย)

2) การหลอม

เป็นวิธีการที่ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงเพื่อทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์ แต่หากเปรียบเทียบกับกระบวนการทำเป็นสารละลาย พบว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพน้อยกว่า เพราะว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปจะส่งผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวเป็นไปได้ยากกว่า

3) In Situ Polymerization

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาในระดับโมโนเมอร์ (Monomer) ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีเยี่ยมของท่อนาโนคาร์บอน แต่กระบวนการโดยสรุปแล้วจะค่อนข้างยุ่งยาก โดย

พอสรุปได้ดังนี้ ขั้นแรกเริ่มโดยการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวในโมโนเมอร์ แล้วทำให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ด้วยกระบวนการควบแน่น (Condensation reaction)

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุผสมพอลิเมอร์-ท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป ดังนี้ เช่นการเติมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นลงไปไนลอน 6 (Nylon 6) (Chen et al., 2006) โดยใช้กระบวนการหลอม ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนก่อนนำมาผสมนั้นได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรด และปรับ Fictionalization มาก่อนเมื่อเตรียมชิ้นงานแล้วได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ผลพบว่าการผสมท่อนาโนคาร์บอน 2 % โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง โมดูลัส และความแข็งแรงสูงสุด การใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรงในพอลิแอนิ ลีน (Polyaniline, PANI) (Gua et al., 2005) โดยกระบวนการในการเตรียมวัสดุผสมนั้นใช้ กระบวนการ In situ polymerization และปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แก่ 0, 2, 4 และ 8 % โดยน้ำหนัก เมื่อเตรียมชิ้นงานแล้วก็นำมาศึกษาสมบัติที่สนใจ และตรวจสอบ โครงสร้างของวัสดุผสมโดยเปรียบเทียบกับ PANI ที่ไม่มีการเติมท่อนาโนคาร์บอน พบว่าสามารถ ปรับปรุงค่า Electron และ Ion taster relative ให้เพิ่มขึ้นได้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเนื่องมาจากการ กระจายตัวที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนใน PANI และปฏิกิริยาที่ีระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับ PANI Kim และคณะ (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติกายภาพเชิงความร้อนของพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PE) ที่มีท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งในการเตรียมวัสดุ ผสมได้ใช้กระบวนการหลอมเป็นกระบวนการเตรียมชิ้นงาน และท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทดลอง มี 3 ประเภท ได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรดไนตริก โปรแตสเซียมไฮดรอก ไซด์ และท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว โดยปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้คือ 0.1, 0.5, และ 2 % โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติตามที่สนใจพบว่า ค่าสภาพการนำความร้อน ของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 3 ประเภท และท่อนาโน คาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรดไนตริก จะให้ค่า สภาพการนำความร้อนสูงสุด เนื่องจากการ ทำปฏิกิริยาที่ีระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับ PE นั่นเอง Xiao และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหล ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) ที่มีท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งในการเตรียม วัสดุผสมได้ใช้กระบวนการหลอมโดยใช้เครื่องผสมเพื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน LDPE และสารเคมี โดยปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ 0, 1, 3, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ผลของการ ทดลองพบว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 10 % โดยน้ำหนัก ลงใน LDPE จะเป็นปริมาณที่ดีที่สุดที่จะ ส่งผลให้สมบัติต่างๆ มีค่าสูงสุด เช่น ค่ามอดูลัส และค่าการทนทานต่อแรงดึง โดยเพิ่มขึ้นเท่ากับ

85% และ 46% ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเนื่องมาจากสมบัติที่ดีเยี่ยมของท่อนาโนคาร์บอน และการทำปฏิกิริยาที่ดีระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับ LDPE

จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์- ท่อนาโนคาร์บอน ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ลงไปในพอลิเมอร์ นั้น สามารถเพิ่มสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมได้ เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาที่ดีระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ และการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมระหว่างยาง-ท่อนาโนคาร์บอน จากการสืบค้นนั้นพบว่าม้งานวิจัยไม่มากนักที่จะนำเสนอเกี่ยวกับเรื่องนี้ ดังนั้นจึงเป็นงานวิจัยที่ยังใหม่อยู่ ตัวอย่างงานของวิจัยด้านนี้ได้แก่ Yue และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมและสมบัติของยางที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้เตรียมวัสดุผสมจาก 2 กระบวนการคือ กระบวนการแรกเป็นกระบวนการหลอม โดยการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในยางไนไตรล์ (HNBR) และสารเคมีสำหรับยางด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นก็นำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นก็นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามต้องการ และกระบวนการที่สองคือกระบวนการทำเป็นสารละลาย โดยขั้นแรกนำยาง HNBR มาละลายในอะซิโตน แล้วนำมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอน จากนั้นก็นำไปทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิค แล้วทำให้แห้ง หลังจากนั้นก็นำไปผสมสารเคมีบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และกระบวนการอื่นเหมือนกระบวนการแรก โดยปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ 2, 7, 15 และ 25 phr ผลจากการทดลองครั้งนี้พบว่ากระบวนการที่สองเป็นกระบวนการที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่ากระบวนการแรกเพราะเนื่องมาจากท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวที่ดีกว่าจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงกว่า และจากการทดลองยังพบอีกว่า เมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าความแข็ง ค่าทนทานต่อแรงดึง %Elongation และค่าการเสียรูปหลังการกดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในยางดี และมีเกาะกันที่ดีระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับยาง ส่วนงานวิจัยของ Kim และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรงในยางคลอโรพรีน (Chloroprene) โดยใช้กระบวนการหลอมในการเตรียมวัสดุผสม ซึ่งในกระบวนการนี้ได้ใช้เครื่องผสมแบบปิดมาในการผสมท่อนาโนคาร์บอน ยาง และสารเคมีสำหรับยาง จากนั้นก็นำไปทำการวัลคาไนเซชันต่อเพื่อเตรียมเป็นชิ้นงาน และในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณ 5 %โดยน้ำหนัก และ 30 %โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกล และสภาพการนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 % โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเป็นปริมาณที่เหมาะสมของท่อนาโนคาร์บอน และการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนในเนื้อยาง และจากการทดลองครั้งนี้พบต่ออีกว่าเมื่อมีการผสม

ท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 5 % โดยน้ำหนัก เป็น 30 % โดยน้ำหนัก นั้นส่งผลให้สมบัติที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าลดลงเพราะเกิดการรวมตัวของท่อนาโนคาร์บอนในเนื้อยาง และงานวิจัยของ Shanmugharaj และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 ประเภทได้แก่ ท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่มีการปรับปรุงผิว กับท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยไซเลน (Silane) โดยปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 1 กรัม ซึ่งกระบวนการในการเตรียมวัสดุผสมในการทดลองนี้ได้ใช้กระบวนการหลอม โดยการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปนยาง และสารเคมีสำหรับยางด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นก็นำไปทำการวัลคาไนเซชัน ผลการทดลองพบว่าการใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงผิวนั้นจะเพิ่มสมบัติต่างๆ ที่ทดสอบในการทดลองครั้งนี้สูงกว่าท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ปรับปรุงผิวเพราะว่าเกิดการเกาะที่ติดวาระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับยาง ส่วน Falco และคณะ (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรงในยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene, SBR) ซึ่งใช้กระบวนการทำเป็นสารละลายในการเตรียมวัสดุผสม โดยเริ่มต้นนำยาง SBR มาละลายในโทลูอีน แล้วนำมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีสำหรับยาง (ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ 15 มิลลิกรัม และผ่านการทำให้เกิดการกระจายตัวในเอทานอล และอบแห้งมาแล้ว) ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัส และค่าทนทานต่อแรงดึงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอน และยางที่ผสมกับเขม่าดำ (Carbon black) เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กจึงเกิดการกระจายตัวที่ดี และเข้ากันได้ดีในเนื้อยาง

จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ลงไปในพอลิเมอร์หรือยางนั้น สามารถเพิ่มสมบัติของวัสดุผสมได้เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาที่ติดวาระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ และการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการผลิตวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติ (STR 5L และ Latex) กับท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น

1.3.2 นาโนเคลย์

เคลย์ได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเติมประเภทเสริมแรงในพอลิเมอร์หลายชนิด เพราะเคลย์สามารถเกิดเป็นชั้นซิลิเกต (Layer silicate) ขึ้นได้ ดังนั้นเมื่อผสมลงในพอลิเมอร์จะสามารถปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น โดยกระบวนการเตรียมวัสดุผสมพอลิเมอร์-เคลย์ สามารถสรุปวิธีการหลักๆ ได้ 3 วิธีได้แก่ ทำเป็นสารละลาย การหลอม และ In Situ Polymerization (Ray et al., 2003) ซึ่งจะเป็นวิธีการที่เหมือนกับการเตรียมวัสดุผสมพอลิเมอร์-ท่อนาโนคาร์บอนนั่นเอง โดยเคลย์ที่ได้นำมาเป็นตัวเติมในพอลิเมอร์นั้นก็ยังมีหลายชนิดได้แก่ คลอไอไซต์ (Cloisite) (Park et al.,

2003) เรคทอไรต์ (Rectorite) (Wang et al., 2005) และ พาลีกอร์สไกต์ (Palygorskite) (Shen et al., 2006) แต่เคลย์ที่นิยมนำมาเป็นตัวเติมในพอลิเมอร์มากที่สุดก็คือ มอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) โดยตัวอย่างงานวิจัยที่จะแสดงต่อไปนั้นได้แบ่งออกเป็นการนำ MMT มาประยุกต์เป็นตัวเติมในพอลิเมอร์ กับการนำ MMT มาประยุกต์เป็นตัวเติมในยาง

การนำ MMT มาประยุกต์เป็นตัวเติมในพอลิเมอร์ต่างๆ เพื่อเตรียมเป็นวัสดุผสมพอลิเมอร์-เคลย์ ได้แก่ผสมใน Polyethylene (PE) (Gopakumar et al., 2002) ที่ใช้ MMT เป็นตัวเติม ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมวัสดุผสมในการทดลองนี้คือกระบวนการหลอม ผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัส และค่าการทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น 30% และ 53% ตามลำดับ เมื่อผสม MMT เท่ากับ 10 % โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของชั้นซิลิเกต และ การมีพื้นที่ผิวมาก ส่วนงานวิจัยของ Zheng และคณะ (2004) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำ MMT ที่ผ่านการปรับปรุงผิวมาเป็นตัวเติมใน Ethylene-propylene-diene (EPDM) ซึ่งกระบวนการที่ใช้เตรียมวัสดุผสมใช้กระบวนการหลอม โดยนำ EPDM มาผสมกับ MMT และสารเคมี ด้วยเครื่องผสม HAAKE แล้วนำไปทำให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ก่อนนำไปทำการวัลคาไนเซชัน พบว่าเมื่อผสม MMT 15 phr ลงใน EPDM จะสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุให้สูงขึ้น เช่น เพิ่มค่าการทนทานต่อแรงดึงเป็น 25 MPa (EPDM ไม่ผสม MMT เท่ากับ 5.7 MPa) เป็นเพราะว่าความแข็งแรงของปฏิกิริยาระหว่าง MMT กับ EPDM และงานวิจัยของ Yasmin และคณะ (2006) เป็นการนำ MMT มาเป็นตัวเติมในอีพ็อกซี (Epoxy) ซึ่งปริมาณของ MMT ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ 1-10 % โดยน้ำหนัก ผสมลงในอีพ็อกซีด้วยกระบวนการหลอม โดยใช้เครื่องผสมแบบสามลูกกลิ้ง (Three-roll mill) จากนั้นก็นำไปทำการวัลคาไนเซชัน และทดสอบสมบัติ พบว่าเมื่อผสม MMT เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกาะที่ระยะห่าง MMT กับ อีพ็อกซี และยังพบต่ออีกว่าสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of thermal expansion, CTE) งานวิจัยของ Pozsgay และคณะ (2001) ได้นำ MMT ไปเป็นตัวเติมในพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ด้วยกระบวนการหลอม และในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่องเกลียวแฝด (Twin screw) ในการเตรียมวัสดุผสม โดยแปรค่าปริมาณ MMT เท่ากับ 1, 2, 5, 10, 15 และ 20 % โดยปริมาตร ผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงของวัสดุผสมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PP ที่ไม่เติม MMT เนื่องมาจากการแตกตัวของชั้นซิลิเกตจาก MMT ของการทดลองครั้งนี้ไม่ดี สำหรับงานวิจัยสุดท้ายที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมพอลิเมอร์-เคลย์ที่กล่าวถึงได้แก่ งานวิจัยของ Meneghetti และคณะ (2006) เป็นการเปรียบเทียบการเตรียมวัสดุผสมของพอลิเมทิลเมทาอะคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) โดยใช้ MMT เป็นตัวเติมด้วย 2 กระบวนการได้แก่ การทำเป็นสารละลาย และ อิมัลชัน (Emulsion) โดยทั้งสองกระบวนการคล้ายกันมากต่างกันตรงที่กระบวนการอิมัลชัน นั้นต้องทำให้ MMT เกิดกระจายตัวในน้ำก่อนที่นำมาผสมกับ PMMA ซึ่งปริมาณของ MMT ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ 10 % โดย

น้ำหนัก โดยกระบวนการอิมัลชัน จะให้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ที่สูงกว่าเพราะว่ามีการเกิดขึ้นซิติเกตที่ดีกว่าและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ (T_g ของวัสดุผสมจากทั้งสองกระบวนการมีค่าสูงกว่า PMMA ที่ไม่มี MMT เป็นตัวเติม)

การนำ MMT มาประยุกต์เป็นตัวเติมในยางต่างๆ เพื่อเตรียมเป็นวัสดุผสมของยางเคลย์ นั้นได้แบ่งออกเป็นยางสังเคราะห์กับยางธรรมชาติ ซึ่งมีงานวิจัยที่ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวนี้ดังต่อไปนี้ คือ การนำ MMT มาประยุกต์เป็นตัวเติมในยางสังเคราะห์ เช่น งานวิจัยของ Lian และคณะ (2005) เป็นการนำ MMT มาเป็นตัวเติมในยางไอโซพรีนไทลีนไอโซพรีน (Isobutylene isoprene, IIR) ซึ่งในการทดลองนี้ได้เตรียมวัสดุผสมด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ การทำเป็นสารละลาย และการหลอม สำหรับกระบวนการทำเป็นสารละลาย สรุปขั้นตอนได้ดังนี้ นำเคลย์มากระจายตัวในโทลูอีน จากนั้นก็นำไปผสมกับสารละลายของ IIR ด้วยเครื่องผสม และนำไปอบให้แห้ง แล้วนำไปผสมกับสารเคมีด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ส่วนกระบวนการหลอมนั้นนำ IIR, MMT และสารเคมีผสมกันโดยตรงด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นทั้ง 2 กระบวนการทำเหมือนกันก็นำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบต่อไป โดยปริมาณของ MMT ที่ใช้ในการทดลองมีค่าในช่วง 0-30 phr ผลการทดลองพบว่าวัสดุผสมที่เตรียมจากทั้งสองกระบวนการเมื่อผสม MMT ลงไปจะให้ค่าสมบัติเชิงกล (ค่าการทนทานต่อแรงดึง ค่าความแข็ง และค่าความเค้นที่จุดแตกหัก) ที่สูงขึ้น แต่วัสดุผสมที่เตรียมจากกระบวนการทำเป็นสารละลาย จะให้ค่าที่สูงกว่าเพราะว่าอาจจะมาจากอัตราส่วนของชั้นซิติเกตจาก MMT ในยาง IIR ที่ใหญ่กว่าจึงส่งผลทำให้เกิดการเกาะกันระหว่าง MMT กับ IIR ที่แข็งแรง ส่วนงานวิจัยของ Kader และคณะ (2006) ได้นำเสนอเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุผสมของยางไนไตร์บิวทาไดอิน (Nitrile butadiene, NBR) ที่ใช้ MMT เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งการเตรียมนั้นเตรียมจากน้ำยาง (Latex) โดยใช้กระบวนการหลอม สามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้ นำเคลย์มาทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำด้วยการกวนความเร็วรอบสูงๆ แล้วนำไปผสมกับน้ำยาง NBR โดยกวนให้เข้ากัน จากนั้นก็ดำเนินการให้เกิดการจับตัวของยางเกิดขึ้นโดยใช้กรดไดคลอโรอะซิติก (Dichloroacetic acid, DCA) แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำไปผสมกับสารเคมีบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและนำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งทดสอบสมบัติของวัสดุผสม โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้ปริมาณ MMT เท่ากับ 0, 2, 5 และ 10 phr ผลการทดลองพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล (ค่ามอดูลัส ค่าความแข็ง และค่าการทนทานต่อแรงดึง) ให้สูงขึ้น และเมื่อมีการเติม MMT เพิ่มมากขึ้นสมบัติเชิงกลดังกล่าวก็มีค่ามากขึ้นด้วยเพราะว่ามีการกระจายตัวที่ดีของ MMT ในยาง NBR

สำหรับการนำ MMT มาประยุกต์เป็นตัวเติมในยางธรรมชาตินั้น มีงานวิจัยที่นำเสนอเกี่ยวกับการใช้ยางธรรมชาติแห้ง และน้ำยางข้น ในส่วนของการใช้ในยางธรรมชาติแห้งมี

งานวิจัยครั้งนี้ คือ Arroyo และคณะ (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเติม MMT ลงในยางธรรมชาติ โดย MMT ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งที่ปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว ซึ่งปริมาณที่ใช้เท่ากับ 5 phr ในการเตรียมวัสดุผสมนั้นใช้กระบวนการหลอม โดยขั้นตอนมีดังนี้ คือ ผสมยางธรรมชาติ MMT และสารเคมีบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่ใช้ MMT ที่ไม่ปรับปรุงผิวจะให้ค่าน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติม MMT แต่ในทางกลับกันสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่ใช้ MMT ที่ปรับปรุงผิวจะให้ค่าสูงกว่าเพราะว่าการเกิดการเกาะกันที่แข็งแรง และการมีขอบเขตของชั้นซิลิเกต ที่กว้างและมีกระจายตัวที่ดีในเนื้อยางธรรมชาติ ส่วนงานวิจัยของ Netrabukkana และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการปรับปรุงผิว MMT ที่ใช้เป็นตัวเติมในยางธรรมชาติเกรด STR 5L (STR = Standard Thailand Rubber) โดย MMT ที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ MMT ที่ไม่ปรับปรุงผิว และ MMT ที่ปรับปรุงผิวด้วยดีเดซิลเอมีน (Dedecylamine) และ Si-69 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณที่ใช้ในการทดลองของ MMT เท่ากับ 5 phr และในการเตรียมวัสดุผสมได้ใช้กระบวนการหลอม โดยใช้เครื่องผสมระบบปิดในการผสม STR 5L, MMT และสารเคมี จากนั้นก็นำไปวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติ ผลของการทดลองพบว่าหากใช้ MMT ที่ปรับปรุงผิวเป็นตัวเติมนั้นจะส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้น แต่ถ้าใช้ MMT ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si-69 เป็นตัวเติมจะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด เพราะว่ามี การกระจายตัวที่ดีของ MMT และการเกิดการเกาะกันที่ดีระหว่าง MMT กับยางธรรมชาติ และงานวิจัยอีกเรื่องที่ใช้ยางธรรมชาติแห้งได้แก่ งานวิจัยของ Sharif และคณะ (2005) ซึ่งได้นำเสนอเกี่ยวกับการใช้ MMT เป็นตัวเติมในยางธรรมชาติเกรด SMRL (SMR = Standard Malaysian Rubber) โดยใช้ MMT 3 ชนิด ได้แก่ MMT ที่ไม่ปรับปรุงผิว และ MMT ที่ปรับปรุงผิวด้วยดีเดซิลแอมโมเนียม (Dedecyl ammonium, DDA) และออกตะเดซิลแอมโมเนียม (Octadecyl ammonium, ODA) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณ MMT ที่ใช้ในการทดลอง เท่ากับ 0, 1, 3, 5 และ 10 phr และในการเตรียมวัสดุผสมได้ใช้กระบวนการหลอม โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด จากนั้นก็นำไปวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติ ผลของการทดลองพบว่าหากใช้ MMT ที่ปรับปรุงผิวเป็นตัวเติมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่ค่าการทนทานต่อแรงดึงของวัสดุผสมจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ MMT ที่ปรับปรุงผิวด้วย ODA ในปริมาณ 3-5 phr เพราะปริมาณนี้ของ MMT เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการทดลองครั้งนี้ หากเพิ่มปริมาณ MMT มากกว่าที่กล่าวมา จะส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มของ MMT เกิดขึ้น ส่วนการเตรียมวัสดุผสมจากน้ำยางข้นที่ใช้ MMT เป็นตัวเติมนั้น ยังไม่แพร่หลายมากนัก ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้จึงมีไม่มากนัก เช่น งานวิจัยของ Valadares และคณะ (2006) ได้ใช้ยางธรรมชาติที่เป็นน้ำยางข้น 60% solid ในการเตรียมวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วย MMT และใช้กระบวนการหลอม โดยปริมาณ MMT ที่ใช้ในการทดลองได้แก่

5, 10, 20 และ 30 phr กระบวนการเตรียมวัสดุผสมสามารถสรุปได้ดังนี้ นำ MMT มาทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำโดยการกวนด้วยความเร็วรอบสูงๆ จากนั้นก็นำไปผสมกับน้ำยางข้นโดยกวนด้วยความเร็วประมาณ 24000 รอบต่อนาที เพื่อให้เกิดการเข้ากันที่ดี หลังจากนั้นก็นำไปเทในเบ้าหล่อแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส แล้วนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ ผลการทดลองพบว่าเมื่อผสม MMT เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัส และค่าการทนทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยปริมาณ MMT ที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงมีค่ามากที่สุด คือ ปริมาณ MMT เท่ากับ 20 phr และงานวิจัยของ Wu และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ MMT เสริมแรงในยาง 4 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (SBR) ยางธรรมชาติ (NR) ยางไนไตรล์บิวทาไดอิน (NBR) และยางคาร์บอกซีเลตอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอิน (XNBR) โดยปริมาณ MMT ที่ใช้เท่ากับ 20 phr เตรียมด้วยกระบวนการหลอม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ นำเคลย์มาผสมกับน้ำยางของแต่ละชนิดแล้วกวนให้เข้ากันจากนั้นก็ทำให้เกิดการจับตัว โดย NR กับ SBR ใช้ไตรเอทิลินเตตระแอมโมเนียมคลอไรด์เจือจาง 2% (2% dilute triethylenetetrammonium chloride) ส่วน NBR กับ CNBR ใช้ 1% แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) ในการจับตัว หลังจากนั้นก็นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง แล้วนำไปผสมสารเคมีบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ผลการทดลองในครั้งนี้พบว่า ค่าการทนทานต่อแรงดึง ค่าความแข็ง ค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด และ ค่าการยืดก่อนขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม MMT ลงไปในยางทั้ง 4 ชนิด เพราะว่าการกระจายตัวในระดับนาโนของเคลย์ และการเกิดระนาบชั้นซิลิเกตที่ดี

สรุปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุผสมของพอลิเมอร์ที่กล่าวมาข้างต้น นั้นพบว่าเมื่อนำ MMT ที่ผ่านการปรับปรุงผิวหรือไม่ปรับปรุงผิวมาเติมในพอลิเมอร์ นั้นส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีสมบัติต่างๆที่ดีขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น การเกิดการเกาะกันและการเกิดชั้นซิลิเกต เป็นต้น

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.4.1 ผลิตวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเลือก

กระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์เข้าไปในเนื้อยางอย่างมีประสิทธิภาพ

1.4.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ใช้วัตถุดิบยางธรรมชาติ ท่อนานาโนคาร์บอน นาโนเคลย์ และสารเคมีสำหรับยางจากแหล่งเดียวกัน
- 1.5.2 ศึกษาสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอน เมื่อผสมในปริมาณต่างๆ
- 1.5.3 ศึกษาสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติที่ผสมนาโนเคลย์ เมื่อผสมในปริมาณต่างๆ
- 1.5.4 ศึกษาสมบัติต่างๆของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์ เมื่อผสมในปริมาณต่างๆ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.2 ได้เทคนิคในการผสมท่อนานาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์เข้าไปในเนื้อยาง
- 1.6.2 ได้ยางผสมที่มีสมบัติที่ดีเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ
- 1.6.3 ได้แนวทางในการปรับปรุงสมบัติยางผสมให้มีสมบัติเฉพาะด้านที่ดีมากขึ้น

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีวิจัย

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยการใช้สารตัวเติมระดับนาโนเมตร 2 ชนิด คือ ท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ โดยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการทดลองหากระบวนการผสมสารตัวเติมเข้าไปในยางธรรมชาติ 2 ชนิด คือ ยางแท่งเกรด STR 5L และ น้ำยางข้น 60% DRC ด้วยกระบวนการผสมที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การผสมด้วยกระบวนการหลอม และการผสมด้วยกระบวนการทำให้เป็นสารละลาย หลังจากได้กระบวนการที่เหมาะสมแล้ว ก็ดำเนินการทดลองโดยแปรผันปริมาณสารตัวเติมแต่ละตัวเพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ มีดังนี้

2.1.1 ยาง

ใช้ น้ำยางข้น 60% DRC (รูปที่ 2.1) และยางแท่งเกรด STR 5L (รูปที่ 2.2) จากบริษัท ฉลองอุตสาหกรรมน้ำยางข้น จำกัด จ.สงขลา โดยน้ำยางข้อมีสมบัติดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 น้ำยางข้น



รูปที่ 2.2 ยางแท่งเกรด STR 5L

ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำยางข้น

Properties	Test result	H.A. limits
Total solid content (%)	61.56	61.50 Min.
Dry rubber content (%)	60.19	60.00 Min.
Ammonia content (on total weight) (%)	0.68	0.60 Min.
Ammonia content (on water phase) (%)	1.769	1.60 Min.
Non rubber solid (%)	1.37	2.00 Max.
pH	10.50	10.50 Min.
Koh number	0.55	1.00 Max.
Volatile fatty acid number	0.032	0.20 Max.
Mechanical stability time@55% T.S. (ASTM) (sec)	900	650 Min.
Mg ⁺² (PPM)	18.60	30.00 Max.
Colour of latex	White	White
Colour of film	Normal	Normal
Odour of latex	Sweet	Sweet

2.1.2 สารเคมี

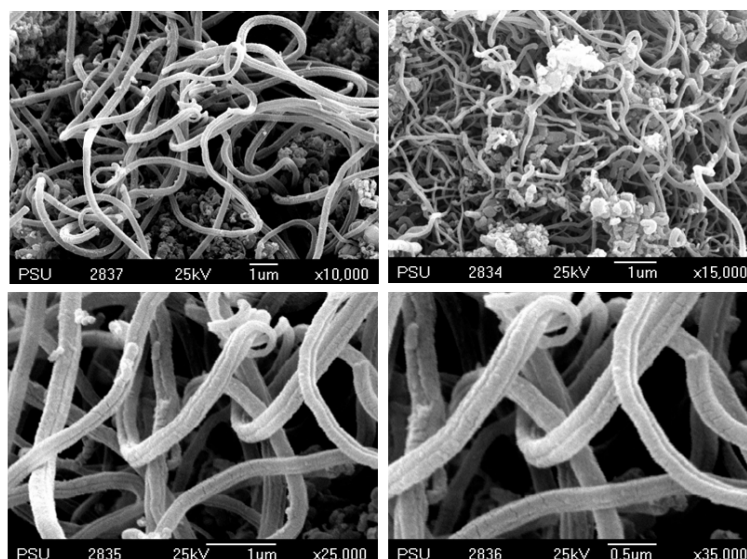
สารเคมีผสมในยางที่ใช้ในงานวิจัยมีดังในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารเคมีผสมในยางที่ใช้ในการทำวิจัย (พงษ์ธร, 2548; วราภรณ์, 2530)

สารเคมี	หน้าที่
Zinc Oxide (ZnO)	สารกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา
Stearic acid (SA)	ช่วยเสริมให้สารเร่งการคงรูป เพื่อให้เกิดการคงรูปเร็วขึ้น
Benzothiazyl disulfide (MBTS)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วปานกลาง
Tetramethyl thiuram disulfide (TMTD)	สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วที่สามารถแตกตัวให้กำมะถันได้
Sulfur (S)	ทำให้เกิดการวัลคาไนเซชัน คือ เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง

2.2.3 สารตัวเติม

สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดแบบผนังหลายชั้น ผลิตจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (Singjai et al., 2007) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 และสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น แสดงในตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่กำลังขยายต่างๆ

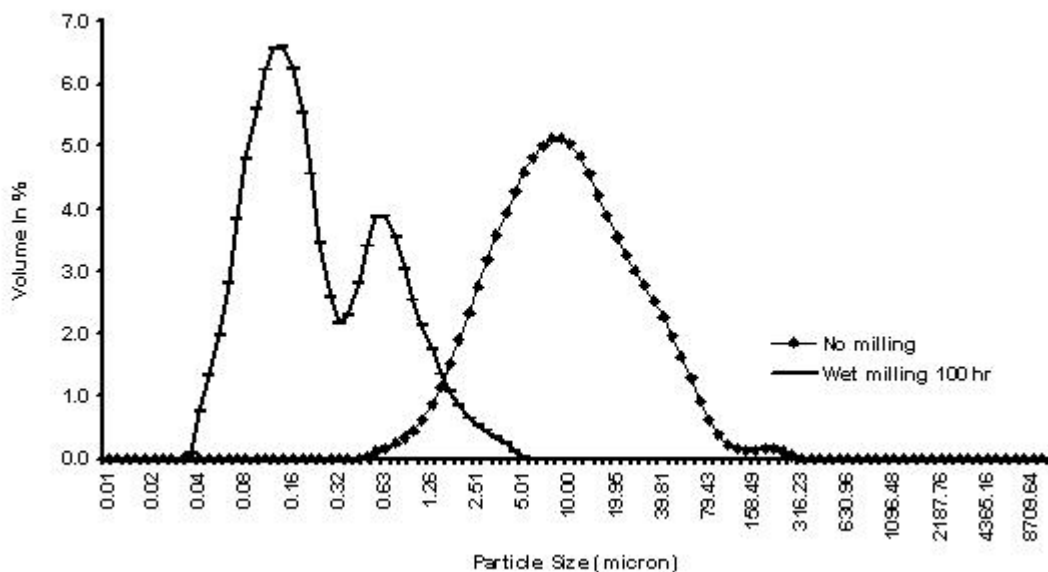
ตารางที่ 2.3 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (Singjai et al., 2007)

ลักษณะ	ข้อมูล
วัสดุตั้งต้น (Start materials)	Ni
ความบริสุทธิ์ (Purity (%))	> 95
ความยาว (Length (μm))	> 10
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter (nm))	20-50
สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity (Ωm))	0.5-0.8
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area (m^2/g))	150-400
สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity (Ωcm^{-1}))	65
ความหนาแน่นก้อน (Bulk density (g/cm^3))	No data
ความหนาแน่นจริง (True density (g/cm^3))	2.1
ปริมาณเถ้า (Ash content (%wt))	< 0.5

เคลย์ที่ใช้เป็นชนิด มอนต์โมริลโลไนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (XRF) ดังตารางที่ 2.4 และมีขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser particle size analysis, LS) โดยขนาดอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 9.446 ไมครอน (μm) และนำเคลย์ทำการบดเปียก (Wet milling) มาก่อนเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ด้วยเครื่องบดจาร์มิลล์ (Jar mill) ซึ่งขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค โดยขนาดอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 0.197 μm และมีขนาดผลึก (Crystallite size) (ที่วิเคราะห์ด้วย XRD) เท่ากับ 27 nm ดังรูปที่ 2.4 แล้วนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาลดขนาดด้วยเครื่องลดขนาดอนุภาคแบบมอร์ต้า ก็จะได้เป็นเคลย์สำหรับทำวิจัย

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบเคมีของเคลย์ (มอนต์โมริลโลไนต์)

องค์ประกอบเคมี	%	องค์ประกอบเคมี	%
MgO	1.82	CaO	2.69
Al ₂ O ₃	12.29	TiO ₂	0.15
SiO ₂	69.56	Fe ₂ O ₃	3.16
SO ₃	0.62	ZnO	0.03
K ₂ O	2.13	SrO	0.04



รูปที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเปรียบเทียบเคลย์ที่ไม่บดกับบดเปียก 100 ชั่วโมง

2.2 วิธีการวิจัย

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาวิธีการนำท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นและนาโนเคลย์ (มอนต์โมริลโลไนต์) มาเป็นตัวเติมประเภทเสริมแรงในยางธรรมชาติ โดยในการทดลองครั้งนี้มีตัวแปรควบคุมหลายตัวได้แก่ อุณหภูมิและเวลาในการอบยาง เวลาในการผสมบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง และอุณหภูมิในการวัลคาไนเซชัน ส่วนตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา งานวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กระบวนการผสมสารตัวเติม และปริมาณสารตัวเติม ดังแสดงในตารางที่ 2.5

2.2.1 การศึกษาผลของกระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนและนาโนเคลย์เข้าไปในยางธรรมชาติ

2.2.1.1 กระบวนการผสมสารตัวเติมแต่ละชนิดกับยางธรรมชาติ

โดยกระบวนการนี้จะแยกออกเป็น 2 กระบวนการด้วยกันได้แก่ กระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในยางธรรมชาติ และกระบวนการผสมเคลย์ลงไปในยางธรรมชาติ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังจะกล่าวต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษางานวิจัย

กระบวนการผสมสารตัวเติม	ปริมาณสารตัวเติม (phr)
-ชนิดของยางธรรมชาติ ได้แก่ยางแห้งเกรด STR 5L กับ น้ำยางชั้น 60% DRC	-ท่อนาโนคาร์บอน ได้แก่ 0, 1, 5, 10, 15 และ 20
-ลักษณะของท่อนาโนคาร์บอน ได้แก่ แบบแห้ง กับแบบสเลอรี	-เคลย์ ได้แก่ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30
-มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และไม่ใช้สำหรับท่อนาโนคาร์บอนแบบสเลอรี	
-ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน ได้แก่ มีการปรับปรุงผิว และไม่ปรับปรุงผิว	
-ลักษณะของเคลย์ ได้แก่ แบบแห้ง กับแบบสเลอรี	
-กระบวนการเตรียมเคลย์แบบเปียก ได้แก่ เตรียมจากการใช้เครื่องกวนแท่งแม่เหล็กกับใช้เครื่องกวนแบบใบพัด	

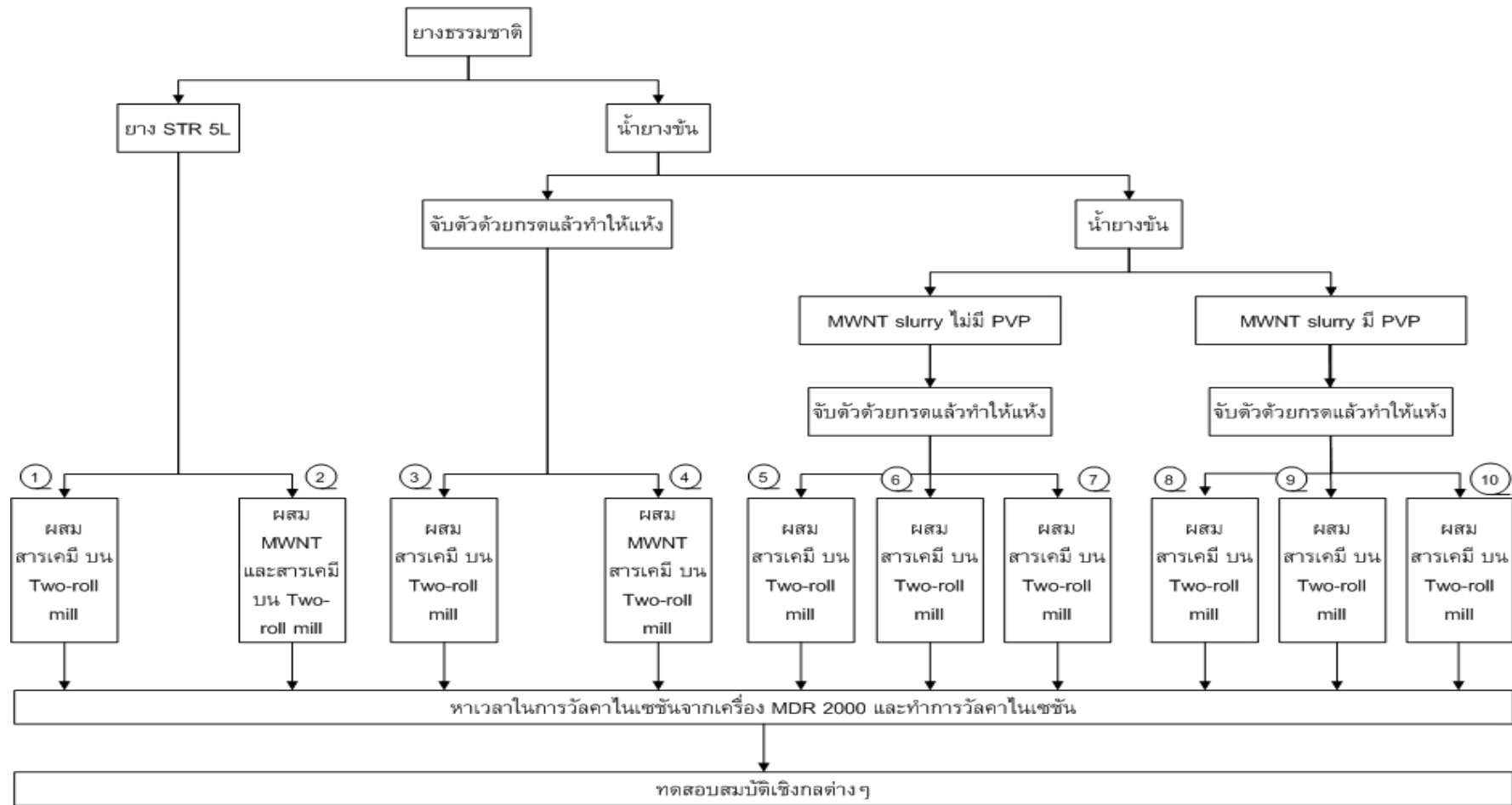
1) การผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปอย่างธรรมชาติ

โดยในกระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปอย่างธรรมชาตินี้ได้เริ่มต้นโดยใช้ยางธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ ยางแห้ง STR 5L และน้ำยางชั้น 60% DRC และปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 10 phr ส่วนลำดับการใส่สารเคมี ปริมาณ และเวลาในการผสมสารเคมีแสดงดังตารางที่ 2.6 และอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส โดยสามารถสรุปกระบวนการทั้งหมดได้ดังรูปที่ 2.5 และรายละเอียดของแต่ละกระบวนการเป็นดังนี้

ตารางที่ 2.6 ลำดับการเติม ปริมาณ และเวลาที่ใช้ในการผสมของสารเคมีที่ใช้

ลำดับ	สารเคมี	ปริมาณสารเคมี (phr*)	เวลาในการผสม (นาที)
1	ZnO	5.0	3
2	SA	3.0	3
3	MBTS	1.0	2
4	TMTD	0.5	2
5	S	2.0	2

* phr is the abbreviation of weight parts per 100 weight part rubber



รูปที่ 2.5 กระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 10

- กระบวนการที่ 1 นำยางแท่ง STR 5L จำนวน 100 กรัม มาผสมสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (รูปที่ 2.6) ซึ่งเริ่มต้นโดยการบดยางให้หั่นก่อนเป็นเวลา 3 นาที แล้วผสมสารเคมีในปริมาณลำดับ และเวลาในการผสมสารเคมีลงไปในยางดังแสดงในตารางที่ 2.6 ก็จะได้เป็นยางคอมปาวด์ (Compound) (รูปที่ 2.7) จากนั้นก็นำไปหาเวลาในการวัลคาไนเซชันจากเครื่อง MDR 2000 (รูปที่ 2.8) แล้วนำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอัดแม่พิมพ์ยางไฮดรอลิก (รูปที่ 2.9) โดยใช้แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ความหนา 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.10) เพื่อให้ได้ชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.11) แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยกระบวนการที่ 1 นี้เป็นกระบวนการอ้างอิงของยางแท่ง STR 5L

- กระบวนการที่ 2 ดำเนินการเหมือนกระบวนการที่ 1 แต่ต่างกันในการบวนการที่ 2 มีการผสมท่อนานาโนคาร์บอน โดยทำการผสมท่อนานาโนคาร์บอนหลังจากผสมกรดสเตียริก (Stearic acid) โดยใช้เวลาในการผสมท่อนานาโนคาร์บอน 5 นาที หลังจากนั้นก็ผสมสารเคมีที่เหลือตามลำดับต่อไปในตารางที่ 2.6 ส่วนขั้นตอนต่อไป ก็ดำเนินการเหมือนกับการเตรียมในกระบวนการที่ 1

- กระบวนการที่ 3 นำน้ำยางข้น จำนวน 167 กรัม มาผสมกับน้ำจำนวน 750 มิลลิลิตร โดยทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด (รูปที่ 2.12) โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 1360 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นก็ทำให้ยางจับตัวกันด้วยกรดน้ำส้ม (Acetic acid) ความเข้มข้น 1% ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร (รูปที่ 2.13) จากนั้นก็นำไปรีดให้บางด้วยเครื่องรีดยางแผ่น (รูปที่ 2.14) แล้วนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ด้วยตู้อบ ก็จะได้เป็นยางแห้ง (รูปที่ 2.15) ส่วนขั้นตอนการผสมสารเคมี และขั้นตอนอื่นๆ ดำเนินการเหมือนกับการเตรียมในกระบวนการที่ 1 ซึ่งกระบวนการที่ 3 นี้เป็นกระบวนการอ้างอิงของน้ำยางข้น

- กระบวนการที่ 4 ขั้นแรกต้องเตรียมยางแห้งจากน้ำยางข้นก่อน โดยวิธีการเตรียมดำเนินการแบบเดียวกับกระบวนการที่ 3 หลังจากได้ยางแห้งจากน้ำยางข้นแล้ว ก็ดำเนินการในขั้นตอนการผสมท่อนานาโนคาร์บอน การผสมสารเคมี และขั้นตอนอื่นๆ โดยดำเนินการเหมือนการเตรียมในกระบวนการที่ 2 ซึ่งตัวอย่างของยางคอมปาวด์ และตัวอย่างชิ้นงานของยางที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอนหนา 1 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

- กระบวนการที่ 5 เป็นกระบวนการที่เตรียมจากน้ำยางข้นแล้วมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำน้ำยางข้นจำนวน 167 กรัม มาผสมกับน้ำจำนวน 250 มิลลิลิตร โดยทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 1360 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำท่อนาโนคาร์บอนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ (ใช้น้ำจำนวน 250 มิลลิลิตร) ที่ผ่านการทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยการใช้เครื่องกวนแบบใช้ใบพัด โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 1900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที มาผสมลงไป หลังจากผสมท่อนาโนคาร์บอนแล้วเติมน้ำเข้าไปในระบบอีก 250 มิลลิลิตร แล้วกวนให้เข้ากัน โดยทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 1360 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ส่วนขั้นตอนต่อไปก็ดำเนินการเหมือนกับการเตรียมในกระบวนการที่ 3
- กระบวนการที่ 6 และ 7 ขั้นตอนการดำเนินการแบบเดียวกับกระบวนการที่ 5 ต่างกันตรงที่วิธีการเตรียมท่อนาโนคาร์บอนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเพื่อให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัว ซึ่งกระบวนการที่ 6 ดำเนินการได้โดยนำท่อนาโนคาร์บอนมาผสมกับน้ำจำนวน 250 มิลลิลิตร ในบีกเกอร์แล้วนำไปแช่ในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที ส่วนกระบวนการที่ 7 จะใช้วิธีการผสมระหว่างกระบวนการที่ 5 และ กระบวนการที่ 6 นั่นก็คือใช้ทั้งเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด และแช่ในอ่างอัลตราโซนิกพร้อมๆ กันเป็นเวลา 20 นาที
- กระบวนการที่ 8-10 ดำเนินการเหมือนกับกระบวนการที่ 5-7 ตามลำดับ แต่กระบวนการที่ 8-10 นี้จะมีการใช้สารช่วยกระจายตัวได้แก่พอลิไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone, PVP) จำนวน 1 กรัม ลงไปในขั้นตอนการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวในน้ำ



รูปที่ 2.6 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของยางคอมปาวด์ที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม



รูปที่ 2.8 เครื่อง MDR 2000



รูปที่ 2.9 เครื่องอัดแม่พิมพ์ยางไฮดรอลิก



รูปที่ 2.10 แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร สำหรับยางที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม



รูปที่ 2.12 เครื่องกวนแบบใช้ใบพัด



รูปที่ 2.13 การจับตัวอย่างในอ่างกรดน้ำส้ม



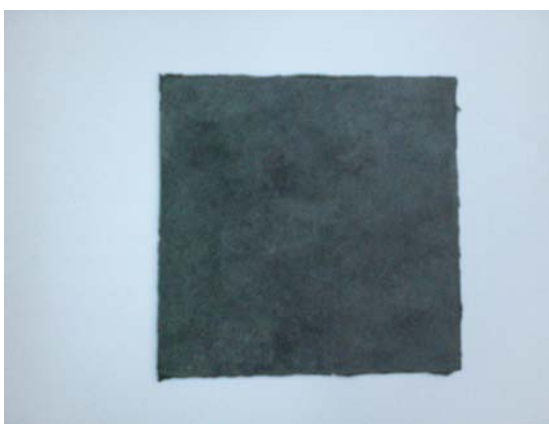
รูปที่ 2.14 เครื่องรีดขางแผ่น



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างขางแห้งจากน้ำยางข้น



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างยางคอมปาวด์ที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน

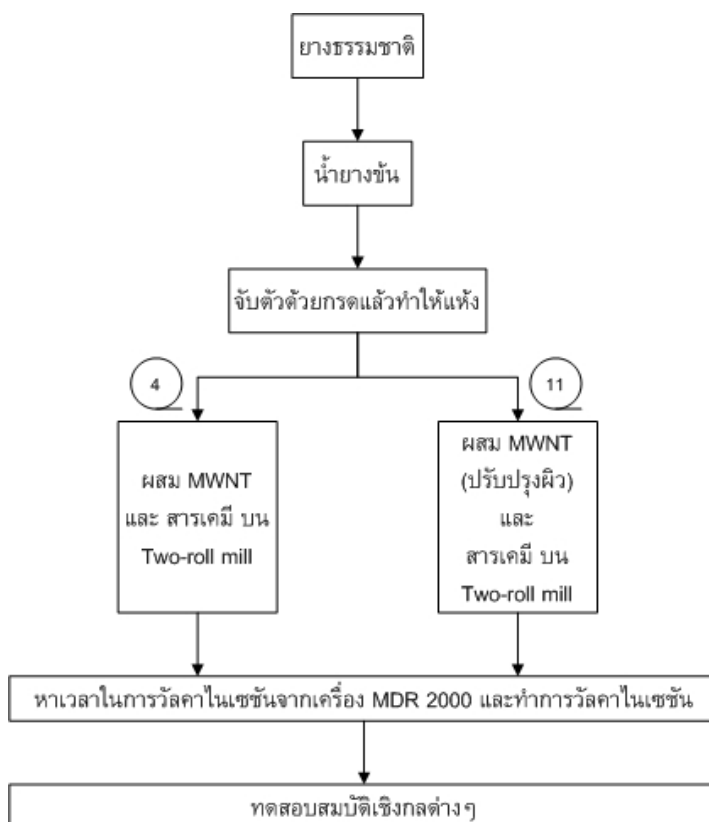


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างชิ้นงานยางที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนหนา 1 มิลลิเมตร

หลังจากนำชิ้นงานที่เตรียมจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 10 ไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยเน้นที่ค่าการทนทานต่อแรงดึงเป็นหลักนั้นพบว่า ยางผสมท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมจากกระบวนการที่ 4 จะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด (รายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 3) ดังนั้นจึงนำกระบวนการที่ 4 นี้ไปพัฒนาต่อเป็นกระบวนการที่ 11 ดังรูปที่ 2.18

- กระบวนการที่ 11 เป็นสูตรที่ดำเนินการแบบเดียวกับกระบวนการที่ 4 แต่จะต่างกันตรงที่ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในกระบวนการที่ 11 นี้ต้องผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรดซัลฟิวริก และกรดไนตริกในอัตราส่วน 3:1 ก่อนนำไปผสมลงในยาง โดยวิธีการดำเนินการปรับปรุงผิวท่อนาโนคาร์บอนมีดังนี้ นำท่อนาโนคาร์บอนจำนวน 10 กรัม มาผสมลงในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 96% ในปริมาตร 75 มิลลิลิตร และกรดไนตริกความเข้มข้น 65% ในปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นก็นำไปต้มให้เดือดเป็น

เวลา 30 นาที เมื่อครบแล้วนำมาทำการล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง จากนั้นก็นำไปทำการอบด้วยตู้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2.18 กระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 4 กับ กระบวนการที่ 11

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยเน้นค่าการทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนที่เตรียมมาจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 11 พบว่าวัสดุผสมที่เตรียมจากกระบวนการที่ 4 จะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (รายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 3) ดังนั้นจึงนำกระบวนการทดลองนี้เพื่อไปเตรียมวัสดุผสมเป็นชิ้นงานที่มีปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่างๆ ต่อไป

2) การผสมเคลย์ลงไปยางธรรมชาติ

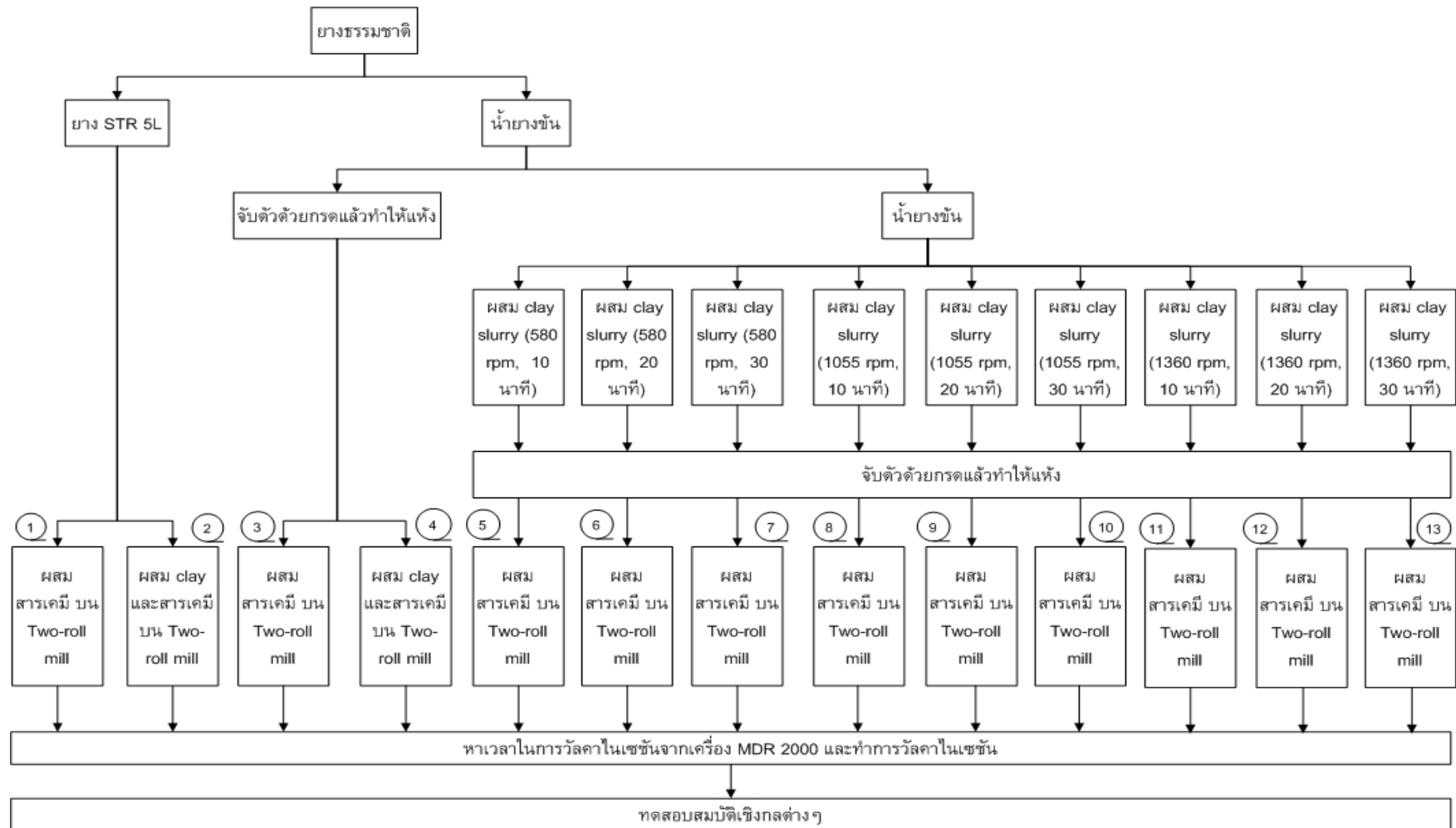
โดยในกระบวนการผสมเคลย์ลงไปยางธรรมชาตินี้ ได้เริ่มต้นโดยใช้ยางธรรมชาติ 2 ชนิด ได้แก่ ยางแท่ง STR 5L และน้ำยางข้น 60% DRC และปริมาณเคลย์ที่ใช้ในการ

ทดลองเท่ากับ 15 phr ส่วนลำดับการใส่สารเคมี ปริมาณ และเวลาในการผสมสารเคมีแสดงดังตารางที่ 2.6 และอุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนเซชันเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับการผสมก่อนนาโนคาร์บอนลงไปอย่างธรรมชาติ โดยสามารถสรุปกระบวนการทั้งหมดได้ดังรูปที่ 2.19 และรายละเอียดของแต่ละกระบวนการเป็นดังนี้

- กระบวนการที่ 1 นำยางแท่ง STR 5L จำนวน 100 กรัม มาผสมสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ซึ่งเริ่มต้นโดยการบดยางให้ نرم ก่อนเป็นเวลา 3 นาที แล้วผสมสารเคมีในปริมาณ ลำดับ และเวลาในการผสมสารเคมีลงไปอย่างดังแสดงในตารางที่ 2.6 ก็จะได้เป็นยางคอมปาวด์ จากนั้นก็นำไปหาเวลาในการวัลคาไนเซชันจากเครื่อง MDR 2000 แล้วนำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอัดแม่พิมพ์ยางไฮดรอลิก โดยใช้แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ความหนา 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยกระบวนการที่ 1 นี้เป็นกระบวนการอ้างอิงของยางแท่ง STR 5L ซึ่งเป็นกระบวนการเดียวกับกระบวนการที่ 1 ในส่วนของการผสมก่อนนาโนคาร์บอนลงไปอย่างธรรมชาติ ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว

- กระบวนการที่ 2 ดำเนินการเหมือนกระบวนการที่ 1 แต่ต่างกันที่กระบวนการที่ 2 มีการผสมเคลือบ โดยทำการผสมเคลือบหลังจากผสม Stearic acid โดยใช้เวลาในการผสมเคลือบ 5 นาที หลังจากนั้นผสมสารเคมีที่เหลือตามลำดับต่อไปในตารางที่ 2.6 ส่วนขั้นตอนต่อไป ก็ดำเนินการเหมือนกับการเตรียมในกระบวนการที่ 1

- กระบวนการที่ 3 นำน้ำยางข้นจำนวน 167 กรัมมาผสมกับน้ำจำนวน 750 มิลลิลิตร โดยทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 1360 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นก็จับตัวด้วยกรดน้ำส้มความเข้มข้น 1% ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร จากนั้นก็นำไปรีดให้บางด้วยเครื่องรีดยางแผ่น แล้วนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ด้วยตู้อบก็จะได้เป็นยางแห้งจากน้ำยางข้น ส่วนขั้นตอนการผสมสารเคมี และขั้นตอนอื่นๆ ดำเนินการเหมือนกับการเตรียมในกระบวนการที่ 1 ซึ่งกระบวนการที่ 3 นี้เป็นกระบวนการอ้างอิงของน้ำยางข้น โดยกระบวนการที่ 3 นี้เป็นกระบวนการอ้างอิงของน้ำยางข้น ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการเดียวกับกระบวนการที่ 3 ในส่วนของการผสมก่อนนาโนคาร์บอนลงไปอย่างธรรมชาติ ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว



รูปที่ 2.19 กระบวนการผสมเคลย์ลงในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 13

- กระบวนการที่ 4 ดำเนินการขั้นแรกโดยการเตรียมยางแห้งจากน้ำยางชั้นก่อน โดยวิธีการการเตรียมแบบเดียวกับกระบวนการที่ 3 หลังจากได้ยางแห้งจากน้ำยางชั้นแล้ว ก็ดำเนินการในขั้นตอนการผสมท่อนาโนคาร์บอน การผสมสารเคมี และขั้นตอนอื่นๆ โดยดำเนินการเหมือนการเตรียมในกระบวนการที่ 2

- กระบวนการที่ 5 มีรายละเอียดคือ นำน้ำยางชั้นจำนวน 167 กรัมมาผสมกับน้ำจำนวน 250 มิลลิลิตรโดยทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด โดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 1360 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นก็ผสมกับเคลย์สเลอรี (Clay slurry) โดยเคลย์สเลอรีเตรียมได้ดังนี้ นำเคลย์มาทำการผสมกับน้ำจำนวน 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ด้วยความเร็ว 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากผสมยางกับเคลย์สเลอรีแล้วก็ทำการเพิ่มน้ำเข้าไปอีก 250 มิลลิลิตร แล้วกวนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัดโดยใช้ความเร็วในการกวนผสม 580 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ขั้นตอนต่อไปดำเนินการเหมือนกับกระบวนการที่ 3

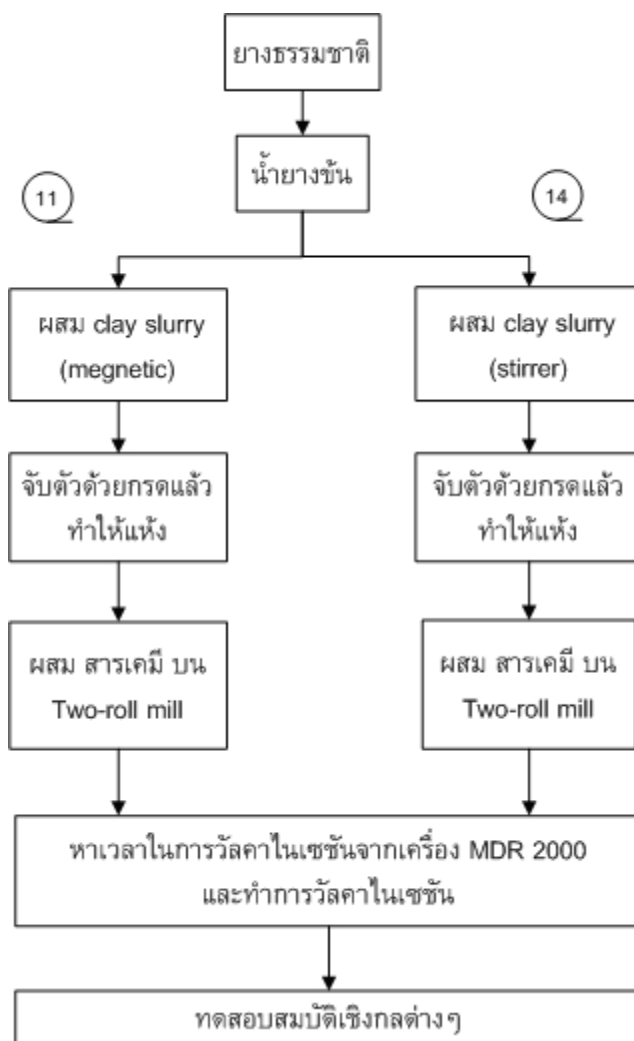
- กระบวนการที่ 6 และ 7 ดำเนินการเหมือนกับกระบวนการที่ 5 แต่ต่างกันที่เวลาในการผสมยางกับเคลย์สเลอรี ด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัดเพิ่มเป็น 20 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ

- กระบวนการที่ 8, 9 และ 10 ดำเนินการเหมือนกับกระบวนการที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ แต่ต่างกันที่ความเร็วในการผสมยางกับเคลย์สเลอรี ด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัดเพิ่มเป็น 1055 รอบต่อนาที

- กระบวนการที่ 11, 12 และ 13 ดำเนินการเหมือนกับกระบวนการที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ แต่ต่างกันที่ความเร็วในการผสมยางกับเคลย์สเลอรี ด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัดเพิ่มเป็น 1360 รอบต่อนาที

หลังจากเตรียมชิ้นงานจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 13 แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยเน้นที่ค่าการทนทานต่อแรงดึงเป็นหลักนั้นพบว่า ยางผสมเคลย์ที่เตรียมจากกระบวนการที่ 11 จะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด (รายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 3) ดังนั้นจึงนำกระบวนการที่ 11 นี้ไปพัฒนาต่อเป็นกระบวนการที่ 14 ดังรูปที่ 2.20

- กระบวนการที่ 14 ดำเนินการเหมือนกับกระบวนการที่ 11 แต่ต่างกันที่วิธีการเตรียมเคลย์สเลอร์ โดยกระบวนการที่ 14 ใช้เครื่องกวนแบบใช้ใบพัดกวนแทนการใช้เครื่องกวนแท่งแม่เหล็กโดยกวนด้วยความเร็ว 1900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (รูปที่ 2.21)



รูปที่ 2.20 กระบวนการผสมเคลย์สเลอร์ในยางธรรมชาติกระบวนการที่ 11 กับ กระบวนการที่ 14



รูปที่ 2.21 การกวนเคลย์ด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัด

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยเน้นค่าการทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ที่เตรียมมาจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 14 นั้นพบว่า วัสดุผสมที่เตรียมจากกระบวนการที่ 11 จะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (รายละเอียดจะกล่าวในบทที่ 3) ดังนั้นจึงนำกระบวนการทดลองนี้เพื่อไปเตรียมวัสดุผสมเป็นชิ้นงานที่ปริมาณเคลย์ต่างๆ ต่อไป

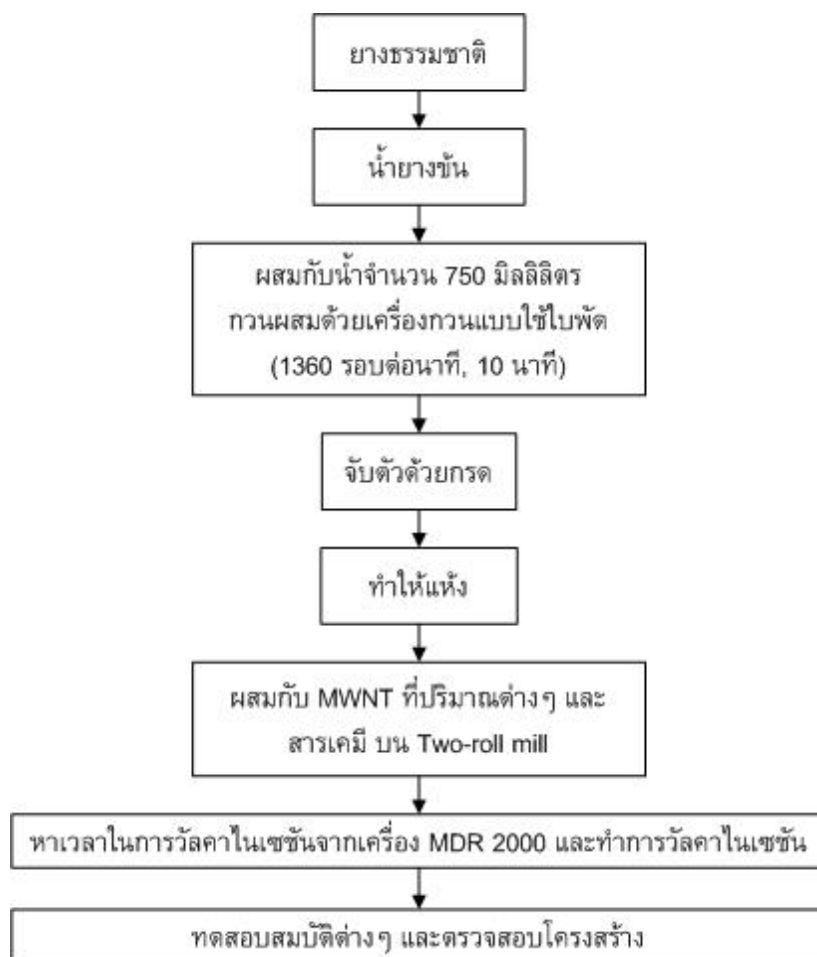
2.2.2.2 การศึกษาผลของปริมาณของสารตัวเติมแต่ละชนิด

หลังจากได้กระบวนการผสมของแต่ละสารตัวเติมแล้ว ก็นำกระบวนการดังกล่าวมาเตรียมชิ้นงาน โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติม ส่วนลำดับสารเคมี ปริมาณสารเคมี เวลาในการผสมสารเคมี และอุณหภูมิในการวัลคาไนเซชันยังคงเดิม

1) ผลของปริมาณของท่อนานโนคาร์บอนที่ผสมลงไปในยางธรรมชาติ

จากการทดลองหากระบวนการผสมท่อนานโนคาร์บอนเข้าไปในเนื้อยางที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่ากระบวนการที่เตรียมจากน้ำยางข้นแล้วมาทำให้เป็นยางแห้ง หลังจากนั้นนำยางแห้งดังกล่าวไปผสมกับท่อนานโนคาร์บอน และสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (กระบวนการที่ 4) หลังจากเตรียมเป็นชิ้นงานและทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึงเป็นกระบวนการที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่สูงสุด ดังนั้นจึงใช้กระบวนการนี้ในการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมท่อนานโนคาร์บอนที่ปริมาณท่อนานโนคาร์บอน เท่ากับ 0, 1, 5, 10, 15 และ 20 phr แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไป

ทดสอบสมบัติ และตรวจสอบโครงสร้างต่อไป ซึ่งขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสามารถพิจารณาได้จาก รูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณต่างๆ

2) ผลของปริมาณของเคลย์ที่ผสมลงไปยางธรรมชาติ

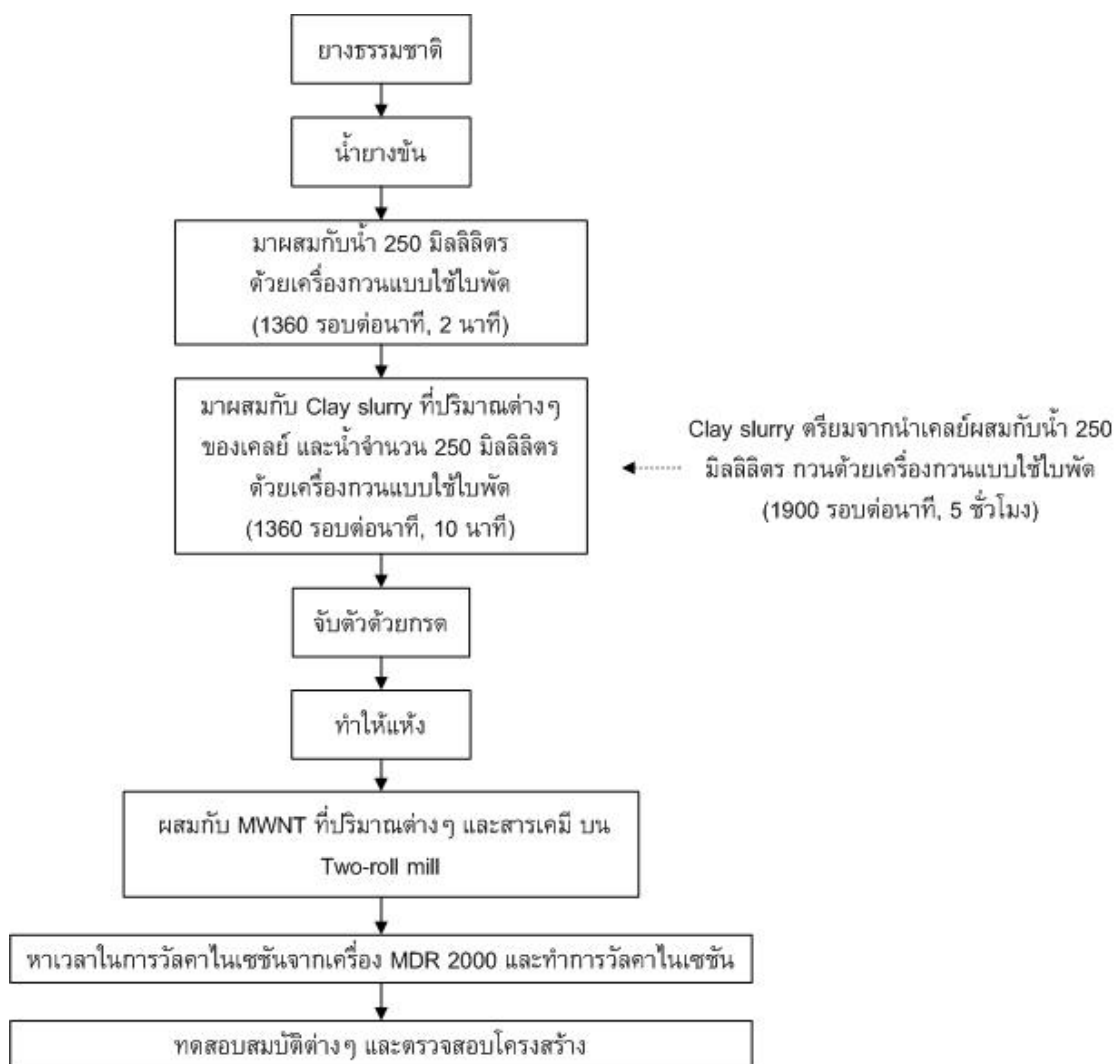
จากการทดลองหากระบวนการผสมเคลย์เข้าไปในเนื้อยางที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่ากระบวนการที่เตรียมจากน้ำยางข้นที่ผสมกับเคลย์สเลอรีแล้วมาทำให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปผสมกับสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (กระบวนการที่ 14) หลังจากเตรียมเป็นชิ้นงาน และทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึงเป็นกระบวนการที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่สูงสุด ดังนั้น จึงใช้กระบวนการนี้ในการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ที่ปริมาณเคลย์ เท่ากับ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 phr แล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติที่ต้องการต่อไป ซึ่งขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ

2.3.2.3 ปริมาณของท่อนานคาร์บอนและเคลย์ที่ผสมลงไปยางธรรมชาติ

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการผสมระหว่างสารตัวเติม 2 ชนิด ลงไปยางธรรมชาติ โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรกเตรียมยางผสมกับเคลย์ที่ปริมาณต่างๆ ก่อน ซึ่งกระบวนการเตรียมดำเนินการแบบเดียวกับการเตรียมในหัวข้อ 2.3.2.2 ส่วนขั้นตอนหลังเป็นขั้นตอนเตรียมยางที่ผสมกับเคลย์ในขั้นตอนแรกมาผสมกับท่อนานคาร์บอนที่ปริมาณต่างๆ และสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง โดยสรุปขั้นตอนได้ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ

2.2.3 การศึกษาสมบัติของยางคอมปาวด์และชิ้นงาน

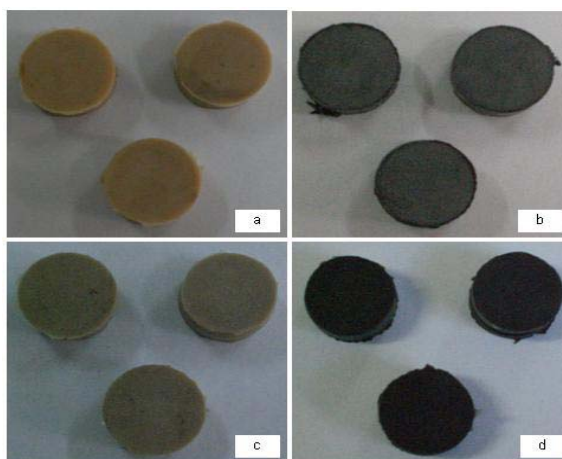
เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆ ของยางคอมปาวด์ และของชิ้นงานยางที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ชิ้นงานยางที่ผสมเคลย์ และชิ้นงานยางที่ผสมทั้งท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์

2.2.3.1 การศึกษาคุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure characteristics)

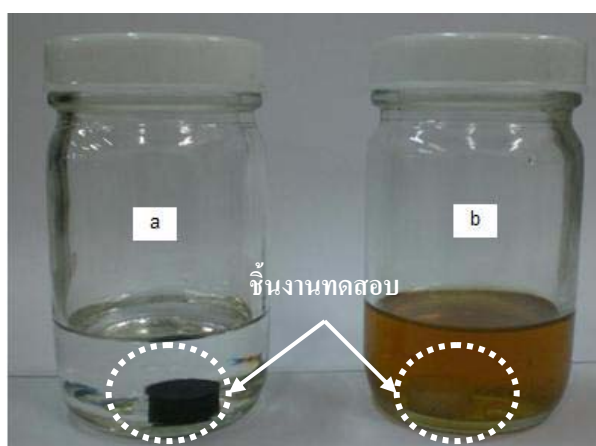
เป็นการนำยางคอมปาวด์มาทดสอบค่า Scorch time และ Cure time เพื่อคุณลักษณะการทำให้ยางคงรูปของยางผสมและเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในขั้นตอนการวัดค่าในเซชัน โดยใช้เครื่อง MDR 2000 ในการทดสอบ ซึ่งในการทดลองใช้ตัวอย่างประมาณ 4 กรัม และอุณหภูมิในการทดสอบ 150 องศาเซลเซียส

2.2.3.2 การศึกษาร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

เป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากนำไปแช่ในสารละลาย ซึ่งการบวมตัวจะเกิดกับเนื้อเยื่ออย่างเดี๋ยว (Rakchonlatee et al., 2004) โดยนำชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร (รูปที่ 2.25) จำนวน 6 ชิ้นต่อ 1 สูตรการทดลองมาชั่งน้ำหนักและแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ส่วนละ 3 ชิ้น) โดยส่วนแรกนำไปแช่ในน้ำมันเกรด SAW 15W-40 ปริมาตรที่ใช้ 30 มิลลิตร เป็นเวลา 7 วัน และส่วนที่สองนำไปแช่ในโทลูอิน ปริมาตรที่ใช้ 30 มิลลิตร เป็นเวลา 3 วัน (รูปที่ 2.26) จากนั้นเมื่อครบกำหนดก็นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการ 2.1



รูปที่ 2.25 ชิ้นงานหนา 6 มิลลิเมตร (a) ยาง (b) ยางผสมท่อนาโนคาร์บอน (c) ยางผสมเคลย์ และ (d) ยางผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์



รูปที่ 2.26 การทดสอบร้อยละการบวมตัว (a) ในโทลูอิน และ (b) ในน้ำมัน

$$\% \text{ Swelling} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (2.1)$$

โดย

m_0 = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

m_1 = น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

การนำชิ้นงานไปแช่ในโทลูอีนนอกจากจะสามารถคำนวณร้อยละการบวมตัวได้แล้ว ยังสามารถคำนวณความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) ได้ด้วยตามสมการของ Flory-Rhener (Arroyo et al., 2006; Kumnuantip et al., 2003) ซึ่งสมการการคำนวณแสดงในสมการที่ 2.2 และ 2.3

$$-\left[\ln(1 - \phi_r) + \phi_r + \chi\phi_r^2\right] = v_0 n \left[\phi_r^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right] \quad (2.2)$$

โดย

ϕ_r = สัดส่วนโดยปริมาตรของยางในมวลที่บวมตัว

v_0 = มวลโดยปริมาตรของตัวทำละลาย (106.2 cm³/mol)

χ = ค่าคงที่ Flory-Huggins ของยางในตัวทำละลาย (0.393)

n = ความหนาแน่นการเชื่อมโยง (mol/cm³)

$$\frac{1}{\phi_r} = 1 + \frac{w_s * \rho_r}{w_i * \rho_s} \quad (2.3)$$

โดย

w_r = น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

w_i = น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

ρ_s = ความหนาแน่นของโทลูอีน (0.87 g/cm³)

ρ_r = ความหนาแน่นของยาง (g/cm³)

2.2.3.3 การศึกษาการทนทานต่อแรงดึง

สมบัติเชิงกลของยางที่สำคัญ ได้แก่ การทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และมอดูลัส ซึ่งสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้สามารถวัดได้โดยการดึงชิ้นตัวอย่างมาตรฐานรูปดัมเบลที่อัตรา

การดึงคงที่ด้วยเครื่องทดสอบที่เรียกว่า “Universal testing machine” ค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะเป็นค่าแรงดึงที่แปรผันตามระยะการดึง ผู้ทดสอบสามารถนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าความเค้น (Stress, σ) และความเครียด (Strain, ϵ) ได้จากสมการ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ เนื่องจากในระหว่างการทดสอบ พื้นที่หน้าตัดของยางจะมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของยางจะลดลงตามระยะทางที่ยางยืดตัว ด้วยเหตุนี้ ในการทดสอบส่วนใหญ่จึงนิยามกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของยางมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบคือมีค่าเท่ากับค่าพื้นที่หน้าตัดตั้งต้น (ซึ่งมีค่าเท่ากับควมกว้างตั้งต้นคูณกับความหนาตั้งต้นของชิ้นทดสอบ)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.5)$$

โดย

σ = ค่าความเค้น (MPa)

ϵ = ค่าความเครียด

F = ค่าแรงดึง (N)

A = ค่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (m^2)

ΔL = ระยะที่ยางเกิดการยืดตัว (m)

L_0 = ความยาวตั้งต้นของชิ้นทดสอบ (m)

1) การทนทานต่อแรงดึง

คือค่าแรงดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือค่าความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดที่อัตราการดึงคงที่ ซึ่งมีหน่วยเป็น MPa หรือ N/mm^2 ยางแต่ละชนิดจะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงแตกต่างกัน ยางที่สามารถดกผลึกได้ในขณะที่ถูกดึงหรือได้รับความเครียด เช่น ยางธรรมชาติและยางนีโอพรีน จะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่สามารถดกผลึกได้ อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ รวมถึงระบบการคงรูปก็ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติแรงดึงของยาง โดยทั่วไป ค่าการทนทานต่อแรงดึงของยางจะอยู่ในช่วง 7 N/mm^2 ถึงมากกว่า 45 N/mm^2 ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี

2) การยืดตัว

คือการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากแรงดึง ซึ่งจะแสดงในรูปร้อยละการยืดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น เช่น การยืดตัวที่ 300 % หมายถึงชิ้นตัวอย่างถูกยืดออกไปจนมีความยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเริ่มต้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด คือระดับการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ก็คือค่าการทนทานต่อแรงดึงนั่นเอง โดยทั่วไป การยืดตัว ณ จุดขาดของยางมีค่าอยู่ในช่วง 100% ถึงมากกว่า 1000% ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี ส่วนค่าความเครียดก็สัมพันธ์กันโดยตรงกับค่าการยืดตัวของยางเพราะค่าความเครียดคืออัตราส่วนของระยะที่ยางยืดตัวต่อความยาวตั้งต้นของยาง ด้วยเหตุนี้ เมื่อยางยืดตัวมากขึ้น ค่าความเครียดของยางก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

3) โมดูลัส

สำหรับยางแล้ว ค่าโมดูลัสจะหมายถึงความเค้น (ในหน่วย MPa หรือ N/mm^2) ที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ (โดยทั่วไปจะกำหนดการยืดตัวไว้ที่ 100% และ 300%) เช่น หากยางมีค่า 100% โมดูลัสเท่ากับ $5 N/mm^2$ หมายถึงการที่จะดึงยางให้ได้ 100% ของการยืดตัวจะต้องใช้ความเค้นเท่ากับ $5 N/mm^2$ เนื่องจากค่าโมดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่าโมดูลัสของยางในการบ่งชี้สมบัติความแข็งแรง และระดับของการเชื่อมโยงของยาง โดยทั่วไป ค่า 100% โมดูลัสของยางอยู่ในช่วง $1 N/mm^2$ ถึงมากกว่า $13 N/mm^2$ ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมี (พงษ์ธร, 2550)

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะใช้บริการการทดสอบจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 37 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Instron universal testing (รุ่น 5655) โดยชิ้นงานเป็นรูปดัมเบล หน้า 1 มิลลิเมตร และทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้นต่อสูตรการทดลอง

2.2.3.4 การศึกษาค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด

การทดสอบค่าการต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสามารถทำได้โดยการวัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน โดยทั่วไปจะคล้ายคลึงกับการทดสอบการทนทานต่อแรงดึง ซึ่งค่าการต้านทานต่อการฉีกขาดจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดต่อความหนาของชิ้นงานทดสอบ (มีหน่วยเป็น N/mm) (พงษ์ธร, 2550) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะใช้บริการการทดสอบจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดยการทดสอบ

อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 34 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Instron universal testing (รุ่น 5655) โดยชิ้นงานเป็นรูปคันธนูหนา 1 มิลลิเมตร และทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้นต่อสูตรการทดลอง

2.3.3.5 การศึกษาค่าความแข็ง (Hardness)

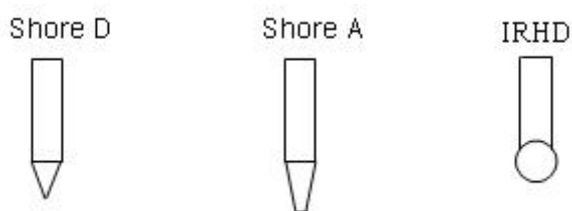
ความแข็งของยางหมายถึงความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวงของตัวกดที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด เครื่องวัดความแข็งของยางมีหลายชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกดและแรงที่ใช้กดลงบนพื้นผิว สเกลที่ใช้วัดจะเริ่มตั้งแต่ศูนย์ (สำหรับยางที่อ่อนมาก ๆ) จนถึง 100 (สำหรับยางที่แข็งมาก) แรงที่ใช้กดอาจมาจากน้ำหนักที่คงที่หรืออาจใช้สปริงแทนก็ได้ หน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วยคือ IRHD (International rubber hardness degrees) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นจะใช้ลูกกลมแข็งแทนตัวกด และแรงกดจะมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์นั้นเรียกว่าเครื่องคูโรมิเตอร์ ซึ่งมี 2 แบบ คือแบบชอร์เอ (Shore A) และแบบชอร์ดี (Shore D)

1) เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์เอ

ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่อ่อนมาก ๆ จนถึงยางที่มีความแข็งค่อนข้างมาก (90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์เอจะเป็นแท่งรูปโคนที่ทื่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.27

2) เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดี

ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่แข็งมาก ๆ (มากกว่า 90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดีจะเป็นแท่งรูปโคนที่แหลม ดังแสดงในรูป 2.27



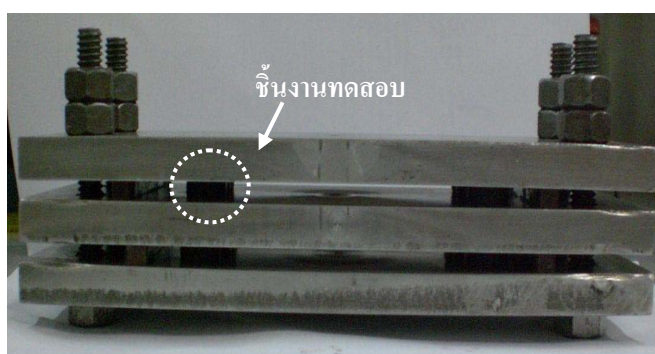
รูปที่ 2.27 หัวกดแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง (ดัดแปลงจาก พงษ์ธร, 2550)

แม้ว่าหน่วยวัดความแข็งแบบชอร์เอจะคล้ายกับหน่วยแบบ IRHD แต่ก็ไม่ควรนำหน่วยชอร์เอไปเปลี่ยนให้เป็นหน่วย IRHD เพราะอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ผลลัพท์บางส่วน

ใหญ่จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 40 ถึง 90 IRHD สำหรับยางที่มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า 40 IRHD สามารถผลิตได้โดยการเติมสารทำให้ยางนิ่มลงไปในปริมาณที่มาก ๆ (พงษ์ธร, 2550) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะใช้บริการการทดสอบจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบชอร์เอ โดยทำการวัดความแข็งชิ้นงาน 5 จุดต่อสูตรการทดลอง

2.2.3.6 การศึกษาค่าการเสียรูปหลังการกด (Compression set)

ค่านี้แสดงถึงความสามารถของยางในการคืนรูปร่างหลังจากที่มีแรงกระทำให้มันเปลี่ยนรูปไปในระยะเวลาหนึ่ง โดยทำการทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทดสอบ 22 ชั่วโมง ซึ่งทดสอบชิ้นงาน 3 ชิ้นต่ออุณหภูมิต่อสูตรการทดลอง (พงษ์ธร, 2550) โดยใช้เครื่องมือตามรูปที่ 2.28 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D471 (Method B) ทำการทดลองเก็บข้อมูลและทำการคำนวณค่าการเสียรูปหลังการกดตามสมการที่ 2.6



รูปที่ 2.28 เครื่องมือทดสอบการเสียรูปหลังการกด

$$\% \text{ Compression set} = \frac{t_b - t_a}{t_b - t_n} \times 100 \quad (2.6)$$

โดย

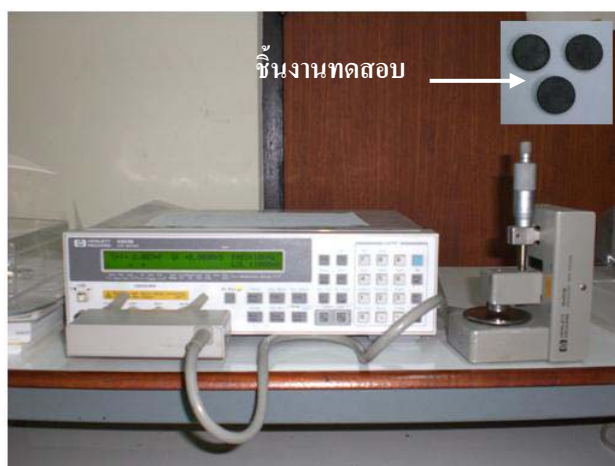
t_b = ความหนาชิ้นทดสอบก่อนการทดลอง (mm)

t_a = ความหนาชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ (mm)

t_n = ความหนาของแท่งเหล็กมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ (mm)

2.2.3.7 การศึกษาค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

โดยปรกติแล้วขงมีค่าความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าสูงมาก ขงจึงจัดเป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะขงที่ไม่มีขั้วซึ่งจะมีความเป็นฉนวนสูงกว่าขงที่มีขั้ว แม้ว่าสมบัติทางไฟฟ้าของขงจะขึ้นอยู่กับชนิดของขง แต่องค์ประกอบต่าง ๆ ที่เติมลงไปในขงก็ส่งผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติทางไฟฟ้าของขงได้เช่นกัน โดยเฉพาะสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ดี (พงษ์ธร, 2550) สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุผสม โดยการนำชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร มาตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นต่อสูตรการทดลอง นำมาดำเนินการวัดด้วยเครื่อง LCR Meter (รูปที่ 2.29) โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 100 KHz หลังจากนั้นก็นำมาคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามสมการที่ 2.7



รูปที่ 2.29 เครื่องมือทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า

$$\sigma = \frac{Gl}{A} \quad (2.7)$$

โดย

σ = สภาพการนำไฟฟ้า (s/cm)

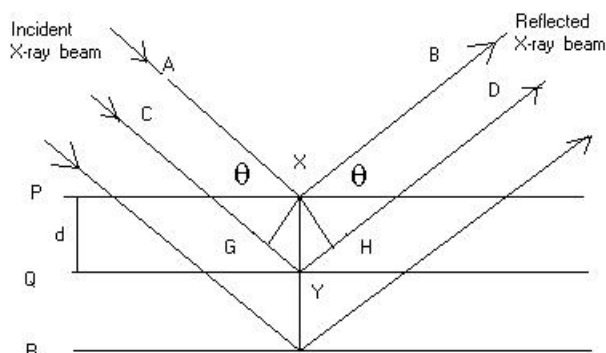
G = ค่า Conductance (μ s)

l = ความหนาของชิ้นงาน (mm)

A = พื้นที่ของชิ้นงาน (cm)

2.2.3.8 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffraction, XRD)

เครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ คือ เทคนิคการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบผิวหน้าของผลึกทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอ็กซ์เกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า ขั้นตอนการกระเจิงแสงของรังสีเอ็กซ์แสดงในรูปที่ 2.30 โดยการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ทำให้สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้ โดยใช้สมการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในสมการที่ 2.8 สมการนี้เรียกว่า “สมการของแบรค (Bragg equation)” (ณัฐวุฒิ, 2549)



รูปที่ 2.30 ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัตถุตามกฎของแบรค

(http://www.geocities.com/soilsciences/soiltest_method/X-ray.pdf)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.8)$$

โดย

n = ตัวเลขจำนวนเต็ม

λ = ความยาวคลื่น (nm)

d = ระยะห่างระหว่างชั้น (Å)

θ = มุมของการเลี้ยวเบน

ในงานวิจัยครั้งนี้ดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ PHILIPS X'Pert MPD โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- ตัดแผ่นยางขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตร และความยาว 2.5 เซนติเมตร วางทับลงบนแผ่นกระจกขนาดเดียวกัน ติดแผ่นยางให้แน่นบนแผ่นกระจกด้วยเทปกาวสองหน้า โดยไม่ให้มีฟองอากาศระหว่างแผ่นแผ่นยางกับกระจก

- นำแผ่นกระจกที่มีชิ้นงานมาวางลงในช่องใส่ตัวอย่าง นำช่องใส่ตัวอย่างเข้าสู่แท่นวางตัวอย่างภายในเครื่อง XRD

- ทำการทดสอบโดยใช้อัตรามุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ต่อเวลาเท่ากับ 0.01 องศาต่อ 10 วินาที เลือกมุมมองสาในการทดสอบตั้งแต่ 1 องศา ถึง 10 องศา ใช้กำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการทดสอบเท่ากับ 40 กิโลโวลต์ และ 30 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ

- สเปกตรัม XRD ของสารที่ตรวจสอบได้ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมมองที่รังสีเอ็กซ์เกิดการกระเจิงและผลึกของสารที่กำลังทดสอบ

- นำค่ามุมมองที่ได้จากการทดสอบจากเครื่อง XRD มาคำนวณค่าระยะห่างระหว่างชั้นของของสารที่สนใจดังสมการ 2.8

2.2.3.9 การศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติม

เป็นการศึกษาการกระจายตัวของสารต่างๆ ในรูปองค์ประกอบของธาตุ เพื่อตรวจสอบว่าการกระจายตัวเป็นไปในลักษณะใด โดยนำชิ้นงานแช่ในไนโตรเจนเหลวรอจนขึ้นทดสอบเพราะพอที่จะสามารถทำการหักได้ หลังจากนั้นทำการเคลือบทองบนชิ้นทดสอบเป็นเวลา 120 วินาที ทำการถ่ายภาพการกระจายตัวของสารตัวเติมในงานชิ้นตัวอย่างด้วยวิธีการ X-ray mapping โดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 LV

2.2.3.10 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

จากโครงสร้างของดินเหนียวมอนต์โมริลโลไนต์ ชั้นของดินเหนียวเรียงซ้อนทับกันไปมาจำนวนหลายๆแผ่นและขนาดอนุภาคของดินเหนียวมีขนาดเล็กมากประมาณ 1-30 นาโนเมตร (ณัฐวุฒิ, 2549) และขนาดของท่อนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้การศึกษาอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบปกติไม่สามารถตรวจสอบได้ จึงจำเป็นต้องศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน ซึ่งสามารถศึกษาอนุภาคเล็กได้ในระดับนาโนเมตร โดยใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการส่องผ่านตัวอย่าง และ TEM สามารถศึกษาตัวอย่างที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ 0.2 นาโนเมตร ถึง 0.2 มิลลิเมตร การศึกษาโครงสร้างของวัสดุผสมของยางที่ผสมด้วยท่อคาร์บอนและเคลือบด้วยเครื่อง TEM เป็นการศึกษาคุณภาพวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบโครงสร้างที่แท้จริงของท่อคาร์บอนและดินเหนียวในเนื้อยาง โดยใช้เครื่องทดสอบยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-

2010 ซึ่งวิธีการทำได้ดังนี้ นำชิ้นงานตัวอย่างที่จะตรวจสอบ โครงสร้างด้วยเครื่อง TEM ไปทำการตัดตามความหนาของชิ้นตัวอย่าง (Cross section) ด้วยเครื่องอัลตราคัทไมโครโทม (Ultra cut microtome) และนำตัวอย่างมาตรวจสอบโครงสร้าง โดยใช้กำลังไฟฟ้าในการทดสอบ 200 กิโลโวลต์ และกำลังขยายตั้งแต่ 12000 ถึง 80000 เท่า

2.2.3.11 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

(Fourier transforms infrared spectroscopy, FTIR)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ หลักการตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้คือ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสั่นและการหมุนของโมเลกุลอินฟราเรด เป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีเลขคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 12800 ถึง 10 cm^{-1} หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง $1000\text{ }\mu\text{m}$ การสั่นและการหมุนของโมเลกุลเกิดขึ้นเมื่อรังสีอินฟราเรดเข้าไปกระตุ้นทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน เกิดการดูดกลืนแสงทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า แต่ละหมู่ฟังก์ชันจะมีการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแตกต่างกันทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันของสารได้ (แม้น และคณะ 2539; ณัฐวุฒิ, 2549) สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ทดสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ยี่ห้อ Bruker รุ่น EQUINOX 55 ทดสอบโดยใช้ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000 - 400\text{ cm}^{-1}$ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างวางบนแท่นวางตัวอย่าง แนบตัวอย่างให้แน่นด้วยแถบแม่เหล็ก นำแท่นวางตัวอย่างเข้าสู่เครื่อง FTIR ทดสอบและรายงานผลในรูปแบบของสเปกตรัมของสาร

2.2.3.12 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก

(Thermogravimetric analyzer, TGA)

TGA เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนเกี่ยวกับน้ำหนักที่หายไปของวัสดุเมื่อให้ความร้อนภายใต้การไหลเวียนของแก๊สเฉื่อย เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและศึกษาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของวัสดุเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ณัฐวุฒิ, 2549) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง TGA ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA 7 ดำเนินการได้โดยนำชิ้นงานมาทดสอบ โดยเลือกช่วงอุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิขณะทดสอบ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้การไหลเวียนของก๊าซไนโตรเจน (N_2) รายงานผลการทดสอบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและอุณหภูมิการเสื่อมสลายของ

สสาร (Thermal degradation temperature, T_d) โดยรายงานผลการทดสอบในรูปของ T_5 , T_{10} และ T_{50} คือ อุณหภูมิเมื่อน้ำหนักหายไป 5%, 10% และ 50% ตามลำดับ

2.2.3.13 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

(Dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

DMTA เป็นเครื่องมือที่ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความถี่ของวัสดุภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ กัน (Periodic stress) การตอบสนองของวัสดุสามารถแยกได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ยืดหยุ่น และส่วนที่เป็นของเหลวหนืด (Viscous liquid) ส่วนที่ยืดหยุ่นเกี่ยวข้องกับพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในระบบ ในขณะที่ส่วนที่เป็นของเหลวหนืด เกี่ยวข้องกับพลังงานที่กระจายออกมาในรูปความร้อน (Energy dissipated หรือ Damping) รายงานผลการทดสอบในรูปของพลังงานที่เกิดสะสมภายในชิ้นตัวอย่าง (Storage modulus, E') การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทดสอบ (Loss modulus, E'') และอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานที่เกิดการสูญเสียต่อพลังงานที่เก็บสะสมในชิ้นงานทดสอบ ($\tan \delta$) (ณัฐวุฒิ, 2549) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง DMTA ยี่ห้อ Rheometric Scientific รุ่น DMTA V โดยวิธีการทำได้ดังนี้ ตัดชิ้นตัวอย่างให้มีความกว้าง 10 มิลลิเมตร และความยาว 25 มิลลิเมตร โดยความหนา 1 มิลลิเมตร ทดสอบแบบดึง โดยใช้ความถี่ 1.0 เฮิร์ตซ์ (Hz) เปอร์เซ็นต์การยืด (Strain control) 0.1% ช่วงอุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ -100 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที รายงานผลการทดสอบในรูปของพลังงานที่เกิดสะสมภายในชิ้นตัวอย่าง การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทดสอบและอัตราส่วนระหว่างค่า $\tan \delta$

โดยหากค่า E' มีค่าสูงขึ้น แสดงว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมในชิ้นงานตัวอย่าง ยังไม่ดี ยังมีบางส่วนที่เกิดการรวมตัวเป็นก้อนอยู่กับโมเลกุลของยางที่แทรกกระหว่างสารตัวเติมจึงถูกรั้งไว้ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้ค่า E' สูงขึ้น

ส่วนค่า $\tan \delta$ หากมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนที่ไม่แข็งแรงของสารตัวเติมในบางบริเวณ และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่มีการเกาะกันไม่ดี (Nielsen and Landel, 1994) จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานไม่แข็งแรงเท่าที่ควร และอุณหภูมิที่ $\tan \delta$ มีค่าสูงสุด แสดงถึง อุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass transition temperature, T_g)

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหากระบวนการที่เหมาะสมในการผสมสารตัวเติมเข้าไปในยางธรรมชาติ นั้น พบว่ากระบวนการที่เตรียมจากน้ำยางข้นจะเป็นกระบวนการที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่สูงกว่ากระบวนการที่เตรียมจากยางแท่ง STR 5L ในส่วนของสารตัวเติมที่ใช้ นั้น สำหรับท่อนาโนคาร์บอนใช้ในลักษณะที่แห้ง ส่วนเคลย์ใช้ในลักษณะที่เป็นสเลอรี และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ส่งผลให้สมบัติต่างๆ ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม

3.1 ผลของกระบวนการผสมสารตัวเติม

3.1.1 ผลการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในยางธรรมชาติ

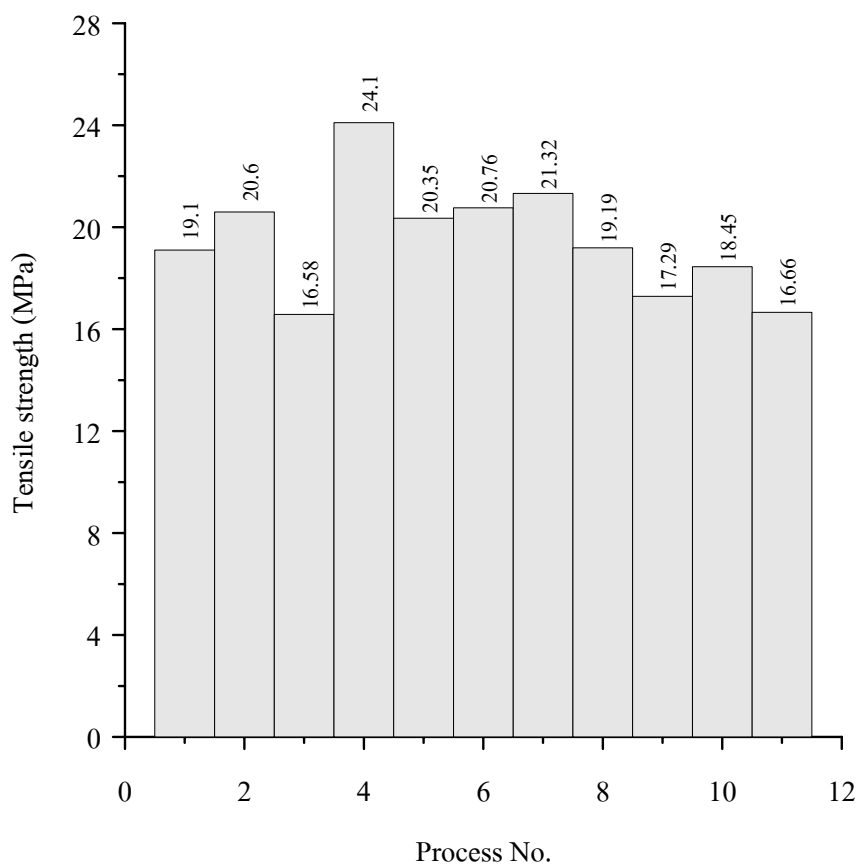
จากการทดลองหากระบวนการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในยางธรรมชาติในกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 11 นั้นเมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลผลเป็นดังตารางที่ 3.1 และเมื่อพิจารณาในส่วนของค่าการทนทานต่อแรงดึงนั้นเป็นดังรูปที่ 3.1 โดยพบว่ากระบวนการที่ 4 ที่นำน้ำยางข้นมาจับตัวด้วยกรดแล้วนำมาทำให้แห้ง จากนั้นก็ผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งนั้นจะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุด คือ มีค่าทนทานต่อแรงดึง 24.10 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเตรียมยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนกระบวนการอื่นๆ

จากผลการทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 3.1 จะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการเตรียมชิ้นงานระหว่างการใช้ยางแท่งเกรด STR 5L (กระบวนการที่ 2) กับน้ำยางข้นที่ทำให้แห้ง (กระบวนการที่ 4) นั้นพบว่าการใช้น้ำยางข้นที่ผ่านการทำให้แห้งเมื่อเตรียมชิ้นงานจะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้ยางแท่ง STR 5L เพราะว่าเมื่อใช้น้ำยางข้นที่ผ่านการจับตัวด้วยกรดแล้วทำให้แห้ง จากนั้นมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง การผสมนั้นทำได้ง่ายกว่า ดังนั้นการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนก็จะกระจายตัวได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงมีค่าสูงกว่านั่นเอง ส่วนการเตรียมชิ้นงานจากน้ำยางข้นแล้วนำมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนที่แขวนลอยในน้ำและผ่านการทำให้กระจายตัว

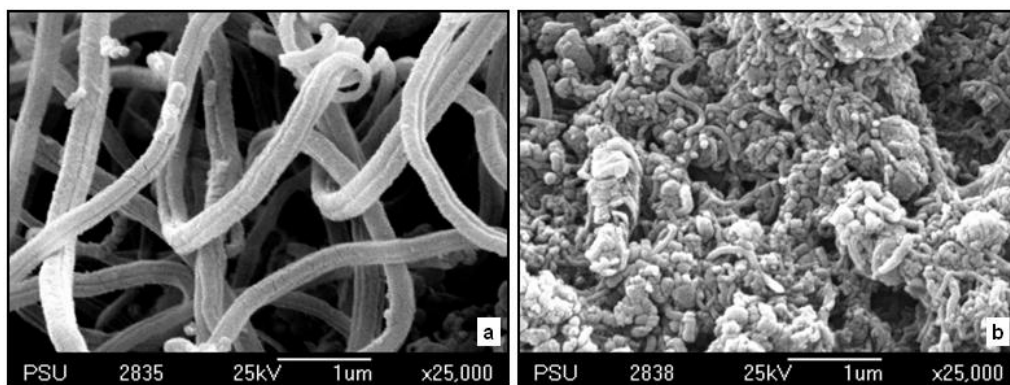
ด้วยกระบวนการต่างๆ ของกระบวนการที่ 5-7 นั้น เมื่อนำชิ้นงานมาทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึงจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากกระบวนการที่ 4 เพราะว่าการผสมในรูปนํ้ายางชั้นการเข้ากัน และการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนจะน้อยกว่า เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบาและขนาดเล็กรวม และเมื่อเตรียมชิ้นงานจากนํ้ายางชั้นเช่นเดียวกันแต่มีการใช้ PVP เป็นสารช่วยกระจายตัว (กระบวนการที่ 8-9) เพื่อมาช่วยให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวมากขึ้นแต่ผลการทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึงของชิ้นงานมีค่าน้อยกว่า (กระบวนการที่ 8-9) เพราะว่าการช่วยกระจายตัวที่ใช้ไม่เหมาะกับนํ้ายางชั้นเนื่องจากค่า pH ที่ PVP สามารถทำงานได้ดีก็คือ pH ประมาณ 7 แต่ในการทดลองนี้ pH ของนํ้ายางชั้นเท่ากับ 9 และสุดท้ายเมื่อมีการปรับปรุงผิวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยการปรับปรุงผิวด้วยกรดก่อนมาผสมกับนํ้ายางชั้นที่ผ่านการทำให้แห้ง (กระบวนการที่ 11) นั้นเมื่อนำชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยวิธีการนี้ไปทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึงนั้นจะมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากกระบวนการที่ 4 เพราะว่าการปรับปรุงผิวของท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการปรับปรุงผิวจะเกิดการรวมกันและจับตัวเป็นก้อนมากขึ้น (รูปที่ 3.2) ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกับยางจึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองครั้งนี้กระบวนการเตรียมยางผสมท่อนาโนคาร์บอนที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่ดีที่สุดคือกระบวนการที่ 4

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน

กระบวนการ	Tensile strength (MPa)		Elongation (%)		Modulus 300% (MPa)		Tear resistance (N/mm)	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
1	19.10	1.38	584.13	23.52	2.66	0.14	26.07	2.88
2	20.60	0.40	523.23	18.16	4.88	0.16	38.46	2.85
3	16.58	0.47	523.37	20.77	2.73	0.09	24.85	1.72
4	24.10	1.62	552.13	12.56	4.48	0.61	35.66	3.45
5	20.35	0.82	539.43	14.34	4.25	0.26	34.16	1.55
6	20.76	0.65	531.48	4.79	4.37	0.07	33.26	2.29
7	21.32	0.72	522.45	10.62	4.42	0.21	38.32	1.65
8	19.19	0.45	545.12	5.38	3.79	0.09	37.64	1.45
9	17.29	0.99	461.03	11.38	5.12	0.13	35.86	1.26
10	18.45	0.55	535.03	12.37	4.05	0.09	36.57	0.98
11	16.66	0.99	606.22	25.32	2.30	0.08	23.79	1.74



รูปที่ 3.1 ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน
ที่เตรียมจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 11



รูปที่ 3.2 ภาพ SEM ของท่อนาโนคาร์บอน (a) ไม่มีการปรับปรุงผิว และ (b) มีการปรับปรุงผิว

3.1.2 ผลการผสมเคลย์ลงไปยางธรรมชาติ

จากการทดลองหากระบวนการผสมเคลย์ลงไปยางธรรมชาติในกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 14 นั้น เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติเชิงกลผลเป็นดังตารางที่ 3.2 และเมื่อพิจารณาในส่วนของการทนทานต่อแรงดึงนั้นเป็นดังรูปที่ 3.3 โดยพบว่ากระบวนการที่ 14 ที่

เตรียมจากน้ำยางข้นแล้วนำมาผสมกับเคลย์สเลอรี (เตรียมมาจากการใช้เครื่องกวนแบบใช้ใบพัดด้วยความเร็ว 1900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง) โดยทำการผสมด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัดด้วยความเร็ว 1360 รอบต่อนาที และใช้เวลาผสม 10 นาที หลังจากนั้นก็นำมาจับตัวด้วยกรดแล้วทำให้แห้งโดยการอบ จากนั้นก็ผสมกับสารเคมีบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง นั้นจะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเตรียมยางธรรมชาติผสมเคลย์สเลอรีกระบวนการอื่นๆ

จากการทดลองทั้งหมด (กระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 14) นั้นปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุผสมมากที่สุดก็คือลักษณะของเคลย์ที่ใช้ โดยหากใช้เป็นเคลย์ที่แห้งแล้วนำมาผสมกับยางไม่ว่าจะเป็นยางแท่ง STR 5L หรือว่าจะเป็นน้ำยางข้นที่ผ่านการทำให้แห้งบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (กระบวนการที่ 2 และ กระบวนการที่ 4) นั้นพบว่าผลการกระจายตัวและการเกิดชั้นซีลีเกตของเคลย์ไม่ดี ดังนั้นส่งผลค่าการทนทานต่อแรงดึงของชิ้นงานที่เตรียมจากกระบวนการดังกล่าวจะน้อยกว่าชิ้นงานที่เตรียมโดยใช้เคลย์ในรูปแบบของสเลอรี (Slurry) (กระบวนการที่ 5 ถึง กระบวนการที่ 14 ยกเว้นกระบวนการที่ 6 (เกิดข้อผิดพลาดในการทดลองขึ้น) แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการเตรียม เคลย์สเลอรีใน 2 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบที่ 1 การใช้เคลย์สเลอรีที่เตรียมมาจากรีเอเจนต์แม่เหล็กของกระบวนการที่ 11 กับแบบที่ 2 เตรียมมาจากการกวนด้วยเครื่องกวนแบบใช้ใบพัดของกระบวนการที่ 14 จะพบว่าการเตรียมเคลย์สเลอรีในรูปแบบที่ 2 เมื่อนำไปผสมกับน้ำยางข้นแล้วเตรียมเป็นชิ้นงานจะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่สูงสุดสำหรับการทดลองครั้งนี้ เพราะการใช้เครื่องกวนแบบใช้ใบพัดสำหรับเคลย์สเลอรีนั้นจะทำให้มีการแตกตัวของเคลย์ออกมามากกว่าการกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก และมีความเป็นไปได้มากกว่าในระดับอุตสาหกรรม แม้ว่าค่าการทนทานต่อแรงดึงของทั้งสองวิธีในการเตรียมยางผสมจะใกล้เคียงกัน และวิธีกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กจะใช้เวลาน้อยกว่า ดังนั้นขนาดอนุภาคที่วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาด จึงเล็กกว่าดังรูปที่ 3.4 กล่าวคือ ค่า d_{50} ของเคลย์สเลอรีในรูปแบบที่ 1 มีค่า 0.24 ไมครอน และ d_{50} ของเคลย์สเลอรีในรูปแบบที่ 2 มีค่า 0.14 ไมครอน สำหรับอิทธิพลของความเร็วรอบของใบพัดกวนการผสมเคลย์กับน้ำยางข้นก่อนนำมาผสมกับสารเคมีเพื่อวัลคาไนเซชันนั้นพบว่าไม่มีผลไม่แตกต่างกันมากนัก เช่นที่ความเร็ว 580 รอบต่อนาที (กระบวนการที่ 5-7) 1055 รอบต่อนาที (กระบวนการที่ 8-10) และ 1360 รอบต่อนาที (กระบวนการที่ 11-13) และเวลาที่ใช้ในการกวน 10-30 นาทีไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองครั้งนี้กระบวนการเตรียมยางผสมเคลย์ที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่ดีที่สุด (24.95 MPa) คือกระบวนการที่ 14 เมื่อพิจารณากระบวนการที่ 11 และ 14 จะพบว่าการเตรียมเคลย์ที่จะใช้ผสมในเนื้อยาง เตรียมเป็นสเลอรี ซึ่งน้ำจะเป็นสารที่แยกเคลย์ออกเป็นแผ่นๆ (Exfoliating agent) ได้ดี เคลย์และอนุภาคยางจะเกิดเป็นประจุลบที่ผิวเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการแขวนลอยได้ดี ในขณะที่ทำให้แห้งอนุภาคเคลย์และยาง

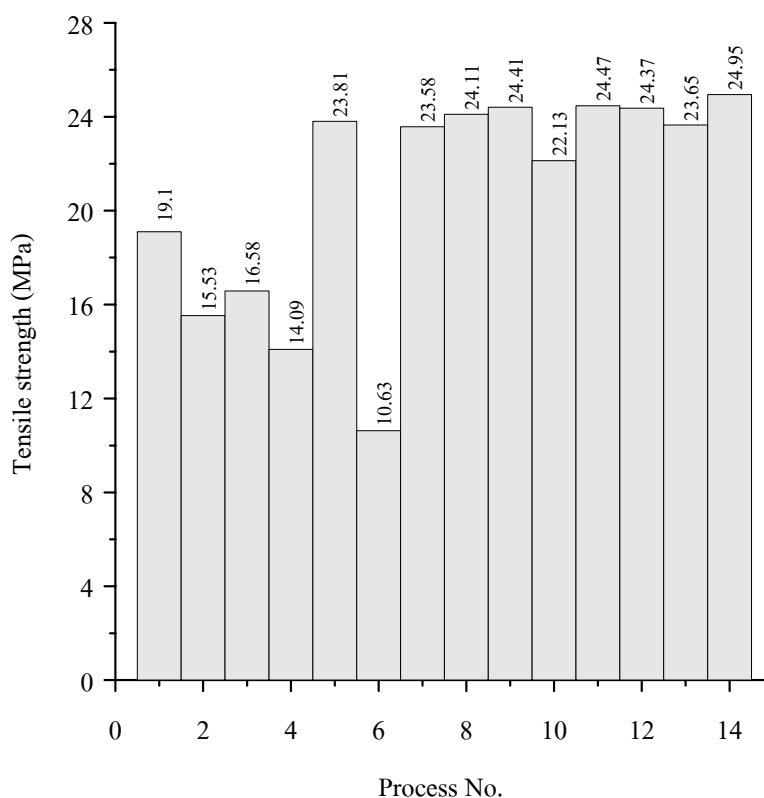
จะเกาะติดกัน (Capillary adhesion) ซึ่งมีความแข็งแรงพอที่จะทำให้เกิดเป็นวัสดุผสมระดับนาโน หลังจากแห้งแล้วก็มีแรงเกาะติดกันแบบไฟฟ้าสถิต (Valadares et al., 2006)

ตารางที่ 3.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมเกล็ด

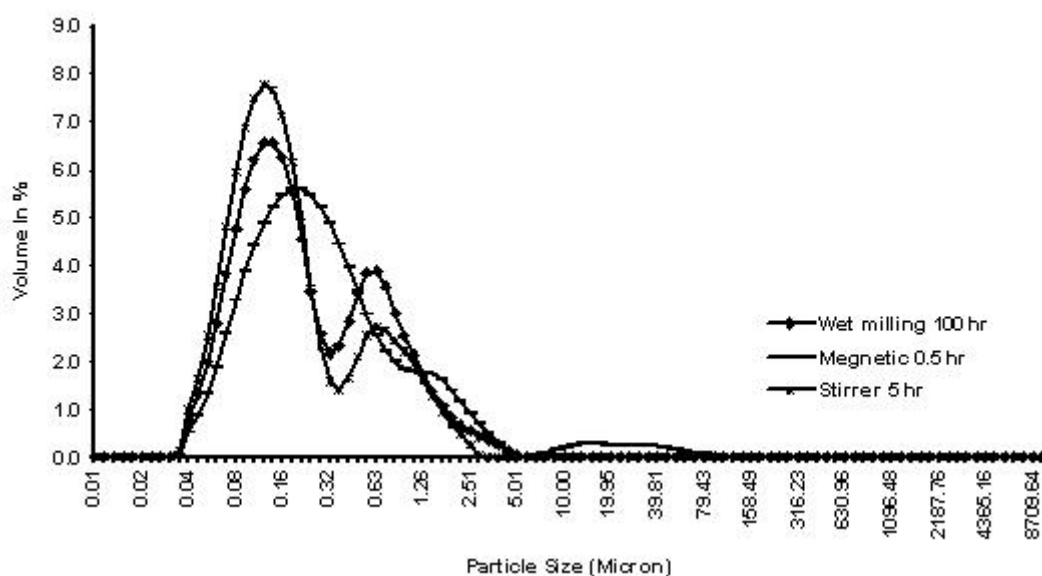
กระบวนกร	Tensile strength (MPa)		Elongation (%)		Modulus 300% (MPa)		Tear resistance (N/mm)	
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.
1	19.10	1.38	584.13	23.52	2.66	0.14	26.07	2.88
2	15.53	0.43	612.83	29.00	2.39	0.06	27.13	1.25
3	16.58	0.47	523.37	20.77	2.73	0.09	24.85	1.72
4	14.09	0.56	604.90	3.45	2.31	0.04	30.83	1.36
5	23.81	2.96	554.72	28.95	5.63	0.15	43.09	1.63
6	10.63	2.21	534.12	42.59	2.75	0.21	39.67	1.52
7	23.58	0.85	563.02	15.62	5.76	0.28	39.56	2.35
8	24.11	0.27	524.10	56.67	5.83	0.36	38.23	3.14
9	24.41	0.26	584.50	5.24	5.70	0.21	42.58	1.87
10	22.13	0.32	547.61	10.49	5.41	0.17	42.05	0.81
11	24.47	0.83	545.92	19.91	6.09	0.27	42.47	1.82
12	24.37	0.25	566.28	22.96	5.53	0.16	40.04	1.00
13	23.65	1.44	542.28	30.97	6.19	0.46	41.05	1.41
14	24.95	0.60	542.65	4.98	5.42	0.15	34.13	2.13

3.2 ผลของปริมาณสารตัวเติม

หลังจากได้กระบวนกรในการผสมสารตัวเติมลงไปในยางธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด แล้ว ก็ดำเนินการเตรียมชิ้นงานที่มีการผสมสารตัวเติมที่ปริมาณต่างๆ โดยในส่วนนี้จะแสดงผลของสารตัวเติมแต่ละตัวที่ปริมาณต่างๆ เมื่อผสมลงไปในยางธรรมชาติ และในส่วนสุดท้ายเป็นผลของการผสมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดโดยผสมร่วมกันลงในยางธรรมชาติ โดยมีผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.3 ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติผสมเคลย์
ที่เตรียมจากกระบวนการที่ 1 ถึง กระบวนการที่ 14

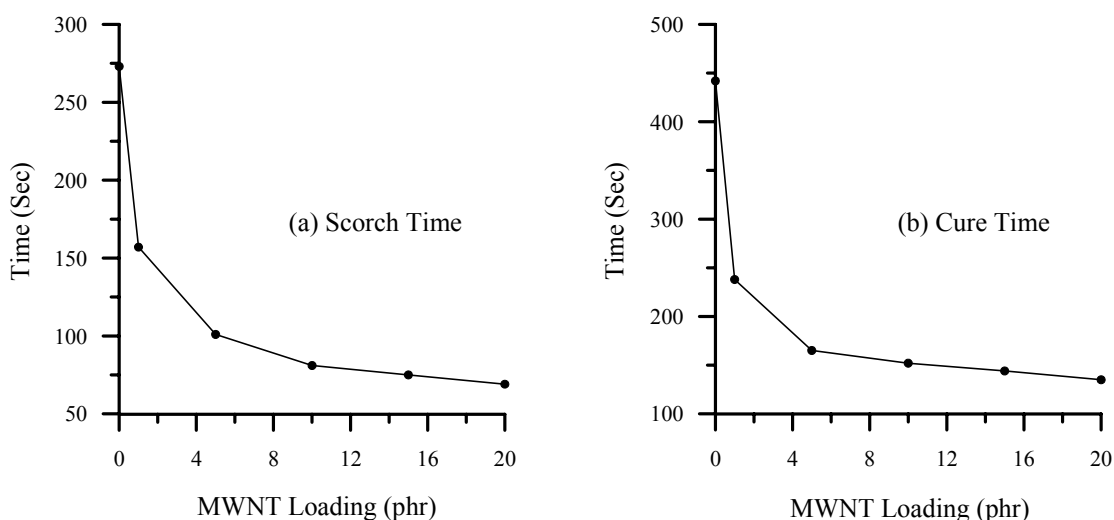


รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเปรียบเทียบเคลย์บดเปียก 100 ชั่วโมง แล้วนำเคลย์มาทวน
ด้วยเครื่องทวนแห้งแม่เหล็ก 30 นาที และเคลย์ที่ทวนด้วยเครื่องทวนแบบใช้ใบพัด 5 ชั่วโมง

3.2.1 ผลของปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนที่ผสมลงไปอย่างธรรมชาติต่อสมบัติต่างๆ

3.2.1.1 คุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure characteristics)

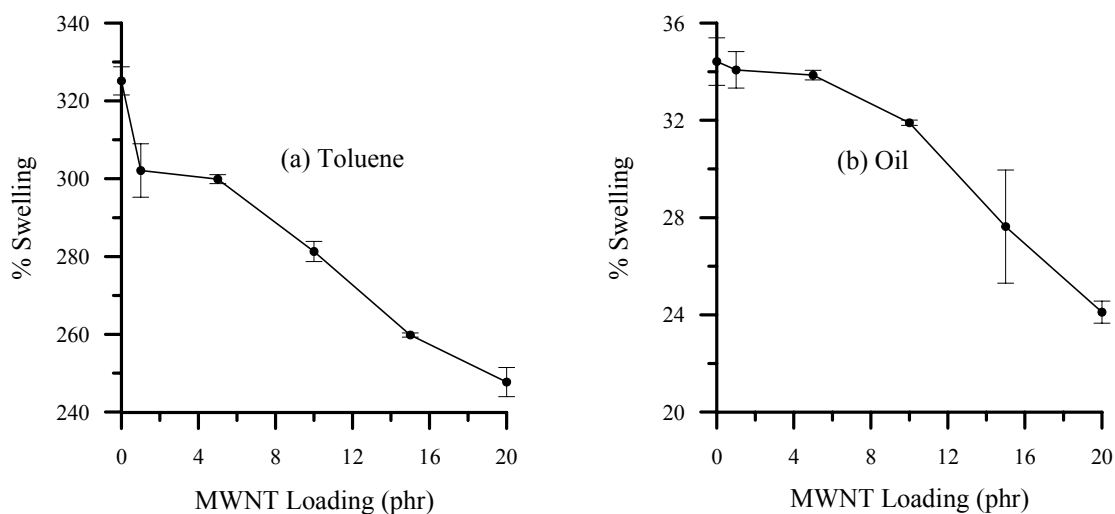
ลักษณะการทำให้ยางคงรูปจะรายงานผลในรูปของค่า Cure time และ Scorch time โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการผสมท่อนานาโนคาร์บอนลงไปอย่างเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าทั้งสองมีค่าลดลง (รูปที่ 3.5) เนื่องจากท่อนานาโนคาร์บอนนำความร้อนได้ดีจึงทำหน้าที่เป็นตัวเร่งให้กัมมะถันแตกตัวเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้เร็วขึ้น จึงทำให้ยางคงรูปและเกิดพันธะเชื่อมโยง (Cross link) ของโมเลกุลของยางเกิดเร็วขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ismail และคณะ (2002)



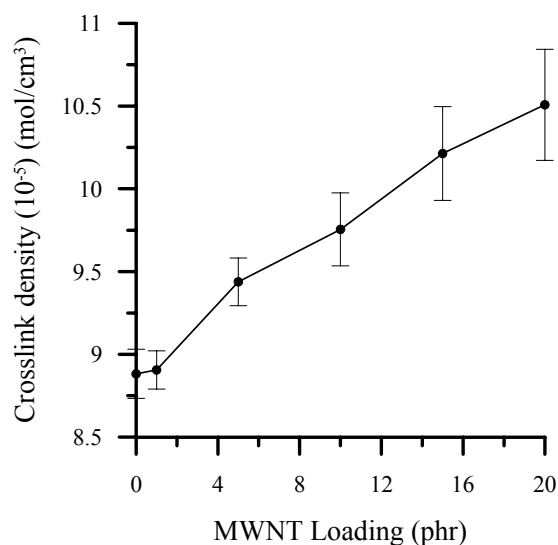
รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำให้ยางคงรูป (a) Scorch time และ (b) Cure time ของยางธรรมชาติผสมท่อนานาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

3.2.1.2 ร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

เมื่อผสมท่อนานาโนคาร์บอนในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการบวมตัวมีค่าลดลงทั้งในโทลูอีน และ น้ำมัน (รูปที่ 3.6a และ 3.6b) เนื่องจากว่าการบวมตัวจะเกิดขึ้นกับเนื้อยางเท่านั้น ไม่เกิดกับสารตัวเติม ดังนั้นการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเป็นการลดปริมาณเนื้อยางลงในตัวอย่างไม่ทราบ (Rakchonlatee et al., 2004) และเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.7) เนื่องจากการเกาะกันอย่างดีของสารตัวเติมกับเนื้อยาง (ชัชวาล และคณะ, 2550; Arroyo et al., 2006) และจากสมบัติในเรื่องการนำความร้อนของท่อนานาโนคาร์บอนที่ดีเลิศจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการคงรูป จึงทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนานาโนคาร์บอน



รูปที่ 3.6 ร้อยละการบวมตัว (a) ในโทลูอีน และ (b) ในน้ำมัน ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

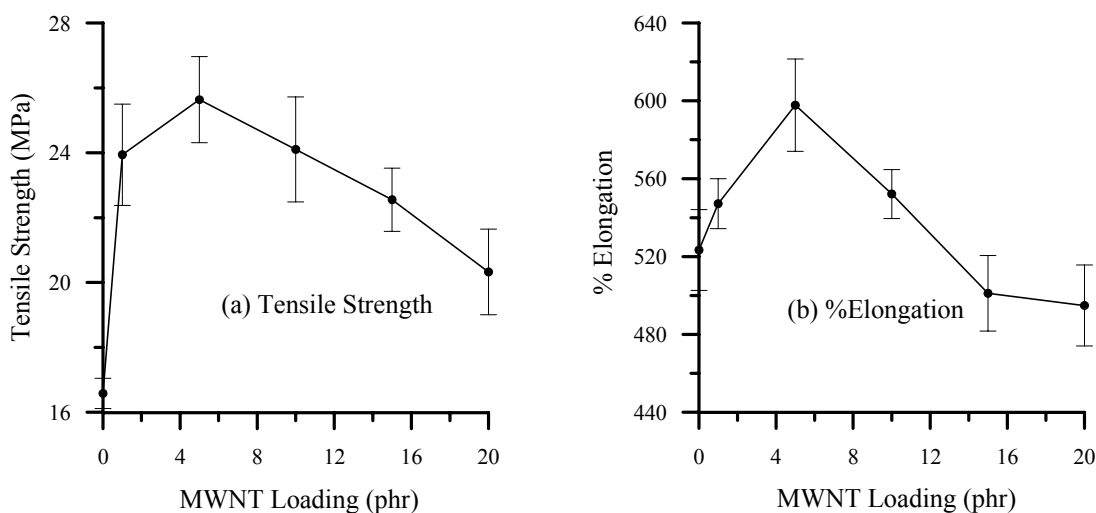


รูปที่ 3.7 ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

3.2.1.3 การทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) %Elongation และมอดูลัส (Modulus)

ผลการทดสอบค่าการทนทานต่อแรงดึง และค่า %Elongation แสดงดังรูปที่ 3.8a และ 3.8b ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในยางธรรมชาติจะส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง และค่า %Elongation มีค่าเพิ่มขึ้นจากที่ไม่มีการผสมท่อนาโนคาร์บอน เพราะท่อนาโนคาร์บอนซึ่งนำความร้อนได้ดีจะไปช่วยทำให้เกิดการแตกตัวของกัมมะถัน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างเชื่อมโยงมากขึ้น และพบอีกว่าปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เหมาะสมที่ให้ค่าทั้งสองมี

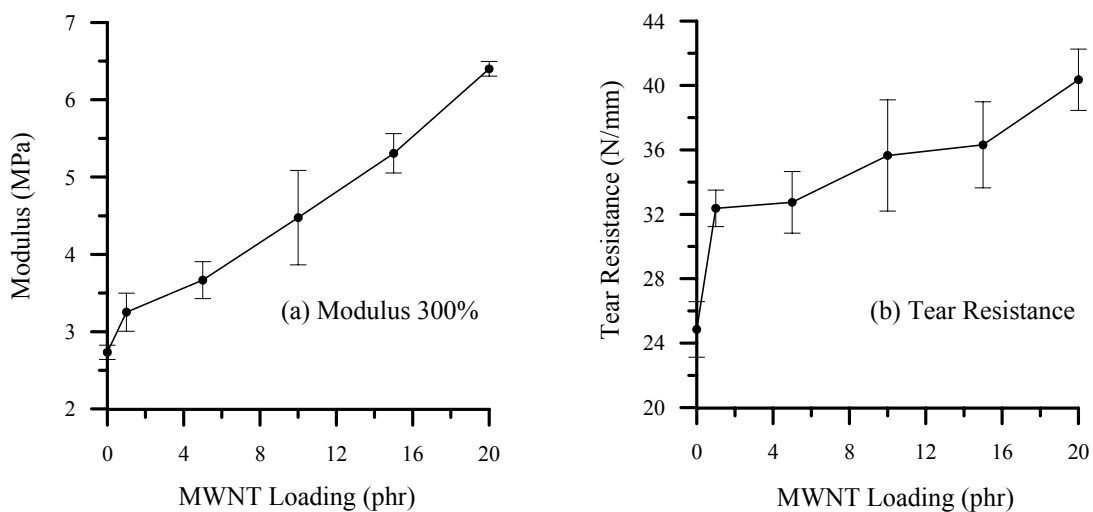
ค่ามากที่สุดก็คือปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 5 phr โดยมีค่าเท่ากับ 25.64 MPa และ 597.77 % ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้นจากยางที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอน 54.4% และ 14.2% ตามลำดับ เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนในยางธรรมชาติ และการเกาะกันระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับยางธรรมชาติอย่างดี (Fakhrul-Razi et al., 2006; Yue et al., 2006) อย่างไรก็ตามเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปในปริมาณที่มากกว่า 5 phr จะทำให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง และค่า %Elongation มีค่าลดลง (รูปที่ 3.8 a และ b) ทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนเกิดการรวมตัวกัน (Sangchay et al., 2007; Xiao et al., 2007) ส่วนค่ามอดูลัสนั้น มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น โดยที่เป็นเช่นนี้น่าจะมาจากการกระจายตัวที่ดีของท่อนาโนคาร์บอน และจากสมบัติอันดีเยี่ยมของท่อนาโนคาร์บอนในด้านมอดูลัสของยังและการทนทานต่อแรงดึง (Zhou et al., 2006) (รูปที่ 3.9a) โดยจากผลของค่ามอดูลัสพบว่าค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นถึง 3.67 MPa เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr หรือเพิ่มจากยางที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 34.2% แต่เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr ให้ค่ามอดูลัสสูงถึง 6.40 MPa หรือเพิ่มขึ้น 134.2%



รูปที่ 3.8 การทนทานต่อแรงดึง (a) และ %Elongation (b) ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

3.2.1.4 การต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อผสมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 3.9b) โดยเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับค่ามอดูลัส ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr ให้ค่าการต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเป็น 32.75 N/mm หรือเพิ่มขึ้นเป็น 31.8% แต่เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนเข้าไป 20 phr ค่าเพิ่มขึ้นเป็น 40.36 N/mm หรือเพิ่มขึ้นเป็น 62.4%



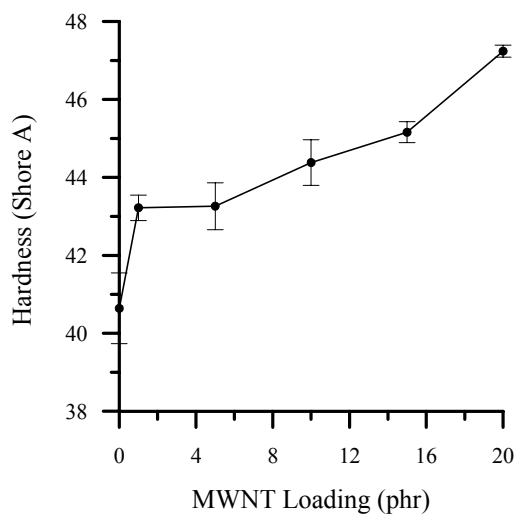
รูปที่ 3.9 มอดูลัส (a) และ การต้านทานต่อการฉีกขาด (b) ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

3.2.1.5 ความแข็ง (Hardness)

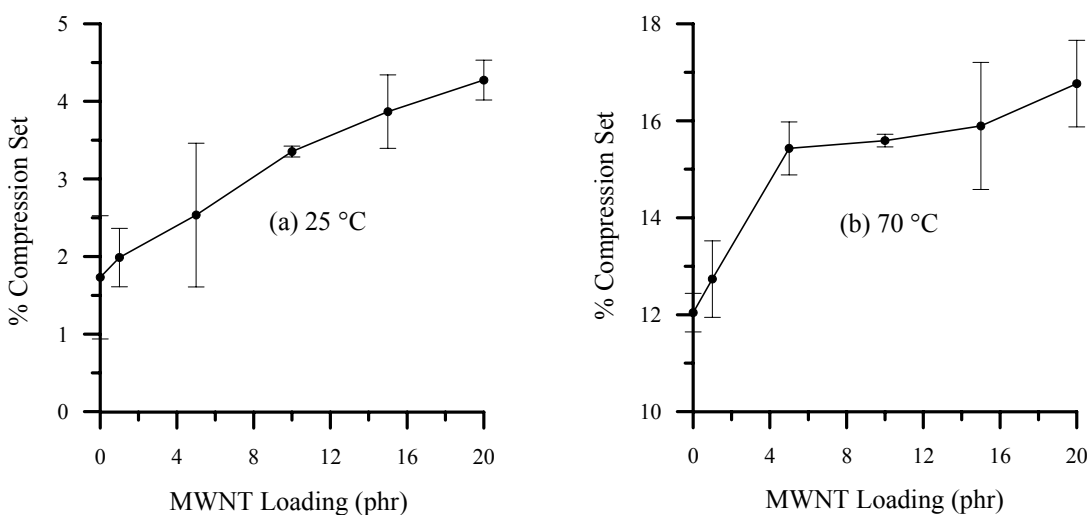
เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.10) เนื่องจากเมื่อมีการผสมตัวเติมซึ่งมีความแข็งมากกว่าเนื้อยางลงไปมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งรวมของวัสดุผสมนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย (Rakchonlatee et al., 2004) ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้เหมือนกับการทดลองของ Yue และคณะ (2006) จากรูปที่ 3.10 พบว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปในยาง 5 phr ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 40.64 Shore A เป็น 43.26 Shore A และเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 47.24 Shore A

3.2.1.6 การเสียรูปหลังการกด (Compression set)

เป็นการทดสอบการเสียรูปหลังการกด โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อมีการเติมท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการเสียรูปหลังการกดเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.11) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเพิ่มปริมาณตัวเติมจะไปลดค่าความยืดหยุ่น (Elasticity) ของวัสดุ (Thongsang et al., 2006) โดยพบว่าที่ 25 องศาเซลเซียส และ 70 องศาเซลเซียส เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr ค่าการเสียรูปหลังการกดเพิ่มขึ้น 46.11% และ 28.12% ตามลำดับ และเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr มีค่าการเสียรูปหลังการกดเพิ่มขึ้น 146.82% และ 39.21% ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

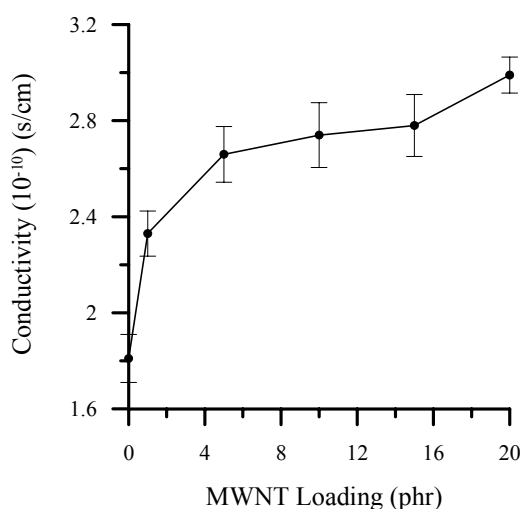


รูปที่ 3.11 การเสีรูปร่างหลังการกด (a) อุณหภูมิ 25 °C และ (b) อุณหภูมิ 70 °C ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

3.2.1.7 สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผลการทดสอบค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนลงไปในยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะจากสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี ดังนั้นเมื่อนำมาผสมลงไปในยางธรรมชาติจึงส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้ารวมของระบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของ Broza และคณะ (2006) เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr ค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 1.81×10^{-10} s/cm เป็น 2.99×10^{-10} s/cm ตามลำดับ และเมื่อนำค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน

20 phr ดังกล่าวมาคำนวณเป็นค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) จะมีค่าเท่ากับ $3.3 \times 10^9 \Omega \text{cm}$ โดยจากข้อมูลในการจัดกลุ่มยางเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้านั้นมีดังนี้ ยางที่มีค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า $10^4 \Omega \text{cm}$ จัดเป็นยางที่นำไฟฟ้าได้ ยางที่มีค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง $10^4 - 10^8 \Omega \text{cm}$ จัดเป็นยางในกลุ่มกึ่งฉนวนและยางที่มีค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า $10^8 \Omega \text{cm}$ จัดเป็นยางที่มีความเป็นฉนวนที่สูง (พงษ์ธร, 2550) ซึ่งจากข้อมูลในการจัดกลุ่มยางและข้อมูลค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้าของยางผสมท่อนาโนคาร์บอนจะมีค่าเท่ากับ $3.3 \times 10^9 \Omega \text{cm}$ สามารถสรุปได้ว่ายางผสมท่อนาโนคาร์บอนในงานวิจัยนี้ยังคงมีสมบัติที่เป็นฉนวนไฟฟ้าอยู่



รูปที่ 3.12 สภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

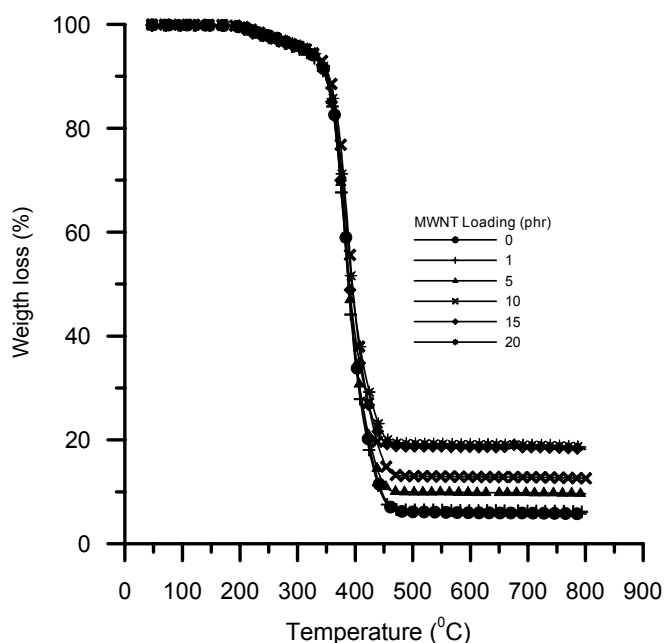
3.2.1.8 สมบัติทางความร้อนของยางผสมท่อนาโนคาร์บอน

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนเกี่ยวกับน้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอน จะตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) เมื่อได้รับความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.13 พบว่า อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เมื่อน้ำหนักของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนหายไปที่ 5%, 10% และ 50% มีค่าใกล้เคียงกับค่าของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเถ้าที่เหลือของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเถ้าที่เหลือของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่างกัน จะมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติ เพราะในท่อนาโนคาร์บอนมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างด้วย ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้ ทำให้มีปริมาณเถ้าสูงกว่าปริมาณเถ้าของยางธรรมชาติ

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง TGA

ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน (phr)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	ปริมาณถ่าน อุณหภูมิ 800 °C (%)
0	313.88	348.60	389.57	5.73
1	306.54	348.38	388.13	6.17
5	312.02	349.45	388.44	9.63
10	317.27	354.61	394.89	12.59
15	317.10	348.77	390.11	18.18
20	320.95	351.78	394.33	18.63

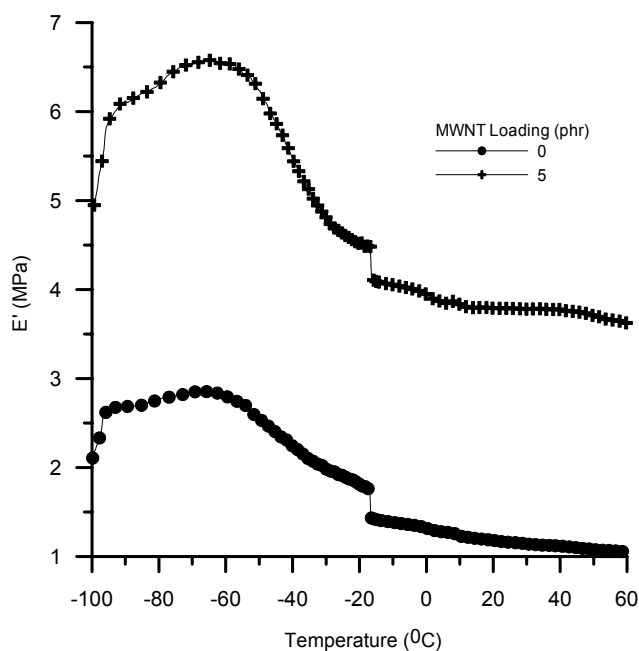


รูปที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณต่างๆ

3.2.1.9 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

รูปที่ 3.14 แสดงผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E') ของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆ โดยจากกราฟทำการเปรียบเทียบค่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 0 phr (ยางที่ไม่สารตัวเติม) กับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 5 phr (สูตรที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด) จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปในระบบจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทดสอบในครั้งนี้เป็นการทดสอบที่มี

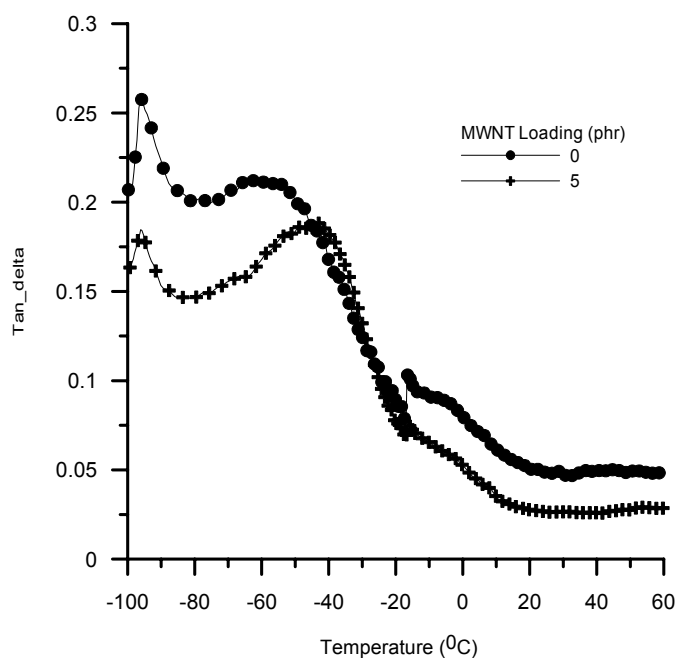
การเปลี่ยนรูปต่ำมาก (Strain 0.5%) ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนบางส่วนจึงยังจับตัวกันอยู่กับโมเลกุลของยางที่แทรกระหว่างท่อนาโนคาร์บอนจึงถูกรั้งไว้ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้มอดูลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น (ยุทธชาติ, 2549; Da Costa et al., 2000)



รูปที่ 3.14 ผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อค่ามอดูลัสสะสม

ส่วนรูปที่ 3.15 แสดงผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนต่อค่าแดมปีง แฟคเตอร์ (Damping factor) หรือค่า $\tan \delta$ ของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆ ค่า $\tan \delta$ มีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของโมเลกุลและช่วงการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) ค่า $\tan \delta$ จะไวต่อการเคลื่อนไหวของโมเลกุลมาก ในกรณีที่มีสารตัวเติมขนาดระดับจุลภาคในระบบ ค่า $\tan \delta$ จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น (Hamdan et al., 2004) ซึ่งการที่มีสารตัวเติมมากขึ้น ทำให้ค่า $\tan \delta$ สูงขึ้นอาจเป็นเพราะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนที่ไม่แข็งแรงของสารตัวเติมในบางบริเวณ และเป็นแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่มีการเกาะกันไม่ดี (Nielsen and Landel, 1994) แต่ที่เป็นสารตัวเติมระดับนาโนอาจได้ผลที่แตกต่างกันออกไป โดยจากกราฟทำการเปรียบเทียบค่าที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 0 phr (ยางที่ไม่มีสารตัวเติม) กับปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 5 phr (สูตรที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปในระบบจะส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ เนื่องมาจากสารตัวเติมที่เติมลงไปจะไปเพิ่มโครงสร้างสารตัวเติม (Filler network) ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลของยางขณะที่ยางผสมเกิดการผิดรูปเชิงพลวัต (ยุทธชาติ, 2549; Sombatsompop et al., 2004) นอกจากนั้นยังแสดงว่าการเกาะกัน

ระหว่างท่อนานาโนคาร์บอนและเนื้อยางมีพันธะที่แข็งแรง จึงทำให้ค่า $\tan \delta$ ในกรณีที่เติมท่อนานาโนคาร์บอนปริมาณ 5 phr มีค่าลดลง (รูปที่ 3.15) จากการศึกษาอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) ซึ่งก็คือค่าอุณหภูมิที่มีค่า $\tan \delta$ สูงสุด พบว่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการผสมท่อนานาโนคาร์บอนลงไปในยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกับไม่มีการผสมท่อนานาโนคาร์บอน โดยกรณีที่ไม่มีการผสมท่อนานาโนคาร์บอนอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเท่ากับ -60 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมท่อนานาโนคาร์บอนลงไปเท่ากับ 5 phr จะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น -40 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้นก็หมายถึงช่วงการมีสภาพเป็นยาง (Rubber region) มีการขยับไปอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่สูงขึ้น และแสดงถึงพันธะที่เกาะกันระหว่างท่อนานาโนคาร์บอนและเนื้อยางแข็งแรงมาก จึงส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่มีค่าสูงขึ้นด้วย (รูปที่ 3.8a) ทำให้ยางสามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ (ยุทธชาติ, 2549)

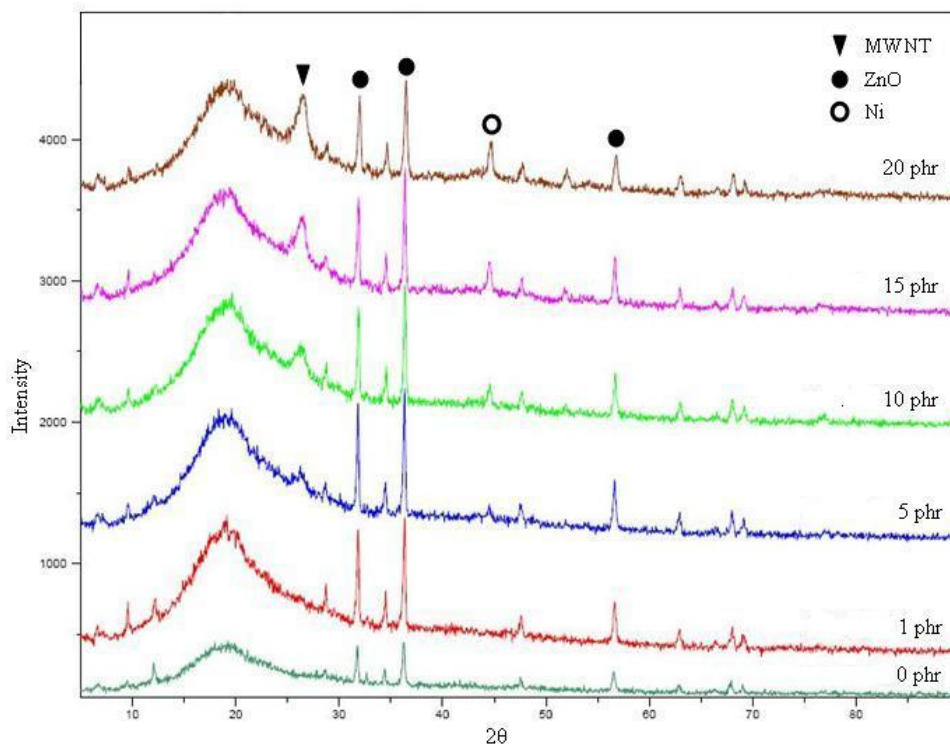


รูปที่ 3.15 ผลของปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนต่อค่า $\tan \delta$

3.2.2 การอภิปรายผลของปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนที่ผสมลงไปยางธรรมชาติ

จากการนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างด้วย XRD พบว่าพีค (Peak) เด่นของยางธรรมชาติที่มุม 19 องศา และพีคเด่นของท่อนานาโนคาร์บอนที่มุม 27 องศา เมื่อมีการผสมท่อนานาโนคาร์บอนลงไปยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้นของเฟสของท่อนานาโนคาร์บอนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 3.16 นอกจากนี้ยังพบเฟสของ ZnO ซึ่งมาจากสารเคมีที่ผสมลงไปยางตลอดจนธาตุ निकเกิดจะเห็นเฟสชัดเจนเพราะในการผลิตท่อนานาโนคาร์บอนได้ใช้ฟอง निकเกิดในกระบวนการด้วย จากผลที่ได้จะเห็นว่าวัสดุผสมไม่มีเฟสใหม่เกิดขึ้นนอกเหนือจากเฟสของยาง

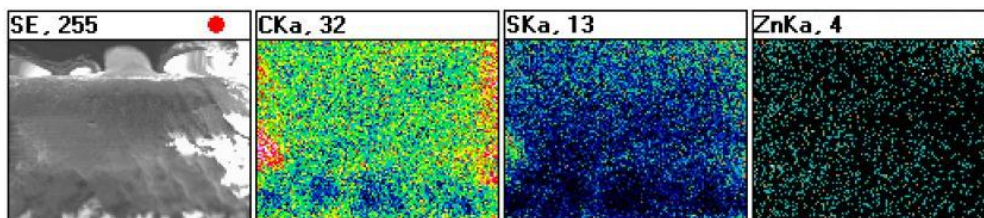
ธรรมชาติ ท่อนาโนคาร์บอน สารเคมีที่ใช้ และนิกเกิลที่ปนเปื้อนอยู่ในท่อนาโนคาร์บอน ดังนั้น วัสดุผสมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการผสมกันเชิงกายภาพ



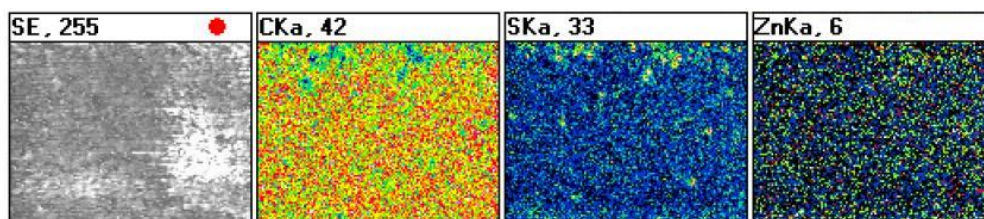
รูปที่ 3.16 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน ในปริมาณต่างๆ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของท่อนาโนคาร์บอน ในการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณต่างๆ ลงไปในยางธรรมชาติ (รูปที่ 3.17 – 3.21) พบว่าการกระจายของธาตุคาร์บอน จะกระจายตัวดีที่สุดเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 5 phr ดังนั้นที่ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเท่ากับ 5 phr (รูปที่ 3.18) นี้จึงส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation มีค่าสูงสุดนั่นเอง แต่เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่มากกว่า 5 phr โดยเฉพาะที่ 20 phr ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคท่อนาโนคาร์บอน เนื่องมาจากในกระบวนการเตรียมชิ้นงานนั้นได้ควบคุมเวลาในการผสมท่อนาโนคาร์บอนและเวลาในการผสมสารเคมี ดังนั้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นแต่เวลาในการผสมคงเดิม จึงส่งผลให้สารตัวเติมมีการกระจายตัวไม่ดีเมื่อเทียบกับการใช้ปริมาณสารตัวเติมน้อยๆ เมื่อกระจายตัวไม่ดีก็จะส่งผลต่อการลดลงของค่าการทนทานต่อแรงดึง (รูปที่ 3.8a) และค่า %Elongation (รูปที่ 3.8b) เช่นเดียวกับการกระจายตัวของธาตุซัลเฟอร์ (S) และ สังกะสี (Zn) ที่ไม่มีการกระจายตัวที่ดีเท่าที่ควร เมื่อผสมท่อนา

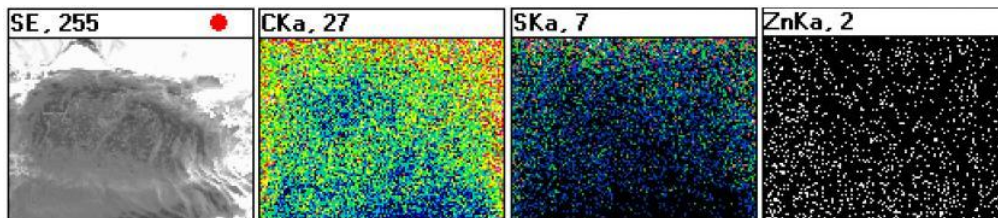
โนคาร์บอนในปริมาณมาก เช่นที่ 20 phr (รูปที่ 3.21) เมื่อเทียบกับที่ 5 phr (รูปที่ 3.18) แสดงว่าท่อนานโนคาร์บอนมีมากขึ้นไปอาจจะไปขัดขวางปฏิกิริยาคาไลเซชัน



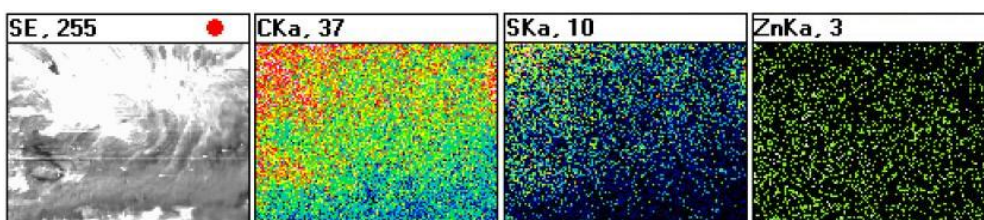
รูปที่ 3.17 ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน 1 phr



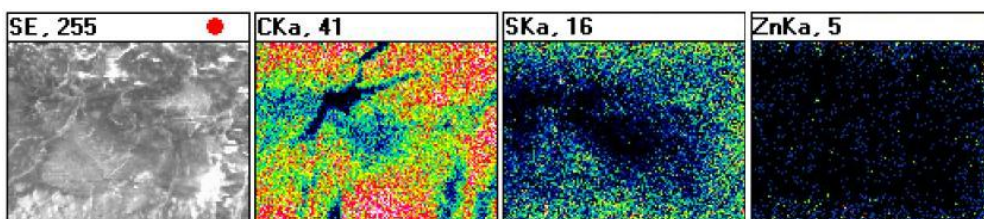
รูปที่ 3.18 ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน 5 phr



รูปที่ 3.19 ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน 10 phr



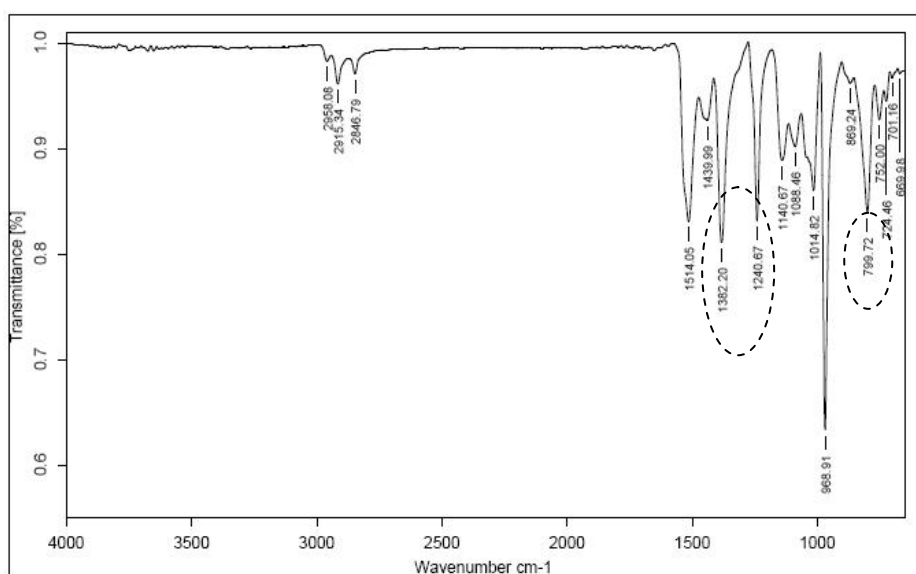
รูปที่ 3.20 ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน 15 phr



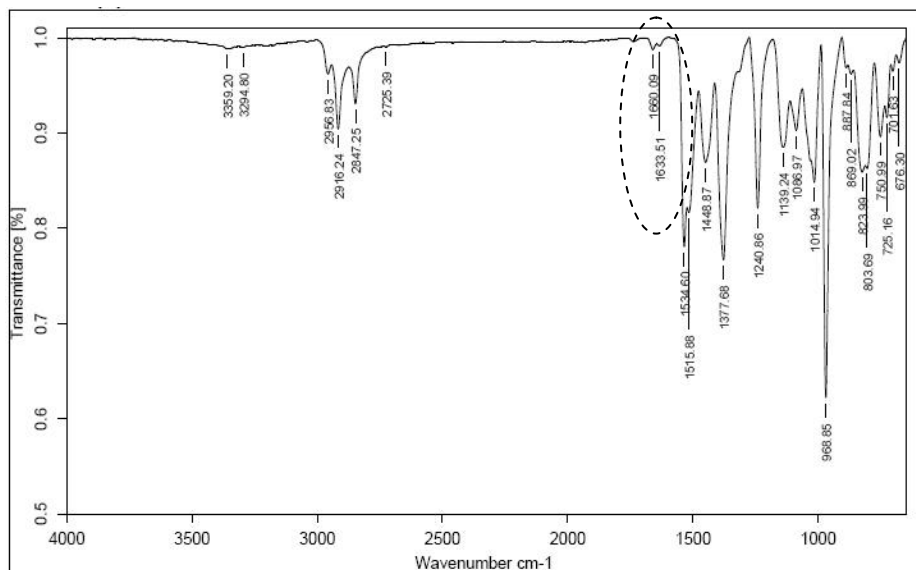
รูปที่ 3.21 ผลการกระจายตัวของท่อนานโนคาร์บอนเมื่อผสมท่อนานโนคาร์บอน 20 phr

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดที่บอกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็น cis-1, 4-Polyisoprene ที่สำคัญได้แก่ ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 837 cm^{-1} เป็นการงอของพันธะ C=C บน cis-1, 4-Polyisoprene และที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1449 และ 1367 cm^{-1} จะเป็นการยืดของพันธะ C-H ของอะลิฟาติก (Aliphatic) ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ (สิทธิพงษ์, 2547) โดยตำแหน่งของเลขคลื่นอาจจะมีการคลาดเคลื่อนบ้าง ดังรูปที่ 3.22 เป็นสเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม โดยตำแหน่งของการงอของพันธะ C=C บน cis-1, 4-Polyisoprene จะปรากฏที่เลขคลื่น 799.72 cm^{-1} ส่วนการยืดของพันธะ C-H ของอะลิฟาติกจะปรากฏที่เลขคลื่น 1382.20 cm^{-1} และ 1240.67 cm^{-1} ตามลำดับ

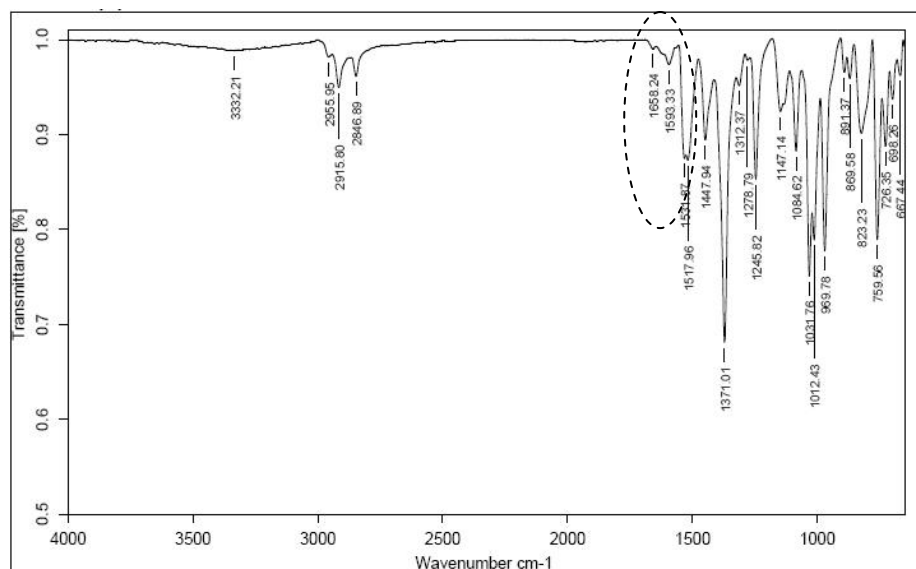
เมื่อผสมท่อนานาโนคาร์บอนลงไปยางธรรมชาติได้นำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วย FTIR โดยตรวจสอบสูตรที่ให้ค่าการทันทานต่อแรงดึงสูงสุด นั่นก็คือสูตรที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอน 5 phr และสูตรที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอนมากที่สุด คือ สูตรที่ผสมท่อนานาโนคาร์บอน 20 phr ดังรูปที่ 3.23 และ 3.24 ตามลำดับ โดยจะพบข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม (รูปที่ 3.22) นั่นก็คือ ที่เลขคลื่นประมาณ $1700 - 1500\text{ cm}^{-1}$ จะปรากฏพันธะ C=C ขึ้นเพิ่มเติมซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง แต่ที่ปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนเท่ากับ 20 phr นั้นพบว่าการจับตัวเป็นก้อนของท่อนานาโนคาร์บอนเกิดขึ้นทำให้การกระจายตัวในเนื้อยางลดลง (รูปที่ 3.21) ดังนั้นจึงทำให้มีค่าความแข็งแรงที่ 20 phr ต่ำกว่าที่ 5 phr ซึ่งมีการกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนดีกว่า (รูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.22 ผล FTIR ของยางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม

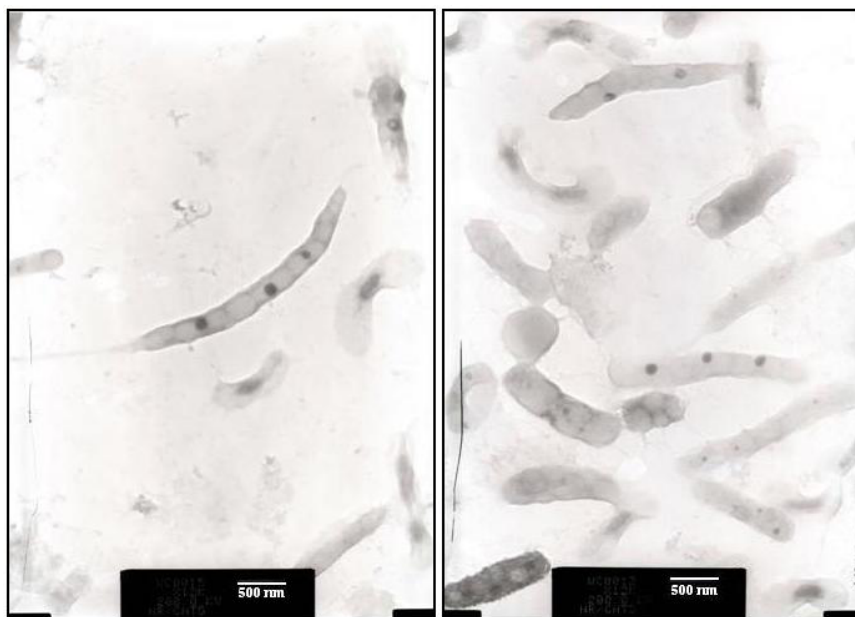


รูปที่ 3.23 ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr



รูปที่ 3.24 ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน 20 phr

และเมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง TEM เป็นดังรูปที่ 3.25 จากรูปไม่สามารถอธิบายได้ว่ายางธรรมชาติกับท่อนาโนคาร์บอนเกิดการแทรกกันแบบใด สามารถอธิบายได้เพียงว่ามีท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ โดยมีการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนอย่างดี จึงมีผลต่อการเติมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr ที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด

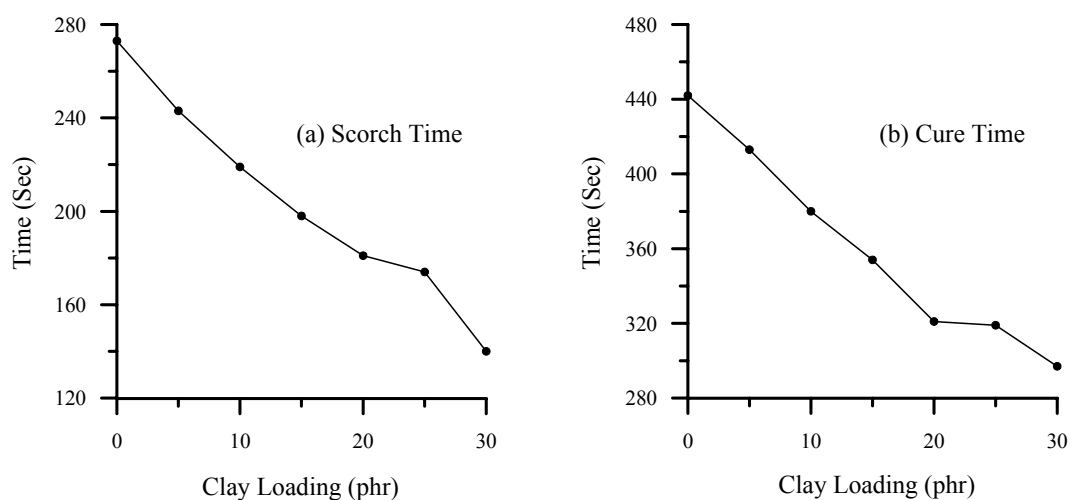


รูปที่ 3.25 การตรวจสอบโครงสร้างด้วย TEM ของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน ที่ปริมาณ 5 phr

3.2.3 ผลของปริมาณเคลย์ที่ผสมลงไปในยางธรรมชาติต่อสมบัติต่างๆ

3.2.3.1 คุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure characteristics)

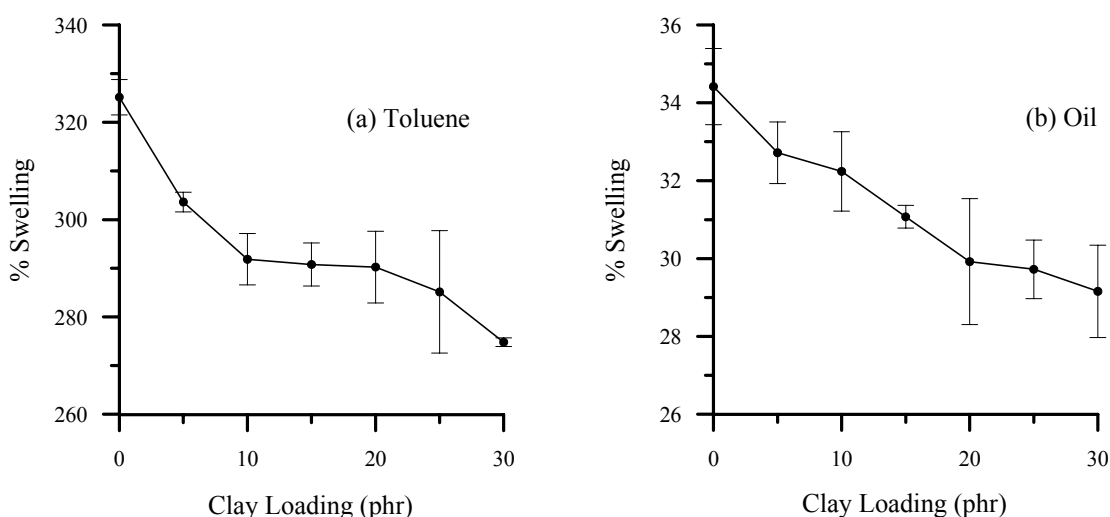
ผลของการศึกษาลักษณะการทำให้ยางคงรูป ของยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์จะมีลักษณะเดียวกับยางที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนดังที่กล่าวมาข้างแล้วต้น (ในหัวข้อ 3.2.1.1) โดย Scorch time และ Cure time จะมีค่าลดลง เมื่อมีการผสมเคลย์ลงไปเรื่อยๆ เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.26)



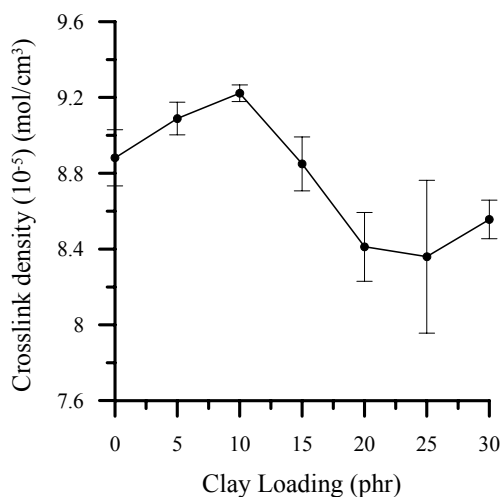
รูปที่ 3.26 ลักษณะการทำให้ยางคงรูป (a) Scorch time และ (b) Cure time ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

3.2.3.2 ร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

เมื่อผสมเคลย์ในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าการบวมตัวมีค่าลดลงทั้งในโทลูอีนและน้ำมัน (รูปที่ 3.27a และ 3.27b ตามลำดับ) เนื่องจากการบวมตัวจะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อเท่านั้น ไม่เกิดกับสารตัวเติม ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเป็นการลดปริมาณเนื้อเยื่อลงในส่วนตัวอย่างที่ทดสอบนั่นเอง (Rakchonlatee et al., 2004) และเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์ไม่เกิน 10 phr ส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.28) เนื่องมาจากเกิดการเชื่อมโยงของโซโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างยางผสมแข็งแรงแรง (Rigid) มากขึ้น แต่เมื่อผสมเคลย์มากกว่า 10 phr จะเกิดการรวมตัวเป็นก้อนของสารตัวเติมทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องตามรูปที่ 3.28



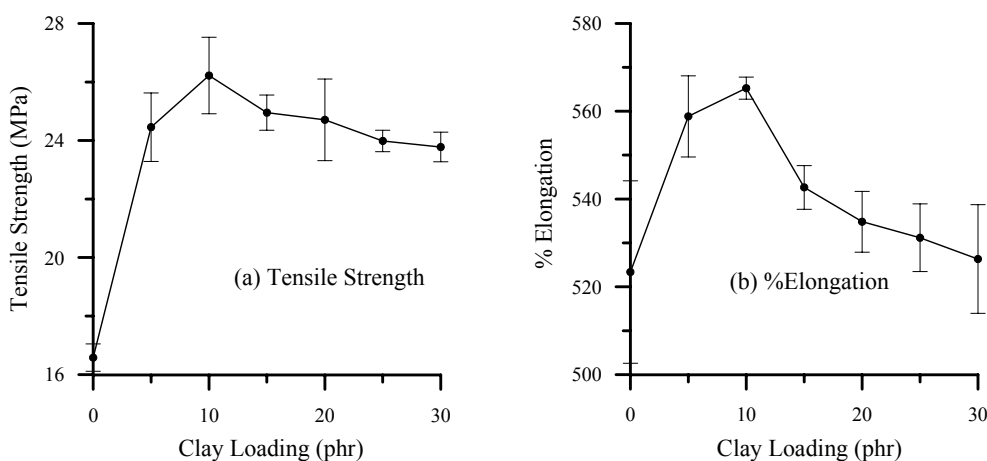
รูปที่ 3.27 ร้อยละการบวมตัว (a) ในโทลูอีน และ (b) ในน้ำมัน ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 3.28 ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

3.2.3.3 การทนทานต่อแรงดึง %Elongation และมอดูลัส

ผลการทดสอบการทนทานต่อแรงดึง %Elongation และมอดูลัสพบว่าเมื่อผสมเคลย์เข้าไปในยางธรรมชาติจะส่งผลให้การทนทานต่อแรงดึง %Elongation และมอดูลัสเพิ่มขึ้นจากที่ไม่ผสมเคลย์ เนื่องจากการเกิดการเกาะกันระหว่างเคลย์กับยาง และการเกิดชั้นซิติเกตที่มีการกระจายตัวที่ดีในเนื้อยาง (Gopakumar et al., 2002; Liang et al., 2005; Netrabukkana et al., 2005; Sharif et al., 2005; Wu et al., 2005; Arroyo et al., 2006; Kader et al., 2006 และ Valadares et al., 2006) และยิ่งพบอีกว่าปริมาณของเคลย์ที่เหมาะสมที่ทำให้การทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation มีค่ามากที่สุดคือปริมาณเคลย์เท่ากับ 10 phr โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม 58.16% และ 8.00 % ตามลำดับ (รูปที่ 3.29a และ 3.29b) เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมเคลย์ อย่างไรก็ตามเมื่อผสมเคลย์มากกว่า 10 phr ทำให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation ลดลงทั้งนี้เพราะเมื่ออนุภาคเคลย์ในระบบมากขึ้น มีแนวโน้มที่จะจับตัวเป็นก้อนได้มากขึ้นทำให้การกระจายตัวลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลงด้วย (3.28) จึงมีผลให้ความสามารถในการยืดลดลง ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gopakumar และคณะ (2002) ในส่วนของค่ามอดูลัสนั้นเมื่อมีการผสมเคลย์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.30a) พบว่าเมื่อผสมเคลย์ 30 phr ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นถึง 213.2% ที่เป็นเช่นนี้เพราะค่ามอดูลัสจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติม กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมมากขึ้นส่งผลให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และจากการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติมในระบบ

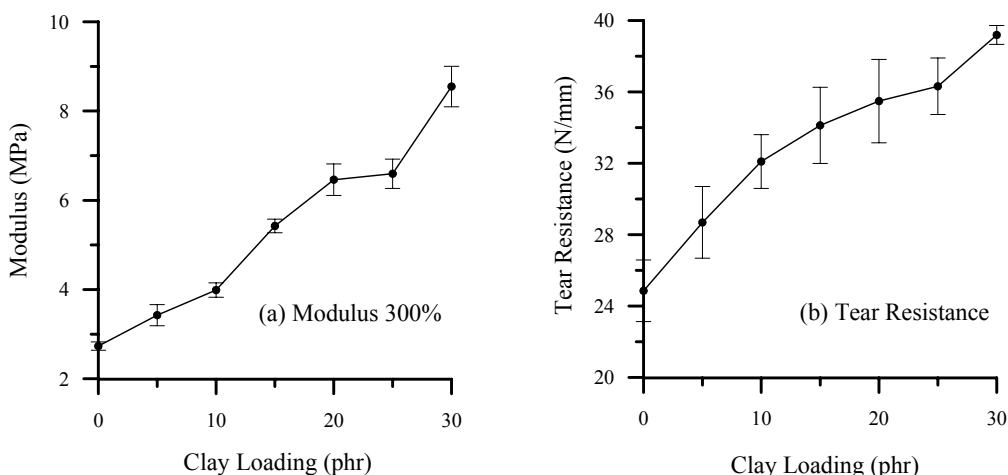


รูปที่ 3.29 การทนทานต่อแรงดึง (a) และ %Elongation (b) ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

3.2.3.4 การต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น เมื่อผสมปริมาณเคลย์เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 3.30b) โดยเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับมอดูลัส ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในหัวข้อ 3.2.3.3 พบว่าเมื่อผสม

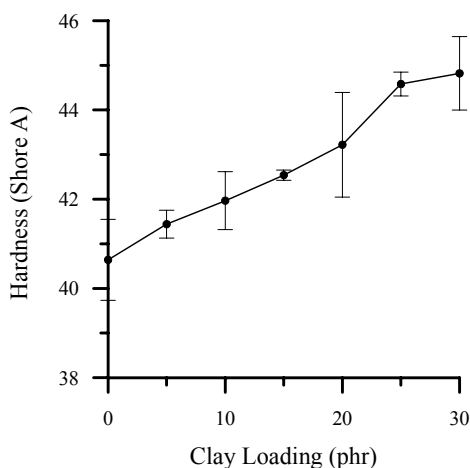
เคลย์เข้าไป 30 phr ทำให้ค่าการต้านทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นถึง 57.7% ในขณะที่เมื่อผสมเคลย์เข้าไป 10 phr ทำให้ค่าการต้านทานต่อแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นเพียง 29.2%



รูปที่ 3.30 มอดูลัส (a) และการต้านทานต่อการฉีกขาด (b) ของยางผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

3.2.3.5 ความแข็ง (Hardness)

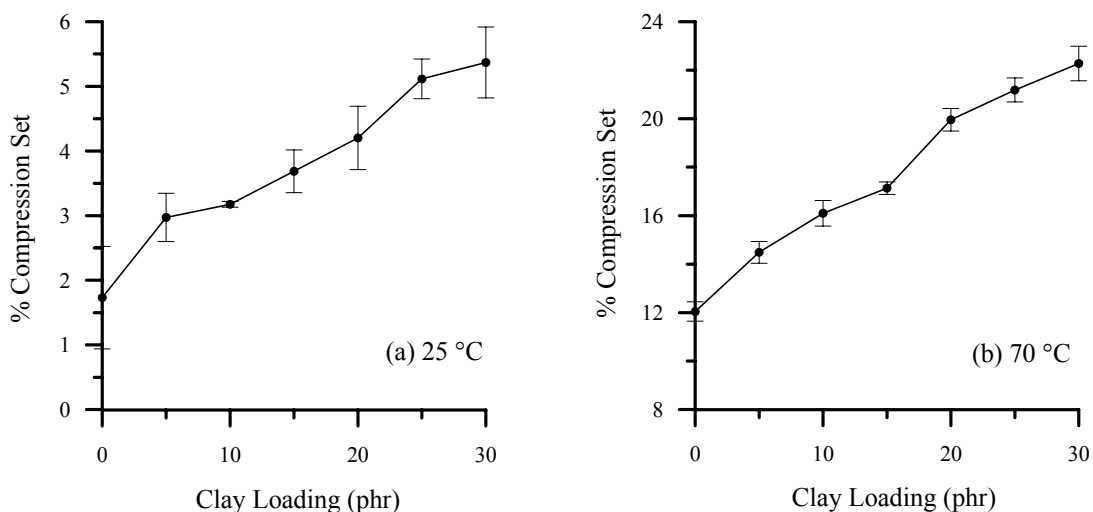
เมื่อผสมเคลย์ในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.31 โดยลักษณะของผลการทดลองและเหตุผลการทดลองเหมือนกับการทดลองในส่วนของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนดังที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือเมื่อมีการผสมตัวเติมซึ่งมีความแข็งมากกว่าเนื้อยางลงไปมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งรวมของวัสดุผสมนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้เหมือนกับการทดลองของ Yue และคณะ (2006) จากรูปที่ 3.31 พบว่าเมื่อผสมเคลย์เข้าไปในยาง 10 phr ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 40.64 Shore A เป็น 41.97 Shore A และเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอน 30 phr ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 44.82 Shore A



รูปที่ 3.31 ความแข็งของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

3.2.3.6 การเสีรูปลังการกด (Compression set)

การทดสอบพบว่าเมื่อผสมเคลย์เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าการเสีรูปลังการกดเพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การเพิ่มปริมาณตัวเติมจะไปลดค่าความยืดหยุ่น (Elasticity) ของวัสดุ (Thongsang et al., 2006) ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 การเสีรูปลังการกด (a) อุณหภูมิ 25 °C และ (b) อุณหภูมิ 70 °C ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

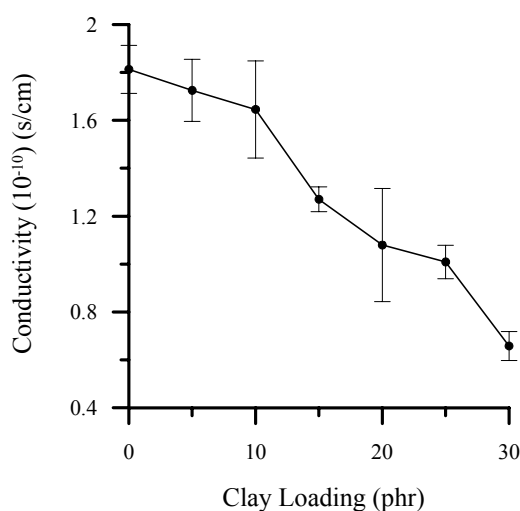
3.2.3.7 สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผลการทดสอบค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมเคลย์ในปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.33 โดยปกติยางธรรมชาติมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าต่ำ หรือ อาจกล่าวว่ายางธรรมชาติมีค่าสภาพการต้านทานไฟฟ้า (ความเป็นฉนวนไฟฟ้า) ที่สูง (พงษ์ธร, 2550) ดังนั้นเมื่อผสมเคลย์ที่มีสมบัติไม่นำไฟฟ้าลงไปยางธรรมชาติในปริมาณเพิ่มขึ้น จะไปส่งผลค่าการสภาพการนำไฟฟ้าลดลง หรือกล่าวได้ว่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าของยางผสมเคลย์มีค่าสูงขึ้นด้วย

3.2.3.8 สมบัติทางความร้อนของยางผสมเคลย์

ผลการตรวจสอบน้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติผสมเคลย์ เมื่อให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.34 พบว่าเคลย์ที่ผสมไปมีผลให้การทนอุณหภูมิของยางผสมมีค่าสูงขึ้น โดยหากผสมเคลย์เท่ากับ 25 phr จะส่งผลให้ค่า T_g มีค่าสูงสุดเท่ากับ 325 องศาเซลเซียส ซึ่งการเติมดินเหนียวจะช่วยให้สมบัติทางความร้อนของวัสดุมีค่าสูงขึ้น (ณัฐวดี, 2549; Yang et al., 1999) โดยอนุภาคของดินเหนียวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นได้ช้าลง เพราะชั้นของดินเหนียวจะขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซ

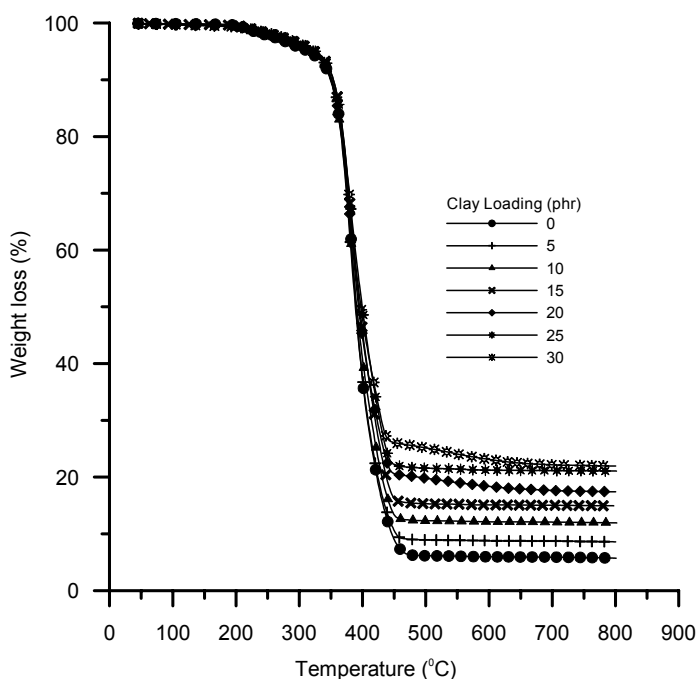
ออกซิเจน (ณัฐวุฒิ, 2549; Sur et al., 2001) ส่วนอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เมื่อน้ำหนักของยางธรรมชาติผสมเคลย์หายไปที่ 10% และ 50% พบว่า อุณหภูมิที่ตรวจสอบได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของยางธรรมชาติ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณเถ้าที่เหลือของยางธรรมชาติที่ผสมกับเคลย์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณเถ้าที่เหลือของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยเคลย์ที่ปริมาณเคลย์ต่างกันจะมีค่ามากกว่าของยางธรรมชาติ เพราะมีเคลย์เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ทำให้มีปริมาณเถ้าสูงกว่าปริมาณเถ้าของยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมเคลย์เข้าไปในปริมาณที่มากขึ้น (ตารางที่ 3.4) จึงทำให้ยางผสมมีแนวโน้มทนความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 3.33 สภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมเคลย์ ในปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ด้วยเครื่อง TGA

ปริมาณเคลย์ (phr)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	ปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิ 800 °C (%)
0	313.88	348.60	389.57	5.73
5	315.88	349.40	389.75	8.61
10	316.80	349.64	390.75	11.95
15	323.14	353.47	395.10	14.94
20	320.05	350.72	393.11	17.44
25	325.27	353.73	399.32	21.05
30	321.90	351.08	397.03	21.96



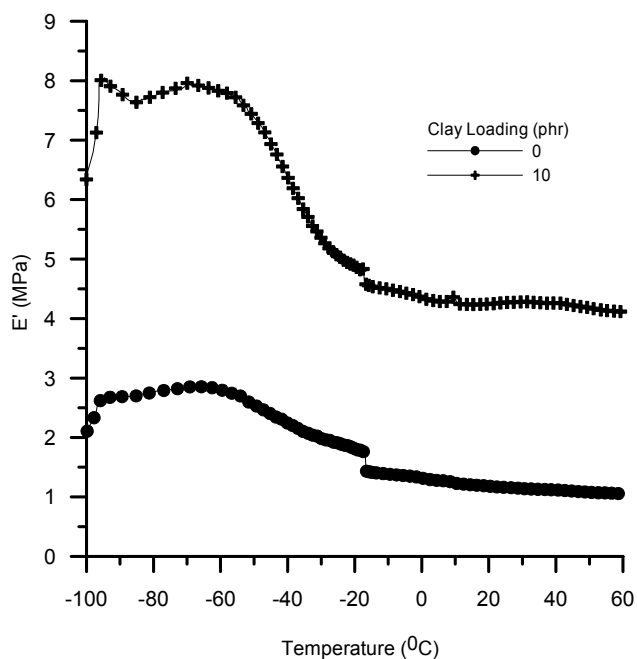
รูปที่ 3.34 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติผสมด้วยเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ

3.2.3.9 วิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

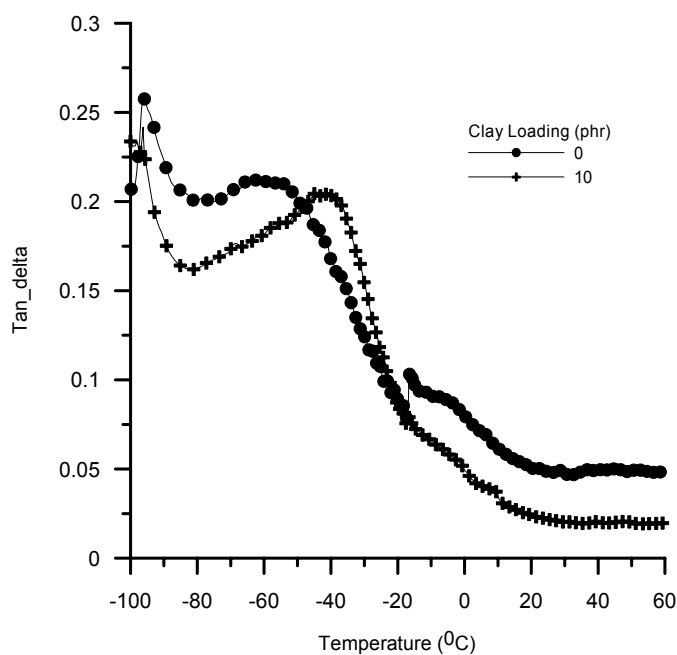
รูปที่ 3.35 แสดงผลของปริมาณเคลย์ต่อค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E') ของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆ โดยจากกราฟทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณเคลย์เท่ากับ 0 phr (ยางที่ไม่สารตัวเติม) กับปริมาณเคลย์เท่ากับ 10 phr (สูตรที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์เข้าไปในระบบจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่าการทดสอบในครั้งนี้เป็นการทดสอบที่มีการเปลี่ยนรูปต่ำมาก (Strain 0.5%) ดังนั้นเคลย์บางส่วนจึงยังจับตัวกันอยู่โมเลกุลของยางที่แทรกกระหว่างเคลย์จึงถูกรั้งไว้ ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น (ยุทธชาติ, 2549; Da Costa et al., 2000)

ค่า $\tan \delta$ ของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.36 โดยจากกราฟทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณเคลย์เท่ากับ 0 phr กับปริมาณเคลย์เท่ากับ 10 phr ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเคลย์เข้าไปในระบบจะส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ เนื่องมาจากสารตัวเติมที่เติมลงไปจะไปเพิ่มโครงสร้างสารตัวเติม (Filler network) ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของโมเลกุลของยางขณะที่ยางผสมเกิดการผิดรูปเชิงพลวัต (ยุทธชาติ, 2549; Sombatsompop et al., 2004) และจากการศึกษาอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) ซึ่งก็คือค่าอุณหภูมิที่มีค่า $\tan \delta$ สูงสุด พบว่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการผสมเคลย์ลงไปในยางธรรมชาติ เปรียบเทียบกับไม่มีการผสมเคลย์ โดยกรณีที่ไม่มีการผสมเคลย์อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเท่ากับ -60 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมเคลย์ลงไปเท่ากับ 10 phr จะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น

เป็น -40 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้นแสดงว่าการมีสภาพเป็นยางอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ (ยุทธชาติ, 2549) นอกจากนี้ยังแสดงว่าพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคเคลย์และเนื้อยางมีความแข็งแรงสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง TEM ที่มีโครงสร้างผสมระดับนาโนเกิดขึ้น (รูปที่ 1.22 และ 3.46)



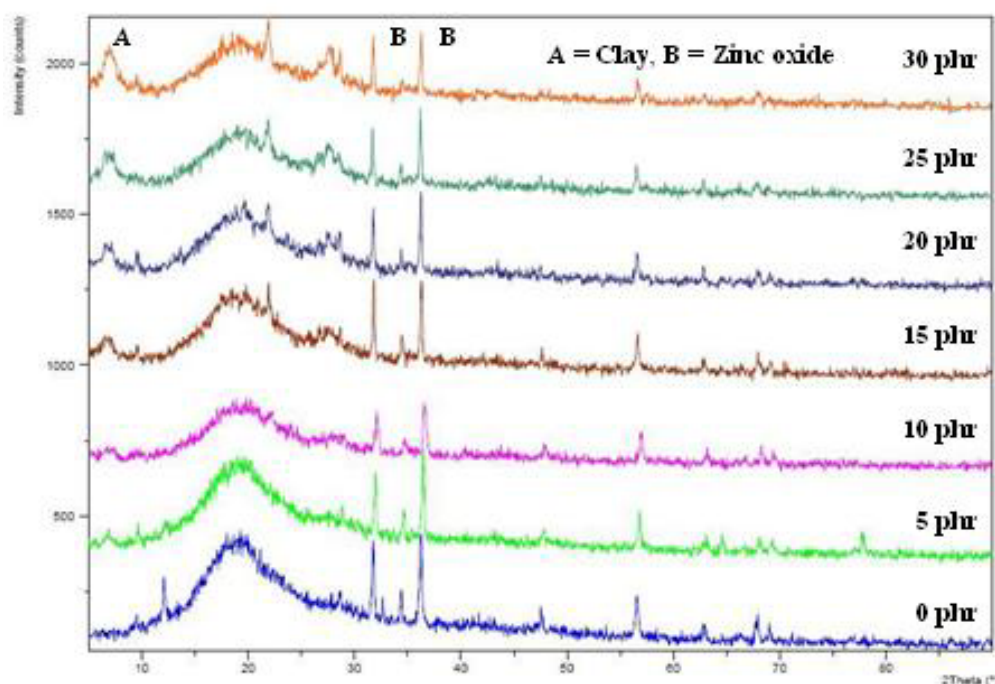
รูปที่ 3.35 ผลของปริมาณเคลย์ต่อค่ามอดุลัสสะสม



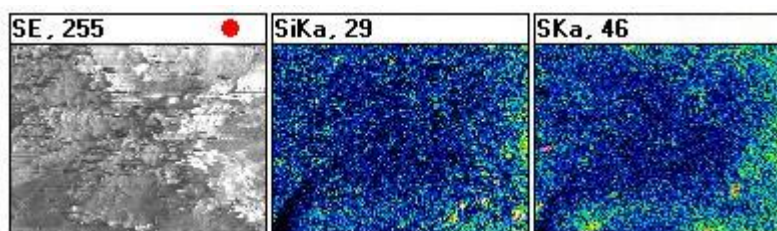
รูปที่ 3.36 ผลของปริมาณเคลย์ต่อค่า $\tan \delta$

3.2.4 การอภิปรายผลของปริมาณเคลือบที่ผสมลงไปอย่างธรรมชาติ

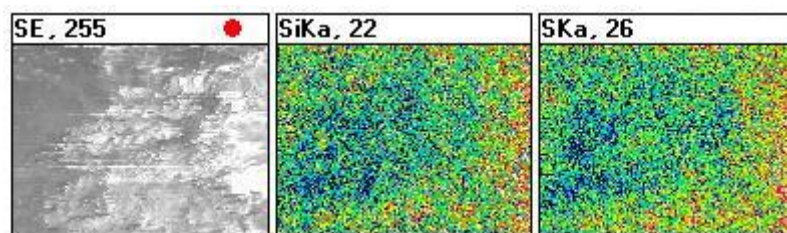
ผลการศึกษาการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD พบว่าเมื่อมีการผสมเคลือบลงไปอย่างธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มข้นของเฟส (ที่มุม $2\theta = 4$ องศา) เคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.37 แต่จะไม่พบเฟสใหม่ นอกเหนือเฟสที่เป็นเคลือบ ยาง และสารเคมีที่ใช้ผสม แสดงว่าการผสมของสารตัวเติมเคลือบส่วนใหญ่เป็นการผสมทางกายภาพ กล่าวคือเคลือบเข้าไปกระจายตัวอยู่ในเนื้อของยาง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 3.38-3.43 โดยพบว่า เมื่อผสมเคลือบเข้าไปในปริมาณ 10 phr ทำให้เกิดการกระจายตัวของเคลือบอย่างดี ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation ของยางผสมที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.39 สังเกตการกระจายตัวของธาตุ Si) แต่เมื่อผสมเคลือบในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มที่จะเกิดการจับตัวเป็นก้อน ทำให้การกระจายตัวลดลงค่าการทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation ของยางผสมจึงลดลงด้วย



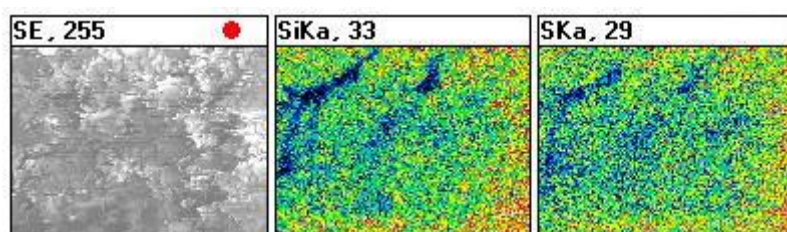
รูปที่ 3.37 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางธรรมชาติผสมเคลือบ ในปริมาณต่างๆ



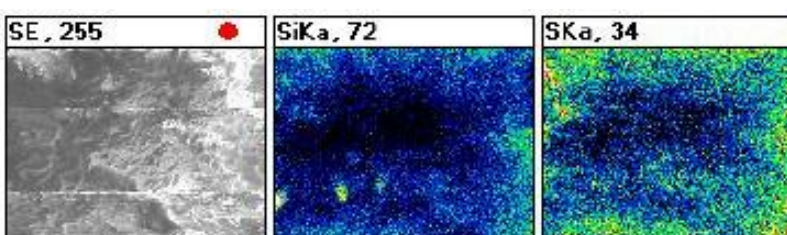
รูปที่ 3.38 ผลการกระจายตัวของเคลือบ เมื่อผสมเคลือบ 5 phr ลงในยางธรรมชาติ



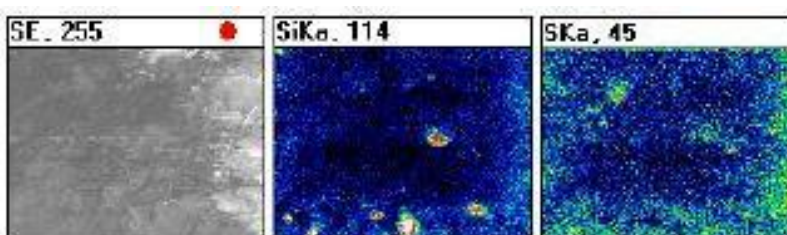
รูปที่ 3.39 ผลการกระจายตัวของเซลล์ เมื่อผสมเคลย์ 10 phr ลงในยางธรรมชาติ



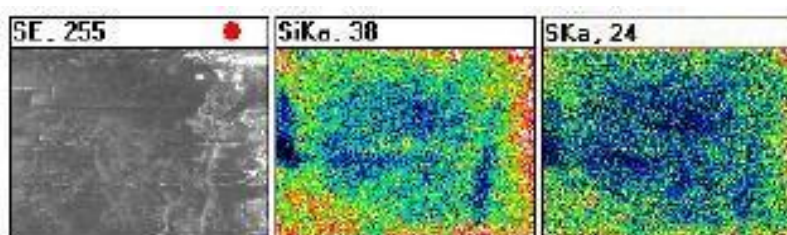
รูปที่ 3.40 ผลการกระจายตัวของเซลล์ เมื่อผสมเคลย์ 15 phr ลงในยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.41 ผลการกระจายตัวของเซลล์ เมื่อผสมเคลย์ 20 phr ลงในยางธรรมชาติ



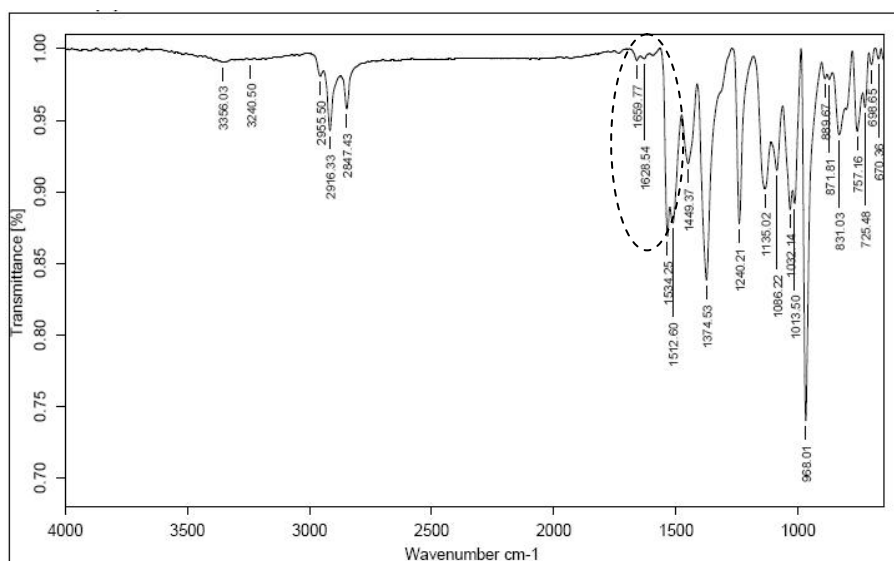
รูปที่ 3.42 ผลการกระจายตัวของเซลล์ เมื่อผสมเคลย์ 25 phr ลงในยางธรรมชาติ



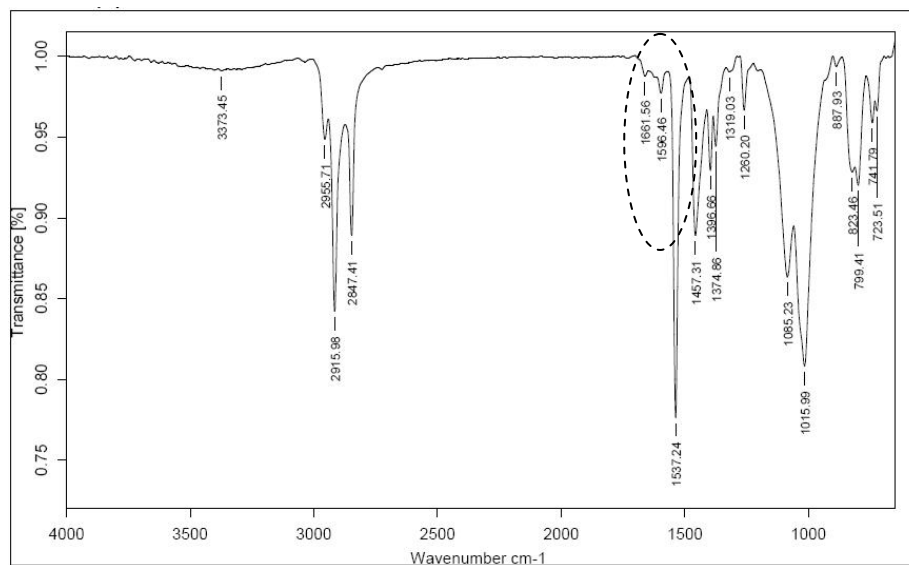
รูปที่ 3.43 ผลการกระจายตัวของเซลล์ เมื่อผสมเคลย์ 30 phr ลงในยางธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของยางด้วยผลการวิเคราะห์จากเครื่อง FTIR ซึ่งรายละเอียดของช่วงอินฟราเรดที่บอกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็น Cis-1, 4-Polyisoprene ตามทฤษฎีและผลการทดลองของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม นั้นได้อธิบายไว้แล้วในส่วนของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน (รูปที่ 3.22) โดยเมื่อผสมเคลย์ลงไป 10 phr และ 25 phr ดังรูปที่ 3.44 และ 3.45 ตามลำดับ ผลของ FTIR จะออกมาคล้ายกับของยางที่ผสมท่อนาโนคาร์บอน พิกที่ปรากฏขึ้นใหม่ตรงตำแหน่งเลขคลื่น 1629 cm^{-1} หรือ 1659 cm^{-1} ซึ่งเป็น Interlayer water deformation vibrations และที่เลขคลื่น 969 cm^{-1} เป็น Si-O stretching ซึ่งมาจากเคลย์ที่เกิดพันธะทางเคมีกับโมเลกุลยาง (Peng et al., 2005) อย่างไรก็ตามที่เลขคลื่นนี้จะเกิดขึ้นในยางธรรมชาติเช่นเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของยางสูงขึ้น โดยทนทานต่อแรงดึงมากขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าผสมเคลย์ในปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 10 phr เป็น 25 phr จะเกิดพันธะทางเคมีในยางเหมือนกัน แต่ความแข็งแรงจะต่ำลงเมื่อผสมเคลย์เข้าไป 25 phr เพราะเนื่องจากอิทธิพลของการจับตัวเป็นก้อนของเคลย์ทำให้การกระจายตัวต่ำลงนั่นเอง

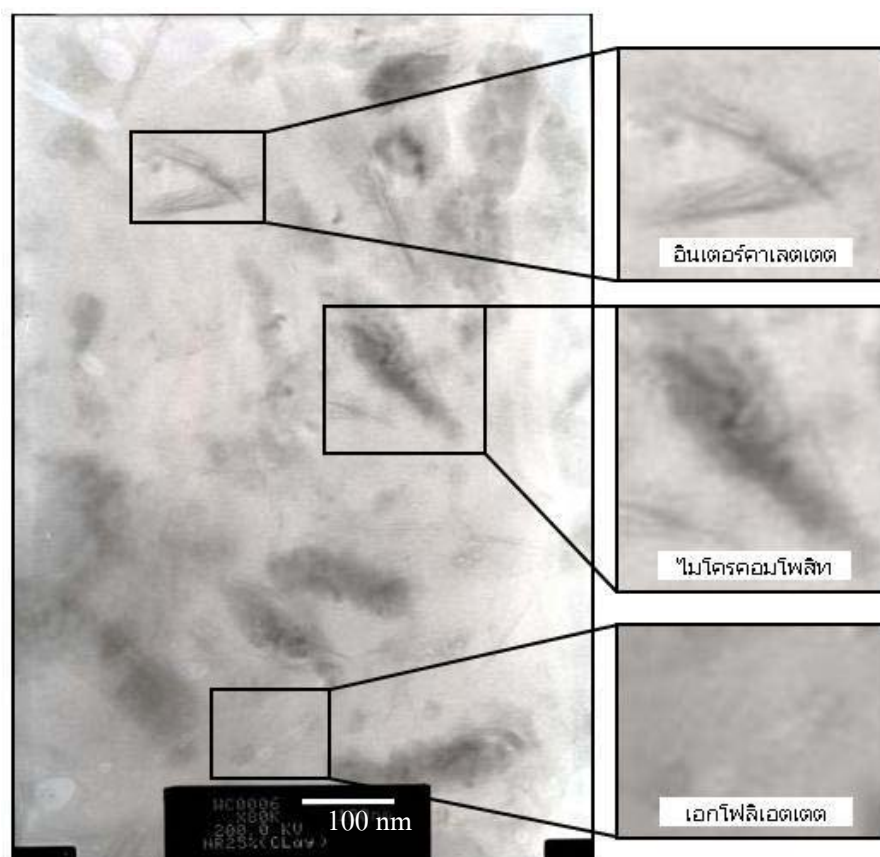
จากผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง TEM โดยเป็นการนำชิ้นงานในสูตรที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (ปริมาณเคลย์เท่ากับ 10 phr) ไปตรวจสอบ พบว่าการใช้เครื่อง TEM เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของยางธรรมชาติผสมเคลย์ในการทดลองครั้งนี้ยังไม่สามารถบ่งบอกได้ชัดเจนว่าการเข้าไปผสมของเคลย์เป็นแบบใดในจำนวน 3 แบบ (ไมโครคอมโพสิต อินเตอร์คาเลตเตด และเอกโฟลิเอตเตด) ที่กล่าวมาในส่วนของบทที่ 1 (รูปที่ 1.21) แต่พอจะสรุปได้ว่ามีแบบไมโครคอมโพสิตมากที่สุด ดังรูปที่ 3.44 และบางบริเวณจะเกิดเป็นวัสดุผสมระดับนาโน จึงทำให้สามารถเสริมแรงให้กับเนื้อยางได้



รูปที่ 3.44 ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ 10 phr



รูปที่ 3.45 ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมเคลย์ 25 phr

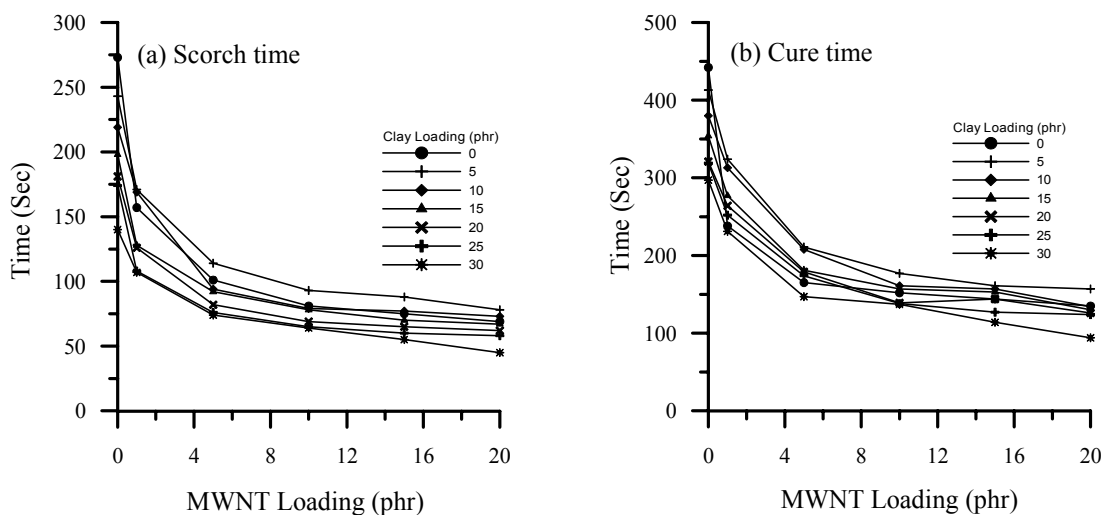


รูปที่ 3.46 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง TEM ของยางธรรมชาติที่ผสมเคลย์ ที่ปริมาณ 10 phr

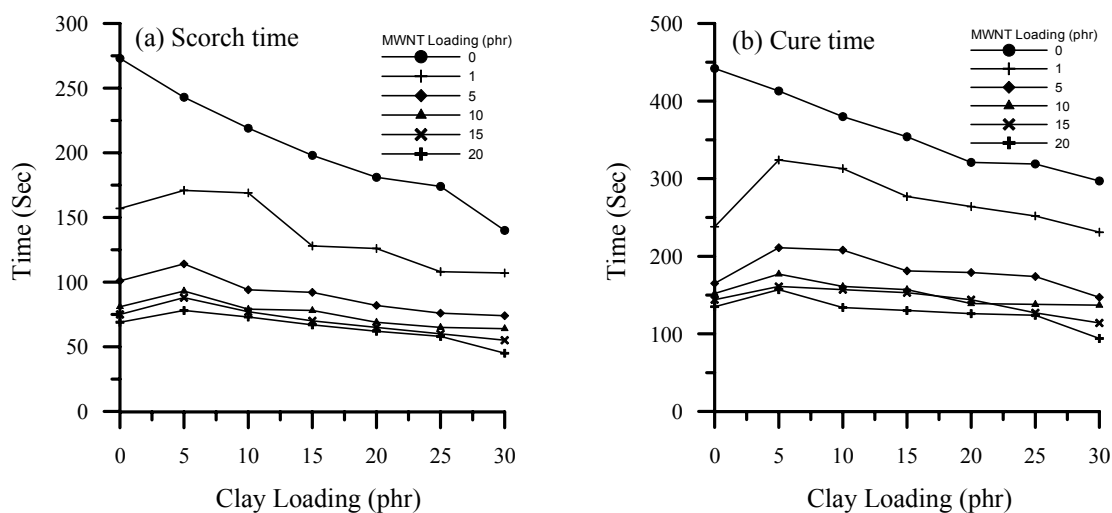
3.2.5 ผลของปริมาณท่อนานคาร์บอนและเคลย์ที่ผสมลงไปอย่างธรรมชาติต่อสมบัติต่างๆ

3.2.5.1 คุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure characteristics)

ผลของการศึกษาลักษณะการทำให้ยางคงรูปของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนานคาร์บอนและเคลย์ โดยเมื่อนำข้อมูลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงผลการทดลอง 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบแรกแสดงผลการทดลองในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณท่อนานคาร์บอน (รูปที่ 3.47) และอีกรูปแบบเป็นการแสดงผลการทดลองในรูปความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณเคลย์ (รูปที่ 3.48) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณท่อนานคาร์บอนที่ปริมาณเคลย์ต่างๆ นั้นค่า Scorch time และ Cure time มีค่าลดลง เช่นเดียวกันหากพิจารณาในส่วนของการเพิ่มปริมาณเคลย์ก็ส่งผลต่อค่า Scorch time และ Cure time แบบเดียวกัน โดยสารตัวเติมทั้งสองชนิดจะมีพฤติกรรมเป็นสารเร่งในการทำให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนเซชันเร็วขึ้น (Arroyo et al., 2003) อย่างไรก็ตามการเติมสารตัวเติมที่มากเกินไปก็จะทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) ลดลง ซึ่งทำให้ความแข็งแรงของยางผสมลดลง จากรูปที่ 3.47 และ 3.48 ยังพบว่าท่อนานคาร์บอนจะมีอิทธิพลต่อ Scorch time และ Cure time มากกว่าเคลย์ เพราะท่อนานคาร์บอนนำความร้อนได้ดี ดังนั้นจึงเป็นตัวเร่งให้เกิดการคงรูปได้เร็วขึ้น



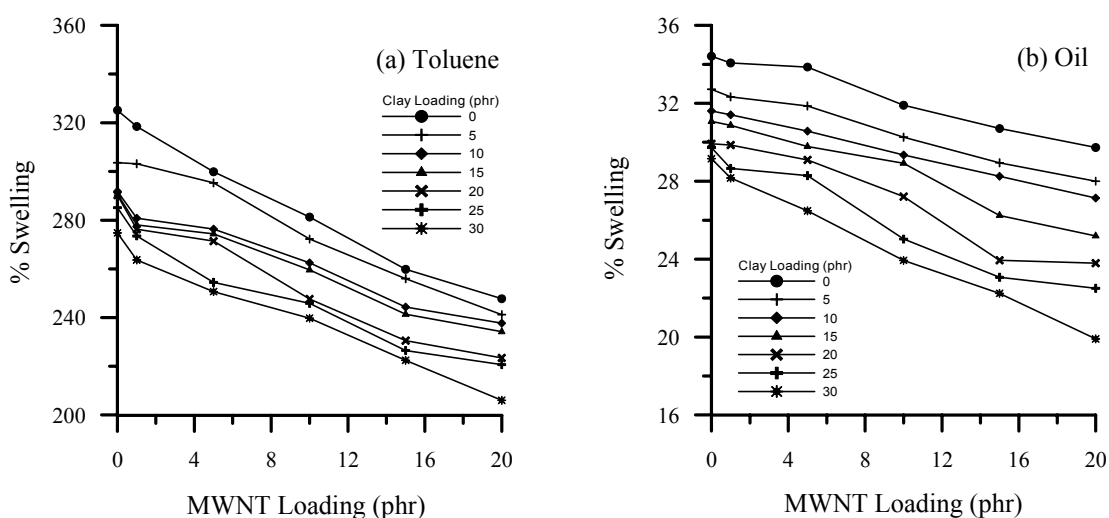
รูปที่ 3.47 ลักษณะการทำให้ยางคงรูป (a) Scorch time และ (b) Cure time ของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณท่อนานคาร์บอน



รูปที่ 3.48 ลักษณะการทำให้ยางคงรูป (a) Scorch time และ (b) Cure time ของยางผสม แสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณเคลย์

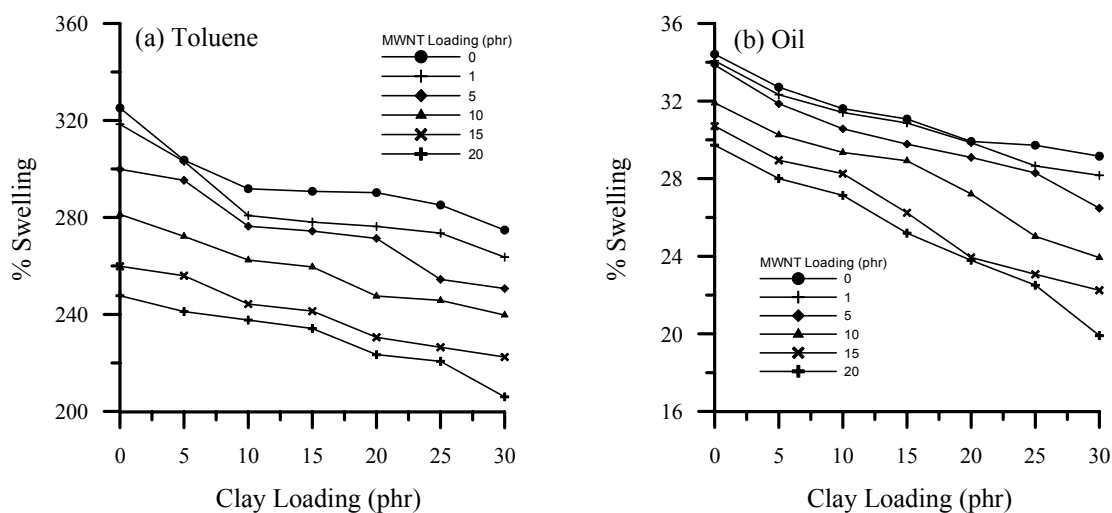
3.2.5.2 ร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

เมื่อเติมสารตัวเติม 2 ชนิดลงไปในเรื่องยางในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการบวมตัวในโทลูอีนและน้ำมันลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.49 และ 3.50 ตามลำดับ เนื่องมาจากว่าการบวมตัวจะเกิดขึ้นกับเนื้อยางเท่านั้น ไม่เกิดกับสารตัวเติม ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเป็นการลดปริมาณเนื้อยางลงในชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบ (Rakchonlatee et al., 2004) จากรูปที่ 3.49 และ 3.50 ยังพบว่าอิทธิพลของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ที่มีต่อร้อยละการบวมตัวในโทลูอีนและน้ำมันเท่าๆ กัน



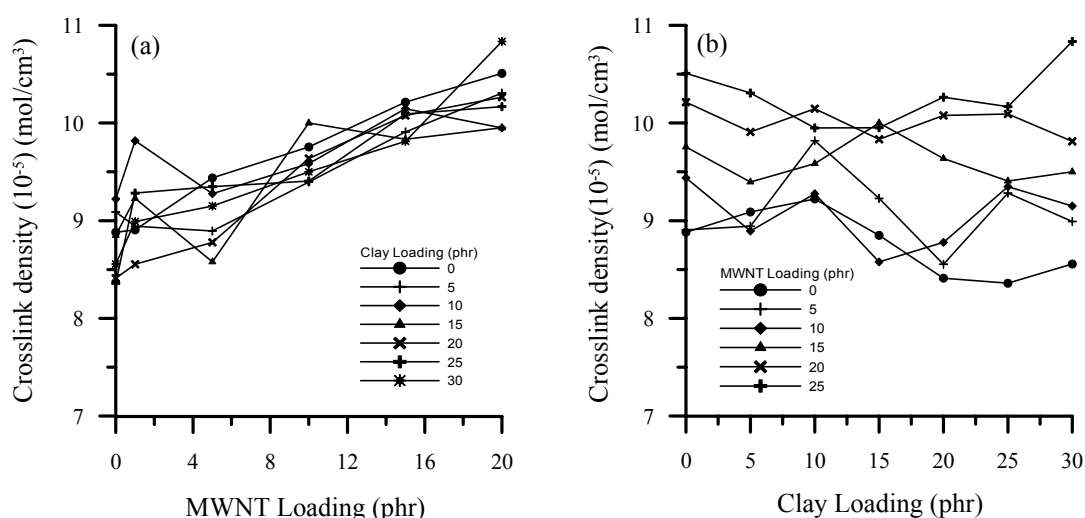
รูปที่ 3.49 ร้อยละการบวมตัว (a) ในโทลูอีน และ (b) ในน้ำมัน ของยางผสม

แสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 3.50 ร้อยละการบวมตัว (a) ในโทลูอีน และ (b) ในน้ำมัน ของยางผสม แสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณเคลย์

ค่าความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมแสดงดังรูปที่ 3.51 จะพบว่าเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มขึ้นค่าดังกล่าวจะมีแนวโน้มสูงขึ้น (รูปที่ 3.51a) เนื่องมาจากการเกาะกันอย่างดีของสารตัวเติมกับเนื้อยาง (ชัชวาล และคณะ, 2550; Arroyo et al., 2006) และท่อนาโนคาร์บอนนำความร้อนได้ดี ดังนั้นจึงเป็นตัวเร่งให้เกิดการคงรูปได้เร็วขึ้น แต่หากพิจารณาเมื่อผสมเคลย์ พบว่าค่าดังกล่าวจะไม่มีรูปแบบที่แน่นอนว่าจะเพิ่มหรือจะลด (รูปที่ 3.51b) เพราะว่าจะเกิดการรวมตัวเป็นก้อนของสารตัวเติม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูงขึ้น นั่นก็คือยางผสมจะมีค่ามอดูลัส ความแข็ง และการต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงขึ้นด้วย

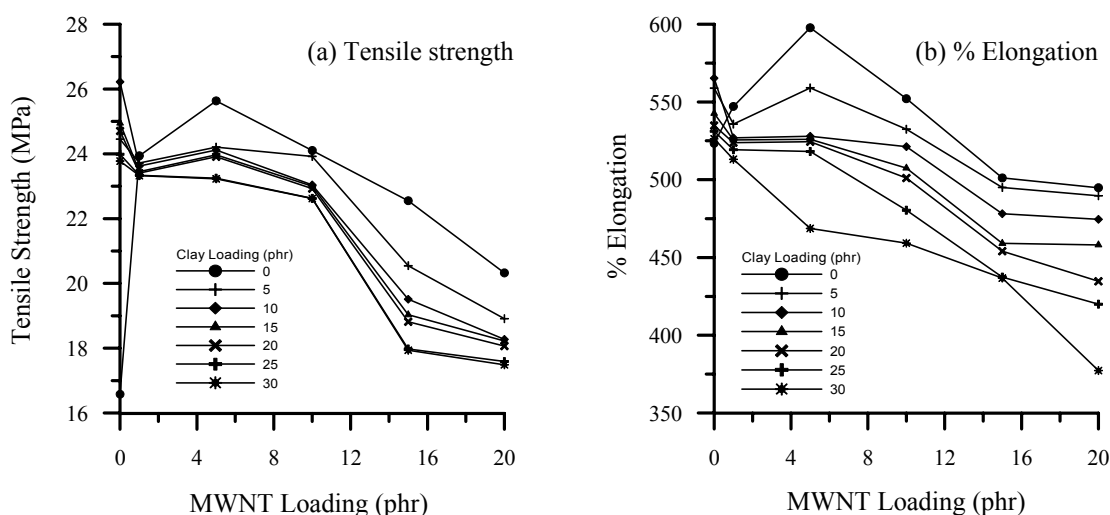


รูปที่ 3.51 ความหนาแน่นการเชื่อมโยงของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติม (a) ท่อนาโนคาร์บอน และ (b) เคลย์

3.2.5.3 การทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength) %Elongation และมอดูลัส (Modulus)

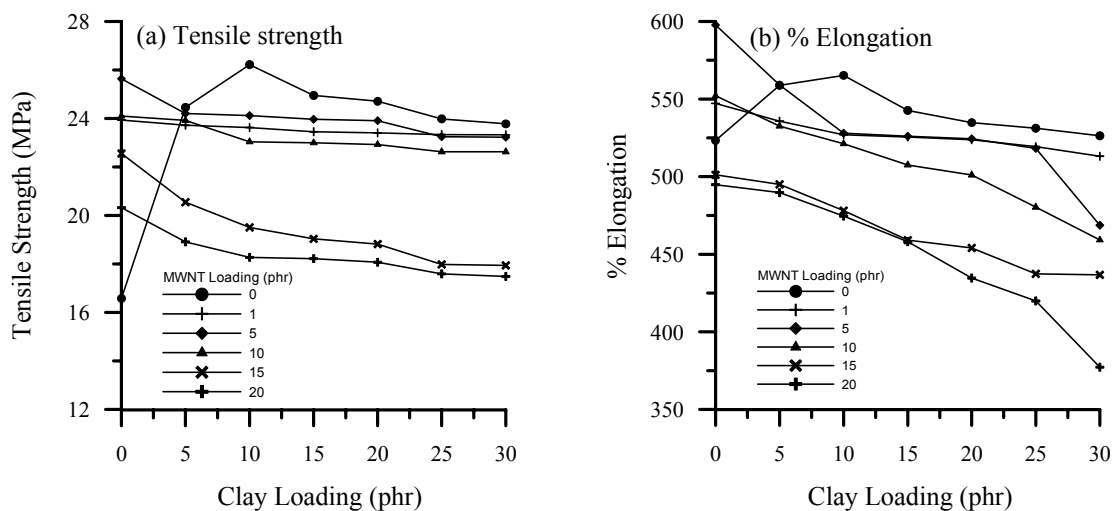
เมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ในยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนหรือเคลย์เพียงอย่างเดียว (รูปที่ 3.52 และ 3.53 ตามลำดับ) เพราะว่ามีผลการผสมสารตัวเติมมากเกินไปจะส่งผลให้การกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อยางไม่ดี ดังนั้นจึงส่งผลให้ทั้งสองค่าต่ำลง แต่สำหรับการทนทานต่อแรงดึงนั้นในการทดลองครั้งนี้ยังคงมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมสารตัวเติม โดยปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง และค่า %Elongation ที่สูงสุด คือ ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ โดยมีค่าเท่ากับ 24.21 MPa และ 559.07% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมจะมีค่าเพิ่มขึ้น 46.00% และ 6.80% ตามลำดับ

ส่วนค่ามอดูลัสแสดงดังรูปที่ 3.54 ซึ่งจะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เพิ่มมากขึ้นในยางธรรมชาติ จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม และยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมเพียงสารเดียว เพราะว่าการกระจายตัวที่ดีของสารตัวเติม และจากสมบัติอันดีเยี่ยมของสารตัวเติม โดยจากผลของค่ามอดูลัสพบว่าค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นถึง 12.55 MPa เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ 20 phr และ 30 phr หรือเพิ่มจากยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเท่ากับ 359.4%

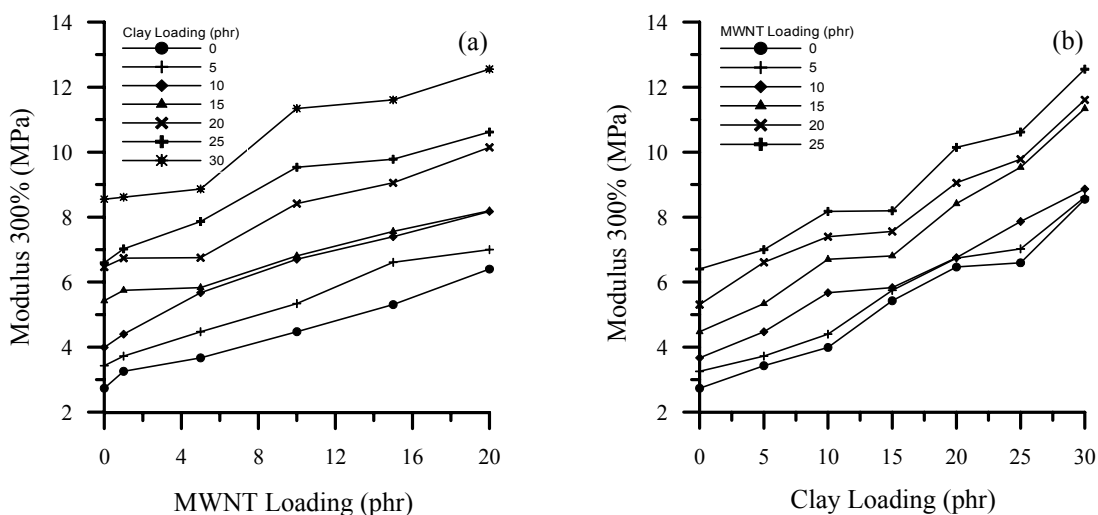


รูปที่ 3.52 การทนทานต่อแรงดึง (a) และ %Elongation (b) ของยางผสม

แสดงผลในรูปแบบความสัมพันธ์กับปริมาณท่อนาโนคาร์บอน



รูปที่ 3.53 การทนทานต่อแรงดึง (a) และ %Elongation (b) ของยางผสม แสดงผลในรูปความสัมพันธ์กับปริมาณเคลย์



รูปที่ 3.54 มอดูลัสของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติม (a) ท่อนาโนคาร์บอน และ (b) เคลย์

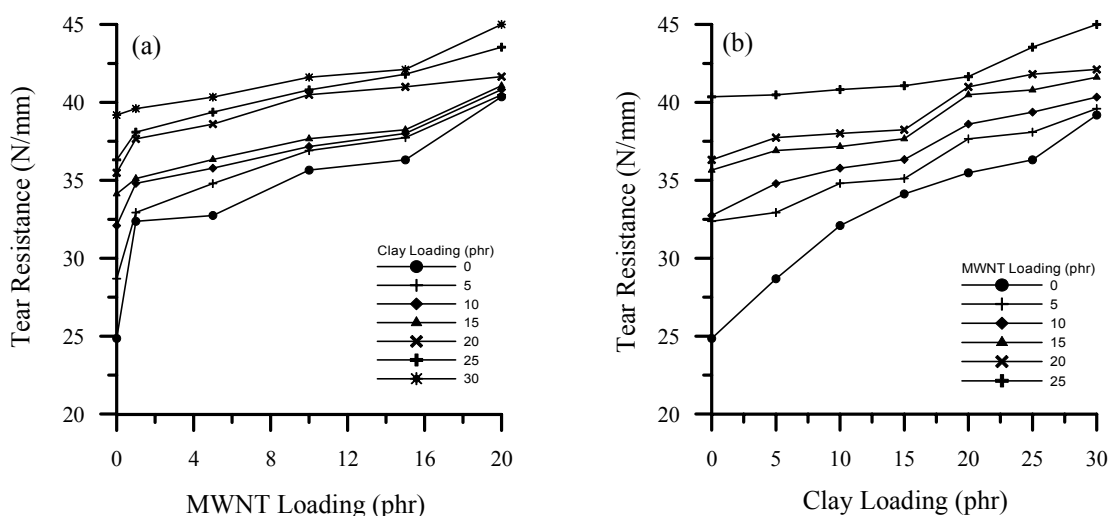
3.2.5.4 การต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

การต้านทานต่อการฉีกขาดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอน และเคลย์เพิ่มมากขึ้น (รูปที่ 3.55) เนื่องมาจากการเกิดการเกาะกันที่ดีระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยาง ที่เป็นเช่นนี้เพราะจากกระบวนการผสมสารตัวเติมเข้าไปในเนื้อยาง โดยเริ่มต้นโดยการผสมเคลย์ที่เป็นสเลอรี ซึ่งในขั้นตอนนี้ น้ำจะเป็นตัวกลางที่แยกเคลย์ออกเป็นแผ่นๆ ได้ดี เคลย์และอนุภาคยาง จะเกิดเป็นประจุลบที่ผิวเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้เกิดการแขวนลอยได้ดี ในขณะที่ทำให้แห้ง อนุภาคเคลย์และยางจะเกาะติดกัน ซึ่งมีความแข็งแรงพอที่จะทำให้เกิดเป็นวัสดุผสมระดับนาโน

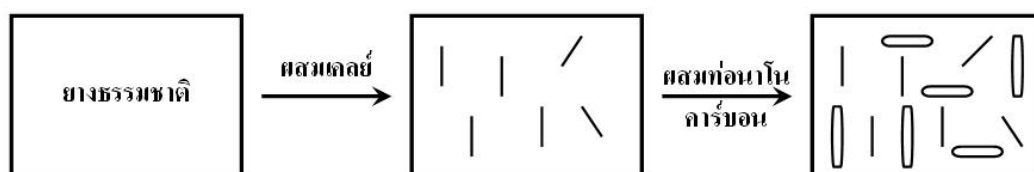
หลังจากแห้งแล้วก็จะมีแรงเกาะติดกันแบบไฟฟ้าสถิต (Valadares, et al., 2006) และเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนในชั้นตอนต่อมา ท่อนาโนคาร์บอนจะเข้าไปแทรกตัวในบริเวณที่ปริมาณของเคลย์มีน้อย หรือไม่มีเลย (รูปที่ 3.56) จึงมีผลความสม่ำเสมอของสารตัวเติมในเนื้ออย่างสูง ดังนั้นจึงมีผลรวมกันเพื่อให้ยางผสมมีค่าการต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงขึ้นนั่นเอง

3.2.5.5 ความแข็ง (Hardness)

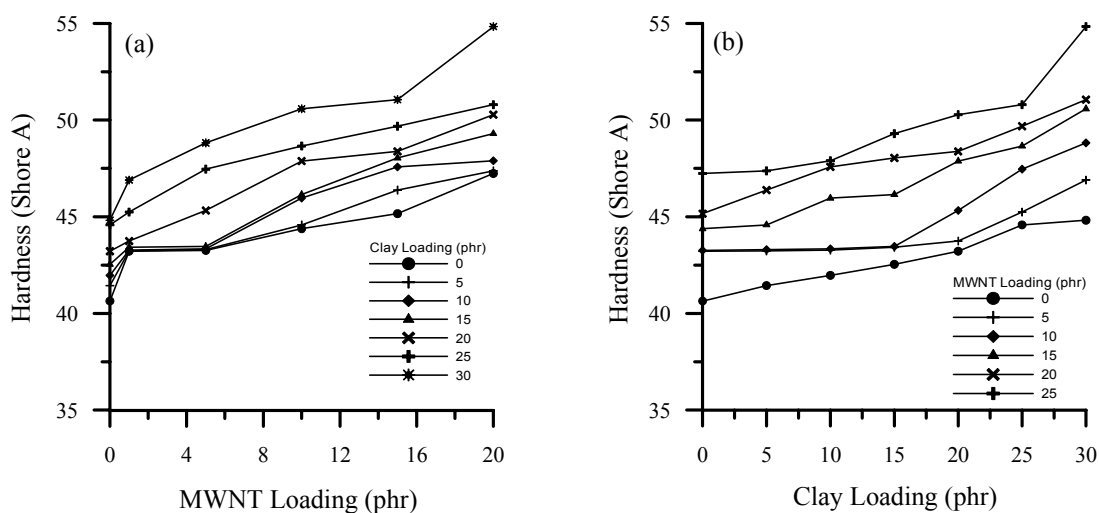
เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เข้าไปในยางในปริมาณเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.57 เพราะอิทธิพลของสารตัวเติมทั้งสองที่มีความแข็งมากกว่าเนื้อยางดังกล่าวมาแล้ว และความแข็งของยางที่ผสมด้วยสารตัวเติมทั้งสองตัวจะสูงกว่าสารตัวเติมที่เป็นอย่างใดอย่างหนึ่ง ทั้งนี้จะเกิดจากการผสมสารตัวเติมทั้งสองตัวไม่พร้อมกัน กล่าวคือ เมื่อผสมเคลย์เข้าไป การกระจายตัวของเคลย์จะกระจายตัวระดับหนึ่ง แต่เมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มเข้าไป ท่อนาโนคาร์บอนจะเข้าไปกระจายตัวในบริเวณที่เคลย์กระจายตัวน้อย หรือบริเวณที่ไม่มีเคลย์กระจายตัวอยู่ ดังรูปที่ 3.56 จึงมีผลความสม่ำเสมอของสารตัวเติมในเนื้ออย่างสูง



รูปที่ 3.55 การต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติม (a) ท่อนาโนคาร์บอน และ (b) เคลย์



รูปที่ 3.56 ภาพแนวความคิดการเข้าไปแทรกตัวของสารตัวเติมในเนื้อยาง



รูปที่ 3.57 ความแข็งของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับปริมาณสารตัวเติม (a) ท่อนาโนคาร์บอน และ (b) เคลย์

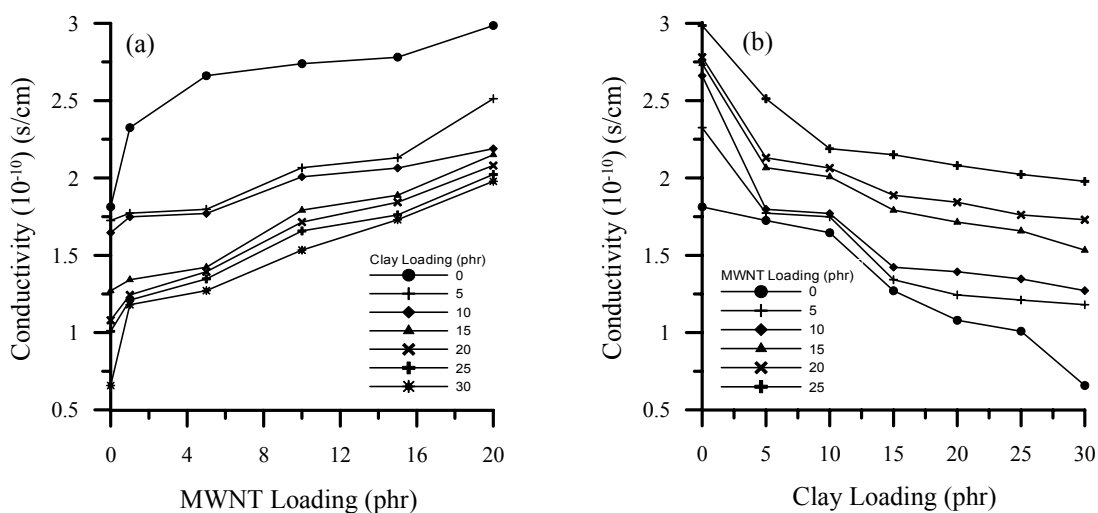
3.2.5.6 สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

ผลการทดสอบค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน และเคลย์ในปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.58 ซึ่งจะพบว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.58a) เมื่อเทียบกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม เพราะว่าท่อนาโนคาร์บอนจะทำหน้าที่คล้ายสะพานทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่ายางผสมท่อนาโนคาร์บอนในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอน นั่นก็คือยางผสมยังคงแสดงความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูง แต่เมื่อมีการผสมเคลย์ลงไปในยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 3.58b) นั่นก็คือมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพราะว่าเคลย์ที่ผสมลงไปเป็นสารตัวเติมที่ไม่นำไฟฟ้า ดังนั้นจึงเข้าไปขัดขวางการนำไฟฟ้า

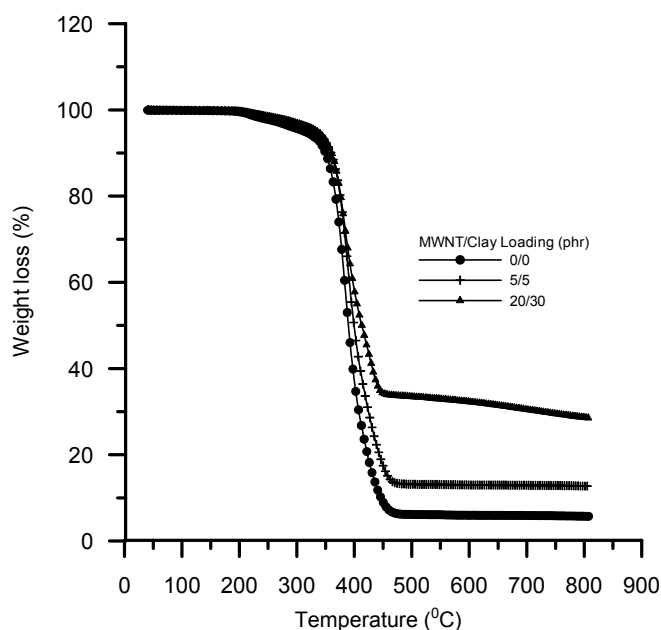
3.2.5.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราฟิมेटริก

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนเมื่อวัดน้ำหนักที่หายไปของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ เมื่อให้ความร้อนในปริมาณที่สูงภายใต้การไหลเวียนของก๊าซไนโตรเจน แสดงผลการทดสอบในตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.59 พบว่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เมื่อน้ำหนักของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนหายไปที่ 5%, 10% และ 50% พบว่าค่าอุณหภูมิที่ตรวจสอบได้มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม ดังนั้นเมื่อผสมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดลงไปส่งผลให้ยางผสมทนอุณหภูมิมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณแก้วที่เหลือของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอน และเคลย์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณแก้วที่เหลือของยางธรรมชาติที่ผสมด้วยท่อนาโนคาร์บอนเคลย์ ที่ปริมาณต่างๆ จะมีค่ามากกว่าของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม เพราะมีท่อนาโนคาร์บอนซึ่งในท่อนาโนคาร์บอนมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างด้วย และมีเคลย์เป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง ทำให้มีปริมาณแก้วสูงกว่าปริมาณแก้วของยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.58 สภาพการนำไฟฟ้าของยางผสมแสดงผลในรูปความสัมพันธ์เปรียบเทียบปริมาณสารตัวเติม (a) ท่อนาโนคาร์บอน และ (b) เคลย์



รูปที่ 3.59 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ที่ปริมาณต่างๆ

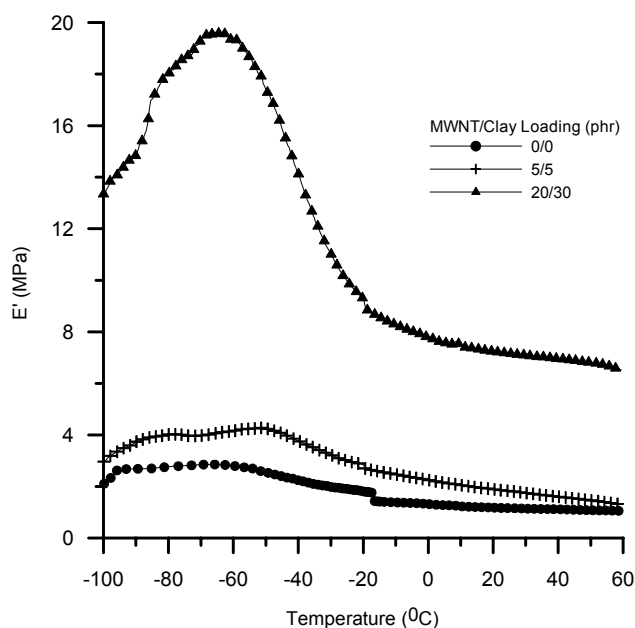
ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน และเคลือบด้วยเครื่อง TGA

ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน/เคลือบ (phr)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	ปริมาณถ่าน อุณหภูมิ 800 °C (%)
0/0	313.88	348.60	389.57	5.73
5/5	328.04	359.22	399.78	12.77
20/30	335.09	360.91	412.96	28.66

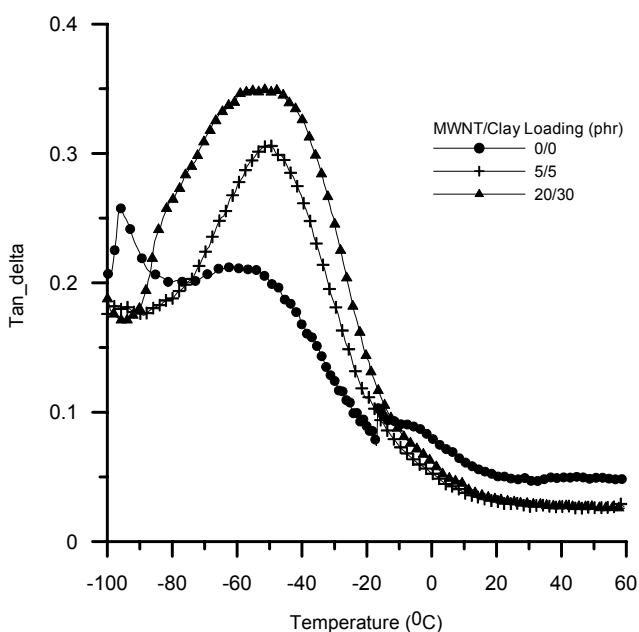
3.2.5.8 ผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

รูปที่ 3.60 แสดงผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและปริมาณเคลือบต่อค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E') ของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อผสมปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและเคลือบรวมกันลงในยางธรรมชาติ จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก เนื่องจากการทดสอบในครั้งนี้เป็นการทดสอบที่มีการเปลี่ยนรูปต่ำมาก (Strain 0.5%) ดังนั้นสารตัวเติมบางส่วนจึงยังจับตัวกันอยู่กับโมเลกุลของยางที่แทรกกระหว่างสารตัวเติม (รูปที่ 3.60) จึงถูกรั้งไว้ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้มอดูลัสสะสมมีค่าสูงขึ้น

ส่วนรูปที่ 3.61 ผลของปริมาณเคลือบต่อค่า $\tan \delta$ ของยางผสมที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทั้งท่อนาโนคาร์บอนและเคลือบเข้าไปในระบบจะส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการผสมสารตัวเติมในปริมาณที่มากจะทำให้เกิดแรง Faction ระหว่างสารตัวเติมกับสารตัวเติม และสารตัวเติมกับโมเลกุลของยาง ซึ่งแรงดังกล่าวมีผลให้ค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้น หรือกล่าวอีกอย่างว่าวัสดุผสมมีความแข็งแรงลดลง และจากการศึกษาอุณหภูมิสภาพแก้ว (T_g) ซึ่งก็คือค่าอุณหภูมิที่มีค่าตัวประกอบของการสูญเสียสูงสุด พบว่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลือบลงไปในยางธรรมชาติรวมกันเปรียบเทียบกับไม่มีการผสมสารตัวเติม โดยกรณีที่ไม่มีการผสมสารตัวเติมอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเท่ากับ -60 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลือบลงไปเท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น -50 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลือบลงไปเท่ากับ 20 phr และ 30 phr ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น -50 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้นแสดงว่าการมีสภาพเป็นยางอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้สามารถใช้งานอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้



รูปที่ 3.60 ผลของปริมาณสารตัวเติมต่อค่ามอดูลัสสะสม

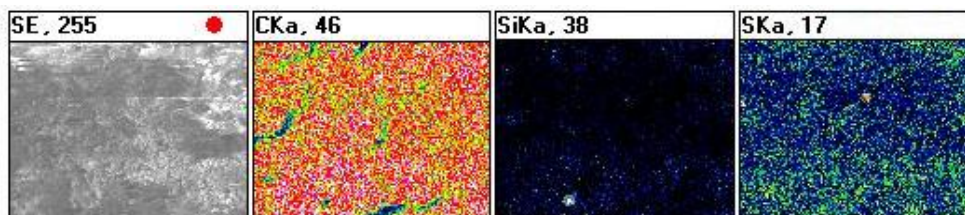


รูปที่ 3.61 ผลของปริมาณสารตัวเติมต่อค่า $\tan \delta$

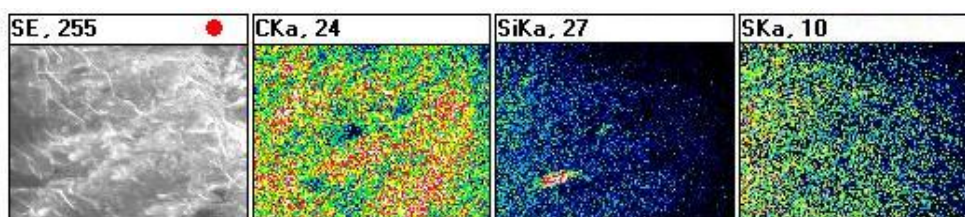
3.2.6 การอภิปรายผลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ที่ผสมลงไปในยางธรรมชาติ

การกระจายตัวของสารตัวเติมโดยทำการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุ C และ Si ที่เป็นองค์ประกอบหลักของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ ตามลำดับ ด้วยเทคนิค X-ray mapping ซึ่งได้ตรวจสอบเพียง 2 อัตราส่วนของสารตัวเติม ได้แก่ ยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ (ให้ค่าการทนแรงดึงสูงสุด) กับ ยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ (ให้ค่าการทนแรงดึงสูงสุด) กับ ยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ (ให้ค่าการทนแรงดึงสูงสุด) กับ ยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ (ให้ค่าการทนแรงดึงสูงสุด)

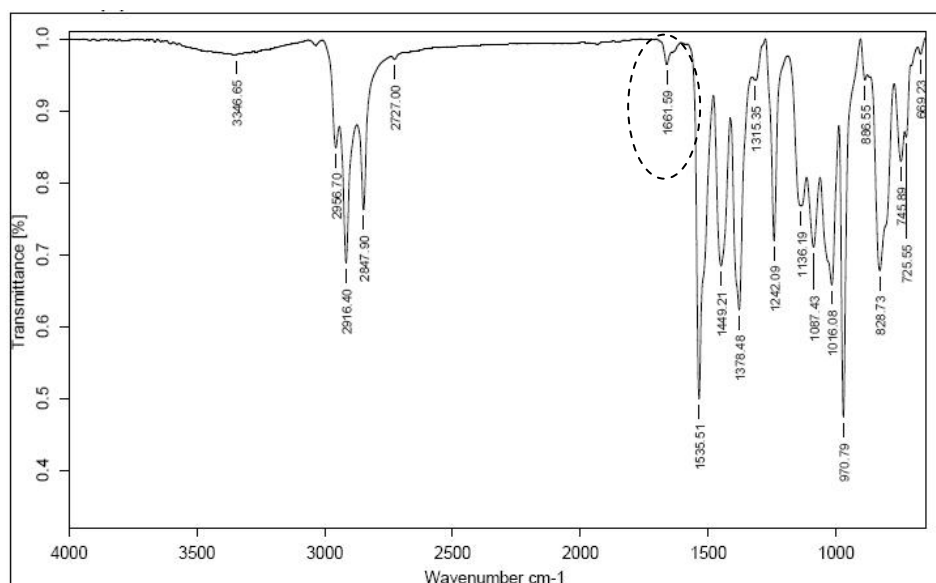
นาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 20 phr และ 30 phr ตามลำดับ (ปริมาณสารตัวเติมมากที่สุด) ผลการตรวจสอบเป็นดังรูปที่ 3.62 และ 3.63 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าเมื่อใช้ปริมาณท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ จะมีการกระจายตัวของ C และ Si ได้ดี จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าการทนทานต่อแรงดึง และ %Elongation สูงกว่าที่สภาวะอื่นๆ



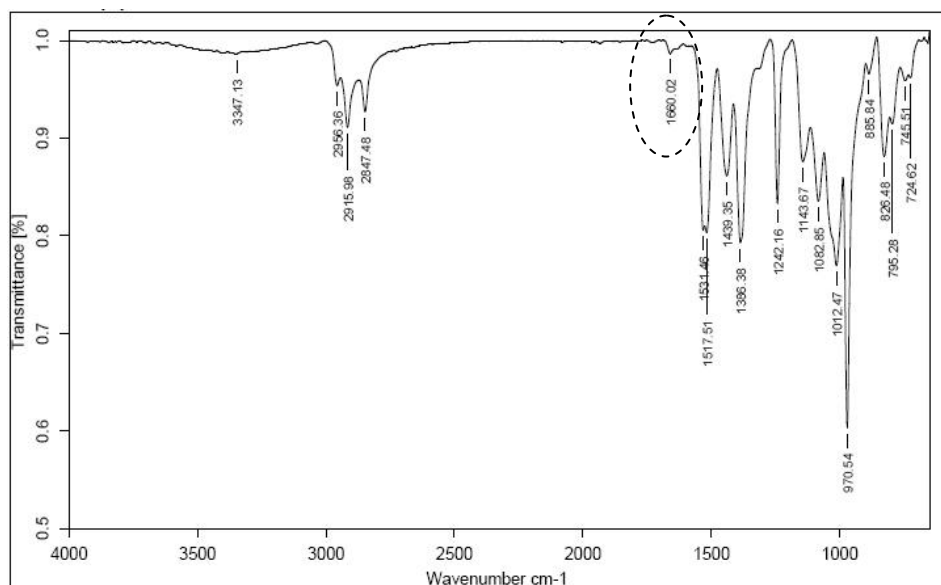
รูปที่ 3.62 การกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์ เมื่อผสมท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ ลงในยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.63 การกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์ เมื่อผสมท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์ 20 phr และ 30 phr ตามลำดับ ลงในยางธรรมชาติ



รูปที่ 3.64 ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนานาโนคาร์บอนและเคลย์ ที่ปริมาณ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ



รูปที่ 3.65 ผล FTIR ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ ที่ปริมาณ 20 phr และ 30 phr ตามลำดับ

3.2.7 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางผสมในงานวิจัยต่างๆ

เป็นการนำข้อมูลตัวอย่างสมบัติต่างๆ ของยางผสมของงานวิจัยในครั้งนี้ เปรียบเทียบกับยางผสมในงานวิจัยต่างๆ ที่ได้ทำการศึกษามาก่อน เพื่อนำผลการเปรียบเทียบไปพิจารณาในการเลือกใช้งานยางผสมให้เหมาะกับงานที่ต้องการต่อไป

จากข้อมูลในตารางที่ 3.6 เมื่อเปรียบเทียบโดยไม่คำนึงถึงชนิดของยาง และกระบวนการผลิตของยางผสมในงานวิจัยครั้งนี้กับงานวิจัยอื่นๆ เป็นดังนี้ ยางผสมท่อนาโนคาร์บอนของงานวิจัยนี้กับยางผสมท่อนาโนคาร์บอนของ Shanmugharaj และคณะ (2007) นั้นพบว่า ยางผสมในงานวิจัยครั้งนี้มีสมบัติต่างๆ ค่อนข้างดีทั้งๆ ที่ท่อนาโนคาร์บอนไม่มีการปรับปรุงผิวมาก่อน ส่วนยางผสมเคลย์ของงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ (Arroyo et al., 2006; Sharif et al., 2005; Valadares et al., 2006 และ Wu et al., 2005) พบว่าสมบัติของยางผสมเคลย์ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ และอาจจะมากกว่าในบางงานวิจัย ส่วนสมบัติของยางผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ นั้นงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้มีน้อยมากจึงไม่มีข้อมูลมาเปรียบเทียบ และเมื่อพิจารณาในส่วนของงานวิจัยครั้งนี้จะพบว่า หากต้องการใช้งานยางผสมในงานที่ต้องการการทานต่อแรงดึงสูงๆ นั้นควรเลือกใช้งานยางผสมท่อนาโนคาร์บอน 5 phr หรือ ยางผสมเคลย์ 10 phr เพราะมีค่าการทานทานต่อแรงดึงที่สูง (25.6 MPa และ 26.2 MPa ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้น 54.6% และ 58.2% ตามลำดับ) แต่หากมีปัจจัยเรื่องต้องการลดต้นทุนในการผลิตเพิ่มเข้ามาด้วยนั้น ขอแนะนำให้ใช้ยางผสมเคลย์เพราะว่าราคาของเคลย์ถูกกว่าท่อนาโนคาร์บอนมาก แต่หากต้องการใช้งานที่ต้องการค่ามอดูลัสสูงๆ และมีสมบัติอื่นๆ ไม่ค่อยมากนัก และต้นทุนในการผลิตไม่สูงนั้น ควรใช้

งานยางผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ที่ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ เท่ากับ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ เพราะมีค่ามอดูลัส และการทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 315.0% และ 36.5% ตามลำดับ จากตัวอย่างที่นำเสนอเป็นเพียงการยกตัวอย่างที่ต้องการใช้งานยางผสมในบางงานบาง ภาวะเท่านั้น หากต้องการใช้งานยางผสมที่ภาวะอื่นๆ ที่ต้องการสมบัติเด่นด้านอื่นๆ สามารถ พิจารณาข้อมูลและรายละเอียดของยางผสมได้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางผสมในงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัย	ชนิด NR	สารตัวเติม (phr)		Tensile strength		Elongation		Modulus 300%		Tear resistance		Hardness		หมายเหตุ (สารตัวเติม)
		MWNT	Clay	MPa	+/- %	%	+/- %	MPa	+/- %	N/mm	+/- %	Shore A	+/- %	
Shanmugaraj et al., 2007	SMR	1	-	20.0	-7.8	481	-18.9	8.12	34.7	-	-	-	-	-
		1	-	26.2	20.7	559	-5.7	7.53	24.9	-	-	-	-	ปรับปรุงผิว
This work	NR Latex	1	-	23.9	44.4	547.2	4.5	3.3	19.0	32.4	30.3	43.2	6.3	-
		5	-	25.6	54.6	597.8	14.2	3.7	34.2	32.7	31.8	43.3	6.4	
		10	-	24.1	45.4	552.1	5.5	4.5	63.8	35.7	43.5	44.4	9.2	
		15	-	22.5	36.0	501.1	-4.2	5.3	94.2	36.3	46.1	45.2	11.1	
		20	-	20.3	22.6	494.9	-5.4	6.4	134.2	40.4	62.4	47.2	16.2	
Arroyo et al., 2006	SMR 5	-	5	8.1	-14.3	879	-1.1	1.11	-23.4	-	-	25.1	-8.7	-
		-	5	21.0	122.2	888	-0.1	3.24	123.4	-	-	39.7	44.4	ปรับปรุงผิว
Sharif et al., 2005	SMR L	-	3	12.1	51.3	-	-	-	94.0	-	-	-	-	ปรับปรุงผิว

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางผสมในงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

งานวิจัย	ชนิด NR	สารตัวเติม (phr)		Tensile strength		Elongation		Modulus 300%		Tear resistance		Hardness		หมายเหตุ (สารตัวเติม)
		MWNT	Clay	MPa	+/- %	%	+/- %	MPa	+/- %	N/mm	+/- %	Shore A	+/- %	
Valadares et al., 2006	NR Latex	-	20	9.7	233.3	-	-	-	-	-	-	-	-	ปรับปรุงผิว
Wu et al., 2005	NR Latex	-	20	26.8	-	644	-	-	-	44.1	-	54	-	-
This work	NR Latex	-	5	24.5	47.5	558.8	6.8	3.4	25.4	28.7	15.4	41.4	2.0	-
		-	10	26.2	58.2	565.3	8.0	4.0	46.0	32.1	29.2	42.0	3.3	
		-	15	25.0	50.5	542.7	3.7	5.4	98.5	34.1	37.3	42.5	4.7	
		-	20	24.7	49.0	534.8	2.2	6.5	136.5	35.5	42.8	43.2	6.3	
		-	25	24.0	44.7	531.2	1.5	6.6	141.3	36.3	46.1	44.6	9.7	
		-	30	23.8	43.4	526.3	0.6	8.6	212.9	39.2	57.7	44.8	10.3	

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางผสมในงานวิจัยต่างๆ (ต่อ)

งานวิจัย	ชนิด NR	สารตัวเติม (phr)		Tensile strength		Elongation		Modulus 300%		Tear resistance		Hardness		หมายเหตุ (สารตัวเติม)
		MWNT	Clay	MPa	+/- %	%	+/- %	MPa	+/- %	N/mm	+/- %	Shore A	+/- %	
This work	NR Latex	5	30	23.2	40.1	468.7	-10.4	8.9	224.3	40.3	62.3	48.8	20.1	-
		10	30	22.6	36.5	459.2	-12.3	11.3	315.0	41.6	67.4	50.6	24.5	
		20	30	17.5	5.5	377.3	-27.9	12.6	359.4	45.0	81.1	54.8	34.9	

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

จากการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปผลการทดลอง โดยสามารถแยกพิจารณาได้เป็น กระบวนการผสมสารตัวเติมที่เหมาะสม ที่ให้ชิ้นงานมีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุด และปริมาณสารตัวเติมในปริมาณเหมาะสมที่จะส่งผลให้สมบัติต่างๆ ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม

4.1 สรุปผล

4.1.1 กระบวนการผสมสารตัวเติม

ในการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการในการเตรียมยางผสมในครั้งนี้ พบว่า กระบวนการเตรียมจากน้ำยางข้นเป็นกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด เพราะให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่สูงกว่าการเตรียมจากยางแท่ง STR 5L ขั้นตอนการเตรียมยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนยางธรรมชาติผสมเคลย์ และยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ พอสรุปได้ดังนี้

- 1) การเตรียมยางผสมท่อนาโนคาร์บอนเตรียมโดยนำยางแห้งที่เตรียมมาจากน้ำยางข้น แล้วผสมท่อนาโนคาร์บอนบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้งพร้อมกับสารเคมีสำหรับปรับสมบัติของยาง
- 2) การเตรียมยางผสมเคลย์ จะผสมเคลย์สเลอรีกับน้ำยางข้น จากนั้นก็จับด้วยวงด้วยกรดแล้วทำให้แห้ง จากนั้นก็ผสมสารเคมีสำหรับปรับสมบัติของยางบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง
- 3) การเตรียมยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิด คือ ท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ นั้นจะผสมเคลย์สเลอรีกับน้ำยางข้นก่อน จากนั้นนำมาจับด้วยวงด้วยกรดแล้วทำให้แห้ง จากนั้นก็ผสมท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีสำหรับปรับสมบัติของยางบนเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง

4.1.2 ปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสม

1) การทนทานต่อแรงดึง พบว่าปริมาณที่เหมาะสมที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของยางผสมท่อนาโนคาร์บอน เท่ากับ 5 phr และยางผสมเคลย์ เท่ากับ 10 phr โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเท่ากับ 54.64% และ 58.16% ตามลำดับ ส่วนยางที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ นั้นปริมาณที่เหมาะสมที่ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงสุดของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ เท่ากับ 5 phr และ 5 phr ตามลำดับ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเท่ากับ 46.01% ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าที่ปริมาณของสารตัวเติมที่กล่าวมานั้นมีการกระจายตัวที่ดีที่สุดในเนื้อยาง และเป็นปริมาณที่เหมาะสม

2) การต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง โมดูลัส และการเสียรูปหลังการกด นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและปริมาณของเคลย์ ทั้งกรณีของยางที่ผสมสารตัวเติม 1 ชนิด และ 2 ชนิด

3) ร้อยละการบวมตัวทั้งในน้ำมันและในโทลูอีน และ Scorch time และ Cure time มีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ในยางผสม

4) ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ที่เหมาะสม มีผลต่อการเกิดโครงสร้างเชื่อมโยงเนื่องจากสารตัวเติม (Filler network) ในยางผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ยางผสมแข็งแรงมากขึ้น

5) สภาพการนำไฟฟ้าของยางผสมที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารตัวเติมนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน แต่ก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นมากเพราะท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่ไม่สูง และยางมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ส่วนการเพิ่มปริมาณเคลย์นั้น ส่งผลให้ยางผสมมีความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเคลย์จะมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นสรุปได้ว่าสมบัติทางไฟฟ้าของยางผสมในงานวิจัยนี้ยังคงมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูง

6) สมบัติทางความร้อน เมื่อทดสอบการทนอุณหภูมิของยางผสมท่อนาโนคาร์บอน และยางผสมเคลย์ นั้นพบว่ายางผสมที่ได้ทนอุณหภูมิใกล้เคียงกับยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม แต่ในส่วนของยางผสมสารตัวเติมทั้งสองชนิด คือ ท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์ พบว่ายางผสมที่ได้จะทนอุณหภูมิได้สูงกว่ายางผสมสารตัวเติมชนิดเดียว และยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม

7) สมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต ในส่วนของ $\tan \delta$ พบว่ายางผสมท่อนาโนคาร์บอน และยางผสมเคลย์ ให้ค่า $\tan \delta$ มีค่าเพิ่มขึ้นเพราะการเกาะกันระหว่างสารตัวเติมกับเนื้อยางมีพันธะที่แข็งแรง แต่ในส่วนของยางผสมทั้งท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์นั้น ค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลงเพราะการเกาะกันของสารตัวเติมกับเนื้อยางมีพันธะที่ไม่แข็งแรง และจากการตรวจสอบ

อุณหภูมิสภาพแก้วของยางผสมทั้งกรณีของยางที่ผสมสารตัวเติม 1 ชนิด และ 2 ชนิด นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม

4.2 ข้อเสนอแนะ

4.2.1 กระบวนการเตรียมเคลย์สเลอร์

ในการทดลองครั้งนี้อาจจะยังไม่ดีมาก เนื่องจากเครื่องกวนมีความเร็วรอบในการกวนไม่เพียงพอและเคลย์ที่ใช้ไม่มีการปรับปรุงผิว ดังนั้นหากมีเครื่องกวนที่ความเร็วรอบสูงๆ และเคลย์ได้ผ่านการปรับปรุงผิวมาก่อน น่าจะทำให้เคลย์กระจายตัวจากกันและเข้าผสมกับเนื้อยางด้วยพันธะที่แข็งแรงมากกว่านี้ ซึ่งก็จะส่งผลให้สมบัติต่างๆ มีค่าสูงขึ้นด้วย

4.2.2 การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

ยางธรรมชาติที่ผสมท่อนาโนคาร์บอนนั้น ให้ค่าการทนทานต่อแรงดึงที่ไม่สูงมาก เนื่องมาจากการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในยางธรรมชาติของการทดลองครั้งนี้ ยังกระจายตัวได้ดีในระดับหนึ่งเท่านั้น หากมีวิธีการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวได้มากกว่านี้ ก็จะส่งผลให้สมบัติต่างๆ มีค่าสูงขึ้นด้วย

บรรณานุกรม

- เกตุศิริ เกื้อเสิ่ง. (2546). *นาโนคอมโพสิตจากท่อนาโนคาร์บอน*, MTEC กรกฎาคม-กันยายน 29-34. *ชัชวาลย์ กัลป์ทาลา และคณะ. (2550). อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ฉบับพิเศษ ปีที่ 30 ฉบับที่ 4 (ต.ค - ธ.ค).*
- ณัฐวุฒิ ทองโสม. (2549). *การเตรียมและสมบัติของพอลิซัลโฟนาโนคอมโพสิต*, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นิธิมา เคารพพวงส์. (2549). *พอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมโพสิต: ออร์แกนอฟิลิกเคลย์*, วารสารวิทยาศาสตร์ พ.ค.-มิ.ย.
- บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ. (2539). *เทคโนโลยีน้ำยางข้น*, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2540). *ยาง เทคนิคการออกสูตรยาง*, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, พิมพ์ครั้งที่ 1.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2544). *ความรู้เบื้องต้นด้านวัสดุ, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 1.*
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). *ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน*, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 2.
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2548). *สารเคมียาง*, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 1
- พงษ์ธร แซ่ฮุย. (2550). *ยาง กระบวนการผลิตและทดสอบ*, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่ 1
- พิชัย สราญรมย์. (2527). *ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับยางพารา*, ศูนย์ตำราวิทยาลัยรำไพพรรณี สมาคมยางพาราไทย.
- พัชรี เพิ่มพูน และ วีระชัย แสงฉาย. (2547). *การศึกษาสมบัติของยางที่ผสมด้วยถั่วลอยและใยแก้ว*, ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

- ไพบุลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. (2546). *เคมีดิน, คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* ห้างหุ้นส่วน
จำกัดเชียงใหม่พิมพ์สวย เชียงใหม่.
- แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. (2539). *Principles and Techniques of Instrumental Analysis*,
กรุงเทพ ชวนพิมพ์.
- ยุทธชาติ วิเชียรบุตร. (2549). *สมบัติของยางธรรมชาติเดิมด้วยเก้าลอยลิกไนต์*, สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- รอฮีม ปรามาท. (2547). *นาโนเทคโนโลยี นวัตกรรมจับปฏิวัติโลก*, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร.
วารสารณ์ ขจรไชยกุล. (2530). *กระบวนการผลิตภัณฑ์ยาง*, เอกสารวิชาการฉบับที่ 135 กลุ่ม
อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร.
- วารสารณ์ ขจรไชยกุล. (2549). *ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน*, สำนักงานกองทุนสนับสนุน
การวิจัย (สกว), ห้างหุ้นส่วนจำกัด ซีโน ดีไซน์ กรุงเทพ, พิมพ์ครั้งที่ 1
- สิทธิพงษ์ อำนวยพานิชย์. (2547). *กราฟต์โคพอลิเมอร์ของยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน*, วารสาร
วิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ปีที่ 9 ฉบับที่ 3 (ก.ค. – ธ.ค.).
- สุรวุฒิ ช่างโชติ และ พิชญ์ สุภพล. (2548). *ท่อนาโนคาร์บอน*, วารสารไฟฟ้าและอุตสาหกรรม, ปีที่
12 ฉบับที่ 3 (พ.ค - มิ.ย).
- สุรวุฒิ ช่างโชติ และ พิชญ์ สุภพล. (2548). *ท่อนาโนคาร์บอน*, วารสารไฟฟ้าและอุตสาหกรรม, ปีที่
12 ฉบับที่ 4 (ก.ค - ส.ค).
- เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี. (2546). *การผลิตยางธรรมชาติ*, สำนักวิทยบริการ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
- Blackley, D.C., (1999). *Polymer lattices science and technology vol.2*, Type of Lattices, 2nd ed.
Chapman & Hall, London.
- Grim, Ralph E., (1968). *Clay mineralogy*, 2nd ed, New York, USA.
- Nielsen, L.E. and Landel, R.F., (1994). *Mechanical properties of polymer and composites*, New
York, Marcel Dekker, Tnc.
- Shaffer, M. and Sandler, J. *Carbon nanotube/nanofiber polymer composites*, London, SW7
2AZ, UK
- Sivakugan, N., (2001). *A powerpoint an clay mineralogy*, James Cooke University, Australia.
- Tantatherdtam, R., (2003). *Reinforcement of natural rubber latex by nanosize montmorillonite
clay*, Department of Materials Science and Engineering, The Pennsylvania State
University.

- Alexandre, M., and Dubois, P. (2000). "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials." *Materials Science and Engineering*, 28, 1-63.
- Arroyo, M., Lopez-Manchado, M.A., Valentin, J.L., and Carretero, J. 2006. "Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blend." *Composites Science and Technology*, doi:10.1016/j.compscitech.2006.09.019.
- Bokobza, L. (2007). "Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review." *Polymer*, 48, 4907-4902.
- Broza, G., Piszczek, K., Schulte, K., and Sterzynski, T. (2006). "Nanocomposites of poly (vinyl chloride) with carbon nanotubes (CNT)." *Composites Science and Technology*, doi: 10.1016/j.compositech.2006.01.003.
- Chen, G.K., Kim, H.S., Park, B.H., and Yoon, J.S. (2006). "Multi-walled carbon nanotubes reinforced nylon 6 composites." *Polymer*, 47, 4760-4767.
- Chunfeng, D., Xuexi, Z., and Dezun, W. (2007). "Chemical stability of carbon nanotubes in the 2024Al matrix." *Materials Letters*, 61, 904-907.
- Chunfeng, D., Xuexi, Z., Yanxia, M., and Dezun, W. (2007). "Fabrication of aluminum matrix composites reinforced with carbon nanotubes." *Rare Materials*, 26, 450-456.
- Da Costa, H.M., Visconte, L.L.Y., Nunes, R.C.R., and Furtado, C.R.G. (2000). "The effect of coupling agent and chemical treatment on rice husk ash-filled natural rubber composites." *Journal of Applied Polymer Science*, 76, 1019-1027.
- Deng, C.F., Wang, D.Z., Zhang, X.X., and Li, A.B. (2007). "Processing and properties of carbon nanotubes reinforced aluminum composites." *Materials Science and Engineering*, A(444), 138-145.
- Duszova, A., Dusza, J., Tomasek, K., Blugan, G., and Kuebler, J. (2007). "Microstructure and properties of carbon nanotubes/zirconia composites." *Journal of the European Ceramic Society*, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.011.
- Esawi, A., and Morsi, K. (2007). "Dispersion of carbon nanotubes (CNTs) in aluminum powder." *Composites part, A*(38), 646-650.

- Falco, A.D., Goyanes, S., Rubiolo, G.H., Mondragon, I., and Marzocca, A. (2007). "Carbon nanotubes as reinforcement of styrene-butadiene rubber." *Applied Surface Science*, doi:10.1016/j.apsusc.2007.07.049.
- Fakhru'l-Razi, A., Atieh, M.A., Girun, N., Chuah, T.G., El-Sadig, M., and Biak, D.R.A. (2006). "Effect of multi-wall carbon nanotubes on the mechanical properties of natural rubber." *Composites Structures*, 75, 496-500.
- Gopakumar, T.G., Lee, J.A., Kontopoulou, M., and Parent, J.S. (2002). "Influence of clay exfoliation on the physical properties of montmorillonite/polyethylene composites." *Polymer*, 43, 5483-5491.
- Guo, D.J., and Li, H.L. (2005). "Well-dispersed multi-walled carbon nanotube/polyaniline composites films." *Journal Solid State Electrochem*, 9, 445-449.
- Hamdan, S., Hashim, D.M.A., and Yusop, M. (2004). "Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) of thermoplastic natural rubber (TPNR) barium ferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) composites." *AJSTD*, 21, 69-79.
- Iijima, S., (1991). "Helical microtubules of graphitic carbon." *Nature*, 354, 56-58.
- Ismail, H., Nordin, R., and Noor, A. (2002). "Cure characteristics, tensile properties and swelling behaviour of recycled rubber powder-filled natural rubber compounds." *Polymer Testing*, 21, 565-569.
- Kader, M.A., Kim, K., Lee, Y.S., and Nah, C. (2006). "Preparation and properties of nitrile rubber/montmorillonite nanocomposites via latex blending." *Journal Master Science*, 41, 7314-7352.
- Kim, S.W., Kim, J.K., Lee, S.H., Park, S.J., and Kang, K.H. (2006). "Thermophysical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced polypropylene composites." *International Journal of Thermophysics*, 27, 152-160.
- Kim, Y.A., Hayashi, T., Endo, M., Gotoh, Y., Wada, N., and Seiyama, J. (2006). "Fabrication of aligned carbon nanotube-filled rubber composites." *Scripta Materialia*, 54, 31-35.
- Kueseng, K., and Jacob, K. (2006). "Natural rubber nanocomposites with SiC anoparticles and carbon nanotubes." *European Polymer Journal*, 42, 220-227.
- Kumnuantip, C., and Sombatsompop, N. (2003). "Dynamic mechanical properties and swelling behaviour of NR/reclaimed rubber blends." *Materials Letters*, 57, 3167- 3174.

- Liang, Y., Wang, Y., Wu, Y., Zhang, H., and Zhang, L. (2005). "Preparation and properties of isobutylene-isoprene rubber (IIR)/clay nanocomposites." *Polymer Testing*, 24, 12-17.
- Lu, M., Lau, K.T., Tam, W.Y., and Liao, K. (2006). "Enhancement of Vicker's hardness of nanoclay-supported nanotube reinforced novel polymer composites." *Carbon*, 44, 381-392.
- Meneghetti, P., and Qutubuddin, S. (2006). "Synthesis thermal properties and applications of polymer-clay nanocomposites." *Thermochimica Acta*, 442, 74-77.
- Merkoci., A. (2006). "Carbon nanotube in analytical sciences." *Microchimica Acta*, 152, 157-174.
- Moniruzzaman, M., and Winey, K.I. (2006). "Polymer nanocomposites containing carbon Nanotubes." *Macromolecules*, 39, 5194-5205.
- Morrison, N.J., and Porter, M., (1983). "Temperature effects on the stability of intermediates and crosslinks in sulfur vulcanization." *Rubber Chem Technol*, 65, 63-85.
- Motomatsu, M., Takahashi, T., Nie, H.-Y, Mizutani, W.H., and Tokumoto, H. (1997). "Micro study of acrylic polymer silica nanocomposites surface by scanning force microscopy." *Polymer*, 38, 177-182.
- Netrabukkana, S., and Pattamapron, C. (2005). "The effect of compatibilizing agent on mechanical properties of natural rubber-nanocomposite." *Chiang Mai Journal of Science*, 1-10.
- Paradise, M., and Goswami, T. (2007). "Carbon nanotubes-production and industrial Applications." *Materials and Design*, 28, 1477-1489.
- Park, J.H., and J, S.C. (2003). "The relationship between nano-and micro-structure and mechanical properties in PMMA-epoxy-nanoclay composites." *Polymer*, 44, 2091-2100.
- Peng, C.C., Gopfert, A., Drechsler, M., and Abetz, V. (2005). "Smart silica-rubber nanocomposites in virtue of hydrogen bonding interaction.", *Polymer for Advanced Technologies*, 16, 770-782.
- Pozsgay, A., Papp, L., Frater, T., and Pukanszky, B. (2001). "Polypropylene/montmorillonite nanocomposites prepared by the delamination of the filler." *Progress Colloid Polymer Science*, 117, 120-125.

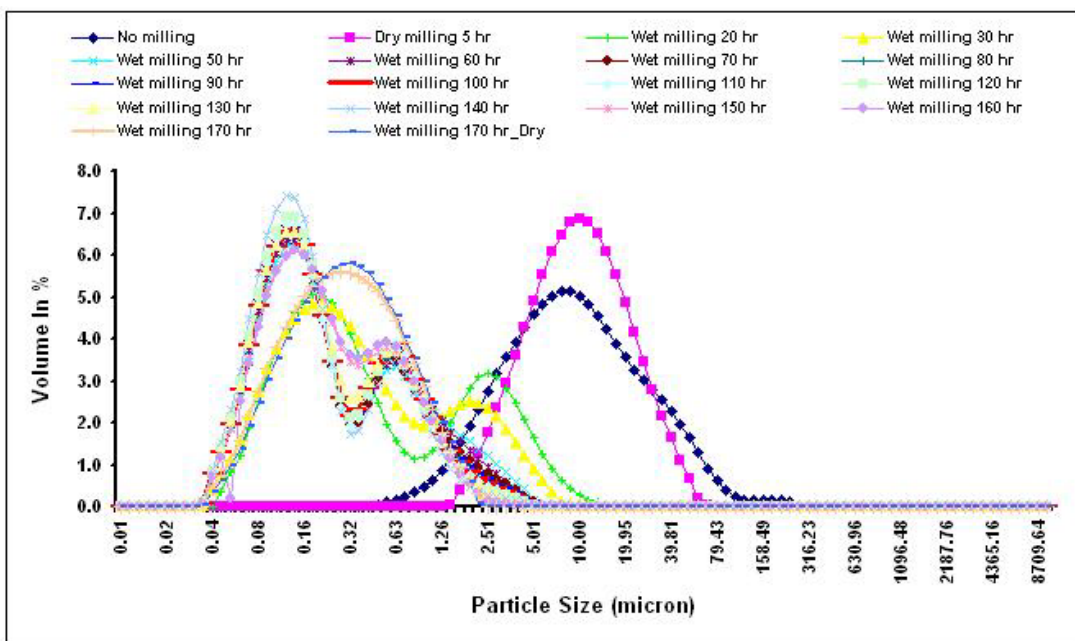
- Rakchonlatee, S., Kuatrakul, T., Chunput, P., and Saeoue, P. (2004). "Influence of rice husk ash in mixed filler on processability and mechanical properties of natural rubber." *Science and Techno*, 12, 50-55.
- Ray, S.S., and Okamoto, M. (2003). "Polymer/layer silicate nanocomposites: a review from preparation to processing." *Progress in Polymer Science*, 28, 1539-1641.
- Sangchay, W., Sikong, L., and Kooptarnood, K. (2007). "Mechanical properties of MWNT-rubber composites." *The First Thailand National Nanotechnology Conference on nanomaterials, pharmaceuticals, Devices and Applications*, Chiang Mai, Thailand, Aug. 14-16, 2007.
- Shanmugaraj, A.M., Bae, J.H., Lee, K.Y., Noh, W.H., Lee, S.H., and Ryu, S.H. (2007). "Physical and chemical characteristics of multiwalled carbon nanotubes functionalized with aminosilane and its influence on the properties of natural rubber composites." *Composites Science and Technology*, 67, 1813-1822.
- Sharif, J., Md Zin, W., Yunus, W., Mohd Dahlan, K., and Ahmad, M. (2005). "Preparation and properties of radiation crosslinked nature rubber/clay nanocomposites." *Polymer Testing*, 24, 211-217.
- Shen, S., Yang, M., Ran, S., Xu, F., and Wang, Z. (2006). "Preparation and properties of natural rubber/polygorskite composites by co-coagulation rubber latex and clay aqueous suspension." *Journal of Polymer Research*, 13, 469-473.
- Singjai, P., Changsarn, S., and Thongtem, S. (2007). "Electrical resistivity of bulk multi-walled carbon nanotubes synthesized by an infusion chemical vapor deposition method." *Materials Science & Engineering*, A(443), 42-46.
- Sombatsompop, N., et al. (2004). "Fly ash particles and precipitated silica as filler in rubber. I. untreated fillers in natural rubber and styrene-butadiene rubber composites." *Journal of Applied Polymer Science*, 93, 2119-2130.
- Sur, G.S., Sun, H.L., Lyu, S.G., and Mark, J.E. (2001). "Synthesis, structure, mechanical properties, and thermal stability of some polysulfone/organoclay nanocomposite." *Polymer*, 42, 9783-9789.
- Tjong, S.C. (2006). "Structure and mechanical properties of polymer nanocomposites." *Materials Science and Engineering*, R(53), 73-197.

- Thongsang, S., and Sombatsompop, N. (2006). "Reinforcement of natural rubber with fly ash from different local sources." *Suranaree J. Sci. Techno*, 114, 77-89.
- Valadraes, L.F., Leite, C.A.P., and Galembeck, F. (2006). "Preparation of natural rubber-montmorillonite nanocomposites in aqueous medium: evidence for polymer-platelet adhesion." *Polymer*, 47, 672-678.
- Wang, Y., Zhang, H., Wu, Y., Yang, J., and Zhang, L. (2005). "Preparation and properties of natural rubber/rectorite nanocomposites." *European Polymer Journal*, 41, 2776-2783.
- Wu, Y., Wang, Y., Zhang, H., Wang, Y., Yu, D., Zhang, L., and Yang, J. (2005). "Rubber-pristine clay nanocomposites prepared by co-coagulating rubber latex and clay aqueous suspension." *Composite Science and Technology*, 65, 1195-1202.
- Xia, Z.H., Lou, J., and Curtin, W.A. (2008). "A multiscale experiment on the tribological behavior of aligned carbon nanotubes/ceramic composites." *Scripta Materialia*, 58, 223-226.
- Xiao, K.Q., Zhang, L.C., and Zarudi, I. (2007). "Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites." *Composites Science and Technology*, 67, 177-182.
- Yang, S.M., Zhu, Z.K., Yin, J., Wang X.Y., and Qi, Z.E. (1999). "Preparation and properties of hybrids of organo-soluble polyimide and montmorillonite with various chemical surface modification methods." *Polymer*, 40, 4407-4414.
- Yasmin, A., Luo, J.J., Abot, J.L., and Daniel, I.M. (2006). "Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites." *Composites Science and Technology*, 66, 2415-2422.
- Yue, D., Liu, Y., and Shen, Z. (2006). "Study on preparation and properties of carbon nanotubes/rubber composites." *Journal Mater Science*, 41, 2441-2544.
- Yeetsorn, R. (2004). "Carbon nanotubes: a new advanced material rapidly interested scientists." *The Journal of KMITNB*, 14, 60-64.
- Zha, L., Tian, C., Zhai, J., and Yang, R. (2007). "Sol-gel derived carbon nanotubes ceramic composites electrodes for electrochemical sensing." *Sensors and Actuators*, B(125), 254-261.
- Zhang, D., Shi, L., Fang, J., Li, X., and Dai, K. (2005). "Preparation and modification of carbon Nanotubes." *Materials Letters*, 59, 4044-4047.

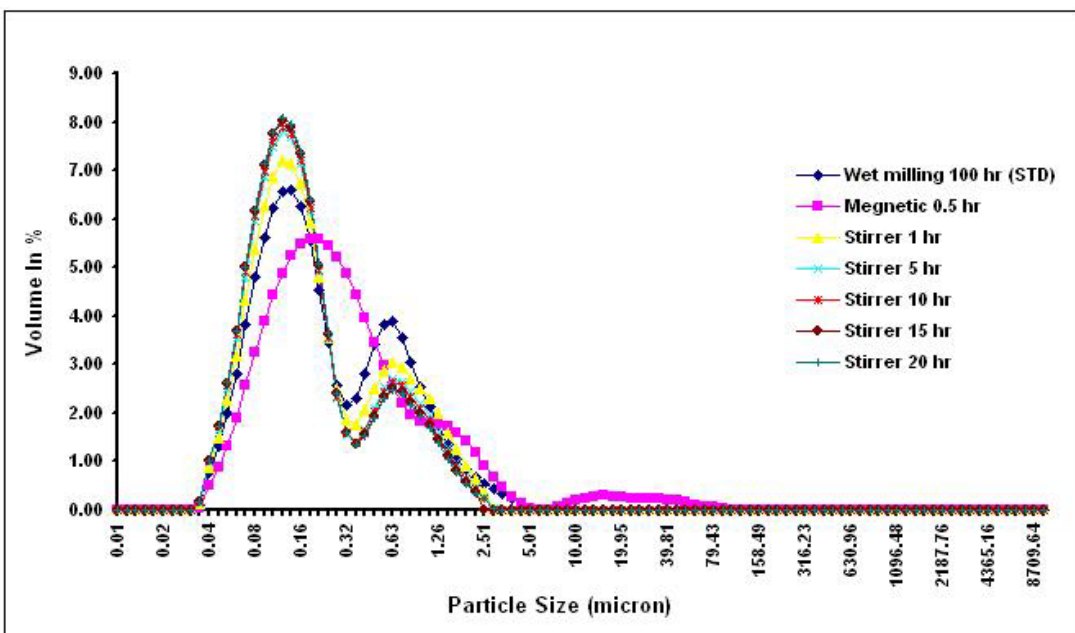
- Zheng, H., Zhang, Y., Peng, Z., and Zhang, Y. (2004). "Influence of clay modification on the structure and mechanical properties of EPPM/montmorillonite nanocomposites." *Polymer Testing*, 23, 217-223.
- Zhou, X., Zhu, Y., Gong, O., and Liang, L. (2006). "Preparation and properties of the powder SBR composites filled with CNTs by spray drying process." *Materials letters*, doi:10.1016/j.matlet.2006.03.147.
- เทคโนโลยียางพื้นฐาน. 2549. สืบค้นจาก: http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm, (10/06/2549)
- นาโน. 2550. สืบค้นจาก: http://www.thaiscience.com/lab_vol/p22/nanotech.asp, 28/11/2550
- นาโนเคลย์. 2549. สืบค้นจาก: http://www.thaiscience.com/lab_vol/htm, 10/06/2549
- เบนโทไนท์. 2550. สืบค้นจาก: <http://www.READE.com>, 30/11/2550
- ยางธรรมชาติ. 2549. สืบค้นจาก: <http://www.rubberthai.com>, 10/06/2549
- ยางธรรมชาติ. 2549. สืบค้นจาก: <http://www.afet.or.th/thai/product/latex/index.php?page=1>, 10/06/2549
- Bragg equation, 2550. สืบค้นจาก: http://www.geocities.com/soilsciences/soiltest_method/X-ray.pdf, 25/12/2550
- Carbon nanotube, 2549. สืบค้นจาก: <http://www.codetukyang.com/tiplearn/old/pages/nano.htm>, 27/06/2549
- Carbon nanotube, 2549. สืบค้นจาก: [http://www.nsrุ.ac.th/science/article/showarticle.asp?id=0000000012](http://www.nsrु.ac.th/science/article/showarticle.asp?id=0000000012), 27/06/2549
- Carbon nanotube, 2549. สืบค้นจาก: <http://www.thaiscience.com/lab.vol/p13cabon%20nanotubes.htm>, 27/06/2549

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ขนาดอนุภาคของเกล็ด



รูปที่ ก.1 ขนาดอนุภาคเคลย์บดเปียกที่เวลาต่างๆ



รูปที่ ก.2 ขนาดอนุภาคของเคลย์ที่ผ่านการบดเปียก 100 ชั่วโมง และนำมาควนด้วยสภาวะต่างๆ

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอน (กระบวนการ)

ตารางที่ ข.1 ผลการทนทานต่อแรงดึง

กระบวนการ	Tensile strength (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	19.79	17.52	20.00	-	-	-	19.10	1.38
2	21.09	20.56	21.07	20.15	20.53	-	20.60	0.40
3	16.68	16.28	16.15	16.60	16.32	17.44	16.58	0.47
4	22.46	19.93	20.14	20.89	20.45	22.37	24.10	1.62
5	19.26	20.80	20.99	20.01	19.68	21.33	20.35	0.82
6	20.26	20.30	20.48	21.17	20.44	21.90	20.76	0.65
7	21.12	20.89	22.16	22.23	20.46	21.05	21.32	0.72
8	18.96	19.55	19.12	19.70	18.46	19.34	19.19	0.45
9	16.10	17.62	17.98	17.59	16.03	18.40	17.29	0.99
10	18.24	17.94	18.98	18.51	17.83	19.19	18.45	0.55
11	15.49	15.75	16.91	17.08	16.49	18.22	16.66	0.99

ตารางที่ ข.2 ผล % Elongation

กระบวนการ	% Elongation							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	588.60	558.70	605.10	-	-	-	584.13	23.52
2	528.20	546.50	513.00	539.20	514.80	497.70	523.23	18.16
3	529.50	502.60	531.90	520.30	556.30	499.60	523.37	20.77
4	568.50	539.20	564.80	530.10	556.30	553.90	552.13	12.56
5	535.00	519.70	539.80	550.80	560.00	531.30	539.43	14.34
6	532.50	525.20	527.60	534.30	530.70	538.60	531.48	4.74
7	512.40	538.00	509.90	529.50	519.10	525.80	522.45	10.62
8	0.45	539.80	550.20	545.30	549.60	537.40	545.12	5.38
9	0.99	452.60	478.80	466.00	456.30	447.10	461.03	11.38
10	0.55	519.10	527.60	532.50	546.50	531.90	535.03	12.37
11	609.4	591.1	594.1	647.8	575.8	619.1	606.22	25.32

ตารางที่ ข.3 ผลมอดูลัส

กระบวนการ	Modulus 300% (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	2.57	2.57	2.85	2.54	2.78	-	2.66	0.14
2	4.87	4.91	4.78	4.66	5.02	5.03	4.88	0.14
3	2.85	2.78	2.80	2.54	2.74	2.68	2.73	0.09
4	4.44	4.95	5.29	3.51	4.43	4.23	4.48	0.61
5	4.62	4.23	4.32	4.09	3.86	4.40	4.25	0.26
6	4.26	4.43	4.36	4.41	4.37	4.41	4.37	0.07
7	4.64	4.49	4.20	4.63	4.16	4.43	4.42	0.21
8	3.71	3.75	3.91	3.85	3.69	3.84	3.79	0.09
9	5.24	5.11	5.24	5.03	4.92	5.18	5.12	0.13
10	4.02	3.96	4.13	4.18	3.95	4.07	4.05	0.09
11	2.24	2.3	2.28	2.23	2.46	2.31	2.30	0.08

ตารางที่ ข.4 ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด

สูตรทดลอง	Tear resistance (N/mm)							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	27.27	20.98	26.91	28.04	27.16	-	26.07	2.88
2	42.76	35.52	37.63	40.65	35.64	38.58	38.46	2.85
3	23.96	25.02	24.26	22.77	25.22	27.89	24.85	1.72
4	39.36	33.46	31.88	39.51	37.16	32.56	35.66	3.45
5	34.56	35.13	32.61	32.56	36.53	33.57	34.16	1.55
6	34.60	34.77	35.90	30.23	30.79	33.27	33.26	2.29
7	36.81	39.44	38.41	37.42	40.97	36.85	38.32	1.65
8	35.58	38.23	37.94	36.32	39.56	38.23	37.64	1.45
9	37.43	35.46	37.27	34.16	35.41	35.43	35.86	1.26
10	38.10	37.21	36.45	35.40	36.48	35.78	36.57	0.98
11	24.8	24.88	26.22	22.69	22.08	22.08	23.79	1.74

ภาคผนวก ค.**ผลการทดสอบสมมติเชิงกลของยางธรรมชาติผสมเคลย์ (กระบวนการ)**

ตารางที่ ค.1 ผลการทนทานต่อแรงดึง

กระบวนกร	Tensile strength (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	19.79	17.52	20.00	-	-	-	19.10	1.38
2	15.78	15.16	15.76	15.08	16.15	15.22	15.53	0.43
3	16.68	16.28	16.15	16.60	16.32	17.44	16.58	0.47
4	14.17	13.39	14.22	14.27	14.96	13.55	14.09	0.56
5	18.72	24.59	24.22	26.35	25.19	18.72	23.81	2.96
6	9.50	10.52	12.75	7.60	12.77	9.50	10.63	2.21
7	24.22	24.27	24.02	22.37	23.00	24.22	23.58	0.85
8	24.49	24.07	23.99	23.87	-	-	24.11	0.27
9	24.36	24.08	24.68	24.52	-	-	24.41	0.26
10	22.20	22.54	22.00	21.78	-	-	22.13	0.32
11	23.74	25.15	25.53	24.20	23.74	-	24.47	0.83
12	24.80	24.30	24.22	24.19	24.36	-	24.37	0.25
13	25.23	23.71	23.84	24.87	23.08	21.19	23.65	1.44
14	25.53	24.65	24.62	24.21	24.90	25.80	24.95	0.60

ตารางที่ ค.2 ผล % Elongation

กระบวนกร	% Elongation							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	588.60	558.70	605.10	-	-	-	584.13	23.52
2	633.80	641.10	633.80	608.10	575.20	585.00	612.83	29.00
3	529.50	502.60	531.90	520.30	556.30	499.60	523.37	20.77
4	608.80	605.10	600.80	604.50	601.40	-	604.90	3.45
5	511.80	551.40	549.60	589.20	571.60	-	554.72	28.95
6	522.80	538.00	578.90	468.50	562.40	-	534.12	42.59
7	584.40	542.30	570.30	560.60	557.50	-	563.02	15.62
8	574.00	576.40	459.30	542.30	468.50	-	524.10	56.67
9	579.50	586.20	591.10	581.20	-	-	584.50	5.24
10	554.50	552.80	551.12	532.00	-	-	547.61	10.49
11	545.30	575.20	519.70	549.00	540.40	-	545.92	19.91
12	570.30	585.60	577.70	520.90	571.60	571.60	566.28	22.96
13	551.40	541.70	522.10	565.50	579.50	493.50	542.28	30.97
14	561.50	535.95	541.81	531.49	542.52	-	542.65	4.98

ตารางที่ ค.3 ผลมอดูลัส

กระบวนกร	Modulus 300% (MPa)							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	2.57	2.57	2.85	2.54	2.78	-	2.66	0.14
2	2.34	2.42	2.39	2.38	2.49	2.33	2.39	0.06
3	2.85	2.78	2.80	2.54	2.74	2.68	2.73	0.09
4	2.27	2.26	2.32	2.35	2.36	2.31	2.31	0.04
5	5.45	5.76	5.81	5.56	5.59	-	5.63	0.15
6	2.42	2.69	2.80	2.88	2.95	-	2.75	0.21
7	5.46	6.21	5.69	5.70	5.76	-	5.76	0.28
8	5.50	5.71	6.33	6.09	5.53	-	5.83	0.36
9	5.76	5.43	5.97	5.56	5.76	-	5.70	0.21
10	5.58	5.24	5.43	-	-	-	5.41	0.17
11	5.82	5.70	6.26	6.33	6.24	6.23	6.09	0.27
12	5.68	5.27	5.47	5.69	5.60	5.44	5.53	0.16
13	6.25	6.17	6.57	5.95	5.45	6.77	6.19	0.46
14	5.45	5.50	5.34	5.37	5.22	5.67	5.42	0.15

ตารางที่ ค.4 ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด

กระบวนกร	Tear resistance (N/mm)							
	1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
1	27.27	20.98	26.91	28.04	27.16	-	26.07	2.88
2	26.78	25.80	28.75	28.55	26.83	26.05	27.13	1.25
3	23.96	25.02	24.26	22.77	25.22	27.89	24.85	1.72
4	32.53	31.51	29.41	31.78	30.60	29.14	30.83	1.36
5	42.09	43.47	41.15	45.49	43.23	42.09	43.09	1.63
6	40.02	37.68	39.02	41.84	39.78	40.02	39.67	1.52
7	37.11	42.77	37.39	40.07	40.44	37.11	39.56	2.35
8	34.91	41.14	38.57	41.40	35.11	34.91	38.23	3.14
9	42.09	41.72	42.07	45.86	41.17	42.09	42.58	1.87
10	41.42	43.01	42.49	42.32	41.02	41.42	42.05	0.81
11	43.71	39.79	44.38	42.87	41.59	43.71	42.47	1.82
12	40.01	38.64	39.99	40.12	41.46	40.01	40.04	1.00
13	41.90	40.26	39.12	41.25	42.74	41.90	41.05	1.41
14	32.73	31.05	35.36	35.82	35.67	-	34.13	2.13

ภาคผนวก ง.
คุณลักษณะการทำให้ยางคงรูป

ตารางที่ ๓.1 ผล Scorch time และ Cure time

MWNT Loading (phr)	Clay Loading (phr)													
	0		5		10		15		20		25		30	
	Scorch (sec)	Cure (sec)	Scorch (sec)	Cure (sec)	Scorch (sec)	Cure (sec)	Scorch (sec)	Cure (sec)	Scorch (sec)	Cure (sec)	Scorch (sec)	Cure (sec)	Scorch (sec)	Cure (sec)
0	273	442	243	413	219	380	198	354	181	321	174	319	140	297
1	157	238	171	324	169	313	128	277	126	264	108	252	107	231
5	101	165	114	211	94	208	92	181	82	179	76	174	74	147
10	81	152	93	177	79	161	78	157	69	139	65	138	64	137
15	75	144	88	161	77	157	70	153	65	144	60	127	55	114
20	69	135	78	157	73	134	67	130	62	126	58	124	45	94

ภาคผนวก จ.**สมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติผสมท่อนาโนคาร์บอนและเคลย์**

ตารางที่ จ.1 ผลร้อยละการบวมตัวในโทลูอินและน้ำมัน

MWNT (phr)	Clay (phr)	% Swelling									
		Toluene					Oil				
		1	2	3	Avg.	S.D.	1	2	3	Avg.	S.D.
0	0	320.99	327.62	326.86	325.16	3.63	34.29	33.51	35.46	34.42	0.98
	5	305.29	301.38	304.16	303.61	2.01	32.06	33.60	32.49	32.72	0.79
	10	285.97	296.20	293.40	291.85	5.29	33.16	32.42	31.14	32.24	1.02
	15	285.72	293.92	292.68	290.77	4.42	30.73	31.22	31.26	31.07	0.29
	20	294.90	281.76	294.07	290.24	7.36	30.65	28.07	31.05	29.92	1.62
	25	291.58	270.64	293.19	285.13	12.58	30.40	29.86	28.91	29.72	0.75
	30	274.24	274.38	275.83	274.82	0.88	30.00	29.67	27.80	29.16	1.19
1	0	312.61	325.63	317.18	318.47	6.60	33.57	34.94	33.71	34.07	0.75
	5	303.97	299.61	305.86	303.15	3.21	32.56	32.50	31.93	32.33	0.35
	10	271.45	288.74	282.34	280.84	8.74	30.84	29.96	33.44	31.41	1.81
	15	286.03	276.26	271.88	278.06	7.24	29.49	31.51	31.60	30.87	1.19
	20	274.23	276.54	278.12	276.30	1.96	30.23	29.83	29.50	29.85	0.36
	25	267.22	277.80	275.52	273.51	5.56	28.10	28.62	29.25	28.66	0.58
	30	270.13	268.90	251.96	263.66	10.16	28.26	28.14	28.11	28.17	0.08
5	0	298.66	300.95	300.08	299.90	1.16	34.02	33.92	33.64	33.86	0.20
	5	296.40	297.15	292.30	295.28	2.61	32.60	31.41	31.57	31.86	0.64
	10	276.28	275.69	277.09	276.35	0.70	30.31	30.31	31.08	30.57	0.44
	15	272.97	273.55	276.62	274.38	1.96	29.36	30.74	29.25	29.78	0.83
	20	272.23	271.16	270.66	271.35	0.80	28.43	29.47	29.38	29.10	0.57
	25	256.19	257.13	250.06	254.46	3.84	28.27	28.49	28.13	28.29	0.18
	30	248.79	253.58	249.71	250.69	2.54	26.85	25.85	26.74	26.48	0.55

ตารางที่ จ.1 ผลร้อยละการบวมตัวในโทลูอินและน้ำมัน (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	% Swelling									
		Toluene					Oil				
		1	2	3	Avg.	S.D.	1	2	3	Avg.	S.D.
10	0	281.70	278.52	283.63	281.28	2.58	31.81	32.02	31.87	31.90	0.11
	5	276.12	270.17	270.42	272.24	3.36	30.05	30.93	29.79	30.26	0.60
	10	263.05	259.34	265.04	262.48	2.89	29.05	29.54	29.45	29.35	0.26
	15	255.09	256.31	267.34	259.58	6.75	29.07	29.02	28.67	28.92	0.22
	20	251.37	248.58	242.76	247.57	4.39	28.30	26.69	26.62	27.20	0.95
	25	255.65	229.83	251.98	245.82	13.97	24.62	25.17	25.29	25.03	0.36
	30	239.21	238.68	241.29	239.73	1.38	24.00	23.68	24.11	23.93	0.22
15	0	259.54	260.46	259.43	259.81	0.57	30.46	29.95	31.70	30.70	0.90
	5	253.47	257.14	257.34	255.98	2.18	28.16	29.48	29.20	28.95	0.69
	10	251.09	237.71	244.16	244.32	6.69	29.37	27.18	28.23	28.26	1.10
	15	243.52	239.77	240.73	241.34	1.95	27.63	27.15	23.96	26.24	1.99
	20	233.03	232.26	226.30	230.53	3.68	23.91	24.52	23.39	23.94	0.56
	25	229.13	232.54	217.82	226.50	7.70	21.44	26.76	21.00	23.07	3.20
	30	222.59	222.97	221.75	222.44	0.63	21.82	22.86	22.04	22.24	0.55
20	0	245.45	252.04	245.63	247.71	3.75	29.36	30.03	29.79	29.73	0.34
	5	242.58	240.24	240.75	241.19	1.23	27.87	27.70	28.43	28.00	0.38
	10	232.07	234.67	246.38	237.71	7.63	26.40	27.01	27.99	27.14	0.80
	15	229.46	238.47	234.65	234.19	4.52	25.69	24.74	25.14	25.19	0.48
	20	226.03	225.66	218.46	223.38	4.27	23.49	24.37	23.52	23.79	0.50
	25	218.98	223.57	219.39	220.65	2.54	22.55	21.48	23.48	22.51	1.00
	30	209.64	201.96	206.51	206.04	3.86	20.00	19.85	19.87	19.90	0.08

ตารางที่ จ.2 ผลความหนาแน่นการเชื่อมโยง

MWNT (phr)	Clay (phr)	Crosslink density (mol/cm ³)				
		1	2	3	Avg.	S.D.
0	0	8.87E-5	8.74E-5	9.04E-5	8.88E-5	1.48E-6
	5	9.00E-5	9.17E-5	9.10E-5	9.09E-5	8.63E-7
	10	9.24E-5	9.26E-5	9.17E-5	9.22E-5	4.39E-7
	15	9.00E-5	8.72E-5	8.83E-5	8.85E-5	1.42E-6
	20	8.34E-5	8.62E-5	8.28E-5	8.41E-5	1.81E-6
	25	8.19E-5	8.82E-5	8.07E-5	8.36E-5	4.03E-6
	30	8.45E-5	8.65E-5	8.57E-5	8.56E-5	1.02E-6
1	0	8.81E-5	8.88E-5	9.03E-5	8.91E-5	1.16E-6
	5	8.98E-5	8.86E-5	8.99E-5	8.94E-5	7.46E-7
	10	1.00E-4	9.86E-5	9.59E-5	9.82E-5	2.17E-6
	15	8.60E-5	9.37E-5	9.71E-5	9.23E-5	5.72E-6
	20	8.63E-5	8.48E-5	8.55E-5	8.55E-5	7.30E-7
	25	9.33E-5	9.13E-5	9.38E-5	9.28E-5	1.30E-6
	30	8.73E-5	8.80E-5	9.45E-5	8.99E-5	3.98E-6
5	0	9.60E-5	9.33E-5	9.38E-5	9.44E-5	1.44E-6
	5	8.82E-5	8.92E-5	8.95E-5	8.89E-5	6.66E-7
	10	9.18E-5	9.27E-5	9.38E-5	9.28E-5	1.00E-6
	15	8.84E-5	8.39E-5	8.51E-5	8.58E-5	2.30E-6
	20	8.95E-5	8.64E-5	8.74E-5	8.78E-5	1.56E-6
	25	9.30E-5	9.36E-5	9.38E-5	9.35E-5	3.93E-7
	30	9.16E-5	9.17E-5	9.12E-5	9.15E-5	2.75E-7

ตารางที่ จ.2 ผลความหนาแน่นการเชื่อมโยง (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	Crosslink density (mol/cm ³)				
		1	2	3	Avg.	S.D.
10	0	1.00E-4	9.71E-5	9.56E-5	9.75E-5	2.21E-6
	5	9.58E-5	9.31E-5	9.30E-5	9.40E-5	1.59E-6
	10	9.56E-5	9.48E-5	9.71E-5	9.58E-5	1.13E-6
	15	1.01E-4	9.99E-5	9.91E-5	1.00E-4	9.35E-7
	20	9.52E-5	9.60E-5	9.79E-5	9.64E-5	1.41E-6
	25	8.95E-5	1.02E-4	9.11E-5	9.41E-5	6.55E-6
	30	9.25E-5	9.76E-5	9.50E-5	9.50E-5	2.55E-6
15	0	1.05E-4	9.91E-5	1.03E-4	1.02E-4	2.84E-6
	5	9.84E-5	9.86E-5	1.00E-4	9.91E-5	1.03E-6
	10	9.81E-5	1.03E-4	1.03E-4	1.01E-4	2.89E-6
	15	9.82E-5	9.85E-5	9.84E-5	9.83E-5	1.47E-7
	20	9.96E-5	9.96E-5	1.03E-4	1.01E-4	2.08E-6
	25	1.00E-4	9.71E-5	1.05E-4	1.01E-4	4.03E-6
	30	9.60E-5	9.79E-5	1.00E-4	9.81E-5	2.25E-6
20	0	1.04E-4	1.02E-4	1.09E-4	1.05E-4	3.35E-6
	5	1.04E-4	1.01E-4	1.04E-4	1.03E-4	1.58E-6
	10	9.92E-5	1.02E-4	9.73E-5	9.95E-5	2.30E-6
	15	1.01E-4	9.83E-5	9.93E-5	9.95E-5	1.32E-6
	20	1.02E-4	1.01E-4	1.04E-4	1.03E-4	1.51E-6
	25	1.04E-4	9.96E-5	1.02E-4	1.02E-4	1.97E-6
	30	1.08E-4	1.07E-4	1.10E-4	1.08E-4	1.56E-6

ตารางที่ จ.3 ผลการทนทานต่อแรงดึง

MWNT (phr)	Clay (phr)	Tensile strength (MPa)							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
0	0	16.68	16.28	16.15	16.60	16.32	17.44	16.58	0.47
	5	23.59	25.83	23.55	24.61	23.28	25.87	24.46	1.17
	10	24.12	26.45	27.42	27.16	25.95	-	26.22	1.31
	15	25.53	24.65	24.62	24.21	24.90	25.80	24.95	0.60
	20	23.21	25.97	24.94	-	-	-	24.71	1.39
	25	23.78	23.95	23.70	24.51	-	-	23.99	0.37
	30	23.66	23.34	24.33	-	-	-	23.78	0.51
1	0	24.78	26.05	22.21	23.29	22.34	24.96	23.94	1.56
	5	22.82	23.78	23.48	24.73	23.78	-	23.72	0.69
	10	23.73	23.63	23.98	23.36	23.42	-	23.62	0.25
	15	23.06	23.88	23.34	23.74	23.22	-	23.45	0.35
	20	23.20	23.38	23.49	23.00	23.95	-	23.40	0.36
	25	23.23	23.26	23.12	23.95	23.12	-	23.34	0.35
	30	23.50	23.10	23.57	23.44	22.89	23.44	23.32	0.27
5	0	27.12	24.05	25.50	24.35	27.19	25.61	25.64	1.33
	5	24.08	25.06	25.51	24.18	24.08	22.33	24.21	1.09
	10	23.00	24.41	24.39	24.34	24.00	24.56	24.12	0.58
	15	25.23	22.55	22.66	24.40	23.92	25.06	23.97	1.16
	20	21.46	22.83	24.50	25.84	24.92	-	23.91	1.75
	25	22.93	22.39	23.76	24.57	22.91	22.93	23.25	0.78
	30	23.11	23.16	22.93	23.74	23.10	23.32	23.23	0.28

ตารางที่ จ.3 ผลการทนทานต่อแรงดึง (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	Tensile strength (MPa)							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
10	0	26.66	23.79	22.59	23.56	25.39	22.62	24.10	1.62
	5	24.16	23.18	23.96	24.19	24.12	-	23.92	0.42
	10	22.92	23.65	22.34	22.75	23.00	23.58	23.04	0.50
	15	23.12	23.22	22.77	23.03	22.87	-	23.00	0.18
	20	23.49	22.28	21.86	23.70	23.89	22.35	22.93	0.86
	25	22.24	22.45	22.24	22.66	23.36	22.80	22.63	0.42
	30	22.37	23.15	21.87	22.80	23.07	22.48	22.62	0.48
15	0	21.07	22.41	22.93	24.05	22.67	22.18	22.55	0.98
	5	19.67	21.24	20.65	19.37	20.76	21.58	20.55	0.87
	10	20.16	19.58	18.82	20.79	18.88	18.82	19.51	0.83
	15	18.88	19.20	19.13	19.35	18.60	-	19.03	0.30
	20	18.65	19.08	18.70	18.44	19.21	-	18.82	0.32
	25	18.42	17.90	17.60	17.66	18.30	-	17.98	0.37
	30	18.29	19.52	17.32	17.56	17.00	-	17.94	1.00
20	0	19.76	19.86	22.18	21.74	19.51	18.89	20.32	1.32
	5	19.23	18.70	19.45	18.15	19.02	-	18.91	0.51
	10	17.29	17.17	19.39	19.57	18.40	17.81	18.27	1.03
	15	18.48	18.55	18.40	17.94	17.97	17.98	18.22	0.29
	20	18.35	17.08	17.70	18.84	18.21	18.22	18.07	0.61
	25	17.33	17.51	17.54	17.98	-	-	17.59	0.28
	30	18.18	17.24	18.41	17.91	16.84	16.33	17.49	0.82

ตารางที่ ๑.๔ ผล % Elongation

MWNT (phr)	Clay (phr)	% Elongation							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
0	0	529.50	502.60	531.90	520.30	556.30	499.60	523.37	20.77
	5	596.87	546.10	554.05	549.68	540.21	566.11	558.84	9.25
	10	560.09	569.86	565.80	-	-	-	565.25	2.52
	15	561.50	535.95	541.81	531.49	542.52	-	542.65	4.98
	20	544.09	524.01	535.71	541.94	528.37	-	534.82	6.94
	25	521.40	528.01	535.60	536.53	521.56	543.94	531.20	7.72
	30	537.07	509.98	525.73	542.64	516.24	-	526.33	12.37
1	0	546.50	536.80	539.80	565.50	-	-	547.15	12.88
	5	525.00	554.51	530.94	546.09	522.55	-	535.8	12.56
	10	528.35	526.93	525.80	-	-	-	527.03	0.68
	15	514.56	525.03	528.42	532.15	529.72	523.17	525.51	3.35
	20	523.03	529.49	511.96	539.40	504.63	534.53	523.84	13.40
	25	511.50	507.10	535.79	518.38	523.75	-	519.30	10.36
	30	523.17	539.73	502.75	503.34	496.82	-	513.16	17.01
5	0	594.70	640.50	577.70	577.00	606.90	589.80	597.77	23.69
	5	568.57	569.54	545.18	580.20	552.19	538.74	559.07	15.46
	10	541.46	523.81	518.61	-	-	-	527.96	4.68
	15	532.02	533.41	524.41	500.94	539.63	-	526.08	14.71
	20	522.21	522.78	527.47	523.61	525.90	-	524.39	1.87
	25	538.51	525.43	498.82	514.47	513.61	-	518.17	9.73
	30	421.02	485.28	488.75	489.26	490.53	437.37	468.70	20.87

ตารางที่ ๑.๔ ผล % Elongation (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	% Elongation							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
10	0	568.50	539.20	564.80	530.10	556.30	553.90	552.13	12.56
	5	537.97	529.20	522.24	514.40	558.77	-	532.52	16.79
	10	498.97	525.88	523.58	536.70	-	-	521.28	6.82
	15	518.64	481.69	503.07	537.87	515.44	488.41	507.52	20.08
	20	500.37	492.88	494.34	495.45	495.20	528.06	501.05	13.47
	25	513.71	491.51	465.73	462.87	460.34	487.84	480.33	13.52
	30	430.11	486.13	443.89	463.09	450.20	481.67	459.18	16.86
15	0	492.90	509.23	480.41	489.07	536.56	498.58	501.13	19.45
	5	489.93	507.13	490.18	510.81	480.82	491.51	495.06	11.21
	10	483.94	469.43	473.01	486.26	-	-	478.16	7.30
	15	450.31	459.56	470.83	458.04	454.94	460.58	459.04	5.42
	20	469.33	450.71	444.63	446.20	459.22	-	454.02	5.92
	25	442.64	438.72	434.50	446.48	424.66	-	437.40	7.90
	30	465.77	435.29	424.93	420.96	-	-	436.74	7.74
20	0	485.85	477.85	520.76	523.17	483.36	478.13	494.85	20.79
	5	500.22	484.11	475.36	499.07	-	-	489.69	9.95
	10	453.01	450.15	493.98	476.88	479.05	494.01	474.51	16.14
	15	463.94	455.88	448.28	480.63	471.32	428.47	458.09	18.20
	20	425.50	422.80	429.85	436.29	452.29	441.23	434.66	10.06
	25	448.74	401.49	430.75	416.48	420.50	401.55	419.92	11.56
	30	375.57	383.23	389.18	350.22	397.97	367.39	377.26	16.94

ตารางที่ ๖.5 ผลมอดูลัส

MWNT (phr)	Clay (phr)	Modulus 300% (MPa)							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
0	0	2.85	2.78	2.80	2.54	2.74	2.68	2.73	0.09
	5	3.53	3.46	3.00	3.36	3.73	3.47	3.43	0.24
	10	4.10	3.79	3.88	3.95	3.94	4.27	3.99	0.16
	15	5.45	5.50	5.34	5.37	5.22	5.67	5.42	0.15
	20	6.66	7.00	6.09	6.21	6.35	-	6.46	0.35
	25	6.51	6.39	6.50	6.63	6.31	7.23	6.60	0.33
	30	8.67	8.93	8.00	8.14	9.01	-	8.55	0.45
1	0	3.30	3.62	3.45	3.07	3.00	3.08	3.25	0.25
	5	3.91	3.63	3.70	3.88	3.66	3.54	3.72	0.11
	10	4.50	4.53	4.34	4.15	4.58	4.28	4.40	0.16
	15	5.55	5.90	5.75	5.79	-	-	5.75	0.07
	20	6.30	7.69	6.38	6.59	-	-	6.74	0.58
	25	7.61	7.05	7.58	7.25	7.02	5.63	7.02	0.67
	30	8.43	9.92	8.19	8.32	8.39	8.43	8.61	0.64
5	0	3.40	3.66	4.13	3.62	3.52	-	3.67	0.24
	5	4.16	4.59	4.77	4.49	4.51	4.33	4.48	0.15
	10	5.73	5.66	5.63	5.81	5.53	-	5.67	0.10
	15	5.73	6.11	5.53	6.01	5.78	-	5.83	0.22
	20	6.94	6.66	6.43	6.30	6.98	7.21	6.75	0.34
	25	7.20	8.23	8.43	7.66	7.80	-	7.86	0.32
	30	8.50	9.16	8.86	8.96	8.73	8.96	8.86	0.14

ตารางที่ จ.5 ผลมอดูลัส (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	Modulus 300% (MPa)							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
10	0	4.44	4.95	5.29	3.51	4.43	4.23	4.48	0.61
	5	5.40	5.19	5.72	5.20	5.15	5.37	5.34	0.21
	10	6.48	7.28	7.08	6.21	7.16	6.01	6.70	0.53
	15	7.58	6.46	6.08	7.78	6.87	6.08	6.81	0.64
	20	8.72	8.43	7.95	8.63	8.29	8.46	8.41	0.23
	25	9.90	9.20	9.24	9.99	9.35	-	9.54	0.32
	30	11.77	11.83	11.07	11.38	10.65	-	11.34	0.43
15	0	5.68	5.48	4.88	5.50	4.99	5.31	5.31	0.26
	5	6.74	6.42	6.64	6.70	6.81	6.36	6.61	0.17
	10	7.52	7.61	7.11	8.62	6.85	6.67	7.40	0.70
	15	7.51	7.77	7.72	7.85	7.58	6.92	7.56	0.34
	20	8.24	8.66	9.11	9.58	9.69	-	9.06	0.42
	25	9.39	9.82	9.28	9.38	10.50	10.33	9.78	0.49
	30	11.06	10.51	12.77	12.09	-	-	11.61	0.95
20	0	6.19	6.43	6.57	6.52	6.38	6.31	6.40	0.10
	5	6.38	6.88	6.70	8.00	7.04	-	7.00	0.51
	10	7.77	7.78	8.91	7.33	9.19	8.08	8.18	0.70
	15	8.76	8.35	8.02	8.05	8.03	7.96	8.20	0.14
	20	10.62	10.61	9.97	10.38	9.75	9.54	10.15	0.40
	25	11.48	10.32	10.08	10.59	-	-	10.62	0.25
	30	12.74	12.42	13.49	11.97	13.71	10.99	12.55	1.00

ตารางที่ จ.6 ผลความแข็ง

MWNT (phr)	Clay (phr)	Hardness (Shore A)						
		1	2	3	4	5	Avg.	S.D.
0	0	40.70	41.40	40.80	41.20	39.10	40.64	0.91
	5	41.10	41.50	41.20	41.90	41.50	41.44	0.31
	10	42.00	41.30	42.60	-	-	41.97	0.65
	15	42.40	42.60	42.50	42.50	42.70	42.54	0.11
	20	41.90	43.00	42.80	45.10	43.30	43.22	1.17
	25	44.40	44.30	44.60	45.00	44.60	44.58	0.27
	30	44.70	44.70	44.00	46.20	44.50	44.82	0.82
1	0	42.90	43.50	42.90	43.20	43.60	43.22	0.33
	5	42.90	43.20	42.98	43.40	43.70	43.24	0.32
	10	43.50	42.78	43.90	43.00	43.20	43.28	0.44
	15	43.50	42.80	43.50	43.50	43.80	43.42	0.37
	20	43.80	43.90	43.60	43.90	43.50	43.74	0.18
	25	45.20	45.20	45.20	45.50	45.10	45.24	0.15
	30	47.20	46.70	46.50	46.50	47.60	46.90	0.48
5	0	42.60	42.60	43.70	43.70	43.70	43.26	0.60
	5	43.60	43.20	43.50	43.60	42.58	43.30	0.43
	10	43.50	43.60	43.00	43.20	43.40	43.34	0.24
	15	43.10	43.10	43.20	43.80	44.10	43.46	0.46
	20	44.90	45.80	45.30	45.10	45.50	45.32	0.35
	25	47.90	47.50	47.40	47.00	47.50	47.46	0.32
	30	48.60	49.00	48.40	49.50	48.60	48.82	0.44

ตารางที่ จ.6 ผลความแข็ง (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	Hardness (Shore A)						
		1	2	3	4	5	Avg.	S.D.
10	0	44.20	45.40	44.20	44.20	43.90	44.38	0.58
	5	44.40	44.80	44.40	45.30	44.00	44.58	0.49
	10	45.50	46.40	45.90	46.70	45.30	45.96	0.59
	15	46.10	45.70	46.70	46.30	45.94	46.15	0.38
	20	47.50	48.20	47.20	48.20	48.30	47.88	0.50
	25	48.10	49.30	48.50	49.10	48.30	48.66	0.52
	30	50.80	51.10	50.10	50.40	50.50	50.58	0.38
15	0	44.70	45.20	45.20	45.40	45.30	45.16	0.27
	5	46.50	46.70	46.10	46.70	45.90	46.38	0.36
	10	47.50	47.00	47.60	48.30	47.50	47.58	0.47
	15	48.20	47.80	47.70	48.30	48.20	48.04	0.27
	20	49.20	48.10	48.30	48.30	48.00	48.38	0.48
	25	49.60	49.60	50.20	49.50	49.50	49.68	0.29
	30	50.80	51.00	51.50	51.10	50.90	51.06	0.27
20	0	47.20	47.50	47.20	47.20	47.10	47.24	0.15
	5	47.50	47.40	47.60	47.56	46.80	47.37	0.33
	10	47.50	49.00	47.00	48.90	47.10	47.90	0.98
	15	49.40	49.40	48.20	50.00	49.50	49.30	0.66
	20	50.30	49.80	50.20	50.70	50.40	50.28	0.33
	25	50.40	50.67	50.90	51.21	50.80	50.80	0.30
	30	54.50	55.50	54.80	54.90	54.50	54.84	0.41

ตารางที่ จ.7 ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด

MWNT (phr)	Clay (phr)	Tear resistance (N/mm)							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
0	0	23.96	25.02	24.26	22.77	25.22	27.89	24.85	1.72
	5	24.83	29.79	29.11	28.27	29.98	30.14	28.69	2.01
	10	30.21	31.36	32.54	34.22	33.26	31.01	32.10	1.51
	15	32.73	31.05	35.36	35.82	35.67	-	34.13	2.13
	20	34.41	36.20	37.46	37.61	31.36	35.86	35.48	2.33
	25	34.37	36.16	35.32	37.46	35.78	38.80	36.32	1.59
	30	39.55	38.28	39.55	39.17	38.92	39.67	39.19	0.53
1	0	31.71	33.10	33.58	30.91	33.42	31.51	32.37	1.13
	5	34.61	32.32	30.99	33.45	33.99	32.23	32.93	1.33
	10	32.60	38.85	32.17	35.04	35.35	-	34.80	2.67
	15	34.98	35.17	35.21	-	-	-	35.12	0.12
	20	35.67	38.82	36.22	39.25	40.66	35.32	37.66	2.21
	25	36.02	41.96	37.34	37.98	37.14	-	38.09	2.28
	30	37.58	42.68	40.88	37.26	-	-	39.60	2.63
5	0	31.49	29.96	33.85	32.99	32.65	35.53	32.75	1.92
	5	32.82	35.92	31.96	32.07	38.69	37.29	34.79	2.90
	10	35.18	35.86	35.38	36.41	36.07	-	35.78	0.50
	15	33.79	33.67	42.78	38.73	34.18	34.88	36.34	3.68
	20	37.41	41.85	38.11	38.26	38.63	37.41	38.61	1.66
	25	40.21	37.76	40.40	39.12	-	-	39.37	1.21
	30	43.04	41.81	36.18	-	-	-	40.34	3.66

ตารางที่ จ.7 ผลการต้านทานต่อการฉีกขาด (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	Tear resistance (N/mm)							
		1	2	3	4	5	6	Avg.	S.D.
10	0	39.36	33.46	31.88	39.51	37.16	32.56	35.66	3.45
	5	41.09	36.76	33.59	33.72	37.30	38.98	36.91	2.94
	10	37.00	36.67	36.18	38.52	37.30	37.33	37.17	0.79
	15	39.11	36.70	37.18	-	-	--	37.66	1.28
	20	43.47	40.05	43.67	43.91	35.56	36.28	40.49	3.82
	25	39.74	41.42	43.67	39.82	38.19	41.96	40.80	1.94
	30	39.11	44.97	42.23	39.61	42.15	-	41.61	2.36
15	0	35.97	33.32	38.96	38.15	38.54	32.93	36.31	2.68
	5	39.02	36.37	38.06	37.49	-	-	37.74	1.11
	10	38.46	38.67	37.70	37.64	37.58	-	38.01	0.51
	15	40.62	36.61	35.59	40.15	-	-	38.24	2.52
	20	38.95	41.12	41.77	39.18	42.84	42.11	41.00	1.60
	25	41.19	40.57	44.47	40.98	-	-	41.80	1.80
	30	38.85	42.39	44.30	44.65	40.37	-	42.11	2.50
20	0	40.83	41.70	39.81	37.69	39.09	43.02	40.36	1.90
	5	38.89	39.63	42.00	41.58	39.22	41.58	40.48	1.38
	10	41.58	40.76	40.13	-	-	-	40.82	0.73
	15	38.52	42.69	43.12	41.54	40.07	40.45	41.07	1.73
	20	41.31	39.77	43.67	41.73	41.76	-	41.65	1.39
	25	41.44	42.64	40.44	45.01	48.19	-	43.54	3.11
	30	46.85	46.37	44.39	44.54	42.84	-	45.00	1.62

ตารางที่ จ.8 ผลการเสียวรูปหลังการกด

MWNT (phr)	Clay (phr)	% Compression set									
		25 °C					70 °C				
		1	2	3	Avg.	S.D.	1	2	3	Avg.	S.D.
0	0	2.52	0.93	1.74	1.73	0.79	11.86	12.50	11.76	12.04	0.40
	5	3.20	2.54	3.17	2.97	0.37	15.00	14.17	14.29	14.49	0.45
	10	3.15	3.23	3.15	3.18	0.04	16.67	16.00	15.63	16.10	0.53
	15	3.85	3.91	3.31	3.69	0.33	17.05	16.92	17.42	17.13	0.26
	20	4.76	3.85	4.00	4.20	0.49	20.49	19.69	19.69	19.95	0.47
	25	4.92	5.47	4.96	5.12	0.31	21.60	20.63	21.31	21.18	0.50
	30	3.20	2.54	3.17	2.97	0.37	22.05	21.71	23.08	22.28	0.71
1	0	1.72	1.82	2.42	1.99	0.38	12.40	13.64	12.17	12.74	0.79
	5	2.33	3.33	4.13	3.26	0.91	15.25	15.87	15.57	15.57	0.31
	10	3.13	3.94	3.91	3.66	0.46	15.20	13.82	20.00	16.34	3.24
	15	3.03	4.72	4.07	3.94	0.85	17.07	17.46	17.32	17.29	0.20
	20	3.91	4.72	4.55	4.39	0.43	19.51	20.47	20.77	20.25	0.66
	25	5.47	4.84	5.43	5.24	0.35	20.77	24.22	21.88	22.29	1.76
	30	5.34	6.25	4.62	5.40	0.82	24.06	21.60	24.22	23.29	1.47
5	0	3.48	2.50	1.63	2.53	0.93	15.97	14.88	15.45	15.43	0.55
	5	3.17	4.13	3.13	3.48	0.57	15.38	20.16	12.82	16.12	3.73
	10	3.85	3.17	4.65	3.89	0.74	17.05	17.83	14.75	16.55	1.60
	15	4.65	3.85	4.13	4.21	0.41	17.97	16.79	17.83	17.53	0.64
	20	5.19	4.07	4.88	4.71	0.58	20.45	21.54	21.60	21.20	0.64
	25	5.38	6.02	4.88	5.43	0.57	23.08	22.58	22.56	22.74	0.29
	30	4.76	6.11	7.09	5.99	1.17	22.95	22.58	24.48	23.34	1.00

ตารางที่ จ.8 ผลการเสียรูปหลังการกด (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	% Compression set									
		25 °C					70 °C				
		1	2	3	Avg.	S.D.	1	2	3	Avg.	S.D.
10	0	3.42	3.28	3.36	3.35	0.07	15.45	15.63	15.70	15.59	0.13
	5	4.65	3.85	3.85	4.11	0.46	14.84	15.08	18.66	16.19	2.14
	10	4.41	3.85	4.88	4.38	0.52	17.80	16.95	15.63	16.79	1.09
	15	6.62	5.60	6.11	6.11	0.51	19.40	18.80	18.60	18.93	0.42
	20	6.82	6.25	7.58	6.88	0.67	22.58	21.54	20.63	21.58	0.97
	25	6.62	8.15	6.77	7.18	0.84	22.40	21.37	23.31	22.36	0.97
	30	7.04	8.66	11.03	8.91	2.01	23.85	23.26	23.85	23.65	0.34
15	0	4.03	3.33	4.24	3.87	0.47	14.96	17.39	15.32	15.89	1.31
	5	4.55	4.65	4.00	4.40	0.35	15.75	15.87	17.65	16.42	1.06
	10	4.03	4.58	5.34	4.65	0.66	17.07	17.19	16.94	17.07	0.13
	15	6.87	6.30	6.82	6.66	0.32	18.55	19.85	20.15	19.51	0.85
	20	8.33	6.77	6.11	7.07	1.14	24.44	24.06	23.39	23.96	0.54
	25	6.87	7.26	7.69	7.27	0.41	24.24	24.19	24.43	24.29	0.12
	30	9.92	9.77	9.70	9.80	0.11	24.60	25.37	25.40	25.12	0.45
20	0	4.51	4.00	4.31	4.27	0.26	17.80	16.24	16.26	16.77	0.89
	5	4.51	3.97	5.38	4.62	0.71	17.46	14.63	19.08	17.06	2.25
	10	5.38	4.62	4.58	4.86	0.45	17.05	18.60	18.03	17.90	0.78
	15	6.98	6.87	7.26	7.04	0.20	20.63	22.39	22.73	21.92	1.12
	20	7.69	7.63	6.11	7.14	0.90	24.24	23.88	24.64	24.25	0.38
	25	7.35	7.03	7.80	7.40	0.39	24.24	25.71	24.44	24.80	0.80
	30	10.08	9.45	10.08	9.87	0.36	25.76	24.31	25.95	25.34	0.90

ตารางที่ จ.9 ผลสภาพการนำไฟฟ้า

MWNT (phr)	Clay (phr)	Conductivity (s/cm)				
		1	2	3	Avg.	S.D.
0	0	1.78E-10	1.73E-10	1.93E-10	1.81E-10	1.00E-11
	5	1.70E-10	1.61E-10	1.87E-10	1.73E-10	1.30E-11
	10	1.49E-10	1.58E-10	1.87E-10	1.65E-10	2.03E-11
	15	1.21E-10	1.29E-10	1.31E-10	1.27E-10	5.17E-12
	20	1.35E-10	9.53E-11	9.33E-11	1.08E-10	2.36E-11
	25	9.43E-11	1.08E-10	1.00E-10	1.01E-10	6.97E-12
	30	6.93E-11	6.93E-11	5.88E-11	6.58E-11	6.07E-12
1	0	2.43E-10	2.27E-10	2.28E-10	2.33E-10	9.42E-12
	5	1.68E-10	1.86E-10	1.78E-10	1.77E-10	8.88E-12
	10	1.62E-10	1.79E-10	1.84E-10	1.75E-10	1.12E-11
	15	1.23E-10	1.50E-10	1.30E-10	1.34E-10	1.44E-11
	20	1.37E-10	1.09E-10	1.27E-10	1.24E-10	1.39E-11
	25	8.66E-11	1.34E-10	1.43E-10	1.21E-10	3.02E-11
	30	1.34E-10	9.24E-11	1.27E-10	1.18E-10	2.25E-11
5	0	2.77E-10	2.68E-10	2.54E-10	2.66E-10	1.16E-11
	5	1.75E-10	1.77E-10	1.87E-10	1.80E-10	6.74E-12
	10	1.87E-10	1.84E-10	1.61E-10	1.77E-10	1.42E-11
	15	1.40E-10	1.54E-10	1.33E-10	1.42E-10	1.11E-11
	20	1.24E-10	1.40E-10	1.54E-10	1.39E-10	1.53E-11
	25	1.37E-10	1.46E-10	1.21E-10	1.35E-10	1.24E-11
	30	1.31E-10	1.15E-10	1.35E-10	1.27E-10	1.08E-11

ตารางที่ จ.9 ผลสภาพการนำไฟฟ้า (ต่อ)

MWNT (phr)	Clay (phr)	Conductivity (s/cm)				
		1	2	3	Avg.	S.D.
10	0	2.63E-10	2.89E-10	2.70E-10	2.74E-10	1.35E-11
	5	2.08E-10	2.13E-10	1.98E-10	2.07E-10	7.64E-12
	10	2.13E-10	1.98E-10	1.91E-10	2.01E-10	1.16E-11
	15	1.68E-10	1.85E-10	1.85E-10	1.79E-10	9.70E-12
	20	1.70E-10	1.79E-10	1.66E-10	1.71E-10	6.35E-12
	25	1.74E-10	1.51E-10	1.71E-10	1.66E-10	1.27E-11
	30	1.36E-10	1.53E-10	1.71E-10	1.53E-10	1.79E-11
15	0	2.91E-10	2.66E-10	2.77E-10	2.78E-10	1.29E-11
	5	2.08E-10	2.04E-10	2.28E-10	2.13E-10	1.28E-11
	10	1.99E-10	2.25E-10	1.94E-10	2.06E-10	1.67E-11
	15	2.01E-10	1.80E-10	1.85E-10	1.89E-10	1.10E-11
	20	1.65E-10	2.04E-10	1.85E-10	1.84E-10	1.95E-11
	25	1.71E-10	2.06E-10	1.51E-10	1.76E-10	2.76E-11
	30	1.85E-10	1.78E-10	1.56E-10	1.73E-10	1.50E-11
20	0	2.92E-10	2.98E-10	3.07E-10	2.99E-10	7.48E-12
	5	2.55E-10	2.56E-10	2.43E-10	2.51E-10	7.59E-12
	10	2.12E-10	1.65E-10	2.80E-10	2.19E-10	5.80E-11
	15	2.32E-10	2.18E-10	1.94E-10	2.15E-10	1.91E-11
	20	2.23E-10	1.93E-10	2.08E-10	2.08E-10	1.50E-11
	25	2.12E-10	2.10E-10	1.85E-10	2.02E-10	1.52E-11
	30	1.80E-10	2.12E-10	2.01E-10	1.98E-10	1.63E-11

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายวีระชัย แสงฉาย	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4910120082	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2546

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนกักนุญระดับนักศึกษาปริญญาโท จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีการศึกษา 2549
- ทุนสนับสนุนการทำวิจัยสำหรับงานวิจัยทางด้านนาโน จากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านนาโนเทคโนโลยีของ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2549 และ 2550

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Sangchay, W., Sikong, L. and Kooptarnond, K. "Mechanical Properties of MWNT-Rubber Composite" The First Thailand National Nanotechnology Conference on Nanomaterials, Pharmaceuticals, Devices and Applications Chiang Mai, Thailand. 14-16 August 2007.
- Sangchay, W., Sikong, L. and Kooptarnond, K. "Effect of Preparation Process and Characteristics of MWNT on Properties of NR-MWNT Composites" The 2th Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008) Khon Kaen, Thailand. 28-29 January 2008.