

การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิซิสไตรีนกับอวกาไดอีนสไตรีน
กับออกแกโนเมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยการผสมแบบสารละลาย

PREPARATION OF SBS/ORGANO-MONTMORILLONITE
NANOCOMPOSITES FILM BY SOLVENT BLENDING

ระพี เจริมสูงเนิน
RAPEE JERMSUNGNERN

วิทยานิพนธ์ส่งแบบฉบับของภาควิชาเคมีของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-014-074

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิไสตรีนบิวทาไดอีนไสตรีน
กับอ็อกโทมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยการผสมแบบสารละลาย

PREPARATION OF SBS/ORGANO-MONTMORILLONITE
NANOCOMPOSITES FILM BY SOLVENT BLENDING

ระพี เจิมสูงเนิน

RAPEE JERMSUNGNERN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 76730
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-014-074

**PREPARATION OF SBS/ORGANO-MONTMORILLONITE
NANOCOMPOSITES FILM BY SOLVENT BLENDING**

RAPEE JERMSUNGNERN

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

2007

KMITL-2007-SC-M-014-074

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ สไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน กับออกแกโนมอนต์มอโล- ไนด์ ด้วยการผสมแบบสารละลาย
นักศึกษา	นางสาวระพี เจริญเนิน
รหัสประจำตัว	47064214
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
พ.ศ.	2550
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์โนน
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (SBS) และมอนต์มอริลโลไนด์ (MMT) ที่ดัดแปรโครงสร้าง (SBS/Organo-MMT) ในขั้นแรกทำการดัดแปรโครงสร้าง MMT ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (HTAB) MMT ที่ดัดแปรแล้ว (Organo-MMT) จะมีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่ากับ 23.61 Å ซึ่งมากกว่า MMT และมีปริมาณของ HTAB ในโครงสร้างประมาณ 20% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำ Organo-MMT ไปเตรียมวัสดุประกอบนาโนกับ SBS โดยใช้ไซลีนเป็นตัวทำละลาย แล้วขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) บนแผ่นกระจก โดยปริมาณ Organo-MMT ที่ใช้อยู่ในช่วง 0.25-5% โดยน้ำหนักของ SBS จากนั้นนำฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย XRD และ SEM/EDX พบว่า SBS/Organo-MMT ที่มีปริมาณ 0.25% 0.5% และ 1% เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated nanocomposites) และมีการกระจายของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ แต่ในวัสดุประกอบนาโนที่ใช้ 3% และ 5% Organo-MMT เมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้นจะมีการรวมกันเป็นกลุ่มของอนุภาค จัดเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว (Intercalated nanocomposites) เมื่อทำการวัดเสถียรภาพทางความร้อนด้วย TGA พบว่าเมื่อเติม Organo-MMT ทำให้ SBS มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น จากการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของวัสดุประกอบพบว่า วัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT ที่เตรียมได้มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงกว่า SBS โดยวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเท่ากับ 100% และ 300% สูงสุด และยังสามารถป้องกันการผ่านของอากาศได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุประกอบนาโนทั้งหมดที่เตรียมได้

Thesis Title	Preparation of SBS/Organo-Montmorillonite Nanocomposites film by Solvent Blending
Name	Miss Rapee Jermungnern
Student ID.	47064214
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Punnama Siriphannon
Thesis Co-Advisor	Asst. prof. Dr. Chonlada Ritvirulh Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

ABSTRACT

This research involves preparation of Poly (styrene-butadiene-styrene, SBS)/modified montmorillonite (Organo-MMT) nanocomposites (SBS/Organo-MMT). Montmorillonite (MMT) was modified using hexadecyltrimethyl ammonium bromide (HTAB) in an aqueous medium. The d-spacing (d_{001}) of the modified MMT (Organo-MMT) was 23.61 Å which was higher than that of MMT. The content of HTAB in Organo-MMT was about 20 wt%. SBS/Organo-MMT nanocomposites were prepared by mixing the Organo-MMT in the SBS solution using xylene as solvent and then spin coating on glass substrate. The amount of Organo-MMT was varied in the range of 0.25-5 wt% of SBS. The nanocomposites films were characterized by XRD and SEM/EDX. It was found that the SBS/Organo-MMT nanocomposites containing 0.25, 0.5 and 1% wt% of Organo-MMT were exfoliated nanocomposites with regular dispersion of Organo-MMT. However, the agglomerated particles were observed in the composites with 3 and 5 wt% of Organo-MMT, resulting in intercalated nanostructure. The TGA results showed that the nanocomposites had better heat stability than SBS. Tensile strength and modulus of the SBS/Organo-MMT were higher than those of SBS. Among the prepared composites, the SBS/Organo-MMT with 1% Organo-MMT showed the highest tensile strength and modulus at 100% and 300% strain. In addition, the best barrier (air) property was obtained from the SBS/Organo-MMT with 1% Organo-MMT.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความเอาใจใส่ของอาจารย์ที่ปรึกษาได้แก่ ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์ โนน ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักษลธิ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ และช่วยกรุณาแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ให้ ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดการซึมผ่านของอากาศตามมาตรฐาน ASTM D 1434 และให้ ความรู้ในการวัดการซึมผ่านของอากาศ

ขอขอบพระคุณ พี่เกษมศรี ศิริฤทธิไกร สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือวัดการซึมผ่านของ อากาศ และคำปรึกษาต่างๆ รวมทั้งคอยดูแลช่วยเหลือขณะที่ทำงานวิจัยที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตศาลายา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบังทุกท่านที่ประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา

ขอขอบพระคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ ทุกๆ ท่านที่เอื้อเพื่อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่าน สำหรับกำลังใจ ความห่วงใย ความปรารถนาดี และ ทุกๆ ความช่วยเหลือในขณะทำงานวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจ ความเอาใจใส่ ความรัก และแรงผลักดันจากบิดา มารดา และพี่ๆ และขอขอบพระคุณ นพ. มาวิน วงศ์สายสุวรรณ สำหรับความเมตตา และทุกๆ ความเอาใจใส่ที่มีให้ผู้เขียนขณะพักรักษาตัว รวมถึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึง ณ โอกาสนี้ด้วย

สำหรับบุญงามความดีอันใดซึ่งเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้เขียนขอมอบให้ทุกๆ ความ ปรารถนาดี และความห่วงใยจากทุกๆ ท่านที่มีต่อผู้เขียนตลอดมา

ระพี เจริมสูงเนิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 เกลย์ (Clay).....	4
2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของเกลย์.....	4
2.1.2 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	5
2.2 สารลดแรงตึงผิว.....	7
2.3 เฮกซะเดกซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	8
2.3.1 สมบัติของ HTAB.....	8
2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์.....	9
2.4 พอลิस्टาไทรนบิวทาไดอีนสไตรีน.....	9
2.4.1 การสังเคราะห์ SBS.....	9
2.4.2 สมบัติเด่นของ SBS.....	12
2.4.3 การใช้งาน SBS.....	12
2.5 วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposites).....	12
2.6 การเตรียมวัสดุประกอบนาโน.....	14
2.7 ลักษณะสำคัญของวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์และเกลย์.....	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 การกั้นการซึมผ่านของอากาศ.....	15
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 สารเคมี.....	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	28
3.3 การเตรียมวัตถุดิบในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง.....	30
3.3.1 การตัดแปรโครงสร้างของ MMT.....	30
3.3.2 การหาตัวทำละลายสำหรับ SBS และ Organo-MMT ในการเตรียมวัสดุประกอบ.....	32
3.3.3 การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT.....	33
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	39
4.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Organo-MMT.....	39
4.2 ผลการหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับ SBS และ Organo-MMT ในการเตรียมวัสดุประกอบ.....	43
4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบนาโน.....	45
4.3.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบนาโนด้วย XRD.....	45
4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย TGA ของวัสดุประกอบนาโน.....	47
4.4 สัณฐานวิทยา.....	49
4.4.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM/EDX.....	49
4.5 ผลการทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบนาโน.....	53
4.5.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน.....	53
4.5.2 ผลการทดสอบการซึมผ่านของอากาศ.....	57
4.5.3 การวัดการส่องผ่านของรังสียูวี-วิสิเบิล.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	103

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างผลึกของแร่ไพโรซิลิเกต.....	5
2.2 ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโนเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์.....	7
2.3 โครงสร้างของ Hexadecyltrimethylammonium Bromide.....	8
2.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์.....	11
2.5 ลักษณะของวัสดุประกอบนาโนชนิดต่างๆ.....	13
2.6 ลักษณะกราฟ XRD ของวัสดุประกอบนาโนชนิดต่างๆ.....	13
2.7 แบบจำลองการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์เมื่อเติมเคลย์ลงไปเป็นสารเติมแต่ง.....	15
2.8 ทิศทางเคลื่อนที่ของก๊าซผ่านฟิล์มที่มีการเติมวัสดุซึ่งก๊าซไม่สามารถซึมผ่านได้.....	16
2.9 การซึมผ่านของก๊าซเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้น.....	26
3.1 แผนงานการดัดแปร โครงสร้างของ MMT.....	31
3.2 แผนงานแสดงขั้นตอนการหาตัวทำละลายที่เหมาะสม.....	32
3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT.....	34
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่ผ่านของอากาศตามมาตรฐาน ASTM D 1434.....	36
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ HTAB, MMT และ Organo-MMT.....	39
4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT และ Organo-MMT.....	40
4.3 เทอร์โมแกรมของ HTAB Organo-MMT และ MMT.....	41
4.4 การบวมตัวของ Organo-MMT ในตัวทำละลาย.....	44
4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ SBS และวัสดุประกอบนาโน.....	45
4.6 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนในสภาวะก๊าซในโตรเจน.....	47
4.7 สันฐานวิทยาจาก SEM ของฟิล์ม SBS และวัสดุประกอบนาโน.....	49
4.8 สันฐานวิทยาและการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX.....	51
4.9 ความแข็งแรงดึงของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน.....	53
4.10 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน.....	55
4.11 ค่ามอดุลัสของยังของวัสดุประกอบนาโน.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แบบจำลองลักษณะการจัดเรียงตัวของ Organo-MMT ในแบบต่างๆ.....	58
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยปริมาตรและ D/D' ตามสมการ ของคัสเลอร์.....	59
4.14 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของ Organo-MMT และทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งคาด ว่าเกิดขึ้นในฟิล์มวัสดุประกอบ.....	61
4.15 การส่องผ่านของรังสียูวี-วิสิเบิลใน SBS และวัสดุประกอบนาโน.....	61

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการใช้ตัวทำละลายชนิดต่างๆ สำหรับ SBS และ Organo-MMT . ในการเตรียมวัสดุประกอบ.....	44
4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของ SBS ในวัสดุประกอบนาโนในบรรยากาศไนโตรเจน.....	48
4.3 ความชันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทางการเคลื่อนที่ ของไอโซโพรพานอล.....	59
4.4 ผลการคำนวณค่า Tortuosity factor และสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุประกอบนาโน.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

นาโนเทคโนโลยี เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีในระดับอะตอมและโมเลกุลซึ่งมีขนาดในหน่วยนาโนเมตร (หนึ่งในพันล้านส่วน) มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในชีวิตประจำวัน [1,2] เทคโนโลยีดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและปรับปรุงสมบัติของวัสดุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น พอลิเมอร์ อีลาสโตเมอร์ โลหะ และวัสดุอื่นๆ ทำให้วัสดุดังกล่าวสามารถใช้งานได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เช่น เสื้อผ้าไร้รอยยับและป้องกันรอยเปื้อนสิ่งสกปรก เครื่องสำอางค์และเวชภัณฑ์ที่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ผิวหนังได้ดียิ่งขึ้น ระบบการปลดปล่อยยา (Drug release) ที่สามารถทำหน้าที่เคลื่อนส่งตัวยาไปยังอวัยวะเป้าหมายได้แม่นยำขึ้น เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยทางด้านพอลิเมอร์ ได้นำนาโนเทคโนโลยีมาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เมทริกซ์ในวัสดุประกอบ โดยมุ่งพัฒนาในส่วนของการเสริมแรง (Reinforcement) ที่เติมลงไป ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix) ให้มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร (Nanometer) โดยเรียกผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ว่า “วัสดุประกอบนาโน” สารเสริมแรงที่มีขนาดระดับนาโนเมตรมีหลายชนิด เช่น ซิลิกา (Silica) ไมก้า (Mica) และเคลย์ (Clay) เป็นต้น โดยสารเสริมแรงที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดคือเคลย์ เนื่องจากเคลย์หาได้ง่ายจากธรรมชาติ มีราคาถูก ทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิต และไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม [3] เคลย์มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ชนิดที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดในวัสดุประกอบนาโนคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) เนื่องจากโครงสร้างของ MMT ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาซึ่งมีประจุลบ และชั้นของอะลูมินาซึ่งมีประจุบวกในอัตราส่วนซิลิกา ต่ออะลูมินาเป็น 2:1 ดังนั้น MMT จึงมีความเป็นขั้ว ทำให้ดัดแปรโครงสร้างได้ง่ายด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุ การดัดแปร โครงสร้างของ MMT จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ MMT เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อนำไปเติมในพอลิเมอร์เมทริกซ์ สายโซ่ของพอลิเมอร์จึงมีโอกาสที่จะแทรกเข้าไประหว่างชั้นเคลย์ ทำให้ชั้นเคลย์แยกออกจากกัน เป็นสารเสริมแรงในระดับนาโนเมตร

วัสดุประกอบระหว่างนาโนเคลย์และพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาและวิจัย เนื่องจากวัสดุประกอบดังกล่าวมีสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นกว่าวัสดุประกอบอื่นๆ การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเมอร์และนาโนเคลย์ได้พัฒนาออกเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรกโดย บริษัท Toyota Central R&D [4] สมบัติสำคัญของวัสดุประกอบนาโนจากนาโนเคลย์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง [5] ช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซ ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่วัสดุ ทำให้ทนความร้อนได้สูง ไม่ลามไฟ [6]

ทำให้วัสดุประกอบที่เตรียมได้มีอุณหภูมิเสียรูปเนื่องจากความร้อนสูงขึ้น (Higher heat distortion temperature) [7] นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพต่อรังสีต่างๆ กล่าวคือทนต่อรังสีต่างๆ ได้ดีขึ้น สมบัติเหล่านี้เห็นได้ชัดเจน แม้จะมีการเติมส่วนผสมของนาโนเคลย์ ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากสมบัติของวัสดุประกอบที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้สามารถนำไปใช้งานเฉพาะทางต่างๆ ได้อย่างน่าอัศจรรย์ ผลพลอยได้ก็ตามมาก็คือ สามารถลดต้นทุนการผลิตโดยรวมได้มาก ส่วนผสมไม่ยุ่งยาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำหนักเบาขึ้นเมื่อเทียบกับการใส่สารตัวเติม (Fillers) อื่นๆ

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (Poly (styrene-butadiene-styrene), SBS) กับมอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง (Organo-MMT) ซึ่ง SBS จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ มีความยืดหยุ่นที่ดี นิ่ม มีความแข็งแรงต่ำ และอากาศซึมผ่านได้ดี งานวิจัยนี้จึงตั้งใจนำ SBS มาเตรียมเป็นวัสดุประกอบนาโนโดยการเติมมอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างแล้ว เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง และป้องกันการซึมผ่านของอากาศให้แก่ SBS ดิซีน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประโยชน์ในการใช้งาน SBS ในอุตสาหกรรมได้กว้างขวางขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำการดัดแปรโครงสร้างของมอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก
2. เพื่อเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS กับมอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยการผสมแบบสารละลาย (Solvent blending) และขึ้นรูปฟิล์มวัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) และทดสอบสมบัติเบื้องต้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS กับ Organo-MMT ด้วยการผสมแบบสารละลาย โดยดัดแปรโครงสร้างของมอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide, HTAB) ตรวจสอบคุณสมบัติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเทคนิคเทอร์มัลกราวิเมตริก (TGA) จากนั้นหาตัวทำละลายที่เหมาะสม (Solvent screening) ในการเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนด้วยการผสมแบบสารละลาย แล้วขึ้นรูปแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ศึกษาผลของมอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง ที่เติมลงในเมตริกซ์ ในปริมาณ 0.25% 0.5% 1% 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS ต่อสมบัติต่างๆ นอกจากนี้ ทำการเตรียมวัสดุประกอบระหว่าง SBS กับ 1% มอนอ์มอร์ลิโตไลไนต์ โดยน้ำหนักของ SBS เพื่อเปรียบเทียบผลกับสูตรที่มีการ

เติมมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดที่ดัดแปร โครงสร้าง จากนั้นตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ด้วย XRD TGA สังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM/EDX) ทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบการซึมผ่านของอากาศเบื้องต้นตามมาตรฐาน ASTM D 1434 และวัดการส่องผ่านของรังสียูวี-วิสิเบิล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปร โครงสร้าง (Organo-MMT) โดยใช้เฮกซะ-เดคซิล ไตรเมทิลแอมโมเนียม โบรไมด์ ให้มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) มากขึ้น สำหรับการเตรียมวัสดุประกอบนาโน
2. สามารถเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS กับ Organo-MMT โดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ได้
3. ฟิล์มวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลที่ดี และช่วยป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมได้กว้างขวางขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เคลย์ (Clay)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไปของเคลย์

“เคลย์” หมายถึง แร่ดินเหนียว หรือ ดิน โคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matter) และความชื้น [3] แร่ดินเหนียวมีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ซับซ้อน และมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ส่วนใหญ่เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร [8] แร่ดินเหนียวในกลุ่มนั้นยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ โครงสร้างผลึกหรืออัญรูป เป็นต้น ลักษณะเด่นของแร่ดินเหนียวที่นำไปสู่เทคโนโลยีของวัสดุประกอบนาโนคือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นและเรียงซ้อนกันเป็นชั้น บางครั้งจึงเรียกว่า Layer silicate clay เนื่องจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นของเคลย์ ทำให้เคลย์สามารถขยายตัวและหดตัวได้ ทำให้อาร์อื่น ๆ เช่น น้ำ หรือสารอินทรีย์อื่น ๆ สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ได้

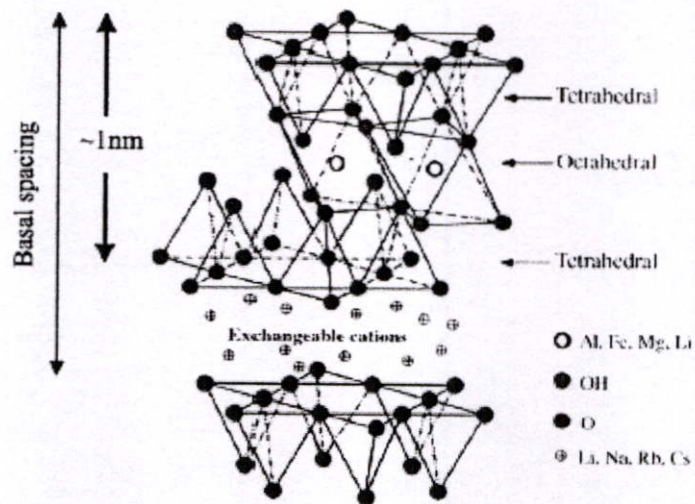
แร่ดินเหนียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือชนิดไม่ผลึกหรืออสัณฐาน และชนิดที่เป็นผลึก [9] แร่ดินเหนียวที่มีความสำคัญต่อวัสดุประกอบนาโนคือแร่ดินเหนียวที่เป็นผลึก สำหรับแร่ดินเหนียวที่เป็นผลึกที่สำคัญคือ สเมกไทต์เคลย์ (Smectite clay) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 คือมีแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ต่อแผ่นอะลูมินา 1 แผ่นในหนึ่งหน่วย โดยที่แร่ดินเหนียวประเภท 2:1 จะขยายตัวและหดตัวได้มาก มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ดี (Cation exchange capacity หรือค่า CEC คือความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก หมายถึงผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดของดิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูลต่อดินแห้ง 100 กรัม เมื่อวัดที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7) [10] แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ที่พบมากในดินคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT)

มอนต์มอริลโลไนต์ มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไปคือ $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ จัดอยู่ในแร่ตระกูลไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส สำหรับในประเทศไทยพบที่บริเวณตำบลถ่านทราย อำเภอยะบะดี จังหวัดลพบุรี [11] แร่ดินเหนียวชนิดอื่น ๆ ในกลุ่มนี้ที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นนาโนเคลย์ ได้แก่ ซาโปไนต์ (Saponite) และเฮกโตไรต์ (Hectorite)

มอนต์มอริลโลไนต์ประกอบด้วยชั้น 3 ชั้นมีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึก [12] ประกอบด้วยชั้นอะลูมินาออกตาฮีดรอล (Octahedral) ซึ่งมีประจุเป็นบวก ที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิ-

เกตเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ที่มีประจุเป็นลบ จึงมีลักษณะโครงสร้างของชั้นผลึก อะลูมินา (Al_2O_3) ต่อซิลิกา (SiO_2) เป็น 2:1 ความหนาแน่นของชั้นผลึกมีค่าประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ในขณะที่ความยาวของแผ่นผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตร ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุที่อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio (L/D)) สูง และมีประจุสุทธิเป็นลบจึงมักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม แคลเซียม และธาตุอื่น ๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นจึงทำให้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่พื้นผิวด้วยไอออนที่มีขนาดใหญ่ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 0.98 เป็น 1.2-2.5 นาโนเมตร

เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์ มีความเป็นขั้วจึงชอบน้ำ เมื่อมีการนำมาใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุประกอบกับพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่มีขั้ว ทำให้มีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และมอนต์มอริลโลไนต์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ ให้เป็นสารที่ความเป็นขั้วลดลงก่อนนำมาใช้งาน การดัดแปรโครงสร้างที่พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของแร่ไฟโรซิลิเกต [12]

2.1.2 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนการนำมาใช้งานนั้นทำได้โดยการใช้เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ (Quaternary ammonium) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กับโซเดียมไอออน (Na^+) หรือพวกไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline or Alkaline earth ions) ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ จาก

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการตัดแปร โครงสร้างด้วยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตภายใน โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์มีระยะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของชั้นซิลิเกตซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าไอออนของโซเดียม หรือไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ โดยการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตนั้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวของหมู่อัลคิลในเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์

ภายหลังการตัดแปร โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แล้ว ทำให้สมบัติความชอบน้ำของมอนต์มอริลโลไนต์ลดลง จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำจากการแทนที่ไอออนของโซเดียม ไอออนของอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ธ ด้วยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ในระหว่างชั้นซิลิเกต จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า แร่ดินเหนียวชนิดตัดแปร (Modified clay) ออแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Organomontmorillonite) ออแกโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออแกโนเคลย์ (Organoclay) หรือนาโนเคลย์ (Nanoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ สามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์ เช่น พอลิเมอร์ เนื่องจากความมีขั้วลดลง

เมื่อพอลิเมอร์แทรกเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกต จะทำให้ชั้นของซิลิเกตซึ่งเกาะกันอย่างหลวมๆ มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้น ถ้าพอลิเมอร์แทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตได้มาก และมีขนาดความยาวของสายโซ่มากพอ ชั้นของซิลิเกตแต่ละชั้นอาจแยกออกจากกันได้ ทำให้มีขนาดอนุภาคเสริมแรงอยู่ในระดับนาโนเมตร เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร นับว่าเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคขนาดนาโนเมตรจากธรรมชาติ

การแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไปในชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ [8] แบ่งตามลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ได้ 4 แบบคือ

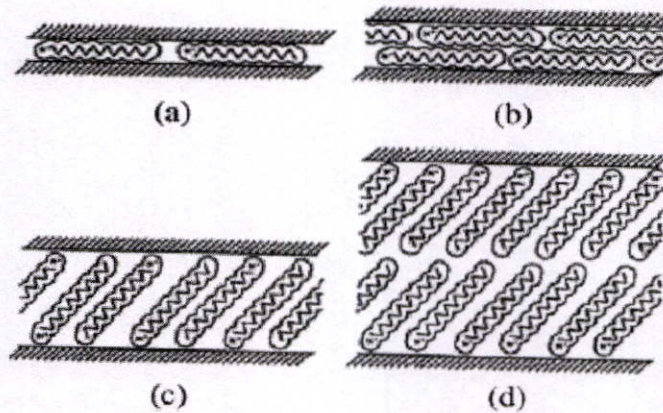
1. Lateral monolayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตเพียง 1 ชั้น ไม่มีการซ้อนกันของสายโซ่ และสายโซ่จัดเรียงตัวในลักษณะแนวนอนที่ขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 a

2. Lateral bilayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต โดยเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ในแนวนอนขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงได้ดังรูปที่ 2.2b

3. Paraffin type monolayer สายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต 1 ชั้น ในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิลิเกต ทำให้ระยะห่างของชั้นมีค่าเท่ากับความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 c

4. Paraffin type bilayer เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิลิเกต โดยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ จะเรียงต่อกันเป็น 2 ชั้น ทำให้ระยะห่างของชั้นซิลิเกตมีค่าเท่ากับความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ 2 สายโซ่รวมกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 d

การจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ดังกล่าว เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างชั้นของอ็อกไซด์ หรืออ็อกไซด์มอนอเมอร์ในโครงสร้าง



รูปที่ 2.2 ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโมเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์ [12]

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| a) Lateral monolayer | b) Lateral bilayer |
| c) Paraffin type monolayer | d) Paraffin type bilayer |

2.2 สารลดแรงตึงผิว [13,14]

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้สารที่มีประจุลบ ส่วนมากจะอยู่ในรูปของเกลือซัลโฟเนต เกลือซัลเฟต และเกลือฟอสเฟต เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งสกปรก ช่วยให้เปียก รักษาสิ่งสกปรกให้แขวนลอยในน้ำได้ดี และให้ฟองมาก

2. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อนุมูลของสารที่มีประจุบวก ส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารประกอบเอมีนหรือเกลือของแอมโมเนียม เช่น เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมโบรไมด์ เป็นต้น สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ไม่สามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นด่างสูง (pH 10-11) เนื่องจากเกลือแอมโมเนียมจะมีการสูญเสียประจุบวก ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองมากกว่าสารลดแรงตึงผิวที่มี

ประจุลบ จึงมักนำไปใช้ในน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการจัดแต่งทรงผม เป็นต้น

3. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกและลบใน โมเลกุลเดียวกัน (Zwitterionic surfactant หรือ Amphoteric surfactant)

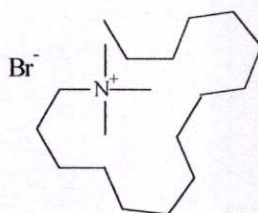
สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำ สามารถให้ได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ ขึ้นกับค่าความเป็นกรดของสภาวะแวดล้อม สารประเภทนี้จะกำจัดสิ่งสกปรกได้ดีที่สุดในสารละลายที่เป็นกลาง จึงนิยมใช้ทำแชมพู และผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิว เป็นต้น

4. สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้เมื่อละลายน้ำจะไม่มีการแตกตัวให้อนุมูลของสารที่มีประจุ เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีสมบัติเป็นสารซักฟอก ทนต่อน้ำกระด้าง ต่อกกรด และต่อด่าง แต่ให้ฟองน้อย และสามารถใช้ร่วมกับสารเคมีชนิดอื่นๆ ได้

2.3 เฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ [15]

เฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium bromide, HTAB) อาจเรียกว่า Cetrymonium bromide, Cetyltrimethylammonium bromide, Palmityltrimethylammonium bromide, Trimethylhexadecylammonium หรือ CTAB เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) มีสูตร โมเลกุล $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{Br})(\text{CH}_3)_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 364.45 และมีสูตร โครงสร้าง ดังรูป



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ Hexadecyltrimethylammonium Bromide [15]

2.3.1 สมบัติของ HTAB

HTAB เป็นผงของแข็งสีขาว ละลายน้ำได้สารละลายใส และเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่แรง ค่า pH ประมาณ 5.0–7.0 (25 °C, 0.1 M ในน้ำ) จุดหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 237–250 °C จุดควบไฟ 244 °C (471 °F) จุดเดือด 235 °C อุณหภูมิสลายตัว (T_d) 230 °C เสถียรที่อุณหภูมิห้อง ดูดความชื้นได้ง่าย เมื่อเผาไหม้จะเกิดควันที่เป็นพิษและระคายเคือง

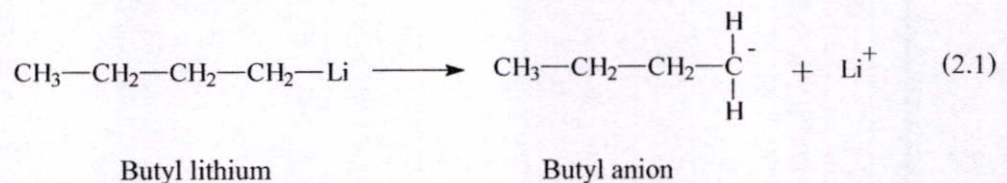
2.3.2 การนำไปใช้ประโยชน์

HTAB ใช้เป็นส่วนประกอบของครีมนวดผม สารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic agent) สารซักล้าง สารทำให้นุ่มในอุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ สารฆ่าเชื้อและสารต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ และสารอิมัลซิไฟเออร์ ใช้คัดแปร โครงสร้างของมอนอเมอร์โพลีไธโอ

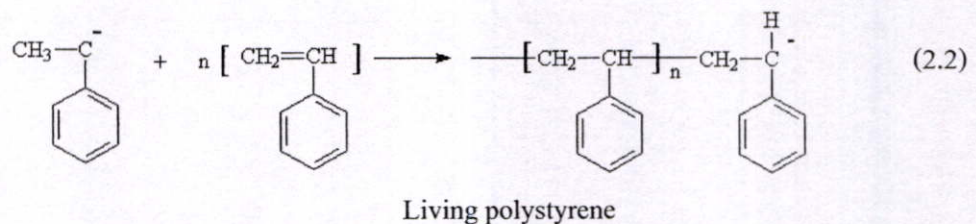
2.4 พอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน

2.4.1 การสังเคราะห์พอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน [16-18]

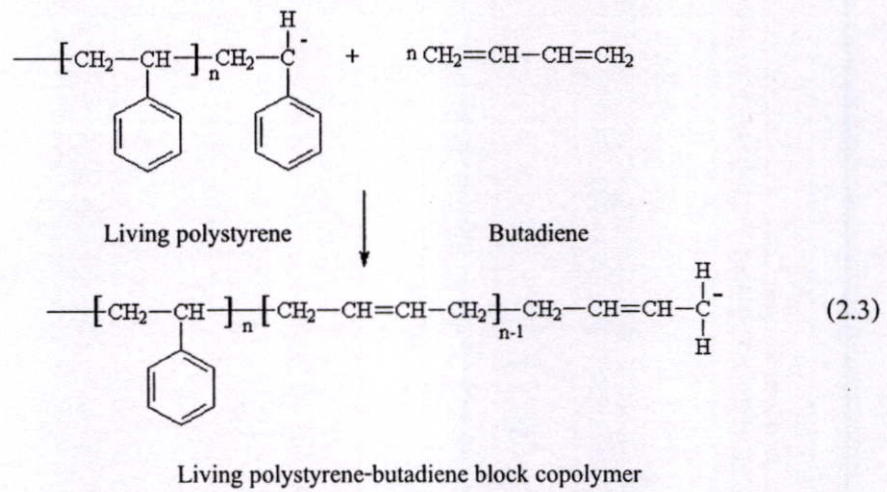
Poly (styrene-butadiene-styrene) หรือ SBS เตรียมได้จากการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านกลไกปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมด้วยประจุลบแบบ Living anionic polymerization เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เริ่มจากการเกิดหมู่ที่ว่องไว (Active site) หรือไอออนลบของตัวริเริ่ม จากนั้นไอออนลบของตัวริเริ่มจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์เกิดไอออนลบใหม่เป็นการตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์ โดยตัวริเริ่มที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์คือ บิวทิลลิเทียม (Butyl lithium) การเกิดไอออนลบของบิวทิลลิเทียมแสดงในสมการต่อไปนี้



หลังจากนั้นไอออนลบของตัวริเริ่มจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ในมอนอเมอร์สไตรีนไอออนลบที่เป็นตัวตั้งต้นสายโซ่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์โมเลกุลที่สอง สาม สี่ ไปเรื่อยๆ ซึ่งถ้าไม่มีการเติมมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ ลงไป ทำให้ได้พอลิสไตรีนที่ปลายสายโซ่มีความว่องไวอยู่เรียกว่า Living polymer แสดงได้ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

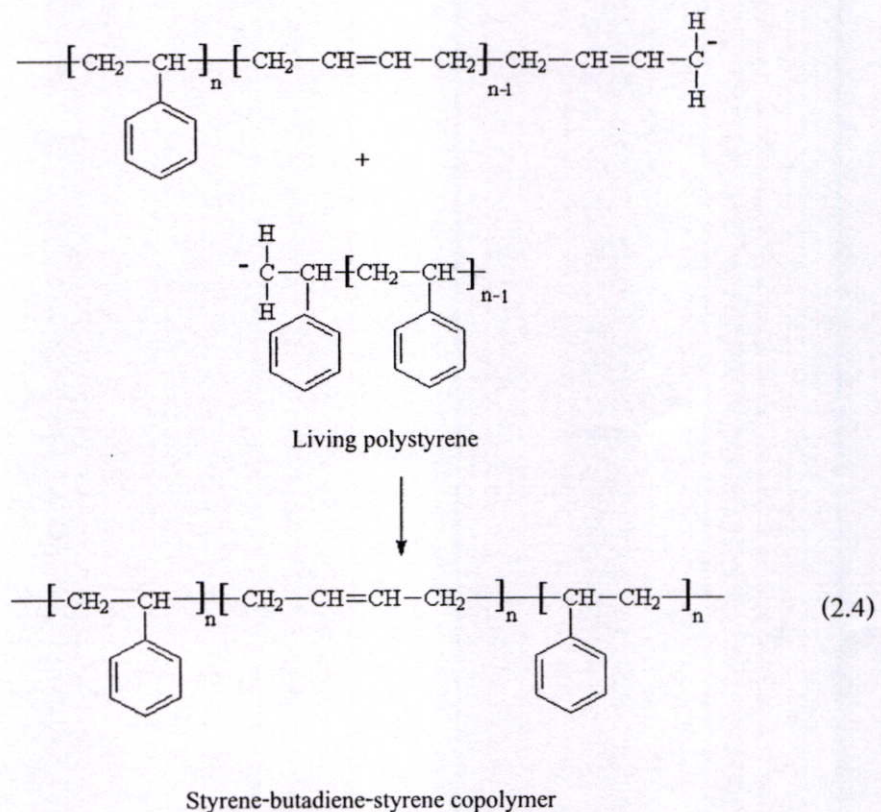


หลังจากนั้นเติมบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อจาก Living polymer ของพอลิสไตรีน แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



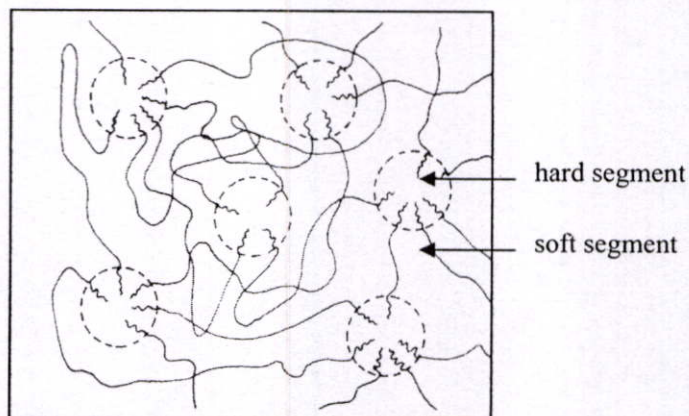
เมื่อได้ Living styrene-butadiene block copolymer แล้ว ขั้นตอนถัดมาเติมสารคู่ควบ (Coupling agent) แล้วเติม Living polystyrene homopolymer ลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิสไตรีนบิวทาไดอีน ได้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน แสดงได้ดังสมการ

สารคู่ควบนั้นมีหลายชนิด การเลือกใช้สารคู่ควบที่ต่างชนิดกันทำให้ได้โครงสร้างของ SBS ที่แตกต่างกันออกไป การเลือกใช้สารคู่ควบที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ ตัวอย่างเช่น ไดคลอโรไดเมทิลไซเลน (Dichlorodimethyl silane) เป็นต้น ทำให้ได้ SBS ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง (Linear chain) [19]



จะเห็นได้ว่าโครงสร้างโมเลกุลของ SBS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนของพอลิสไตรีน และ ส่วนของบิวทาไดอีน [20] โดยส่วนของพอลิสไตรีนจัดเป็นส่วนแข็ง (Hard segment) และส่วนของพอลิบิวทาไดอีนจัดเป็นส่วนอ่อน (Soft segment) โดยที่ส่วนแข็งคือพอลิสไตรีนมีความสำคัญในการสร้างบริเวณแข็ง (Rigid region) ที่ทำหน้าที่คล้ายกับการเชื่อมโยงเชิงกายภาพ (Physical crosslinks) ยึดสายโซ่ที่ยืดหยุ่นของส่วนอ่อนคือพอลิบิวทาไดอีนไว้ด้วยกัน ส่วนแข็งเหล่านี้สามารถคลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อน และกลับมารวมกันใหม่ได้เมื่อเย็นตัว สำหรับส่วนอ่อนคือพอลิบิวทาไดอีน มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) คล้ายยาง มีอิสระในการเคลื่อนที่มากกว่าส่วนแข็ง และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ต่ำ

SBS จัดเป็นวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [21] (Thermoplastic elastomers, TPEs) ชนิดหนึ่ง ซึ่งวัสดุดังกล่าวเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (Rubber-like) นิ่มตัว มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ ยืดหยุ่นได้คล้ายยาง แต่แตกต่างจากยางทั่วไปคือ สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งคล้ายเทอร์โมพลาสติก การที่ SBS สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งหรือไหลได้ที่อุณหภูมิสูง และกลายเป็นยางที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจาก SBS มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinks) แทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมีเหมือนยางทั่วไป จุดเชื่อมโยงเชิงกลนี้จะช่วยยึดให้สายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ติดกันเหมือน โครงสร้างร่างแหสามมิติในยาง แต่สามารถเปลี่ยนแบบย้อนกลับไปได้เมื่อให้ความร้อน จึงขึ้นรูปได้ใหม่เหมือนเทอร์โมพลาสติก ส่วนอ่อนและส่วนแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [19]

2.4.2 สมบัติเด่นของ SBS [21]

- เป็นพอลิเมอร์อสัญฐานทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้โปร่งใส (Transparent)
- ทนต่อน้ำมัน
- เป็นฉนวนทางความร้อนที่ดี
- ทนต่อสารเคมี
- ทนต่อแรงกดและแรงกระแทกได้ดี

2.4.3 การใช้งาน SBS [22]

- ใช้ในอุตสาหกรรมพื้นรองเท้า
- ใช้ในการผลิตอุปกรณ์กีฬา
- ใช้ผลิตวัสดุรับแรง และวัสดุอื่นๆ ที่ต้องการความทนทาน
- ใช้ปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น
- ใช้ในอุตสาหกรรมสารยึดติด (Adhesive)
- ใช้ผลิตส่วนประกอบของยางรถยนต์

2.5 วัสดุประกอบนาโน [12, 23-25]

วัสดุประกอบนาโน (Nanocomposites) เป็นวัสดุประกอบที่มีอนุภาคของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์เมตริกซ์มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของวัสดุประกอบได้เป็น 3 ประเภท [12] คือ

1. วัสดุประกอบแบบดั้งเดิม หรือเรียกว่า Conventional composites

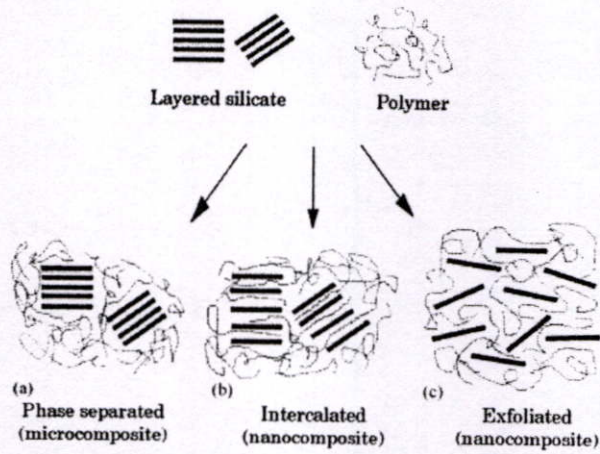
วัสดุประเภทนี้เป็นโครงสร้างของวัสดุประกอบแบบไมโคร (Microcomposites) ซึ่งสายโซ่ของพอลิเมอร์ไม่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 a

2. วัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposites)

วัสดุประเภทนี้เป็นวัสดุประกอบนาโนที่ยังคงมีโครงสร้างของชั้นซิลิเกตที่เรียงซ้อนอย่างหลวมๆ แต่มีระเบียบอยู่ภายในพอลิเมอร์เมตริกซ์ การอยู่รวมกันระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์จะมีลักษณะเหมือนแซนวิช โดยสายโซ่ของพอลิเมอร์จะแทรกอยู่ระหว่างชั้นของซิลิเกต โดยที่ชั้นของซิลิเกตไม่แยกออกจากกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 b

3. วัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated nanocomposites)

วัสดุประกอบประเภทนี้เป็นวัสดุประกอบที่ทำให้ชั้นของซิลิเกตแตกกระจายแยกออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยวๆ กระจายอย่างอิสระในเนื้อพอลิเมอร์แสดงได้ ดังรูปที่ 2.5 c วัสดุประกอบนาโนชนิดนี้จะมีสมบัติที่ดีมาก แม้จะใช้สารตัวเติมในปริมาณเพียงเล็กน้อย

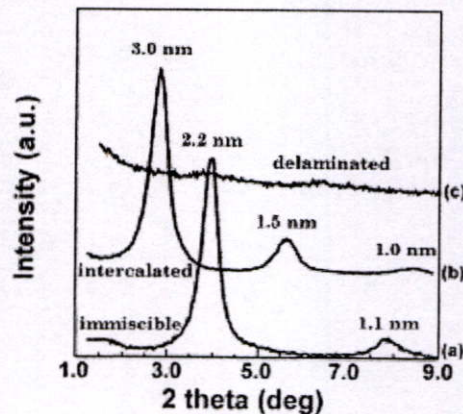


รูปที่ 2.5 ลักษณะของวัสดุประกอบนาโนชนิดต่างๆ [8]

การตรวจวิเคราะห์เคลย์ในวัสดุประกอบนาโนอาศัย เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) จัดเป็นเทคนิคหนึ่งในการตรวจวิเคราะห์ว่าวัสดุประกอบนาโนเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว (Intercalated) หรือเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ซึ่งโดยปกติแล้วการแทรกตัวของพอลิเมอร์เข้าไประหว่างชั้นเคลย์ จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น ทำให้พีกของเคลย์ที่ระนาบ (100) เลื่อนไปยังตำแหน่ง 2θ ที่ต่ำลง นั่นหมายถึงการที่เคลย์มีระยะห่างที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของ Bragg's equation ดังนี้

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

จากการเลื่อนของพีกจาก XRD ทำให้สามารถระบุได้ว่า เคลย์ในวัสดุประกอบมีลักษณะเป็น Intercalated หรือ Exfoliated การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะกราฟ XRD ของวัสดุประกอบนาโนชนิดต่างๆ [8]

a) Microcomposite b) Intercalated nanocomposites และ c) Exfoliated nanocomposites

2.6 การเตรียมวัสดุประกอบนาโน [26]

วิธีการในการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์มีหลายวิธี และวิธีที่นิยมใช้มีดังนี้

1. การผสมแบบสารละลาย (Solution method)

การเตรียมแบบสารละลายเป็นเทคนิคที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างมีการกระจายตัว ส่วนพอลิเมอร์ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่เลือกใช้ เทคนิคนี้จะช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Agglomeration) ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง การเตรียมวัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิคนี้ สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกตได้ง่าย หลังจากนั้นเทหล่อสารละลายดังกล่าวในแม่พิมพ์ และระเหยตัวทำละลายอินทรีย์หรือตกตะกอน

2. การผสมแบบหลอมเหลว (Melt method)

เทคนิคนี้จะผสมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เลือก โดยอาศัยการให้ความร้อนทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว สายโซ่ของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะค่อยๆ เคลื่อนที่เข้าไประหว่างชั้นของเคลย์เนื่องจากแรงเฉือน ทำให้ได้วัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว หรือ แบบแตกกระเจิง

3. In situ intercalative polymerization

ในเทคนิคนี้มีลักษณะคล้ายกับการเตรียมแบบสารละลาย แต่แตกต่างกันที่เทคนิคนี้จะเตรียมจากมอนอเมอร์ โดยชั้นของเคลย์บวมตัวอยู่ในมอนอเมอร์ หลังจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน พอลิเมอร์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสามารถริเริ่มได้ด้วยความร้อน รังสี หรือด้วยตัวริเริ่มปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่างๆ

2.7 ลักษณะสำคัญของวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์และเคลย์ [3]

1. มีความใส เพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส

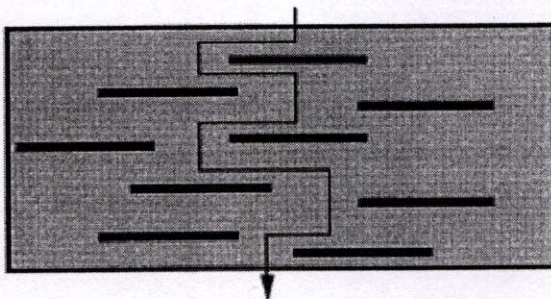
2. มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นซิลิเกต แม้จะเติมในปริมาณที่น้อยมากก็ทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างมาก

3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซ เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น และมีอัตราส่วนความยาวต่อพื้นที่หน้าตัดสูง จึงเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.7

4. ทนความร้อนได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้จะให้ถ่านปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับได้อย่างรวดเร็ว

5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า จะทำให้วัสดุประกอบดังกล่าวนำไฟฟ้าหรือนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้นเพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในสถานะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

6. สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้ ทำให้ช่วยลดปัญหาขยะ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.7 แบบจำลองการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์เมื่อเติมเคลย์ลงไปเป็นสารเติมแต่ง [3]

2.8 การกั้นการซึมผ่านของอากาศ [27]

การกั้นการซึมผ่าน (Barrier properties) ของอากาศ หรือก๊าซต่างๆ ในฟิล์มพอลิเมอร์ จะช่วยให้สามารถนำพอลิเมอร์มาใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้นในงานด้านบรรจุภัณฑ์ การป้องกันการซึมผ่านของอากาศทำได้โดยการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable sheet) เช่น เคลย์ ไมก้า ทัลคัม อื่นๆ ที่มีลักษณะ โครงสร้างภายในเป็นแผ่น ลงในฟิล์มพอลิเมอร์บริสุทธิ์ จะช่วยลดการซึมผ่านของอากาศได้ เนื่องจาก

1. พื้นที่ที่ก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้มีพื้นที่ลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ลงไปแทนที่พอลิเมอร์ ซึ่งก๊าซสามารถผ่านได้ดี
 2. การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ เนื่องจากเมื่อมีการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ ทำให้ก๊าซต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดโค้งรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้
- การลดการซึมผ่านของก๊าซสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของคัสเลอร์ (Cussler's model) แบบจำลองของคัสเลอร์ (Cussler's model) [28]

คัสเลอร์ได้อธิบายพฤติกรรมการแพร่ผ่านของก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลเล็กๆ ผ่านพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่มีการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ ในกรณีที่แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้มีการจัดเรียงตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่แพร่ผ่านของก๊าซ และแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูง การแพร่ผ่านของก๊าซผ่านแผ่นฟิล์มขึ้นอยู่กับ ปัจจัยดังนี้

1. ความคดเคี้ยวรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้
2. ความแน่นของช่องว่างระหว่างแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้
3. ความต้านทานการขยับของแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้

แบบจำลองของคัสเลอร์ แสดงได้ดังสมการที่ 1 โดยสมมุติว่าการแพร่ผ่านขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้ และสัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

$$\frac{D}{D'} = \frac{1}{1 + \frac{(L/2W)^2 \phi_f^2}{(1 - \phi_f)}} \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของวัสดุประกอบ (Diffusion coefficient of the composites)

D' คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (Diffusion coefficient of the pure polymer)

L คือ ความยาวของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

W คือ ความกว้างของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

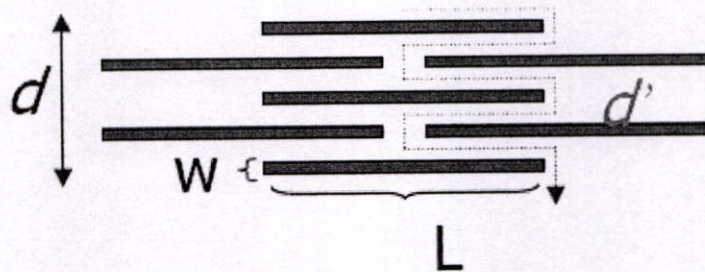
ϕ_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นวัสดุซึ่งก๊าซซึมผ่านไม่ได้

และสามารถคำนวณความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้โดยสมการที่ 2

$$\frac{P}{P_0} = \frac{(1 - \phi_f)^2}{1 - \phi_f + (L/2W)^2 \phi_f^2} \quad (2.6)$$

เมื่อ P คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในวัสดุประกอบ

P_0 คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์



รูปที่ 2.8 ทิศทางเคลื่อนที่ของก๊าซผ่านฟิล์มที่มีการเติมวัสดุซึ่งก๊าซไม่สามารถซึมผ่านได้ [28]

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับทฤษฎีความคดโค้ง (Tortuosity theory) [29] กล่าวได้ว่า ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางการแพร่ผ่านของก๊าซ

เพิ่มขึ้น โดยค่า Tortuosity factor (τ) นิยามว่าเป็น อัตราส่วนของโมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ผ่านแผ่นฟิล์ม (d') ต่อความหนาของแผ่นฟิล์ม (d) แสดงได้ดังสมการที่ 3

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \right] \phi_f \quad (2.7)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของแผ่นเคลือบ

W คือ ความกว้างของแผ่นเคลือบ

ϕ_f คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นเคลือบ

และสามารถคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้จาก

$$\frac{P}{P_0} = \frac{(1 - \phi_f)}{\tau} \quad (2.8)$$

เมื่อ P คือ ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซผ่านวัสดุประกอบ

P_0 คือ ความสามารถในการซึมผ่านก๊าซผ่านพอลิเมอร์บริสุทธิ์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ A. B. Morgan และ J. D. Harris [30] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ระหว่างพอลิไตรีนกับเคลือบ โดยการผสมแบบสารละลาย (Solvent blending) ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ การตัดแปรโครงสร้างของเคลือบและทำการเปรียบเทียบผลจากชนิดของเคลือบที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ Fluorinated synthetic mica (FSM, ชื่อทางการค้า คือ SOMASIFME-100) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT, ชื่อทางการค้าคือ Cloisite Na⁺) โดยใช้ 1,2-Dimethyl-3-n-hexadecyl imidazolium bromide (DMHDI-Br) ในการตัดแปรโครงสร้างของเคลือบ และขั้นตอนที่ 2 คือ การเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิไตรีนกับเคลือบ โดยเติมเคลือบ 1% และ 2.5% โดยน้ำหนัก ด้วยการผสมแบบสารละลาย พบว่าตัวทำละลายที่เหมาะสมคือ คลอโรเบนซีน เนื่องจากสามารถละลายพอลิไตรีนได้ดี ทำให้เคลือบที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างแล้วเกิดการบวมตัวดี และมีเสถียรภาพสูง นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของการใช้เครื่องสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง (Sonication) ขณะเตรียมวัสดุประกอบโดยการใช้และไม่ใช้ Sonic horn เพื่อกระจายเคลือบในตัวทำละลายก่อน แล้วเติมพอลิไตรีน จากนั้นทำการปั่นกวนของผสมทั้งสองที่อุณหภูมิห้อง 4 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ 20 ชั่วโมง แล้วกำจัดตัวทำละลาย โดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุน และตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d -spacing) ของ MMT มีค่า

มากกว่า FSM และการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง (Sonication) จะทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มขึ้น สามารถเตรียมวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated) ได้โดยการใช้แรงสั่นด้วยคลื่นความถี่สูงด้วย Sonic horn ร่วมด้วย

งานวิจัยของ J. Ma และคณะ [31] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Polydimethylsiloxane (PDMS) และโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na^+ -MMT) โดยการดัดแปรโครงสร้างของ Na^+ -MMT ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide) จะทำให้ได้อแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ (Org-MMT) จากนั้นแช่ Org-MMT 5 กรัม ในคลอโรฟอร์ม 50 ml นาน 5 ชั่วโมง แล้วเติมไดเมทิลไดคลอโรไซเลน มอนอเมอร์ (Dimethyldichlorosilane monomer) ลงไป 25 กรัม นำไปให้แรงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกนาน 1 ชั่วโมง และในขณะเดียวกันทำการผสมเมทานอล 30 ml น้ำ 10 ml คลอโรฟอร์ม 30 ml ในขวดสามคอแล้วค่อยๆ หยดสารละลายข้างต้นลงไปด้วยอัตราเร็ว 1 หยดต่อนาที ที่อุณหภูมิ 0°C และทำการปั่นกวนอย่างแรงแล้วล้างสารละลายที่ได้ด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเติมเตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) 200 ml ลงไปในสารละลายดังกล่าว ปั่นกวนนาน 5 นาที และนำสารละลายไปตกตะกอนโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง นำตะกอนที่ได้ละลายในคลอโรฟอร์ม 500 ml และปั่นกวน 10 นาที สารละลายที่ได้จะเรียกว่าอแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดปรับปรุง (Treated-org-MMT) เท Treated-org-MMT ลงในขวดสามคอและเติมพอลิเมอร์ PDMS ลงไปปั่นกวนนาน 1 ชั่วโมง ตกตะกอนสารละลายด้วยเมทานอล วิเคราะห์ Treated-org-MMT ด้วย เทคนิค XRD โดยนำสารละลายของ Treated-org-MMT ระบายให้แห้งในตู้อบสูญญากาศ จากการวิเคราะห์พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเตรียมวัสดุประกอบนาโนผ่านเทคนิค In situ polymerization ทำให้ได้วัสดุประกอบนาโนระหว่าง PDMS/Org-MMT และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ทั้งนี้เนื่องจากโดยปกติแล้วพิกของ MMT จะขึ้นที่มุม 2θ เท่ากับ 4-5 องศา คือมีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 1.97 nm แต่เมื่อเตรียมเป็นวัสดุประกอบแล้วจะไม่พบพิกที่ตำแหน่งดังกล่าว จากผลการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่า วัสดุประกอบ PDMS/10% MMT ที่เตรียมได้ ทนความร้อนได้ดีขึ้นกว่า PDMS บริสุทธิ์ คือจะเสียดสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 395.4°C แต่เมื่อเตรียมเป็นวัสดุประกอบแล้วพบว่าสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 463.6°C ซึ่งสูงขึ้นไปถึง 68.2°C

งานวิจัยของ X.A. Fu และคณะ [32] ได้ศึกษาการบวมตัวของอแกโนเคลย์ในสไตรีน และศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated) โดยศึกษาผลของสารซึ่งใช้ในการดัดแปรโครงสร้าง MMT ที่ส่งผลกระทบต่อ การบวมตัวของอแกโนเคลย์ที่เตรียมได้ในสไตรีน การศึกษาเริ่มจากการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยสารดังต่อไปนี้ Octadecylamine (ODA) Hexadecyltrimethyl ammonium bromide (HTAB) Benzalkonium chloride (BAC) และ Vinylbenzylalkyl dimethyl ammonium chloride (VDAC) โดย MMT ที่ใช้ศึกษามีค่า CEC 90 meq/

100 g เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ลงในเคลย์ที่ผ่านการกำจัดสิ่งแปลกปลอมแล้ว เพื่อปรับไอออนของ MMT ให้เป็นชนิดเดียวกัน (Homoionic) ทำให้ได้ Na^+ -MMT แล้วตัดแปรโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ที่ใช้ในการตัดแปรโครงสร้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) จากนั้นกรองตะกอนแล้วอบให้แห้งเพื่อนำมาใช้ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน โดยผสมออกแกโนเคลย์ในสไตรีนมอนอเมอร์ แล้วทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้ 2,2'-azobisisobutyronitrile (AIBN) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิค XRD พบว่า Na^+ -MMT มีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เท่ากับ 12.4 Å แต่หลังจากการอบด้วยตู้อบสูญญากาศพบว่า Na^+ -MMT จะมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ลดลงเป็น 9.9 Å และเมื่อผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาใช้ในการตัดแปรโครงสร้างของเคลย์ด้วย จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่า Na^+ -MMT ที่ตัดแปรโครงสร้างด้วย ODA มีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์มากที่สุด (21.6 Å) และการศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบนาโนโดยเติมออกแกโนเคลย์ 3.2 % โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อใช้สารตัดแปรโครงสร้าง MMT ต่างชนิดกันจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโน จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุประกอบนาโน PS-VDAC-MMT เป็นวัสดุประกอบชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated) และนอกจากนี้พบว่าวัสดุประกอบทนต่อแรงดึงได้สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีแรงกระทำระหว่าง PS และ VDAC-MMT อย่างแข็งแรง

งานวิจัยของ S. Peeterbroeck และคณะ [33] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิเมอรร่วมเอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Poly (ethylene-co-vinyl acetate), EVA) และเคลย์ และทำการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุประกอบที่เตรียมจากเคลย์ที่ไม่ผ่านการตัดแปรโครงสร้าง และออกแกโนเคลย์ ทั้งด้านสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ โดยเคลย์ที่ใช้เติมใน EVA มี 3 ชนิดคือ Na^+ -MMT ชนิด Closite[®] Na^+ -MMT ชนิด Nanofil[®] และ Na^+ fluoromica ชนิด Somasif[®] นอกจากนี้ยังตัดแปรโครงสร้างของเคลย์ Closite[®] ด้วยเกลือแอมโมเนียมที่แตกต่างกัน คือ dimethyl bis (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations (Closite[®] 20A) ปรับปรุงด้วย (2-ethylhexyl)-methyl (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations (Closite[®] 25A) และตัดแปรโครงสร้างด้วย bis (2-hydroxyl-ethyl) methyl tallowalkyl ammonium cations (Closite[®] 30A) และวิเคราะห์ออกแกโนเคลย์แต่ละชนิดที่ตัดแปรโครงสร้างได้ด้วยเทคนิค XRD พบว่า Closite[®] 20A มีระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์มากที่สุด 22.4 Å ในงานวิจัยจึงใช้ dimethyl bis (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations ในการตัดแปรโครงสร้างของเคลย์ Nanofil[®] ได้เป็น Nanofil[®] 15 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์ประมาณ 29 Å และปรับปรุง Somasif[®] ด้วย dimethyl bis (hydrogenated tallowalkyl) ammonium cations ได้เป็น Somasif[®] MAE ซึ่งเมื่อตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่ามีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 31.1 Å

จากนั้นนำเคลย์แต่ละชนิดนำไปเตรียมวัสดุประกอบกับ EVA โดยเติมเคลย์และออกแกโนเคลย์ 5% สำหรับใช้ในศึกษาสัณฐานวิทยา และเติมเคลย์และออกแกโนเคลย์ 3% สำหรับศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโน EVA/เคลย์ ซึ่งเตรียมได้โดยการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression) จากนั้นวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโนด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบที่เติมเคลย์ชนิดไม่ตัดแปรโครงสร้างจะได้วัสดุประกอบแบบไมโคร เนื่องจากเคลย์ยังคงอยู่กันเป็นชั้นไม่แยกออกจากกัน และระยะห่างของชั้นเคลย์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่วัสดุประกอบที่เติมออกแกโนเคลย์พบว่าสามารถเตรียมเป็นวัสดุประกอบนาโนได้ เนื่องจากเคลย์เกิดการแยกชั้นออกจากกัน และมีระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์เพิ่มขึ้น โดยวัสดุประกอบที่เติม Closite® 20A พบว่าระยะห่างของเคลย์จะเพิ่มจาก 12.1 Å เป็น 38.7 Å วัสดุประกอบซึ่งเติม Nanofil® 15 พบว่าระยะห่างของเคลย์จะเพิ่มจาก 12.2 Å เป็น 40 Å สำหรับวัสดุประกอบที่เติม Somasif® MAE พบว่าระยะห่างของเคลย์จะเพิ่มจาก 12.2 Å เป็น 31.1 Å จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นแบบแทรกตัว (Intercalated) และแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าวัสดุประกอบนาโนระหว่าง EVA/เคลย์ จะมีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้น และจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าการเติมออกแกโนเคลย์ลงใน EVA จะทำให้ได้วัสดุประกอบที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

งานวิจัยของ W. Dieter [34] ศึกษาการทำวัสดุประกอบนาโนที่ประกอบด้วยพอลิพรอพิลีน (PP) ผสมกับเคลย์ ในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยใช้ปริมาณเคลย์ 5% พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีสีที่ทึบขึ้นและเมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC ไม่พบผลของการเกิดนิวเคลียสและการเกิดผลึก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของสารช่วยในการบวมตัว (Swelling agent) ได้แก่ แนนพาทามีจุดเดือดที่ค่อนข้างสูง ทำให้สารช่วยการบวมตัวไม่ระเหยและตกค้างเกิดการขัดขวางการเกิดผลึก จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD จะไม่พบความเป็นผลึกในช่วงมุมของการเบี่ยงเบน 2θ ถึง 40 องศา พบว่าอนุภาคมีการจัดเรียงตัวแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) จากผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าอนุภาคของเคลย์สามารถกระจายตัวสม่ำเสมอดี

งานวิจัยของ L. Liu และคณะ [35] ทำการศึกษาวัสดุประกอบนาโนที่ประกอบด้วยไนลอน 6 กับเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้าง (ออกแกโนเคลย์) โดยใช้กระบวนการหลอมเหลวของไนลอน 6 เข้าไปในชั้นของเคลย์ (Melt intercalation process) จากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์คือ 1.55 nm (2θ เท่ากับ 2.48 องศา) แต่หลังจากการเตรียมเป็นวัสดุประกอบกับไนลอน 6 พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นเป็น 3.68 nm (2θ เท่ากับ 2.38 องศา) เมื่อใช้ออกแกโนเคลย์ต่ำกว่า 10% โดยน้ำหนัก จากการศึกษาสมบัติทางด้านความร้อนโดยเครื่อง DSC พบว่าเคลย์ที่อยู่ในวัสดุประกอบนาโนนั้นช่วยเพิ่มค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลว (T_m) และทำให้ช่วงอุณหภูมิของการเกิดผลึกแคบลงรวมทั้งเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดผลึกและผลของการศึกษาสมบัติ

เชิงกลพบว่ายิ่งปริมาณเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นแต่ความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง

งานวิจัยของ C. Long และ Z. Qi [36] ได้ทำการศึกษาลักษณะความเป็นผลึกและสัณฐานวิทยาของวัสดุประกอบนาโนของพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเรต (PET) กับเคลือบ (5% โดยน้ำหนัก) แล้วนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีและมีขนาดอนุภาคในช่วง 10-100 nm และผลจากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC พบว่าวัสดุประกอบนาโนมีค่าอัตราเร็วในการเกิดผลึกสูงกว่า PET บริสุทธิ์ถึง 3 เท่า และผลของสมบัติทางความร้อนพบว่าวัสดุประกอบนาโนมีค่า Heat distortion temperature (HDT) สูงกว่า PET บริสุทธิ์ประมาณ 20-50 °C และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ามีค่ามอดูลัสสูงกว่า PET บริสุทธิ์ถึง 3 เท่า

งานวิจัยของ T. K. Chen และ K. H. Wel [37] ทำการเตรียมวัสดุประกอบระหว่างพอลิยูรีเทนกับเคลือบ โดยมีพอลิคาโพลแลกโตนเป็น prepolymer จะได้เป็นลักษณะของวัสดุประกอบพอลิเมอร์แล้วนำไปศึกษาด้วยเทคนิค XRD เพื่อแสดงโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกของพอลิคาโพลแลกโตนในพอลิยูรีเทนกับเคลือบ และพบว่าเมื่อปริมาณของเคลือบเท่ากับ 1.4% จะทำให้วัสดุประกอบพอลิยูรีเทนมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) เพิ่มขึ้นแต่เมื่อมีปริมาณเคลือบเพิ่มขึ้นถึง 4.7 % พบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงจากอิลาสโตเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกมากขึ้น

งานวิจัยของ W. J. Bae และคณะ [38] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ระหว่าง Poly (styrenesulfonic acid graft pyrrole, PSSA-g-PPY) กับ Na⁺-MMT ด้วยเทคนิค In situ polymerization การเตรียมวัสดุประกอบนาโนทำโดยเตรียม Na⁺-MMT ให้เกิดการบวมตัวภายใต้สภาวะกรดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก แล้วเติมลงใน Poly (styrenesulfonic acid-co-pyrrolylmethyl styrene, P(SSA-coPMS)) จากนั้นเติม Pyrrole ลงใน P(SSA-co-PMJS)/Na⁺-MMT จะได้ P(SSA-co-PMS)/Na⁺-MMT โดยศึกษาปริมาณ Na⁺-MMT ที่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค Small-angle X-ray scattering (SAXS), XRD และ TEM แสดงให้เห็นว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นแบบแตกกระเจิง (Exfoliated) ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ และจากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของ Na⁺-MMT เพิ่มขึ้น การนำไฟฟ้าของวัสดุประกอบจะลดลง แต่วัสดุประกอบจะสามารถทนความร้อนได้มากขึ้น

งานวิจัยของ M. Avella และคณะ [39] ได้เตรียมวัสดุประกอบนาโนที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติระหว่างแป้งและเคลือบ เพื่อใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร เพื่อช่วยลดปริมาณของขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติที่มาจากพลาสติก โดยผสมแป้งมันฝรั่งกับพอลิเอสเตอร์ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งแป้งจัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) การนำแป้งมาใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร นอกจากจะทำให้ย่อยสลายได้ง่ายแล้ว ยังช่วยลดต้นทุนการผลิต แต่แป้งมีข้อเสียคือ ดูดความชื้นได้ง่าย และมีสมบัติ

เชิงกลต่ำ ดังนั้นการเติม Na^+ -MMT ลงไปจะช่วยลดการซึมผ่านของไอน้ำ และช่วยให้รับแรงได้ดีขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มของวัสดุประกอบนาโน โดยการเติมเคลย์ให้กระจายตัวใน Thermoplastic starch โดยผ่านกระบวนการแบบหลอมเหลว (Melt processing) โดยฟิล์มนี้ผลิตจากแป้งต่างชนิดกัน เช่น แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันฝรั่งผสมพอลิเอสเทอร์ ที่สามารถย่อยสลายได้ จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเติม Na^+ -MMT ลงในแป้งทำให้ผลึกของแป้งลดลงอย่างมาก จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า แป้งมันฝรั่ง/ Na^+ -MMT จะมีค่ามอดูลัสของยังสูงกว่า แป้งมันฝรั่งผสมพอลิเอสเทอร์/ Na^+ -MMT นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า แป้งกับพอลิเมอร์มีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้ Na^+ -MMT ยังช่วยเสริมแรงในวัสดุประกอบ และเกิดเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแตกกระเจิง และแบบแทรกตัว

งานวิจัยของ Y. S. Choi และคณะ [40] ได้เตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมของอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) และเคลย์ โดยผ่านเทคนิค In situ polymerization โดยทำการศึกษาผลของการใช้เคลย์ 2 ชนิดคือ Na^+ -MMT และ Laponite ผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยเติมเคลย์ทั้ง 2 ชนิดลงในปฏิกิริยาการเตรียม ABS โดยการกระจายเคลย์ในสารละลายที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ก่อน จากนั้นทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้คิวมินไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Cumene hydroperoxide) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยเคลย์ที่ใช้ทั้งหมดจะมีปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของ Na^+ -MMT ต่อ Laponite เท่ากับ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบนาโน ABS/เคลย์ และเคลย์ด้วย Wide-angle X-ray diffraction (WAXD) พบว่าไม่ปรากฏฟีกของ Laponite จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ TEM พบว่าเมื่อปริมาณของ Na^+ -MMT ต่ำกว่า 5 % โดยน้ำหนัก วัสดุประกอบที่เตรียมได้จะเป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง แต่ถ้าปริมาณของ Na^+ -MMT มากขึ้นเป็น 7.5% จะได้วัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว จากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าวัสดุประกอบนาโนจะมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า ABS จากการวัดค่า Storage modulus ของวัสดุประกอบนาโน ABS/เคลย์ พบว่าเมื่อปริมาณของ Na^+ -MMT เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Storage modulus เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สามารถทำนายได้ว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณ Na^+ -MMT เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Na^+ -MMT เป็นเคลย์ที่มีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างสูง (Aspect ratio)

งานวิจัยของ J. Xiao และคณะ [41] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่าง Poly (butylenes terephthalate) กับ Na^+ -MMT ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Hexadecyl trimethyl ammonium chloride, OMT-C16) และซีทิลไพริเดียมคลอไรด์ (Cetyl pyridium chloride, CPC) และศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบ และเคลย์ที่ตัดแปรโครงสร้างที่เตรียมได้ โดยเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เป็น Na^+ -MMT เตรียมโดยอัตราส่วนของเคลย์ต่อ CPC หรือ OMT-C16 ในอัตราส่วน 1:1 โมล ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80°C นาน 5 ชั่วโมง และนำไปเตรียมเป็นวัสดุประกอบโดยผสมเคลย์ที่ตัดแปรโครงสร้างแล้วกับ PBT ด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) โดยเติมเคลย์ 3% โดยน้ำหนัก จากนั้นวิเคราะห์วัสดุประกอบด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR), XRD, High-resolution electron microscopy (HREM) และ TEM bright field จากการวิเคราะห์ MMT-OMT-C16 และ MMT-CPC ด้วย IR จะพบพีกของ OMT-C16 และ CPC ทำให้ทราบว่าเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างแล้วจะมี OMT-C16 หรือ CPC แทรกอยู่ระหว่างชั้นเคลย์

จากการวิเคราะห์วัสดุประกอบและเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยเทคนิค XRD พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์จะมีระยะห่างเพิ่มขึ้น ในวัสดุประกอบที่เติม Na^+ -MMT ซึ่งเป็นเคลย์จากธรรมชาติไม่ผ่านการตัดแปรโครงสร้าง พบว่า PBT ไม่สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ได้ ทำให้ได้วัสดุประกอบแบบไมโคร ส่วนวัสดุประกอบที่เติมเคลย์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างจะเป็นวัสดุประกอบนาโนแบบ Intercalated และ Exfoliated ผสมกันอยู่ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้ด้วยเทคนิค TEM และ HERM และจากการวิเคราะห์ด้วย TGA พบว่าวัสดุประกอบนาโนระหว่าง PBT/MMT-OMT-C16 หรือ MMT-CPC ที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PBT/ Na^+ -MMT และ PBT บริสุทธิ์

งานวิจัยของ P. Kampeerapappun และคณะ [42] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบนาโนของแป้งมันสำปะหลังกับมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) โดยเทคนิคการหล่อจากสารละลาย โดยใช้ไดเอทาโนลามีนแคตไอออนผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วน 2:1 จากนั้นนำสารที่ได้ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง น้ำกลั่นและใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ผสมส่วนผสมทั้งหมดในเครื่องปั่น ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิการเกิดเจล ($70-80^\circ\text{C}$) จากนั้นเทสารละลายแป้งลงในแม่พิมพ์อะคริลิก ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบการเปลี่ยนแปลงของพีก โดยไม่พบพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.59 องศา ซึ่งเป็นพีกของ MMT ซึ่งยังไม่ผ่านการตัดแปรโครงสร้าง นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้เกิดการผสมในระดับนาโนเมตร ถึงแม้ว่าจะเตรียมวัสดุประกอบนาโนได้ แต่ความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังกลับมีค่าลดลง เปรียบเช่นดั่งการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมไปทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุประกอบลดลง จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากไดเอทาโนลามีนเป็นสารมีขี้ ทำให้ฟิล์มดูดน้ำมากขึ้น

งานวิจัยของ M. V. Burmistr และคณะ [43] ได้ทำการเตรียมวัสดุประกอบและศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์เชิงเส้น (เช่นพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอไมด์ (PA) เป็นต้น) กับเบนโทไนด์บริสุทธิ์ และเบนโทไนด์ที่ผ่านการตัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือพอลิเมอร์คิวเทอนารีแอมโมเนียม (PQAS) โดยเตรียมวัสดุประกอบนาโน

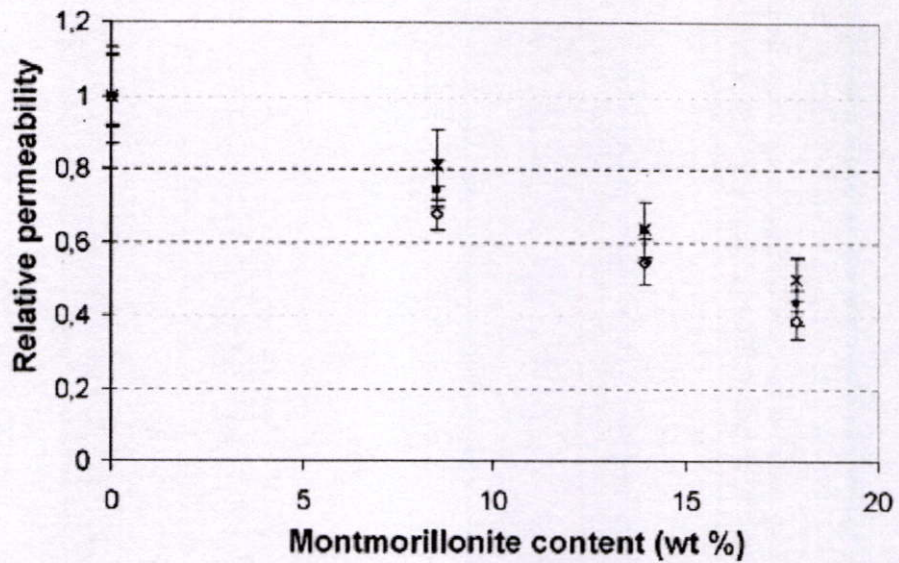
ด้วยการผสมด้วยเครื่องอัดรีด และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด จากการวิเคราะห์หัวสควประกอบทั้งจาก PS และ PA กับเบนโทไนด์และอแกโนเบนโทไนด์ ด้วยเทคนิค XRD พบว่าวัสดุประกอบดังกล่าวเป็นวัสดุประกอบนาโน จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าวัสดุประกอบระหว่าง PA กับอแกโนเบนโทไนด์ และวัสดุประกอบระหว่าง PS กับอแกโนเบนโทไนด์ จะมีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) สูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์หลายเท่า เมื่อปริมาณของเบนโทไนด์และอแกโนเบนโทไนด์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีปริมาณเบนโทไนด์หรืออแกโนเบนโทไนด์มากถึง 5% แต่ถ้าปริมาณมากกว่านี้สมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบนาโนกลับลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติมอแกโนเบนโทไนด์ มีค่าความแข็งแรง และความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติมเบนโทไนด์บริสุทธิ์ และการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่าวัสดุประกอบระหว่าง PS หรือ PA กับอแกโนเบนโทไนด์ มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ประมาณ 30-60 °C

งานวิจัยของ R. K. Shah และคณะ [44] ได้เตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับอแกโนเคลย์ และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างเอทิลีนและกรดเมทาอะคริลิก (Poly (ethylene-co-methacrylic acid) กับอแกโนเคลย์ ด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป จากนั้นทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบนาโนซึ่งประกอบด้วย ทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุประกอบ และทดสอบสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ในโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำผ่านฟิล์มของวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ทั้ง 2 ชนิด โดยอแกโนเคลย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คัดแปร โครงสร้างด้วยไดเมทิลบิสไฮโดรจีเนตเทดโลแอมโมเนียม (dimethyl bis (hydrogenated tallow) ammonium) จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์อแกโนเคลย์ที่เตรียมได้ด้วย TGA พบว่ามีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบประมาณ 48 % และอแกโนเคลย์ที่เตรียมได้มีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่ากับ 35.1 Å จากนั้นทำการผสมพอลิเมอร์และอแกโนเคลย์ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยเติมอแกโนเคลย์ในปริมาณ 1% และ 3% โดยน้ำหนัก จากนั้นขึ้นรูปฟิล์มวัสดุประกอบทั้งสองชนิดโดยการเป่าขึ้นรูป ฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้มีลักษณะของพื้นที่ผิวที่ดี นอกจากนี้ฟิล์มตัวอย่างของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ที่เตรียมได้จะใสไม่มีสี สำหรับฟิล์มของวัสดุประกอบที่เตรียมได้จะขุ่นขึ้นเล็กน้อย และจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อปริมาณของอแกโนเคลย์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าวัสดุประกอบนาโนทั้งสองชนิดมีสมบัติเชิงกล และมีสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซที่ดีกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และวัสดุประกอบนาโน Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/อแกโนเคลย์มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นประมาณ 50% เมื่อมีการเติมอแกโนเคลย์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของ Poly (ethylene-co-methacrylic acid) ส่วนในฟิล์มวัสดุประกอบนาโน LDPE/อแกโนเคลย์ที่มีการเติมอแกโนเคลย์ 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 25% นอกจากนี้การเติมอแกโนเคลย์ในวัสดุประกอบจะไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าการดึงยืด ณ จุดขาด นอกจากนี้วัสดุประกอบนาโน (Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/อแกโนเคลย์)

แกโนเคลย์ มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และค่าการดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าวัสดุประกอบนาโน LDPE/อแกโนเคลย์และยังพบว่าความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซผ่านฟิล์มวัสดุประกอบ Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/อแกโนเคลย์ มีค่าลดลงประมาณ 40% และมีค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลง 60% เมื่อมีการเติมออร์แกโนเคลย์ลงไปในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก ส่วนสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุประกอบนาโน LDPE/อแกโนเคลย์ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากวัสดุประกอบที่เตรียมได้เกิดการแตกกระเจิง (Exfoliated) ในฟิล์มวัสดุประกอบนาโนต่ำกว่า Poly (ethylene-co-methacrylic acid)/อแกโนเคลย์

งานวิจัยของ E. Picard และคณะ [45] ได้ศึกษาสมบัติการกันการซึมผ่านของก๊าซของวัสดุประกอบนาโนระหว่างไนลอน 6 (PA6) กับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง (OMMT) ที่มีปริมาณสารอินทรีย์เท่ากับ 30.8% ด้วยการผสมแบบหลอมเหลวโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ที่มี L/D เท่ากับ 36 แล้วเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโน PA6/OMMT ด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป โดยเตรียมฟิล์มที่มีปริมาณของสารอินทรีย์ใน OMMT เท่ากับ 6% 10% และ 13% โดยน้ำหนัก ได้ฟิล์มวัสดุประกอบ PANC6, PANC10 และ PANC13 ตามลำดับ และฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนา 80 ± 5 ไมครอน จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ฟิล์มวัสดุประกอบนาโน PA6/OMMT ด้วย XRD โดยทำการวัดตั้งแต่มุม 2θ เท่ากับ 1.5° ถึง 9° ไม่ปรากฏพีกซึ่งแสดงเอกลักษณ์ของ OMMT ในวัสดุประกอบนาโน PANC6 และ PANC10 แต่จะพบพีก 2θ เท่ากับ 5° และพบพีกเล็กๆ ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2° (d_{001} เท่ากับ 44 Å) ในวัสดุประกอบนาโน PANC13 ทั้งนี้เนื่องจาก OMMT ในวัสดุประกอบ PANC13 เกิดการแตกกระเจิงอย่างไม่สมบูรณ์ ทำให้ในวัสดุประกอบดังกล่าว มีทั้ง OMMT ที่เกิดการแตกกระเจิง (Exfoliated) และ OMMT ที่ไม่แตกกระเจิง (Intercalated)

จากการทดสอบสมบัติกันการซึมผ่านของก๊าซได้แก่ ฮีเลียม ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไอน้ำ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้น ฟิล์มวัสดุประกอบนาโนจะกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดียิ่งขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 กล่าวคือก๊าซต่างๆ จะแพร่ผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโน PA6/OMMT ได้ยากกว่าการแพร่ผ่านฟิล์มของ PA6 และฟิล์มวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีสมบัติการกันการซึมผ่านของก๊าซที่ดีขึ้นเมื่อปริมาณ OMMT เพิ่มขึ้น



(◇) helium, (■) hydrogen, (×) water, and (—) oxygen.

รูปที่ 2.9 การซึมผ่านของก๊าซเมื่อปริมาณของ OMMT เพิ่มขึ้น [46]

งานวิจัยของ T. Ogasawara และคณะ [46] ได้ศึกษาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซฮีเลียมผ่านวัสดุประกอบนาโนระหว่างอีพอกซีกับมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง 2 ชนิดคือ Nanomer™ I.30E (MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วย Octadecylamine) และ Nanofil™ 32 (MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วย Benzyl dimethyl stearyl ammonium chloride) จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ Nanomer™ I.30E และ Nanofil™ 32 พบว่ามีระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่ากับ 2.3 nm และ 1.9 nm ตามลำดับ จากนั้นเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างอีพอกซีกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้างในปริมาณ 1, 3 และ 6 phr โดยการผสมอนุภาคของ Nanomer™ I.30E หรือ Nanofil™ 32 ลงในอีพอกซีที่อุณหภูมิ 75 °C นาน 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่องผสมเชิงกล จากนั้นเติมสารเชื่อมโยง แล้วเทลงในแม่พิมพ์เทฟลอน (PTFE) ให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 1 ชั่วโมง เตรียมชิ้นงานที่มีความหนา 2 mm จากนั้นทำการทดสอบการซึมผ่านก๊าซฮีเลียมผ่านวัสดุประกอบ โดยผ่านก๊าซฮีเลียมเข้าไปยังด้านบนของแผ่นฟิล์มด้วยอัตราเร็ว 50 ml/min และวัดความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซฮีเลียม พบว่าวัสดุประกอบนาโนระหว่างอีพอกซี/มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรโครงสร้าง มีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซฮีเลียมลดลง เมื่อเทียบกับอีพอกซี และเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นทำให้ก๊าซฮีเลียมซึมผ่านวัสดุประกอบของอีพอกซีได้ลดลง

งานวิจัยของ P. C. Meneghetti และ S. Qutubuddin [28] ได้เตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และ MMT ที่ดัดแปรโครงสร้างด้วยสารประกอบอินทรีย์ 4 ชนิดคือ ออกตะเดซิลเอมีน (Octadecyl-amine, C18amine) ออกตะเดซิลไดเมทิลบีเทน

(Octadecyldimethyl-betaine, C18DMB) ไวนิลเบนซิลโดเดคซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Vinylbenzyl-dodecyl dimethyl ammonium chloride, VDAC) และ ไวนิลเบนซิลออกตะเดคซิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Vinylbenzyl-octadecyl dimethyl ammonium chloride, VODAC) โดยเติมมอนอเมอร์ลอโนไนต์ที่ตัดแปรโครงสร้างในปริมาณ 5, 10, 20 และ 30 phr จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน พบว่าวัสดุประกอบนาโน SBR/VODAC-MMT สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าวัสดุประกอบนาโนของ SBR กับมอนอเมอร์ลอโนไนต์ที่ตัดแปรโครงสร้างด้วยสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุประกอบนาโน SBS กับมอนอเมอร์ลอโนไนต์ที่ตัดแปรโครงสร้างจะช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ โดยเมื่อมีการเติม VODAC-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr พบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง 32% และ 60% ตามลำดับ และพบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงสำหรับทุกๆ ตัวอย่างของวัสดุประกอบนาโน เมื่อปริมาณ MMT ที่ตัดแปรโครงสร้างเพิ่มขึ้นดังนี้ ในวัสดุประกอบนาโน SBR/VDAC-MMT พบว่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะลดลง 21% และ 49% เมื่อเติม VDAC-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ ในวัสดุประกอบ SBR/C18DMB-MMT พบว่ามีการลดลงของการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนจะลดลง 21% และ 36% เมื่อเติม C18DMB-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ และในวัสดุประกอบนาโน SBR/C18amine-MMT พบว่ามีการลดลงของการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมวัสดุประกอบระหว่าง SBR/Na⁺-MMT จากการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้ จะมีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง 11% และ 24% เมื่อเติม Na-MMT ในปริมาณ 10 phr และ 30 phr ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า เมื่อมีการเติมอนุภาคซึ่งก๊าซไม่สามารถแพร่ผ่านได้ลงในพอลิเมอร์เมตริกซ์ ทำให้ก๊าซออกซิเจนใช้เวลานานขึ้นในการซึมผ่านพอลิเมอร์เมตริกซ์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (Poly (styrene-butadiene-styrene), SBS, Calprene 500[®]) ซึ่งมีอัตราส่วนของ บิวทาไดอีน/สไตรีน ในอัตราส่วน 70/30 มีค่าดัชนีการไหล 5 g/10 min ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.94 g/cm³ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท BEHN MEYER Chemical (ประเทศไทย) จำกัด
2. เฮกซะเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium bromide หรือ Centrimonium bromide, C₁₉H₄₂BrN) บริษัท ACROS ORGANICS เกรดวิเคราะห์
3. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT ชื่อทางการค้า Mac gel[®]) บริษัท Thai Nippon Chemical Industry
4. โทลูอีน (Toluene, C₆H₅CH₃) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
5. ไซลีน (Xylene, C₆H₄(CH₃)₂) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
6. คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene, C₆H₅Cl) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
7. เฮกเซน (Hexane, CH₃(CH₂)₄CH₃) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
8. เบนซีน (Benzene, C₆H₆) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
9. ออโรไดคลอโรเบนซีน (o-dichlorobenzene, C₆H₄Cl₂) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์
10. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate, AgNO₃) บริษัท CARLO ERBA เกรดวิเคราะห์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

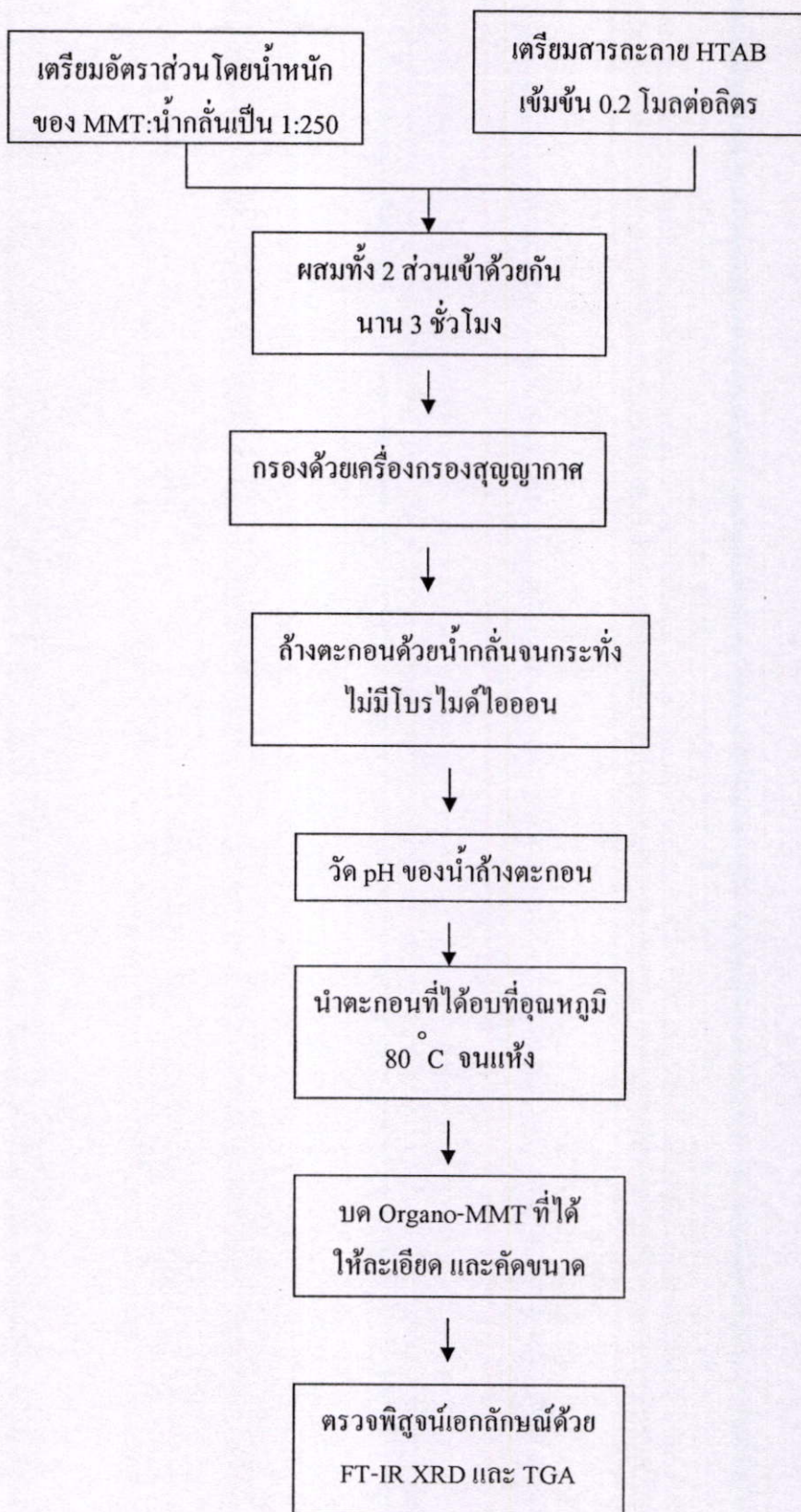
1. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) บริษัท Bruker รุ่น D8 Advance
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM/EDS) บริษัท JEOL รุ่น JSM-5800LV
3. เครื่องวิเคราะห์เทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermogravimetric analyze, TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA
4. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
ความยาวคลื่น : 4000-400 cm⁻¹

5. เครื่องทดสอบแรงดึงประตงค์ (Universal testing machine)
6. เครื่องวัดการซึมผ่านอากาศตามมาตรฐาน ASTM D 1434
(ได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย)
7. เครื่องกรองลดความดัน บริษัท Buchi รุ่น B-169
8. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) บริษัท Denver Instrument รุ่น 225
9. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Fisher Scientific Worldwide รุ่น ULTRASONIK
10. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC-254
11. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific
12. ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven) บริษัท Fisher Scientific รุ่น 282A
13. ตู้อบ (Oven) บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isoterm
14. ใบพัดปั่นกวนพร้อมมอเตอร์ บริษัท IKA LABOR TECHNIK STAUFEN รุ่น EURO-ST B
15. แม่พิมพ์กระจกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 cm
16. บริษัทเครื่องแก้ว
17. กถ่องพลาสติกขนาด 16 x 22 x 12 cm³
18. โกร่งบดสาร
19. ไมโครมิเตอร์
20. เวอร์เนีย
21. ตู้ดูดความชื้น

3.3 การเตรียมวัตถุดิบในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

3.3.1 การดัดแปรโครงสร้างของ MMT

- 1) ชั่ง MMT เติมน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ MMT:น้ำกลั่นเป็น 1:250
 - 2) เตรียมสารละลายของเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (HTAB) ในน้ำกลั่นเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร
 - 3) ผสมสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2 ลงไป ในสารแขวนลอยในข้อ 1 ผสมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
 - 4) กรองสารที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองลดความดัน ถ้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งไม่มีโบรไมด์ไอออน (ทดสอบโดยการหยดสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดเข้มข้น 0.1% ลงในน้ำล้างตะกอน)
 - 5) วัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำล้างตะกอนสุดท้าย
 - 6) นำตะกอนที่ได้อบที่อุณหภูมิ 80 °C จนแห้ง แล้วนำตะกอนที่ได้ไปบดด้วยโม่บดสาร คัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 400 เมช
- นำ Organo-MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างแล้วไปทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR XRD และ TGA



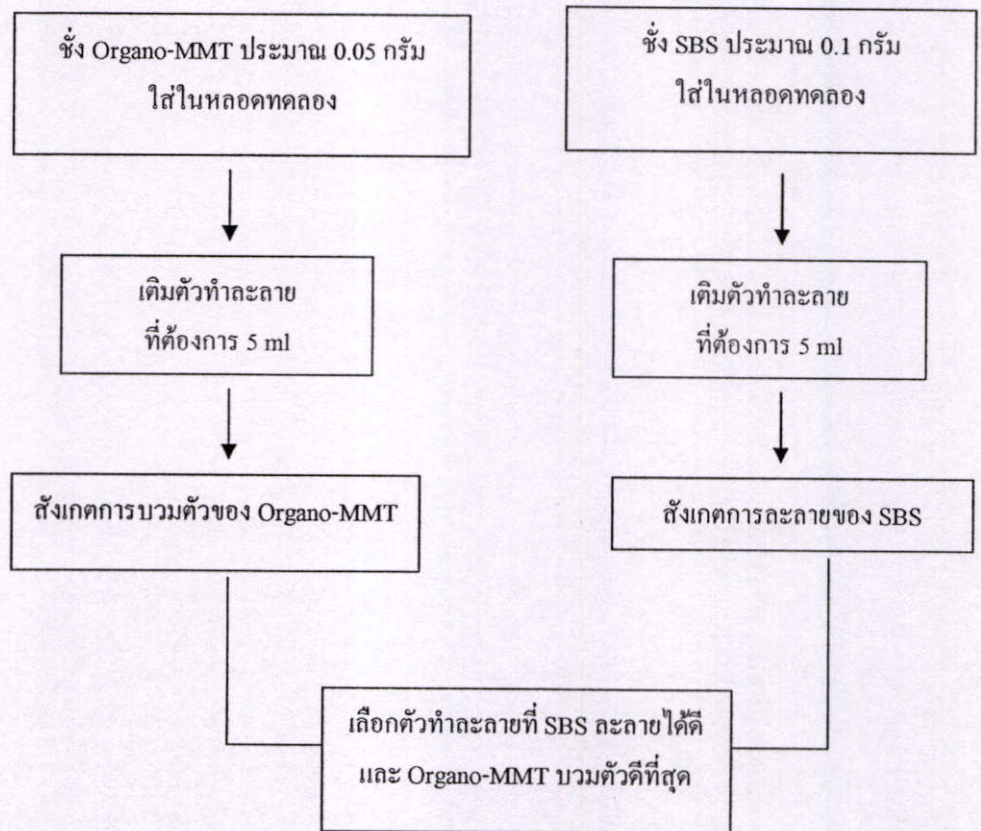
รูปที่ 3.1 แผนงานการดัดแปรโครงสร้างของ MMT

3.3.2 การหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับ SBS และ Organo-MMT ในการเตรียมวัสดุประกอบ

ตัวทำละลายที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ไซลีน, เฮกเซน, โทลูอีน, ออโรคลอโรเบนซีน, เบนซีน และคลอโรเบนซีน

ขั้นตอนการหาตัวทำละลายมีดังนี้

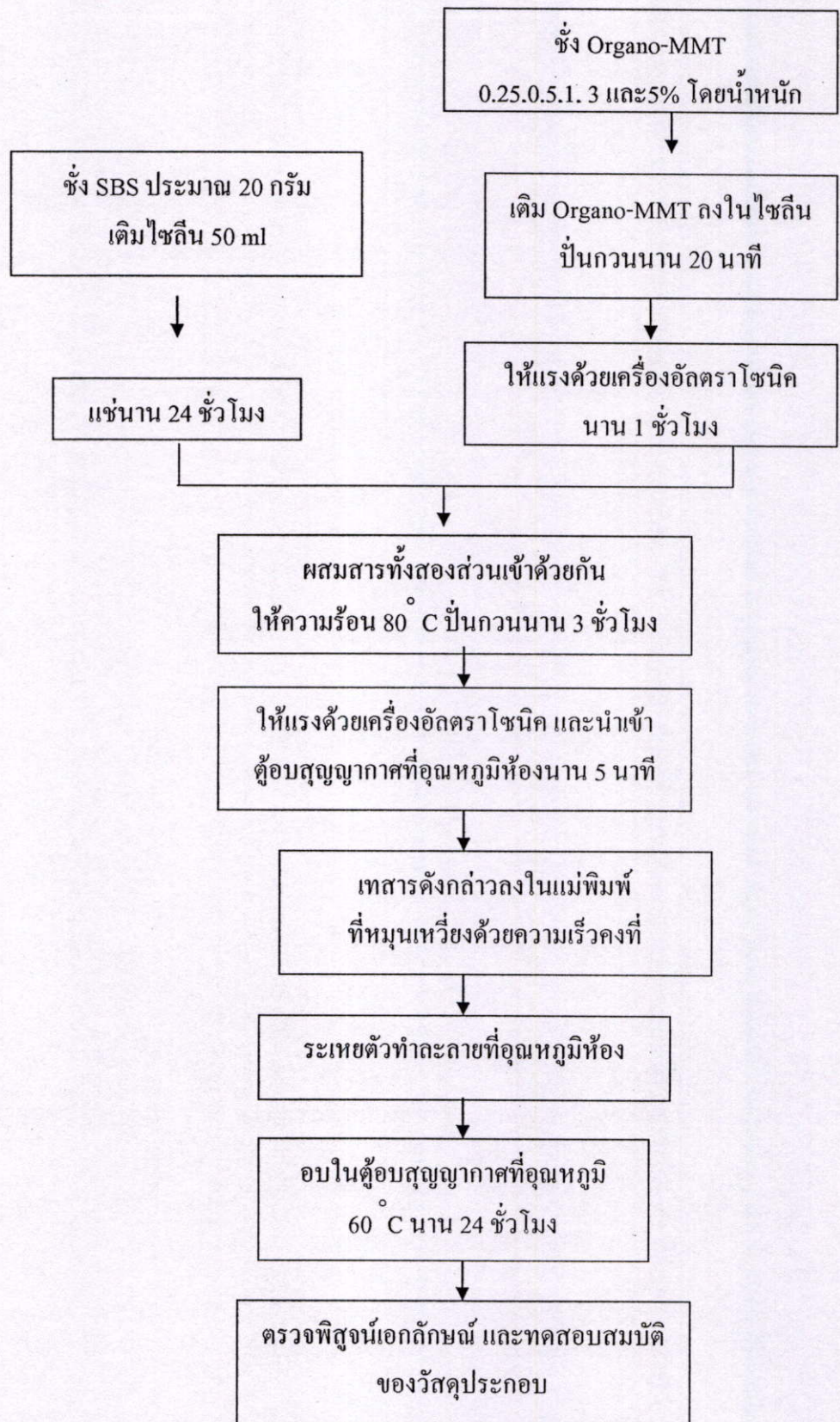
1. ใส้ Organo-MMT ประมาณ 0.05 กรัมลงในหลอดทดลอง เติมตัวทำละลายต่างๆ ทีละ 1 ชนิด ปริมาตร 5 ml ลงในหลอดทดลอง สังเกตตัวทำละลายที่ทำให้ Organo-MMT เกิดการบวมตัว และมีเสถียรภาพมากที่สุด (จะไม่ตกตะกอนลงมาเมื่อตั้งทิ้งไว้)
2. ชั่ง SBS ประมาณ 0.1 กรัม แล้วเติมตัวทำละลายประมาณ 5 ml ลงไปในหลอดทดลอง ทีละ 1 ชนิดสังเกตตัวทำละลายที่ทำให้พอลิเมอร์ละลายได้ดีที่สุด
3. เลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อเตรียม SBS/Organo-MMT เป็นวัสดุประกอบต่อไป



รูปที่ 3.2 แผนงานแสดงขั้นตอนการหาตัวทำละลายที่เหมาะสม

3.3.3 การเตรียมวัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT

- 1) แช่ SBS 20 กรัมในไซลีน 50 ml เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2) ชั่ง Organo-MMT ปริมาณ 0.25, 0.5, 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS แล้วค่อยๆ เติมลงในบีกเกอร์ที่มี ไซลีน 50 ml โดยทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กประมาณ 20 นาที แล้วให้แรงด้วยเครื่องอัลตราโซนิกนาน 1 ชั่วโมง
- 3) เติมสารแขวนลอยของ Organo-MMT ในข้อ 2 ลงในสารละลายพอลิเมอร์ข้อ 1 จากนั้นให้ความร้อน 80°C และปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4) นำไปกำจัดฟองอากาศด้วยเครื่องอัลตราโซนิกนาน 30 นาที และนำเข้าตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที
- 5) นำสารละลายดังกล่าวไปขึ้นรูป โดยการเทลงในแม่พิมพ์กระจกที่หมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วคงที่ และระเหยตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้องจนได้ฟิล์มของ SBS/Organo-MMT ที่มีความหนา 55 ± 5 ไมโครเมตร
- 6) นำฟิล์มดังกล่าวไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C นาน 24 ชั่วโมง
- 7) นำฟิล์มที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์ด้วย XRD, TGA, SEM/EDX, ทดสอบสมบัติเชิงกลและวัดการซึมผ่านของอากาศเบื้องต้นต่อไป



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT

3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.4.1 การวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ MMT และ Organo-MMT จะเตรียมตัวอย่างแบบผง และวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้มุม 2θ เริ่มต้นตั้งแต่ 1° ถึง 30° Step 0.040° Step time 0.5 วินาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C

สำหรับฟิล์มวัสดุประกอบเตรียมชิ้นงานโดยตัดแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 นิ้ว นำไปวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้มุม 2θ เริ่มต้นตั้งแต่ 1° ถึง 10° Step 0.04° Step time 5 วินาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C

3.4.2 สันฐานวิทยาและการกระจายตัวของอนุภาค Organo-MMT ด้วยเครื่อง SEM/EDX

เตรียมชิ้นงานโดยการนำฟิล์มวัสดุประกอบแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วหักชิ้นงานภายใต้ไนโตรเจนเหลวเพื่อสังเกตลักษณะทางสันฐานวิทยาริเวณรอยแตกหักของชิ้นงาน ด้วยเครื่อง SEM/EDX

3.4.3 สันฐานวิทยาด้วยเครื่อง TEM

การศึกษาลักษณะทางสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT ทำได้โดยการเจือจางสารละลายของ SBS/1% Organo-MMT แล้วนำไปหยดลงบน Copper grid ที่หมุนเหวี่ยงด้วยอัตราเร็ว 2000 rpm

3.4.4 สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA

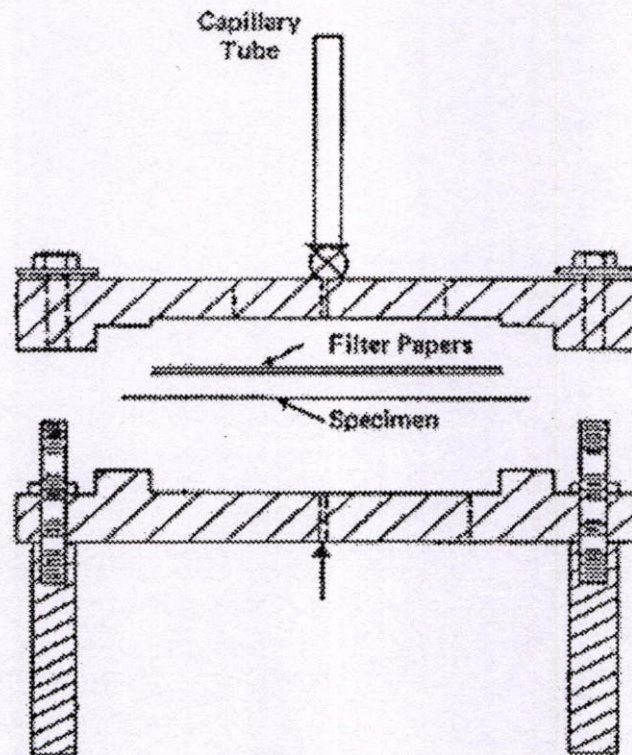
ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่งประมาณ 20 mg ให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 800°C และภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวเนื่องจากความร้อนและอุณหภูมิสลายตัวเนื่องจากความร้อน และทำการวัดภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ในอัตราเร็วของ Air zero $40\text{ cm}^3/\text{min}$ ภายใต้สภาวะเดิมเพื่อหาปริมาณของ HTAB ใน Organo-MMT

3.4.5 สมบัติการรับแรงดึง

นำฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล-อเนกประสงค์ (Universal testing machine) ใช้ Load cell ขนาด 100 N ความเร็วในการดึง $500\text{ mm}/\text{min}$ ระยะจับของชิ้นงาน (Gauge length) 20 mm ที่อุณหภูมิห้อง 25°C เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile yield strength) ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเท่ากับ 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

3.4.6 ทดสอบการซึมผ่านของอากาศ

การทดสอบการซึมผ่านของอากาศตามมาตรฐาน ASTM D 1434 วิธี V (Procedure V) เป็นการหาปริมาณของอากาศที่แพร่ผ่านผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ซึ่งอากาศจะแพร่ผ่านฟิล์มได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับสมบัติการซึมผ่านก๊าซของฟิล์มตัวอย่างแต่ละชนิด โดยในการทดสอบทำการประกบฟิล์มด้วย o-ring ทั้งสองด้านของแผ่นฟิล์ม (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) โดยที่ด้านหนึ่งของแผ่นฟิล์มจะต่อเข้ากับหลอดแคพริลลารี (Capillary tube) ที่ภายในบรรจุไอโซโทปทานอลอยู่ โดยมีการวางกระดาษกรองด้านบนของฟิล์มด้านที่ต่อกับหลอดแคพริลลารี เพื่อป้องกันการพองของฟิล์มตัวอย่างเมื่อได้รับแรงดันอากาศ และอีกด้านหนึ่งของแผ่นฟิล์มต่อเข้ากับอากาศที่ผ่านเข้ามาด้วยความดัน 1 บรรยากาศ รวมกับความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ ทำให้ความดันของอากาศที่แพร่ผ่านแผ่นฟิล์มเท่ากับ 2 บรรยากาศ ความดันของทั้งสองด้านของแผ่นฟิล์มจึงมีความแตกต่างกัน ทำให้ก๊าซที่แพร่ผ่านแผ่นฟิล์มเข้าสู่หลอดแคพริลลารี ส่งผลให้ระดับความสูงของไอโซโทปทานอลในหลอดแคพริลลารีสูงขึ้น จากนั้นทำการวัดระยะทางที่ไอโซโทปทานอลเคลื่อนที่ได้เทียบกับเวลา โดยให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของไอโซโทปทานอลเป็นค่าคงที่ และวัดเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการแพร่ผ่านของอากาศตามมาตรฐาน ASTM D 1434

จากนั้นนำระยะทางที่ไอโซโทปทรานอลเคลื่อนที่กับเวลา มาเขียนกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงของไอโซโทปทรานอลที่ถูกก๊าซดันขึ้นไปกับเวลา ซึ่งความชันของก๊าซ (dh/dt) นำไปใช้ในการคำนวณอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate, GTR) ได้ ดังสมการที่ 1

$$\text{Gas transmission rate (GTR)} = \frac{Q}{A \times t \times \Delta p} \quad (3.1)$$

เมื่อ Q = ปริมาณก๊าซที่ผ่านชิ้นงานตัวอย่าง

A = พื้นที่ตัวอย่าง

t = เวลา

โดยที่ ปริมาณก๊าซที่ผ่านชิ้นงานตัวอย่าง เท่ากับ ปริมาณของของเหลวที่อยู่ในหลอดแคปิลลารี (Capillary tube) คูณด้วยความสูงของของเหลวในหลอด ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q = A_1 \times h \quad (3.2)$$

เมื่อ A_1 = พื้นที่หน้าตัดของหลอดแคปิลลารี (Capillary tube)

h = ความสูงของระดับของเหลว

เมื่อแทน Q ในสมการที่ (1) จะได้

$$\text{Gas transmission rate (GTR)} = \frac{A_1 \times h}{A \times \Delta p \times t} \quad (3.3)$$

ให้ h/t คือค่าความชันที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของระดับความสูงของของเหลวที่ถูกก๊าซดันขึ้นไปกับเวลา แทนค่าในสมการที่ (3) จะได้

$$\text{Gas transmission rate (GTR)} = \frac{A_1}{A \times \Delta p} \times \text{slope} \quad (3.4)$$

และใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณค่าการซึมผ่านของก๊าซต่อไป

สำหรับตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ในการวัดการซึมผ่านของอากาศควรมีความหนาใกล้เคียงกัน และเก็บในตู้ดูดความชื้นอย่างน้อยเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 4x4 เซนติเมตร แล้วนำฟิล์มดังกล่าวไปวัดระยะทางการเคลื่อนที่กับเวลา ข้อมูลที่ได้นำไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์และหาค่าความชัน โดยความชันของกราฟมีค่าเท่ากับระยะทางต่อเวลา แล้วนำค่าความชันที่ได้คูณด้วยความหนาของฟิล์มตัวอย่างเพื่อทำการปรับค่า (Normalize slope) ก่อนนำมาใช้เปรียบเทียบการซึมผ่านของอากาศ

3.4.7 การวัดการส่องผ่านของรังสียูวี-วิสิเบิล

เลือกฟิล์มวัสดุประกอบนาโนที่มีความหนาใกล้เคียงกันมากที่สุด แล้วตัดให้มีขนาดประมาณ 2.5 x 3 cm จากนั้นนำไปวัดการส่องผ่านรังสียูวีด้วยเครื่อง UV-Visible โดยทำการวัดตั้งแต่ความยาวคลื่นเท่ากับ 190 nm ถึง 1000 nm บันทึกเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของรังสี

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Organo-MMT

จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ HTAB MMT และ Organo-MMT ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้ผลดังนี้

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ HTAB ด้วย FTIR พบพิกที่สำคัญดังนี้

V_{max} : 3000-2800 cm^{-1} (sat. C-H stretching), 1487-1462 cm^{-1} (C-H bending for CH_3)

1470-1400 cm^{-1} (C-H bending for CH_2), 1250-1020 cm^{-1} (C-N stretching)

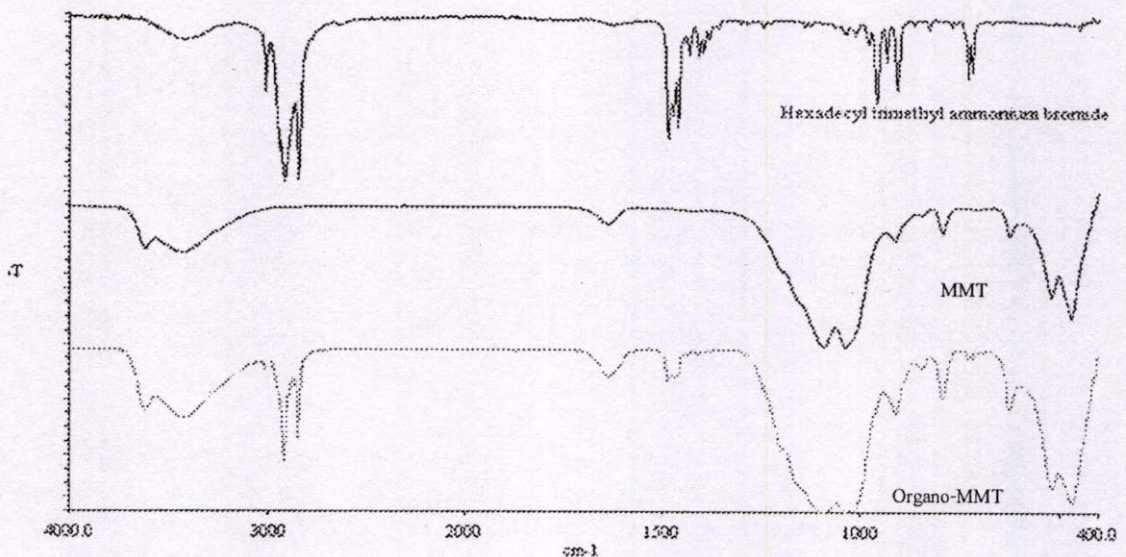
สำหรับ MMT พบพิกที่สำคัญที่ตำแหน่ง

V_{max} : 3623-3435 cm^{-1} (O-H Stretching), 1637 cm^{-1} , 1096-1039 cm^{-1} (Si-O Stretching), 470 cm^{-1} (Si-O-Si bending)

และทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ Organo-MMT ด้วย FTIR พบพิกที่สำคัญดังนี้

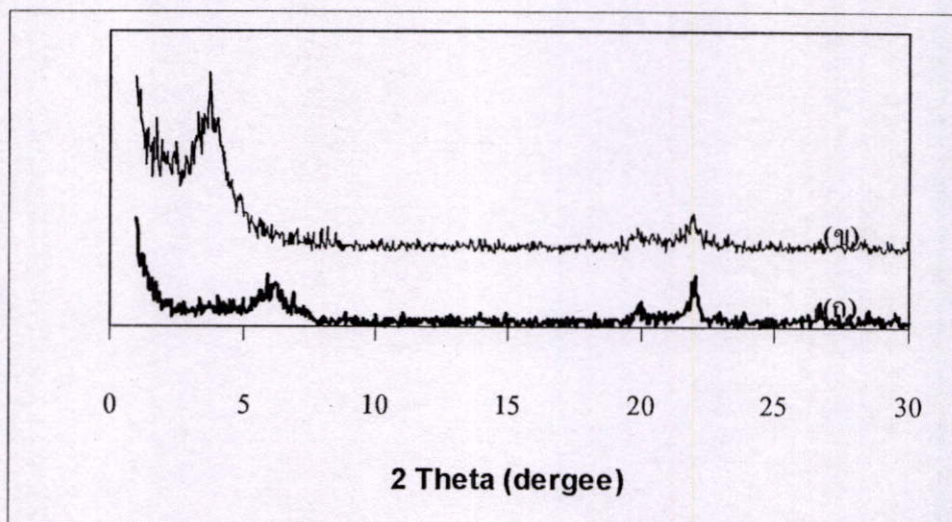
V_{max} : 3623-3435 cm^{-1} (O-H Stretching), 3000-2800 cm^{-1} (sat. C-H stretching), 1487-1462 cm^{-1} (C-H bending for CH_3), 1637 cm^{-1} , 1096-1039 cm^{-1} (Si-O Stretching), 470 cm^{-1} (Si-O-Si bending)

จากผลดังกล่าวพบพิกที่สำคัญที่ 3000-2800 cm^{-1} และ 1470-1400 cm^{-1} ใน Organo-MMT ซึ่งแสดงถึงส่วนของสารอินทรีย์ของ HTAB ใน Organo-MMT ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ HTAB, MMT และ Organo-MMT

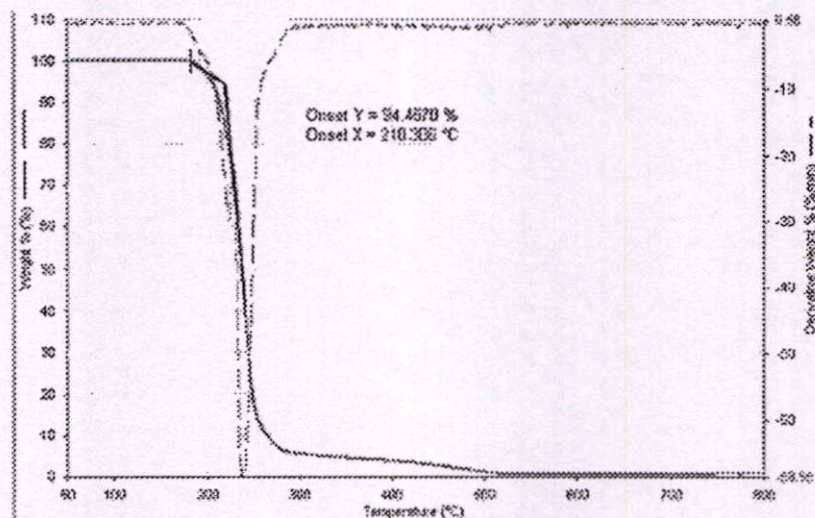
เมื่อตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ MMT ด้วย XRD โดยทำการวัดที่มุม 2θ ตั้งแต่ 1° ถึง 30° พบพีกที่สำคัญที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.9° สามารถนำไปคำนวณระยะห่างระนาบ 001 (d_{001}) ได้จากสมการ $n\lambda = 2d \sin\theta$ ได้ระยะห่างระนาบ 001 (d_{001}) เท่ากับ 14.93 \AA และเมื่อปรับปรุงโครงสร้างของ MMT ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (HTAB) และเรียก MMT ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างแล้วว่า Organo-MMT จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของ Organo-MMT ด้วย XRD พบพีกสำคัญที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 3.74° และคำนวณระยะห่างระนาบ 001 (d_{001}) ได้เท่ากับ 23.61 \AA ซึ่งพบว่าระยะห่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ Organo-MMT มีค่าสูงกว่าระยะห่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ MMT ซึ่งแสดงให้เห็นว่า HTAB ที่เติมลงไปเพื่อดัดแปรโครงสร้างของ MMT นั้นได้แทรกเข้าอยู่ระหว่างชั้นของ MMT จริง ผลการทดลอง แสดง ได้ดังรูปที่ 4.2



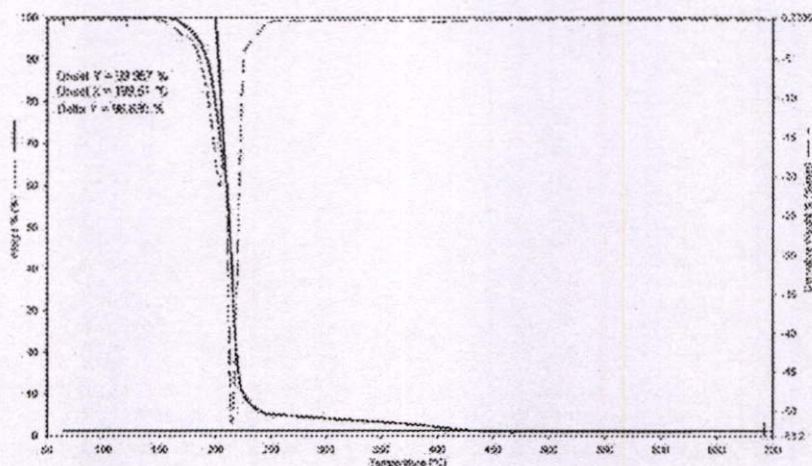
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ (ก) MMT และ (ข) Organo-MMT

จากผลการตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของ HTAB ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วยเทคนิค TGA ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50°C ถึง 800°C พบว่า HTAB มีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 218°C (รูปที่ 4.3ก) ในบรรยากาศไนโตรเจน และสลายตัวที่ 199°C เมื่อทดสอบในบรรยากาศออกซิเจน (รูปที่ 4.3ข) และเมื่อตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวเนื่องจากความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนของ Organo-MMT พบว่า HTAB มีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 230°C (รูปที่ 4.3ค) แสดงว่าสารอินทรีย์สลายที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อ HTAB แทรกเข้าไปอยู่ระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ MMT แทนที่ตำแหน่งของไอออนบวกของโซเดียม

(Na⁺) ระบายของ MMT ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ จะทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อน ทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ระหว่างระนาบของ MMT ได้รับความร้อนช้าลง อีกทั้งอันตรกิริยาระหว่างประจุบวกของ HTAB และประจุลบบนพื้นผิวของแผ่นผลึก MMT จึงส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ HTAB มีค่าสูงขึ้น และเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่ามีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.3ง)

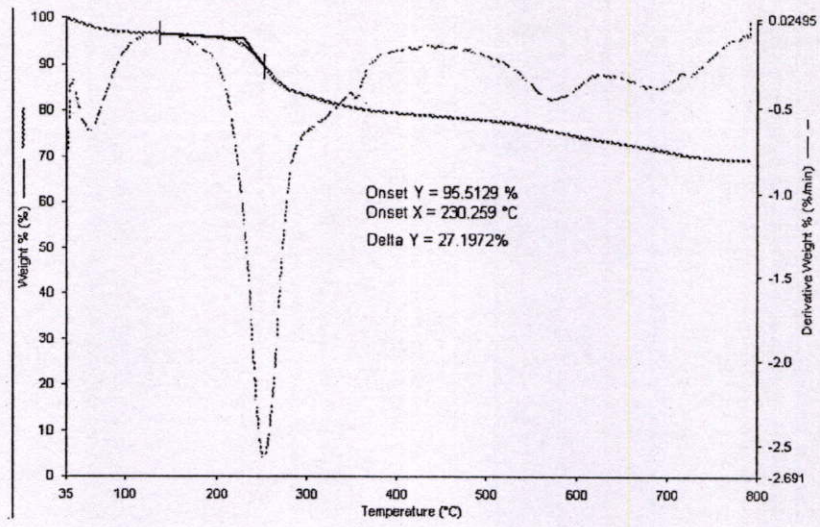


(ก)

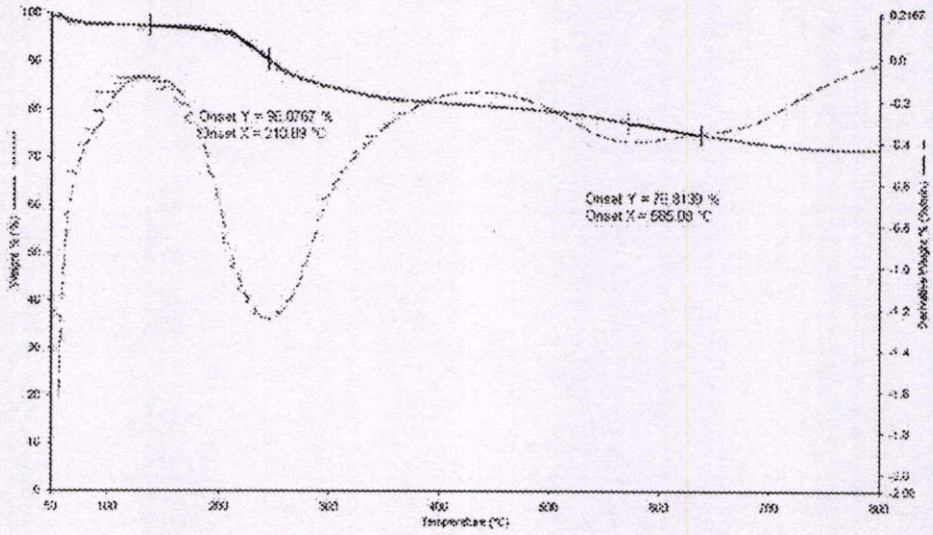


(ข)

รูปที่ 4.3 เทอร์โมแกรมของ ก) HTAB ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ข) HTAB ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน ค) Organo-MMT ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ง) Organo-MMT ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน และ จ) MMT ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

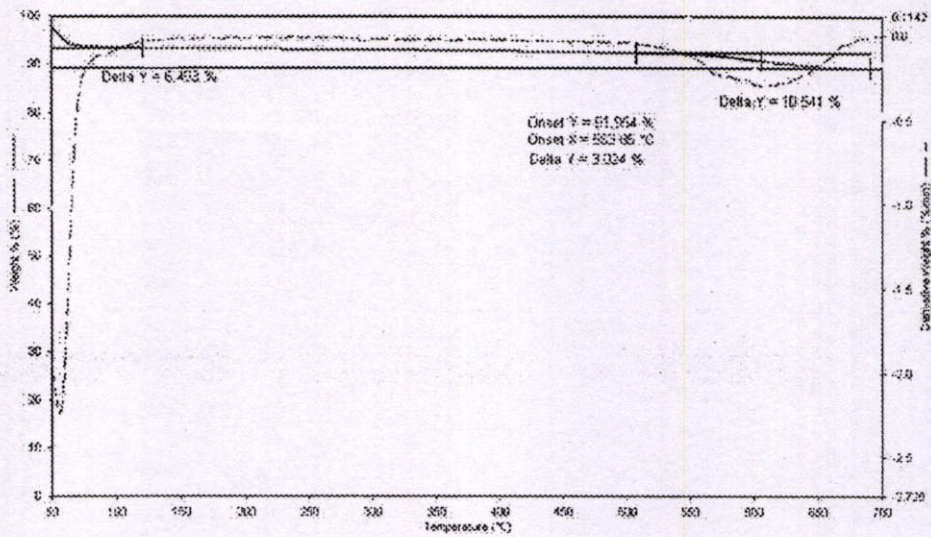


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 (ต่อ)



(จ)

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

4.2 ผลการหาตัวทำละลายที่เหมาะสมสำหรับ SBS และ Organo-MMT ในการเตรียมวัสดุประกอบ

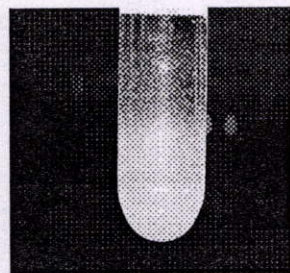
ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT โดยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) นั้น ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดคือ การหาตัวทำละลายที่เหมาะสม (Solvent screening) ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ และเป็นสารซึ่งทำให้ Organo-MMT เกิดการบวมตัวในขณะที่เตรียมวัสดุประกอบ ตัวทำละลายทำหน้าที่สำคัญคือเป็นตัวกลางพาพอลิเมอร์เคลื่อนที่แทรกเข้าไประหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ MMT ซึ่งตัวทำละลายที่นำมาทดสอบได้แก่ ไซลีน เฮกเซน โทลูอีน ออโรไดคลอโรเบนซีน เบนซีน และคลอโรเบนซีน ซึ่งตัวทำละลายที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน คือตัวทำละลายที่สามารถทำให้ Organo-MMT เกิดการกระจายและบวมตัว มีเสถียรภาพคงตัวอยู่ได้นานในสารละลาย [27] โดยที่จะไม่ตกตะกอนในระหว่างการเตรียมวัสดุประกอบ และระเหยได้ง่าย ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบตัวทำละลายชนิดต่างๆ สำหรับการเตรียมวัสดุประกอบ

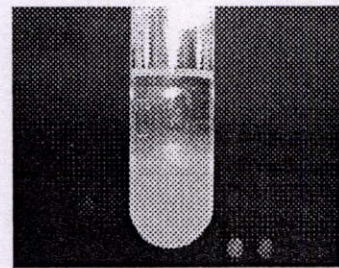
SBS/Organo-MMT

ชนิดของตัวทำละลาย	ผลการทดสอบ	
	SBS	Organo-MMT
ไซลีน	ละลาย	บวมตัว ไม่ตกตะกอน
เฮกเซน	ไม่ละลาย	บวมตัวเล็กน้อย ตกตะกอน
โทลูอีน	ละลาย	บวมตัว ตกตะกอน
ออโรไดคลอโรเบนซีน	ละลาย	บวมตัว ตกตะกอน
เบนซีน	บวมตัว	บวมตัว ตกตะกอน
คลอโรเบนซีน	ละลาย	บวมตัว ไม่ตกตะกอน

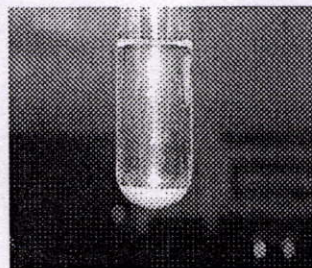
จากผลการทดสอบพบว่า SBS สามารถละลายได้ดีใน ไซลีน ออโรไดคลอโรเบนซีน โทลูอีน และคลอโรเบนซีน และเมื่อพิจารณาถึงการบวมตัวของ Organo-MMT ในตัวทำละลายต่าง ๆ พบว่า Organo-MMT บวมตัวและแขวนลอยได้ดี ในตัวทำละลาย 2 ชนิดคือ ไซลีน และคลอโรเบนซีน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไซลีนเป็นตัวทำละลาย เนื่องจากมีราคาถูกกว่าและมีใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมมากกว่าคลอโรเบนซีน



(ก) ไซลีน



(ข) คลอโรเบนซีน



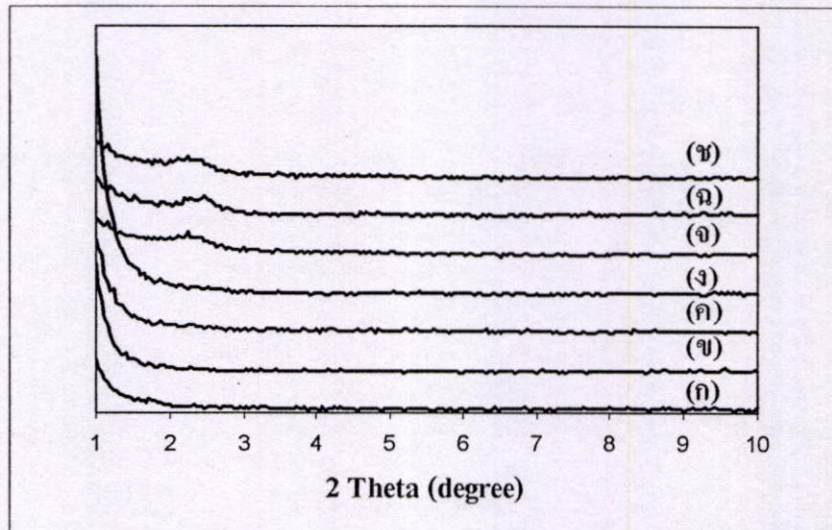
(ค) โทลูอีน

รูปที่ 4.4 ตัวอย่างรูปถ่ายแสดงการบวมตัวของ Organo-MMT ในตัวทำละลาย

4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบนาโน

4.3.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบนาโนด้วย XRD

ฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ที่เตรียมด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง เมื่อนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย XRD โดยทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ตั้งแต่มุม 2θ เท่ากับ 1° ถึง 10° แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุประกอบ ก) SBS ข) SBS/0.25 % Organo-MMT ค) SBS/0.5% Organo-MMT ง) SBS/1% Organo-MMT จ) SBS/3% Organo-MMT ฉ) SBS/5% Organo-MMT และ ช) SBS/1% MMT

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย XRD เพื่อต้องการทราบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated nanocomposites) หรือแบบแทรกตัว (Intercalated nanocomposites) โดยศึกษาปริมาณ Organo-MMT ที่มีผลต่อลักษณะของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าวัสดุประกอบที่มีปริมาณของ Organo-MMT 0.25% 0.5% และ 1% โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.5 ข-ง) ไม่ปรากฏพีกในช่วง 2θ ตั้งแต่ 1° ถึง 10° นอกจากนี้ยังได้นำชิ้นงานวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย XRF พบว่าฟิล์มวัสดุประกอบมีซิลิกอนและอะลูมิเนียมซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบของ Organo-MMT และเมื่อนำชิ้นงานของวัสดุประกอบนาโนไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย TGA พบว่ามี Organo-MMT อยู่ในวัสดุประกอบนาโนซึ่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของ Organo-MMT ที่เหลืออยู่จากการทดสอบดังแสดงในภาคผนวก ก จึงยืนยันได้ว่ามี Organo-MMT อยู่ในฟิล์มตัวอย่างจริง การหายไปของพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 3.74° สันนิษฐานได้ว่า สาย

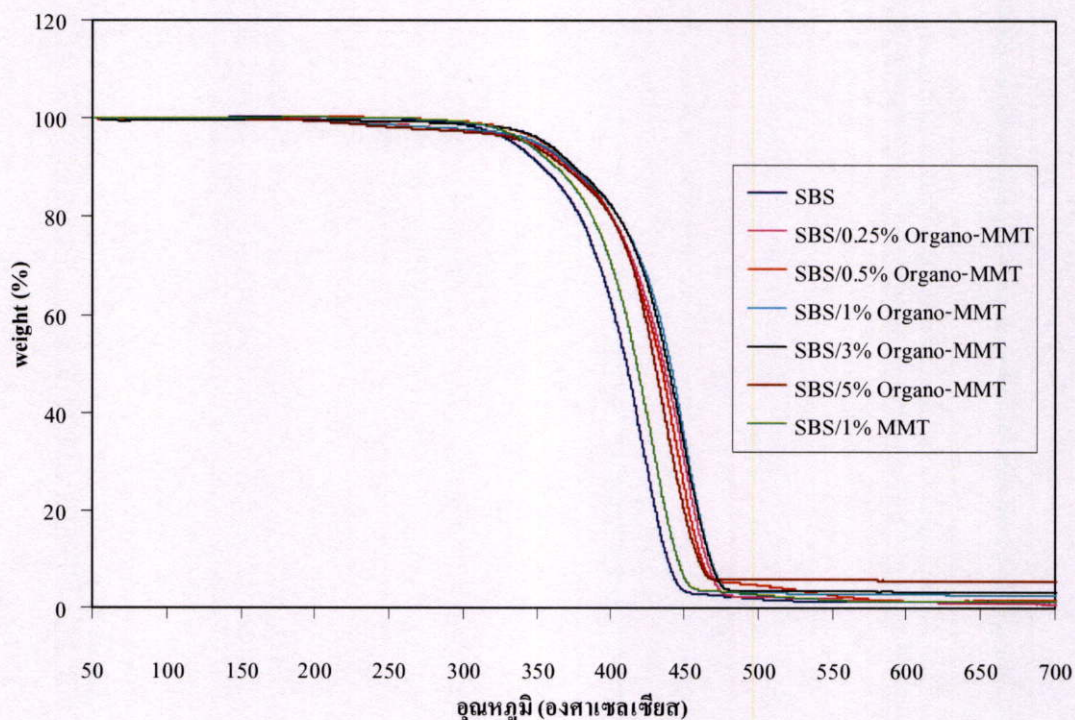
โซ่ของ SBS ได้เคลื่อนที่แทรกตัวเข้าไประหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ Organo-MMT เนื่องจากความมีขั้วของ HTAB ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ใกล้เคียงกับ SBS จึงเข้ากันได้ดี จนทำให้ระนาบของ Organo-MMT แยกออกจากกันอย่างอิสระ ทำให้วัสดุประกอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกกระเจิง [44] แต่เมื่อวัสดุประกอบมีปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มมากขึ้นเป็น 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS (รูปที่ 4.5 จ และ ฉ) จะปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 2° ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบประมาณ 42 Å ซึ่งแสดงว่า d_{001} ของ Organo-MMT มีระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการแทรกตัวของสายโซ่ของ SBS เข้าไประหว่างระนาบของ Organo-MMT แต่ระนาบของ Organo-MMT ยังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันอยู่ทำให้ระนาบของ Organo-MMT ไม่แยกออกจากกันอย่างอิสระ สันนิษฐานว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้ เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกตัว ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของ Organo-MMT ที่มากขึ้น ทำให้มีปริมาตรอิสระ (Free volume) โดยรวมของระบบน้อยลง ทำให้อุณหภูมิของ Organo-MMT ไม่เกิดการแตกกระเจิงออกจากกัน เป็นผลให้วัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposites)

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้เตรียมวัสดุประกอบ SBS/1% MMT จากผลการตรวจวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีพีกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 2° (รูปที่ 4.5 ข) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบประมาณ 42 Å ซึ่งแสดงว่าระนาบ 001 (d_{001}) ของ MMT มีระยะห่างระหว่างระนาบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการแทรกตัวของสายโซ่ของ SBS เข้าไประหว่างระนาบของ MMT แต่ระนาบของ MMT ยังมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันอยู่ทำให้ระนาบของ MMT ไม่แยกออกจากกันอย่างอิสระ จากผลดังกล่าวแสดงถึงความแตกต่างระหว่างวัสดุประกอบ SBS/1% Organo-MMT กับวัสดุประกอบ SBS/1% MMT ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างระนาบ d_{001} ของ MMT มีค่าน้อยกว่า d_{001} ของ Organo-MMT และความมีขั้วที่แตกต่างกันระหว่าง SBS กับ Na^+ (Counter ion) ที่แทรกตัวอยู่ระหว่างระนาบ d_{001} ของ MMT ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์แทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างระนาบของ MMT ได้ยากกว่า Organo-MMT ที่มีประจุบวกของ HTAB แทรกตัวอยู่ ซึ่งความมีขั้วของ HTAB ซึ่งเป็นสารอินทรีย์น่าจะใกล้เคียงกับขั้วของ SBS นอกจากนี้สังเกตได้ว่าความเข้มของพีกที่ตำแหน่ง 2θ มีค่าลดลงแสดงว่า MMT บางส่วนเกิดการแตกกระเจิง แต่ยังมีบางส่วนที่พอลิเมอร์แทรกตัวเข้าไปเท่านั้น จึงจัดวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/1% MMT เป็นวัสดุประกอบนาโนแบบแทรกตัว (Intercalated nanocomposites)

นอกจากนี้วัสดุประกอบ SBS/1% MMT ในระหว่างการผสมจะมี MMT บางส่วนตกตะกอน ซึ่งแสดงว่าการใช้ MMT ที่ไม่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างนั้นเข้ากับสารละลายพอลิเมอร์ได้ไม่ดี เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีขั้วที่แตกต่างกันมาก เมื่อเทียบกับการใช้ Organo-MMT ในการเตรียมวัสดุประกอบนาโน

4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย TGA ของวัสดุประกอบนาโน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุประกอบนาโนในสภาวะก๊าซไนโตรเจน ได้ผลการทดลองดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนในสภาวะก๊าซไนโตรเจน

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ SBS ด้วยเทคนิค TGA พบว่า SBS มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ 334°C และมีอุณหภูมิสลายตัวหมดเท่ากับ 442°C เมื่อนำมาเตรียมวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดของ SBS สูงขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.2) โดยเมื่อมีการเติม Organo-MMT 0.25% ถึง 5% โดยน้ำหนักของ SBS วัสดุประกอบที่เตรียมได้มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ SBS ในช่วง $346-360^{\circ}\text{C}$ และมีอุณหภูมิสลายตัวหมดของ SBS ในช่วง $440-470^{\circ}\text{C}$ สันนิษฐานว่าเนื่องจากสายโซ่ของ SBS ได้แทรกเข้าไประหว่างระนาบของ Organo-MMT ซึ่งจัดเป็นสารอนินทรีย์ Organo-MMT จึงทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ได้รับความร้อนช้าลง และใช้เวลานานขึ้นในการที่จะส่งผ่านความร้อนไปยังสายโซ่ของ SBS จนเกิดการสลายตัว อีกทั้งอาจมีอันตรกิริยาระหว่าง SBS กับ HTAB ที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของ Organo-MMT ทำให้วัสดุประกอบที่เตรียมได้มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว และสลายตัว

หุ้มของ SBS ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังนั้นวัสดุประกอบที่เตรียมได้จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Organo-MMT ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิที่สลายตัวหุ้มของ SBS อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้เมื่อมีการเติม MMT ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ SBS ทำให้วัสดุประกอบที่เตรียมได้มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวของ SBS สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวเป็น 342°C และมีอุณหภูมิสลายตัวหุ้มเป็น 450°C ดังได้อธิบายมาแล้วข้างต้น และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของ Organo-MMT และ MMT เท่ากับ 1% โดยน้ำหนักของ SBS วัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ที่เตรียมได้จะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว และสลายตัวหุ้มของ SBS ที่สูงกว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/MMT ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ทั้งนี้เนื่องมาจากสายโซ่ของ SBS สามารถแทรกเข้าไประหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ Organo-MMT ได้ดีกว่า MMT เนื่องจาก Organo-MMT ความเข้ากันได้ของ SBS กับ Organo-MMT ที่ดีกว่า SBS กับ MMT

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของ SBS ในวัสดุประกอบนาโนในบรรยากาศไนโตรเจน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ SBS ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิการสลายตัวของ SBS ($^{\circ}\text{C}$)
SBS	334	442
SBS/0.25% Organo-MMT	346	468
SBS/0.5% Organo-MMT	360	465
SBS/1% Organo-MMT	357	466
SBS/3% Organo-MMT	355	473
SBS/5% Organo-MMT	343	460
SBS/1% MMT	342	450

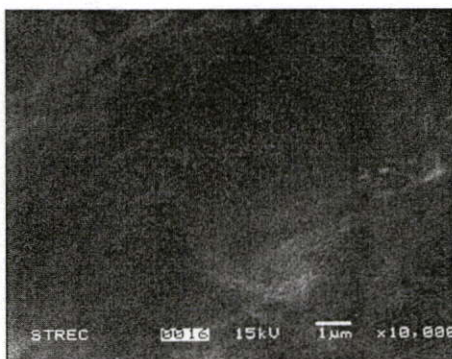
4.4 สัณฐานวิทยา

4.4.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM/EDX

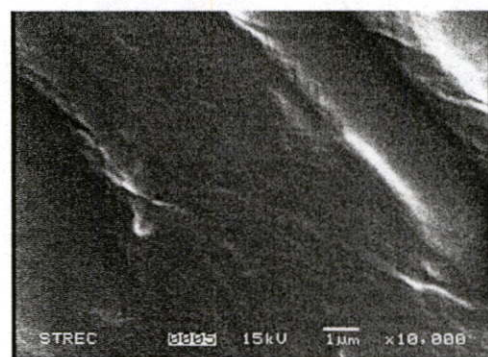
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของวัสดุประกอบนาโนทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าเพื่อดูลักษณะของแผ่นฟิล์มบริเวณรอยแตกหัก แสดงผลดังรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(จ) ไม่พบอนุภาคของ Organo-MMT ในบริเวณรอยแตกหักของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ที่มีปริมาณของ Organo-MMT เท่ากับ 0.25% 0.5% 1 % 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX โดยทำการวิเคราะห์ธาตุซิลิกอน (Mapping) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)-(ค) พบว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ที่มีปริมาณของ Organo-MMT เท่ากับ 0.25% 0.5% และ 1 % โดยน้ำหนักของ SBS มีการกระจายตัวของ Organo-MMT ที่สม่ำเสมอ ไม่พบการรวมตัวกันของอนุภาคของ Organo-MMT สำหรับวัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT ที่มีปริมาณ Organo-MMT เท่ากับ 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS แม้ว่าจากการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM จะไม่พบอนุภาคของ Organo-MMT แต่จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX พบว่าอนุภาคของ Organo-MMT จะรวมตัวกันอยู่เป็นกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ง)-(จ)

จากการสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาวัสดุประกอบ SBS/1% MMT ไม่พบอนุภาคของ MMT อย่างชัดเจน และจากการวิเคราะห์ธาตุซิลิกอนด้วย EDX ในวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT พบว่าอนุภาคของ MMT จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเนื่องมาจากวัสดุทั้งสองมีความมีขั้วแตกต่างกันมาก จึงส่งผลต่อความเข้ากันได้ สารละลายพอลิเมอร์และ MMT จึงเข้ากันได้ไม่ดี มีการกระจายตัวของอนุภาคของ MMT ในพอลิเมอร์เมตริกซ์ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX สามารถแสดงร้อยละประกอบของธาตุซิลิกอนได้ดังภาคผนวก จ

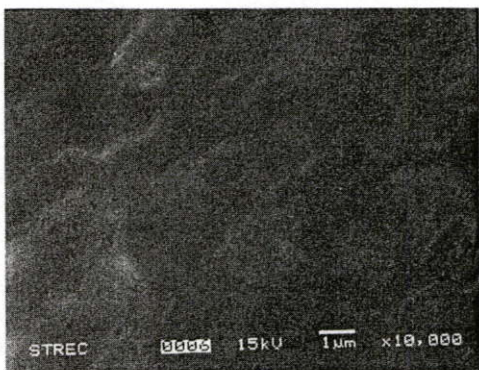


(ก) SBS

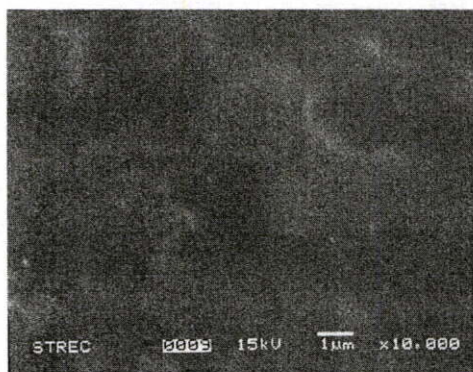


(ข) SBS/0.25% Organo-MMT

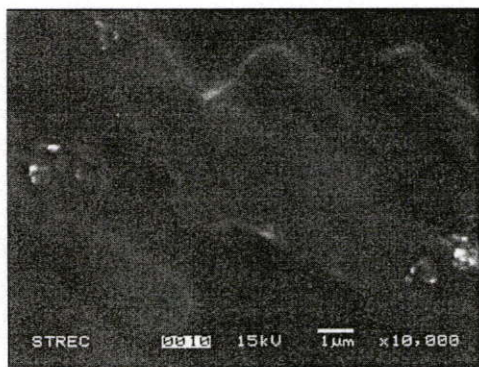
รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาจาก SEM ของฟิล์ม SBS และวัสดุประกอบนาโน



(ก) SBS/0.5% Organo-MMT



(ข) SBS/1% Organo-MMT



(ค) SBS/3% Organo-MMT

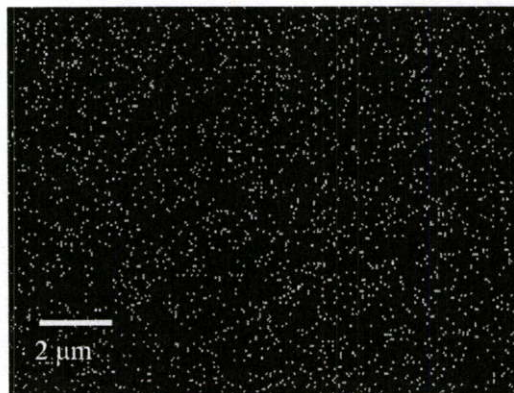
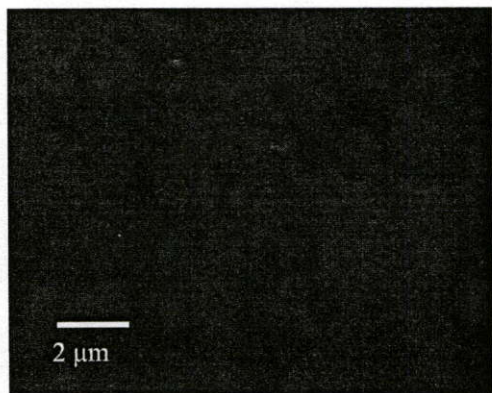


(ง) SBS/5% Organo-MMT

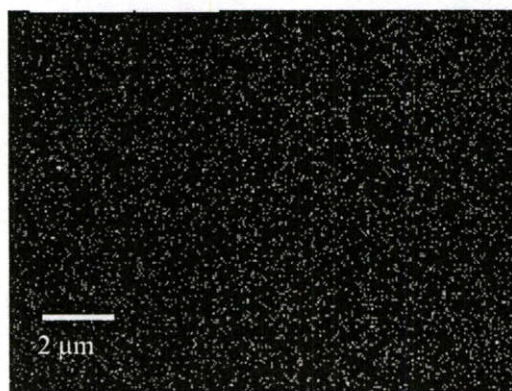
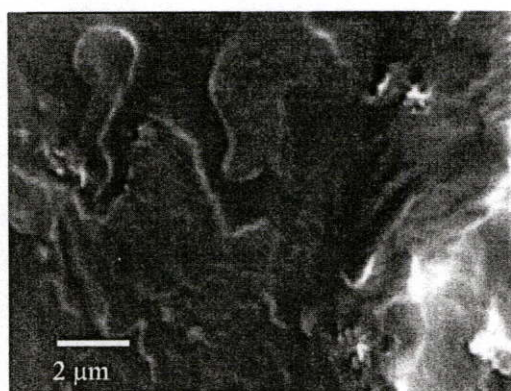


(จ) SBS/1% MMT

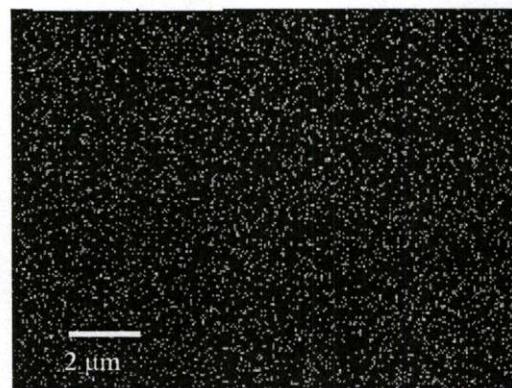
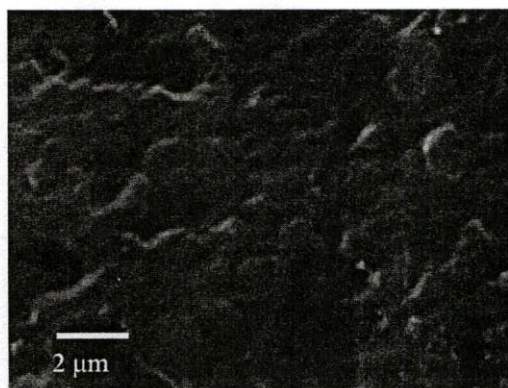
รูปที่ 4.7 (ต่อ)



(ก) SBS

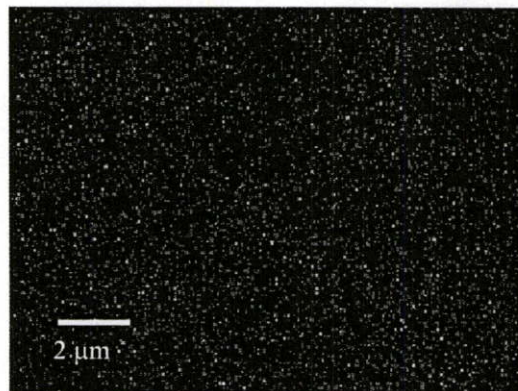
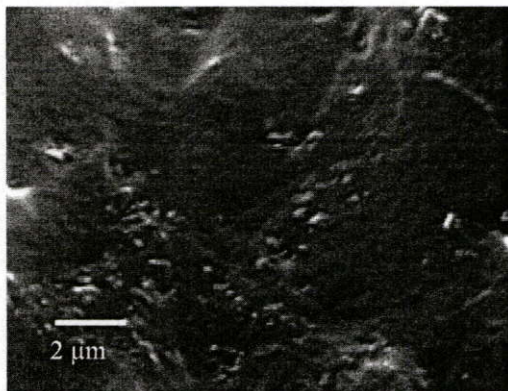


(ข) SBS/0.25 % Organo-MMT

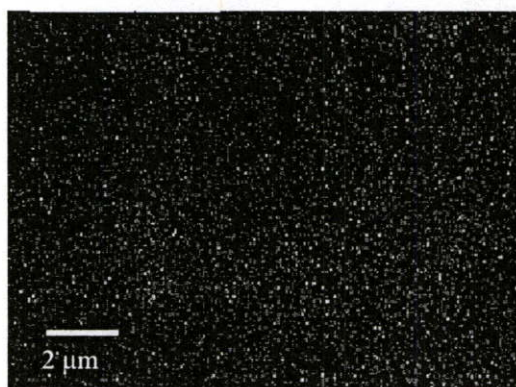
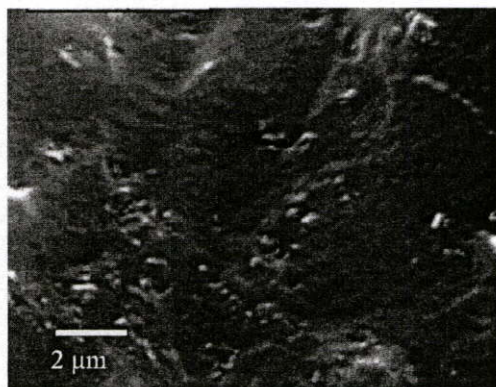


(ค) SBS/0.5% Organo-MMT

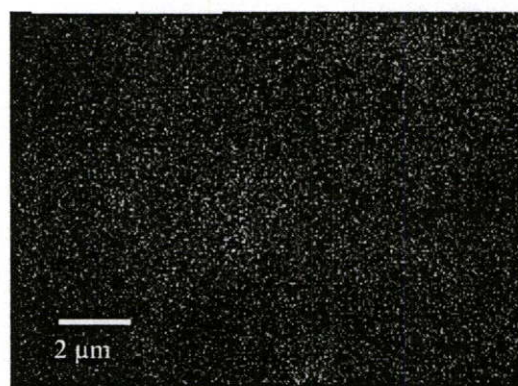
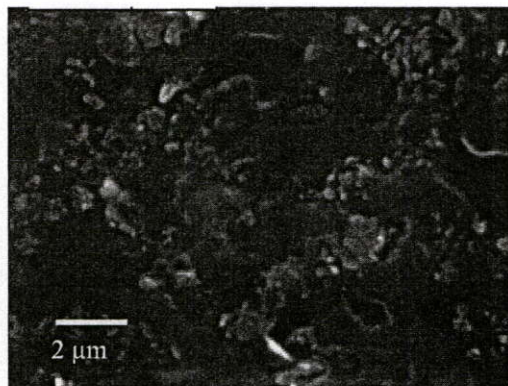
รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาและการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX



(จ) SBS/1% Organo-MMT

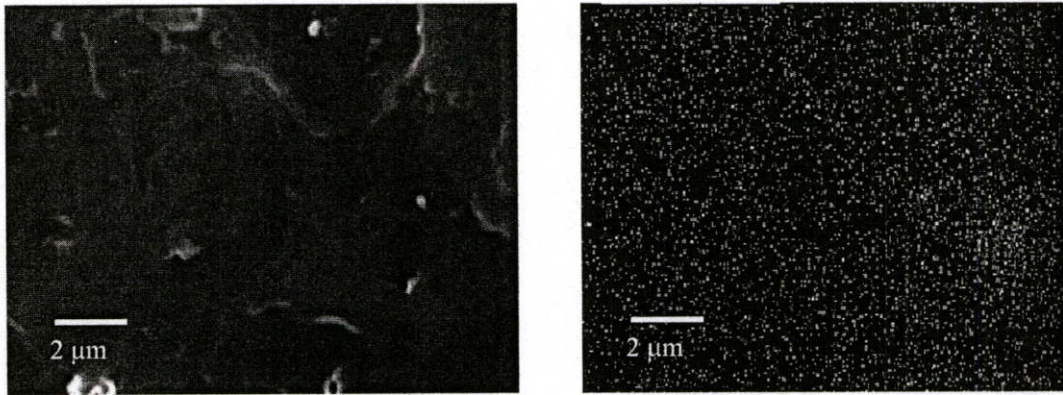


(ฉ) SBS/3% Organo-MMT



(ค) SBS/5% Organo-MMT

รูปที่ 4.8 (ต่อ)



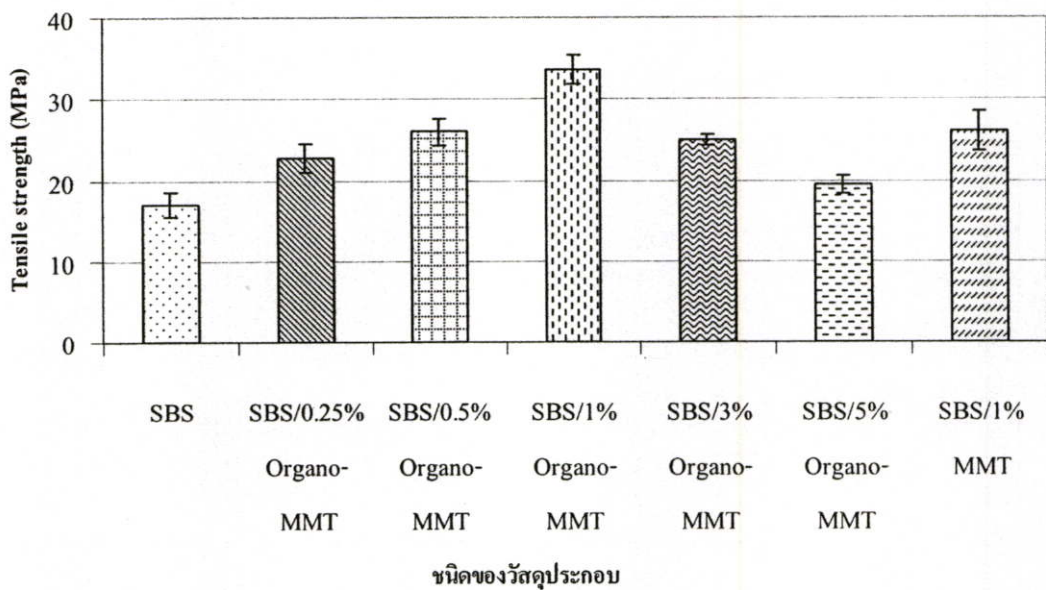
(ข) SBS/1% MMT

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

4.5 ผลการทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์มวัสดุประกอบนาโน

4.5.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน

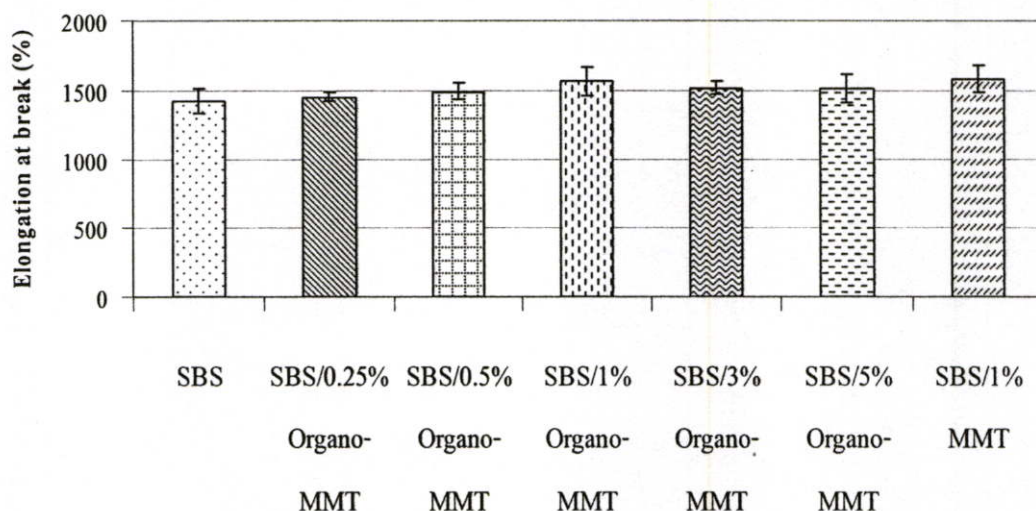
เมื่อนำฟิล์ม SBS และฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติการรับแรงดึง ได้ผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 ความแข็งแรงดึงของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของ SBS และวัสดุประกอบนาโน พบว่า SBS มีค่าความแข็งแรงดึงประมาณ 17 MPa และเมื่อเตรียมเป็นวัสดุประกอบโดยมี Organo-MMT ในปริมาณ 0.25% 0.5 % และ 1% พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีความแข็งแรงดึงสูงกว่า SBS เมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเนื่องจากอนุภาคของ Organo-MMT เป็นวัสดุซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่า SBS เมื่อเติมลงใน SBS จึงทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรง นอกจากนี้วัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นประเภทแตกกระเจิง ซึ่งสายโซ่ของ SBS ได้เคลื่อนที่แทรกตัวเข้าไประหว่างระนาบของ Organo-MMT ทำให้ระนาบของ Organo-MMT แยกออกจากกันอย่างอิสระจนกลายเป็นอนุภาคเสริมแรงระดับนาโน อีกทั้งอนุภาคของ Organo-MMT ยังมีการกระจายตัวอยู่อย่างค่อนข้างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้ส่งผ่านแรงได้ดีขึ้น และเนื่องจากขนาดของอนุภาคอยู่ในระดับนาโนซึ่งมีขนาดเล็ก จึงทำให้ความเค้นสะสมระหว่างภูมิภาค (Stress concentration) ลดลง ทำให้สมบัติการรับแรงของวัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT ที่เตรียมได้ดีขึ้น แข็งแรงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้นเป็น 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS พบว่าวัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT ที่เตรียมได้จะมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่าเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เป็น 1% โดยน้ำหนัก แต่ยังคงแข็งแรงกว่าฟิล์ม SBS จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX พบว่าอนุภาคของ Organo-MMT เกาะกันเป็นกลุ่มๆ และเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้นพบว่าทั้งขนาดและปริมาณของกลุ่มก็เพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลให้มีความเค้นสะสมระหว่างภูมิภาค (Stress concentration) สูงขึ้น บริเวณดังกล่าวจึงเป็นจุดอ่อนแอของชิ้นงาน วัสดุประกอบที่เตรียมได้จึงมีค่าความแข็งแรงดึงลดลง

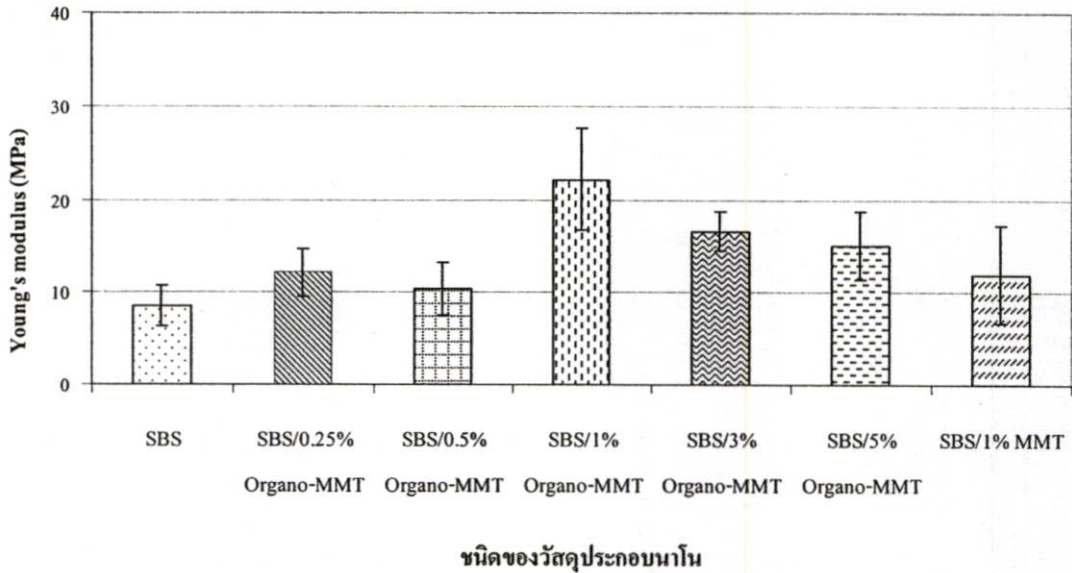
นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่า SBS เนื่องจาก MMT เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า SBS จึงช่วยในการรับแรงกระทำที่มากกระทำต่อวัสดุประกอบนาโนได้มากขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุประกอบที่เติม 1% MMT มีค่าน้อยกว่าการเติม 1% Organo-MMT ทั้งนี้เนื่องจาก Organo-MMT สามารถเข้ากันได้ดีกับ SBS ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX (รูปที่ 4.8) จะพบว่าอนุภาคของ MMT อยู่กันเป็นกลุ่มๆ มีการกระจายของอนุภาค MMT ไม่ดี (รูปที่ 4.8 จ) ทำให้วัสดุประกอบที่เตรียมได้เป็นแบบแทรกตัว ในขณะที่วัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT เป็นแบบแตกกระเจิง



ชนิดของวัสดุประกอบ

รูปที่ 4.10 เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มวัสดุประกอบนาโน

จากรูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ SBS และ วัสดุประกอบ SBS/Ornano-MMT พบว่าการเติม Organo-MMT ในช่วงปริมาณ 0.25%-5% หรือ 1% MMT ลงใน SBS ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดขาดของวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุประกอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิงและแทรกตัว ขนาดของ Organo-MMT หรือ MMT มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร จึงไม่ขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านกันของสายโซ่ SBS เมื่อได้รับแรงดึง ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุประกอบที่มีส่วนเสริมแรงระดับไมโครเมตร



รูปที่ 4.11 ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุประกอบนาโน

จากการทดสอบค่ามอดูลัสของยัง พบว่าการเติม Organo-MMT หรือ MMT ลงใน SBS ทำให้วัสดุประกอบที่เตรียมได้มีค่ามอดูลัสของยังสูงกว่า SBS ดังแสดงในรูปที่ 4.11 นอกจากนี้เมื่อเติม Organo-MMT ในปริมาณ 0.25% ถึง 1% โดยน้ำหนักของ SBS พบว่าค่ามอดูลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากส่วนเสริมแรง Organo-MMT มีความแข็งกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ และมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร นอกจากนี้ยังมีการกระจายตัวที่ดีอยู่ในวัสดุประกอบ (จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX) ทำให้ความเค้นสะสมระหว่างภูมิภาค (Stress concentration) ต่ำ ส่งผลให้บริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคของวัสดุประกอบ SBS/Organo-MMT ดังกล่าวแข็งแรง จึงสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้ดี ค่ามอดูลัสจึงสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่อเติม 1% Organo-MMT แต่ในวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 3% และ 5% โดยน้ำหนักของ SBS พบว่าค่ามอดูลัสของยังของวัสดุประกอบดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่า SBS ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่เมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสของยังลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติม Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-1% เนื่องจาก Organo-MMT มีการรวมเป็นกลุ่มก้อน (จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX) การกระจายตัวไม่ดี ทำให้ความเค้นสะสมระหว่างภูมิภาค (Stress concentration) สูง บริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาคไม่แข็งแรง ทำให้ความสามารถในการต้านทานการเสียรูปต่ำลง ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุประกอบนาโนดังกล่าวจึงมีค่าต่ำลง

นอกจากนี้การเตรียมวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT พบว่าวัสดุประกอบที่เตรียมได้มีค่ามอดูลัสของยังสูงกว่า SBS เนื่องจาก MMT เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากกว่า SBS แต่มีค่าต่ำกว่าวัสดุประกอบนาโนที่ใช้ 1% Organo-MMT ทั้งนี้เป็นเพราะ Organo-MMT เมื่อทำการดัดแปรโครงสร้างแล้วทำให้ความมีขั้วลดลง ความแตกต่างระหว่างขั้วของ Organo-MMT กับ SBS จึงลดลง จึงเข้ากัน

ได้ดี ส่งผลให้ความเค้นสะสมระหว่างวัฏภาค (Stress concentration) ต่ำ ความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างสูงกว่า จึงทำให้ค่ามอดูลัสของยังของวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก เมื่อเทียบกับวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/1% Organo-MMT

4.5.2 ผลการทดสอบการซึมผ่านของอากาศ

ผลการวัดสมบัติการซึมผ่านของอากาศตามมาตรฐาน ASTM D 1434 Procedure V แสดงผลของความชันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทางการเคลื่อนที่ของไอโซโพรพานอล ได้ดังตารางที่ 4.3

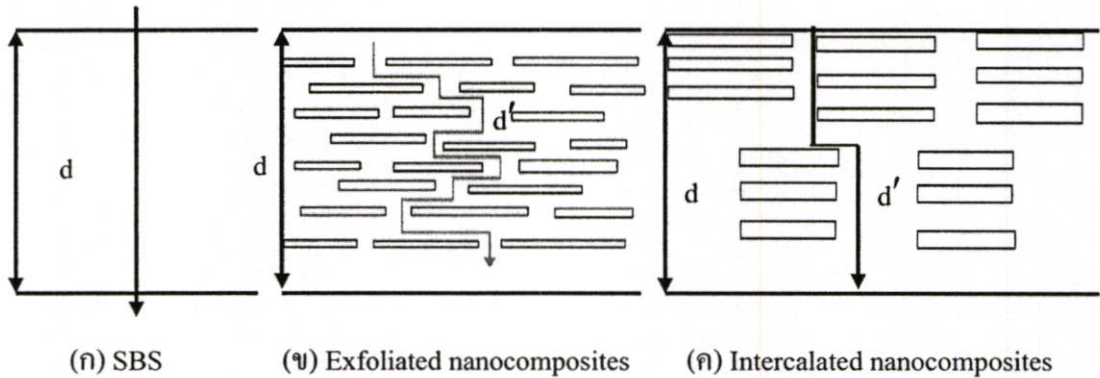
ตารางที่ 4.3 ความชันจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทางการเคลื่อนที่ของไอโซโพรพานอล

ตัวอย่าง	ความชัน (mm/s)	ความหนา (mm) ของแผ่นฟิล์ม	ความชัน X ความหนา (mm^2/s), Z
SBS	8.000	0.050	0.400
SBS/0.25% Organo-MMT	5.520	0.055	0.300
SBS/0.5% Organo-MMT	5.180	0.055	0.280
SBS/1% Organo-MMT	4.030	0.050	0.200
SBS/3% Organo-MMT	4.640	0.050	0.230
SBS/5% Organo-MMT	4.430	0.055	0.240
SBS/1% MMT	4.130	0.060	0.250

จากการวัดค่าการซึมผ่านของอากาศ โดยการสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของไอโซโพรพานอลกับเวลา ค่าความชันของกราฟ (ระยะทางการเคลื่อนที่/เวลา) จะมีค่าผกผันกับความหนาของแผ่นฟิล์ม เมื่อทำการปรับค่าความชัน (Normalised slope) ดังกล่าว ด้วยความหนาของแผ่นฟิล์ม (Z) จะได้ค่าการซึมผ่านของอากาศเป็นปริมาตรของก๊าซต่อเวลาที่ซึมผ่านแผ่นฟิล์ม พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม Organo-MMT ในปริมาณต่างๆ หรือเติม MMT จะมีค่า Z ลดลงเมื่อเทียบกับ SBS ซึ่งแสดงว่าการซึมผ่านของอากาศในวัสดุประกอบนาโนมีค่าลดลง แสดงว่าอากาศใช้เวลาในการซึมผ่านวัสดุประกอบนาโนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งนานขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อมีการเติม Organo-MMT หรือ MMT ลงใน SBS จะทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคของ Organo-MMT หรือ MMT มาขัดขวางการเคลื่อนที่ของ

อากาศทำให้ระยะทางและความคดเคี้ยวมากขึ้น จึงใช้เวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มเพราะต้องเคลื่อนที่อ้อมอนุภาคของเคลย์ที่ขวางการเคลื่อนที่อยู่

สำหรับในวัสดุประกอบนาโนที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-1% พบว่าค่า Z ของวัสดุประกอบนาโนดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มวัสดุประกอบที่เตรียมได้เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated nanocomposites) จึงทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ผ่านของอากาศผ่านวัสดุประกอบนาโนมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความคดโค้งของเส้นทางการเดินทาง (d') ของอากาศผ่านวัสดุประกอบที่มีแผ่นของ Organo-MMT ที่แตกออกจากกันกระจายอยู่ อธิบายได้ดังรูป 4.12 ข ทำให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนานกว่าการเคลื่อนที่ผ่าน SBS การเดินทางของอากาศผ่าน SBS จะมีระยะทางที่สั้นกว่า การซึมผ่านของอากาศจึงผ่านได้ดีกว่า



รูปที่ 4.12 แบบจำลองลักษณะการจัดเรียงตัวของ Organo-MMT ในแบบต่างๆ

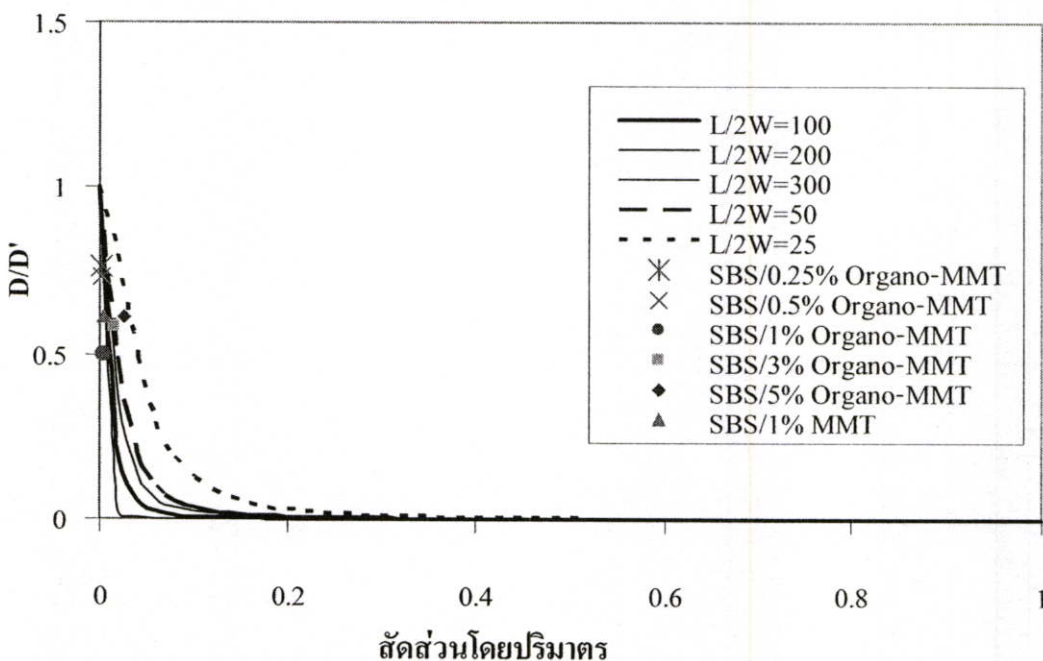
สำหรับวัสดุประกอบนาโนที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 3% และ 5% พบว่าค่า Z ของวัสดุประกอบดังกล่าวมีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบนาโนที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 1% แสดงว่าวัสดุประกอบนาโนที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 3% และ 5% มีการซึมผ่านของอากาศมีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบนาโนที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 1% แต่การซึมผ่านของอากาศในวัสดุประกอบดังกล่าวจะมีค่าต่ำกว่าใน SBS ทั้งนี้เนื่องจากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุประกอบนาโนที่มี Organo-MMT ในปริมาณ 3% และ 5% พบว่าเป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposites) ทำให้มีชั้นของ Organo-MMT ที่ยังไม่แยกจากกันอยู่ ส่งผลให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโนมีระยะทางที่สั้นกว่าการเคลื่อนที่ในฟิล์มวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ค อากาศจึงซึมผ่านวัสดุประกอบนาโนชนิด

แทรกตัวได้ง่ายกว่าวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง อย่างไรก็ตามการซึมผ่านของอากาศในวัสดุประกอบดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าใน SBS

เมื่อเติม 1% MMT ใน SBS พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีการซึมผ่านของอากาศลดลงเมื่อเทียบกับ SBS แต่การซึมผ่านของอากาศยังคงสูงกว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT ทั้งนี้เนื่องจากความเข้ากันได้ของ Organo-MMT กับ SBS ดีกว่า MMT กับ SBS ทำให้อนุภาคของ Organo-MMT เกิดการแตกกระเจิง และมีการกระจายตัวใน SBS สม่าเสมอกว่า MMT ระยะทางการเคลื่อนที่ของอากาศในวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT จึงมีค่าสูงกว่าในวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT ดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้การซึมผ่านของอากาศผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT มีค่าต่ำกว่า

เมื่อนำค่า Z ของวัสดุประกอบหารด้วยค่า Z ของ SBS ทำให้ได้ค่า D/D' หรือค่า Tortosity factor (τ) ซึ่งสามารถใช้ในการคาดคะเน Aspect ratio (L/W) ของ Organo-MMT และ MMT จากสมการของกัสเลอร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.5

ซึ่งผลการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยปริมาตรและ D/D' ตามสมการของกัสเลอร์

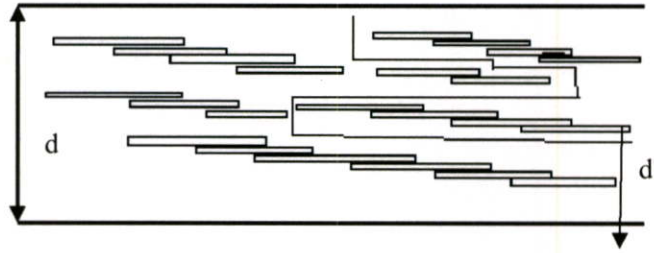
จากนั้นนำค่า D/D' ที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ไปคาดคะเนค่า Aspect ratio จากรูปที่ 4.13 ได้ค่า Aspect ratio ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่า Tortuosity factor และสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุประกอบนาโน

ตัวอย่าง	สัดส่วนโดยปริมาตร	Tortuosity factor	Aspect ratio
SBS/0.25% Organo-MMT	0.0013	0.76	600
SBS/0.5% Organo-MMT	0.0025	0.73	600
SBS/1% Organo-MMT	0.0052	0.50	600
SBS/3% Organo-MMT	0.154	0.58	100
SBS/5% Organo-MMT	0.0254	0.61	50
SBS/1% MMT	0.0052	0.62	600

พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-1% พบว่า Organo-MMT มีค่า aspect ratio ประมาณ 600 เนื่องจากในวัสดุประกอบนาโนที่มีปริมาณ Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-1% เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง และมีการกระจายตัวของอนุภาคสม่ำเสมอ แยกออกจากกันอย่างอิสระแต่ในวัสดุประกอบนาโนที่เติม Organo-MMT ในปริมาณ 3% และ 5% พบว่ามีค่า Aspect ratio ลดลง เป็น 100 และ 50 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้น วัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้เป็นแบบแทรกตัว และมีการรวมกลุ่มของอนุภาคของ Organo-MMT ซึ่งขนาดของกลุ่มและจำนวนกลุ่มจะมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุประกอบนาโนที่เติมสำหรับวัสดุประกอบนาโนที่เติม 1% MMT พบว่า MMT มี aspect ratio ประมาณ 600

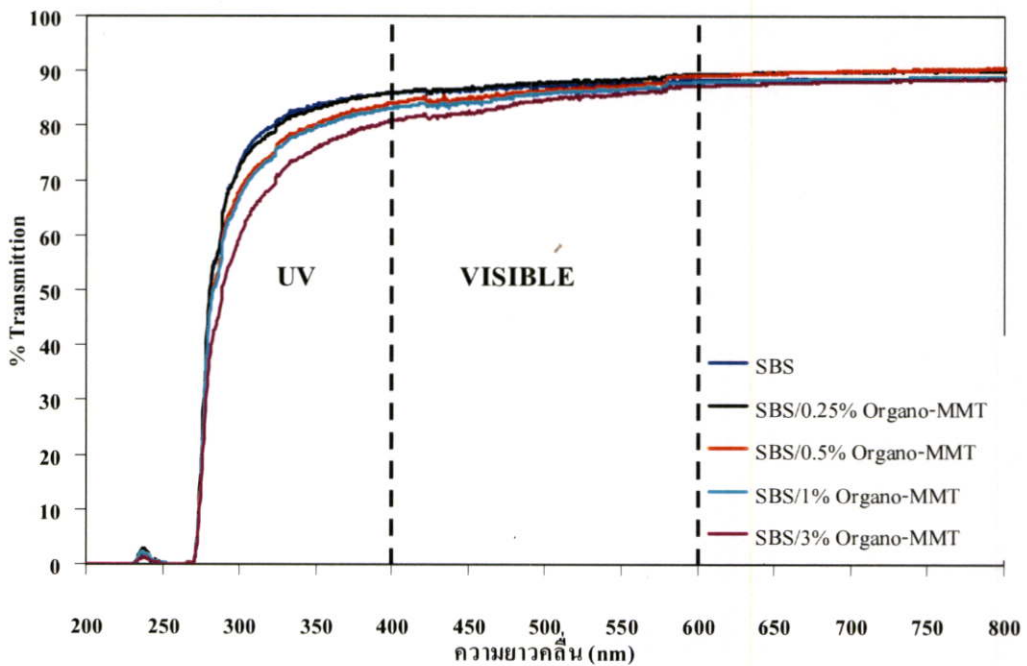
ค่าการซึมผ่านของอากาศมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเติมปริมาณ Organo-MMT ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้สันนิษฐานว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุประกอบนาโน ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงโครงสร้างของแผ่น MMT ออกไปในแนวรัศมีของแผ่นฟิล์มเนื่องจากแรงเหวี่ยง ทำให้การกระจายของอนุภาค Organo-MMT มีลักษณะดังรูปที่ 4.14 จากภาพเห็นได้ว่าอากาศต้องเคลื่อนที่ผ่านแผ่นของ Organo-MMT ในระยะทางที่มากขึ้น เนื่องจาก ทำให้การซึมผ่านของอากาศลดลง



รูปที่ 4.14 แบบจำลองการจัดเรียงตัวของ Organo-MMT และทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศซึ่งคาดว่าจะเกิดขึ้นในฟิล์มวัสดุประกอบ

4.5.3 การวัดการส่องผ่านของรังสียูวี-วิสิเบิล

เมื่อนำ SBS และวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ไปวัดการส่องผ่านของรังสียูวีซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 190 nm ถึง 400 nm และวัดการส่องผ่านของแสงที่ตามองเห็นได้ซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm ถึง 600nm ผลการวัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การส่องผ่านของรังสียูวี-วิสิเบิลใน SBS และวัสดุประกอบนาโน

จากรูปที่ 4.15 พบว่ารังสียูวีและแสงที่ตามองเห็นได้สามารถส่องทะลุผ่านฟิล์ม SBS ได้ดีกว่าวัสดุประกอบนาโน และเมื่อเติม Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-3% พบว่าการส่องผ่านของรังสี

ยูวีและแสงที่ตามองเห็นได้ลดลงเมื่อปริมาณของ Organo-MMT เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดลงของการส่องผ่านของรังสียูวีจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การส่องผ่านของแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้มีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก Organo-MMT มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของรังสียูวี จึงขัดขวางการส่องผ่านของรังสียูวีได้ดี แต่ไม่ขัดขวางการส่องผ่านของคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ทำให้วัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีลักษณะใส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (SBS) และมอนอเมอร์อิโคโนนที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้าง (Organo-MMT) ด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (HTAB) จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง และศึกษาผลของปริมาณของ Organo-MMT ที่เติมลงวัสดุประกอบที่มีต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล การซึมผ่านของอากาศผ่านฟิล์ม และทำการเปรียบเทียบผลกับวัสดุประกอบที่เติม MMT ที่ไม่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างได้ผลดังนี้

จากการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของ MMT ด้วย HTAB พบว่าการดัดแปรโครงสร้าง ทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d_{001}) ของ Organo-MMT มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 14.93 Å ใน MMT เป็น 23.61 Å และพบว่า HTAB ในโครงสร้างของ Organo-MMT สลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น และมีปริมาณของสารอินทรีย์ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ SBS และวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้พบว่าเมื่อมีการเติม Organo-MMT หรือ MMT ลงใน SBS จะทำให้ SBS มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดสูงขึ้น และยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ Organo-MMT ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดของ SBS นอกจากนี้พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม 1% Organo-MMT โดยน้ำหนัก ทำให้ SBS มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัว และอุณหภูมิสลายตัวหมดสูงกว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม 1% MMT

จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM/EDX ของวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-1% โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแตกกระเจิง (Exfoliated nanocomposites) และมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ทำให้วัสดุประกอบนาโนมีค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้น เนื่องจากมีค่าความเค้นสะสมระหว่างวัฏภาคต่ำ นอกจากนี้จากการทดสอบการซึมผ่านอากาศเบื้องต้นพบว่า การซึมผ่านของอากาศมีค่าลดลง นั่นคือเมื่อเติม Organo-MMT ลงในวัสดุประกอบ Organo-MMT จะทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโนมีค่าเพิ่มขึ้นกว่า SBS อากาศจึงใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโนนานขึ้น

เมื่อปริมาณของ Organo-MMT ในวัสดุประกอบนาโนเพิ่มขึ้นเป็น 3% และ 5% ทำให้วัสดุประกอบนาโนดังกล่าวมีค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสของยังมีค่าต่ำกว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม 1% Organo-MMT จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์และการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

พบว่าวัสดุประกอบนาโนดังกล่าวเป็นวัสดุประกอบนาโนชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposites) มีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค Organo-MMT ทำให้มีค่าความเค้นระหว่างวัฏภาคสูงขึ้น นอกจากนี้จากการทดสอบการซึมผ่านของอากาศพบว่ามีการซึมผ่านของอากาศลดลง เมื่อเทียบกับ SBS แต่มีการซึมผ่านของอากาศสูงกว่าวัสดุประกอบนาโนที่เติม Organo-MMT ในปริมาณ 0.25%-1%

นอกจากนี้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังของวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT มีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่า SBS แต่มีค่าต่ำกว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT และการซึมผ่านของอากาศผ่านฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/1% MMT มีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT เนื่องจากความแตกต่างระหว่างชั้นของ MMT กับ SBS ทำให้อนุภาค MMT รวมกันเป็นกลุ่มก้อนในเมตริกซ์ และยังส่งผลต่อความเค้นสะสมระหว่างวัฏภาคทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT

สำหรับเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด พบว่าการเติม Organo-MMT หรือ MMT ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของวัสดุประกอบนาโน และการเพิ่มปริมาณของ Organo-MMT ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเช่นเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้มีลักษณะใสเนื่องจากอนุภาคของ Organo-MMT มีขนาดเล็กกว่าความยาวของคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโน SBS/Organo-MMT ด้วยกระบวนการอื่นเช่น การหล่อแบบ หลอมเหลว เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น
2. อาจเปลี่ยนเกรดของ SBS เพื่อลดปัญหาการติดกันของฟิล์มวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ ทำให้สามารถนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้สะดวกยิ่งขึ้น หรืออาจมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อลดการติดกันของ SBS

เอกสารอ้างอิง

- [1.] นวัตกรรมการศึกษา. 2548. นาโนเทคโนโลยีคืออะไร?. [online]. Available :
<http://www.kunkroo.com/nano.html>.
- [2.] nstda.or.th. 2548. **Nanotechnology**. [online]. Available: <http://www.nstda.or.th/html/ar-nanotech.html>.
- [3.] รัตนาวรรณ มกรพันธุ์. 2548. นาโนเคลย์/นาโนคอมโพสิต (Nanoclay/Nanocomposites). [online]. Available:<http://www.thaiscience.com/lab-vol/p18/18 นาโนเคลย์.html>.
- [4.] P. C. Lebaron, Z. Wang and T. J. Pinnavaia. 1999. "Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview". **Applied Clay Science**. 15: 11-29.
- [5.] T. G. Gopakumar, J. A. Lee, M. Kontopoulou and J. S. Parent. 2002. "Influence of clay exfoliation on the physical properties of montmorillonite/polyethylene composites". **Polymer**. 43: 5483-5491.
- [6.] G. Beyer. 2002. "Nanocomposites: a new class of flame retardants for polymer". **Plastics Additives and Compounding**. 22-28.
- [7.] Sigma-Aldrich. 2005. **Nanocomposites-Polymer-Clay Nanocomposites, silica Nanocomposites and Types of Nanocomposites**. [online]. Available :
www.azonano.com/details.asp?Article ID=1147.
- [8.] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2005. **วัตถุต้นกำเนิดดิน**. [online]. Available : <http://www.environment.in.th/evdb/info/soil/soil07/html>.
- [9.] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2006. **แร่**. [online]. Available : http://www.environment.in.th/evdb/info/soil/download/111_soil/1113.doc.
- [10.] มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. 2006. **ปฐพีวิทยา**. [online]. Available : <http://www.Nsru.ac.th/kasetfac/soil/lesson 7.3 php>.
- [11.] กรมทรัพยากรธรณี. 2006. **ดิน**. [online]. Available :
http://www.dmr.go.th/knowledge/BMR_Publication/Min_Assess/_private/Clay

- [12.] M. Alexandre and P. Dubois. 2000. "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials". **Materials Science and Engineering**. 28: 1-63
- [13.] สิริรัตน์ จารุจินดา. 2546. เอกสารประกอบการเรียนวิชาการพิมพ์และย้อมสีสิ่งทอ. กรุงเทพฯ. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14.] Wikipedia. 2006. **Surfactant**. [online]. Available : <http://www.surfactant\Surfactant-Wikipedia, the free encyclopedia.htm>.
- [15.] Chemicalland. 2005. **Cetrimide (Hexadecyltrimethyl ammonium bromide)**. [online]. Available : <http://www.chemicalland21.com/arokorhi/lifescience/phar/CETRIMIDE.htm>.
- [16.] Polymer science learning center. 2005. **Anionic vinyl polymerization**. [online]. Available : <http://www.pslc.ws/mactest/anionic.htm>.
- [17.] Polymer science learning center. 2005. **Making SBS Rubber**. [online]. Available : <http://www.pslc.ws/mactest/sbssyn.htm>.
- [18.] J. E. Mcgrath. 1981. **Anionic polymerization kinetics, mechanisms and synthesis**. Washington D.C. American Chemical Society.
- [19.] J. A. Baydson. 1988. **Rubbery materials and their compounds**. New york. Elsevier applied science publishers.
- [20.] อธิพิล แจ่มชัด. 2543. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. กรุงเทพฯ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21.] Polymer Scienc Learning Centre. 2005. **SBS Rubber**. [online]. Available : <http://www.pslc.ws/mactest/sbs.htm>.
- [22.] Dynasol. 2001. **Calprene® 500 technical data**. [online]. Available: <http://www.dynasoleladtomers.com/Calprene484.aspx>
- [23.] azom.com. 2005. **Clay-Based Nanocomposites**. [online]. Available: <http://www.azom.com/detail.asp?ArticleID=936>.
- [24.] wiley.com. 2005. **Polymer-Clay Nanocomposites**. [online]. Available: <http://as.wiley.com/WileyCDA/Wiley Title/productcd-0471637009.html>.
- [25.] กฤษณ์ เรืองธรรม. 2544. "การศึกษาโคโคซานนาโนคอมโพสิตชนิดใหม่." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26.] P. M. Ajayan, L. S. Schadler and P. V. Braun. 2004. **Nanocomposite science and**

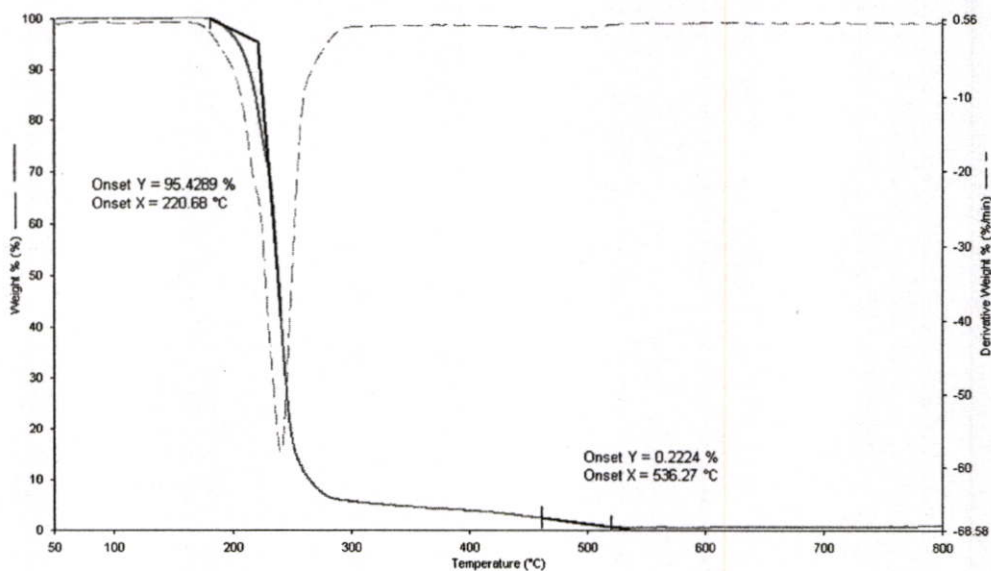
- technology.** Weinheim (Great Britain). Federal Republic of Germany.
- [27.] N.K. Lape, E.E. Nuxoll and E.L. Cussler. 2004. "Polydisperse flakes in barrier films". **Journal of Membrane Science.** 236 : 29-37.
- [28.] P. C. Meneghetti and S. Qutubuddin. 2005. "Synthesis and properties of rubber-clay nanocomposites". Ph.D.Thesis of Case Western Reserve University.
- [29.] R.K. Bharadwaj. 2001. "Modeling the barrier properties of polymer-layered silicate nanocomposites". **Macromolecules.** 34 : 9189-9192.
- [30.] A. B. Morgan and J. D. Harris. 2004. "Exfoliated polystyrene-clay nanocomposites synthesized by solvent blending with sonication". **Polymer.** 45 : 8695-8703.
- [31.] J. Ma, J. Xu, J. H. Ren, Z. Yu and Y. W. Mai. 2003. "A new approach to polymer /montmorillonite nanocomposites". **Polymer.** 44 : 4619-4624.
- [32.] X. A. Fu and S. Qutubuddin. 2005. "Swelling behavior of organoclays in styrene and exfoliated in nanocomposites". **Journal of Colloid and Interface Science.** 283 : 373-379.
- [33.] S. Peeterbroeck, M. Alexandre, R. Jerome and Ph. Dubois. 2005. "Poly(ethylene-co-vinyl acetate)/Clay nanocomposites: Effect of clay nature and organic modifiers on morphology, mechanical and thermal properties". **Polymer Degradation and Stability.** 90 : 288-294.
- [34.] W. Dieter. 1999. "Nanocomposites of Polyolefin Clay Hybrids". **Euro-Filler.** 26 : 1245-1265.
- [35.] L. Liu, Z. Qi and X. Zhu. 1999. "Studies on Nylon 6/clay Nanocomposites by Melt-Intercalation Process". **Journal of Applied Polymer Science.** 71 : 1133-1138.
- [36.] C. Long and Z. Qi. 1999. "Crystallization Properties and Crystal and Morphology of PET-Clay Nanocomposites". **Journal of Applied Polymer Science.** 71 : 1139-1146.
- [37.] T. K. Chen and K. H. Wel. 2000. "Synthesis and Characterization of Novel Segmented Polyurethane Clay Nanocomposites". **Polymer.** 41 : 1345-1353.
- [38.] W. J. Bae, K. H. Kim, W. H. Jo and Y. H. Park. 2005. "Fully exfoliated nanocomposites from polypyrrole graft copolymer/clay". **Polymer.** 46 : 10085-10091.
- [39.] M. Avella, J. D. Vlieger, M. E. Errico, S. Fischer, P. Vacca and M. G. Volpe. 2005. "Biodegradable starch/clay nanocomposite films for food packaging applications". **Food**

Chemistry. 93 : 467-474.

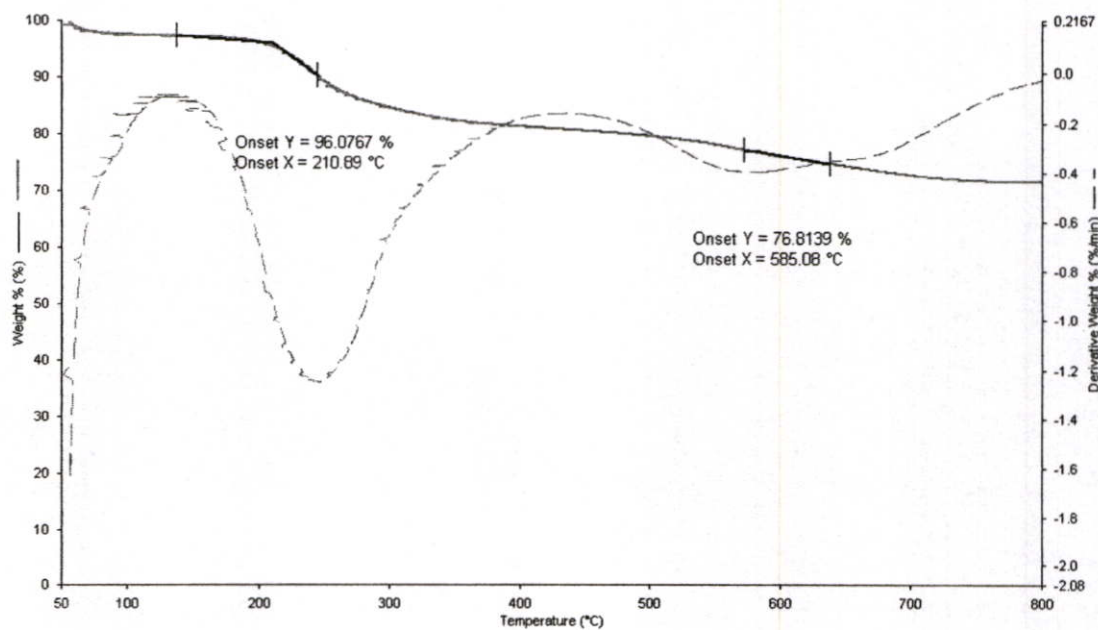
- [40.] Y. S. Choi, M. Xu and I. J. Chung. 2005. "Synthesis of exfoliated acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS) clay nanocomposites: role of clay as a colloidal stabilizer". **Polymer.** 46 : 531-538.
- [41.] J. Xiao, Y. Hu, Z. Wang, Y. Tang, Z. Chen and W. Fan. 2005. "Preparation and characterization of poly(butylene terephthalate) nanocomposites from thermally stable organic-modified montmorillonite". **European polymer journal.** 41 : 1030-1035.
- [42.] P.Kampeepappun, K. Srikulkit and D. Pentrakoon. 2004. "Preparation of Cassava Starch/Montmorillonite Nanocomposites Film". **Journal of Science Research Chula University.**
- [43.] M. V. Burnistr, K. M. Sukhyy, V. V. Shilov, P. Pissis, A. Spanoudaki, I. V. Sukha, V. I. Tomilo and Y. P. Gomza. 2005. "Synthesis, structure, thermal and mechanical properties of nanocomposites based on linear polymers and layered silicates modified by polymeric quaternary ammonium salts (ionenes)". **Polymer.** 46 : 12226-12232
- [44.] R. K. Shah, R. K. Krishnaswamy, S. Takahashi, D. R. Paul. 2006. "Blown films of nanocomposites prepared from low density polyethylene and a sodium ionomer of poly(ethylene-co-methacrylic acid)". **Polymer.** 47 : 6187-6201.
- [45.] E. Picard, A. Vermogen, J. F. Gerard and E. Espuche. 2007. "Barrier properties of nylon 6-montmorillonite nanocomposite membranes prepared by melt blending: Influence of the clay content and dispersion state consequences on modeling". **Journal of Membrane Science.** 292 : 133-144.
- [46.] T. Ogasawara, Y. Ishida, T. Tshikawa, T. Aoki and T. Ogura. 2006. "Helium gas permeability of montmorillonite/epoxy nanocomposites". **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.** 37 : 2236-2240.
- [47.] มาลินี ชัยสุขภักดิ์สินธุ์. 2540. **เคมีพอลิเมอร์.** กรุงเทพฯ. โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48.] ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. 2548. **เอกสารประกอบการสอนวิชานาโนเทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาคผนวก ก

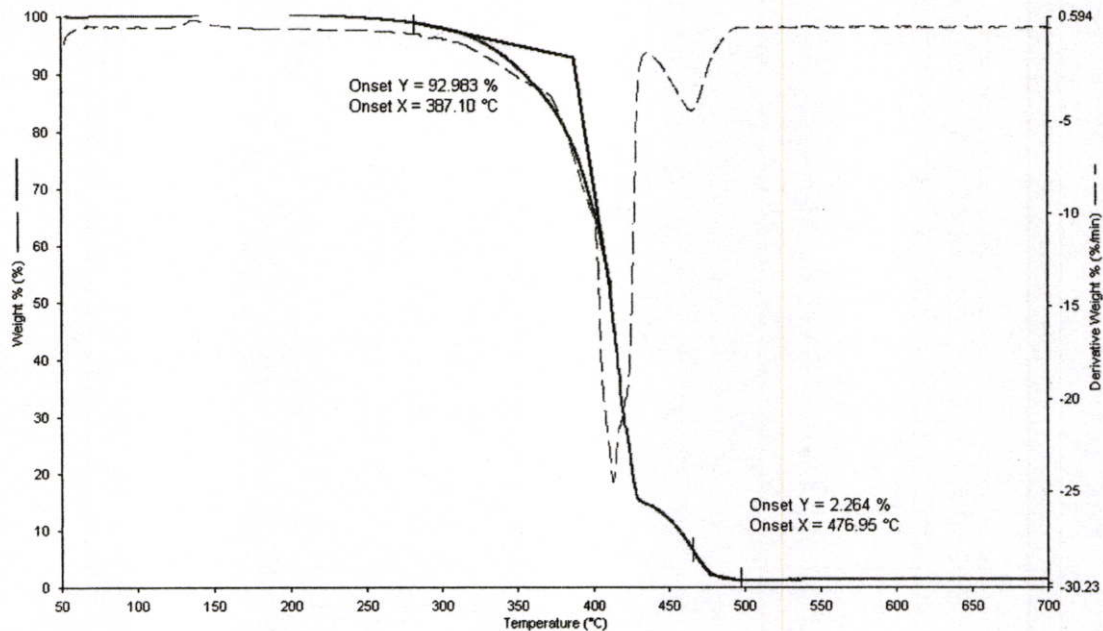
TGA เทอร์โมแกรมของ HTAB Organo-MMT และวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ ภายใน
บรรยากาศออกซิเจน



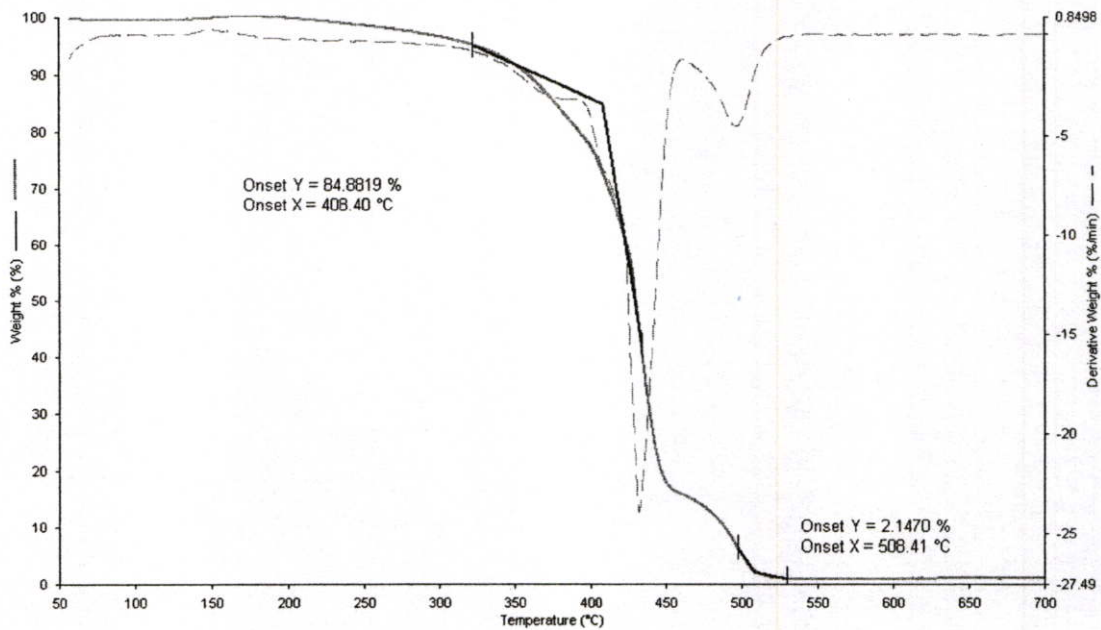
รูปที่ ก. 1 เทอร์โมแกรมของเฮกซะเดคซิล ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์



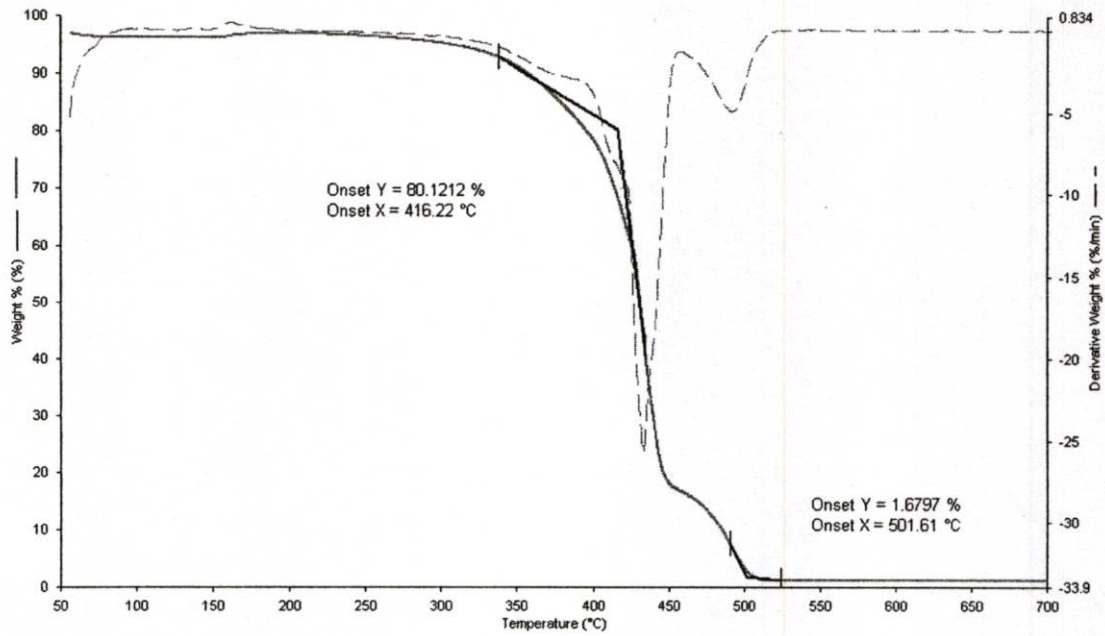
รูปที่ ก. 2 เทอร์โมแกรมของออกแกโนเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยเฮกซะเดคซิล ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์



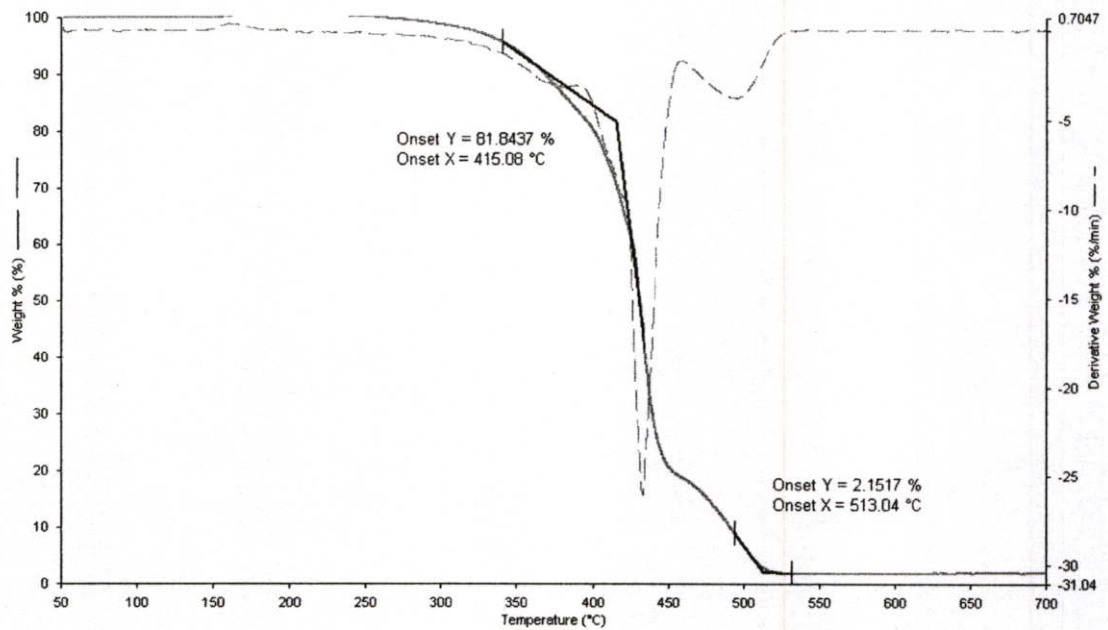
รูปที่ ก. 3 เทอร์โมแกรมของ SBS



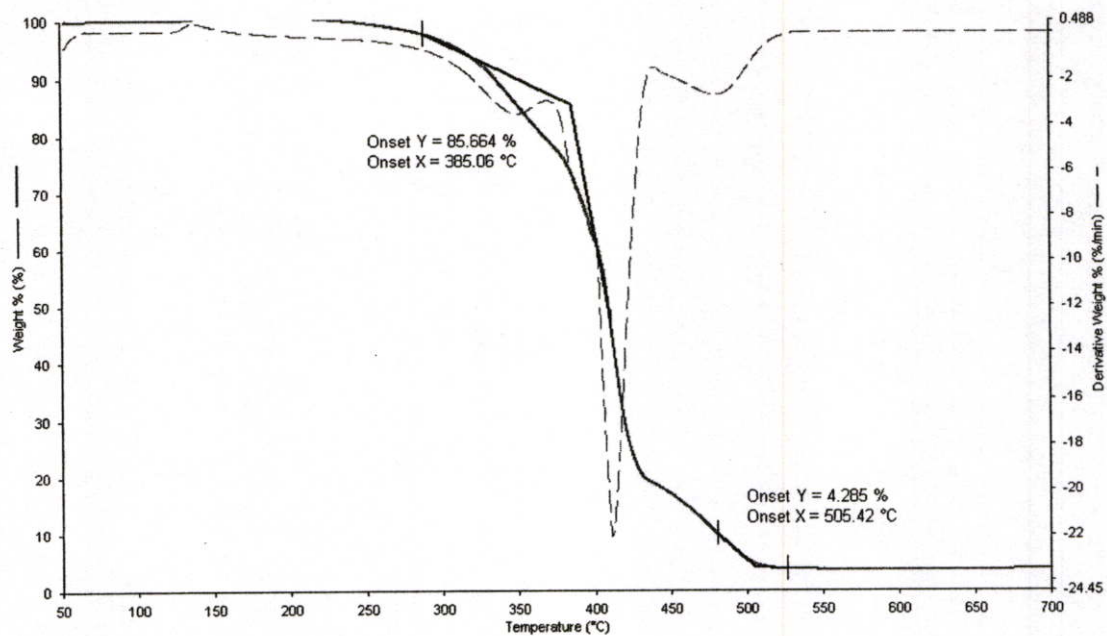
รูปที่ ก. 4 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/0.25% Organo-MMT



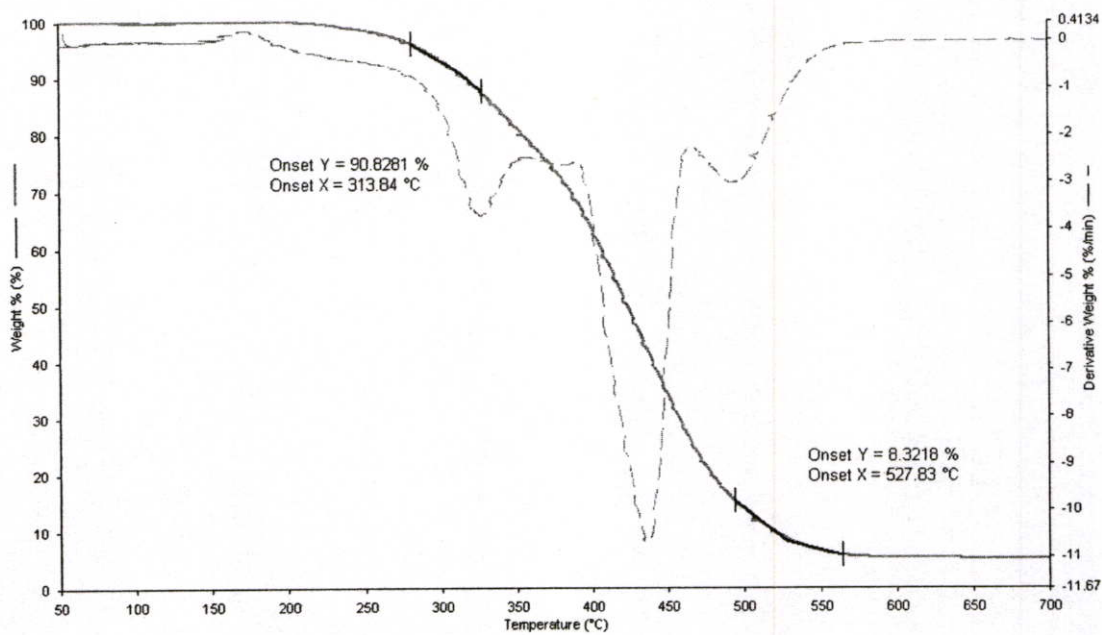
รูปที่ ก. 5 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/0.5% Organo-MMT



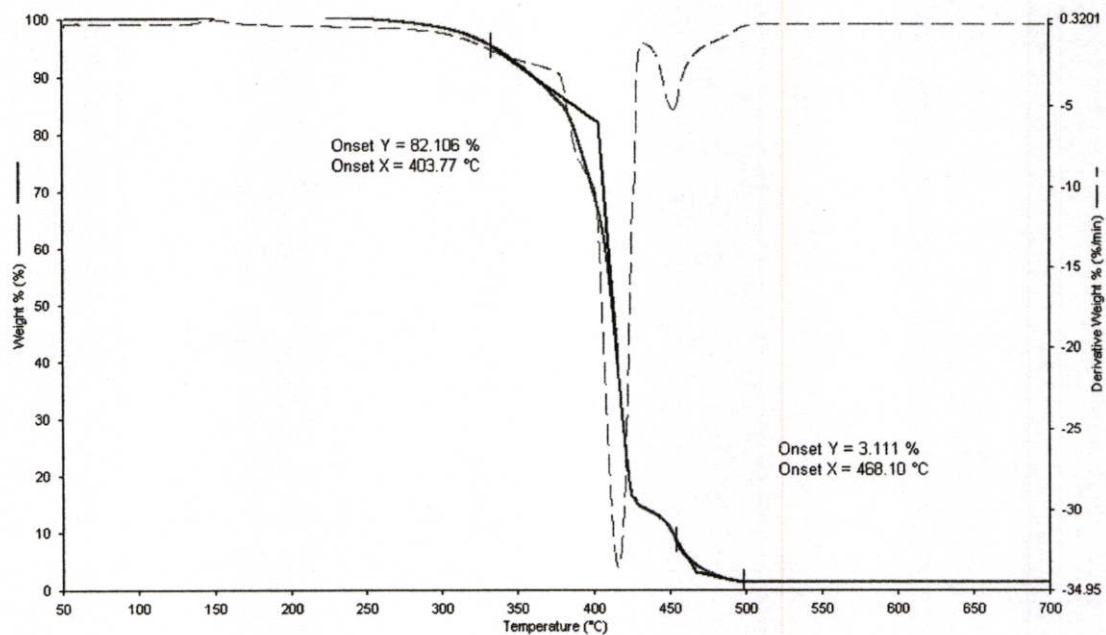
รูปที่ ก. 6 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/1% Organo-MMT



รูปที่ ก. 7 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/3% Organo-MMT



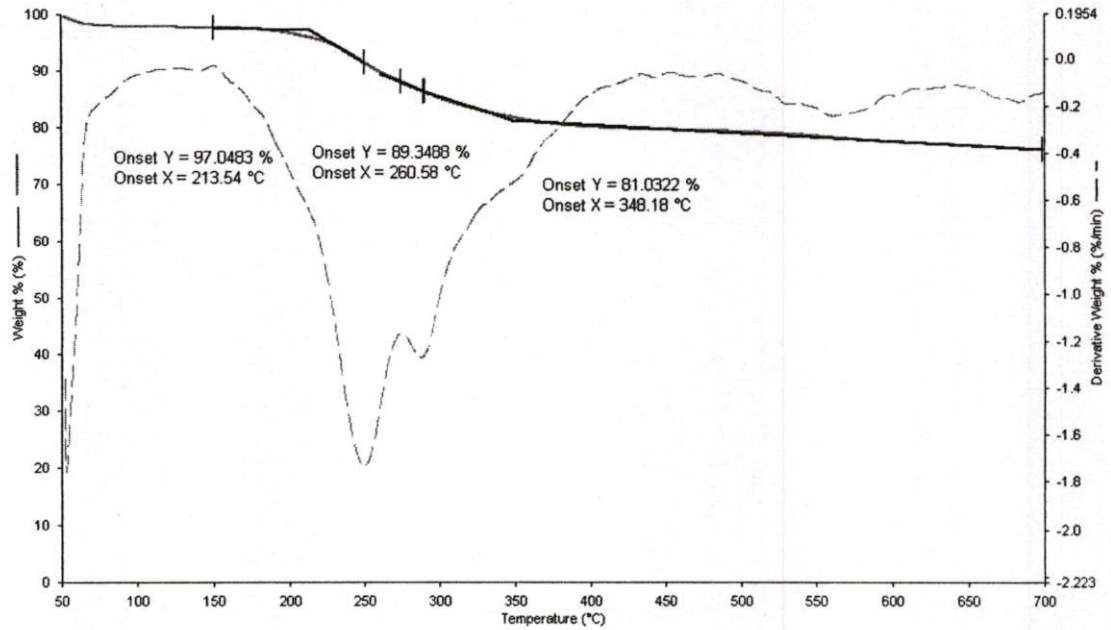
รูปที่ ก. 8 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/5% Organo-MMT



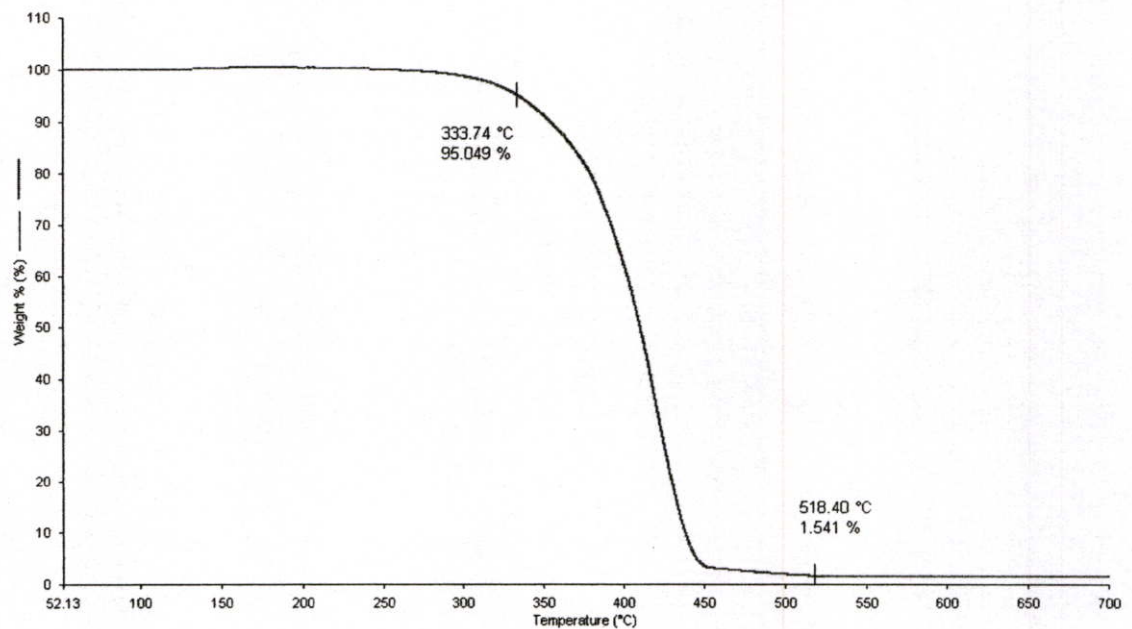
รูปที่ ก. 9 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/1% MMT

ภาคผนวก ข

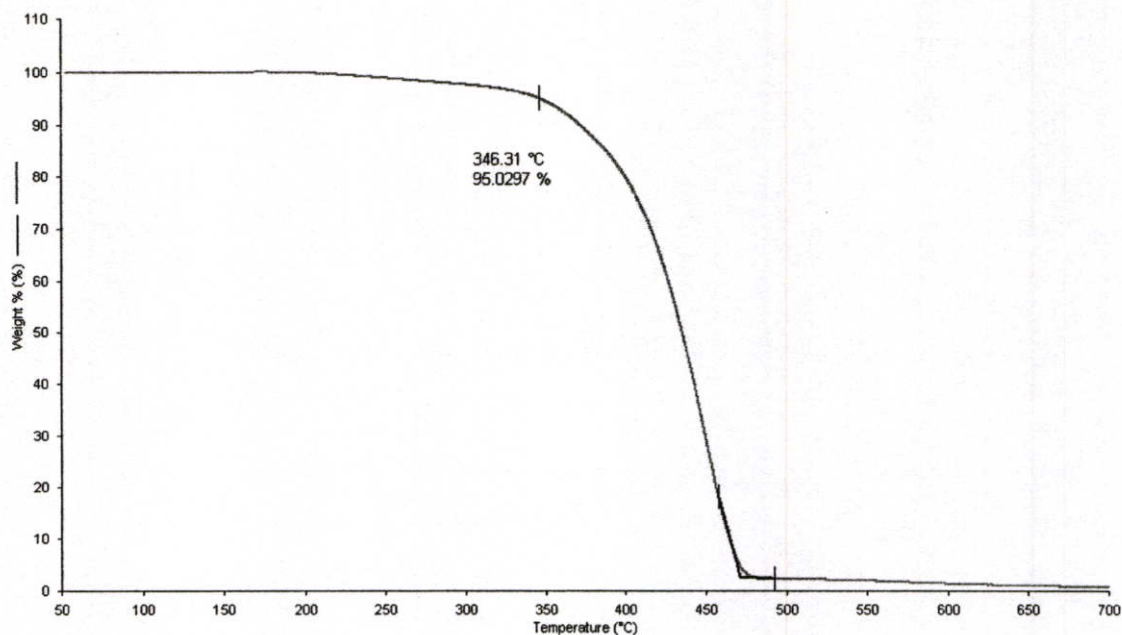
TGA เทอร์โมแกรมของ HTAB Organo-MMT และวัสดุประกอบนาโนที่เตรียมได้ ภายในบรรยากาศไนโตรเจน



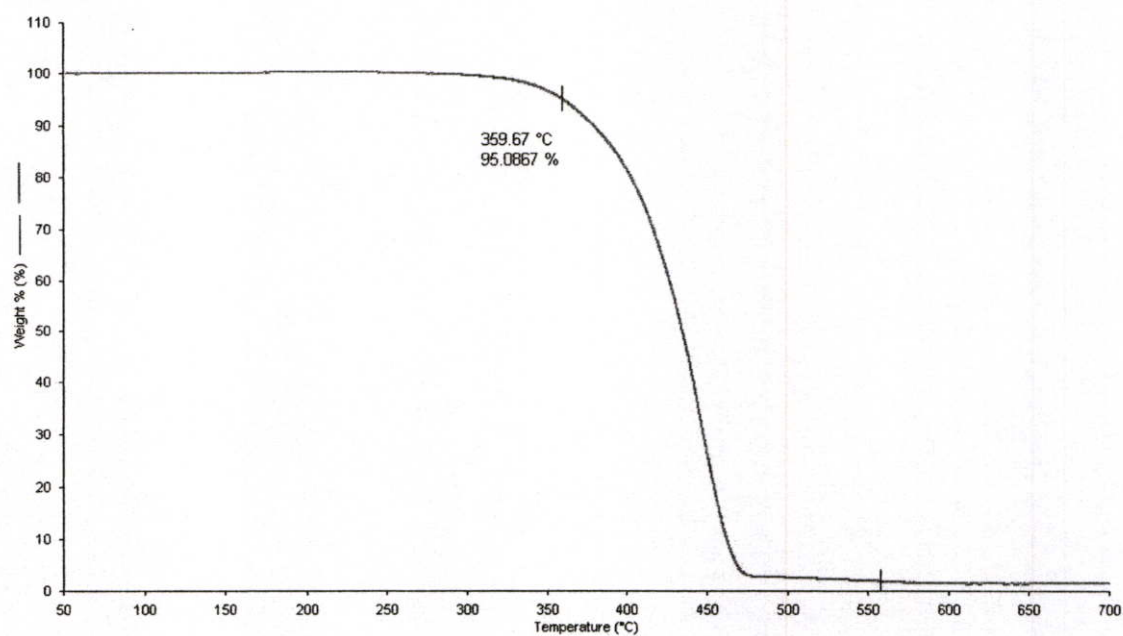
รูปที่ ข. 1 เทอร์โมแกรมของออกแกโนเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยเฮกซะเดคซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์



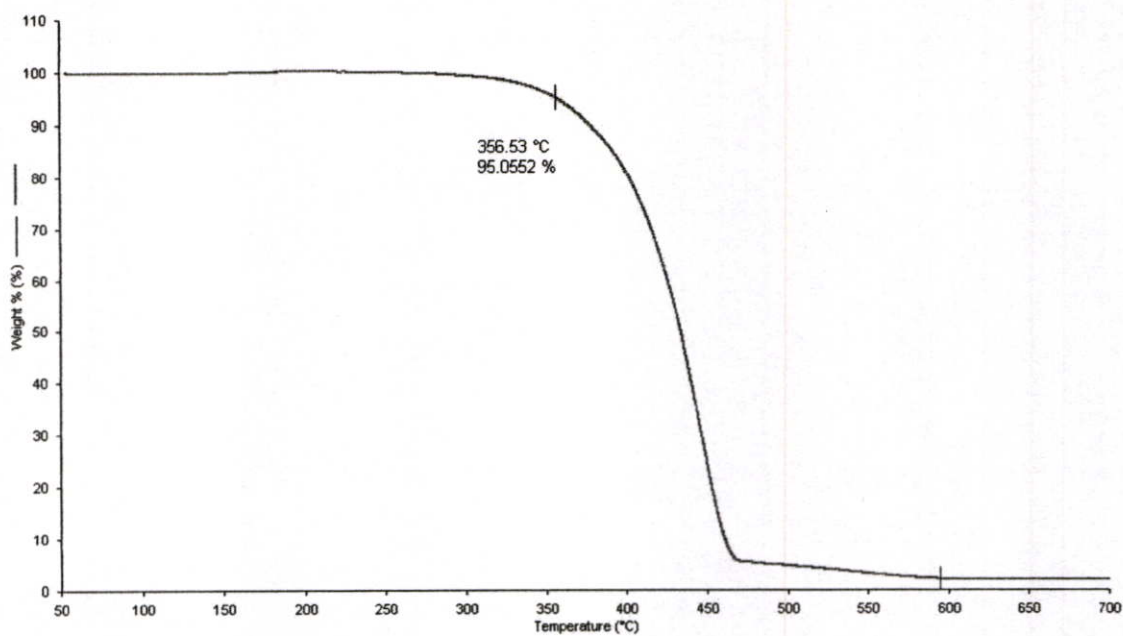
รูปที่ ข. 2 เทอร์โมแกรมของ SBS



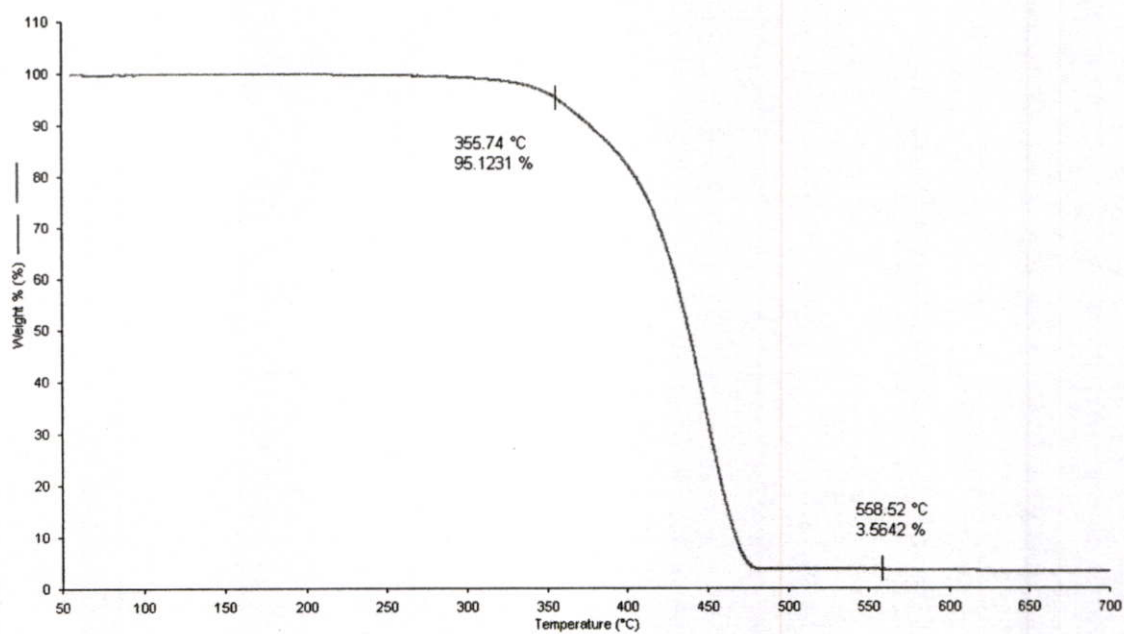
รูปที่ ข. 3 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโน SBS/0.25% Organo-MMT



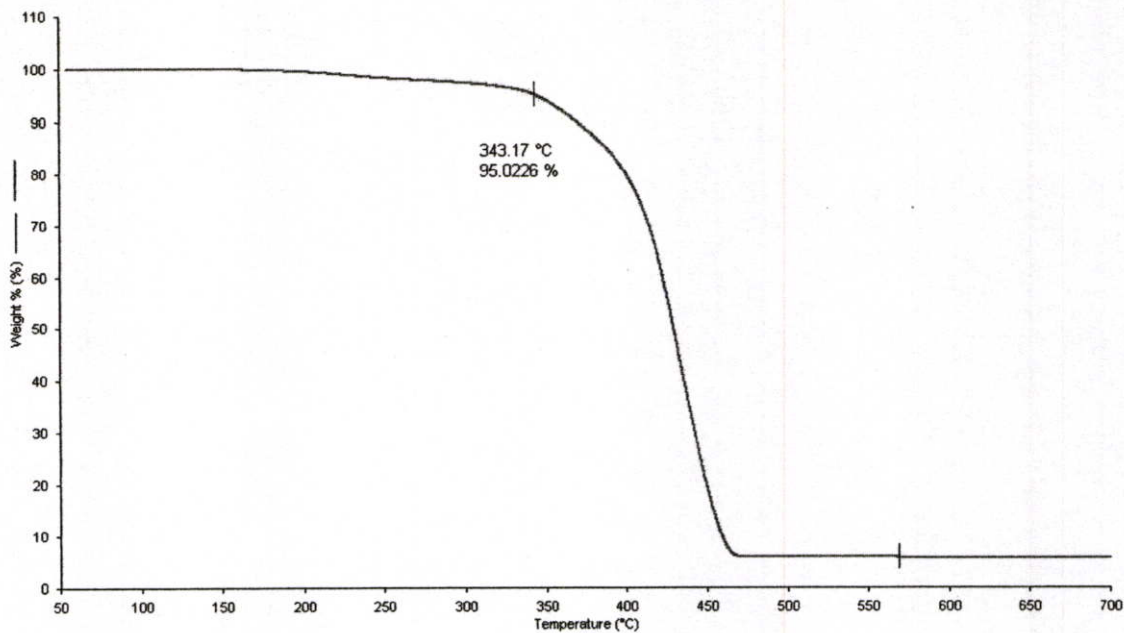
รูปที่ ข. 4 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/0.5% Organo-MMT



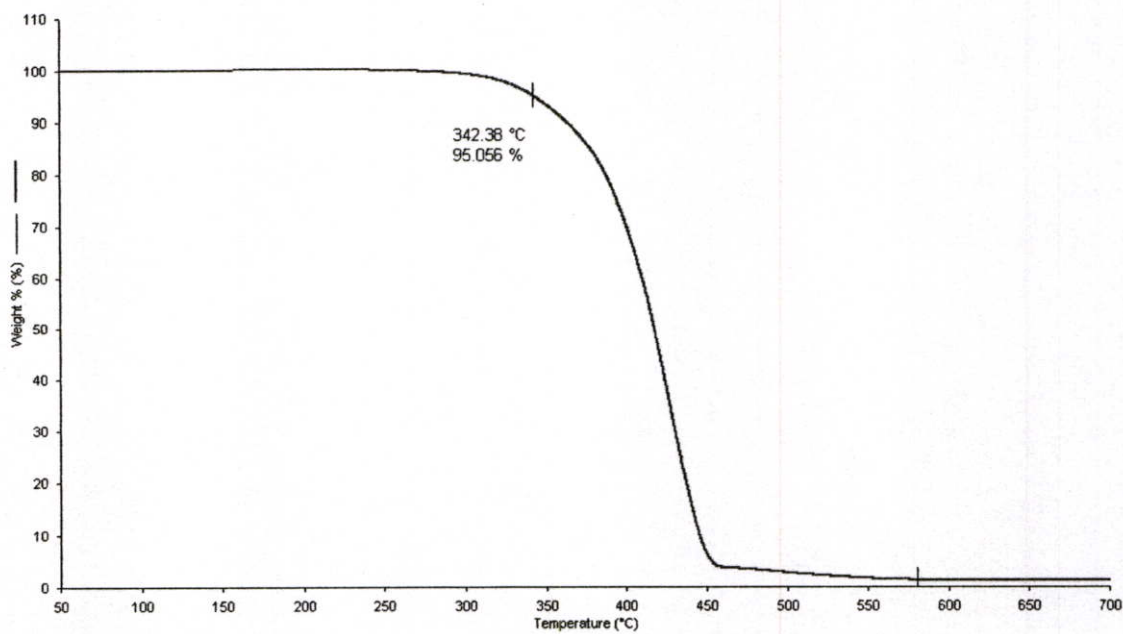
รูปที่ ข. 5 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/1% Organo-MMT



รูปที่ ข. 6 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/3% Organo-MMT



รูปที่ ข. 7 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/5% Organo-MMT



รูปที่ ข. 8 เทอร์โมแกรมของวัสดุประกอบนาโนระหว่าง SBS/1% MMT

ภาคผนวก ค

ร้อยละขององค์ประกอบของธาตุจาก XRF

ตารางที่ ค 1 องค์ประกอบของ MMT

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	49.1%
Na	2.97%
Mg	1.85%
Al	8.72%
Si	33.0%
S	0.00737%
Cl	0.196%
K	0.838%
Ca	1.45%
Ti	0.202%
Fe	1.26%
Cu	0.0848%
Pd	0.131%

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของ Organo-MMT

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละ โดยอะตอมของธาตุ
O	49.600%
Mg	2.060%
Al	9.310%
Si	34.400%
K	0.420%
Ca	0.230%
Ti	0.200%
Fe	1.340%
Cu	0.106%
Br	2.140%

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของ SBS

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละ โดยอะตอมของธาตุ
O	21.40%
S	1.950%
Ca	18.60%
Fe	11.40%
Ni	1.47%
Cu	14.20%
Zn	2.71%
Rh	3.93%
Pd	4.12%
Sb	2.13%
Cs	13.30%
Ba	2.11%
Re	2.68%

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของ SBS/0.25% Organo-MMT

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	38.600%
Mg	2.300%
Al	3.730%
Si	19.400%
S	2.220%
K	0.989%
Ca	10.600%
Fe	4.590%
Cu	6.250%
Rh	3.030%
Pd	3.420%
Au	2.420%
Th	2.480%

ตารางที่ 5 องค์ประกอบของ SBS/0.5% Organo-MMT

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	46.600%
Mg	2.260%
Al	4.680%
Si	30.000%
S	1.540%
K	1.080%
Ca	6.540%
Fe	2.240%
Cu	3.030%
Rh	0.336%
Pd	1.680%

ตารางที่ 6 องค์ประกอบของ SBS/1% Organo-MMT

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	48.500%
Mg	1.650%
Al	5.140%
Si	32.100%
S	1.770%
Ca	5.260%
Fe	2.060%
Cu	2.350%
Rh	10408%
Pd	0.579%
Sb	0.161%

ตารางที่ 7 องค์ประกอบของ SBS/3% Organo-MMT

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	50.300%
Mg	1.420%
Al	6.220%
Si	36.100%
S	0.544%
K	0.700%
Ca	2.400%
Ti	0.242%
Fe	0.999%
Cu	0.858%
Rh	0.0869%
Pd	0.1890%

ตารางที่ 8 องค์ประกอบของ SBS/5% Organo-MMT

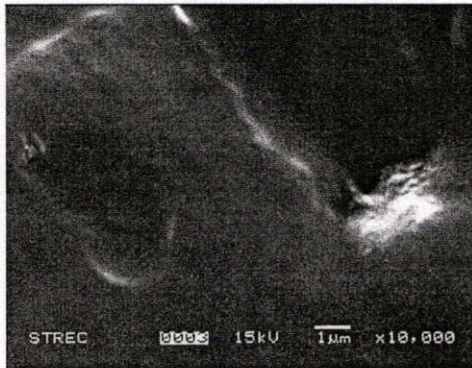
ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	50.600%
Mg	1.600%
Al	6.620%
Si	36.300%
S	0.477%
K	0.650%
Ca	1.840%
Ti	0.199%
Fe	0.841%
Cu	0.507%
Pd	0.134%

ตารางที่ 9 องค์ประกอบของ SBS/1% MMT

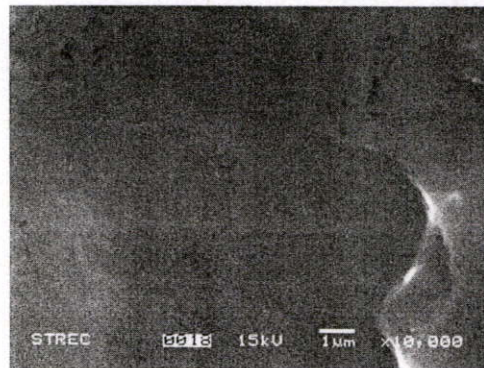
ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยอะตอมของธาตุ
O	44.800%
Mg	1.560%
Al	3.560%
Si	28.800%
S	1.410%
K	1.210%
Ca	8.280%
Fe	2.630%
Ni	0.361%
Cu	3.030%
Rb	0.941%
Rh	0.498%
Pd	1.410%
Cs	1.580%

ภาคผนวก ง

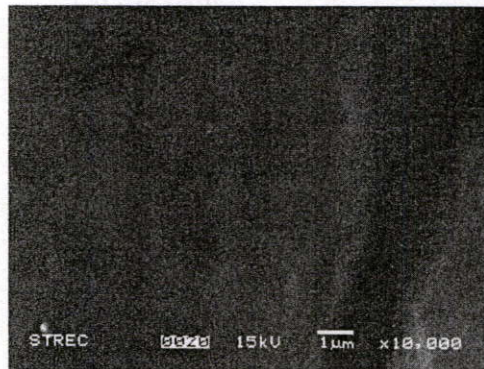
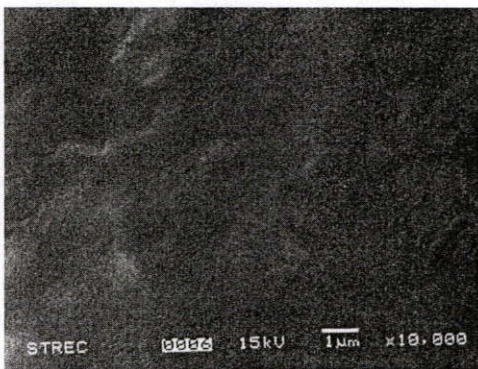
สัณฐานวิทยาจาก SEM ของฟิล์ม SBS และฟิล์มวัสดุประกอบนาโน



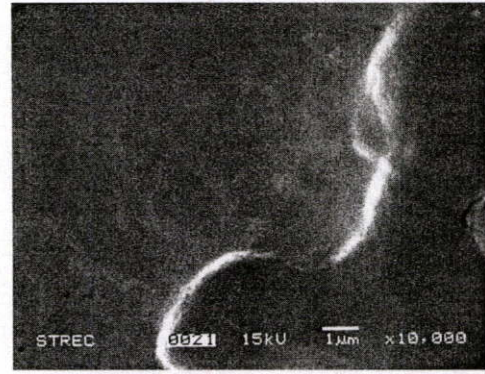
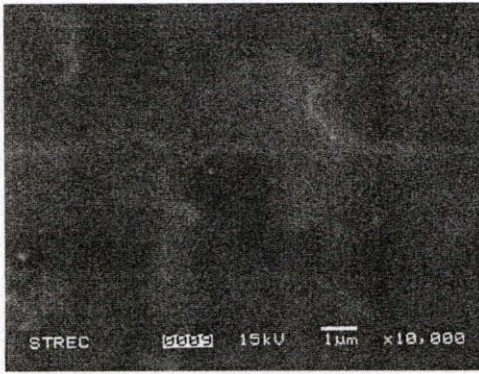
รูปที่ ง 1 สัณฐานวิทยาจาก SEM ของ SBS



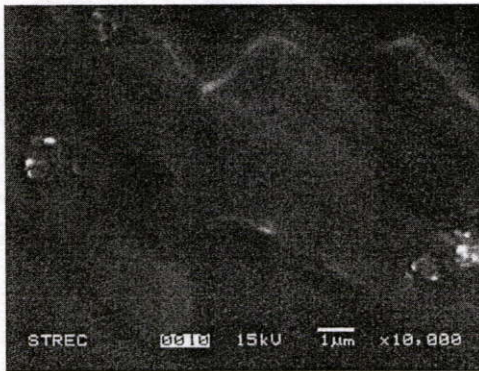
รูปที่ ง 2 สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุประกอบนาโน SBS/0.25% Organo-MMT



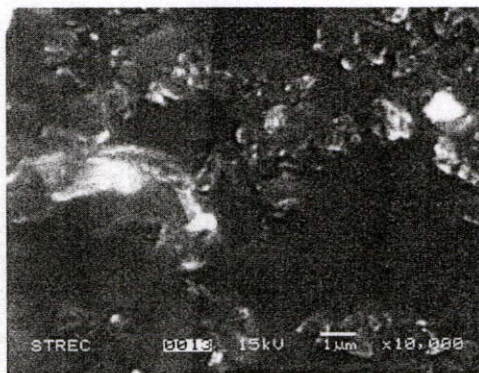
รูปที่ ง 3 สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุประกอบนาโน SBS/0.5% Organo-MMT



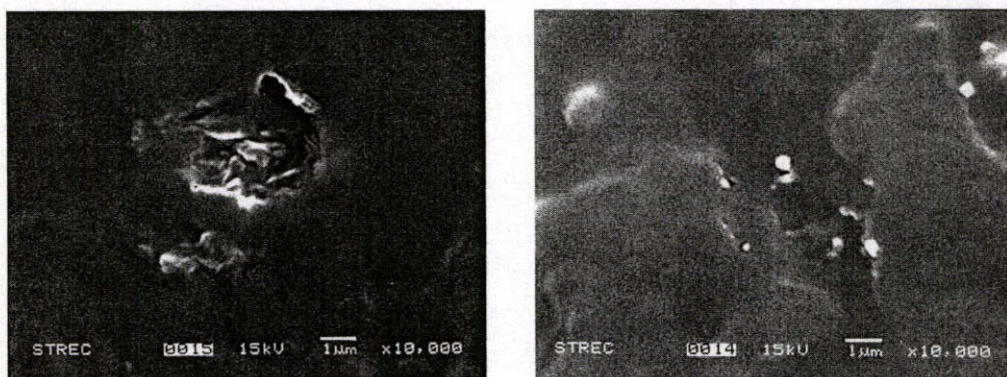
รูปที่ ๔ สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุประกอบนาโน SBS/1% Organo-MMT



รูปที่ ๕ สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุประกอบนาโน SBS/3% Organo-MMT



รูปที่ ๖ สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุประกอบนาโน SBS/5% Organo-MMT



รูปที่ ๗ สัณฐานวิทยาจาก SEM ของวัสดุประกอบนาโน SBS/1%MMT

ภาคผนวก จ

ตารางที่ จ 1 ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุจาก SEM/EDX ของฟิล์ม SBS และฟิล์มวัสดุประกอบนาโน

ตัวอย่าง	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	% Atomic		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
SBS	C	99.49	99.48	99.49
	Au	0.51	0.52	0.51
SBS/0.25% Organo-MMT	C	92.12	93.67	94.06
	O	7.78	6.21	5.84
	Si	0.10	0.11	0.10
SBS/0.5% Organo-MMT	C	91.72	91.99	91.93
	O	8.06	7.86	7.87
	Si	0.22	0.16	0.20
SBS/1% Organo-MMT	C	93.12	93.69	94.64
	O	6.72	5.96	5.02
	Si	0.16	0.35	0.34
SBS/3% Organo-MMT	C	91.78	91.48	88.20
	O	7.68	8.14	11.08
	Si	0.54	0.38	0.47
	Al	-	-	0.25
SBS/5% Organo-MMT	C	91.37	92.27	91.06
	O	7.39	6.94	7.71
	Si	0.95	0.63	0.99
	Al	0.29	0.16	0.24
SBS/1% MMT	C	91.76	91.43	90.51
	O	7.93	8.45	9.30
	Si	0.31	0.12	0.20

ภาคผนวก ฉ

ตารางที่ ฉ 1 ผลของปริมาณ Organo-MMT ที่มีต่อค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุประกอบนาโน

ตัวอย่าง	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)						
	SBS	SBS/0.25% Organo- MMT	SBS/0.5% Organo- MMT	SBS/1% Organo- MMT	SBS/3% Organo- MMT	SBS/5% Organo- MMT	SBS/1% MMT
1	26.210	21.450	24.890	31.750	25.520	20.480	26.580
2	23.500	22.340	26.500	33.400	24.440	18.170	27.960
3	18.670	19.450	25.940	35.680	25.460	20.270	27.470
4	22.850	25.550	24.530	34.700	24.420	19.340	26.410
5	22.000	23.600	24.930	34.720	24.820	18.070	29.520
6	26.080	22.300	25.620	31.710	23.790	19.980	23.380
7	23.550	24.100	25.620	31.310	25.340	20.590	22.500
8	25.070	22.910	29.740	35.620	25.550	18.060	24.550
ค่าเฉลี่ย	23.491	22.713	25.971	33.611	24.918	19.370	26.046
SD	2.463	1.826	1.650	1.819	0.654	1.120	2.393

ตารางที่ 2 ผลของปริมาณ Organo-MMT ที่มีต่อค่ามอดุลัสของยาง

ตัวอย่าง	ค่ามอดุลัสของยาง (MPa)						
	SBS	SBS/0.25% Organo- MMT	SBS/0.5% Organo- MMT	SBS/1% Organo- MMT	SBS/3% Organo- MMT	SBS/5% Organo- MMT	SBS/1% MMT
1	8.42	12.26	11.87	14.78	17.31	19.95	8.47
2	6.61	9.17	7.45	29.25	17.76	15.94	7.48
3	7.37	16.94	10.32	27.93	15.08	11.93	6.19
4	6.11	10.12	15.04	20.8	14.48	9.5	11.01
5	8.21	13.67	7.94	21.12	18.69	14.19	12.08
6	10	11.82	12.32	25.1	18.96	15.06	17.02
7	12.4	10.77	7.33	16.24	13.76	19.01	20.79
ค่าเฉลี่ย	8.44	12.12	10.32	22.17	16.58	15.08	11.86
SD	2.16	2.59	2.93	5.54	2.11	3.69	5.32

ตารางที่ 3 ผลของปริมาณ Organo-MMT ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเท่ากับ 100%
ของวัสดุประกอบนาโน

ตัวอย่าง	ค่ามอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเท่ากับ 100% (MPa)						
	SBS	SBS/0.25% Organo- MMT	SBS/0.5% Organo - MMT	SBS/1% Organo - MMT	SBS/3% Organo - MMT	SBS/5% Organo -MMT	SBS/ 1% MMT
1	2.397	1.891	2.092	3.060	2.055	2.085	2.273
2	2.092	1.856	2.004	2.817	2.862	1.800	2.500
3	2.076	1.907	1.927	3.013	2.306	1.906	2.006
4	2.074	2.16	2.014	3.025	2.214	2.288	2.198
5	2.193	2.029	1.883	2.997	2.285	2.347	2.095
6	1.829	2.08	1.942	2.816	2.046	1.993	2.042
7	1.948	2.152	1.852	2.789	2.234	2.110	2.025
8	1.932	1.949	1.991	2.856	2.249	1.902	2.084
ค่าเฉลี่ย	2.067	2.003	1.963	2.922	2.281	2.054	2.153
SD	0.175	0.119	0.078	0.112	0.254	0.192	0.167

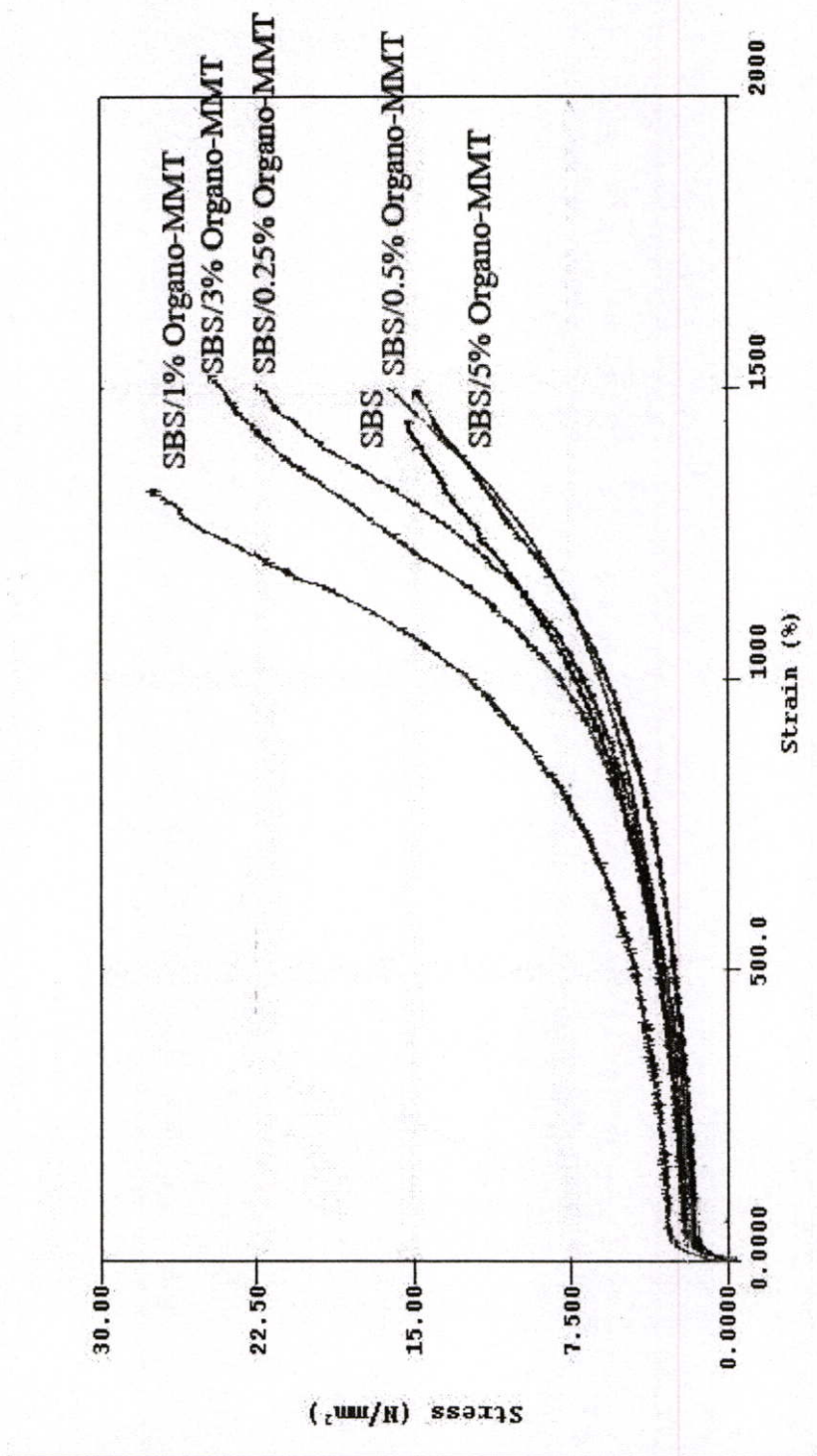
ตารางที่ 3 ผลของปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่มีต่อค่ามอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเท่ากับ 300%
ของวัสดุประกอบนาโน

ตัวอย่าง	ค่ามอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การดึงยืดเท่ากับ 300% (MPa)						
	SBS	SBS/0.25% Organo- MMT	SBS/0.5% Organo- MMT	SBS/1% Organo- MMT	SBS/3% Organo- MMT	SBS/5% Organo- MMT	SBS/1% MMT
1	2.463	2.358	2.597	3.753	2.636	2.401	2.682
2	2.741	2.176	2.541	3.577	3.678	2.331	2.775
3	2.731	2.362	2.260	3.687	2.688	2.329	2.308
4	2.665	2.532	2.479	3.547	2.636	2.725	2.542
5	2.755	2.416	2.379	3.327	2.597	2.621	2.516
6	2.608	2.365	2.370	3.420	2.385	2.433	2.379
7	2.708	2.417	2.221	3.401	2.570	2.470	2.289
8	2.550	2.533	2.491	3.309	2.487	2.307	2.354
ค่าเฉลี่ย	2.653	2.395	2.417	3.503	2.709	2.452	2.481
SD	0.104	0.113	0.133	0.165	0.403	0.149	0.179

ตารางที่ 4 ผลของปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของวัสดุ
ประกอบนาโน

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%)						
	SBS	SBS/0.25% Organo- MMT	SBS/0.5% Organo- MMT	SBS/1% Organo- MMT	SBS/3% Organo- MMT	SBS/5% Organo- MMT	SBS/1% MMT
1	1263	1432	1433	1400	1532	1630	1597
2	1272	1494	1437	1477	1444	1371	1690
3	1396	1418	1536	1609	1518	1630	1658
4	1434	1497	1516	1590	1488	1613	1587
5	1552	1473	1514	1625	1520	1512	1631
6	1482	1439	1599	1474	1521	1501	1397
7	1571	1439	1461	1574	1595	1382	1467
8	1499	1404	1422	1717	1485	1458	1593
ค่าเฉลี่ย	1434	1450	1490	1558	1513	1512	1578
SD	117	35	62	102	44	105	98

รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเปอร์เซ็นต์การดึงของ SBS และวัสดุประกอบนาโน



ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข 1 ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	0.43	5	0.36	5	0.40
10	1.26	10	1.10	10	1.27
15	2.06	15	1.45	15	2.11
20	2.52	20	2.20	20	2.53
25	3.36	25	2.54	25	3.34
30	4.11	30	3.28	30	4.14
35	4.51	35	3.59	35	4.56
40	5.32	40	4.34	40	5.34
45	6.11	45	5.09	45	6.14
50	6.53	50	5.40	50	6.54
55	7.37	55	6.15	55	7.32
60	8.15	60	6.50	60	8.13
65	8.54	65	7.22	65	8.51
70	9.34	70	7.58	70	9.29
75	10.14	75	8.31	75	10.07
80	10.53	80	9.06	80	10.44
85	11.31	85	9.40	85	11.25
90	12.12	90	10.13	90	12.03
95	12.48	95	10.47	95	12.41
100	13.30	100	11.23	100	13.22
105	14.08	105	11.56	105	13.59

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ ๒ ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS/0.25% Organo-
MMT

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
5	1.06	5	0.54	5	1.05
10	2.065	10	1.47	10	1.35
15	3.03	15	2.39	15	2.11
20	4.05	20	3.39	20	3.06
25	5.05	25	4.33	25	4.50
30	6.02	30	5.27	30	5.05
35	7.01	35	6.23	35	5.32
40	8.05	40	7.23	40	6.03
45	9.07	45	8.23	45	6.24
50	10.12	50	9.15	50	7.17
55	11.16	55	10.09	55	8.00
60	12.16	60	11.05	60	9.00
65	13.17	65	12.03	65	9.52
70	14.13	70	12.56	70	10.51
75	15.19	75	13.51	75	12.46
80	16.22	80	14.47	80	13.19
85	17.35	85	15.49	85	14.12
90	18.40	90	16.44	90	14.48
95	19.53	95	17.41	95	15.35
100	20.59	100	18.40	100	16.34
105	22.07	105	19.35	105	17.29
110	23.18	110	20.29	110	18.24
115	24.21	115	21.28	115	19.25
120	25.29	120	22.23	120	21.05

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ ๓ 3 ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS/0.5% Organo-
MMT

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	1.02	5	1.40	5	1.00
10	1.59	10	2.44	10	1.56
15	2.55	15	3.54	15	2.59
20	3.58	20	4.51	20	3.59
25	4.43	25	5.51	25	4.57
30	5.53	30	6.49	30	5.46
35	6.36	35	7.44	35	6.42
40	7.33	40	8.42	40	7.29
45	8.29	45	9.39	45	8.28
50	9.16	50	10.38	50	9.17
55	10.12	55	11.28	55	10.06
60	11.09	60	12.21	60	10.58
65	12.05	65	13.17	65	12.02
70	13.09	70	14.18	70	13.04
75	14.17	75	15.11	75	14.03
80	15.07	80	16.00	80	14.54
85	16.05	85	16.59	85	15.54
90	17.07	90	17.49	90	16.57
95	18.02	95	18.45	95	17.40
100	19.01	100	19.42	100	18.22
105	19.52	105	20.33	105	19.29
110	21.00	110	21.30	110	20.28
115	22.00	115	22.28	115	21.25
120	22.55	120	23.17	120	22.27

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ ๔ ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS/1% Organo-
MMT

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	4.42	5	1.22	5	1.29
10	6.40	10	2.19	10	2.54
15	7.39	15	3.42	15	4.20
20	8.54	20	5.05	20	5.44
25	10.20	25	6.25	25	7.15
30	11.23	30	7.46	30	8.37
35	12.37	35	9.13	35	9.59
40	13.48	40	10.37	40	11.14
45	14.53	45	11.53	45	12.35
50	15.59	50	13.13	50	13.50
55	17.01	55	14.28	55	15.03
60	18.04	60	15.48	60	16.23
65	19.05	65	17.05	65	-
70	20.00	70	18.27	70	17.43
75	21.15	75	19.39	75	19.02
80	22.19	80	20.52	80	20.17
85	23.25	85	22.14	85	21.37
90	24.32	90	23.21	90	22.56
95	25.31	95	24.36	95	24.16
100	26.43	100	26.00	100	25.36
105	27.52	105	27.18	105	27.03
110	29.00	110	28.43	110	28.13
115	29.57	115	29.58	115	29.35
120	31.59	120	31.16	120	30.51

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ 5 ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS/3% Organo-
MMT

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	2.20	5	1.25	5	1.11
10	3.45	10	2.30	10	2.07
15	4.58	15	3.35	15	2.59
20	6.31	20	4.40	20	3.54
25	7.52	25	5.48	25	4.47
30	9.14	30	6.39	30	5.39
35	10.36	35	7.30	35	6.37
40	12.00	40	8.30	40	7.40
45	13.30	45	9.40	45	8.33
50	14.56	50	10.39	50	9.32
55	16.21	55	11.43	55	10.25
60	17.46	60	12.41	60	11.25
65	19.03	65	13.35	65	12.24
70	20.25	70	14.33	70	13.04
75	21.39	75	15.31	75	14.02
80	22.58	80	16.30	80	15.06
85	24.58	85	17.31	85	15.51
90	25.53	90	18.37	90	16.43
95	27.00	95	19.34	95	17.29
100	28.39	100	20.34	100	18.30
105	29.58	105	21.25	105	19.22
110	31.16	110	22.27	110	20.20
115	32.57	115	23.24	115	21.10
120	34.09	120	24.32	120	22.04

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ ๖ ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS/5% Organo-
MMT

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	1.08	5	0.45	5	1.15
10	2.29	10	2.13	10	2.36
15	3.21	15	2.51	15	4.03
20	4.32	20	3.34	20	5.19
25	5.54	25	5.02	25	6.31
30	6.55	30	6.14	30	7.31
35	8.11	35	7.19	35	8.40
40	9.24	40	8.27	40	9.42
45	10.41	45	9.28	45	10.51
50	11.55	50	10.34	50	11.56
55	13.05	55	11.45	55	13.00
60	14.07	60	12.53	60	14.02
65	15.24	65	13.57	65	15.04
70	16.30	70	15.02	70	16.06
75	17.42	75	16.10	75	17.13
80	18.46	80	17.26	80	18.11
85	19.55	85	18.20	85	19.13
90	21.03	90	19.22	90	20.15
95	22.12	95	20.28	95	21.17
100	23.16	100	21.27	100	22.09
105	24.18	105	22.29	105	23.05
110	25.22	110	23.28	110	24.10
115	26.26	115	24.30	115	25.15
120	27.31	120	25.31	120	26.21

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ ๗ ระยะทางและเวลาในการทดสอบการซึมผ่านอากาศผ่านฟิล์ม SBS/1% MMT

ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (mm)	เวลา (วินาที)
0	0.00	0	0.00	0	0.00
5	1.20	5	1.12	5	1.27
10	2.18	10	2.24	10	3.06
15	3.44	15	4.05	15	4.30
20	5.10	20	5.30	20	5.44
25	6.26	25	6.48	25	6.48
30	7.48	30	8.07	30	7.58
35	-	35	9.22	35	8.59
40	9.08	40	10.35	40	10.12
45	10.23	45	11.40	45	11.19
50	11.4	50	12.54	50	12.29
55	13.04	55	14.09	55	13.38
60	14.13	60	15.27	60	14.42
65	15.23	65	16.34	65	15.46
70	16.37	70	17.48	70	16.54
75	17.59	75	18.57	75	18.01
80	19.21	80	20.11	80	19.02
85	20.46	85	21.21	85	20.06
90	21.59	90	22.33	90	21.13
95	23.17	95	23.45	95	22.18
100	24.36	100	24.54	100	23.23
105	25.49	105	26.04	105	24.28
110	28.27	110	27.16	110	25.34
115	29.39	115	28.30	115	26.39
120	30.50	120	29.15	120	27.45

นำระยะทางและเวลาไป plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความชัน และ R^2

ตารางที่ 8 ค่าความชันของกราฟระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของไอโซโพรพานอลและเวลาของ SBS วัสดุประกอบนาโน

ตัวอย่าง	ค่าความชันการซึมผ่านอากาศ			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
SBS	8.82	7.59	7.59	8.00
SBS/0.25% Organo-MMT	6.27	4.84	5.46	5.52
SBS/0.5% Organo-MMT	4.90	5.23	5.40	5.18
SBS/1% Organo-MMT	4.27	3.84	3.99	4.03
SBS/3% Organo-MMT	5.45	4.99	3.47	4.64
SBS/5% Organo-MMT	4.48	4.26	4.56	4.43
SBS/1% MMT	4.00	4.04	4.34	4.13

หมายเหตุ ค่า $R^2 = 0.99$

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข 1 ความหนาแน่นของ Organo-MMT ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งหาจากพิกโนมิเตอร์ โดยใช้ Xylene

ครั้งที่	ความหนาแน่น
1	1.79
2	1.85
3	1.75
4	1.71
5	1.88
ค่าเฉลี่ย	1.80
SD	0.07

ตารางที่ ข 2 ความหนาแน่นของ MMT ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งหาจากพิกโนมิเตอร์

ครั้งที่	ความหนาแน่น
1	1.81
2	1.97
3	1.734
4	1.88
5	1.75
6	1.63
ค่าเฉลี่ย	1.79
SD	0.12

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ	นางสาวระพี เจริญสูงเนิน
ภูมิลำเนา	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	59/206 หมู่ 7 หมู่บ้านฉัตรหลวง ถ.ราษฎร์อุทิศ แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี กทม. 10510
การศึกษา	- ระดับมัธยม โรงเรียนสตรีศรีอยุธยาบุรีรัมย์ - ระดับปริญญาตรี (วท.บ.เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - ระดับปริญญาโท (วท.ม.เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง