

ผลของคลอ์กาโนเคลย์ทมตอพลมเบ้าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชย่อกยผลลย

EFFECTS OF ORGANOCLAY ON DEGRADABLE
THERMOPLASTIC STARCH BLOWN FILM



ว้ชรี ธรรมรลภล

WATCHAREE THAMRAPA

ว้ชเรียนพนสนเบ้นสว่นหน้่งขงกการศกษลตามหล้กฐตรปร้ญญลว้ชยลศลศรลมหลบ้ฉล

สลขลว้ชยลศลศรล

ศลขลว้ชยลศลศรล

ศลขลว้ชยลศลศรล

พ.ศ. ๒๕๕๒

KMITL-2009-SC-M-014-016

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของออร์แกนไคลด์ที่มีต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชย่อยสลาย

EFFECTS OF ORGANOCLAY ON DEGRADABLE
THERMOPLASTIC STARCH BLOWN FILM



T105263

วัชรีย์ ธรรมรภา

WATCHAREE THAMRAPA

ฉพ.
๑๑๘๗๗
๒๕๕๒

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105263
วัน,เดือน,ปี..... 17 พ.ย. 2552

b.....121bbaaab
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-014-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EFFECTS OF ORGANOCCLAY ON DEGRADABLE
THERMOPLASTIC STARCH BLOWN FILM**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2009

KMITL-2009-SC-M-014-016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาarch ขยาย
Effects of Organoclay on Degradable Thermoplastic Starch Blown Film
นักศึกษา นางสาววีรฉวี ธรรมรภา
รหัสประจำตัว 50067902
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา	ฤตวิรุพห์	
รศ.ดร.สมศักดิ์	วรมงคลชัย	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวรากร	
รศ.ดร.ศิริพร	ดำรงศักดิ์กุล	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 14 พฤษภาคม 2552 เวลา 08.30 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่... ๑๕ ...เดือน... พฤษภาคม ... พ.ศ. ๒๕๕๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ย่อยสลาย
นักศึกษา	นางสาว วัชรีย์ ธรรมรามา
รหัสประจำตัว	50067902
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมศักดิ์ วรรณกุลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายที่ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบความเร็วสูง เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอกู่ โดยมีอัตราเร็วสกรู 30 รอบต่อนาที และอุณหภูมิบริเวณหัวคาย 175 °C แล้วนำมาเป่าขึ้นรูป โดยมีอัตราเร็วสกรู 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณหัวคาย 180 °C และมีอัตราเร็วในการดึง 2 เมตรต่อนาที โดยทำการศึกษาหาปริมาณของพลาสติกไซเซอรซ์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายได้ พบว่า การใช้พลาสติกไซเซอรซ์ปริมาณ 65 % โดยน้ำหนักของแป้งมีความเหมาะสมที่สุด จากนั้นศึกษาหาชนิดและปริมาณของออร์กาโนเคลย์ที่ทำให้สมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ดีขึ้น ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ให้ค่ามากที่สุด และจากสมบัติทางความร้อน พบว่า ออร์กาโนเคลย์ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น โดยออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE มีเสถียรภาพทางความร้อนดีที่สุด และเมื่อนำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาผสมกัน ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE โดยมีอัตราส่วนของออร์กาโนเคลย์ระหว่าง Mac – gel® SAC GRADE : Cloisite® 15A ที่แตกต่างกัน พบว่า สมบัติต่างๆ ที่ได้มีความใกล้เคียงกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE จึงสามารถนำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาทำการผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่ได้ให้ดีขึ้น และสามารถลดราคาค้นทุนในการผลิตลงได้นอกจากนี้ ออร์กาโนเคลย์ยังมีผลทำให้ฟิล์มเป่าสามารถต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้มากขึ้น โดยมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง และไม่ขัดขวางการย่อยสลายของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

Thesis	Effects of Organoclay on Degradable Thermoplastic Starch Blown Film
Student	Miss Watcharee Thamrapa
Student ID.	50067902
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Somsak Woramongkolchai

ABSTRACT

This research is aimed to study effects of organoclay on degradation blown film thermoplastic starch which is blended with high speed mixer and twin-screw extrusion at screw speed of 30 rpm and temperature of die zone at 175 °C. It is formed with blown film process at screw speed of 100 rpm, temperature of die zone at 180 °C and draw down ratio at 2 m/min. The amount of plasticiser for blending of cassava starch and low density polyethylene (LDPE) was investigated to produce degradation thermoplastic starch film. The amount of plasticizer at 65 % by weight of cassava starch is suitable for blending. The types and amount of organoclay are further studied to investigate the properties of blown film thermoplastic starch. Maximum tensile strength and modulus at 7 % LDPE of organoclay Cloisite® 15A indicated the greatest value. Thermal properties were also revealed. The higher the amount of organoclay, the lower the onset decomposition temperature was. At 7 % LDPE of organoclay Cloisite® 15A shown the optimum thermal stability. When the two types of organoclay at 7 % LDPE with different ratios of Mac-gel® SAC GRADE : Cloisite® 15A were mixed, the properties of mixed organoclay/thermoplastic starch blown film were similar to organoclay/thermoplastic starch blown film. It was believed that the mixed organoclay could improve the film properties and reduce the capital cost. In addition, organoclay/thermoplastic starch blown film could be lower oxygen permeability than thermoplastic blown film and it was faster degradation film.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ต้องขอขอบคุณหลายฝ่ายที่ได้ให้การสนับสนุน ตลอดจนให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่กรุณาอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ในเรื่องการทำวิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณบริษัท มัลติแบกซ์ จำกัด ที่ให้ทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมทั้งอนุเคราะห์ เม็ดพลาสติก LDPE สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel[®] SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A ตลอดจนเครื่องทดสอบอเนกประสงค์สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ชลดดา ฤตวิรุฬห์ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ และ รศ.ดร.ศิริพร คำรงค์ศักดิ์กุล ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ คุณสุคใจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ อนุเคราะห์การทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทุกคนที่มีส่วนในการช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ ครอบครัวธรรมราชา และเพื่อนทุกคนที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ตลอดมา

วัชรีย์ ธรรมราชา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูปภาพ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลาย.....	5
2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้.....	6
2.1.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง.....	6
2.1.1.2 พลาสติกย่อยสลายทางกล.....	6
2.1.1.3 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	6
2.1.1.4 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส.....	7
2.1.1.5 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ.....	7
2.2 พอลิเอทิลีน.....	8
2.3 แป้ง.....	10
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง.....	11
2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	11
2.3.3 แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch).....	12
2.3.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	12
2.3.3.2 การย่อยสลายของแป้ง.....	13
2.4 เคลย์ (Clay).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของเคลย์.....	15
2.4.2 คินเบน โทไนท์.....	16
2.4.3 แร่คินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite ; MMT).....	17
2.4.3.1 การตัดแปร โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	18
2.4.3.2 ข้อดีของแร่คินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์.....	20
2.4.3.3 ประโยชน์ของแร่มอนต์มอริลโลไนต์.....	20
2.5 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer nanocomposites).....	20
2.6 สารช่วยผสม (Compatibilizer).....	23
2.7 กระบวนการอัดรีด (Extrusion process).....	25
2.8 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film extrusion process).....	28
2.8.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	29
2.8.2 หลักการของฟิล์มเป่า.....	30
2.8.3 สมบัติของฟิล์มเป่า.....	31
2.9 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์.....	32
2.9.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR).....	32
2.9.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	34
2.9.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD.....	35
2.9.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	36
2.9.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test).....	36
2.9.4.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test).....	37
2.9.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties).....	38
2.9.5.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	38
2.9.5.2 Thermogravimetric Analysis (TGA).....	38
2.9.6 สมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต...39	
2.9.6.1 คำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน...39	
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49
3.3.1 การศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมเป่ามัน สำปะหลังกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้น รูป(Blown film) ให้เป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch film) ได้.....	49
3.3.2 การศึกษาหาปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมา ผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) แล้วสามารถ นำมาเป่าขึ้นรูป (Blown film) ได้.....	51
3.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีผลต่อฟิล์ม เป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	53
3.3.4 ศึกษาสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay/thermoplastic starch nanocomposites film).....	53
3.3.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม.....	54
3.3.4.2 การทดสอบค่าการร่อนไหล (Melt Flow Index).....	54
3.3.4.3 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR).....	54
3.3.4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม (Morphological Analysis).....	54
3.3.4.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค XRD.....	54
3.3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	54
3.3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties).....	55
3.3.4.8 การศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	56
3.3.4.9 ศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับ ออร์กาโนเคลย์.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	57
4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมแป้งมัน สำปะหลังกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้.....	58
4.1.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	58
4.1.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล.....	58
4.1.3 ผลการศึกษามบัติน้ำแข็งกล.....	59
4.1.4 ผลการศึกษามบัติน้ำแข็งเหลว.....	61
4.2 ผลการศึกษาหาปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมา ผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชข่อยสลาย.....	62
4.2.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับ ออร์กาโนเคลย์.....	62
4.2.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล.....	63
4.2.3 ผลการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง.....	64
4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	67
4.2.5 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค XRD.....	72
4.2.6 ผลการศึกษามบัติน้ำแข็งกล.....	75
4.2.7 ผลการศึกษามบัติน้ำแข็งเหลว.....	78
4.3 ผลการศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีต่อ ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	80
4.3.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับ ออร์กาโนเคลย์ผสม (Mac-gel [®] SAC GRADE + Cloisite [®] 15A) 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE.....	81
4.3.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล.....	81
4.3.3 ผลการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง.....	82
4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	83
4.3.5 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค XRD.....	85
4.3.6 ผลการศึกษามบัติน้ำแข็งกล.....	87
4.3.7 ผลการศึกษามบัติน้ำแข็งเหลว.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.8 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของออร์กาโนเคลย์.....	91
4.4 ผลการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก้ำชออกซิเจนและการย่อยสลาย ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์.....	92
4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก้ำชออกซิเจน.....	92
4.4.2 ผลการศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มเป่า.....	94
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	97
5.1 การศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมเป็งมันสำปะหลัง กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้.....	97
5.2 การศึกษาหาปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมา ผสมกับเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ย่อยสลาย.....	97
5.3 การศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีต่อ ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์.....	98
5.4 การศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก้ำชออกซิเจนและการย่อยสลาย ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์.....	98
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	99
เอกสารอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก ก รูปร่างของเม็ดเป็งและออร์กาโนเคลย์.....	105
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing).....	107
ภาคผนวก ค การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	108
ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	110
ภาคผนวก จ การคำนวณหาคร่าวๆของความเป็งผลึก.....	124
ภาคผนวก ฉ การทดสอบสมบัติการด้านการซึมผ่านของก้ำชออกซิเจน.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณความต้องการของตลาดพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้.....	1
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง โดยทั่วไป.....	12
2.2 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง.....	13
2.3 การจัดจำแนกลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	26
3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD 1905F.....	46
3.2 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลัง Food grade.....	47
3.3 สมบัติของ Fusabond MB 226D.....	47
3.4 สมบัติของกลีเซอรอล.....	47
3.5 สมบัติทางกายภาพของ Mac – gel [®] SAC GRADE (Nano aluminosilicate).....	48
3.6 สมบัติของ Cloisite [®] 15A (Natural montmorillonite modified with a quaternary ammonium salt).....	48
3.7 สูตรผสมของเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย (Thermoplastic starch) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.8 สภาวะที่ใช้ในการผสม Thermoplastic starch ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	50
3.9 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป Thermoplastic starch film ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม.....	51
3.10 สูตรผสมของออร์กาโนเคลย์กับเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย (Organoclay/Thermoplastic starch) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	52
3.11 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป Organoclay/Thermoplastic starch film ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม.....	52
3.12 สูตรผสมของออร์กาโนเคลย์ผสม (Mac – gel [®] SAC GRADE + Cloisite [®] 15A) กับเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย (Organoclay/Thermoplastic starch) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
4.1 คำอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ.....	57
4.2 ลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ช.....	58
4.3 ค่าดัชนีการไหลของ LDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตา์ช (TPS 1 – TPS 5).....	59
4.4 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ได้จากเทคนิค DSC.....	61
4.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ได้จากเทคนิค TGA.....	62
4.6 ลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมออร์กาโนเคลย์.....	63
4.7 ค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel [®] SAC GRADE (1) และ Cloisite [®] 15A (2).....	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D – spacing) ของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดและออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์.....	75
4.9 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel [®] SAC GRADE (1) และ Cloisite [®] 15A (2) ที่ได้จากเทคนิค DSC.....	79
4.10 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel [®] SAC GRADE (1) และ Cloisite [®] 15A (2) ที่ได้จากเทคนิค TGA.....	80
4.11 ลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์สองชนิด (Mac-gel [®] SAC GRADE + Cloisite [®] 15A).....	81
4.12 ค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE.....	82
4.13 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D – spacing) ของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดและออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE.....	86
4.14 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ที่ได้จากเทคนิค DSC.....	89
4.15 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ที่ได้จากเทคนิค TGA.....	90
4.16 การวิเคราะห์ต้นทุนของออร์กาโนเคลย์.....	91
4.17 ลักษณะของฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรต่างๆ ที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายเป็นระยะเวลา 4 เดือน.....	95

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE).....	9
2.2 โครงสร้างของอะไมโลส.....	11
2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน.....	12
2.4 โครงสร้างผลึกของแร่คินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์.....	17
2.5 ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโมเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์	
(a) Lateral monolayer (b) Lateral bilayer	
(c) Paraffin type monolayer (d) Paraffin type bilayer.....	19
2.6 ชั้นซิลิเกต (แผ่น) และสายโซ่พอลิเมอร์ (เส้น) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์ กับแร่คินเหนียวหรือนาโนเคลย์ (บนซ้าย) แบบแทรกสอดมีความเป็นระเบียบเทียบกับรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ล่างซ้าย) และ (บนขวา) แบบแตกกระเจิง นาโนคอมโพสิตของพอลิไวนิลคลอไรด์ และนาโนเคลย์.....	22
2.7 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง	
(a) วัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์กระจายแบบแยกวัฏภาค (Phase separated microcomposite)	
(b) นาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposite)	
(c) นาโนคอมโพสิตชนิดแตกกระจาย (Exfoliated nanocomposite).....	22
2.8 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE – g – MA).....	25
2.9 ส่วนประกอบของสกรูแบบเกลียวหอนกู่.....	26
2.10 ลักษณะของเครื่องจักริกแบบเกลียวหอนกู่ (Twin screw extruder).....	27
2.11 ลักษณะของเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine).....	29
2.12 Bragg's Law.....	35
2.13 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens)	
(a) ASTM Die A (Nicked Crescent) (b) ASTM Die B (Nicked Tab End)	
(c) ASTM Die C (Right Angle) (d) Russian (e), (f) Trouser.....	37
2.14 โครงสร้างของ tortuous path ใน polymer/layered silicate nanocomposites.....	41
4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล.....	60
4.2 ค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล.....	60
4.3 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล.....	60
4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS 4).....	64

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel [®] SAC GRADE และ Cloisite [®] 15A.....	65
4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel [®] SAC GRADE.....	66
4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite [®] 15A...	66
4.8 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์เปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE.....	67
4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ และเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรต่างๆ (a) TPS (b) TPS/C3/1 (c) TPS/C3/2 (d) TPS/C5/1 (e) TPS/C5/2 (f) TPS/C7/1 (g) TPS/C7/2 (h) TPS/C10/1 (i) TPS/C10/2.....	68
4.10 ภาพการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร (a) TPS/C3/1 (b) TPS/C3/2 (c) TPS/C5/1 (d) TPS/C5/2 (e) TPS/C7/1 (f) TPS/C7/2 (g)TPS/C10/1 (h) TPS/C10/2.....	71
4.11 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel [®] SAC GRADE และ Cloisite [®] 15A.....	73
4.12 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel [®] SAC GRADE และฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C3/1, TPS/C5/1, TPS/C7/1 และ TPS/C10/1.....	74
4.13 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite [®] 15A และฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C3/2, TPS/C5/2, TPS/C7/2 และ TPS/C10/2.....	74
4.14 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel [®] SAC GRADE และ Cloisite [®] 15A.....	76
4.15 ค่ามอดุลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel [®] SAC GRADE และ Cloisite [®] 15A.....	77
4.16 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac–gel [®] SAC GRADE และ Cloisite [®] 15A.....	77
4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตา์ร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE.....	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดสูตร (a) TPS/C7/3 (b) TPS/C7/4 (c) TPS/C7/5	84
4.19 ภาพการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดสูตร (a) TPS/C7/3 (b) TPS/C7/4 (c) TPS/C7/5.....	85
4.20 XRD patterns ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE.....	86
4.21 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE.....	88
4.22 ค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE.....	88
4.23 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE.....	89
4.24 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ในฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1, TPS/C7/2 และ TPS/C7/4.....	92
4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ในฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1, TPS/C7/2 และ TPS/C7/4.....	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่อำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ ทั้งในเรื่องรูปแบบของผลิตภัณฑ์ การตอบสนองด้านการใช้งาน ความคงทนถาวร น้ำหนักเบา ตลอดจนมีราคาที่เหมาะสม เกือบทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้มาจากกระบวนการปิโตรเคมี พลาสติกจัดได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมีทั้งผลิตภัณฑ์ที่มีระยะเวลาในการใช้งานนาน เช่น ตู้ โต๊ะ เก้าอี้ และชั้นวางของ เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง เช่น ขวดน้ำพลาสติก ถุงพลาสติก และฟิล์มที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ประเภทหลังนี้ทำให้เกิดปัญหาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากขยะพลาสติกเหล่านี้มีอยู่เป็นจำนวนมาก และยากต่อการกำจัด เพราะ ไม่สามารถย่อยสลายได้ในระยะเวลาอันสั้น หรือในสภาวะแวดล้อมปกติได้ นอกจากนี้ยังเกิดการตกค้างอยู่ในธรรมชาติ หรือถ้าหากจะกำจัดด้วยการเผาไหม้ก็ก่อให้เกิดปัญหาปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ ทำให้โลกร้อนขึ้น ปัญหาดังกล่าวจัดเป็นประเด็นปัญหาที่สำคัญและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบันแล้วว่าต้องหาวิธีการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ในปัจจุบันนี้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้จึงเป็นที่ต้องการของตลาดโลกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร หรือบรรจุผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้แล้วทิ้ง ได้แก่ ถุงพลาสติก และแผ่นฟิล์มที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณความต้องการของตลาดพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (หน่วย : ล้านปอนด์) [1]

Application	2533	2538	2543
ถุงขยะ	250	1,500	2,200
การเกษตร	15	60	200
ภาชนะสำหรับบรรจุอาหาร	-	200	400
บรรจุภัณฑ์	-	400	600
บรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร	-	150	300
Total	265	2,310	3,700

(Excerpt from Chemical Week, 27 October 1993)

พลาสติกย่อยสลายได้ (Biodegradable Plastic) สามารถผลิตได้จากเม็ดพลาสติกชีวภาพที่มีพืช เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด และข้าว เป็นองค์ประกอบหลัก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด ได้แก่ ประเทศฝรั่งเศสได้ออกกฎหมายห้ามจำหน่ายและแจกถุงพลาสติกทุกประเภท ยกเว้น ถุงพลาสติกที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกชีวภาพ และภายในวันที่ 1 มกราคม 2553 ประเทศจีนห้ามใช้ถุงพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้บนรถไฟ ขณะเดียวกันธุรกิจขนาดใหญ่หลายรายเริ่มหันมาใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติมากขึ้น อาทิ ห้างสรรพสินค้าอออนมอลล์ของประเทศญี่ปุ่นซึ่งเป็นห้างที่มีขนาดใหญ่เป็นอันดับ 10 ของโลก ใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ในแผนกอาหารของห้างร้าน Mc Donald's ในประเทศออสเตรเลีย ใช้ช้อนส้อมพลาสติกที่ผลิตจากเม็ดพลาสติกชีวภาพซึ่งผลิตจากข้าวโพด เป็นต้น [2]

ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะพัฒนาปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติก (LDPE) ให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น และเนื่องจากความพร้อมทางด้านวัตถุดิบของไทย ซึ่งเป็นผู้ผลิตมันสำปะหลังรายใหญ่อันดับ 3 ของโลก (รองจากไนจีเรีย และบราซิล) ด้วยปริมาณผลผลิตราว 25 ล้านตันต่อปี จึงเอื้อต่อการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพ (Biopolymer) ซึ่งผลิตจากพืชที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง เพื่อนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ นอกจากนี้ แป้งมันสำปะหลังยังมีราคาต่ำกว่าแป้งชนิดอื่นๆ โดยในปัจจุบันแป้งข้าวโพดดิบมีราคาประมาณตันละ 400 ดอลลาร์สหรัฐ ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดิบมีราคาประมาณตันละ 300 ดอลลาร์สหรัฐ [2] ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและผลิตฟิล์มเป่าที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบ โดยเป็นส่วนหนึ่งในโครงสร้างของฟิล์มพลาสติก เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายแป้งได้ เมื่อโครงสร้างของฟิล์มในส่วนที่เป็นแป้งถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายไป ฟิล์มพลาสติกจะไม่สามารถคงสภาพเป็นฟิล์มต่อไปได้ คือ จะมีขนาด หรือชิ้นส่วนต่างๆ ที่เล็กลง ซึ่งส่งผลให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพและย่อยสลายได้ดีและเร็วขึ้น แต่แผ่นฟิล์มเป่าที่มีแป้งเป็นส่วนประกอบจะส่งผลทำให้สมบัติบางประการของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกลดลงได้ เช่น ความแข็งแรง และความเหนียวของฟิล์ม ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการใช้งานรูป และการนำไปใช้งานบางส่วนได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้นอกจากจะทำการศึกษาและผลิตฟิล์มที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบแล้ว ยังได้มีการนำ ความสามารถและประโยชน์ของวัสดุประเภทนาโนคอมโพสิตมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มนี้ให้ดีขึ้นด้วย เนื่องจากวัสดุประเภทนาโนคอมโพสิตสามารถปรับปรุงสมบัติบางประการให้มีสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุเสริมแรงทั่วไป เช่น สมบัติเชิงกล โดยมีการนำออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็ก มีพื้นที่ผิวที่ใหญ่ และมีสมบัติที่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายใน โมเลกุลต่างๆ ได้ดี มาผสมกับเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย (Thermoplastic starch) เพื่อเพิ่มสมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย ให้มีประสิทธิภาพด้านสมบัติเชิงกล เช่น การเสริมแรง เพิ่มมอดูลัส มีความเหนียวมากขึ้น มีสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซ (Barrier properties) ที่ดีขึ้น และมีเสถียรภาพทางความร้อน ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay/thermoplastic starch nanocomposites blown film) โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มเป่า เช่น ชนิดของออร์กาโนเคลย์ ปริมาณของสารช่วยผสม ปริมาณของแป้งมันสำปะหลังและออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถผลิตฟิล์มเป่าที่มีประสิทธิภาพตรงตามความต้องการของตลาดโลกในปัจจุบันมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย (LDPE ผสม แป้งมันสำปะหลัง) ให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น
2. เพื่อศึกษาหาปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสม สำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังและ LDPE แล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูป (Blown films) ได้
3. เพื่อศึกษาหาชนิดและปริมาณออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่เหมาะสม สำหรับนำมาผสมกับฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูป (Blown films) ได้
4. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่ใช้ในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) และการเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่เหมาะสม
5. เพื่อศึกษาบทบาทของออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านการซึมผ่านของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch film)
6. เพื่อศึกษาสมบัติในการย่อยสลายของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay/thermoplastic starch nanocomposites film)

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาหาปริมาณของกลีเซอรอลที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังและ LDPE แล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูป (Blown films) ให้เป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch film) ได้
2. ศึกษาหาชนิดของออร์กาโนเคลย์ Mac - Gel[®] SAC GRADE หรือ Cloisite[®] 15A ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
3. ศึกษาหาปริมาณของออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แล้วให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

4. ศึกษาหาสภาวะที่ใช้ในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับออร์กาโนเคลย์(Organoclay) และการเป่าขึ้นรูปฟิล์มที่เหมาะสม
5. ศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่มีผลต่อฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (Thermoplastic starch film)
6. ศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (LDPE ผสม แป้งมันสำปะหลัง) เปรียบเทียบกับการย่อยสลายของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay/thermoplastic starch nanocomposites film)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตฟิล์มที่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้
2. สามารถผลิตฟิล์มย่อยสลายที่มีประสิทธิภาพด้านการเสริมแรง เพิ่มมอดูลัส มีความเหนียว (toughness) และมีเสถียรภาพทางความร้อน
3. สามารถผลิตฟิล์มที่สามารถด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้
4. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ เพื่อให้เกิดประโยชน์ตรงตามความต้องการของตลาดโลกในปัจจุบันมากขึ้น

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลาย [1]

พลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติเด่นในด้านความทนทาน น้ำหนักเบา และมีราคาถูก ดังนั้น ในปัจจุบันจะพบเห็นอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้มากมายที่ทำมาจากพลาสติก รวมถึงอุปกรณ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้บรรจุอาหารด้วย ซึ่งได้แก่ งาน ซ้อน ส้อม มีด ถ้วยน้ำ ถูพลาสติก และ แผ่นฟิล์มที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ความทนทานของพลาสติกกลับเป็นข้อเสียในการกำจัด กล่าวคือพลาสติกย่อยสลายได้ยากในกระบวนการทางธรรมชาติ พลาสติกที่ใช้แล้วอาจก่อให้เกิดปัญหาอย่างต่อเนื่องสู่สิ่งแวดล้อมถ้าขาดการจัดการที่เหมาะสม เช่น เกิดการตกค้างของพลาสติกในสิ่งแวดล้อมตามพื้นดินและในแหล่งน้ำซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น เกิดการอุดตันในท่อระบายน้ำ การใช้พื้นที่ในการฝังกลบมาก นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งมลภาวะทางสายตา โดยเฉพาะในเขตเมืองใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีปริมาณมูลฝอยพลาสติกคิดเป็นร้อยละ 142 ของมูลฝอยทั้งหมด [1]

ปัญหาของพลาสติกที่เกิดขึ้นหลังจากใช้งานแล้วมีดังต่อไปนี้

1. ปัญหาการตกค้างของมูลฝอยจากพลาสติกในสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา
2. ปัญหาการไม่ย่อยสลายของมูลฝอยพลาสติก เนื่องจากพลาสติกเป็นสารที่สลายตัวได้ยากไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางเคมี (เช่น การละลายน้ำ อิทธิพลของความร้อน แสงหรือสารเคมี) กระบวนการทางกายภาพ (เช่น การสึกกร่อนโดยลม) หรือกระบวนการทางชีวภาพ (เช่น การย่อยสลายของแบคทีเรียหรือเชื้อรา) หากไม่มีการจัดเก็บขยะพลาสติกอย่างเหมาะสมจะก่อให้เกิดปัญหาตกค้างของมูลฝอยจากพลาสติกในสิ่งแวดล้อม
3. ปัญหาต่อระบบการกำจัดพลาสติก โดยทั่วไปในการกำจัดมูลฝอยมีวิธีการกำจัดที่ถูกต้องตามหลักวิธีการอยู่ 3 วิธี คือ การหมักทำปุ๋ย การเผาในเตาเผา และการฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล พลาสติกเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากไม่สามารถกำจัดโดยวิธีการหมักทำปุ๋ยได้จึงถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบหรือการเผา ต่อมาวิธีการฝังกลบเริ่มมีปัญหานี้เนื่องจากความต้องการใช้ที่ดินเป็นจำนวนมากในการฝังกลบมูลฝอยที่มีพลาสติกปนอยู่ ทั้งนี้เพราะพลาสติกเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยาก เมื่อฝังกลบลงใต้ดินแล้วจะทำให้สารที่กำจัดหมดอายุการใช้งานเร็วขึ้นต้องหาที่กำจัดแห่งใหม่อยู่บ่อยครั้ง นอกจากนี้การย่อยสลายพลาสติกใน

หลุมฝังกลบจะเป็นไปอย่างช้าๆ ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างของสารเคมีหรือโลหะหนักที่เดิมเข้าไปในเนื้อพลาสติกสู่น้ำใต้ดินได้

จากปัญหาของพลาสติกดังกล่าวข้างต้น ก่อให้เกิดมลภาวะต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากขึ้นตามลำดับ หน่วยงานต่างๆ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยผลิตจากพืชและน้ำมันพืชซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถปลูกทดแทนได้และสามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติก พลาสติกย่อยสลายที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ โดยเฉพาะแป้ง (Starch) ได้ทวีความสำคัญมากขึ้น ซึ่งมีทั้งที่ผลิตจากแป้งบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี ถั่วเหลือง มันสำปะหลัง และข้าวโพด แต่พลาสติกย่อยสลายที่ทำจากแป้งเพียงอย่างเดียวอาจจะมีสมบัติเชิงกลไม่เพียงพอ วัตถุประสงค์ และ อายุใช้งานสั้นเนื่องจากเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผิวพลาสติกได้ ดังนั้น การผลิตพลาสติกย่อยสลาย (Biodegradable Plastic) โดยการผสมพอลิเมอร์กับแป้งจะสามารถย่อยสลายได้และเสริมความแข็งแรงให้กับแป้งโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี และ เมื่อใช้แล้วสามารถทิ้งในสิ่งแวดล้อมแล้วย่อยสลายเป็นปุ๋ยและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งกลับมาซึ่งพืชเพื่อสังเคราะห์แสงและเก็บเป็นแป้งหมุนเวียนเข้าสู่วัฏจักรต่อไป

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [3]

2.1.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองปุ๋ยหมัก หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการทาดัวยหมึกที่หนาปกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2.1.1.2 พลาสติกย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradable plastic)

การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) เป็นการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

2.1.1.3 พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradable plastic)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความ

ร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลเร็วยิ่งขึ้น

2.1.1.4. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradable plastic)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรอกไซด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะอัลคาไลน์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.1.1.5. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

พลาสติกประเภทนี้เกิดจากการนำวัสดุธรรมชาติ เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อให้โครงสร้างทางเคมีเรียงตัวกันคล้ายกับโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก การย่อยสลายของพอลิเมอร์เกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

2.2 พอลิเอทิลีน [1,4]

พอลิเอทิลีน (PE) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นสารขุ่นสีขาวขุ่น (Milky White) โปร่งแสง ลักษณะคล้ายขี้ผึ้งไม่เกาะติดน้ำ มีความลื่นมันในตัว เมื่อสัมผัสจึงรู้สึกลื่น หยุนตัวได้ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ติดแม่พิมพ์ มีความเหนียว ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งพอลิเอทิลีนได้จากเอทิลีนมอนอเมอร์ ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันกัน สามารถทำให้เป็นสีต่างๆ ได้ตามความต้องการ มีน้ำหนักเบามาก มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น และอัตราการคายก๊าซเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้อัตราการเสื่อมสลายของผิวเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ผิวจะแตกกร่อนได้ง่ายขึ้น

พอลิเอทิลีนมีปริมาณการใช้สูงสุดในประเทศขณะนี้ นิยมใช้ทำเครื่องใช้เครื่องเรือนทั่วไป ของเล่นเด็ก ดอกไม้พลาสติก ภาชนะบรรจุต่างๆ เช่น ถุงพลาสติก เป็นต้น พอลิเอทิลีนมีหลายชนิด เช่น Low Density Polyethylene (LDPE), High Density Polyethylene (HDPE) และที่ได้พัฒนาใหม่ให้มีสมบัติยิ่งขึ้น นิยมใช้มากคือ Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) กับ Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMW PE)

ฟิล์มพอลิเอทิลีน เป็นฟิล์มที่ยอมให้ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านได้ง่าย ป้องกันการเกิดฝ้า ใอน้ำ เนื่องจากแผ่นฟิล์มชนิดนี้ยอมให้ความชื้นที่เกิดขึ้นแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อฟิล์มแทนที่จะเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนแผ่นฟิล์ม โดยทั่วไปความหนาของแผ่นฟิล์มจะอยู่ระหว่าง 25 - 65 ไมครอน การลดความหนาของแผ่นฟิล์มจะเลือกใช้ฟิล์มที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แทน เพราะ สมบัติของ LDPE สามารถยืดตัวได้ จึงทำให้สามารถขยายตัวตามความหนาและความยาวได้

สำหรับเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ใช้ในประเทศไทยมีอยู่ด้วยกัน 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene ; HDPE)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene ; LDPE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene ; LLDPE)

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่นำมาใช้ในงานวิจัย ดังนี้
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่นำมาใช้ในการค้า
เริ่มผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอังกฤษ โดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI)
โดยมีกระบวนการผลิตและลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE ดังนี้ คือ

- เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระ โดยมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก ซึ่งโซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก Intramolecular backbiting
- ความดันที่ใช้ในการผลิตสูงมาก ประมาณ 1,000 – 3,000 บรรยากาศ (15,000 – 45,000 psi)
- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือ 200 – 400°C
- มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง และมีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก
- โมเลกุลของ LDPE มีสายโซ่หลักเป็นคาร์บอนที่มีหมู่ข้างเคียงของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับสายโซ่หลักอย่างสลับๆ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [5]

สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

- มีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
- มีความเป็นผลึกต่ำ ประมาณ 50 – 70%
- มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt Flow Index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10 นาที
- มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
- มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
- ฟิล์มที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High Gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low Haze)
- เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good Dielectric property)

LDPE มีการใช้อย่างกว้างขวาง เพราะวราคาราไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อ

สารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้อย่างดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ

การใช้งานของ LDPE แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. Homopolymer ได้แก่ เม็ดพลาสติก LDPE ทั่วไป แบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

1.1 งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก เช่น ถุงน้ำแข็ง ถุงบรรจุอาหารแช่เย็น ใช้ทำวัสดุกันกระแทก ได้แก่ Air Bubble Sheet นอกจากนี้ แผ่นฟิล์มยังใช้งานในการรัดสินค้าให้อยู่ในสภาพทรงตัว เช่น ฟิล์มรัดกล่อง ฟิล์มรัดสินค้าบนไม้พาเลทเพื่อการขนส่ง ไปจนกระทั่งแผ่นฟิล์มขนาดใหญ่หลายๆ ใช้ในด้านการเกษตรกรรม เช่น แผ่นฟิล์มรองพื้นปูบ่อน้ำเพื่อการเก็บกักน้ำ เรือนเพาะชำ (Green House)

1.2 งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง

1.3 งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นูนเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถัง ขาม อ่าง

1.4 งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์มบนผิวแผ่น อลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ซึ่งต้องการสมบัติการป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ

1.5 งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลวดเอนกประสงค์ เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยาน ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

2. Copolymer มีสมบัติพิเศษกว่า LDPE ชนิดธรรมดา คือ มีความอ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ผลิตหนังเทียมแทน PVC ชนิดอ่อน พื้นรองเท้า และ รองเท้ากีฬา เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป (LD 1905F) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูป คือ มีความลื่น ไม่ติดสกรู (Slip and Antiblocking) มีความสามารถในการผลิตสูง มีความใส และสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารได้

2.3 แป้ง [6, 7]

แป้งจัดเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยกลูโคสเป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวกับน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในน้ำเย็น สามารถพบแป้งได้ในเซลล์พืชทุกชนิด เช่น ในเมล็ด และรากพืช เป็นต้น โดยมีกระบวนการในการผลิตแป้งหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

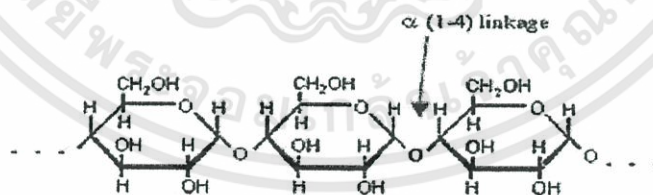
วัตถุดิบที่ใช้ ลักษณะของแป้งจะเป็นเม็ดเล็กๆ มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจากประโยชน์ของแป้งเกิดจากสมบัติความชื้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การขี้ดัด และการเกิดฟิล์มคุณภาพสามารถควบคุมได้ง่าย และยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นองค์ประกอบที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยหน่วยพื้นฐานเป็นแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ทางด้านตอนปลายโมเลกุลของแป้งจะมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์ เรียกว่า กลุ่มปลายด้านที่มีสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end group) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส (amylose) ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย ที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง

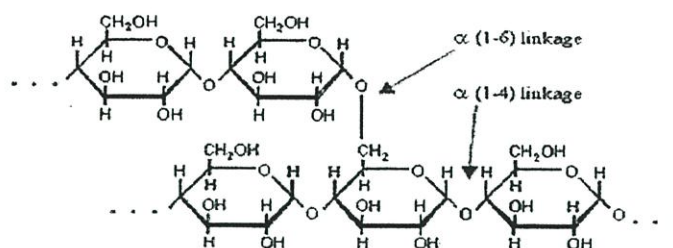
2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

- อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ตรง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200 – 2,000 หน่วย เชื่อมกันด้วยพันธะ α - 1,4 glucosidic linkage โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 15 – 25% มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [8]

- อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่ง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส เชื่อมกันด้วยพันธะ α - 1,4 glucosidic linkage และ α - 1,6 glucosidic linkage แต่ละโซ่กิ่งในโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 20 – 30 หน่วย โดยโครงสร้างที่เป็นอะไมโลเพกตินจะมีประมาณ 75 – 80% ของแป้ง มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [8]

2.3.3 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilissima* และในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า *Tapioca starch*, *Cassava starch* และ *Manioc starch* โดยมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [6]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	12.59
แป้ง	87.00
ไขมัน	0.10
โปรตีน	0.10
เถ้า	0.20
ฟอสฟอรัส	0.01

2.3.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ประกอบด้วย เม็ดแป้งตั้งแต่ 2 – 8 เม็ดมารวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 4 – 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกจะมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอกัน เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โพลาริซ จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำ เรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้ เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้ เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง [9]

สมบัติ	แป้งข้าวโพด	แป้งมันสำปะหลัง
ขนาด (µm)	3 - 26	4 - 35
เฉลี่ย	15	20
ไขมัน (%w/w)	0.60	0.10
โปรตีน (%w/w)	0.35	0.10
อะไมโลส (%)	28	17
Degree of polymerisation		
อะไมโลส	800	3000
อะไมโลเพกติน $\times 10^6$	2	2
Pasting temp (°C)	75 - 80	65 - 70
Peak viscosity	600	1000
Swelling power ที่ 95 °C	24	71
Paste viscosity	ปานกลาง	สูง
Paste and film clarity	ทึบแสง	ใส
Retrogradation rate	สูง	ต่ำ

2.3.3.2 การย่อยสลายของแป้ง

แป้งสามารถย่อยสลายได้หลายทาง ได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา และการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.3.3.2.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by Fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี ได้แก่ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดครอยด้า

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด การเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเป็นสาเหตุหลัก หรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ เช่น ผลิตภัณฑ์ของ mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น alfatoin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยด่างดำที่เกิดขึ้นบนสิ่งทอ

3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

การเกิดรอยด่างดำเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ ตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบแสง หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด่างดำเช่นนี้มักเกิดในสภาวะที่ไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถผลิตเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

2.3.3.2.2 การย่อยสลายตามลักษณะของการทำงานของเอนไซม์

1. เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo – enzyme)

1.) เมต้า – อะไมเลส (β – amylase ; 1,4 – α – D – glucan maltohydrolase)

พบเอนไซม์นี้ในพืชชั้นสูง เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี และพบได้ในถั่วเหลืองและมันฝรั่งหวาน จัดเป็น extracellular enzyme ในเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Bacillus cereus* เป็นต้น เมต้าอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะจากด้านนอกเข้ามาด้านใน โดยเริ่มจากปลายของอะไมโลส หรืออะไมโลเพกตินจากปลายด้านที่ไม่มีสมบัติรีดิวซ์ เอนไซม์จะตัดพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิกของโมเลกุลกลูโคสเป็นคู่ๆ ไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลมอลโตส การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนเข้าร่วมทำงาน

2.) เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase; 1,4- α -D-glucan glucohydrolase)

สามารถผลิตได้จากเชื้อราในสกุล *Aspergillus*, *Penicillium* และ *Rhizopus* ยีสต์และแบคทีเรีย กลูโคอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดน้ำตาลกลูโคสที่จับกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิกและพันธะกิ่งแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก โดยการตัดพันธะกิ่งจะเกิดขึ้นช้ากว่าการตัดพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก ถ้าการย่อยเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ กลูโคส มีความเสถียรที่ pH 3.5 – 5.0 และที่อุณหภูมิ $\pm 55^{\circ}\text{C}$

2. เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo – enzyme)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase ; endo-1,4- α -D-glucan glucohydrolase) จัดเป็น extracellular enzyme คือ เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแล้วถูกขับออกมานอกเซลล์ พบได้ในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์หลายชนิด เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายใน โมเลกุลแป้ง โดยจะย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ที่ตำแหน่งกิ่งก้านของแป้งได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง คือ มอลโตส กลูโคส และลิมิตเดกซ์ทริน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนเข้าร่วมทำงาน มีความเสถียรที่ pH 5.5 – 9.0 และที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 150°C ในทางอุตสาหกรรมจะได้เอนไซม์จากเชื้อรา และแบคทีเรีย เมื่อใช้แอลฟาอะไมเลสในการย่อยแป้ง จะทำให้ความหนืดและความสามารถในการย้อมติดสี ไอโอดีนลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ reducing power เพิ่มขึ้นด้วย

3. เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (Debranching enzyme)

1.) ไอโซอะไมเลส (Isoamylase ; glucogen-6-glucohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยจุดที่เป็นกิ่งก้านของไกลโคเจน และอะไมโลเพกทิน ได้ดี ไอโซอะไมเลสไม่ต้องการโคแฟกเตอร์ในการทำงาน มีความเสถียรในช่วง pH 3.0 – 4.0 และที่อุณหภูมิ 45 – 55°C เอนไซม์ชนิดนี้สามารถแยกได้จากพืช สัตว์ และจุลินทรีย์

2.) พูลูลานเนส (Pullulanase ; Pullulan 6-glucohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ของพูลูลาน และอะไมโลเพกทิน แต่การทำกิจกรรมไม่สมบูรณ์เท่ากับการย่อยโดยไอโซอะไมเลส และทำกิจกรรมร่วมกับไกลโคเจนได้ จะสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2 – 3 หน่วย แต่ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 4.5 – 5.5 และที่อุณหภูมิ 50°C เอนไซม์ชนิดนี้พบได้ในพืช สัตว์ และแบคทีเรีย

ในงานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ผลิตมากที่สุดในประเทศไทย และเป็นแป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น กาวแป้งเปียกใสและมีความเหนียวสูง

2.4 เกลย์ (Clay) [10, 11, 12]

2.4.1 ข้อมูลทั่วไปของเกลย์

เกลย์ (Clay) ในภาษาไทยแปลว่า ดินขาว ดินเหนียว หรือดินโคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic matters) สารอนินทรีย์ (Inorganic matters) และความชื้น ในส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์นี้มีแร่ธาตุหรือแร่ดินเหนียวที่สำคัญหลากหลายชนิด ที่สำคัญที่สุด คือ กลุ่มแร่ซิลิเกต (silicate) โดยจะมีองค์ประกอบเป็นอลูมิเนียมซิลิเกตที่ซับซ้อน และมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก ส่วนใหญ่เล็กกว่า 2 ไมโครเมตร แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบ ขึ้นอยู่กับ ปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ และ ชนิดโครงสร้างผลึกหรืออัญรูป เป็นต้น แร่ดินเหนียวที่มี

ความสำคัญ คือ กลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน บางครั้งเรียกว่า Layer silicate clay เนื่องจากชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่น สามารถขยายและหดตัวได้ ทำให้สารอื่นๆ เช่น น้ำและสารอินทรีย์อื่นๆ สามารถแทรกเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ได้

แร่ดินเหนียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่ ชนิดที่ไม่มีผลึกหรืออสัณฐาน และชนิดที่เป็นผลึก แร่ดินเหนียวที่เป็นผลึกที่สำคัญ และมีความเป็นขั้วหรือประจุ (polarity) เรียกว่า กลุ่มสมกไทต์เคลย์ (Smectite clay) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่มีการจัดเรียงตัวแบบ 2:1 คือ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ต่อแผ่นอลูมินา 1 แผ่น ในหนึ่งหน่วย โดยแร่ดินเหนียวประเภทนี้จะมีการยึดและหดตัวได้ดีมาก มีความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออนบวกได้ดี และแร่ดินเหนียวที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้ก็คือ แร่ดินเหนียว มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite ; MMT) หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เบนโทไนท์หรือเบนโทน (Bentonite, Bentone) ซึ่งอยู่ในตระกูลไฟโรซิลิเกต (Phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส แร่ซิลิเกตในกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์นี้จะมีสูตรโครงสร้างทางทฤษฎีเหมือนกัน คือ $\text{Na}_0.2\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ แต่จะต่างกันที่ปริมาณการถูกไล่ของอะตอม Si หรือ Al ในโครงสร้างของผลึกด้วยธาตุอื่นๆ ซึ่งเรียกการแทนที่แบบนี้ว่า Isomorphous substitution นอกจากนี้ยังมีแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ ในกลุ่มที่มีศักยภาพพัฒนาเป็นนาโนเคลย์ ได้แก่ Saponite, Vermiculite

2.4.2 ดินเบนโทไนท์

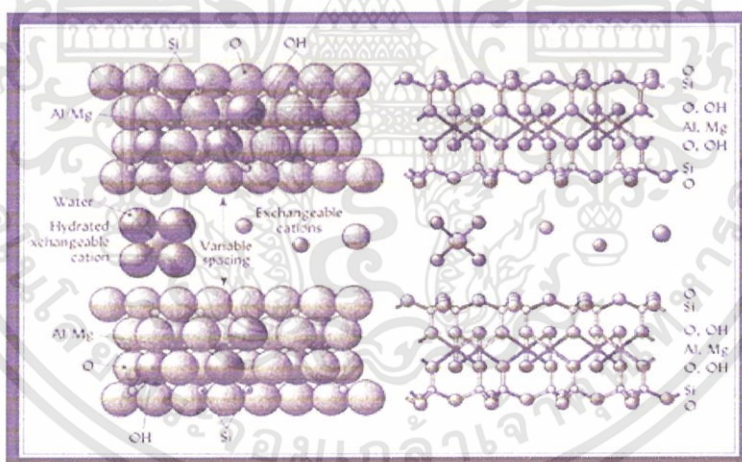
ดินเบนโทไนท์เป็นดินชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้งานหลายด้าน เช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็น ในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสาร ดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก และรองลงมา ได้แก่ ซิลิกอนออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์จะทำให้ดินเบนโทไนท์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยน ไอออนได้ จากสมบัตินี้ ทำให้สามารถนำเบนโทไนท์ไปสังเคราะห์เป็นออร์กาโนเคลย์ที่ใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิเมอร์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม สมบัติของดินในเรื่องของการดูดซับ และความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออน ยังคงแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์

โซเดียมเบนโทไนท์เมื่อดูดซับน้ำแล้วจะสามารถพองตัวได้ถึง 15 – 20 เท่าจากปริมาตรเดิม จึงมีสมบัติเป็นสารหล่อลื่นและกันการแพร่ผ่าน นิยมใช้เป็นหัวเจาะ โคลนและใช้อุดหรือยาแนวของเขื่อน ทำนบ สำหรับแคลเซียม และแมกนีเซียมเบนโทไนท์ มีความสามารถในการพองตัวน้อยกว่า โซเดียมเบนโทไนท์ จึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสีหรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปดัดแปร โดยทำปฏิกิริยากับกรดได้เป็นแอคติเวตเตดเคลย์

(Activated Clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับโซคาไฟโดยเปลี่ยนจากแคลเซียมเบนโทไนท์เป็นโซเดียมเบนโทไนท์

2.4.3 แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite ; MMT)

แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite ; MMT) เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน มีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึกที่เรียกว่า 2:1 phyllosilicate ซึ่งประกอบด้วยชั้นออกซิไดออกเตดราล (octahedral) ที่ถูกประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระดราล (tetrahedral) แต่ละชั้นจะมีความบางมากโดยความหนาของชั้นผลึก 2:1 มีค่าประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ในขณะที่ความยาวด้านข้างของแผ่นผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตร ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio ; L/D) สูง ซึ่งเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็ก เรียกว่า แกลเลอรี (Gallery) พื้นผิวของชั้นออกซิไดออกเตดราลมีประจุลัพท์เป็นลบ จึงมักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ คือ ไม่มีประจุ ดังรูปที่ 2.3 จึงทำให้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่พื้นผิวด้วยไอออนที่มีขนาดใหญ่ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 0.98 เป็น 1.2 – 2.5 นาโนเมตร



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ [13]

เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นขั้ว โดยธรรมชาติแล้วจึงชอบน้ำ (Hydrophillic) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก (โดยทั่วไปพบว่าความหนาของชั้นผลึกสามารถขยายได้ถึง 1.2 nm. เมื่อมีความชื้น) จึงเป็นที่รู้จักกันดีและนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ และเครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดสารพิษต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นในถาดปฏิกลของสัตว์เลี้ยง รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย แต่มีผลทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับพอลิเมอร์

ได้ยาก คือ เมื่อนำมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้ในการเตรียมเป็นวัสดุประกอบกับพอลิเมอร์ชนิดที่ไม่มีขั้วจะมีปัญหาในเรื่องของความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และมอนต์มอริลโลไนต์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ (Modified montmorilloite) ให้เป็นสารที่มีความเป็นขั้วลดน้อยลง หรือไม่มีขั้วก่อนนำมาใช้งาน และทำให้โครงสร้างของเคลย์เกิดการแยกชั้นขึ้น เพื่อให้มอนต์มอริลโลไนต์สามารถยึดติดกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยเสริมแรงให้กับพลาสติก ซึ่งจะทำให้สมบัติบางประการของพลาสติกดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความทนทานต่อการโค้งงอ (Flexural strength) และความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น

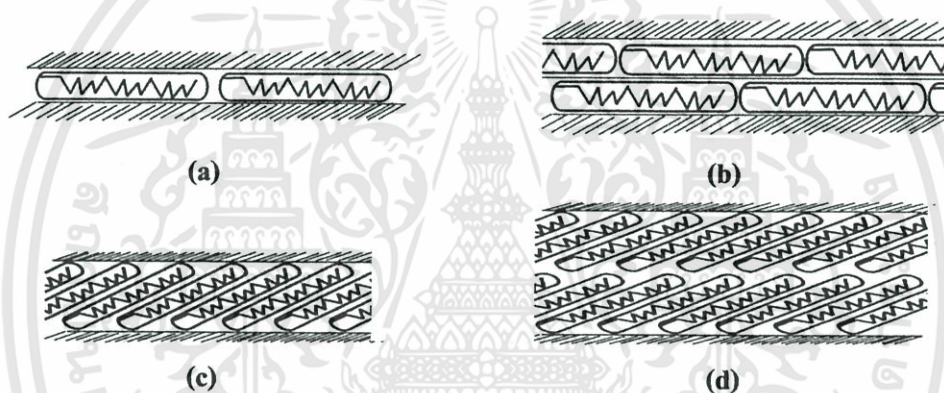
2.4.3.1 การดัดแปรโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

การดัดแปรโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ก่อนการนำมาใช้งาน วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ การทำปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) โดยใช้สารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (Organic cation) เช่น การใช้เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ (Quaternary ammonium salt) หรือเกลือฟอสโฟเนียม (Phosphonium salt) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กับโซเดียมไอออน (Na^+) หรือพวกไอออนของอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline or Alkaline earth ions) ในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยจะเข้าแทรกแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร โครงสร้างด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD) พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นซิติลเกิดภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์มีระยะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของชั้นซิติลเกิด ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าไอออนของโซเดียม หรือ ไอออนของอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ธ โดยการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างชั้นของซิติลเกิดนั้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความยาวของหมู่อัลคิลในเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์

ภายหลังการดัดแปร โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แล้ว ทำให้สมบัติความชอบน้ำของมอนต์มอริลโลไนต์ลดลง จึงสามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น พอลิเมอร์ที่ไม่มีชอบน้ำ จากการแทนที่ไอออนของโซเดียม หรือ ไอออนของอัลคาไลน์ หรือ อัลคาไลน์เอิร์ธ ด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ในระหว่างชั้นซิติลเกิด จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า แร่ดินเหนียวชนิดดัดแปร (Modified clay) ออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์ (OrganoMontmorillonite) ออร์กาโนฟิลลิกเคลย์ (Organophillic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ สามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์ เนื่องจากความมีขั้วลดลง โดยวิธีการหนึ่งในการพัฒนาออร์กาโนเคลย์ ไปใช้งาน โดยอาศัยสมบัติความชอบสารอินทรีย์คือการเตรียมเป็นคอมโพสิตกับสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สำคัญคือ พอลิเมอร์ (polymers) ซึ่งจะสามารถแทรกตัวเข้าไปในพื้นที่

ระหว่างชั้นผลึกซิลิเกตได้ง่าย แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกซิลิเกตขยายตัวกว้างออก ทำให้ชั้นของซิลิเกตซึ่งเกาะกันอย่างหลวมๆ มีระยะห่างระหว่างชั้นเพิ่มขึ้นหรือแยกห่างจากกันมากขึ้นไปอีก จนถึงชั้นแตกกระเจิงออกจากกันโดยอิสระ (exfoliation) ถ้าพอลิเมอร์แทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตได้มาก และมีขนาดความยาวของสายโซ่มากพอ ชั้นของซิลิเกตแต่ละชั้นอาจแยกออกจากกันได้ ทำให้มีขนาดอนุภาคเสริมแรงอยู่ในระดับนาโนเมตร เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคนาโนเมตรจากธรรมชาติ วิธีการนี้ได้พัฒนาสำเร็จสู่การค้าเป็นครั้งแรก โดย Toyota Central R&D laboratory โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposite)

การแทรกตัวของเกล็ดควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไปในชั้นของมอนตม์อริลโลไนต์นั้น สามารถแบ่งตามลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเกล็ดควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ได้ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของสายโซ่อัลคิลแอมโมเนียมที่แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นเคลย์ [14]

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

1. Lateral monolayer : เกิดจากการแทรกตัวของเกล็ดควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไปในชั้นของซิลิเกตเพียงหนึ่งชั้น ไม่มีการซ้อนกันของสายโซ่ และสายโซ่จัดเรียงตัวในลักษณะแนวอนที่ขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.5a
2. Lateral bilayer : เกิดจากการแทรกตัวของเกล็ดควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นซิลิเกต โดยเรียงซ้อนกัน 2 ชั้น ในแนวอนขนานไปตามชั้นซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.5b
3. Paraffin type monolayer : เกิดจากการแทรกตัวของสายโซ่ของเกล็ดควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกต 1 ชั้นในแนวขวางกับแนวการ

เรียงตัวของชั้นซิติลเกิด ทำให้ระยะห่างของชั้นมีค่าเท่ากับความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ แสดงดังรูปที่ 2.5c

4. Paraffin type bilayer : เกิดจากการแทรกตัวของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์เข้าไประหว่างชั้นซิติลเกิดในแนวขวางกับแนวการเรียงตัวของชั้นซิติลเกิด โดยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ จะเรียงต่อกันเป็น 2 ชั้น ทำให้ระยะห่างของชั้นซิติลเกิดมีค่าเท่ากับความยาวของสายโซ่ของเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมของสารอินทรีย์ 2 สายโซ่รวมกัน แสดงดังรูปที่ 2.5d

2.4.3.2 ข้อดีของแรมดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

1. สามารถใช้แรมดินมอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วนเพียง 2 – 10% โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้
2. รักษาความโปร่งแสงของพลาสติก
3. ผสมร่วมกับพอลิเมอร์ได้ง่าย ทั้งในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization) หรือเตรียมคอมพาวด์ (Compounding)
4. ปกป้องภัยต่อการใช้งาน
5. สามารถผสมร่วมกับสารเติมแต่งอื่นๆ ได้
6. ราคาไม่แพง

2.4.3.3 ประโยชน์ของแรมมอนต์มอริลโลไนต์

การเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างออร์กาโนเคลย์กับพอลิเมอร์ได้รับความนิยมมากขึ้นหลังจากที่กลุ่มนักวิจัยของโตโยต้า ได้ค้นพบการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์กับไนลอน 6 แล้วนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ และเนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติพิเศษที่สามารถดัดแปรจนมีขนาดอนุภาคเล็กจนสามารถเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้มอนต์มอริลโลไนต์ยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ดังนี้ คือ สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติด้านการต้านการซึมผ่าน ที่สำคัญยังช่วยลดการติดไฟ รักษาเสถียรภาพทางรูปร่าง และยังคงรักษาความโปร่งใสให้กับพอลิเมอร์ ในการเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่างเคลย์และพอลิเมอร์ พบว่า เมื่อทำการเติมปริมาณเคลย์ 2 – 5% จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีเท่ากับการเตรียมคอมโพสิตแบบทั่วไปที่เติมสารเสริมแรงปริมาณถึง 30 – 40%

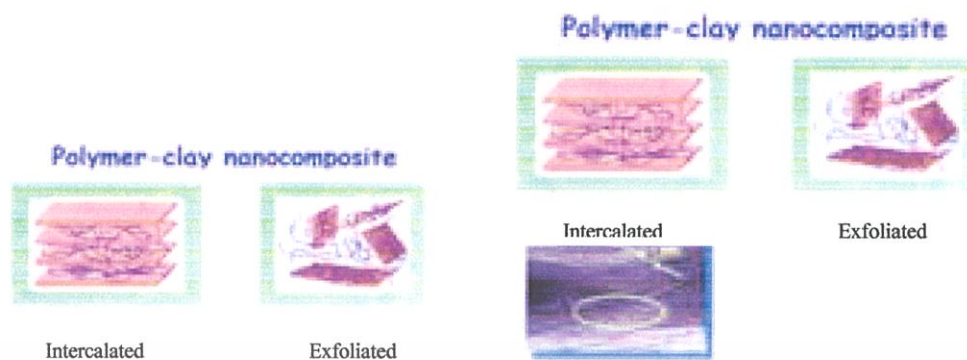
การใช้งานนาโนคอมโพสิตสามารถนำมาใช้ได้หลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ การก่อสร้าง ยานอวกาศ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร และอุปกรณ์ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์

2.5 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer Nanocomposites) [10, 11]

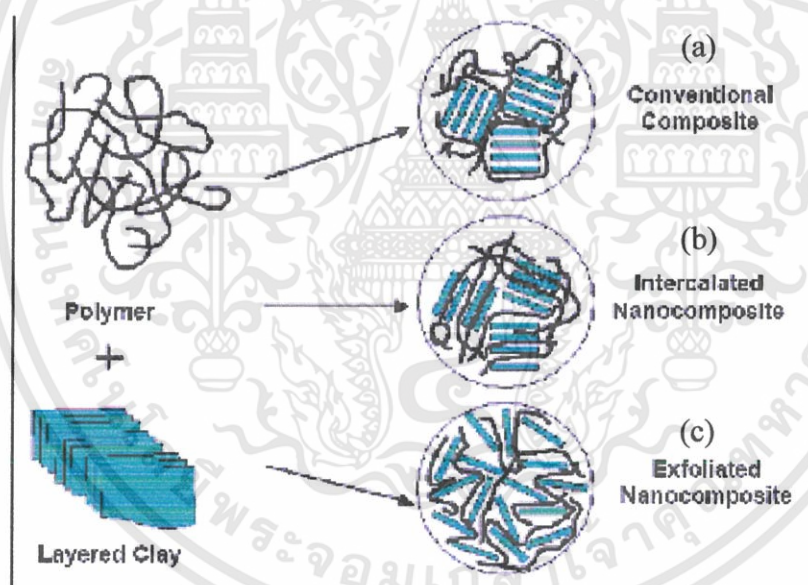
นาโนคอมโพสิต (Nanocomposite) คือ วัสดุประกอบที่เกิดจากวัสดุสองชนิดขึ้นไป โดยมี วัสดุเป็นองค์ประกอบอย่างน้อยหนึ่งชนิดที่เป็นของแข็งขนาดเล็กมากในช่วงนาโนเมตร (10^9 m) ปกติแล้วนาโนคอมโพสิตมีส่วนเสริมแรงขนาดเล็กในช่วง 1 – 20 nm อาจอยู่ในสถานะที่เป็นได้ ทั้งอสัณฐาน (Amorphous) กึ่งผลึก (Semi-crystalline) หรือ เป็นผลึก (Crystalline) ก็ได้ ซึ่ง ส่วนประกอบหลักสองส่วน ได้แก่

1. ส่วนเสริมแรง (Reinforcement) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีค่าความแข็งแรงและมอดูลัสที่สูง โดยส่วนเสริมแรงจะเป็น ส่วนที่รับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรง ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใย คาร์บอน เขม่าดำ เคลย์ เป็นต้น
2. เมทริกซ์ (Matrix) คือ วัสดุที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกัน โดยจะล้อมรอบ และ ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ และความชื้น โดยเมทริกซ์จัดเป็นองค์ประกอบที่มีวิฤภาคที่ต่อเนื่อง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง ในการถ่ายเทแรงไปสู่ส่วนเสริมแรง ตัวอย่างของเมทริกซ์ ได้แก่ พอลิเมอร์ (เรียกคอมโพสิตนี้ว่า Polymer composites)

เนื่องจากพอลิเมอร์ เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่มาก สามารถผสมกับออร์กาโนเคลย์อย่าง เข้ากันแล้วทำให้ชั้นซิลิเกตขยายออกจากกันได้ จึงเรียกว่า นาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์-เคลย์ (Polymer-clay nanocomposites , PNC) หรือนิยมเรียกให้ชัดขึ้นเป็นนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์-ชั้นซิลิเกต (Polymer-layered silicate nanocomposites) เพราะมีอนุภาคนาโนเมตรผสมทั่วไปในเนื้อ พอลิเมอร์ นาโนคอมโพสิตประเภทนี้ยังคงมีโครงสร้างของชั้นซิลิเกตที่เรียงซ้อนอย่างหลวมๆ แต่มี ระเบียบ จึงเรียกว่า นาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) เมื่อผ่านเทคนิค การเตรียมที่ดีจะสามารถทำให้ชั้นซิลิเกตแตกกระจายออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยวๆ กระจายอย่างอิสระ ในเนื้อพอลิเมอร์ได้ จึงเรียกว่าเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตชนิดแตกกระจาเจิง (exfoliated polymer nanocomposites) ดังแสดงในรูป 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 ชั้นซิลิเกต (แผ่น) และสายโซ่พอลิเมอร์ (เส้น) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ในนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์ กับแร่ดินเหนียวหรือนาโนเคลย์ (บนซ้าย) แบบแทรกสอดมีความเป็นระเบียบ เทียบกับรูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ล่างซ้าย) และ (บนขวา) แบบแตกกระจ่างนาโนคอมโพสิตของพอลิไวนิลคลอไรด์ และนาโนเคลย์ [15]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง [34]

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

ลักษณะโครงสร้างของเคลย์แบบคัดแปรนั้น มีลักษณะเป็นสารตัวเติมขนาดเล็กที่มีสมบัติเป็นแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic nanofillers) คือ จะมีค่าความแข็งแรงดึงและความเหนียวสูงกว่าสารตัวเติมโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตจากนาโนเคลย์

1. เป็นวัสดุประกอบที่มีค่า Aspect ratio มากกว่า 100
2. มีความแข็งแรง (Stiffness and Impact strength) และมอดุลัส (Modulus) สูงขึ้น เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต
3. เพิ่มความเสถียรทางด้านรูปร่าง (Dimensional stability) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น
4. มีความสามารถในการยึดติดพื้นผิวได้ดี
5. ทำให้มีการปรับปรุงความมันเงา (Surface gloss) ดีขึ้น
6. เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของอีลาสโตเมอร์ (Elastomer)
7. ปรับปรุงสมบัติความหน่วงต่อการติดไฟ (Flame retardant) ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้จะให้ถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับรวดเร็ว
8. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่น และมีสัดส่วนระหว่างความยาวและความหนา (aspect ratio) สูงทั้งสองมิติ จึงขวางกั้นเส้นทางการเคลื่อนที่ของก๊าซและของเหลวได้
9. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรือนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกทำให้ยึดออกมากกว่าจะหดตัว ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น
10. ลดการหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์
11. มีความใส เพราะมีอนุภาคขนาดเล็ก (นาโนเมตร) ซึ่งเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงยูวี และ Visible light จึงไม่ทำให้แสงแตกกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งแสง

ในงานวิจัยนี้มีการใช้สารออร์กาโนเคลย์ 2 ชนิด เปรียบเทียบกัน ได้แก่ Mac – gel[®] SAC GRADE ซึ่งเป็นนาโนอลูมิเนียมซิลิเกต (Nano aluminosilicate) ที่ผลิตในประเทศไทย เปรียบเทียบกับ Cloisite[®] 15A ซึ่งเป็นมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Natural montmorillonite modified with a quaternary ammonium salt.) ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อหาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมและคุ้มค่ากับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.6 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [16]

การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาคนาโนเคลย์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากสมบัติทางเคมีของแร่มอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นขี้ผึ้ง จึงมักจะไม่สามารถผสมให้เข้ากับพลาสติกทั่วไปที่มีความเป็นขี้ผึ้งต่ำมากหรือไม่มีความเป็นขี้ผึ้งเลย เช่น สิ่งที่เกิดขึ้นใน

ระหว่างการผสมพอลิเอทิลีน (พอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีน) กับแร่คินมอนต์มอริลโลไนต์ คือ อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์จะเกาะกันเป็นกลุ่มและไม่สามารถกระจายตัวในพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของอนุภาคคินมอนต์มอริลโลไนต์ หรือใช้สารช่วยผสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดและการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์กับพลาสติกให้ดีขึ้นได้

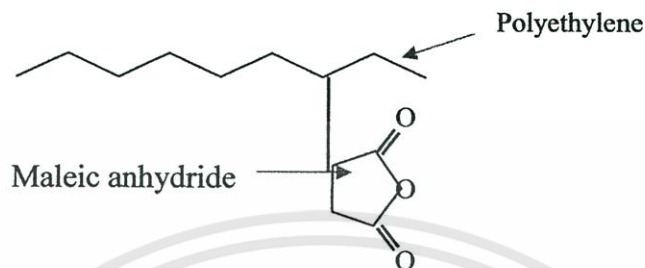
การนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้ จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการผสมให้เข้ากันได้ (Compatibility) นอกจากนี้ยังช่วยลดแรงตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัสดุ ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะที่ความเสถียรมากขึ้นในขณะที่ผ่านกระบวนการแปรรูป และทำให้สมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างสองวัสดุดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น คือ การเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Non-reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบไม่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตรโครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (entanglement) กับวัสดุทั้งสองของพอลิเมอร์ ดังนั้น สารช่วยผสมที่ใช้จะต้องเป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีหลากหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อกิ่ง (graft copolymer) พอลิเมอร์ร่วมแบบโคบล็อก (diblock copolymer) พอลิเมอร์ร่วมแบบไตรบล็อก (triblock copolymer) หรือ พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymer)
2. Reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงไปในพอลิเมอร์แบบเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีในขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดการต่อกิ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

สารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือกราฟต์ ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัสดุของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้มีการแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างพื้นผิวดำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไปจะทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปในพอลิเมอร์ผสมก็จะต่ำเช่นเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้จะใช้ฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี (Fusabond MB 226D) เป็นสารช่วยผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายกับออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี เป็นสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เกิดจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้วต่อกิ่งอยู่กับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted Polyethylene : PE-g-MA) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 จึงทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical properties) ดีขึ้น โดยเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีน ทำให้พอลิเอทิลีนมีความ

เป็นขั้วมากขึ้น และยังเป็น การเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างพอลิเอทิลีนกับสารอื่นที่มีขั้วได้ โดยที่มีแอนไฮโดรคาร์บอเนตเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับสารที่มีขั้ว ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองเพิ่มมากขึ้น



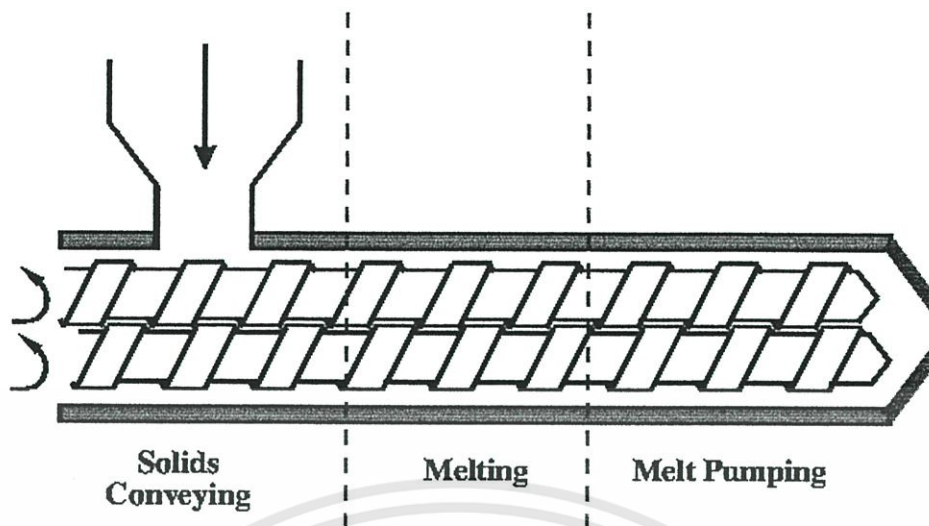
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรคาร์บอเนต (PE-g-MA) [16]

2.7 กระบวนการอัดรีด (Extrusion process) [17, 18]

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการผสมที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในกระบวนการมีราคาถูกกว่ากระบวนการอื่นๆ อีกทั้งยังสามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างตามต้องการได้ และสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง การอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์ในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ที่หลากหลาย คือ เม็ดพลาสติกที่ผ่านเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีด และกระบอกใส่สกรู จะถูกอัด หลอม ผสม และวัดด้วยความดันสวนทางที่เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปทางท่อและออกไปทางหัวตาย โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรูและกระบอกใส่สกรู ทำให้เกิดพลังงานเฉือน (Shearing energy) ช่วยในการผสมและการหลอม ในการเลือกชนิดของสกรูที่นำมาใช้งานนั้น จะต้องคำนึงถึง ความหนาแน่น โดยมวลของพอลิเมอร์ (Bulk density) พฤติกรรมการหลอมเหลว อากาศที่แทรกตัวอยู่และอุณหภูมิ หลอมเหลวที่ต้องการเป็นเกณฑ์

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin-Screw Extruder)

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่จัดเป็นเครื่องอัดรีดสกรูแบบต่อเนื่อง (Continuous Screw Extruder) จะมีสกรูอาร์คิมิดีส (Archimedean Screw) อยู่ 2 สกรู โดยจำแนกลักษณะของเครื่องอัดรีด ตามลักษณะและทิศทางการเคลื่อนที่ของสกรูได้ดังตารางที่ 2.3 โดยเครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองไม่ตรงกันจะมีกลไกของการเคลื่อนที่เป็นแบบลาก (Drag flow conveyance mechanism) ในขณะที่เครื่องอัดรีดแบบมีเฟืองตรงกันจะมีการเคลื่อนที่แบบกระจายทางบวก (Positive conveyance) โดยทั่วไปแล้วเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของสกรูแบบเกลียวหนอนคู่ [19]

ตารางที่ 2.3 การจัดจำแนกลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ [17]

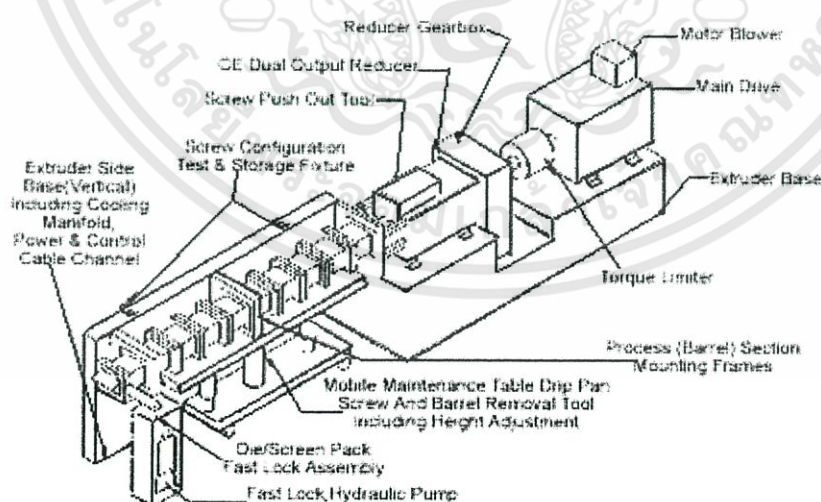
เครื่องอัดรีดแบบมี เฟืองไม่ตรงกัน	เครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน	ความยาวสกรูเท่ากัน
		ความยาวสกรูไม่เท่ากัน
	เครื่องอัดรีดแบบหมุนไปทางเดียวกัน	ไม่ค่อยนิยม
	เครื่องอัดรีดแบบแกนร่วมกัน	เคลื่อนนำของเหลวไปข้างใน
		เคลื่อนกลับของเหลวไปข้างใน
	เคลื่อนกลับของแข็งไปข้างใน	
	การเปลี่ยนสภาพพลาสติกภายใน และเคลื่อนกลับ	
เครื่องอัดรีดแบบมี เฟืองตรงกัน	เครื่องอัดรีดแบบหมุนไปทางเดียวกัน	เครื่องอัดรีดแบบความเร็วต่ำ (เครื่องอัดรีดแบบโปรไฟล์)
		เครื่องอัดรีดแบบความเร็วสูง
	เครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน	เครื่องอัดรีดแบบกรวย (เครื่องอัดรีดแบบโปรไฟล์)
	เครื่องอัดรีดแบบทรงกระบอก (เครื่องอัดรีดแบบโปรไฟล์)	

ประโยชน์ของการนำเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มาใช้

1. มีความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถควบคุมความเนียนของพอลิเมอร์ได้ โดยการใช้การโปรแกรมสกรู (Screw programming) ซึ่งอาศัยความตรงกันของความเนียนและความว่องไวต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์และสกรู
2. เวลาในการกระจายตัวต่ำ จึงสามารถควบคุมได้ง่าย เหมาะสำหรับการทำสารประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์
3. การพาว์สคูปเป็นไปในทางบวก คือ มีลักษณะคล้ายกับการนำเกียร์บีมาช่วยในการพาว์สคูปให้เคลื่อนที่ไปตามสกรู
4. จัดเป็นการทำงานที่อาศัยลักษณะของการระบายอากาศ เนื่องจาก ก๊าซสามารถถูกกำจัดออกไปได้โดยง่าย หรือใช้ทางระบายอากาศเป็นที่เติมสารตัวเติมต่างๆ ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนวัสดุทุติยภูมิ

นอกจากนี้ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ยังมีข้อดีกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวหลายประการ ดังต่อไปนี้

- สามารถให้ผลผลิตที่สูงกว่าที่อัตราเร็วของการหมุนสกรูที่เท่ากัน
- สามารถปรับปรุงลักษณะการส่งพลาสติกหลอมเข้าสู่หัวตาย ได้หลายแบบ
- สามารถลดการเกิดความร้อนเนื่องจากการไหลหนืดได้
- สามารถใช้กับพอลิเมอร์ที่แปรรูปยากและมีความยุ่งยากในการป้อนเข้าเครื่อง
- ใช้พลังงานในการเดินเครื่องน้อยกว่า



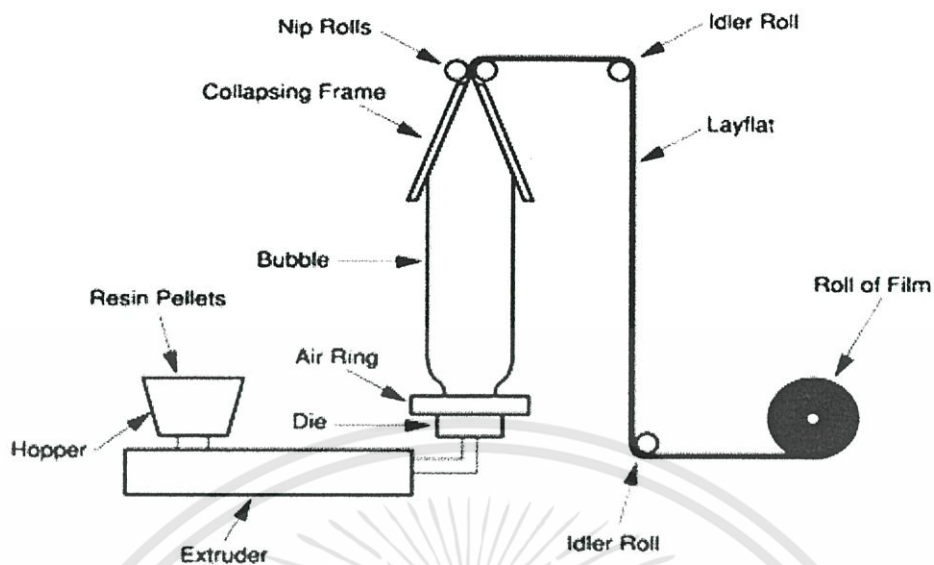
รูปที่ 2.10 ลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film extrusion process) [16, 17]

การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีดอื่นๆ วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พลาสติกในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ จะเป็นพลาสติกที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์ม ซึ่ง LDPE จะเป็นที่นิยมมากที่สุด โดยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม มีหลักการทั่วไป คือ เม็ดพลาสติกจะถูกอัดรีดผ่านเกลียวขับ (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวคาย (Die head) ซึ่งคายที่ใช้จะมีลักษณะเป็นวงแหวนสองชั้น (Annular die) โดยที่พอลิเมอร์หลอมเหลวนี้นี้จะถูกบังคับให้อยู่ในรูปของหลอดกลมที่อยู่ภายในคายและไหลออกผ่านคายเปิดรูปวงกลม ในลักษณะที่เป็นท่อ ซึ่งท่อที่ยังอยู่ในสถานะหลอมเหลวจะสามารถเกิดการขยายตัวและพองออกได้ หัวคายหรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขับจะทำหน้าที่ในการควบคุมพลาสติกให้เป่าได้ตามขนาดที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบครอสเฮด (Cross head) ก็อยู่ในแนวตั้งลงล่าง ในการอัดรีดฟิล์มจะทำการอัดรีดในแนวตั้งฉากกับแนวของเครื่องอัดรีด หลังจากนั้นจะทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (Axial direction) แล้วใช้ลมเป่าให้เป็นท่อกว้างโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ในขณะเดียวกันก็ทำให้พลาสติกหลอมเกิดการพองตัวออกในแนวรัศมี (Radial direction) เกิดเป็นลูกโป่งที่มีผนังบาง (Thin wall bubble) ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่เย็น โดยหัวเป่าจะมีลักษณะเป็นวงแหวน (Air ring) อยู่ด้านนอกหัวคาย หัวเป่าวงแหวนนี้จะเป็นตัวปรับทิศทางของลมเป่าให้กระทบกับลูกโป่งในแนวตั้งฉากและทำให้กระแสลมเป่ามีความสม่ำเสมอ ไม่พุ่งออกไปที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งทำให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันไม่ให้ผิวฟิล์มติดกันและลดแรงดึงภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย

ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์มแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ลูกโป่งที่ได้จากการเป่าจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสมและถูกจำกัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพองฟิล์ม (Sizing basket หรือ calibration unit) หลังจากนั้นจะทำการรวบลูกโป่งโดยการป้อนให้ลูกโป่งเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะเคลือบกำมะหยี่ที่ตีบเข้า (Collapsing boards) และป้อนเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสองตัว (Nip roll) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเกิดเป็นฟิล์มสองชั้นซ้อนทับกัน หลังจากนั้นทำการดึงฟิล์มโดยใช้หน่วยดึง (Haul-off unit) สุดท้ายฟิล์มจะถูกพันม้วนเก็บด้วยตัวม้วนฟิล์ม (Winder) แล้วนำไปผลิตเป็นถุงหรือผลิตภัณฑ์อื่นต่อไป



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine) [21]

2.8.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม

1. เครื่องอัดรีด (Extruder) มีหน้าที่หลักในการหลอมเหลวพลาสติก
2. หัวดาย (Die) โดยปกติมี 2 ชนิด ได้แก่
 - วงแหวนป้อนเข้าด้านล่าง (Annular bottom feed die)
 - วงแหวนแบบป้อนเข้าด้านล่าง (Annular side feed die)
3. ระบบการหล่อเย็น แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่
 - แบบบังคับด้วยอากาศ (Forced air)
 - ทำให้เย็น โดยอาศัยแหล่งความเย็นจากภายในหรือภายนอก (Internal or external refrigeration)
 - การหล่อเย็นด้วยน้ำ (Water cooling bath)
4. หอคอยช่วยดึงขึ้น ได้แก่
 - ลูกกลิ้งดึง (Pull rolls) แบ่งเป็นแบบหลัก (Primary type) และแบบรอง (Secondary type)
 - ระบบการพับฟิล์ม (Folding system)
 - ระบบม้วนฟิล์ม (Wind – up system) แบ่งเป็นระบบขับโดยตรง (Direct drive) และระบบขับพื้นผิว (Surface drive)
5. อุปกรณ์อื่นๆ

5.1 อุปกรณ์ทั่วไป

- เครื่องวัดความหนาแน่นของแผ่นฟิล์ม (Film thickness gauges)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter)
- ระบบควบคุมวงจรรปิด (Closed loop system)

5.2 อุปกรณ์ปรับพื้นผิว

- โครโน่าคิสซาร์จ (Corona discharge)
- เปลวไฟก๊าซ (gas flame)

5.3 อุปกรณ์ช่วยเสริม เช่น เครื่องจักรสำหรับทำถุง (Bag making machine)

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพยางฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีค่าสำคัญที่ใช้สำหรับอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม ได้แก่

- อัตราส่วนการเป่า (Blow – up ratio, BUR) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง (D_p) กับเส้นผ่านศูนย์กลางของคาย (D_0) โดยทั่วไปอัตราส่วนการเป่า (Blow – up ratio) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า คายตัวหนึ่งสามารถผลิตถุงได้หลายขนาดขึ้นอยู่กับค่า Blow – up ratio

- อัตราการดึงลง (Draw – down ratio, D_R) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้ง (V) กับความเร็วของอัตราการรีด (V_0) ซึ่งความเร็วของการอัดรีดสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลาแปรให้เป็นปริมาตรแล้วค่อนำปริมาตรที่ได้มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของคาย

- อัตราส่วนการลดความหนา (Thickness reduction ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาที่อัดรีดออกมา (H_0) กับความหนาของฟิล์มตอนสุดท้าย (H)

สำหรับวัสดุที่ไม่ขึ้นกับความหนา (Incompressible materials) อัตราส่วนทั้งสามจะเกี่ยวข้องกับตามสมมูลมวลสาร ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$D_R = \frac{V}{V_0} \quad (2.1)$$

$$BUR \frac{V}{V_0} = \frac{H_0}{H} = BUR \times D_R \quad (2.2)$$

2.8.2 หลักการของฟิล์มเป่า

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.05 cm.) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มเป่าประกอบด้วยเครื่องอัดรีดต่ออยู่กับคายประเภทวงแหวน (annular die) ซึ่งปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบท่อ (Tubular blown film) จะใช้อากาศและการดึงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งช่วยรวบฟิล์ม (Collapsing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

guides and nip) อยู่ทางด้านบน โดยฟิล์มจะขยายตัวออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม ตามแนวนาน และในขณะเดียวกัน จะถูกดึงในทิศทางตั้งฉาก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง (Biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (Crystallization) และการแข็งตัว (Freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (Tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแบบแรงเฉือน (Shear force) เพราะความเค้นเฉือนมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอิลาสติก ทำให้แรงหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูง ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เรียกว่า เทราโตเนียน (Troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นในนิวโตเนียน แต่ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด จะมีพฤติกรรมเป็นแบบนั้นเทราโตเนียน (Non – Troutonian) (พอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนใหญ่จะเป็นแบบเทราโตเนียน) ซึ่งแบ่งออกเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากการดึง (Tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากการดึง (Tension thinning)

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลว (Extrudate) ออกจากดาย จะค่อยๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้น และวัสดุที่ยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อยๆ จนในที่สุดเกิดการแตกออกของฟิล์ม แต่อย่างไรก็ดีการทำให้แข็งเนื่องจากการดึง จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบอิลาสติก มากพอที่จะชดเชยการเพิ่มของความเค้น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ อัตราการตกผลึก (Crystallization rate) ก็เป็นอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพ คือ การผลิตฟิล์มด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่า แนวเส้นแข็งตัว (Freeze line or frost line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดลูกโป่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์เกิดการตกผลึก ทำให้ความโปร่งแสงลดน้อยลง อิทธิพลของแนวเส้นแข็งตัวนี้ จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึงไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง

2.8.3 สมบัติของฟิล์มเป่า

สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางตามแนวขวาง) โดยใช้วิธีการทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf) ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส (ความขุ่น) ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและทิศทางตามแนวขวาง) การจัดเรียงตัว เปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิของการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม (วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนา) อัตราส่วนการดึงลง (Draw – down ratio) อัตราส่วนการเป่า (Blow – up ratio) ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (Frost line height) และความสม่ำเสมอของความดัน ซึ่งช่วยลดหรือกำจัดกาเกิดเป็นคลื่น (Surging)

ความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับช่องว่างของคาย อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการเป่า และอัตราส่วนการคั่งลง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัว คือ ระยะทางเหนือคายที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกผลึกในขณะที่ของหลอมเหลวเย็นตัวลง ซึ่งจัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม โดยพบว่า ถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัวเปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวจะลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระแทกจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการหลอมเหลว และอัตราการอัดรีดด้วย โดยเมื่อตัวแปรทั้งสองเพิ่มขึ้น ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับอัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อการคั่ง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวาง และลดลงในทิศทางตามแนวเครื่อง แต่จะมีผลตรงข้ามกับความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนการเป่าที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราส่วนการคั่งลงที่เพิ่มขึ้นจะมีผลตรงกันข้าม

2.9 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

2.9.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) [22]

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FTIR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าแสง Visible โดยรังสีอินฟราเรดแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

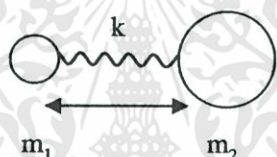
- อินฟราเรดระยะใกล้ (Near IR) แถบการดูดกลืนแสงของ โมเลกุลในระยะนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ 0.8 – 2.5 ไมโครเมตร

- อินฟราเรดระยะกลาง (Middle IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 2.5 – 50 ไมโครเมตร ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ ในช่วงนี้จะแบ่งเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและช่วงลายพิมพ์นิ้วมือที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล

- อินฟราเรดระยะไกล (Far IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 50 – 1,000 ไมโครเมตร จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของ โมเลกุล เนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชันมีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวใน โมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายัง โมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด ความสั่นของโมเลกุลสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การยืด (Stretching) และการโค้งงอ (Bending or Deformation) โมเลกุลที่มีอะตอมที่เหมือนกัน เช่น โมเลกุลใน ไตรเจน (N_2) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ขณะสั่น โดยโมเลกุลที่ประกอบด้วย n อะตอม มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n - 5$ แบบ ส่วนโมเลกุลที่ไม่เป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n - 6$ แบบ

พิจารณาการสั่นแบบยืดระหว่างอะตอม 2 อะตอม ที่ยึดกันด้วยพันธะทางเคมี ถ้าสมมติว่ามวลของอะตอมทั้งสองต่อกันด้วยสปริง แล้วมีการแกว่งแบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย (Simple harmonic oscillation) สามารถคำนวณค่าของความถี่ได้จาก



$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (2.3)$$

เมื่อ ν คือ ความถี่ของการสั่น (cm^{-1})

k คือ ค่าคงที่ของแรง

c คือ ความเร็วของแสง

μ คือ มวลอะตอมที่ลดลง (reduce mass) (kg)

โดยที่
$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

เมื่อ m_1 และ m_2 คือมวลของแต่ละอะตอม

ค่าคงที่ของแรงของพันธะสามจะมากกว่าพันธะสองและพันธะเดี่ยว ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความถี่ของการยืดระหว่างอะตอมคู่หนึ่งได้

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) มีประโยชน์มากสำหรับการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เมื่อไม่นานมานี้ เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive วิเคราะห์ได้ยากหรือเกือบจะเป็นไปไม่ได้

2.9.2 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) [23, 24]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้สำหรับดูพื้นผิวของวัสดุตัวอย่าง โดยภาพที่เกิดขึ้นจะเกิดจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ผ่านชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้วิ่งลงสู่เลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับโฟกัสบนผิวชิ้นงาน และใช้ชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นงาน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพ

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างจะมีสัญญาณที่สำคัญเกิดขึ้น 3 สัญญาณ คือ

1. การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (Backscattered electron : BSE) เป็นผลมาจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในลำอิเล็กตรอนกับแวนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างที่มีประจุบวกแล้วกระเจิงออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีพลังงานสูง
2. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่อยู่วงใน (inner shell) ของอะตอมตัวอย่าง อิเล็กตรอนชนิดนี้จะคายออกมาจากตัวอย่างและมีพลังงานต่ำ
3. รังสีเอ็กซ์ (x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนในวงในของอะตอมตัวอย่างหลุดหายไป ทำให้อะตอมที่อยู่ภายนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่แล้วคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ โดยสัญญาณทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือตรวจวัด (Detector) ที่ใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นหลอดทั้งสแตนท์ที่ถูกทำให้ร้อน หรืออาจใช้แลนทานัม เฮกซะ โบรไรด์ (LaB₆) โดยจะต้องให้ลำอิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงค่าเดียว
2. ชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์ (Condenser lens) ใช้เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ
3. ชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดที่ละตำแหน่งจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งภาพ
4. เครื่องตรวจวัด (Detector) ใช้ตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจวัด เช่น secondary electron detector จะใช้ใน

การตรวจวัดสัญญาณที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยเรียกสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นว่า secondary electron image (SEI)

5. จอแสดงภาพ (Cathode ray tube) จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงภาพที่ได้จากเครื่องมือวัด

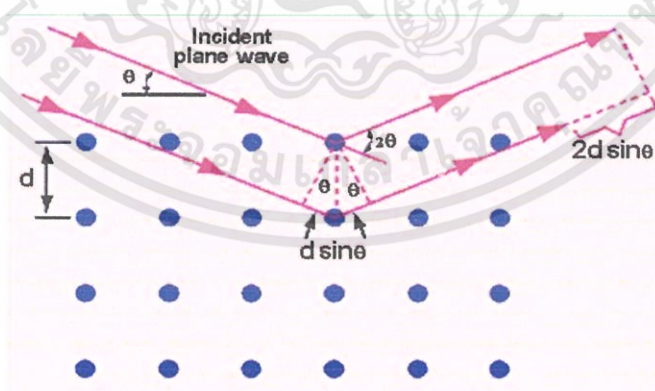
2.9.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD [25, 26]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ ดีเอ็นเอ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น

XRD เป็นเทคนิคที่คล้ายเทคนิค spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร

หลักการพื้นฐานและวิธีการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปแบบสมการ "Bragg's Law"



รูปที่ 2.12 Bragg's Law

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2.4)$$

- เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก
 θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก
 $n = 1, 2, 3, \dots$
 λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้สมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก โดยวัสดุที่เป็นผลึก คือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึกซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

2.9.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

2.9.4.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test) [27, 28]

การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) คือ การวัดความสามารถของวัสดุในด้านความทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียสภาพไป โดยที่ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus) จะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงเปราะ (Stiffness) ของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟความเค้น – ความเครียด (Stress – strain curve)

การทดสอบแรงดึงสามารถทำการทดสอบได้ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 ทำการจับยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐานที่กำหนด ด้วยที่จับ (Grips) สองข้าง โดยที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่ และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่ขึ้น โดยมีเซลล์วัดแรง (Load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่าง ตามมาตรฐานจะใช้ความยาวเกจ (Gauge length) 50 mm. และใช้ความเร็วในการดึง 500 mm/min การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะทำให้ความชันของเส้นกราฟความเค้น – ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือค่ามอดูลัสที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น

จากค่าแรงดึงที่ใช้และการยึดออกของตัวอย่างสามารถคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ดังนี้

$$\text{- ความเค้นดึง (Tensile stress)} \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

$$\text{- ความเครียดดึง (Tensile strain)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (\Delta l = l - l_0) \quad (2.6)$$

$$\text{- มอดูลัส (Modulus)} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ใช้ยึดตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน, N)

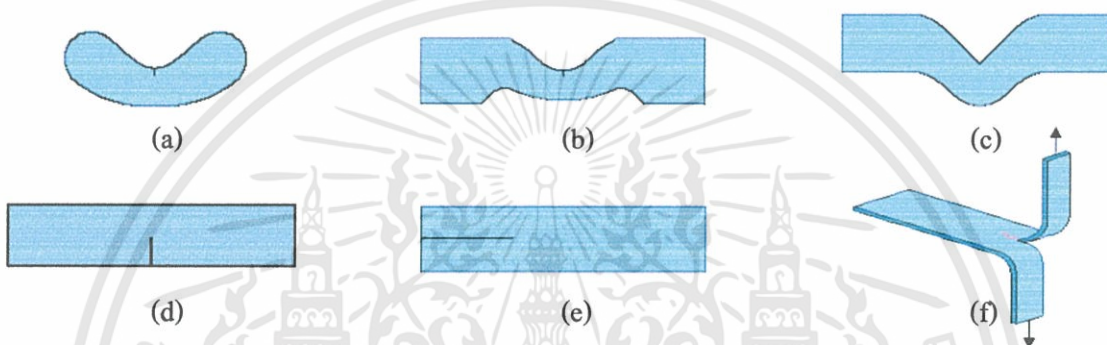
A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร, mm^2)

l คือ ระยะห่างระหว่างซิด 2 เส้นบนตัวอย่างขณะดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

l_0 คือ ระยะห่างระหว่างซิด 2 เส้นบนตัวอย่างก่อนดึง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร, mm)

2.9.4.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test) [29]

การทดสอบการฉีกขาดขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ อัตราเร็วการฉีก และอุณหภูมิ ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการฉีกก็มีหลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens) [30]

- (a) ASTM Die A (Nicked Crescent) (b) ASTM Die B (Nicked Tab End)
 (c) ASTM Die C (Right Angle) (d) Russian
 (e), (f) Trouser

ตัวอย่างการทดสอบการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D 624 และแบบ Trousers รอยขาดจะตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่ให้ และแบบ Russian จะขาดตามแนวตรง โดยรายงานผลเป็นแรงที่ใช้ในการฉีกขาดตัวอย่างที่มีความหนาตามกำหนด นิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบว่า “ความแข็งแรงฉีกขาด” (Tear strength) และเรียกผลที่ได้จากการทดสอบด้วยตัวอย่างแบบ Trousers ว่า “ความต้านทานฉีกขาด” (Tear resistance)

ค่าที่ได้จากการทดสอบฉีกขาดด้วยตัวอย่างแบบ Russian จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด รองลงมาคือตัวอย่าง ASTM Die A หรือ B และ ASTM Die C และตัวอย่างแบบ Trousers จะให้ค่าความแข็งแรงต่ำสุด

ในงานวิจัยนี้จะตัดชิ้นงานแบบ ASTM Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 โดยในการทดสอบการฉีกขาด จะทำให้ทราบถึงแรงที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มฉีกขาด ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดสูงสุด (Maximum stress) ของชิ้นงาน

2.9.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

Thermal properties เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของสารตัวอย่าง โดยเทคนิคในการวัดค่าต่างๆ จะเทียบกับเวลา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน ด้วย เทคนิค DSC และ TGA ซึ่งมีหลักการ ดังต่อไปนี้

2.9.5.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC) [31]

เป็นเทคนิคที่ใช้วัดความแตกต่างของพลังงานระหว่างชิ้นงานตัวอย่าง และสารอ้างอิง โดยวัดเทียบกับอุณหภูมิ ขณะที่สารทั้งสองอยู่ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิกำหนดไว้ ข้อมูลที่ได้จะเป็นค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสาร และค่าการนำความร้อน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_{onset})

2.9.5.2 Thermogravimetric Analysis (TGA) [32]

เป็นเทคนิคที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของสารเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ถ้าทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป (% weight loss) ได้ ซึ่งจะตรงกับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมแกรม ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

$$\% \text{ weight loss} = \frac{\text{น้ำหนักเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2.8)$$

ผลจากเทอร์โมแกรมทำให้ทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร ความสามารถในการทนทานต่อความร้อน องค์ประกอบหรือสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีอยู่ในสารนั้นได้

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 สภาวะ ได้แก่

- O_2 gas มักใช้กับตัวอย่างพวก Organic สารประกอบ Hydrocarbon ซึ่งมักจะถูกเผา กลายเป็นเถ้าถ่าน (Ash)
- N_2 gas ใช้กับสารตัวอย่างพวก Inorganic หรือตัวอย่างที่ไม่ต้องการให้เกิดการ Oxidation

การใช้เครื่อง TGA เพื่อการวิเคราะห์ทดสอบมีอยู่ 2 ประการ ดังนี้

1. ใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปฏิกิริยาทางจลนพลศาสตร์ เช่น ปฏิกิริยาการสลายตัว ปฏิกิริยาการระเหยกกลายเป็นไอ และปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน

2. ใช้ในการศึกษาหาปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ในของผสม เช่นปริมาณสารเติมแต่งในพอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้จะใช้ TGA หาเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์

2.9.6 สมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต [33]

การกั้นการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ ในฟิล์มพอลิเมอร์ นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะการกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ ซึ่งการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซทำได้โดยการเติมแผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้ เช่น เคลย์ ไมก้า ทลคัม ที่มีลักษณะโครงสร้างภายในเป็นแผ่นลงในฟิล์มพอลิเมอร์ จะช่วยลดการซึมผ่านของก๊าซได้เนื่องจาก

1. พื้นที่ที่ก๊าซสามารถแพร่ผ่านได้มีพื้นที่ลดลง
2. การเพิ่มขึ้นของระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของก๊าซ โดยก๊าซต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่คดเคี้ยวรอบๆ แผ่นวัสดุที่ก๊าซซึมผ่านไม่ได้

2.9.6.1 คำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

1. อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate : OTR)

คือ ปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่ผ่านพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ต่อหน่วยเวลาภายใต้สภาวะทดสอบ สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$OTR = \left[\frac{(E_e - E_0) \times Q}{A \times R_L} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ E_e คือ ระดับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่คงที่ (Steady – state voltage)

E_0 คือ ระดับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ศูนย์ (Zero voltage)

Q คือ ค่าคงที่การตรวจสอบ (Calibration constant)

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน (Speciment area)

R_L คือ ค่าของภาวะการต้านทาน (Load resistance)

2. การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeance : OP)

คือ อัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความดันของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกันของฟิล์มทั้งสองด้าน สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$OP = \frac{OTR}{P} \quad (2.10)$$

เมื่อ P คือ ความดันของก๊าซออกซิเจนหรืออัตราส่วนโดยมวลของก๊าซออกซิเจนจากความดันรวม โดยความดันของก๊าซออกซิเจนในด้านที่เป็นก๊าซนำพาให้พิจารณาเป็นศูนย์ ($P=1$)

3. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : OPC) คือ การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความหนาของฟิล์ม สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$OPC = OP \times t \quad (2.11)$$

เมื่อ t คือ ความหนาเฉลี่ยของชั้นงาน

จากโครงสร้างของเคลือบที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบาง ทำให้เกิดเส้นทางคดเคี้ยวสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซต่างๆ หรือที่เรียกว่า "Tortuous part" (รูปที่ 2.14) จากทฤษฎีความคดโค้ง (Tortuosity theory) กล่าวคือ เส้นทางการผ่านของก๊าซต้องเป็นไปตามชั้นซิลิเกตที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกันขวางอยู่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Tortuosity factor (τ) คือ อัตราส่วนระหว่างระยะทางจริงของเส้นทางสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซ (d') กับระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเส้นทางสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซที่ไม่มีชั้นซิลิเกตกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกันขวางอยู่ (d) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.12

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \phi_s \right] \quad (2.12)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของแผ่นเคลือบ

W คือ ความกว้างของแผ่นเคลือบ

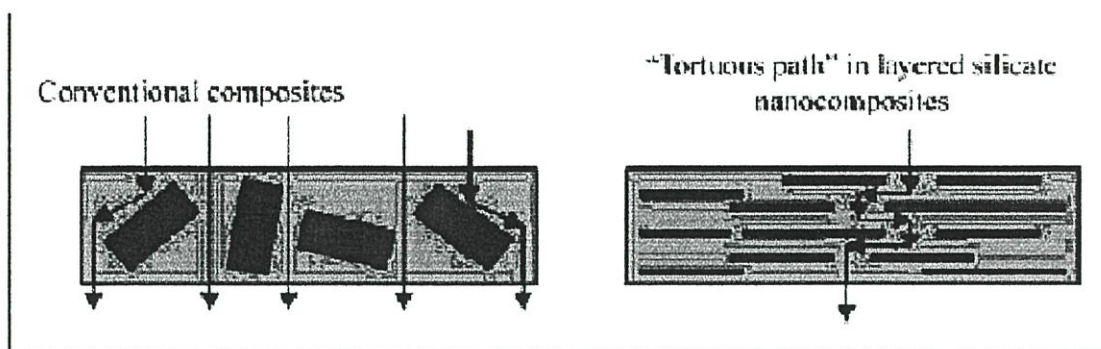
ϕ_s คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแผ่นเคลือบ

และสามารถคำนวณหาความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้จากสมการที่ 2.13

$$\frac{P_s}{P_p} = \frac{(1 - \phi_s)}{\tau} \quad (2.13)$$

เมื่อ P_s คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิต

P_p คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ tortuous path ใน polymer/layered silicate nanocomposites [34]

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Golebiewski J. และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาชนิดของมอนต์มอริลโลไนต์และสารช่วยผสม ตลอดจนสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผสมและเป่าขึ้นรูปฟิล์มนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับมอนต์มอริลโลไนต์ (LDPE/MMT) โดยทำการเปรียบเทียบมอนต์มอริลโลไนต์ 3 ชนิดที่มีการปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์ (Organomodified MMT) ที่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบชนิดของสารช่วยผสม 3 ชนิดเช่นกัน โดยใช้อัตราส่วนในการผสมระหว่างสารช่วยผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์เป็น 15:5 % โดยน้ำหนัก พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับผสมด้วย Twin screw extruder คือ 170, 180, 190, 190, 190 °C ใช้ Screw speed 250 min⁻¹ และอุณหภูมิที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม คือ 150, 160, 175, 165, 175 °C โดยมี Screw rotation speed 30 – 45 min⁻¹, D_R 8:1 และ BUR 3:1 หรือ 6:1 พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์และสารช่วยผสมที่ทำให้สมบัติของฟิล์มนาโนคอมโพสิต LDPE/MMT ดีที่สุด ได้แก่ Cloisite 15A (Modified by quaternary ammonium salt) และ Fusabond EMB 226D ตามลำดับ

Kampeerapapun P. และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับมอนต์มอริลโลไนต์ (Cassava starch/MMT film) โดยใช้เทคนิคการหล่อแบบ (Casting) และใช้ไคโตซานเป็นสารช่วยผสม เพื่อให้อนุภาคของเคลย์ (MMT) กระจายตัวในแป้งได้ดีขึ้น โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และจากการทดสอบด้วย SEM และ %Transmittance พบว่า อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกปรับปรุงด้วยไคโตซาน (Cationic exchange reaction) จะมีขนาดที่เล็กกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว และการใช้มอนต์มอริลโลไนต์ 10% โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดูลัสดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบที่ 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่ได้ยังมีความสามารถในการลดการซึมผ่านของไอน้ำหรือความชื้น ได้อีกด้วย

Cyras V.P. และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางด้านกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายที่ผสมกับโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (TPS/Na⁺ - MMT) ด้วยเทคนิคการหล่อแบบ โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ (2, 3 และ 5 % of MMT) ลงในฟิล์มเทอร์โมพลาสติกย่อยสลาย ฟิล์มที่ได้จะมีความเสถียรต่อความร้อนมากขึ้น ปริมาณการซึมผ่านของน้ำลดลง และมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย

Shujun W. และคณะ [38] ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (TPS/LLDPE) โดยใช้ Single screw extruder ในการผสม และมีกลีเซอรอล มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAH) และ Dicumyl peroxide (DCP) เป็นพลาสติกไซเซอร์ สารช่วยผสม และมอนอเมอร์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ผสม TPS/LLDPE จะมีความเข้ากันได้มากขึ้น เมื่อใส่มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAH) (เปรียบเทียบกับตัวที่ไม่ได้ใส่ MAH) และมีสมบัติทางด้านต่างๆ (Mechanical, Morphology, Thermal, Rheological properties) ที่ดีมากขึ้นด้วย เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีการกระจายตัวที่ดี และเข้ากันได้มากขึ้น

Ranade A. และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนกับมอนต์มอริลโลไนต์เลเซอร์ซิลิเกต (PE/MLS nanocomposite film) โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่มีการใช้สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE - g - MA) กับฟิล์มที่ไม่มีการใช้สารช่วยผสม พบว่า ฟิล์มที่มีการใช้สารช่วยผสม PE - g - MA จะมีการกระจายตัวและความเข้ากันได้ระหว่าง PE กับ MLS ที่ดีกว่า ซึ่งส่งผลให้ค่า Creep - recovery และสมบัติเชิงกลของฟิล์มดีกว่าฟิล์ม PE/MLS ที่ไม่มีสารช่วยผสม

Dean K. และคณะ [40] ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของนาโนคอมโพสิตระหว่างเทอร์โมพลาสติกย่อยสลายกับเคลย์ โดยการผสมด้วย High speed mixer และ Co - rotating twin screw extruder และใช้น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าการแตกตัวและการแยกออกจากกันของชั้นซิลิเกตในเคลย์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของนาโนเคลย์และพลาสติกไซเซอร์ นอกจากนี้ชนิดของนาโนเคลย์ ลักษณะการกระจายตัวของสาร และสถานะที่ใช้ในกระบวนการผสม ยังมีผลทำให้สมบัติของนาโนคอมโพสิตที่ได้แตกต่างกัน โดยจะพบว่า ตัวที่มีการแตกตัวและกระจายตัวได้ดี และมีความเข้ากันได้ดีที่สุดในที่สุด จะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในที่สุดด้วย

ศศิกานต์ สุวรรณประทีป และคณะ [41] ได้ทำการสังเคราะห์นาโนคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนที่มีโลหะ และออร์กาโนเคลย์ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยวิธีโซลูชันอินเทอร์คาลชัน โดยใช้ปริมาณของออร์กาโนเคลย์ที่แตกต่างกัน พบว่า พอลิยูรีเทนที่มีโลหะสามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์และชั้นของออร์กาโนเคลย์อย่างเป็นระเบียบ โดยที่ออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป ในทางตรงกันข้าม ออร์กาโนเคลย์ยังช่วยให้สมบัติของความเสถียรต่อความร้อน และ

ความสามารถในการทนไฟของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตดีขึ้นด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์

ภัทรพร สงวนศักดิ์ [10] ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m – MMT) โดยมุ่งเน้นที่การพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลให้ใกล้เคียงกันกับฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล 2 ทิศทาง (BOPP) พบว่า เมื่อใช้สารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP – g – MA) เกรด Priex® 20095 กับออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A ในอัตราส่วน 2:1 มาทำการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m – MMT โดยเทคนิคการหล่อแบบ จะสามารถพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาดให้ดีกว่าฟิล์มพอลิพรอพิลีนธรรมดา แต่จะมีผลทำให้ค่า % Elongation at yield ลดต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PP/m – MMT ให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ได้โดยการเพิ่มความหนาให้กับฟิล์ม PP/m – MMT และสามารถพัฒนาความแข็งแรงฉีกขาดให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ได้โดยการลดปริมาณออร์กาโนเคลย์และเพิ่มอัตราส่วนการดึง

Nam P.H. และคณะ [42] ได้ศึกษา PP/m – MMT โดยใช้ PP – g – MA เป็นสารช่วยผสม โดยผ่านกระบวนการหลอมเหลว พบว่า การที่สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแทรกสอด (Intercalation) เข้าไปในพื้นที่ระหว่างชั้นผลึกซิติลเกิดจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอพิลีนที่ไม่ได้เติมเคลย์ แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเคลย์ไปเรื่อยๆ ตำแหน่งของการแทรกสอดจะเพิ่มขึ้นตาม ทำให้จำกัดการแตกออกจากกันอย่างอิสระของชั้นซิติลเกิด นอกจากนี้การที่สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดของสายโซ่ของสารช่วยผสม และสัดส่วนระหว่างความยาวและความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคเคลย์ที่กระจายตัวอยู่

Lertwimolnun W. และ Vergnes B. [43] ได้ทำการศึกษาพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต โดยใช้พอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PP – g – MA) เป็นสารช่วยผสม เพื่อพัฒนาความสามารถในการกระจายตัวของเคลย์ โดยทำการศึกษาความเข้มข้นของสารช่วยผสมและสถานะของกระบวนการผลิต พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยผสมจะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์เพิ่มขึ้น และการใช้เวลาในการผสมที่นานขึ้นจะเป็นการเพิ่มระดับการแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระ (Exfoliation) ของเคลย์ นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ Screw speed 150 rpm อุณหภูมิที่ใช้ผสม 180°C และผสมเป็นเวลา 20 นาที จะทำให้ฟิล์ม PP/m – MMT มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวของเคลย์ดีที่สุด ดังนั้น การเพิ่มแรงเฉือน เวลาที่ใช้ในการผสม และใช้อุณหภูมิในการผสมที่เหมาะสม (180°C) จะทำให้อนุภาคของเคลย์มีการแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระได้ดี

Chaoying Wan และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาและเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตจากการใช้พอลิไวนิลคลอไรด์และเคลย์ ด้วยวิธี Melt Blending โดยใช้เคลย์ 3 ชนิด คือ โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ และออร์กาโนฟิลิกมอนต์มอริลโลไนต์อีก 2 ชนิด และสารที่ตัดแปรโครงสร้างของเคลย์ คือ Trimethylcadecyl ammonium และ Dimethyldioctadecyl ammonium โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของนาโนคอมโพสิตที่ได้ด้วย XRD ซึ่งพบว่า ค่า d - spacing (ระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์) ของ Na - MMT มีค่า 1.2 nm., MMT - C₁₈ มีค่า 2.0 nm. และ MMT - 2C₁₈ มีค่า 3.2 nm. และค่าความแข็งแรงดึงและความทนทานต่อแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเคลย์ 0.5 - 3% โดยน้ำหนัก และที่ปริมาณเคลย์ต่ำกว่า 5% โดยน้ำหนัก นาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้จะยังคงมีความใสอยู่

Kozak M. และคณะ [45] ได้ทำการตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ จากนั้นนำมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้ไปศึกษาด้วยเทคนิค XRD, FT - IR และ SEM และศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ตัดแปรมีค่า 1.227 nm. ในขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ตัดแปรมีค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตเพิ่มขึ้นเป็น 1.557 nm. และจากเทคนิค FT - IR พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ตัดแปรจะแสดงพีคของ C - C stretching ที่ช่วง 1468 cm⁻¹ และ C - H stretching ในช่วง 2930 และ 2856 cm⁻¹ ตามลำดับ

Chungui Zhao และคณะ [46] ได้เตรียมนาโนคอมโพสิตของพอลิเอทิลีนและเคลย์ด้วยวิธี Melt intercalation โดยทำการเตรียมออร์กาโนเคลย์จากการใช้สารตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ที่ต่างกัน คือ กลีออควเทอร์นารีอัลคิลแอมโมเนียมที่มีหมู่ฟองไว และกลีออควเทอร์นารีอัลคิลแอมโมเนียมที่ไม่มีหมู่ฟองไว พบว่าการตัดแปรเคลย์ด้วยกลีออควเทอร์นารีอัลคิลแอมโมเนียมที่ไม่มีหมู่ฟองไวจะให้โครงสร้างแบบไมโครคอมโพสิต ส่วนการตัดแปรเคลย์ด้วยกลีออควเทอร์นารีอัลคิลแอมโมเนียมที่มีหมู่ฟองไวจะให้โครงสร้างแบบนาโนคอมโพสิต และนาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้จะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า

เกศินี และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ได้จากแป้งข้าวเจ้าหรือแป้งมันสำปะหลังผสมกับกลีเซอรอลหรือกลีเซอริน โมโนสเตียเรตปริมาณ 0.2, 5 และ 10% โดยผ่านกระบวนการอัดรีด พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความเรียบ และมีความคงทนต่อการแตกตามรอยพับลดลง สำหรับฟิล์มที่ผสมด้วยกลีเซอริน โมโนสเตียเรตไม่ทำให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะที่ดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับกลีเซอรอลจะมีความใสและยืดหยุ่นดี แต่ฟิล์มที่ได้จากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลจะขุ่น

Mali และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ 3 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และกลีเซอรอลผสมกับซอร์บิทอลในอัตราส่วน 1 : 1 โดยใช้ปริมาณ 0, 20 และ 40% ต่อแป้ง 100 กรัม พบว่า ชนิดและความหนาแน่นของพลาสติกไซเซอร์มีผลต่อปริมาณและอัตราการดูด

ความชื้น โดยกลีเซอรอลจะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีที่สุด และถ้าใส่ในปริมาณที่มากกว่า 40% จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลน้อย

Chi – Yuan Huang และคณะ [49] ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งสาธู โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีด พบว่า ควรผสม Maleic anhydride, Glycerol และ LDPE – g – MA ให้เข้ากันก่อน แล้วนำไปผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและแป้งสาธู เมื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า มีค่า MFI, %การดึงยืด และ %Weight loss สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่า มีอัตราการสลายตัวที่ดีที่สุด แต่ให้ค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene ; LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป (LD 1905F) จากบริษัท SCG Chemicals จำกัด ซึ่งมีสมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD 1905F [50]

Property	Test Method	Value	Unit
Resin Properties			
Melt Flow Rate	ASTM D 1238 @ 190°C	5.00	g/10 min
Density	ASTM D 1505	0.919	g/cm ³
Melting Point	ASTM D 2117	110	°C
Vicat Softening Point	ASTM D 1525	92	°C
Brittleness Temperature	ASTM D 746	< - 70	°C
Film Properties			
Tensile Strength at Yield	ASTM D 882	MD: -*, TD:100*	kg/cm ²
Tensile Strength at Break	ASTM D 882	MD:200*, TD:150*	kg/cm ²
Tensile Modulus, 2% Secant	ASTM D 882	MD:1700*, TD:1900*	kg/cm ²
Elongation at Break	ASTM D 882	MD:400*, TD:700*	%
Elmendorf Tear Strength	ASTM D 1922	MD:370*, TD:210*	g
Dart Impact Strength	ASTM D 1709	130*	g
Haze	ASTM D 1003	7*	%
Gloss	ASTM D 2457	55*	%

หมายเหตุ (*) Properties obtained from film produced on a pilot line at TPE, 38 micron, BUR 2:1,

MD = Machine Direction, TD = Transverse Direction

ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. แป้งมันสำปะหลัง Food grade จากบริษัทแสงเพชร ซึ่งมีสมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแป้งมันสำปะหลัง Food grade

สมบัติ	หน่วย	แป้งมันสำปะหลัง
ขนาดอนุภาค	µm.	20
ความชื้น	%	12 – 15
แป้ง	%	87

3. สารช่วยผสม Fusabond MB 226D (พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ : PE – g – MA) จากบริษัท Creative Polymer Ltd. มีสมบัติดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของ Fusabond MB 226D [16]

Properties	Test Method	Value	Unit
Melt flow rate	ASTM D1238	1.5	g/10 min
Density	ASTM D1505	0.93	g/cm ³
Melting point	ASTM D3418	122	°C

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. พลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) จากบริษัท Thai pure science Ltd. มีสมบัติดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของกลีเซอรอล [51]

สมบัติ	หน่วย	กลีเซอรอล
ความหนาแน่น	g/cm ³	1.26
จุดเดือด	°C	290
จุดหลอมเหลว	°C	18
ความหนืดที่ 20 °C	mps	1400

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ชนิด คือ
- Mac – gel[®] SAC GRADE (Nano aluminosilicate) จากบริษัท Thai Nippon Chemical Industry จำกัด ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Cloisite[®] 15A (Natural montmorillonite modified with a quaternary ammonium salt.)
จากบริษัท Southern Clay Products, Inc ซึ่งมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพของ Mac – gel[®] SAC GRADE (Nano aluminosilicate) [52]

Moisture Content , %	8-12
5% Suspension , pH	9.5-11.0
Swelling Index , ml per 2 g of clay	15
Viscometer Dial Reading @ 600 rpm	12-20
Dry particle size (pass 200 mesh) , %	80
Liquid Limit , %	400

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.6 สมบัติของ Cloisite[®] 15A (Natural montmorillonite modified with a quaternary ammonium salt.) [53]

Product Name	Cloisite [®] 15A
Chemical Name	Ditallowdimethylammonium salts with Bentonite
Appearance	Cream powder
Particle size (90% less than)	13 μm
Odor	Mild
pH	N/A
Boiling Point	N/A
Melting Point	Not applicable
Flash Point	Not determined
Flammability	Dust could containing more than 50 gm^{-3} may ignite at 470 $^{\circ}\text{C}$
Vapour Pressure	N/A
Bulk Density/Specific Gravity	1.6 – 1.8 g/cc
Solubility	Solubility in water negligible
Organic Modifier	2M2HT (dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium)

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) : Intro Engineering Ltd. รุ่น PL200
2. เครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer) : Lab Tech Engineering Company Ltd. รุ่น Model 3000
3. เครื่องบดพลาสติก (plastic grinder) : Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
4. ตู้อบ (Oven)
5. เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) : Lab Tech Engineering Company Ltd. รุ่น Type LF 400
6. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Digimatic micrometer) : Mitutoyo รุ่น MDC 25PJ
7. เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Rate Tester) : CEAST รุ่น 6841
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.
10. เครื่องตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR spectrum GX
11. เครื่องตรวจพิสูจน์เอกซ์เรย์ X-ray Diffractometer (XRD) : XRD รุ่น D8 Advance
12. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : Lloyd Instrument Ltd. รุ่น LR 5 K
13. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter : DSC) : Mettler – Toledo รุ่น DSC822 และ (Thermogravimetric Analyzer : TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris1
14. เครื่อง Oxygen permeability analyzer

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูป (Blown film) ให้เป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch film) ได้

เตรียมแป้งมันสำปะหลังผสมกับ LDPE ในอัตราส่วน 30 : 100 โดยเติมสารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) ปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของ LDPE และเติมพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) 15 - 21 % โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งมีสูตรผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้ในงานวิจัย ดังตารางที่ 3.7

เริ่มจากการนำเม็ด LDPE และแป้งมันสำปะหลังไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้นออก จากนั้นนำ LDPE มาผสมกับสารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสม ดังตารางที่ 3.8 เพื่อให้โครงสร้างของ LDPE ยึดติดกับโครงสร้างของสารช่วยผสม และเป็นการเพิ่มความมีขั้วให้กับ LDPE แล้วนำพลาสติกที่ผสมได้ไปบดย่อยด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแล้วมาผสมกับกลีเซอรอลและนำเข้าเครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 1 นาที

ตารางที่ 3.7 สูตรผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	LDPE (g)	แป้งมันสำปะหลัง (% LDPE)	สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) (% LDPE)	พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) (% LDPE)
LDPE	100	0	0	0
TPS 1	100	30	5	15
TPS 2	100	30	5	16.5
TPS 3	100	30	5	18
TPS 4	100	30	5	19.5
TPS 5	100	30	5	21

ตารางที่ 3.8 สภาวะที่ใช้ในการผสม Thermoplastic starch ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

สภาวะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	30 rpm
อุณหภูมิบริเวณที่ 1 (Feed zone)	160°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 2	165°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 3	170°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 4 (Die zone)	175°C

จากนั้นนำส่วนผสม Thermoplastic starch ที่ได้จากรายการที่ 3.7 (เม็ดพลาสติกที่ผ่านการอบและแป้งที่ผสมกับกลีเซอรอล) มาผสมกันในเครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 2 นาที และนำมาทำการผสมให้เข้ากันอีกครั้งด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสม ดังตารางที่ 3.8 นำ Thermoplastic starch ที่ได้เตรียมได้มาบดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่บดแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ใน

การเป่าขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.9 เพื่อคุณลักษณะการขึ้นรูปและความเข้ากันได้ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch film) ที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3.9 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป Thermoplastic starch blown film ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder)

สภาวะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	110 rpm
อุณหภูมิบริเวณที่ 1 (Feed zone)	160°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 2	170°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 3	170°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 4 (Die zone)	180°C
อัตราการดึง (Draw down ratio)	3.5 m/min

3.3.2 การศึกษาหาปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) แล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูป (Blown film) ได้

ทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) ที่เตรียมได้จากสูตรผสมที่เหมาะสมและดีที่สุด ในข้อ 3.3.1 โดยทำการผสมออร์กาโนเคลย์ที่ปริมาณ 3, 5, 7 และ 10% โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งออร์กาโนเคลย์ที่ใช้ในการศึกษาจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ Mac – gel[®] SAC GRADE (Nano aluminosilicate) และ Cloisite[®] 15A (Natural montmorillonite modified with a quaternary ammonium salt.) ซึ่งกำหนดปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) ที่ 5 % โดยน้ำหนักของ LDPE โดยมีสูตรผสมของออร์กาโนเคลย์กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ดังตารางที่ 3.10

เริ่มจากการนำเม็ด LDPE เป่ามันสำปะหลัง และออร์กาโนเคลย์ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้นออก จากนั้นนำ LDPE มาผสมกับสารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสม ดังตารางที่ 3.7 แล้วนำพลาสติกที่ผสมได้ไปบดย่อยด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการอบแล้วมาผสมกับกลีเซอรอล และออร์กาโนเคลย์ตามอัตราส่วนที่กำหนดตามตารางที่ 3.10 และนำเข้าเครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำเม็ดพลาสติกที่ผ่านการบดแล้วมาใส่ลงในเครื่องผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer) ซึ่งมีแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และออร์กาโนเคลย์ผสมกันอยู่ โดยทำการผสมเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำมาผสมให้เข้ากันอีกครั้งด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสม ดังตารางที่ 3.8 นำ Organoclay/Thermoplastic starch ที่

เตรียมได้มาบดด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่บดแล้ว ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) โดยมีสถานะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.10 สูตรผสมของออร์กาโนเคลย์กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Organoclay/Thermoplastic starch) ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	LDPE (g)	แป้งมันสำปะหลัง (% LDPE)	สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) (% LDPE)	พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล)* (% LDPE)	Organoclay (% LDPE)	
					Mac-gel [®] SAC GRADE	Cloisite [®] 15A
TPS/C3/1	100	30	5	19.5	3	0
TPS/C3/2	100	30	5	19.5	0	3
TPS/C5/1	100	30	5	19.5	5	0
TPS/C5/2	100	30	5	19.5	0	5
TPS/C7/1	100	30	5	19.5	7	0
TPS/C7/2	100	30	5	19.5	0	7
TPS/C10/1	100	30	5	19.5	10	0
TPS/C10/2	100	30	5	19.5	0	10

* กลีเซอรอลที่เหมาะสมอยู่ที่ 19.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE

ตารางที่ 3.11 สถานะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป Organoclay/Thermoplastic starch blown film ด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder)

สถานะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	100 rpm
อุณหภูมิบริเวณที่ 1 (Feed zone)	160°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 2	170°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 3	170°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 4 (Die zone)	180°C
อัตราการดึง (Draw down ratio)	2.0 m/min

3.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีผลต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

ทำการศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของฟิล์มเป่าที่ได้จากข้อที่ 3.3.2 โดยดูจากการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มว่าสามารถขึ้นรูปได้หรือไม่ และทำการตรวจสอบลักษณะของฟิล์มเบื้องต้น โดยการสังเกตจากสี ความขุ่นของฟิล์มที่ได้ การกระจายตัวของสาร ทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ และทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) จากนั้นนำสูตรผสมที่ดีที่สุดที่ได้จากการผสมในข้อ 3.3.2 มาทำการผสม พบว่าออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A สามารถขึ้นรูปได้ดีกว่า มีการกระจายตัวของสาร และค่าความแข็งแรงดึงที่ดีกว่า Mac-gel® SAC GRADE แต่มีราคาที่สูงกว่า ดังนั้น ในการวิจัยนี้จึงได้ เปลี่ยนออร์กาโนเคลย์ที่ใช้เป็นการนำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาทำการผสมกันแทน โดยมีอัตราส่วนของ Mac-gel® SAC GRADE : Cloisite® 15A เป็น 3.5 : 3.5, 4 : 3 และ 5 : 2 โดยคาดว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่ได้ให้ดีขึ้น และมีราคาที่ต่ำลง ดังตารางที่ 3.12 และทำการทดสอบสมบัติของฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 3.12 สูตรผสมของออร์กาโนเคลย์ผสม (Mac-gel® SAC GRADE + Cloisite® 15A) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Organoclay/Thermoplastic starch) ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	LDPE (g)	แป้งมันสำปะหลัง (% LDPE)	สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) (% LDPE)	พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) (% LDPE)	Organoclay (% LDPE)	
					Mac-gel® SAC GRADE	Cloisite® 15A
TPS/C7/3	100	30	5	19.5	3.5	3.5
TPS/C3/4	100	30	5	19.5	4	3
TPS/C7/5	100	30	5	19.5	5	2

3.3.4 ศึกษาสมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay/thermoplastic starch nanocomposites film)

ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่ได้ โดยเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS 30) เพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพของฟิล์มที่ดีที่สุดที่สามารถย่อยสลายได้เร็วขึ้น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีสมบัติด้านการซึมผ่าน และมีเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้น

3.3.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

ตรวจสอบลักษณะของแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตลักษณะการเป่าขึ้นรูป สังเกตสีและความขุ่นของฟิล์ม และทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องมือโครมิเตอร์

3.3.4.2 การทดสอบค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index)

ค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index : MFI หรือ Melt Flow Rate : MFR) เป็นค่าที่ใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ โดยกดเม็ดพลาสติกที่หลอมเหลวให้ไหลผ่านหัวคายที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนัก 2.16 kg การรายงานผลจะรายงานเป็นน้ำหนักต่อหน่วยเวลา คือ กรัมต่อ 10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 1238

3.3.4.3 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR)

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy การเตรียมตัวอย่างที่เป็นฟิล์มจะตัดชิ้นงานเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด $4 \times 8 \text{ cm}^2$ และตัวอย่างที่เป็นผงจะนำมาบดผสมกับ KBr แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดจะได้สารเป็นแผ่นใสออกมา จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาติดไว้บนหน้าค่างเซลล์ แล้วบรรจุลงในที่บรรจุเซลล์ (Cell holder) เพื่อทำการวัดค่าหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง ที่เลขคลื่นช่วง $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

3.3.4.4 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม (Morphological Analysis)

ศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว การกระจายตัว ของแป้งมันสำปะหลัง และออร์กาโนเคลย์ภายในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และดูความเข้ากันได้ของสารผสม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM/EDX) โดยหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) จากนั้นนำพื้นผิวบริเวณที่เป็นรอยแยกของแผ่นฟิล์มมาทำการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDX และนำชิ้นทดสอบบริเวณที่เป็นรอยแยกของแผ่นฟิล์มส่วนที่เหลือมาเคลือบทอง เพื่อดูลักษณะของการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสาร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.4.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค XRD

การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของออร์กาโนเคลย์ จะเตรียมตัวอย่างแบบผง สำหรับฟิล์มจะเตรียมตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $1 \times 1 \text{ นิ้ว}$ และวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้มุม 2θ เริ่มต้นตั้งแต่ 1° ถึง 30° Step size 0.040° Step time 5 วินาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C

3.3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1. สมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) ตามมาตรฐาน ASTM D882

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดฟิล์มตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีความยาว 140 mm. กว้าง 20 mm. ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) และทิศทางตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) ทิศทางละ 10 ชิ้น วัดความหนาของแต่ละชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยมีสภาวะที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell) 100 N

ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length) 50 mm.

ความเร็วในการดึง (Cross head speed) 500 mm/min

โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) โดยสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ตามสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength : } \sigma) = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\text{ค่ามอดูลัส (Modulus : } E) = \text{ความเค้น } (\sigma) / \text{ความเครียด } (\epsilon) \quad (3.2)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด} = \left[\frac{L - L_0}{L_0} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง

L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)

L_0 คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยึดชิ้นงาน (mm.)

2. สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกแบบตาย C (ASTM Die C) ตามมาตรฐาน ASTM D 624 ตามแนว MD และ TD นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยใช้ Load cell 100 N ความเร็วในการดึง 50 mm/min โดยพิจารณาทิศทางของชิ้นงานตามการฉีกขาดตรงบริเวณรอยเว้าของชิ้นงาน เช่น ฟิล์มที่ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกตามแนว MD เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรงในทิศทาง MD ฟิล์มจะเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงานตามทิศทาง TD

3.3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

1. เทคนิค Differential Scanning Calorimetry : DSC

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_{c_onset}) ด้วยเครื่อง DSC โดยทำการชั่งน้ำหนักสารประมาณ 5 – 10 mg. นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ 10°C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 200°C ตามมาตรฐาน ASTM E794

2. เทคนิค Thermogravimetric Analysis : TGA

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ($T_{d\ onset}$) ด้วยเครื่อง TGA โดยทำการชั่งน้ำหนักสารประมาณ 5 – 10 mg. นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 800°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131

3.3.4.8 การศึกษาสมบัติด้านด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ศึกษาสมบัติด้านด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนด้วยเครื่อง Oxygen permeability analyzer โดยวางฟิล์มรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm. ซึ่งตัดด้วย Cutting template ตรงกลางระหว่างเซลล์จะปล่อยก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน โดยก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวนำก๊าซออกซิเจนที่ผ่านออกจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์ม ภายใต้สภาวะคงที่ การรายงานผลจะรายงานเป็นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate : OTR) โดยมีหน่วยเป็น $\text{cc}/\text{m}^2.\text{day}$ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : OPC) มีหน่วยเป็น $\text{mm}.\text{cc}/\text{m}^2.\text{day}$ ตามมาตรฐาน ASTM D 3985

3.3.4.9 ศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ (Organoclay/thermoplastic starch nanocomposites film)

ในการทดสอบการย่อยสลายของฟิล์มจะทำการเปรียบเทียบการย่อยสลายของฟิล์ม LDPE ฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS 30) และฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ด้วยวิธีการฝังดิน โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30×120 มิลลิเมตร ฝังลงในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร เป็นเวลา 4 เดือน เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมาสังเกตการย่อยสลายของฟิล์ม ซึ่งชนิดของดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินที่ใช้สำหรับปลูกต้นไม้ โดยมีการควบคุมความชื้น และค่า pH ของดินให้คงที่และเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดิน (ความชื้น 30% และค่า pH เท่ากับ 7)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชชื่อย่อสลาย โดยทำการเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของออร์กาโนเคลย์ ออกเป็นสูตรต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายความหมายของสูตรต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คำอธิบายความหมายของสูตรต่าง ๆ

ลำดับ	สูตร	ความหมาย
1	LDPE	Low density Polyethylene
2	TPS	Thermoplastic Starch (LDPE+แป้งมันสำปะหลัง 30 % โดยน้ำหนักของ LDPE)
3	TPS 1	Thermoplastic Starch ที่ใช้กลีเซอรอล 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE
4	TPS 2	Thermoplastic Starch ที่ใช้กลีเซอรอล 16.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
5	TPS 3	Thermoplastic Starch ที่ใช้กลีเซอรอล 18 % โดยน้ำหนักของ LDPE
6	TPS 4	Thermoplastic Starch ที่ใช้กลีเซอรอล 19.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
7	TPS 5	Thermoplastic Starch ที่ใช้กลีเซอรอล 21 % โดยน้ำหนักของ LDPE
8	TPS/C3/1	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE
9	TPS/C3/2	Thermoplastic starch + Cloisite [®] 15A 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE
10	TPS/C5/1	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
11	TPS/C5/2	Thermoplastic starch + Cloisite [®] 15A 5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
12	TPS/C7/1	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE
13	TPS/C7/2	Thermoplastic starch + Cloisite [®] 15A 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE
14	TPS/C10/1	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE
15	TPS/C10/2	Thermoplastic starch + Cloisite [®] 15A 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE
16	TPS/C7/3	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 3.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE + Cloisite [®] 15A 3.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
17	TPS/C7/4	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 4 % โดยน้ำหนักของ LDPE + Cloisite [®] 15A 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE
18	TPS/C7/5	Thermoplastic starch + Mac gel [®] SAC GRADE 5 % โดยน้ำหนักของ LDPE + Cloisite [®] 15A 2 % โดยน้ำหนักของ LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียม LDPE ผสมกับแป้งมันสำปะหลังและสารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) ในอัตราส่วน 100 : 30 : 5 และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ โดยศึกษาจากผลการเป่าขึ้นรูป ความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

4.1.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

จากการทดลอง พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์สูตร TPS 1 และ TPS 2 ซึ่งใช้กลีเซอรอล 15 และ 16.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ จึงได้ทำการศึกษาผลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์สูตร TPS 3 – TPS 5 (ใช้กลีเซอรอล 18, 19.5 และ 21 % โดยน้ำหนักของ LDPE ตามลำดับ) ซึ่งสามารถเป่าขึ้นรูปได้ โดยแสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 4.2 และเมื่อสังเกตสีของฟิล์มเป่าที่ได้ พบว่า ฟิล์มเป่า LDPE จะไม่มีสี และมีความใส แต่ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จะมีสีขาว และมีความขุ่นมากขึ้น โดยฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แต่ละสูตรจะมีสีและความขุ่นไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อทำการวัดความหนาของฟิล์มดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีช่วงความหนาที่มากกว่าฟิล์มเป่า LDPE เนื่องจากในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีเม็ดแป้งแทรกตัว และกระจายตัวอยู่ใน LDPE ทำให้ฟิล์มมีช่วงความหนาที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนา (μm)
LDPE	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	40 – 50
TPS 1	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	-
TPS 2	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	-
TPS 3	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 80
TPS 4	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 80
TPS 5	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 90

4.1.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหล (MFI) ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เปรียบเทียบกับ LDPE ที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนัก 2.16 kg แสดงผลในตารางที่ 4.3 พบว่าค่า MFI ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีค่าต่ำกว่า MFI ของ LDPE เนื่องจากในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จะมีอนุภาคของ

แป้งมันสำปะหลังเข้าไปขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของ LDPE ส่งผลให้สายโซ่มีการเคลื่อนที่ได้ น้อยลง หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความหนืดสูงขึ้น [54]

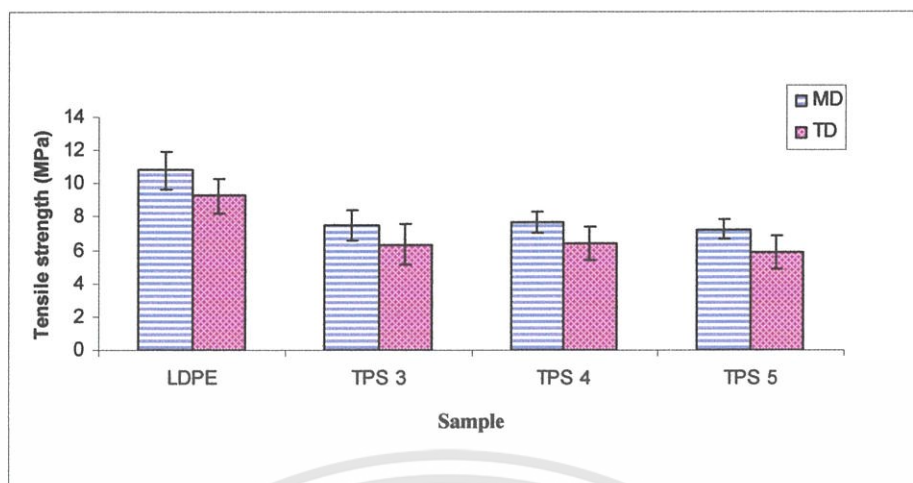
และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตรซึ่งมีปริมาณของ พลาสติกไซเซอรอล (กลีเซอรอล) ที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้น จะส่งผลให้ ค่า MFI สูงขึ้นด้วย แสดงว่า กลีเซอรอลมีผลทำให้แป้งมีความอ่อนตัวมากขึ้น โมเลกุลของพอลิ เมอร์จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น หรือมีความหนืดลดลง ส่งผลให้ค่า MFI สูงขึ้น [55]

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของ LDPE และ เทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS 1 – TPS 5)

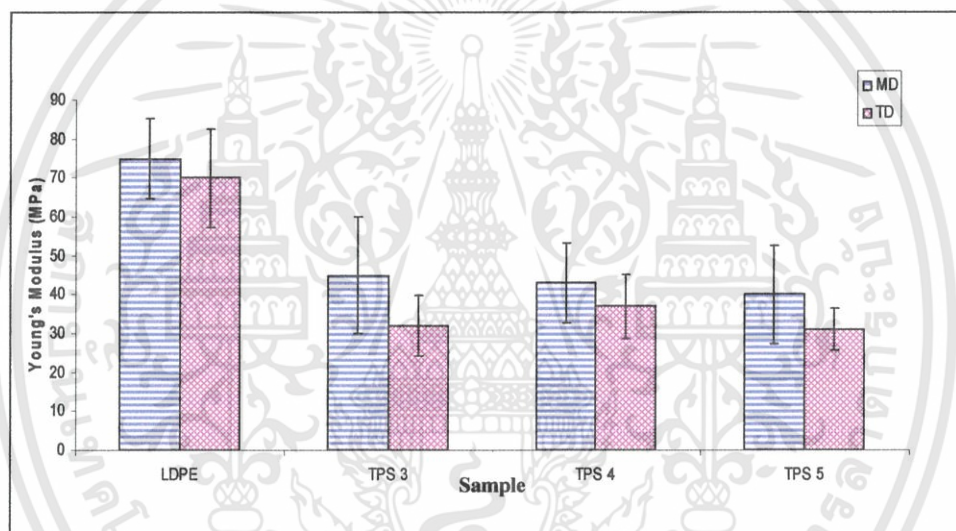
สูตร	MFI (g/10 min)
LDPE	4.9 ± 0.02
TPS 1	1.84 ± 0.05
TPS 2	1.86 ± 0.05
TPS 3	1.92 ± 0.08
TPS 4	2.38 ± 0.08
TPS 5	2.41 ± 0.07

4.1.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

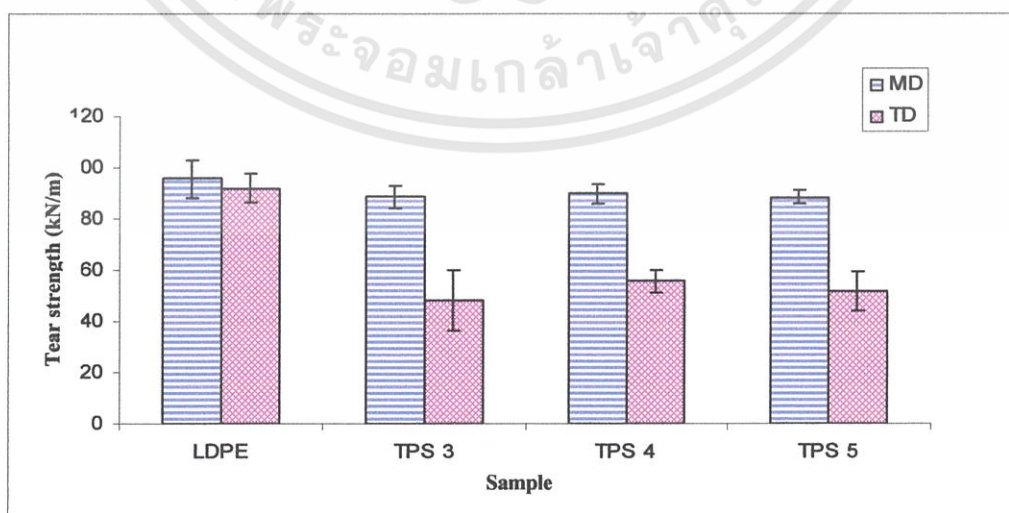
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลสูตร TPS 3, TPS 4 และ TPS 5 เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่า LDPE โดยทำการศึกษาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่า มอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตามขวางเครื่องจักร (TD) พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีสมบัติเชิงกล ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแป้งเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ LDPE ทำให้สายโซ่ จัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้ยากขึ้น คือ มีส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) มากขึ้น จึงส่งผลให้ สมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้การเติมพลาสติกไซเซอรอล (กลีเซอรอล) เพื่อปรับสภาพของแป้งและ ช่วยในกระบวนการขึ้นรูปนั้น มีผลทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลงได้ [49, 55] และเมื่อทำการ เปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตร พบว่า ค่าที่ได้มีความใกล้เคียง กัน โดยสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลสูตร TPS 4 มีแนวโน้มสูงที่สุด เนื่องจาก กลีเซอรอลมีผลทำให้แป้งมีความอ่อนตัวมากขึ้น สายโซ่ LDPE จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น แป้ง สามารถเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ในทางตรงกันข้าม ปริมาณ กลีเซอรอลที่มากเกินไปจะมีผลทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มโดยทั่วไปลดลง เนื่องจากพลาสติก ไซเซอรอล (กลีเซอรอล) จะทำให้พันธะที่ยึดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์อ่อนแอลง [55] ดังแสดง ในรูปที่ 4.1 – 4.3 และภาคผนวก ก ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาอรัซ



รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาอรัซ



รูปที่ 4.3 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาอรัซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจากรูปร่างของอนุภาคแป้ง ดังแสดงในภาคผนวก ก พบว่า มีรูปร่างเป็นทรงกลม ทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นไอโซโทรปิก คือ ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจะแสดงสมบัติเชิงกลที่ลดลงเหมือนกันทั้งสองทิศทาง โดยทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) มีความแข็งแรงดึง ค้ำมอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดที่สูงกว่าทิศทางตามขวางเครื่องจักร เนื่องจากการให้แรงดึงตามแนวการจัดเรียงตัว [56]

4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล TPS 3, TPS 4 และ TPS 5 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาหาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ง (รูปที่ ง-1 ถึง ง-3) พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณของกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน ไม่มีผลทำให้ผลึกของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ [38] ดังนั้น จึงไม่มีผลต่อค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้จากเทคนิค DSC

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก
	(% Crystallinity)	T_m (°C)	$T_{c\ onset}$ (°C)
TPS 3	17 – 25	113	92
TPS 4	17 – 25	112	93
TPS 5	17 – 25	112	92

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ง (รูปที่ ง-15 ถึง ง-17) พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 4 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักของ โมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิในช่วง 0-150° C ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วงอุณหภูมิประมาณ 177-217° C ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของแป้งในช่วงอุณหภูมิประมาณ 303-307° C และช่วงที่สี่เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของ LDPE ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีค่าต่ำลง เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลมากขึ้น คือ จะเกิดการสลายตัวเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก กลีเซอรอลมีผลทำให้ความต้านทานต่อความร้อนลดลง [55]

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ได้จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE (°C)
TPS 3	448
TPS 4	447
TPS 5	430

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ได้ พบว่า ฟิล์มเป่าสูตร TPS 4 จะให้สมบัติดังกล่าวข้างต้นดีที่สุด จึงได้มีการนำสูตร TPS 4 ไปประยุกต์ใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ตามลำดับ

4.2 ผลการศึกษาหาปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชย่อยสลาย

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.1 พบว่า สูตรของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่เหมาะสมและดีที่สุด คือ สูตร TPS 4 ซึ่งมีอัตราส่วนการผสมของ LDPE : แบริ่งมันสำปะหลัง : สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) เป็น 100 : 30 : 5 และมีพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) 19.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE แต่ฟิล์มเป่าที่มีแบริ่งเป็นส่วนประกอบ จะมีผลทำให้สมบัติบางประการของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกลดลง จึงได้มีการนำออร์กาโนเคลย์มาปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของฟิล์มให้ดีขึ้น โดยได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชแล้วให้สมบัติที่ดีที่สุด

4.2.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์

จากการทดลอง พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE (1) และ Cloisite[®] 15A (2) สามารถเป่าขึ้นรูปได้สม่ำเสมอ ยกเว้น ฟิล์มที่มีการผสมกับออร์กาโนเคลย์ 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE จะมีการขึ้นรูปไม่ค่อยสม่ำเสมอ และมีการขาดเป็นช่วงๆ เนื่องจากความไม่เข้ากันของสารผสม และเมื่อสังเกตสีของแผ่นฟิล์มที่ได้ พบว่า ฟิล์มเป่าที่ได้มีสีขาวขุ่น และจะมีความขุ่นมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีปริมาณของออร์กาโนเคลย์มากขึ้น และความหนาของฟิล์มที่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนา (μm)
TPS/C3/1	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 100
TPS/C3/2	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 90
TPS/C5/1	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 100
TPS/C5/2	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	70 – 100
TPS/C7/1	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	90 – 100
TPS/C7/2	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	90 – 100
TPS/C10/1	สามารถเป่าขึ้นรูปได้ แต่มีการขาดเป็นบางช่วง	90 – 110
TPS/C10/2	สามารถเป่าขึ้นรูปได้ แต่มีการขาดเป็นบางช่วง	90 – 110

4.2.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล

จากการศึกษาค่า MFI ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (TPS) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์ พบว่า ค่า MFI ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณของออร์กาโนเคลย์เพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า อนุภาคของแป้งและออร์กาโนเคลย์ที่เป็นของแข็งจะเข้าไปขวางการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ ส่งผลให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ช้าลง [54] หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นได้กับพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารตัวเติมที่เป็นของแข็งลงไป ดังแสดงผลในตารางที่ 4.7

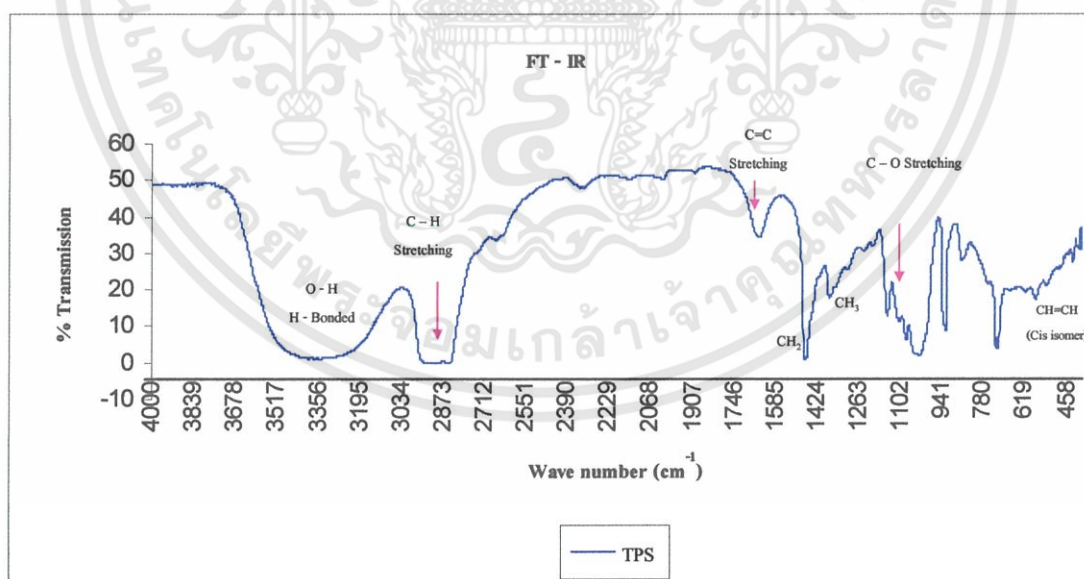
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า MFI ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE (1) และ Cloisite[®] 15A (2) พบว่า ค่า MFI ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A จะมีแนวโน้มที่สูงกว่า หรือมีค่าความหนืดที่ต่ำกว่า เนื่องจาก ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A เป็นออร์กาโนเคลย์ที่มีการดัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมทำให้มีความเป็นขั้วน้อยลง หรือไม่มีขั้ว [12] จึงสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ (LDPE) ที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่า Mac – gel[®] SAC GRADE ซึ่งเป็นออลูมิโนซิลิเกต ที่มีความเป็นขั้วสูงกว่า

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel[®] SAC GRADE (1) และ Cloisite[®] 15A (2)

สูตร	MFI (g/10 min)
TPS	2.38 ± 0.08
TPS/C3/1	2.18 ± 0.13
TPS/C3/2	2.34 ± 0.05
TPS/C5/1	1.84 ± 0.11
TPS/C5/2	1.92 ± 0.22
TPS/C7/1	1.78 ± 0.08
TPS/C7/2	1.82 ± 0.13
TPS/C10/1	1.66 ± 0.05
TPS/C10/2	1.68 ± 0.08

4.2.3 ผลการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง

ผลการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค FTIR แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 – 4.7

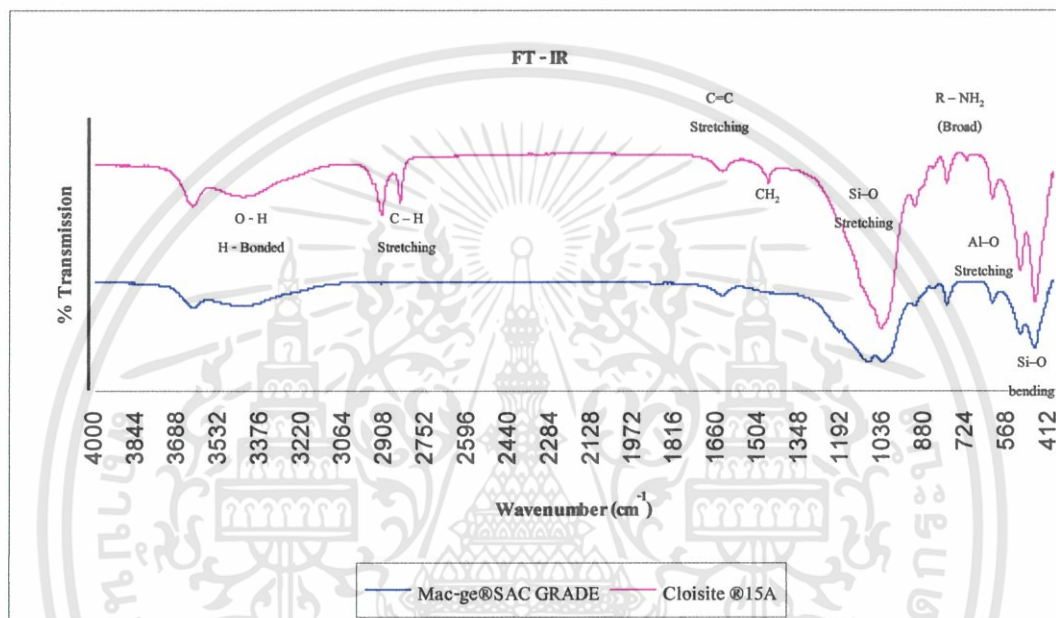


รูปที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS 4)

จากการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS4) ด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4.4 พบพิกที่ที่สำคัญ ได้แก่ หมู่ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง 3500-3250 cm^{-1}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H- bonding ที่ตำแหน่ง 3367 cm^{-1} หมู่ C-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ หมู่ C=C Stretching ที่ตำแหน่ง $1660\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้ยังมี CH_2 และ CH_3 ที่ตำแหน่ง 1460 cm^{-1} และ 1367 cm^{-1} ตามลำดับ [54,57] นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง $1250\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีกของหมู่ C-O-C Stretching และ C-O-H Stretching โดยจะมีความยาวคลื่นที่แตกต่างกันไปตามแรงในการยึดเกาะกันระหว่างพันธะไฮโดรเจนของแป้ง กลิเซอรอล และพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [38]

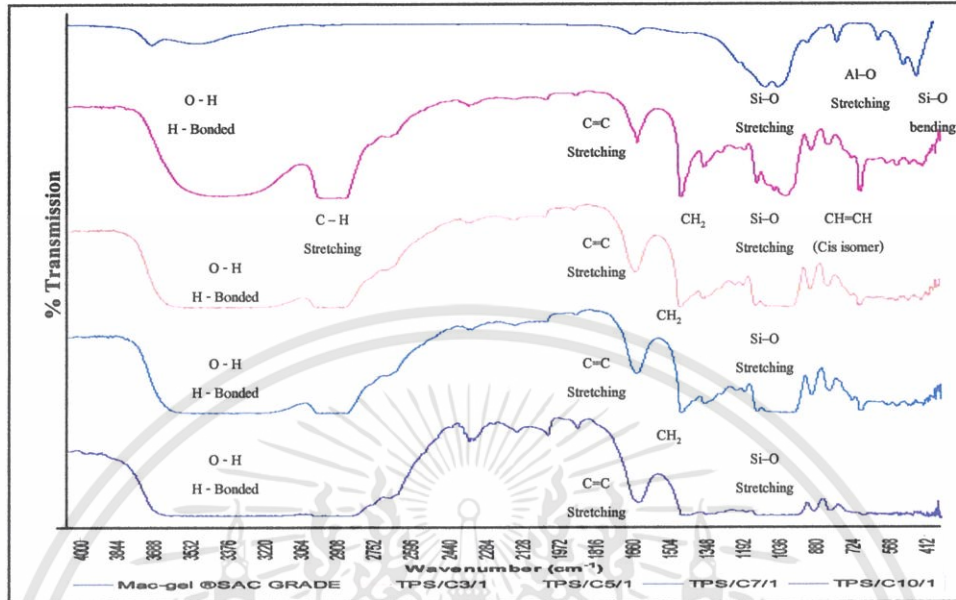


รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel® SAC GRADE และ Cloisite® 15A

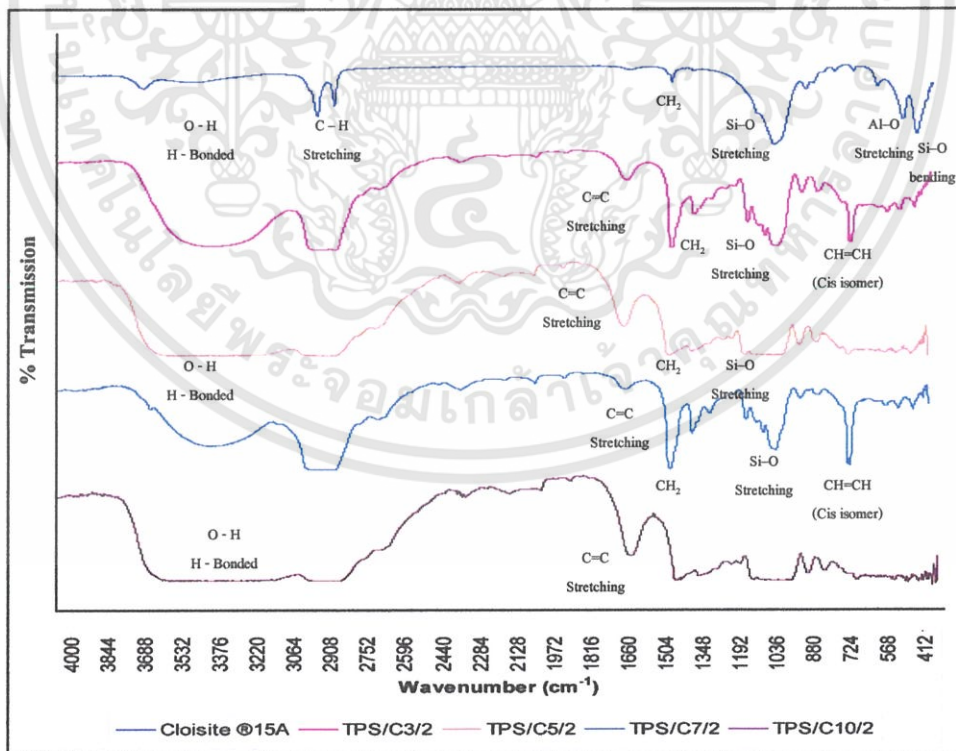
จากการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดด้วย FT - IR แสดงดังรูปที่ 4.5 พบพีกที่สำคัญ ได้แก่ หมู่ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3500\text{--}3250\text{ cm}^{-1}$ H- bonding ที่ตำแหน่ง 3631 cm^{-1} หมู่ C=C Stretching ที่ตำแหน่ง $1660\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Si-O Stretching ที่ตำแหน่ง $1150\text{--}1015\text{ cm}^{-1}$ R - NH_2 broad ที่ตำแหน่ง $860\text{--}760\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Al-O Stretching ที่ตำแหน่ง 521 cm^{-1} และ Si - O bending from aluminosilicate layers ที่ตำแหน่ง 456 cm^{-1} และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิด จะพบว่า ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A จะมีหมู่ C-H Stretching ของ CH_2 ที่ตำแหน่ง $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ และมีหมู่ CH_2 ที่ตำแหน่ง 1465 cm^{-1} [57]

จากการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดด้วย FT - IR แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งพบพีกที่สำคัญของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์เช่นเดียวกับรูปที่ 4.4 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของออร์กาโนเคลย์ ได้แก่ หมู่ Si-O Stretching ที่ตำแหน่ง $1150\text{--}1015\text{ cm}^{-1}$ R - NH_2 broad ที่ตำแหน่ง 860

– 760 cm^{-1} หมู่ Al-O Stretching ที่ตำแหน่ง 521 cm^{-1} และ Si – O bending from aluminosilicate layers ที่ตำแหน่ง 456 cm^{-1} [57, 58]



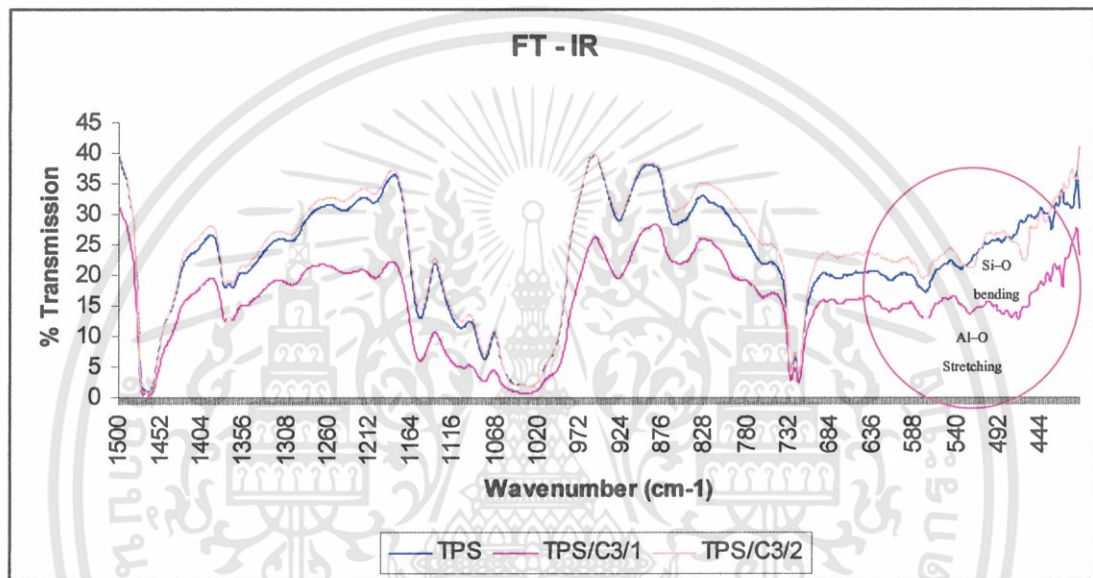
รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE



รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

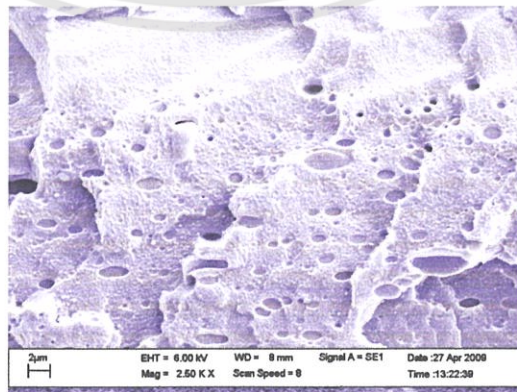
เมื่อเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ดังรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่าอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์ปรากฏพีกของซิลิเกต Si – O Stretching ($1150 - 1015 \text{ cm}^{-1}$) ซึ่งซ้อนทับกับพีกของ C-O Stretching ($1250-1000 \text{ cm}^{-1}$) ซึ่งเป็นพีกของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของ Al-O Stretching (521 cm^{-1}) และพีกของ Si – O bending from alumino silicate layers (456 cm^{-1}) ซึ่งแตกต่างจากอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้มีสารออร์กาโนเคลย์อยู่จริง



รูปที่ 4.8 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์ 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE

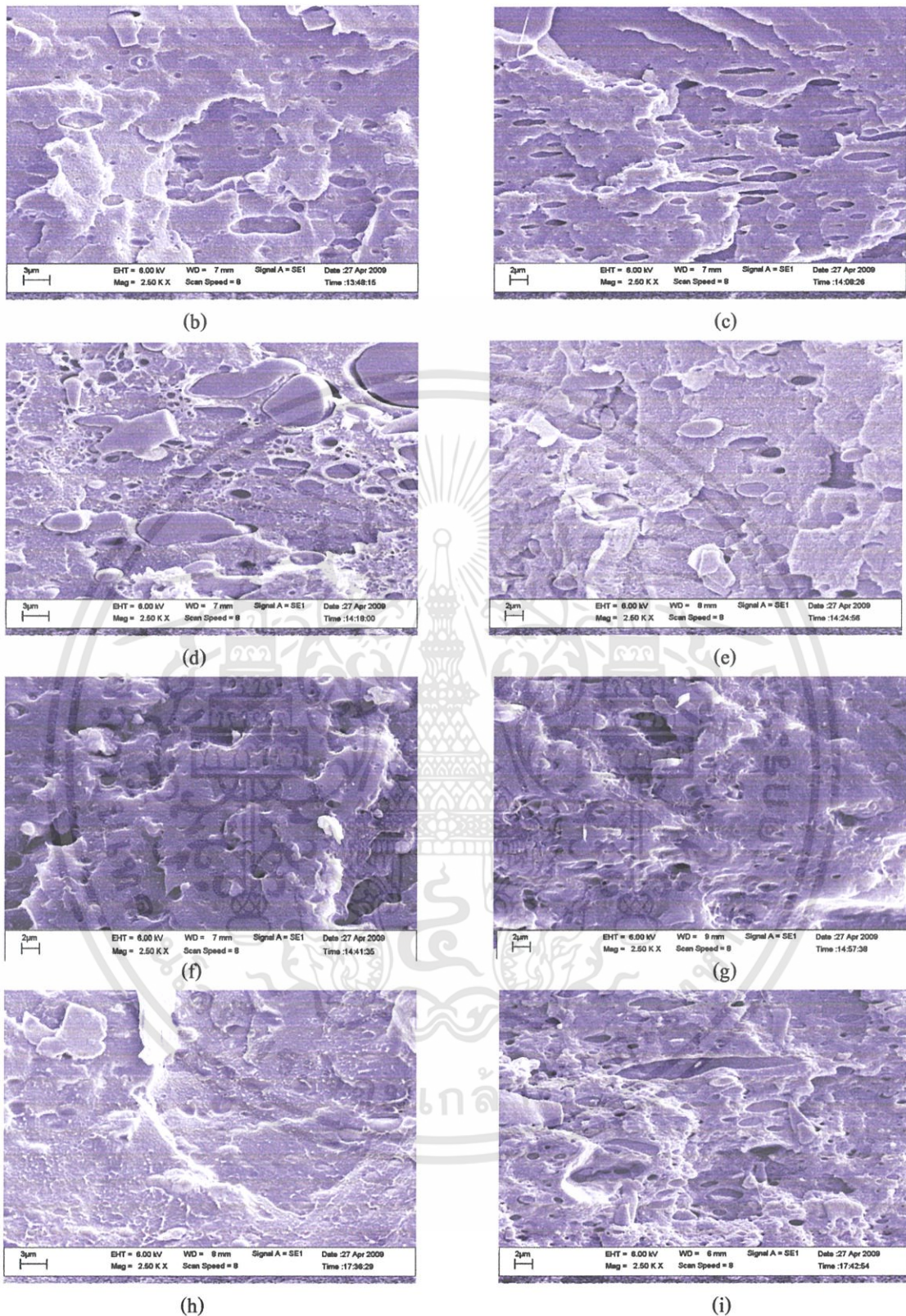
4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังและออร์กาโนเคลย์ภายใน LDPE ด้วยเทคนิค SEM/EDX ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

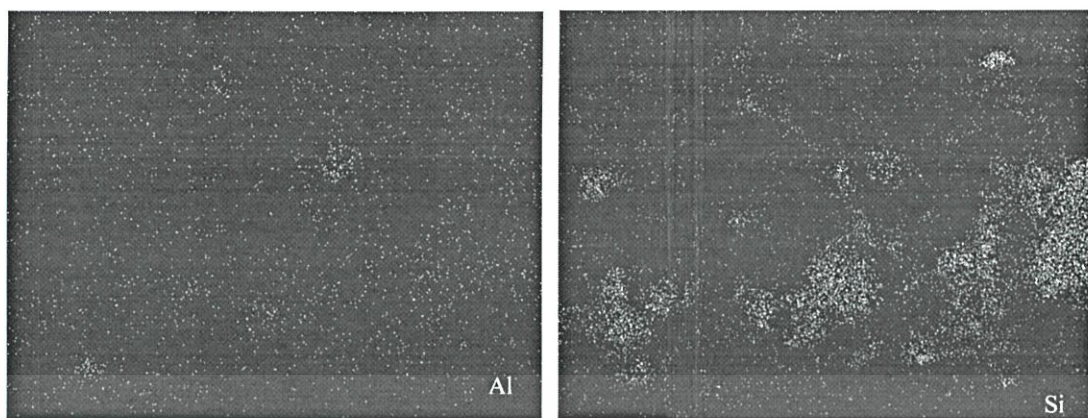


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มเป่าเทอร์โม

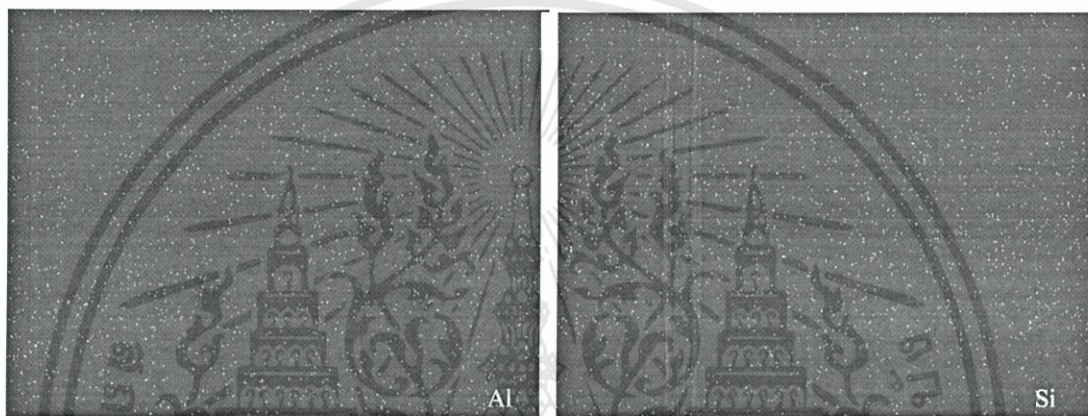
พลาสติกสตาโรล และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรต่างๆ

- (a) TPS (b) TPS/C3/1 (c) TPS/C3/2 (d) TPS/C5/1 (e) TPS/C5/2
 (f) TPS/C7/1 (g) TPS/C7/2 (h) TPS/C10/1 (i) TPS/C10/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



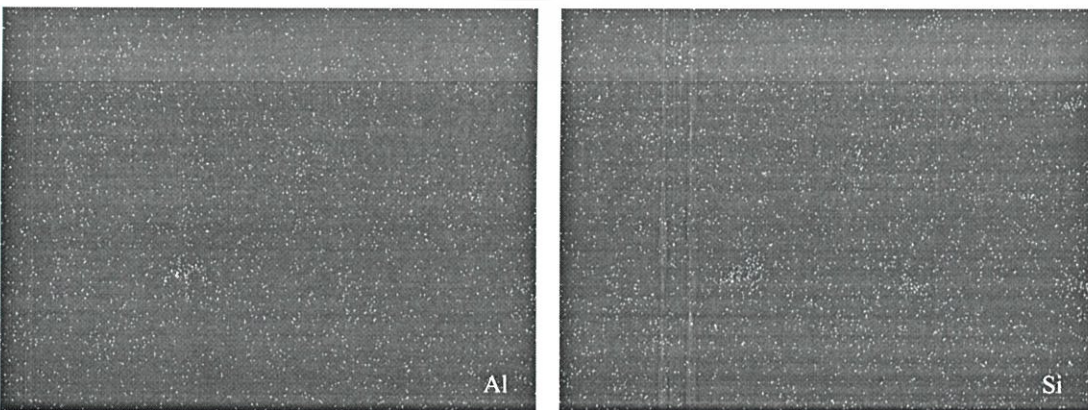
(a)



(b)

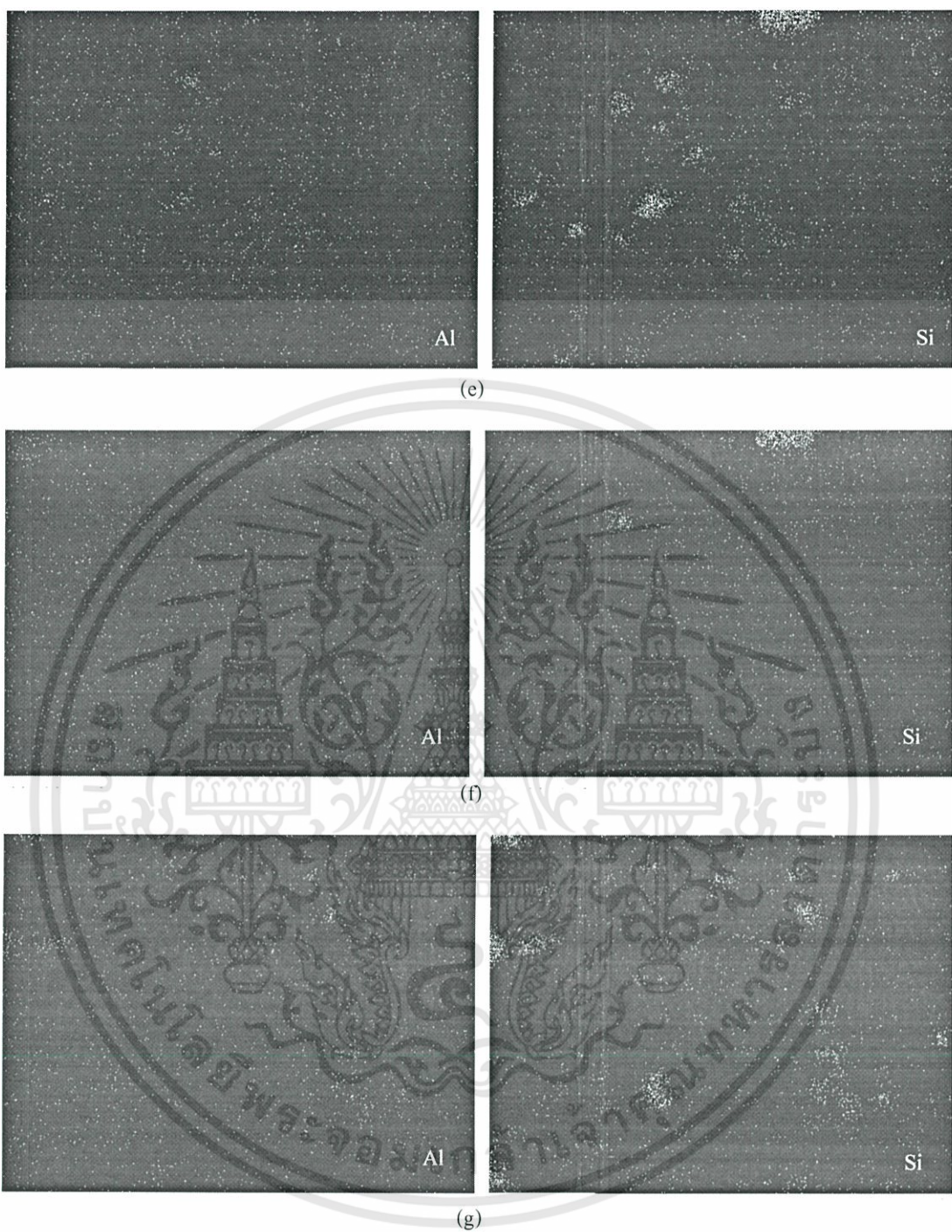


(c)

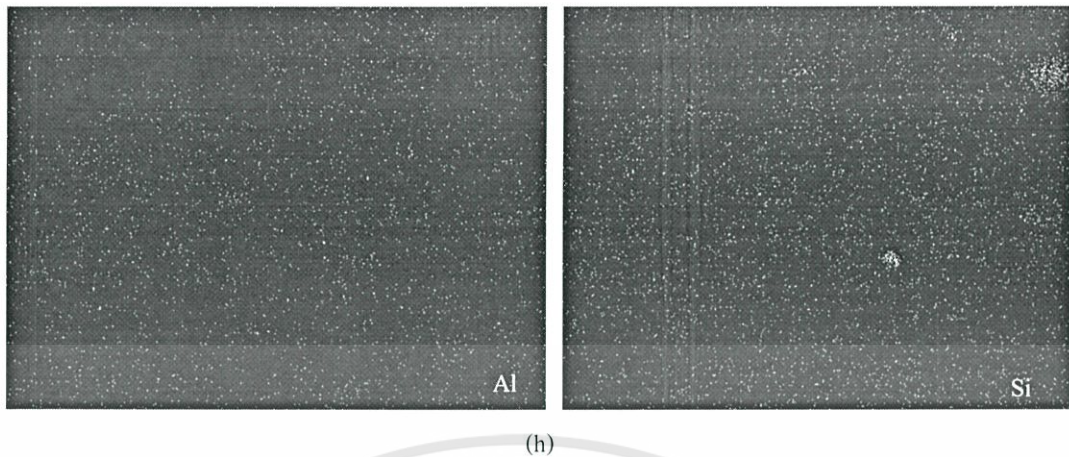


(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร

- | | | | |
|--------------|--------------|---------------|---------------|
| (a) TPS/C3/1 | (b) TPS/C3/2 | (c) TPS/C5/1 | (d) TPS/C5/2 |
| (e) TPS/C7/1 | (f) TPS/C7/2 | (g) TPS/C10/1 | (h) TPS/C10/2 |

จากรูปที่ 4.9 (a) เป็นภาพของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ซึ่งจะพบว่ามีอนุภาคของแป้งแทรกตัวและกระจายตัวอยู่ภายในพื้นผิวของ LDPE สำหรับรูปที่ 4.9 (b – i) เป็นภาพของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ซึ่งมีอนุภาคของแป้งแทรกตัวและกระจายตัวอยู่ภายในพื้นผิวของ LDPE ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ยังคงแยกวิภาคกันอยู่ โดยรูปที่ 4.9 (g) ซึ่งเป็นฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/2 จะมีความเข้ากันได้ของสารผสมที่ค่อนข้างดี แต่ไม่สามารถแยกอนุภาคของแป้งและออร์กาโนเคลย์ออกจากกันได้อย่างชัดเจน จึงได้ทำการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX และจากทฤษฎี พบว่าแร่ซิลิกेटในกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์นี้มีสูตรโครงสร้างทางทฤษฎีเหมือนกัน คือ $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$ แต่จะต่างกันที่ปริมาณการถูกแทนที่ของอะตอม Si หรือ Al ในโครงสร้างของผลึกด้วยธาตุอื่นๆ [12] ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ธาตุอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ซึ่งเป็นธาตุที่สำคัญในออร์กาโนเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (a – h) พบว่า ปริมาณของธาตุอลูมิเนียม และซิลิกอนมีปริมาณที่มากขึ้นตามปริมาณของออร์กาโนเคลย์ที่มากขึ้น โดยธาตุอลูมิเนียมจะมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อยในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE (รูปที่ 4.10 (a), 4.10 (c), 4.10 (e) และ 4.10 (g)) และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของธาตุซิลิกอนที่เป็นธาตุหลักของออร์กาโนเคลย์ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่มาก จะมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น เมื่อปริมาณของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปที่ 4.10 (a), 4.10 (e) และ 4.10 (g) ซึ่งเป็นรูปของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE จะสังเกตเห็นกลุ่มก้อนของธาตุซิลิกอนได้มากกว่ารูปที่

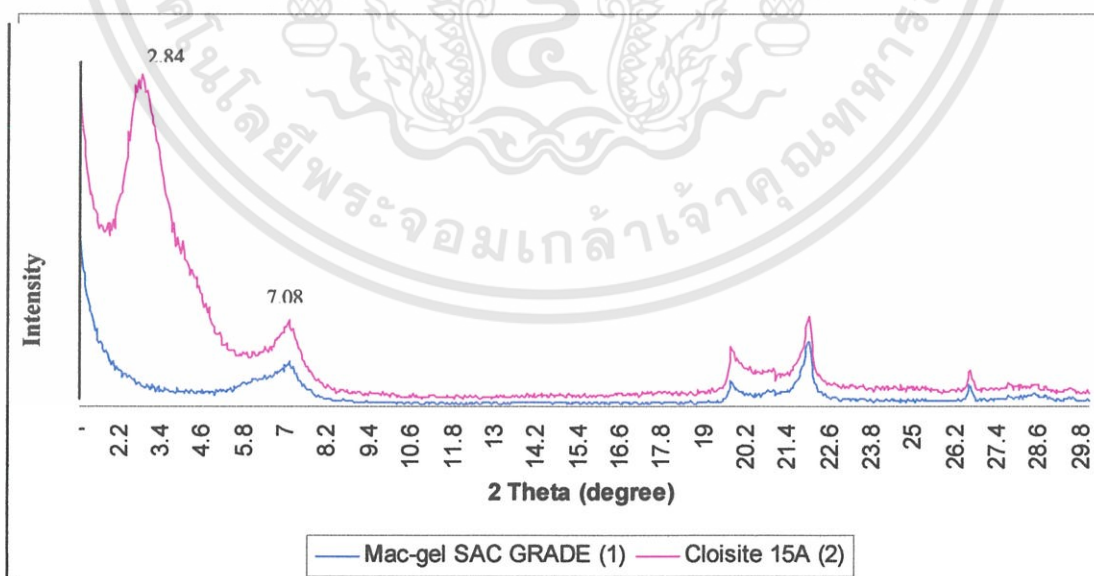
4.10 (b), 4.10 (d), 4.10 (f) และ 4.10 (h) ซึ่งเป็นรูปของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับ ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A โดยฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/2 (รูปที่ 4.10 (f)) จะมีการกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียม และซิลิกอนที่สม่ำเสมอที่สุด และมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนน้อยที่สุด ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A มีการกระจายตัวใน LDPE ได้ดีกว่าออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE เนื่องจากออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A สามารถเข้ากับ LDPE ได้ดีกว่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อที่ 4.2.2 จึงส่งผลให้สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ดีกว่าสมบัติของฟิล์มเป่าที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE ด้วย

4.2.5 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค XRD

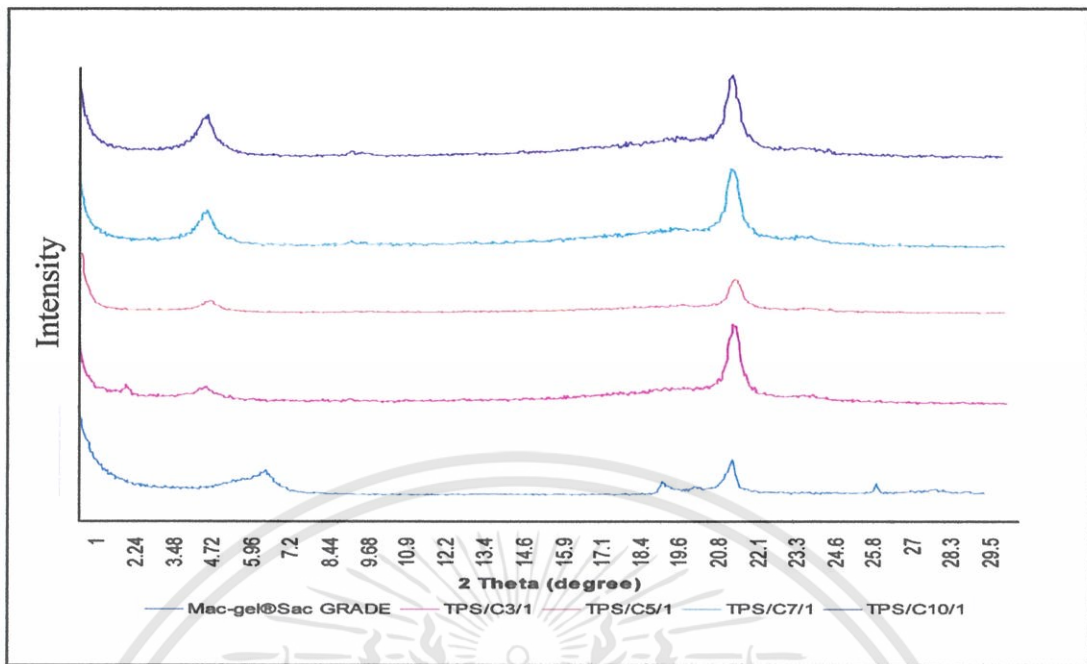
จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE ด้วยเทคนิค XRD ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.08° และ 22° ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 12.47 \AA และ 4.04 \AA ตามลำดับ และออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 2.84° และ 7.08° ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่า ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 31.07 \AA และ 12.47 \AA ตามลำดับ ซึ่งระยะห่างระหว่างชั้นของ Cloisite® 15A มีค่าสูงกว่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Mac – gel® SAC GRADE เนื่องจาก มีเกลือควอเทอร์นารี แอมโมเนียมที่ใช้ในการตัดแปรโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A จึงทำให้มีระยะห่างระหว่างชั้นที่มากกว่าระยะห่างระหว่างชั้นของ Mac – gel® SAC GRADE [10] ดังนั้น เมื่อนำไปผสมกับเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชจะทำให้สายโซ่ของ LDPE สามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้มากขึ้น ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.11 [10,12]

เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในเทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.8 พบว่า เทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE (1) จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้นจาก 12.47 \AA เป็น 17 \AA และ 22° เป็น 21° เนื่องจาก สายโซ่ของ LDPE ได้แทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ จึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เพิ่มมากขึ้น แต่ชั้นของออร์กาโนเคลย์ยังคงมีการยึดเหนี่ยวระหว่างกันอยู่ทำให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์ไม่แยกออกจากกันอย่างอิสระ ดังนั้น เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE จึงเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposite) [14] โดยที่มีความเข้มข้นของออร์กาโนเคลย์ที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์อย่างมีนัยสำคัญ และจากรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.8 พบว่า เทอร์โมพลาสติกสคาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด

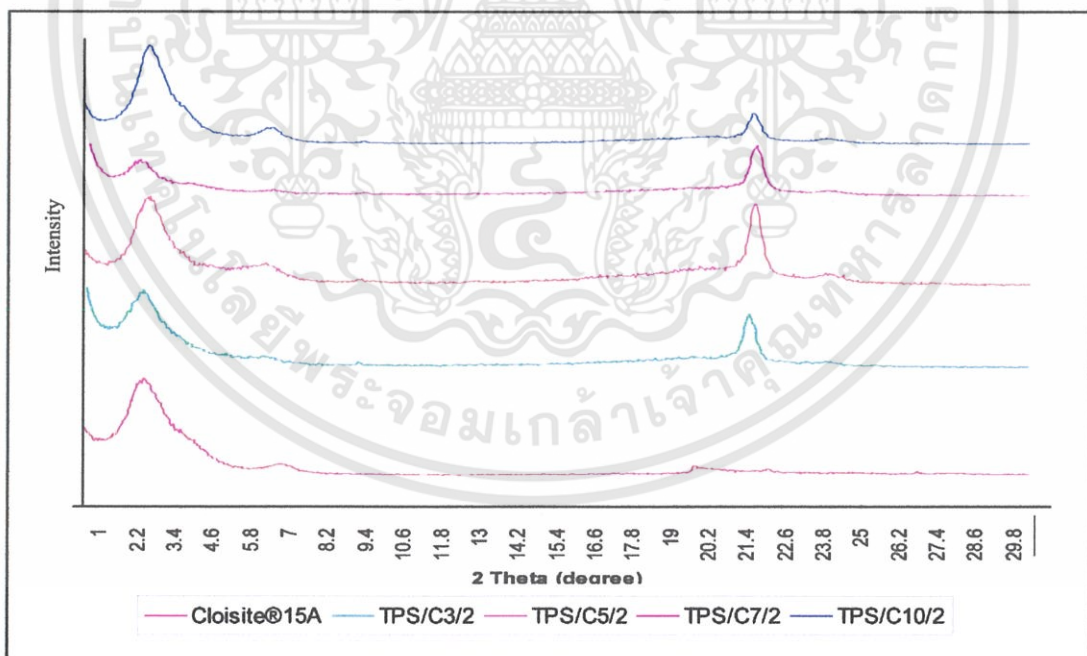
Cloisite[®] 15A มีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ใกล้เคียงกัน และมีระยะห่างระหว่างชั้นใกล้เคียงกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A แต่จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ที่มากกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE เนื่องจาก ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A มีเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมที่ใช้ในการดัดแปรโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A จึงทำให้มีระยะห่างระหว่างชั้นที่มาก [10] สายโซ่ของ LDPE จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปได้มากขึ้น ส่งผลให้มีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์มากขึ้นด้วย แต่ชั้นของออร์กาโนเคลย์ยังคงมีการยึดเหนี่ยวระหว่างกันอยู่ทำให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์ไม่แยกออกจากกันอย่างอิสระ ดังนั้น เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A จึงเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposite) เช่นเดียวกัน [14] โดยเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C3/2 และ TPS/C7/2 จะมีการหายไปของพีคที่ตำแหน่ง 7.08° แสดงว่า มีชั้นของออร์กาโนเคลย์บางส่วนที่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างอิสระ โดย TPS/C7/2 จะมีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์มากที่สุด คือ 32.93 Å ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ได้จากเทคนิค SEM/EDX ที่แสดงถึงการเข้ากันได้ของสารผสมค่อนข้างดี และมีการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอโดยมีการรวมเป็นกลุ่มน้อยกว่าสูตรอื่น นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 21.60° – 21.84° ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นของ LDPE ได้ประมาณ 4.1 Å เท่ากันทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ LDPE เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A



รูปที่ 4.12 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE และฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C3/1, TPS/C5/1, TPS/C7/1 และ TPS/C10/1



รูปที่ 4.13 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A และฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C3/2, TPS/C5/2, TPS/C7/2 และ TPS/C10/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D – spacing) ของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดและออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์

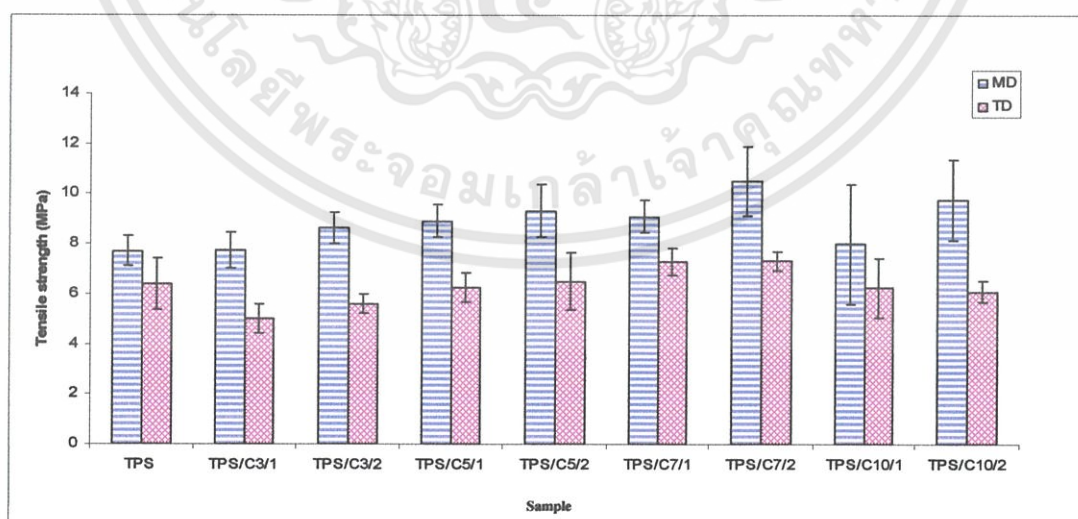
สูตร	2 θ (degree)	ระยะห่างระหว่างชั้น (Å)
Mac – gel [®] SAC GRADE	7.08	12.47
	22	4.04
Cloisite [®] 15A	2.83	31.07
	7.08	12.47
TPS	21.56	4.12
TPS/C3/1	5.04	17.37
	21.48	4.13
TPS/C3/2	2.88	30.64
	21.48	4.13
TPS/C5/1	5.16	17.11
	21.56	4.12
TPS/C5/2	3.24	27.24
	6.76	13.06
	21.68	4.09
TPS/C7/1	5.08	17.37
	21.48	4.13
TPS/C7/2	2.68	32.93
	21.64	4.10
TPS/C10/1	5.12	17.24
	21.56	4.12
TPS/C10/2	3.00	29.42
	6.64	13.30
	21.56	4.12

4.2.6 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

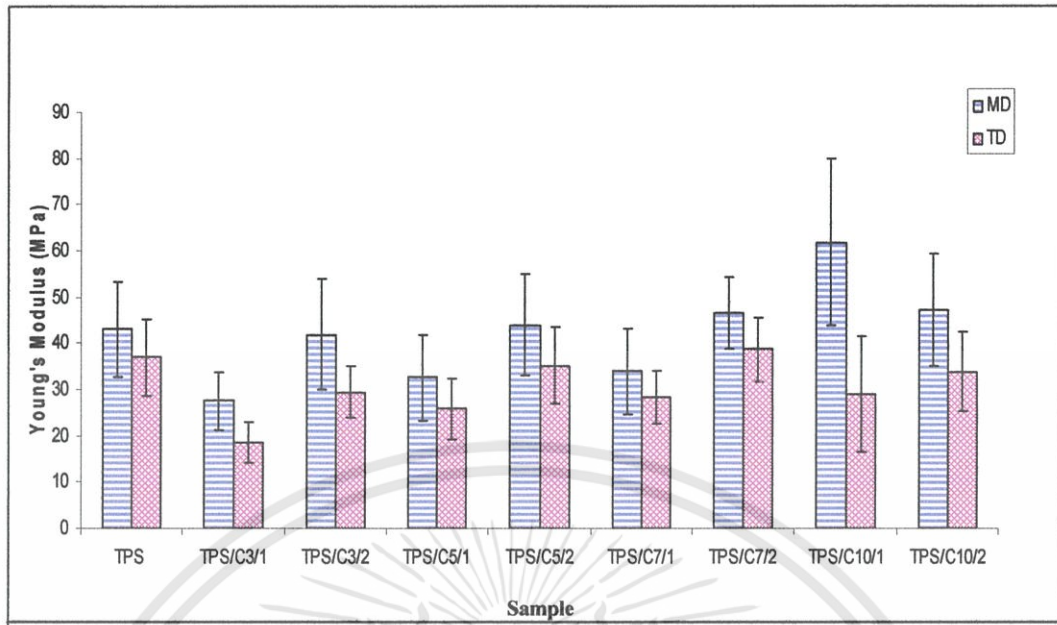
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A ที่ปริมาณ 3, 5, 7 และ 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช โดยทำการศึกษาค่าความแข็งแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

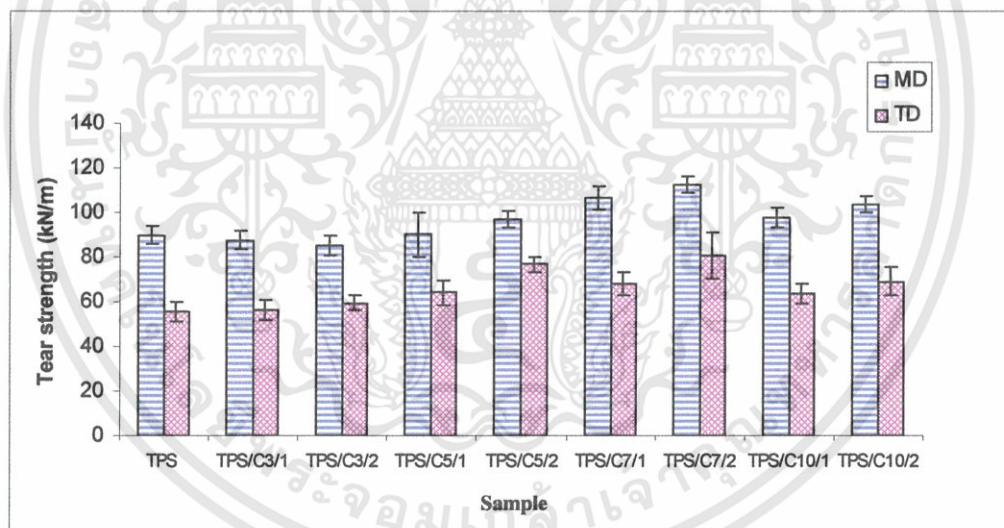
(Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตามขวางเครื่องจักร (TD) พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น โดย TPS/C5/1 จะมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด สำหรับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE และ TPS/C7/2 จะมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด สำหรับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ชนิด Cloisite[®] 15A เนื่องจาก ออร์กาโนเคลย์ประกอบด้วยธาตุอลูมิเนียม และซิลิกอน ซึ่งชั้นของซิลิกอนมีความแข็ง จึงเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ [10,12] และเมื่อสังเกตจากการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค SEM/EDX ในข้อที่ 4.2.4 พบว่า TPS/C7/2 มีการกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียม และซิลิกอนที่สม่ำเสมอที่สุด และมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนน้อยที่สุด นอกจากนี้ในการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD ในข้อ 4.2.5 พบว่า วัสดุที่เตรียมได้เป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposite) โดยสายโซ่ของ LDPE สามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ จึงทำให้การเสริมแรงของออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังนั้น ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อมีปริมาณของออร์กาโนเคลย์ 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE เนื่องจากอนุภาคของออร์กาโนเคลย์มีการกระจายตัวไม่ค่อยสม่ำเสมอ มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น มีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ที่น้อยกว่า และมีความสามารถในการเข้ากันได้ น้อยกว่าออร์กาโนเคลย์ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ที่มีปริมาณรองลงมา แต่ค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มต่ำกว่าค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 – 4.16 และภาคผนวก ค ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A



รูปที่ 4.15 ค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel[®]SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A



รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel[®]SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A

จากรูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงให้เห็นว่าออร์กาโนเคลย์มีผลทำให้ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงดึงฉีกขาดเพิ่มขึ้นในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) ซึ่งแสดงลักษณะของฟิล์มเป็นแบบแข็งและเหนียว ในขณะที่ฟิล์มเป่าในทิศทางตามขวางเครื่องจักร (TD) จะเกิดการยืดออกเพียงเล็กน้อย และเมื่อให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่อง ฟิล์มจะเกิดการเสียหาย ซึ่งแสดงลักษณะของฟิล์มเป็นแบบแข็งเปราะ แสดงว่าการเติมออร์กาโนเคลย์

ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติเป็นแอนไอโซโทรปิกมากขึ้น [10] ทั้งนี้ สมบัติเชิงกลในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและตามขวางเครื่องจักรแตกต่างกันมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของซิลิเกตจัดเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (Aspect ratio) สูง เมื่อผสมกับพอลิเมอร์หลอมเหลวจะทำให้มีความหนืดสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และเมื่อถูกดึงยืดขณะขึ้นรูปจะทำให้อนุภาคของซิลิเกตมีการจัดเรียงตัวตามแนวแรง (MD) มากขึ้น ซึ่งเป็นการเสริมแรงตามแนวแรง แต่จะมีผลทำให้ฟิล์มเกิดการเปราะและขาดง่ายในแนวตั้งฉากกับแนวแรง (TD) [38]

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติดังกล่าวของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด พบว่า ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ซึ่งเป็นออร์กาโนเคลย์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียม มีความสามารถในการกระจายตัวและเข้ากันได้กับฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ดีกว่าออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel® SAC GARDE ที่เป็นอนุเมนิมซิลิเกตที่ไม่ผ่านการดัดแปร นอกจากนี้ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ยังมีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ที่มากกว่า สายโซ่ของ LDPE จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมากกว่าออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel® SAC GARDE ด้วย ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าออร์กาโนเคลย์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกให้ดีขึ้นได้ โดยออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ที่ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE (TPS/C7/2) จะให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด

4.2.7 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาหาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c, onset}$) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และภาคผนวก ง (รูปที่ ง-2, ง-4 ถึง ง-9, ง-13 และ ง-14) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด พบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึกของ TPS/C5/1 มีค่ามากที่สุดสำหรับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel® SAC GARDE และค่าร้อยละความเป็นผลึกของ TPS/C7/2 มีค่ามากที่สุดสำหรับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A โดยที่ TPS/C7/2 จะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกที่มากกว่า TPS/C5/2 ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าที่ได้ กล่าวคือ สายโซ่ของ LDPE สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้ดี ค่าร้อยละความเป็นผลึกจึงมีค่ามาก ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึกของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เนื่องจากปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่แตกต่างกัน ไม่มีผลทำให้ผลึกของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ [46] แสดงว่า การเติมออร์กาโนเคลย์

ปริมาณ 3-10 % โดยน้ำหนักของ LDPE ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ชนิด Mac - gel[®] SAC GRADE (1) และ Cloisite[®] 15A (2) ที่ได้จากเทคนิค DSC

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก T_m (°C)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c\ onset}$ (°C)
TPS	17.77	112	93
TPS/C3/1	18.16	112	93
TPS/C3/2	20.32	112	94
TPS/C5/1	19.42	112	94
TPS/C5/2	16.04	113	92
TPS/C7/1	18.14	112	94
TPS/C7/2	22.83	112	92
TPS/C10/1	18.32	113	92
TPS/C10/2	16.10	114	92

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และภาคผนวก ง (รูปที่ ง-16, ง-18 ถึง ง-23, ง-27 และ ง-28) พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 4 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิในช่วง 0-130°C ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วงอุณหภูมิประมาณ 133-213°C ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของแป้งในช่วงอุณหภูมิประมาณ 293-304°C และช่วงที่สี่เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของ LDPE ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณของออร์กาโนเคลย์ 3 – 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE เนื่องจากกลีเซอรอลที่มีปริมาณมากกว่าออร์กาโนเคลย์ จึงทำให้สมบัติทางความร้อนลดลง แต่เมื่อปริมาณของออร์กาโนเคลย์เพิ่มมากขึ้นเป็น 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE จะทำให้ออร์กาโนเคลย์ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์มีบทบาทมากขึ้น คือ มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE ที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด

ที่ความเข้มข้นเท่ากัน พบว่า ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก แสดงว่า ชนิดของออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac - gel[®] SAC GRADE (1) และ Cloisite[®] 15A (2) ที่ได้จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE (°C)
TPS	447
TPS/C3/1	441
TPS/C3/2	447
TPS/C5/1	438
TPS/C5/2	438
TPS/C7/1	438
TPS/C7/2	434
TPS/C10/1	446
TPS/C10/2	455

จากผลการศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีต่อสมบัติของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่า ออร์กาโนเคลย์จัดเป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมพอสิต มีผลทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A ซึ่งเป็นออร์กาโนเคลย์ที่มีการคัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสามารถเข้ากับเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีขั้ว ในที่นี้ได้แก่ LDPE ได้ดีขึ้น จึงมีผลทำให้สมบัติดังกล่าวข้างต้นดีขึ้นด้วย [12]

4.3 ผลการศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีผลต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

จากการศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะและสมบัติของฟิล์มเป่าที่ได้จากหัวข้อที่ 4.2 โดยดูจากการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มว่าสามารถขึ้นรูปได้หรือไม่ และทำการตรวจสอบลักษณะของฟิล์มเบื้องต้น โดยการสังเกตจากสี ความขุ่นของฟิล์มที่ได้ การกระจายตัวของสาร ทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ ทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่า ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A สามารถขึ้นรูปได้ดีกว่า มีการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของ

สารดีกว่า จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า Mac – gel[®] SAC GRADE แต่มีราคาที่สูงกว่า โดยออร์กาโนเคลย์ที่ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด ดังนั้น จึงทำการศึกษาผลของการใช้ออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาทำการผสมกันแทน โดยมีอัตราส่วนของ Mac – gel[®] SAC GRADE : Cloisite[®] 15A เป็น 3.5 : 3.5, 4 : 3 และ 5 : 2 โดยคาดว่า จะสามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่ได้ให้ดีขึ้น และสามารถลดราคาค้นทุนลงได้

4.3.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสม (Mac - gel[®] SAC GRADE + Cloisite[®] 15A) 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE

จากการทดลอง พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE สามารถเป่าขึ้นรูปได้สม่ำเสมอดี และเมื่อสังเกตสีของแผ่นฟิล์มที่ได้ พบว่า ฟิล์มเป่าที่ได้มีสีขาวขุ่นใกล้เคียงกันทั้ง 3 สูตร และมีความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ลักษณะของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์สองชนิด (Mac - gel[®] SAC GRADE + Cloisite[®] 15A)

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนาเฉลี่ย (μm)
TPS/C7/3	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 90
TPS/C7/4	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	60 – 100
TPS/C7/5	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	70 – 100

4.3.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล

จากการศึกษาค่า MFI ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE พบว่า ค่า MFI ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก อัตราส่วนของออร์กาโนเคลย์ที่ใช้แตกต่างกันไม่มากนัก คือ มีอัตราส่วนของ Mac – gel[®] SAC GRADE : Cloisite[®] 15A เป็น 3.5 : 3.5, 4 : 3 และ 5 : 2 จึงไม่มีผลต่อค่าความหนืดของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสม และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า MFI ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด พบว่า เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A (TPS/C7/2) มีค่า MFI สูงที่สุด แสดงว่า มีความหนืดต่ำสุด เนื่องจาก ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A เป็นออร์กาโนเคลย์ที่มีการคัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือควอเทอนารีแอมโมเนียมทำให้มีความเป็นขั้วน้อยลง หรือไม่มีขั้ว [12] จึงสามารถเข้ากับพอลิเมอร์ (LDPE) ที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่า Mac – gel[®] SAC GRADE ซึ่งเป็นอลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีความเป็นขั้วสูงกว่า นอกจากนี้สายโซ่ของ

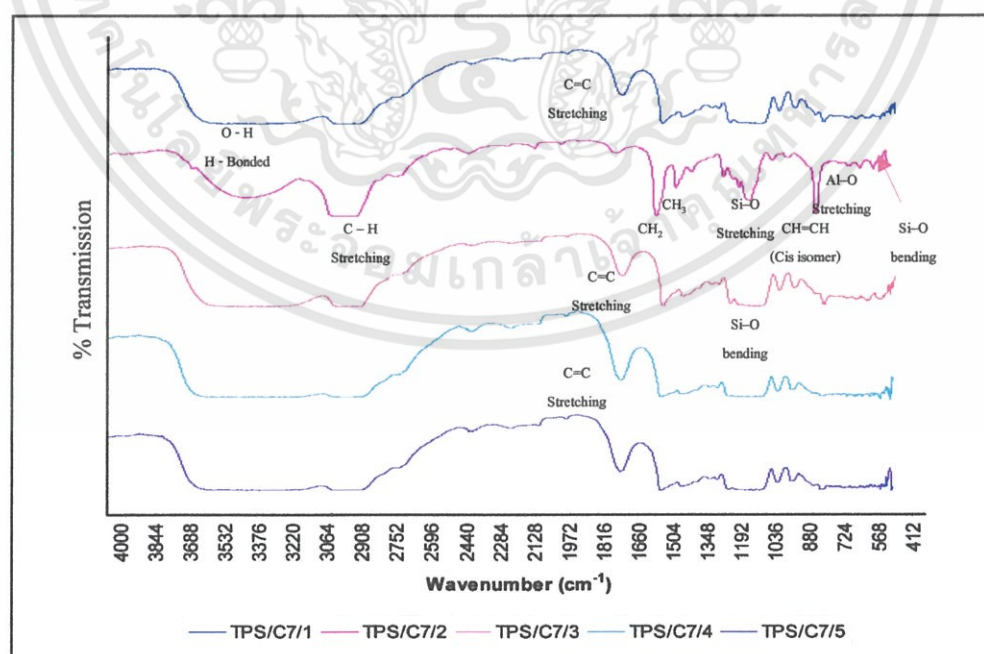
LDPE ยังสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย จึงทำให้มีความหนืดต่ำ ในขณะที่เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรอื่นๆ จะมีปริมาณของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel[®] SAC GRADE เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สายโซ่ของ LDPE เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น (เมื่อเทียบกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A) [54] ความหนืดจึงสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า MFI ที่ได้ลดต่ำลงตามลำดับ ดังแสดงตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE

สูตร	MFI (g/10 min)
TPS/C7/1	1.78 ± 0.08
TPS/C7/2	1.82 ± 0.13
TPS/C7/3	1.70 ± 0.07
TPS/C7/4	1.68 ± 0.04
TPS/C7/5	1.64 ± 0.05

4.3.3 ผลการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง

ผลการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ด้วยเทคนิค FTIR แสดงได้ดังรูปที่ 4.17



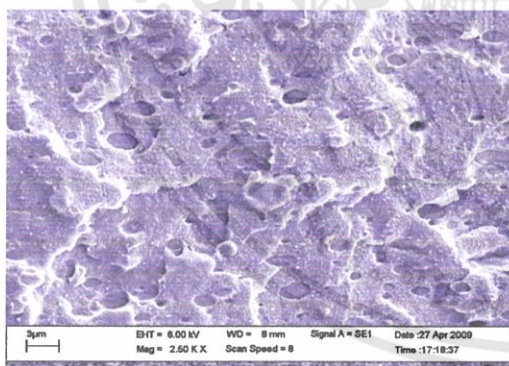
รูปที่ 4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ผสมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

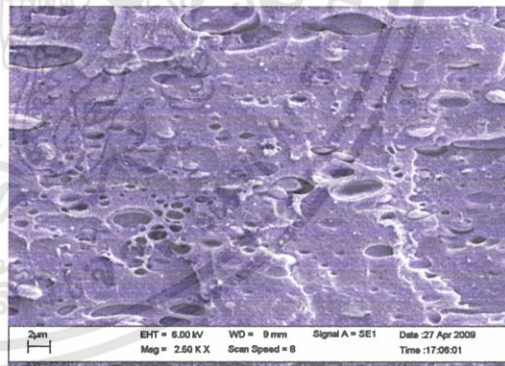
จากการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์สองชนิดด้วย FT - IR แสดงดังรูปที่ 4.17 พบพีกที่สำคัญ ได้แก่ หมู่ O-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3500-3250\text{ cm}^{-1}$ หมู่ C-H Stretching ที่ตำแหน่ง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ หมู่ C=C Stretching ที่ตำแหน่ง $1660-1600\text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้ยังมี CH_2 และ CH_3 ที่ตำแหน่ง $1475 - 1450\text{ cm}^{-1}$ และ $1380 - 1370\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ [57, 58] นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของออร์กาโนเคลย์ ได้แก่ หมู่ Si-O Stretching ที่ตำแหน่ง $1150-1015\text{ cm}^{-1}$ R - NH_2 broad ที่ตำแหน่ง $735 - 710\text{ cm}^{-1}$ หมู่ Al-O Stretching ที่ตำแหน่ง 521 cm^{-1} และ Si - O bending from alumino silicate layers ที่ตำแหน่ง 456 cm^{-1} และเมื่อทำการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด พบว่า พีกที่ปรากฏมีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้น สูตร TPS/C7/2 (เส้นที่ 2) จะปรากฏพีกของ CH_2 ที่ตำแหน่ง 1464 cm^{-1} CH_3 ที่ตำแหน่ง 1369 cm^{-1} และ R - NH_2 broad ที่ตำแหน่ง $735 - 710\text{ cm}^{-1}$ ได้ชัดเจนกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจาก มีปริมาณของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A มากกว่าสูตรอื่น ซึ่งในออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A จะมีการดัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือควอทอนารีแอมโมเนียมที่มี R - NH_2 broad จึงเป็นผลให้ปรากฏพีกดังกล่าวได้ชัดเจน [12, 58]

4.3.4 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

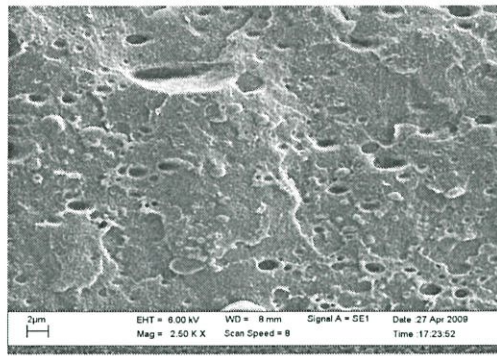
จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และการกระจายตัวของเป็มันสำปะหลังและออร์กาโนเคลย์ภายใน LDPE ด้วยเทคนิค SEM/EDX ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19



(a)



(b)



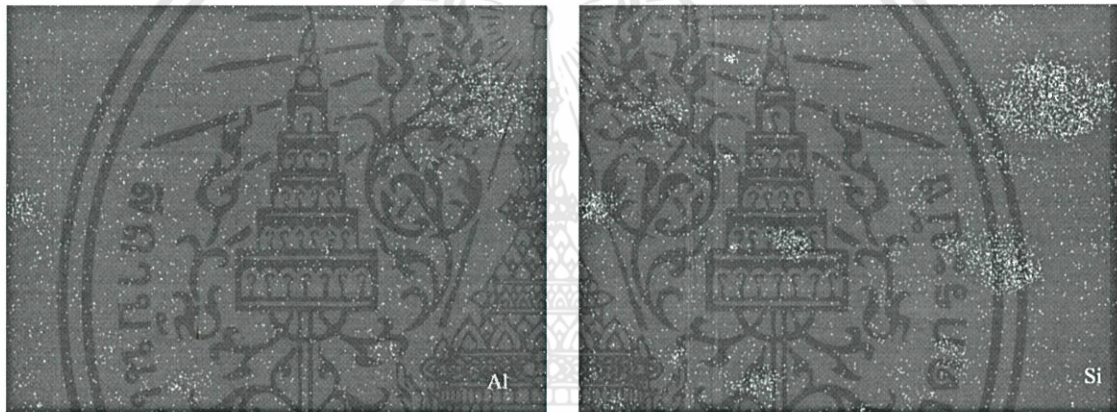
(c)

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดสูตร

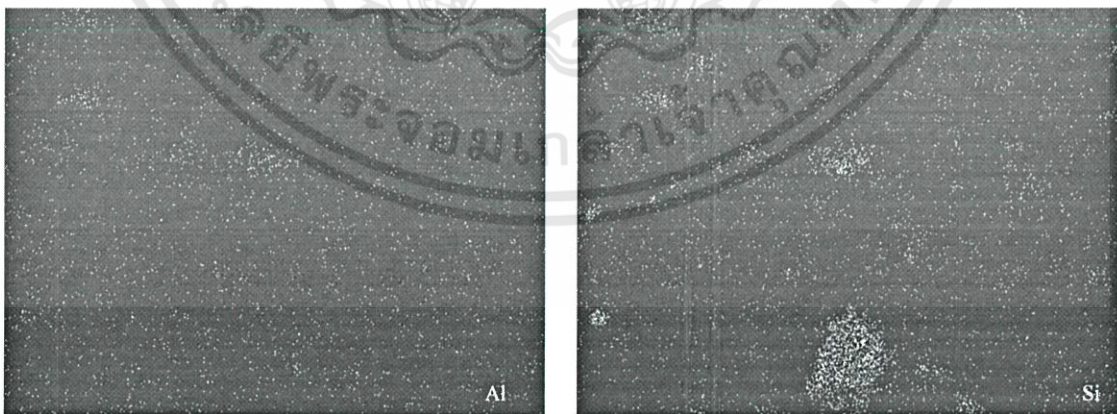
(a) TPS/C7/3

(b) TPS/C7/4

(c) TPS/C7/5

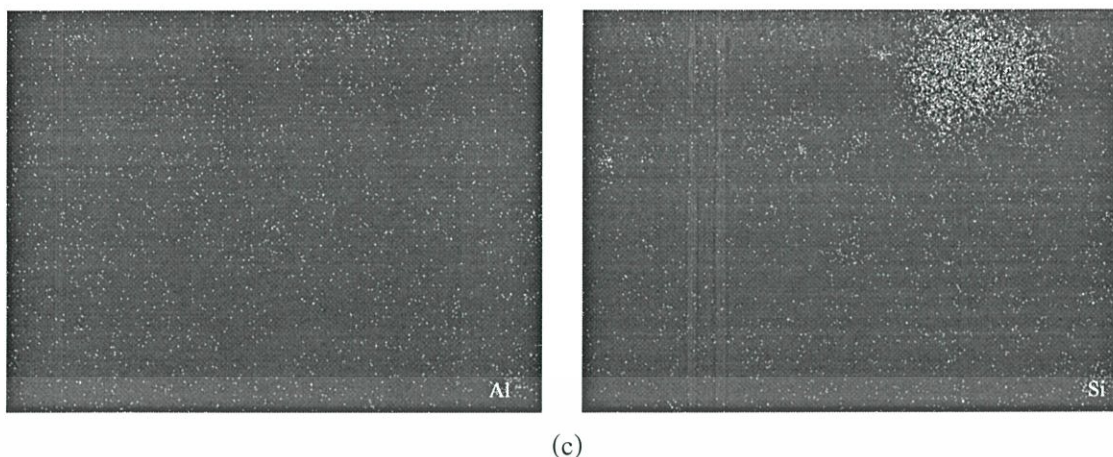


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ภาพการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดสูตร

(a) TPS/C7/3

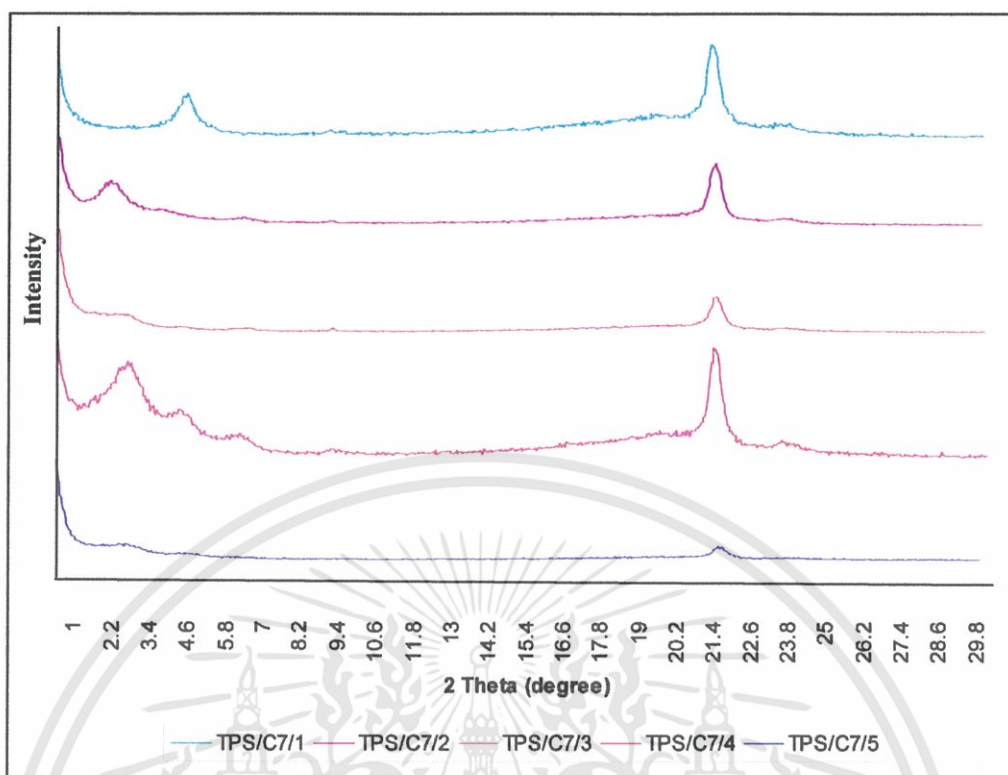
(b) TPS/C7/4

(c) TPS/C7/5

จากรูปที่ 4.18 พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังและออร์กาโนเคลย์ใน LDPE มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ โดยฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/3 และ TPS/C7/4 จะมีการกระจายตัวของสารที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกว่า TPS/C7/5 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นภาพการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDX โดยวิเคราะห์ธาตุอลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ที่อยู่ในโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ พบว่า การกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียมมีความสม่ำเสมอดี แต่ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/3 จะมียุทธของธาตุอลูมิเนียมอยู่บ้างเล็กน้อย สำหรับการกระจายตัวของธาตุซิลิกอน ซึ่งเป็นธาตุหลักในโครงสร้างของออร์กาโนเคลย์จะมีการจับกลุ่มกันอยู่ค่อนข้างมาก โดยฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/3 ยังคงมีการจับกลุ่มของธาตุซิลิกอนมากที่สุด และเมื่อสังเกตการกระจายตัวโดยรวมของธาตุ พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/4 จะมีการกระจายตัวของธาตุซิลิกอนที่สม่ำเสมอ และมีการจับตัวเป็นกลุ่มน้อยที่สุด ซึ่งการกระจายตัวของธาตุอลูมิเนียมและซิลิกอนเปรียบเสมือนการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ จึงกล่าวได้ว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/4 จะมีการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์สม่ำเสมอมากที่สุด มีความเข้ากันได้ของสารมากที่สุด จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดด้วย

4.3.5 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE แสดงดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.20 XRD patterns ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE

ตารางที่ 4.13 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D – spacing) ของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE

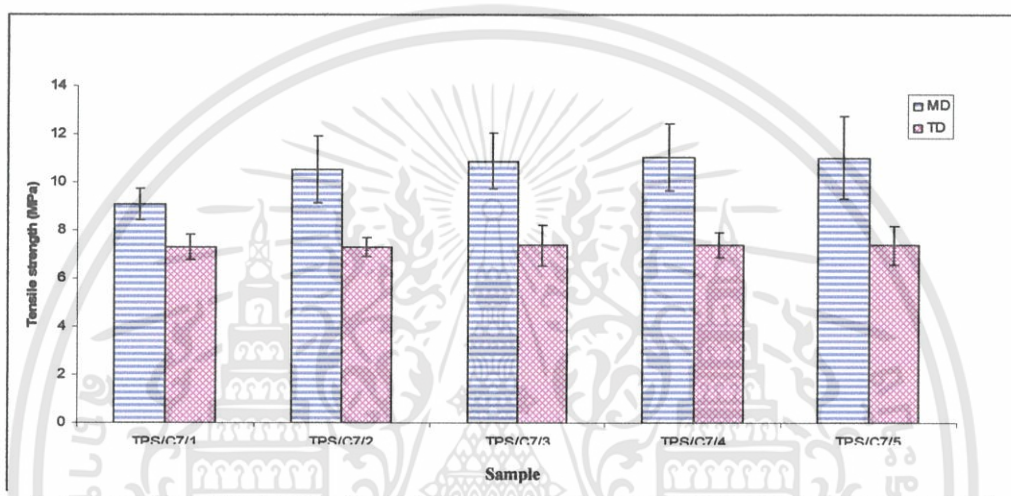
สูตร	2 θ (degree)	ระยะห่างระหว่างชั้น (Å)
TPS/C7/1	5.08	17.37
	21.48	4.13
TPS/C7/2	2.68	32.93
	21.64	4.10
TPS/C7/3	21.6	4.11
TPS/C7/4	3.2	27.58
	4.8	18.39
	6.4	13.79
	21.48	4.13
TPS/C7/5	21.8	4.07

จากรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.13 พบว่า เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/3 และ TPS/C7/5 ไม่ปรากฏพีคของออร์กาโนเคลย์ที่ตำแหน่ง 2θ ในช่วง $1^\circ - 10^\circ$ แสดงว่าสายโซ่ของ LDPE สามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ดี จนทำให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์เกิดการแยกออกจากกันอย่างอิสระ แต่จากการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ใน LDPE ที่ได้จากการทดสอบด้วย EDX พบว่า ชาติขุติคอนยังคงมีการรวมเป็นกลุ่มอยู่บ้างเล็กน้อย ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/3 และ TPS/C7/5 เป็นวัสดุนาโนคอมพอสิตชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposite) [31] แต่เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/4 จะปรากฏพีคของออร์กาโนเคลย์ที่ 2θ เท่ากับ 3.2° , 4.8° และ 6.4° จากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 27.58 \AA , 18.39 \AA และ 13.79 \AA ซึ่งมีระยะห่างระหว่างชั้นน้อยกว่าระยะห่างระหว่างชั้นของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A (สูตร TPS/C7/2) ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 32.93 \AA แต่มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel[®] SAC GRADE (สูตร TPS/C7/1) ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 17.37 \AA ดังแสดงในข้อที่ 4.2.5 แสดงว่า สายโซ่ของ LDPE สามารถแทรกตัวเข้าไประหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้มากกว่า TPS/C7/1 ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel[®] SAC GRADE แต่ยังคงน้อยกว่า TPS/C7/2 ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A และชั้นของออร์กาโนเคลย์ยังคงมีการยึดเหนี่ยวระหว่างกันอยู่ทำให้ออร์กาโนเคลย์ไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างอิสระ ดังนั้น เทอร์โมพลาสติกที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/5 จึงเป็นวัสดุนาโนคอมพอสิตชนิดแทรกตัว (Intercalated nanocomposites) [14] นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ $21.48^\circ - 21.80^\circ$ ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นของ LDPE ได้ประมาณ 4.1 \AA เท่ากันทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของ LDPE เปลี่ยนแปลง

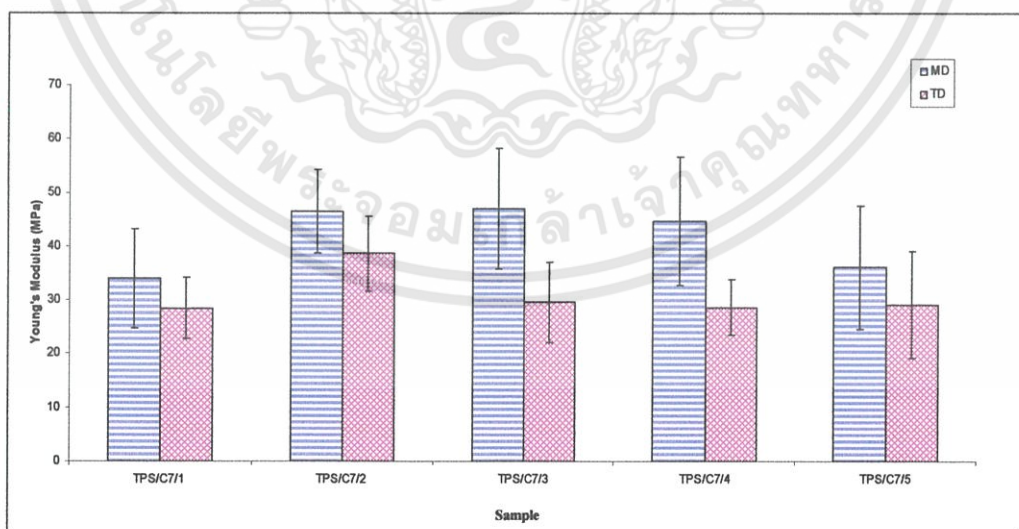
4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE สูตร TPS/C7/3, TPS/C7/4 และ TPS/C7/5 โดยทำการศึกษาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) และทิศทางตามขวางเครื่องจักร (TD) พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของออร์กาโนเคลย์ที่ใช้ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าหากมีการผสมในปริมาณที่มากขึ้น โดยให้เห็นความแตกต่างของแต่ละสูตรอย่างชัดเจน อาจพบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/4 มีสมบัติดังกล่าวดีที่สุด

เนื่องจาก มีการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสองสูตรที่เหลือ และฟิล์มที่ได้มีความเข้ากันได้ดี นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1 และ TPS/C7/2 พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/2 – TPS/C7/5 มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่า TPS/C7/1 เพียงเล็กน้อย แต่ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1 และ TPS/C7/2 จะมีค่าความแข็งแรงดึงฉีกขาดที่มากกว่า TPS/C7/3 – TPS/C7/5 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 – 4.23 และภาคผนวก ค ตามลำดับ

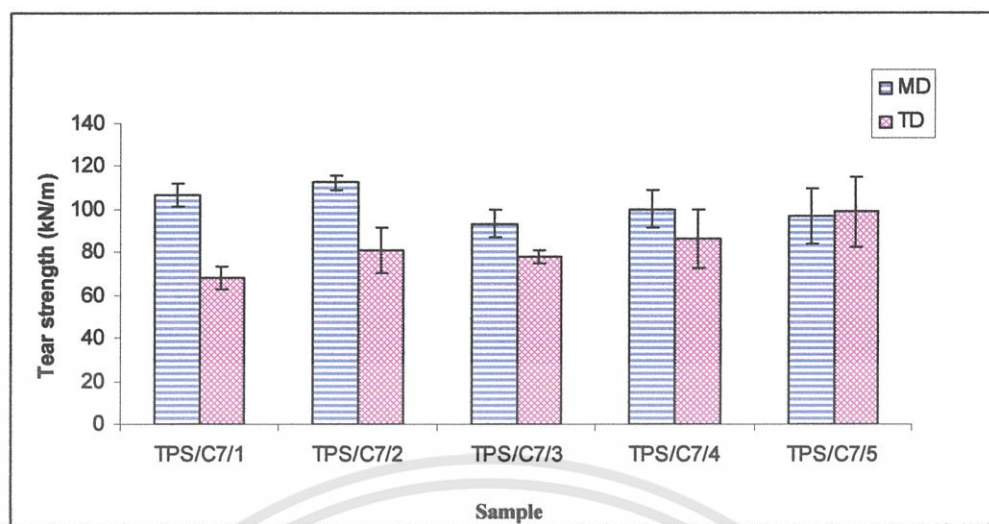


รูปที่ 4.21 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE



รูปที่ 4.22 ค่ามอดูลัสของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 7% โดยน้ำหนักของ LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE

4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดผสมกันปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE สูตร TPS/C7/3, TPS/C7/4 และ TPS/C7/5 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาหาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และภาคผนวก ง (รูปที่ ง-8 ถึง ง-12)

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ที่ได้จากเทคนิค DSC

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก T_m (°C)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c\ onset}$ (°C)
TPS/C7/1	18.14	112	94
TPS/C7/2	22.83	112	92
TPS/C7/3	16.10	113	92
TPS/C7/4	16.74	112	93
TPS/C7/5	16.64	112	93

จากตาราง พบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สองชนิดไม่มีความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของออร์กาโนเคลย์ที่ใช้ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงไม่มีผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละความเป็นผลึกและอุณหภูมิดังกล่าว และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด พบว่า TPS/C7/2 จะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงที่สุด เนื่องจาก สายโซ่ของ LDPE ในฟิล์มเป่าสูตร TPS/C7/2 สามารถแทรกตัวเข้าไปในออร์กาโนเคลย์ได้มาก และมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากที่สุด จึงทำให้มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงที่สุด

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ที่ได้จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE (°C)
TPS/C7/1	438
TPS/C7/2	434
TPS/C7/3	436
TPS/C7/4	457
TPS/C7/5	450

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.15 และภาคผนวก ง (รูปที่ ง-22 ถึง ง-26) ซึ่งเป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าด้วยเทคนิค TGA พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 4 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิในช่วง 0-150 °C ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วงอุณหภูมิประมาณ 155-197 °C ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของแป้งในช่วงอุณหภูมิประมาณ 304-308 °C และช่วงที่สี่เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของ LDPE ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/3 จะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวต่ำที่สุด คือ 436 °C ในขณะที่อีกสองสูตรที่เหลือ ได้แก่ TPS/C7/4 และ TPS/C7/5 จะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน และมีอุณหภูมิที่สูงกว่าสูตร TPS/C7/3 และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิด พบว่า TPS/C7/3 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกับ TPS/C7/1 และ TPS/C7/2 ในขณะที่ TPS/C7/4 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE ที่สูงที่สุด ซึ่งสันนิษฐานว่า อาจเป็นผลของกลีเซอรอล ซึ่งมีปริมาณมากกว่าออร์กาโนเคลย์ จึงส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม คือ ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE ลดลง แต่เมื่อปริมาณของออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE เพิ่มขึ้นด้วย หรืออาจเป็นผลมาจากฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ผสมสูตร TPS/C7/4 มีระยะห่างระหว่างชั้นที่น้อยกว่าสูตรอื่นๆ สายโซ่ของ LDPE ที่แทรกตัวเข้าไป

ระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ ซึ่งประกอบด้วยธาตุลูมิเนียม และซิลิกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ จึงทำให้สายโซ่ของ LDPE ได้รับความร้อนได้ช้าลง และใช้เวลานานขึ้นในการส่งผ่านความร้อนไปยังสายโซ่ของ LDPE จนเกิดการสลายตัว

4.3.8 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของออร์กาโนเคลย์

การวิเคราะห์หาต้นทุนของออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE ที่ใช้ในการผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ต้นทุนของออร์กาโนเคลย์

สูตร	ชนิดของออร์กาโนเคลย์	ราคา* (บาท/kg)	ปริมาณที่ใช้ (kg)	ราคา (บาท)	ราคารวม (บาท)	ความประหยัด (%)**
TPS/C7/1	Mac – gel [®] SAC GRADE	40	7	280	280	83
TPS/C7/2	Cloisite [®] 15A	240	7	1,680	1,680	0
TPS/C7/3	Mac – gel [®] SAC GRADE	40	3.5	140	980	42
	Cloisite [®] 15A	240	3.5	840		
TPS/C7/4	Mac – gel [®] SAC GRADE	40	4	160	880	48
	Cloisite [®] 15A	240	3	720		
TPS/C7/5	Mac – gel [®] SAC GRADE	40	5	200	680	60
	Cloisite [®] 15A	240	2	480		

*ราคาของออร์กาโนเคลย์ที่ใช้เป็นราคาโดยประมาณในปี พ.ศ. 2551

**ความประหยัดคิดเปรียบเทียบกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A

จากผลการนำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาผสมกันที่ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE พบว่า อัตราส่วนที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเป่าที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ โดยสมบัติต่างๆ ที่ได้มีความใกล้เคียงกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel[®] SAC GRADE และอาจมีสมบัติบางประการลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A แต่อยู่ในปริมาณที่

ยอมรับได้ จึงสามารถนำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาทำการผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่ได้ให้ดีขึ้น และสามารถลดราคาต้นทุนในการผลิตลงได้ประมาณ 40 – 60 %

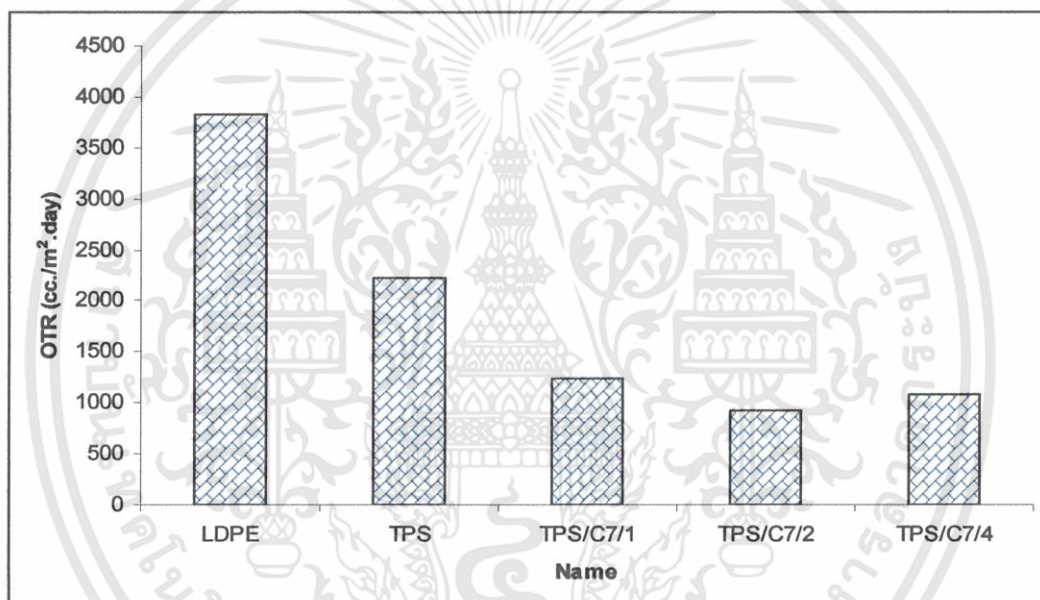
4.4 ผลการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและการย่อยสลายของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์

ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 เป็นการอภิปรายผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม ค่าดัชนีการไหล การตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD การศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรต่างๆ ในหัวข้อนี้จึงเป็นการอธิบายผลการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และผลการย่อยสลายของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ

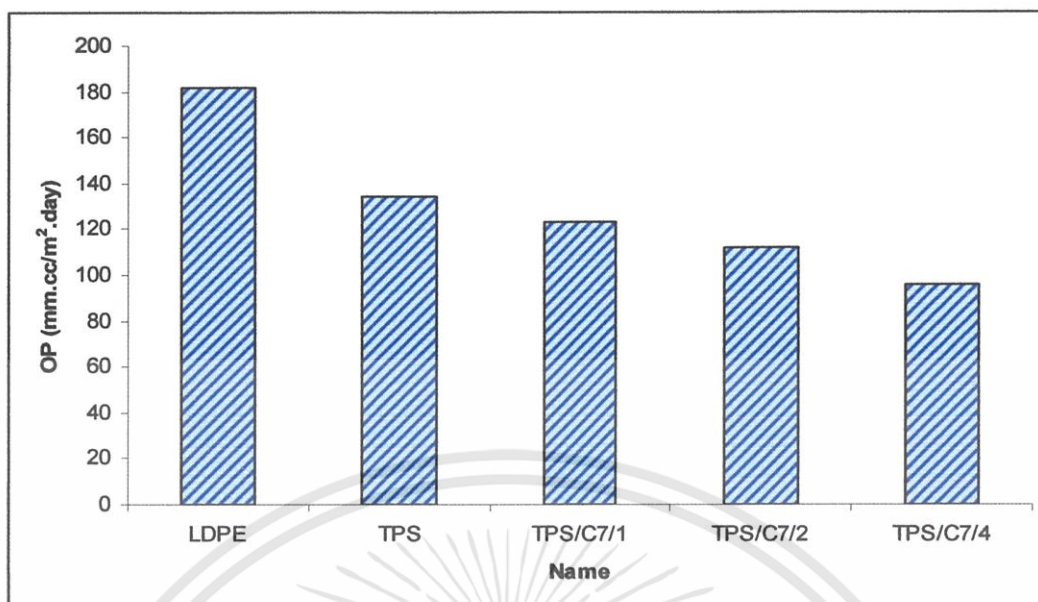
4.4.1 ผลการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

เนื่องจากในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ต้องการฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เพื่อรักษาคุณภาพของอาหาร และสามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1, TPS/C7/2 และ TPS/C7/4 โดยการศึกษาจากค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OPC) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 – 4.25 และภาคผนวก จ พบว่า ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OPC) ต่ำกว่าฟิล์มเป่า LDPE เนื่องจาก ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีความหนาของฟิล์มที่มากกว่าฟิล์มเป่า LDPE และเมื่อพิจารณาฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1, TPS/C7/2 และ TPS/C7/4 เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ พบว่า มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OPC) ลดลงเช่นกัน เนื่องจาก ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์มีค่าร้อยละความเป็นผลึกที่มากกว่าฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ จึงทำให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่านได้ยาก นอกจากนี้ อนุภาคซิลิเกตที่มีในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ มีลักษณะเป็นผลึกที่กระจายอยู่ใน LDPE ทำให้มีการจัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงดังรูปที่ 2.14 จึงส่งผลทำให้ก๊าซออกซิเจนเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และใช้เวลาในการซึม

ผ่านที่มากขึ้น อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP) จึงลดลง นอกจากนี้ พิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ยังมีความหนาของฟิล์มมากกว่าฟิล์มเป่า LDPE แต่มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ โดยจากทฤษฎีของ Tortuosity พบว่า การเพิ่มความหนาของฟิล์ม จะเป็นการเพิ่มระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจน ไปตามชั้นของอนุภาคซิลิเกตที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ดังนั้น การเพิ่มความหนาของฟิล์มจึงมีผลทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OPC) มีแนวโน้มลดลง [10] แสดงให้เห็นว่าออร์กาโนเคลย์สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มเป่า LDPE และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ให้สามารถต้านการซึมผ่านได้มากขึ้นได้



รูปที่ 4.24 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ในฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1, TPS/C7/2 และ TPS/C7/4



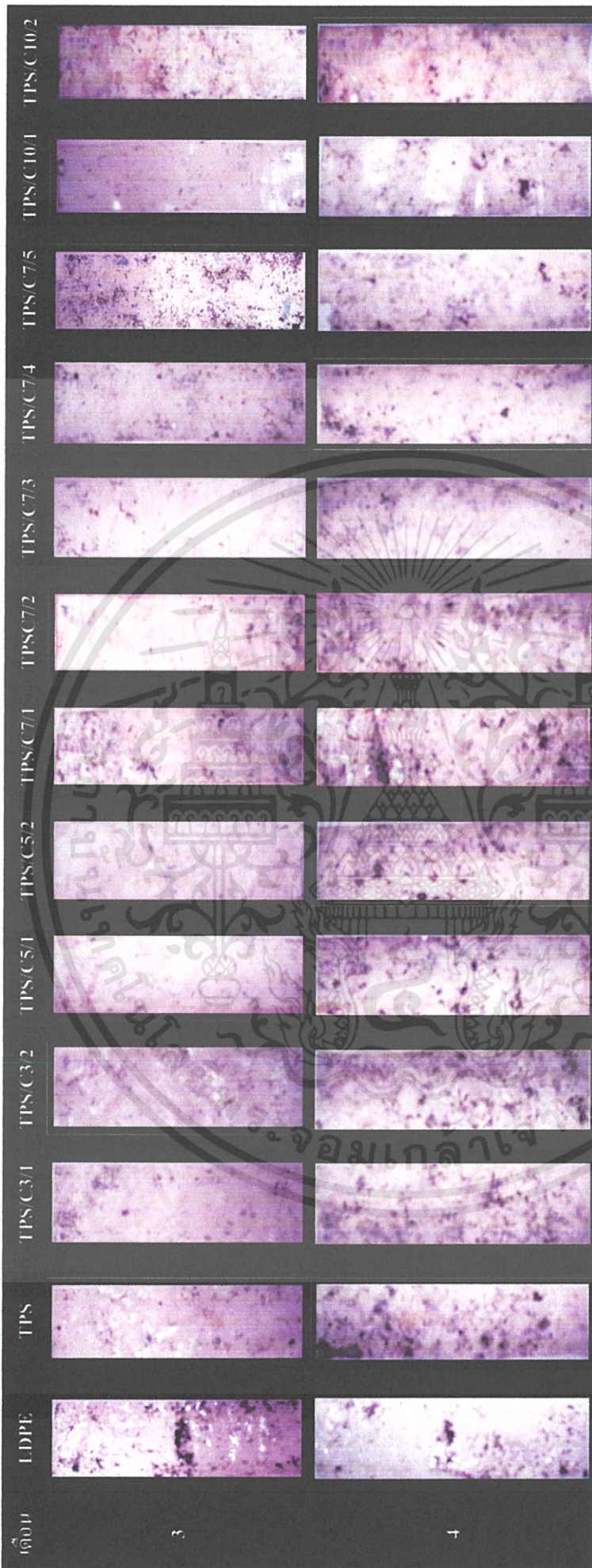
รูปที่ 4.25 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ในฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/1, TPS/C7/2 และ TPS/C7/4

4.4.2 ผลการศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มเป่า

จากการศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มเป่า LDPE เปรียบเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรต่างๆ ด้วยวิธีการฝังดินเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า เมื่อครบกำหนด 4 เดือน ฟิล์มเป่า LDPE ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ สำหรับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ทุกสูตร จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยความหนาของฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนแปลง คือ ฟิล์มจะมีความบางมากขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 – 2 เดือน พื้นผิวของฟิล์มจะไม่เรียบสม่ำเสมอ และจะสังเกตเห็นเม็ดแข็งนูนขึ้นมาจากพื้นผิวของฟิล์ม นอกจากนี้ยังเกิดการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มขึ้น แต่จะสังเกตเห็นได้ชัดในฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1 จะเกิดการฉีกขาดของฟิล์มซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่า การเติมออร์กาโนเคลย์ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ไม่ได้ช่วยลดอัตราการย่อยสลายของฟิล์ม แต่ยังเป็นการเสริมให้ฟิล์มสามารถย่อยสลายได้ดีขึ้น สำหรับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตรอื่นๆ จะเริ่มเห็นการฉีกขาดของแผ่นฟิล์มในช่วงเดือนที่ 3 – 4 ซึ่งเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมพลาสติก (LDPE) ซึ่งไม่ย่อยสลาย และสภาวะที่ใช้ทดสอบเกิดจากการจำลองขึ้นโดยไม่ถูกแสงแดด จึงอาจจะต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานกว่าการทดสอบที่สภาวะจริง

ตารางที่ 4.17 ลักษณะของฟิล์มเป่า LDPE ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรม (TPS) และฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรมในเคลือบสูตรต่างๆ ที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายเป็นระยะเวลา 4 เดือน

เดือน	LDPE	TPS	TPS/C3/1	TPS/C3/2	TPS/C5/1	TPS/C5/2	TPS/C7/1	TPS/C7/2	TPS/C7/3	TPS/C7/4	TPS/C7/5	TPS/C10/1	TPS/C10/2
0													
1													
2													



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ย่อยสลาย โดยได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของออร์กาโนเคลย์สองชนิด ได้แก่ Mac gel[®] SAC GRADE และ Cloisite[®] 15A ที่ปริมาณ 3, 5, 7 และ 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE ซึ่งมุ่งเน้นในเรื่องของการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจน และการย่อยสลายของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ได้ ให้มีความเหมาะสมและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ได้

5.1 การศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซอรท์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้

ในงานวิจัยนี้ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรท์ และจากผลการศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ได้ พบว่า ฟิล์มเป่าสูตร TPS 4 ซึ่งมีอัตราส่วนการผสมของ LDPE : แป้งมันสำปะหลัง : สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) เป็น 100 : 30 : 5 และมีพลาสติกไซเซอรท์ (กลีเซอรอล) 65 % โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และมีสมบัติทางความร้อนที่ดีใกล้เคียงกับ TPS 3

5.2 การศึกษาหาปริมาณและชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ย่อยสลาย

จากผลการวิจัย พบว่า ออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 3 – 10 % โดยน้ำหนักของ LDPE จัดเป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุคอมพอสิต มีผลทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีแนวโน้มที่ดีขึ้น ซึ่งออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A เป็นออร์กาโนเคลย์ที่มีการดัดแปรโครงสร้างด้วยเกลือควอเทอนารีแอม โมนีียมสามารถเข้ากับเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีขั้วในที่นี้ ได้แก่ LDPE ได้ดีขึ้น มีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ที่มาก สายโซ่ LDPE จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปได้มาก และมีการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ที่สม่ำเสมอ มีการรวมกลุ่มของออร์กาโนเคลย์น้อย จึงมีผลทำให้สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนดีขึ้นด้วย ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite[®] 15A ที่ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แล้วให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

5.3 การศึกษาและเปรียบเทียบบทบาทของออร์กาโนเคลย์แต่ละชนิดที่มีผลต่อฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

ออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A สามารถขึ้นรูปได้ดี มีการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของสารดี ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า Mac – gel® SAC GRADE แต่มีราคาที่สูงกว่าออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac – gel® SAC GRADE ในงานวิจัยนี้จึงได้นำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาผสมกันที่ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE พบว่า อัตราส่วนที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเป่าที่ได้ โดยสมบัติที่ได้มีความใกล้เคียงกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Mac-gel® SAC GRADE อาจมีสมบัติบางประการลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A แต่อยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำออร์กาโนเคลย์ทั้งสองชนิดมาทำการผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่ได้ให้ดีขึ้น และสามารถลดราคาค่าต้นทุนในการผลิตลงได้ประมาณ 40 – 60 %

5.4 การศึกษาสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและการย่อยสลายของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์

จากผลการวิจัย พบว่า ออร์กาโนเคลย์มีผลทำให้สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OPC) และส่งเสริมให้ฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์มีการย่อยสลายที่ดี และเร็วขึ้น

จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุประกอบด้วยเทคนิค XRD ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ พบว่า TPS/C7/2 ซึ่งเป็นฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A จะมีสมบัติโดยภาพรวมดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A ปริมาณ 7 % โดยน้ำหนักของ LDPE มีความเหมาะสมที่สุด สำหรับนำมาผสมกับฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แล้วให้ประสิทธิภาพดีที่สุด

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้มีการผสมสาร โดยใช้เครื่องผสมแบบความเร็วสูงและเครื่องอัลตราซาวด์กึ่งยวหนอนคู่ เป็นการผ่านความร้อน 2 ครั้ง ซึ่งมีผลกระทบต่อสมบัติของฟิล์มเป่าที่ได้ หากมีการผสมสารอย่างมีประสิทธิภาพ คือ ใช้เครื่องอัลตราซาวด์กึ่งยวหนอนคู่ที่มีสัดส่วนระหว่างความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) มากขึ้น และสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่มากขึ้น จะส่งผลทำให้สารมีการกระจายอนุภาคในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น มีความเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีมากขึ้นด้วย
2. ปรับปรุงความหนาของฟิล์มให้มีความหนาลดลง และควบคุมความหนาของฟิล์มให้มีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อให้เห็นผลการทดสอบที่ชัดเจนมากขึ้น
3. ในการนำออร์กาโนเคลย์สองชนิดมาผสมกันเพื่อลดต้นทุน เนื่องจากอัตราส่วนที่ใช้ในการวิจัยมีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ดังนั้น หากต้องการเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้น ควรทำการผสมในปริมาณที่มากพอที่จะเห็นความแตกต่างของสมบัติของฟิล์มเป่าได้ชัดเจนขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] อนันต์ เกษมพันธุ์, คุสิต อนันต์รักษ์, ณัฐวุฒิ บุญรักษาวิช, อรุณี เอี้ยวสีหยก และ อัญชลี ตีรพรทวี. 2542. “พลาสติกย่อยสลายได้.” [Online]. Available : <http://www.Thaibioplas.com/010%20Destroy%20plastic.pdf/>.
- [2] ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า. 2551. “โอกาสและศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ของไทย.” [Online]. Available : <http://www.ryt9.com.htm/>.
- [3] ปราโมท. 2551. “พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).” [Online]. Available : <http://www.thaigoodview.com/node/17034.mht>.
- [4] วราภรณ์ พุทธิสตะ. 2549. “การผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ผสมด้วยซีโอไลต์เอโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] Thamapring. “พอลิเมอร์.” [Online]. Available : http://www.thamapring.com-Pingpong web-Polymer-Po_clip_image001_0000_gif ของ Google.mht.
- [6] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [7] ปนัดดา พวงเกษม. 2540. “การเตรียมฟิล์มบริโกลด์จากแป้งมันสำปะหลังและแนวทางการใช้ประโยชน์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [8] “เคมีและสมบัติของแป้ง.” [Online]. Available : <http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>
- [9] มรกต ดันติเจริญ, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. “อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง.” 24th ANNIVERSARY THE THAI TAPIOCA FLOUR INDUSTRIES TRADE ASSOCIATION. กรุงเทพฯ
- [10] ภัทพร สงวนศักดิ์. 2550. “ผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2005. “วัตถุต้นกำเนิดดิน.” [Online]. Available : <http://www.environment.in.th/evdb/info/soil/htm>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] รัตนวรรณ มกรพันธ์. 2547. **นาโนเคลย์/นาโนคอมโพสิต**. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] **“Montmorillonite Clay Minerals.”** Distance Education and Technology Continuing Studies, The University of British Columbia.
- [14] Sinha R.S. and Okamoto M. 2003. “Polymer/layered silicate nanocomposites : a review from preparation to processing.” **Progress in polymer science**. Vol. 28 :1539 – 1641.
- [15] Michael A. and Philippe D. 2000. “polymer – layered silicate nanocomposites : preparation, properties and uses of a new class of materials.” **Materials Science and Engineering**. Vol. 28 : 1 – 63.
- [16] ภัทรพงษ์ สงวนศักดิ์. 2550. “การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเอทีดีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกลิ่นหอมจากวานิลลา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2548. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. กรุงเทพฯ : บூคเน็ต.
- [18] เจริญ นาคะสรรค์. 2544. “กระบวนการแปรรูปพลาสติก.” ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. กรุงเทพฯ : โพรเพซ
- [19] PolymerProcessing. 2008. “Twin screw extrusion.” [Online]. Available : <http://www.polymerprocessing.com/operations/tscrew/index.html>.
- [20] Extrudertechnologies. “ET - TWIN SCREW EXTRUDER.” [Online]. Available : http://www_extrudertechnologies_com/diagram2_gif ของ Google.mht
- [21] PlasticDome. “Blown Film Extrusion (Film Blowing).” [Online]. Available : http://www.plastics_turkavkaz_ru/processes/extrusion/blown-film/extrusion-blown-film/extrusion_gif ของ Google.mht
- [22] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2547. **สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [23] Anderung L. 2545. “Thermogravimetric analysis (TGA).” [Online]. Available : <http://www.amft.tugraz.at/science/pyrolyse/pyrolyse.de.4.html>.
- [24] Flegler S.L., Heckmen J.W. and Klomparens K.L. 1993. **Scanning and Transmission Electron Microscopy and Introduction**. Michigan State University : Oxford University Press,Inc.

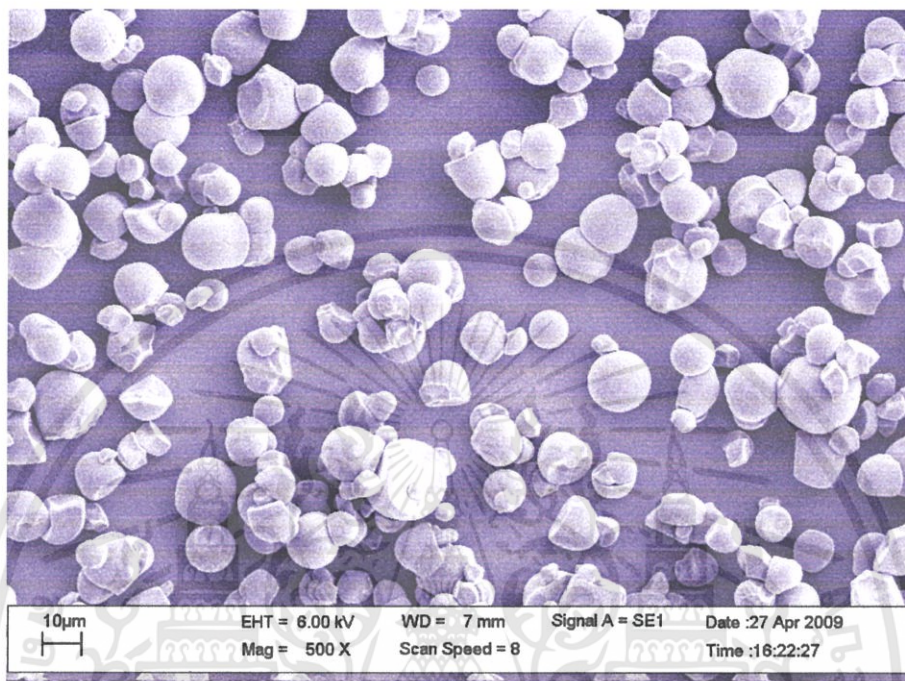
- [25] พรรณทิพย์ ห่อศรีสัมพันธ์. 2552. “การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD.” [Online]. Available : <http://www.forensic2.go.th/fpd21/XRD.htm>.
- [26] ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน. 2552. “X – ray Diffractometer (XRD).” [Online]. Available : http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm.
- [27] Shas V. 1998. **Handbook of Plastic Testing Technology**. 2nd ed., U.S.A. : John Wiley and Sons, Inc.
- [28] American Standard for Testing and Materials. 1998. “**Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet.**” ASTM D882. Annual Book of ASTM standard 08.01., Philadelphia.
- [29] American Standard for Testing and Materials. 1998. “**Standard Test Method for Tear Strength of conventional Vulcanized and Thermoplastic Elastomers.**” ASTM D624. Annual Book of ASTM standard 08.01., Philadelphia.
- [30] IDES. “**Tear strength ASTM D624.**” [Online]. Available : http://www_ides_com/property_descriptions/templates/images/ISO34-1_Trouser_Test_gif ของ Google.mht
- [31] Wikipedia. “**Differential scanning calorimetry.**” [Online]. Available : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/Differential_scanning_calorimeter_jpg/288px/Differential_scanning_calorimeter_jpg
- [32] Hatakeyama T. and Quinn F.X. 1994. **Thermal Analysis : Fundamentals and Applications to Polymer Science**. Ibaraki, Japan. : John Wiley and son., Ltd.
- [33] American Standard for Testing and Materials. 1998. “**Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor.**” ASTM D3985-95794. Annual Book of ASTM standard 08.01., Philadelphia.
- [34] William Gacitua E., Aldo Ballerini A. and Zhang J. 2005. “POLYMER NANOCOMPOSITES: SYNTHETIC AND NATURAL FILLERS A REVIEW.” **Maderas.Ciencia y tecnologia**. Vol.7(3) :159 - 178.
- [35] Golebiewski J., Rozanski A., Dzwonkowski J. and Galeski A. 2008. “Low density polyethylene – montmorillonite nanocomposites for film blowing.” **European Polymer Journal**. Vol. 44 : 270 – 286.

- [36] Kampeerapun P., Ahtong D., Pentrakoon D. and Srikulkit K. 2007 “Preparation of cassava starch/montmorillonite composite film.” **Carbohydrate Polymer**. Vol. 67 : 155 – 163.
- [37] Cyras V.P., Manfredi L.B., Tonthat M. and Vazquez A. 2008. “Physical and mechanical properties of thermoplastic starch/montmorillonite nanocomposite films.” **Carbohydrate Polymers**. Vol. 73 : 55 – 63
- [38] Shujun W., Jiugao Y. and Jinglin Y. 2005. “Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends.” **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 87 : 395 – 401.
- [39] Ranade A., Nayak K., Fairbrother D. and D’Souza N.A. 2005. “Maleated and non – maleated polyethylene – montmorillonite layered silicate blown film : creep, dispersion and crystallinity.” **Polymer**. Vol.46 : 7323 – 7333.
- [40] Dean K., Yu L. and Wu D.Y. 2007. “Preparation and characterization of melt – extruded thermoplastic starch/clay nanocomposites.” **Composites Science and Technology**. Vol. 67 : 413 – 421.
- [41] ศศิกานต์ สุวรรณประทีป , นवलพรรณ จันทศิริ , เต็มศักดิ์ ศรีศรีรินทร์ และ สรินทร ลิ่มปนาท. 2005. “การสังเคราะห์นาโนคอมพอสิตของพอลิยูริเทนที่มีโลหะและเคลย์.” 31st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology.
- [42] Nam P.H., Maiti P., Okamoto M., Kotaka T., Hasegawa N. and Usuki A. 2001. “A hierarchical structure and properties of intercalated polypropylene/clay nanocomposites.” **Polymer**. Vol. 42 : 9633 – 9640.
- [43] Lertwimolnun W. and Vergnes B. 2005. “Influence of compatibilizer and processing condition on the dispersion of nanoclay in a polypropylene matrix.” **Polymer**. Vol. 46 : 3462 – 3471.
- [44] Chaoying W., Xiuying Q., Yong Z. and Yinxi Z. 2003. “Effect of different clay treatment on morphology and mechanical properties of PVC-clay nanocomposites.” **Polymer Testing**. Vol. 22 : 453–461.
- [45] Kozaka M., and Domka L.. 2004. “Adsorption of the quaternary ammonium salts on montmorillonite.” **Journal of Physics and Chemistry of Solids**. Vol. 65 : 441–445.

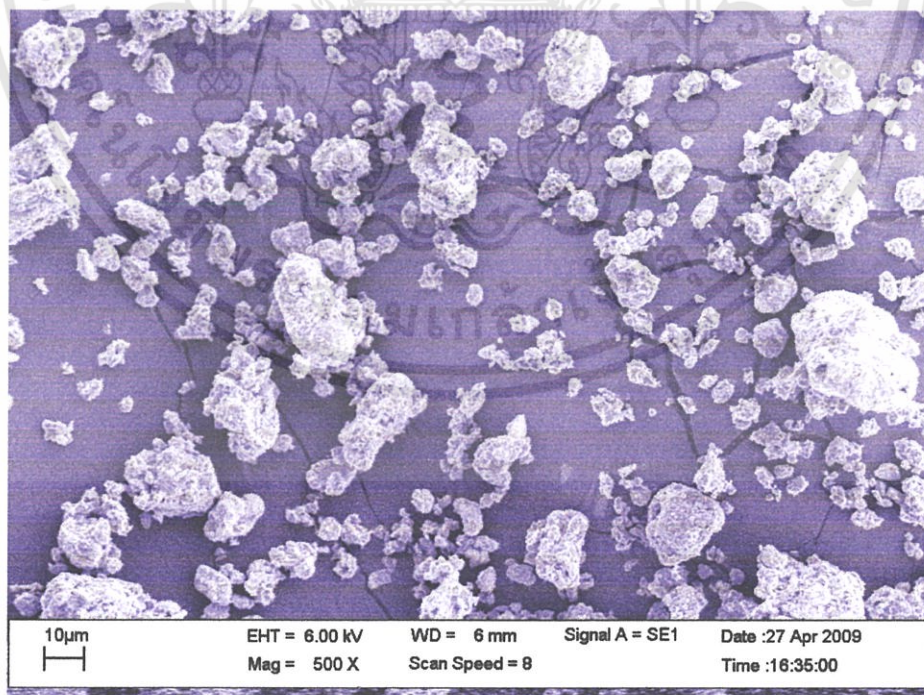
- [46] Chungui Z., Huaili Q., Fangling G., Meng F., Shimin Z. and Mingshu Y. 2005. "Mechanical, thermal and flammability properties of polyethylene/clay nanocomposites." **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 87 : 183 – 189.
- [47] เกศศิณี ตรีภูทิตวาทกรรม, วิชา สุโรจนเมธากุล และ ประชา บุญญศิริกุล. 2539. **การทำฟิล์มบริโกล์ได้จากแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง**. ปรินูญยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [48] Mali S., Sakanaka L.S., Yamachita F. and Grossmann M.V.E. 2005. "Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect." **Carbohydrate Polymers**. Vol 60 : 283 – 289.
- [49] Huang C.Y., Roan M.L., Kuo M.c. and Lu W.L. 2005. "Effect of compatibiliser on the biodegradation and mechanical properties of high – content starch/low density polyethylene blend." **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 90 : 95 – 105.
- [50] SCG. Plastic. "Data sheet LDPE EL – LENE LD 1905F."
- [51] Thai Pure Science Ltd.
- [52] THAI NIPPON CHEMICAL INDUSTRY. "Data sheet Mac – gel[®] Sac grade."
- [53] Rockwood Additives Limited Safety Data Sheet. "Cloisite[®] 15A."
- [54] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย. 2548. "การใช้ซีโอไลต์เอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอัดรีดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [55] สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : บิ๊กเนท.
- [56] มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์. 2540. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [57] Ali D., Maybelle W., Ahmet K., Christopher W. Macosko and Michael T. 2007. "Intercalated linear low density polyethylene (LLDPE)/clay nanocomposites prepared with oxidized polyethylene as a new type compatibilizer: Structural, mechanical and barrier properties." **European Polymer Journal**. Vol 43 : 3737–3749.
- [58] Zhang Q., Yu Z., Xie X., Naito K. and Kagawa Y. 2007. "Preparation and crystalline morphology of biodegradable starch/clay nonpcomposites." **Polymer**. Vol. xx : 1 – 8.

ภาคผนวก ก

รูปร่างของเม็ดแป้งและออร์กาโนเคลย์



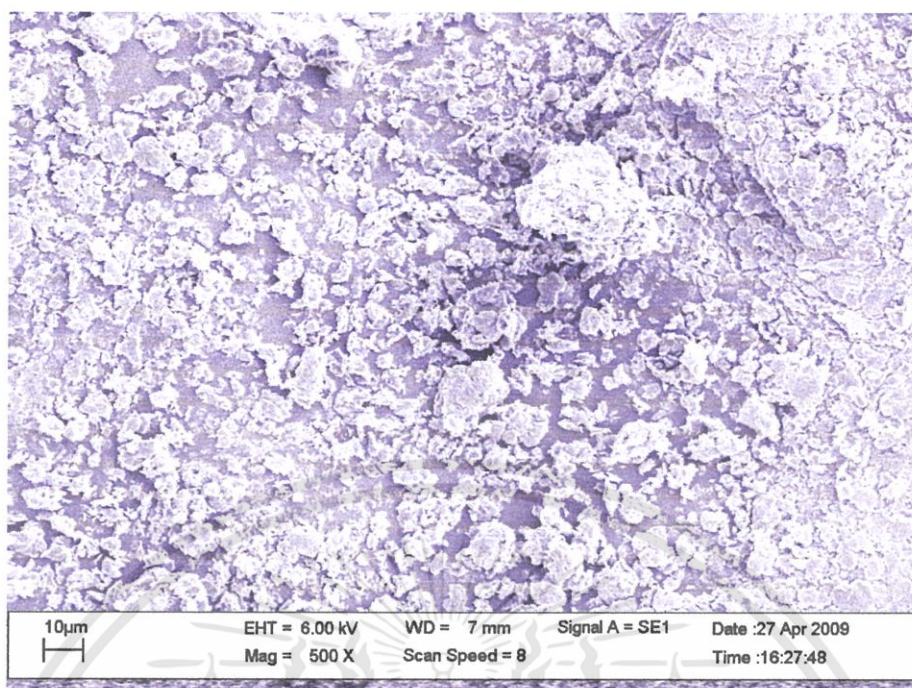
รูปที่ ก-1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ ก-2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของออร์กาโนเคลย์ชนิด

Mac-gel[®] SAC GRADE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D – spacing)

การคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D – spacing) ตามสมการ Bragg's Law

$$\text{Bragg's Law equation} \quad : \quad 2d\sin\theta = n\lambda$$

เมื่อ

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

 θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

$$n = 1, 2, 3, \dots,$$

 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (มีค่าเท่ากับ 1.54 Å หรือ 0.1542 nm)

ตัวอย่างการคำนวณหาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A

เมื่อ

$$2\theta = 2.84$$

$$n = 1$$

$$\lambda = 1.54 \text{ \AA}$$

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

$$d = \frac{1.54}{(2 \times \sin 1.42)}$$

$$= 31.07 \text{ \AA}$$

ดังนั้น ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ชนิด Cloisite® 15A เท่ากับ 31.07 Å

ภาคผนวก ค
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค – 1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
LDPE	MD	10.8 ± 1.1	75 ± 10.21	95.61 ± 7.54
	TD	9.28 ± 1.03	70 ± 12.58	91.98 ± 5.76
TPS 3	MD	7.46 ± 0.9	45 ± 15.11	88.58 ± 4.65
	TD	6.35 ± 1.23	32 ± 7.61	48.20 ± 11.57
TPS 4	MD	7.71 ± 0.62	43 ± 15.11	89.91 ± 3.88
	TD	6.41 ± 1.03	37 ± 8.24	55.7 ± 4.53
TPS 5	MD	7.25 ± 0.60	40 ± 12.66	88.50 ± 2.63
	TD	5.88 ± 0.98	31 ± 5.45	51.81 ± 7.56
TPS/C3/1	MD	7.73 ± 0.69	27 ± 6.21	87.69 ± 4.01
	TD	5.02 ± 0.58	19 ± 4.37	56.49 ± 4.54
TPS/C3/2	MD	8.63 ± 0.63	42 ± 12.02	85.26 ± 4.73
	TD	5.61 ± 0.37	29 ± 5.65	59.59 ± 3.37
TPS/C5/1	MD	8.92 ± 0.66	33 ± 9.36	90.02 ± 10.07
	TD	6.26 ± 0.58	26 ± 6.59	64.12 ± 5.49
TPS/C5/2	MD	9.32 ± 1.06	44 ± 11.05	97.07 ± 3.85
	TD	6.50 ± 1.14	35 ± 8.36	76.78 ± 3.31
TPS/C7/1	MD	9.09 ± 0.65	34 ± 9.22	106.9 ± 5.27
	TD	7.30 ± 0.54	28 ± 5.75	68.20 ± 5.13

หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 (ต่อ)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งแรงดัด (kN/m)
TPS/C7/2	MD	10.53 ± 1.38	46 ± 7.80	112.48 ± 3.68
	TD	7.31 ± 0.39	39 ± 7.01	80.85 ± 10.59
TPS/C7/3	MD	10.88 ± 1.15	47 ± 11.21	93.24 ± 6.55
	TD	7.37 ± 0.85	30 ± 7.50	77.89 ± 3.25
TPS/C7/4	MD	11.05 ± 1.38	45 ± 11.89	100.12 ± 8.73
	TD	7.40 ± 0.53	29 ± 5.17	86.33 ± 10.59
TPS/C7/5	MD	11.02 ± 1.72	36 ± 11.51	96.91 ± 12.76
	TD	7.37 ± 0.82	29 ± 9.96	98.77 ± 16.09
TPS/C10/1	MD	7.99 ± 2.39	61 ± 18.06	97.85 ± 4.18
	TD	6.25 ± 1.18	29 ± 12.61	63.78 ± 4.54
TPS/C10/2	MD	9.75 ± 1.60	47 ± 12.17	103.72 ± 3.93
	TD	6.10 ± 0.42	34 ± 5.17	68.98 ± 6.37

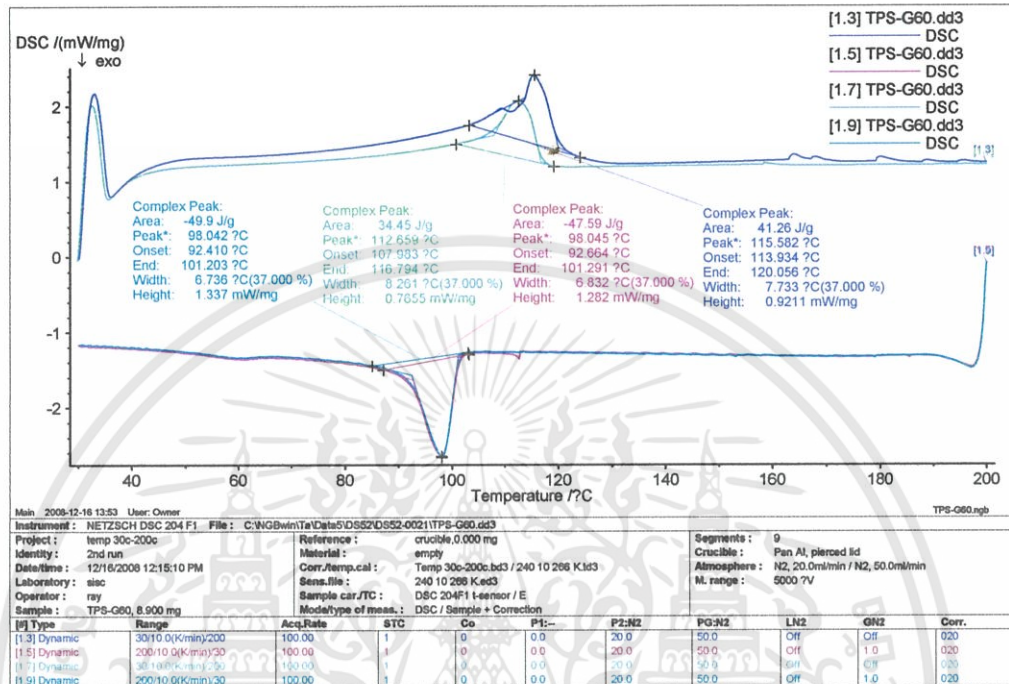
หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

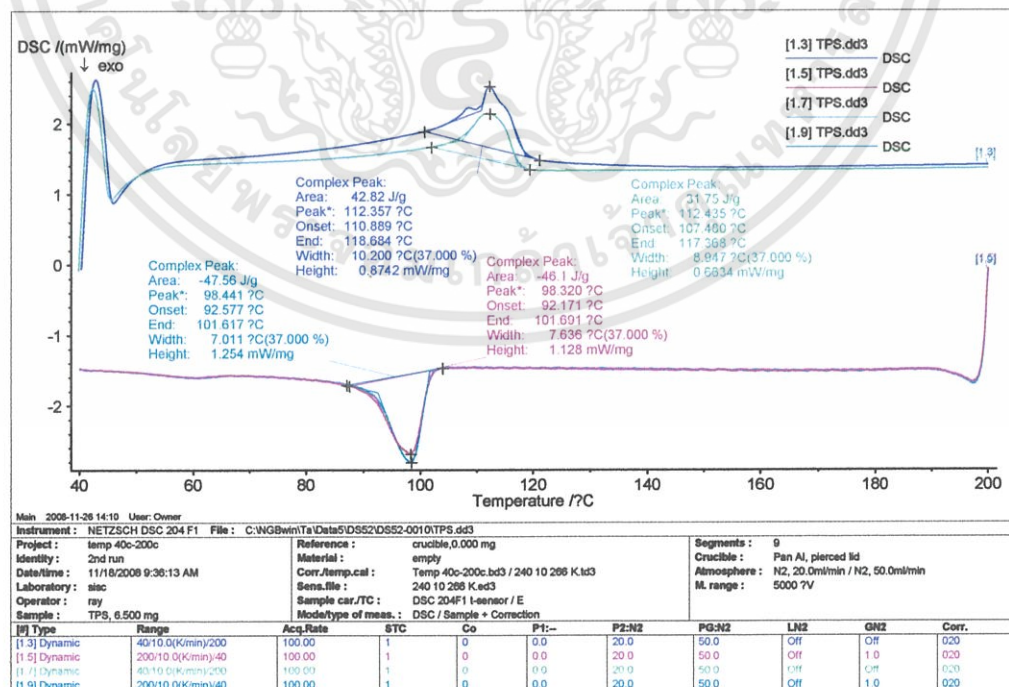
a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ง

การทดสอบสมบัติทางความร้อน

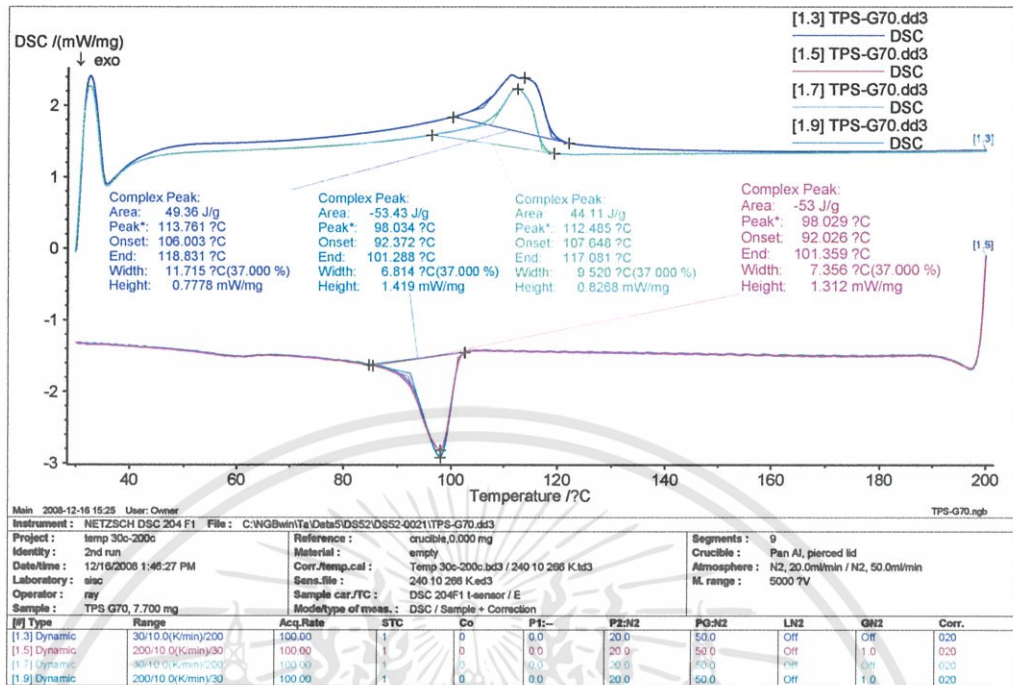


รูปที่ ง-1 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสูตร TPS 3

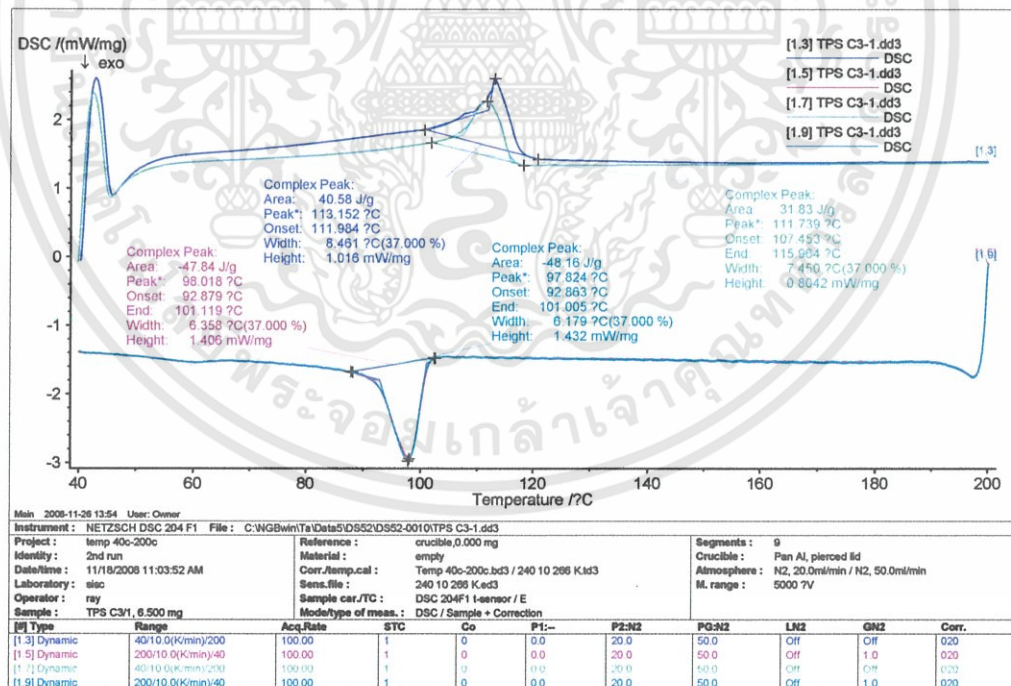


รูปที่ ง-2 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสูตร TPS 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

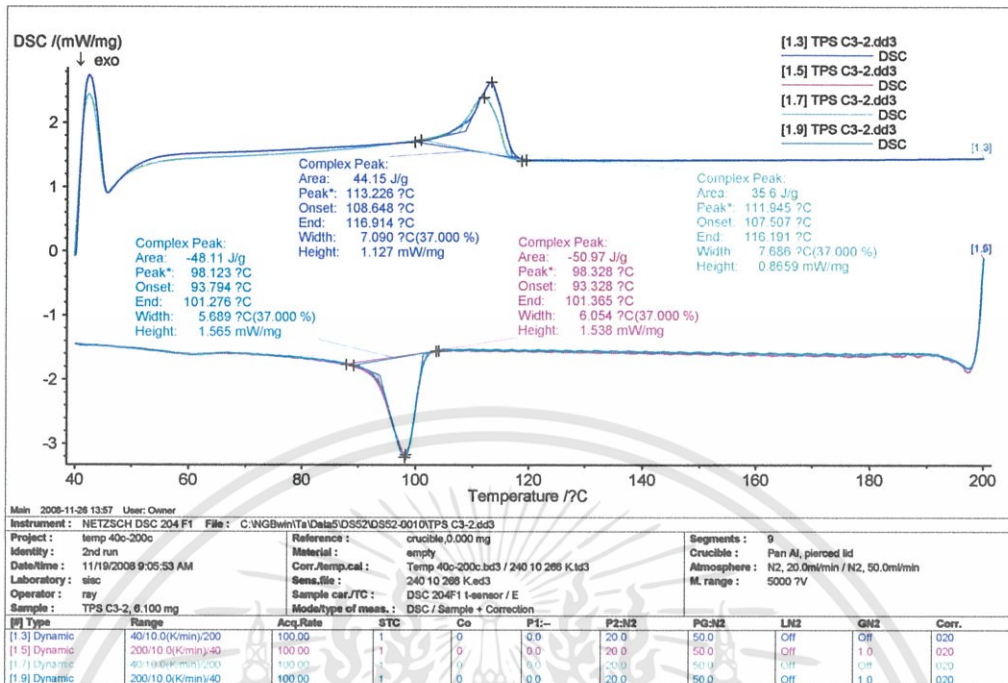


รูปที่ ๓ – 3 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสูตร TPS 5

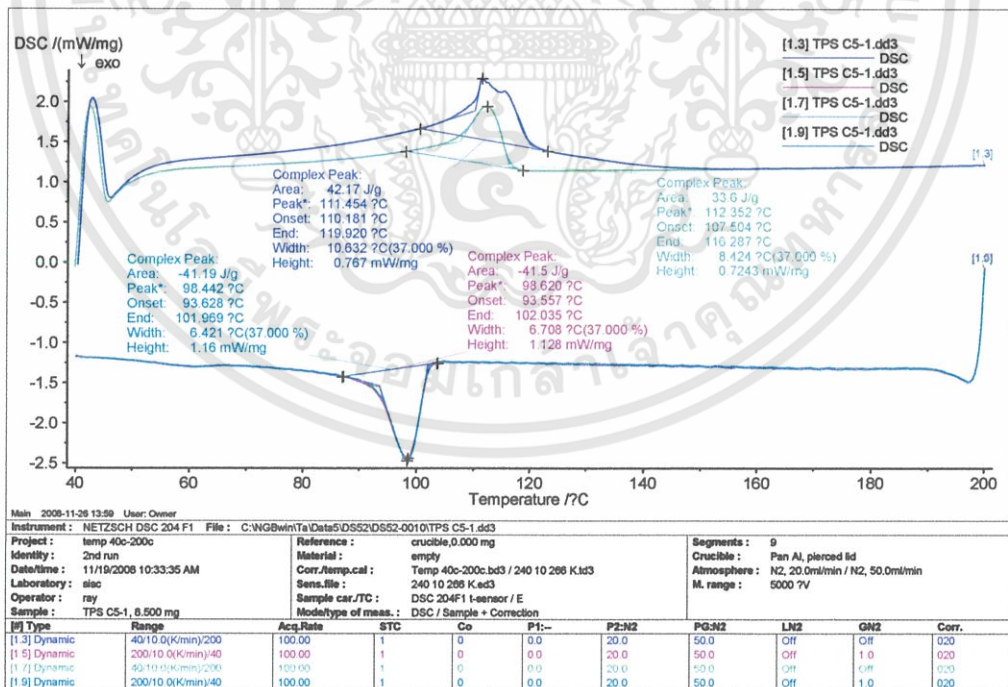


รูปที่ ๔ – 4 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซที่ผสมกับบอรรคาโนเคลย์ สูตร TPS/C3/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

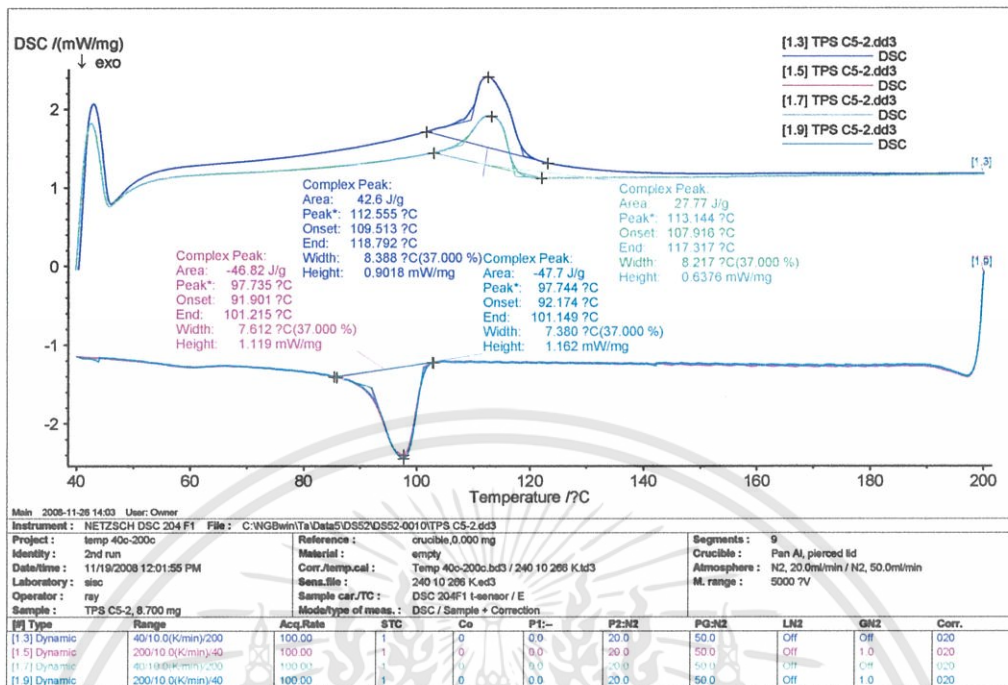


รูปที่ ๕ – 5 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C3/2

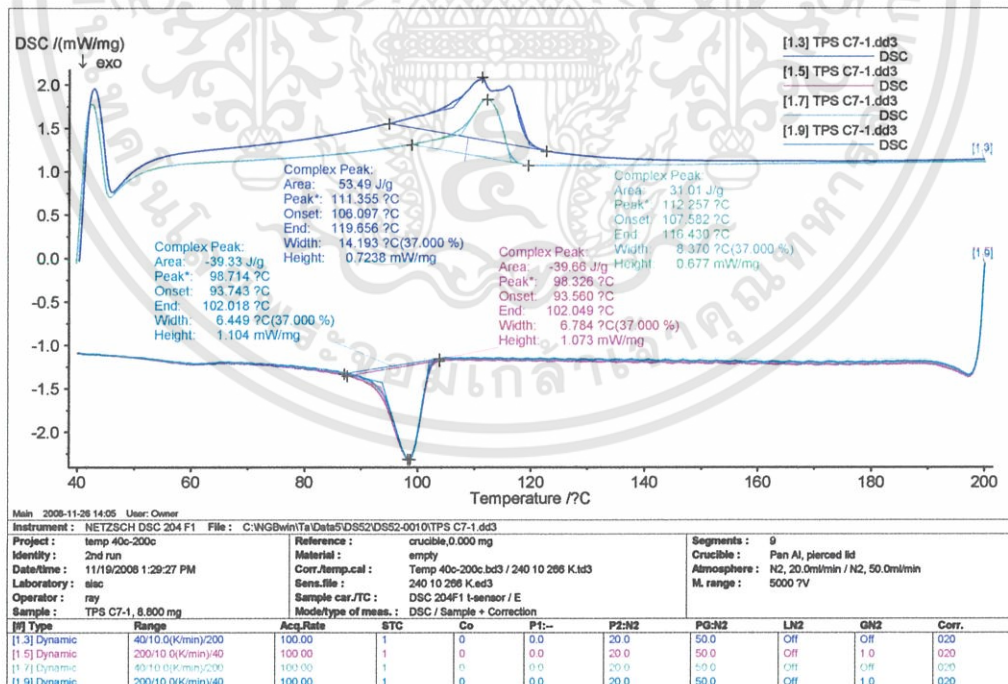


รูปที่ ๖ – 6 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C5/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

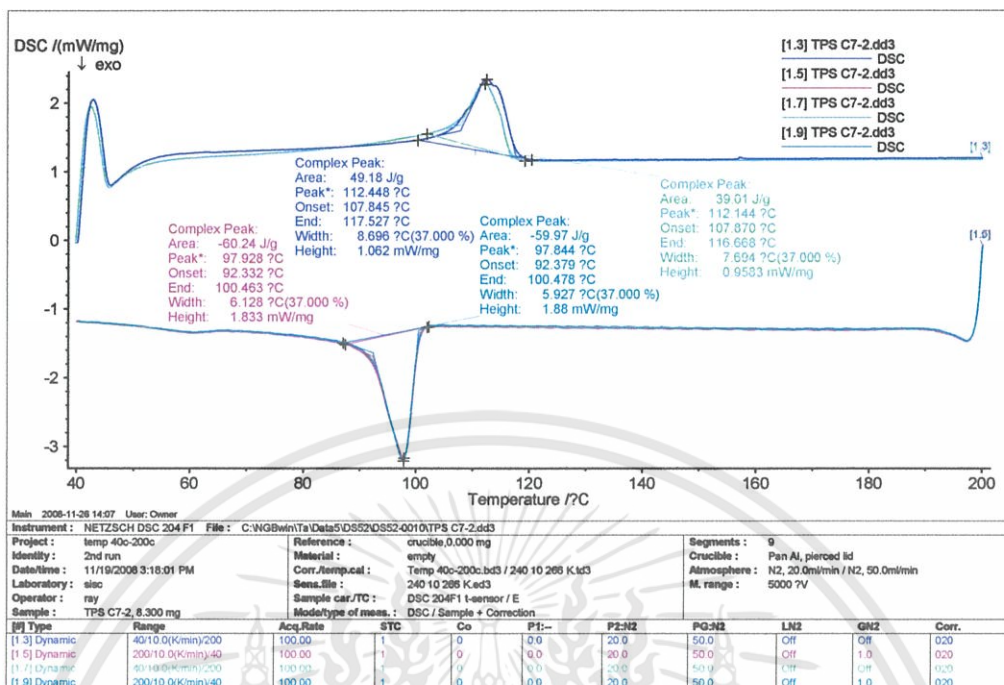


รูปที่ ๗ – 7 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C5/2

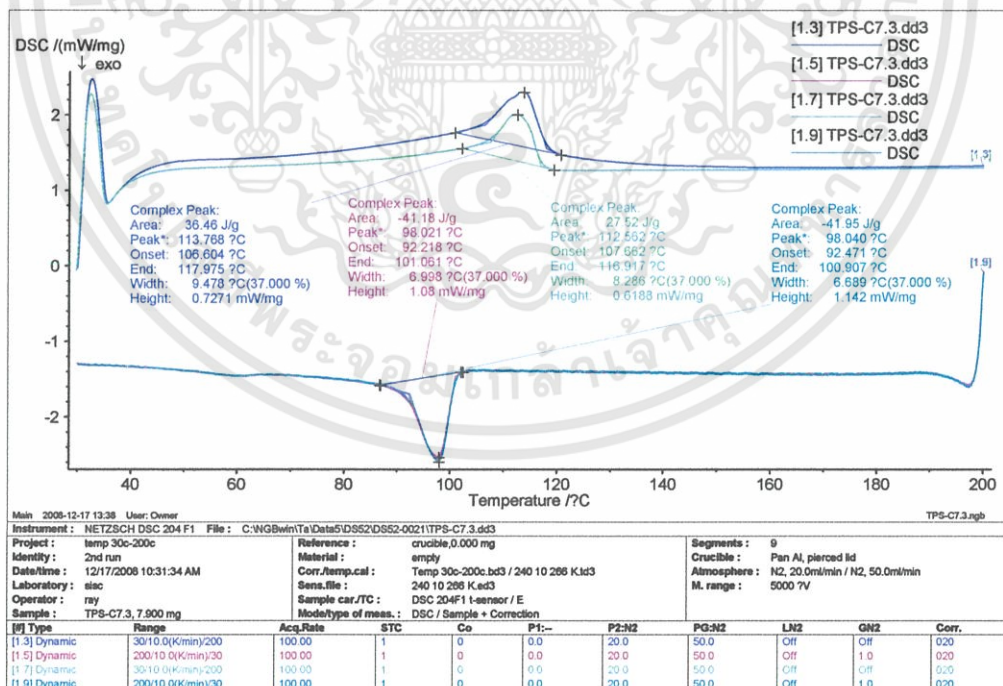


รูปที่ ๘ – 8 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

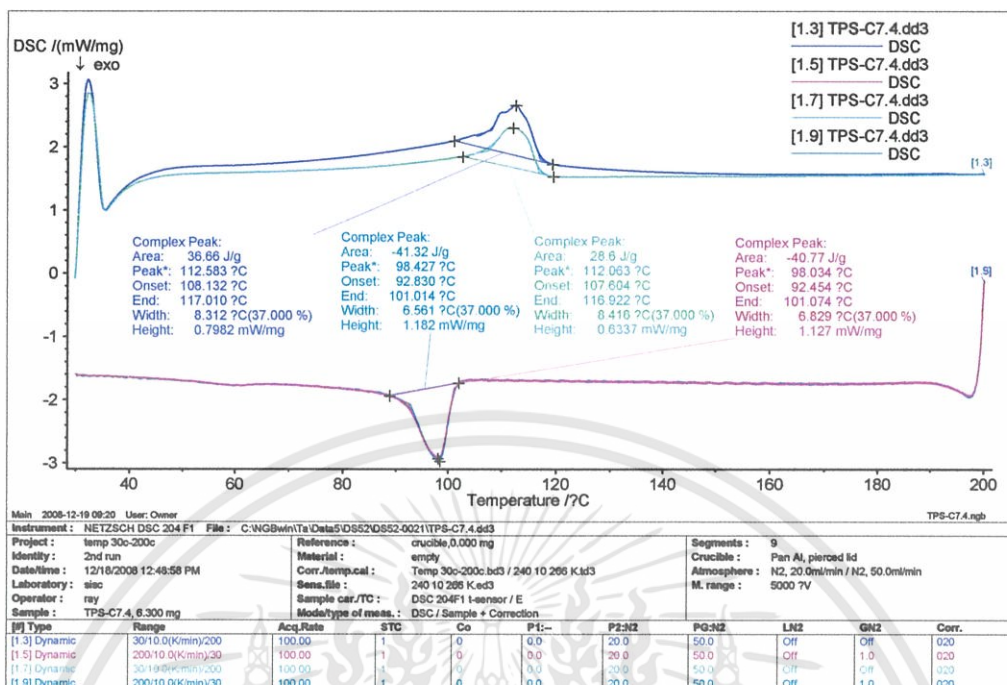


รูปที่ ง-9 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/2

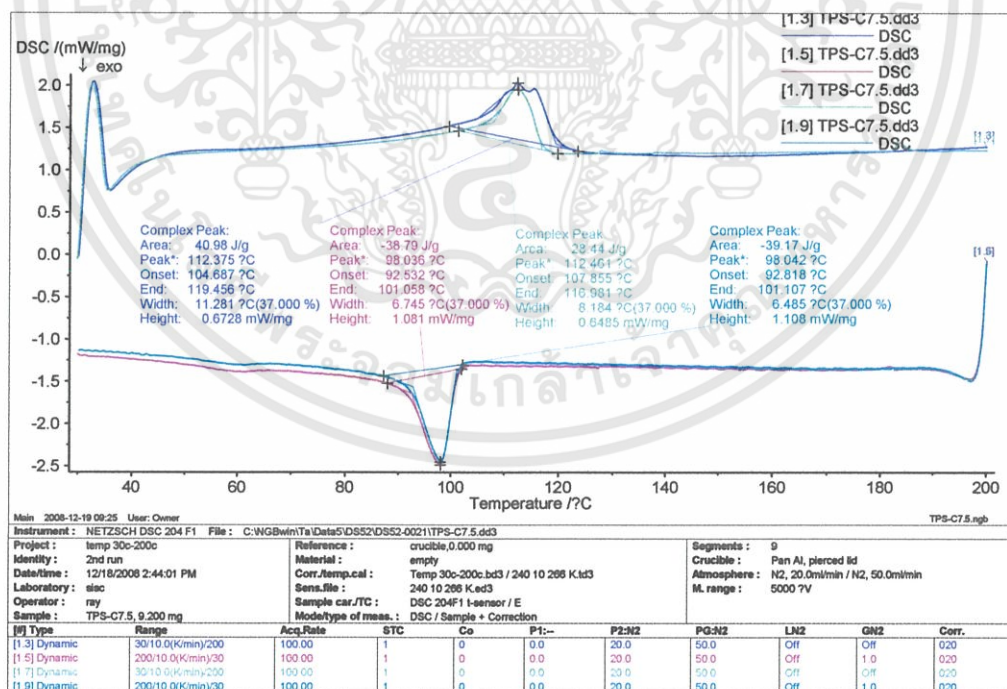


รูปที่ ง-10 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

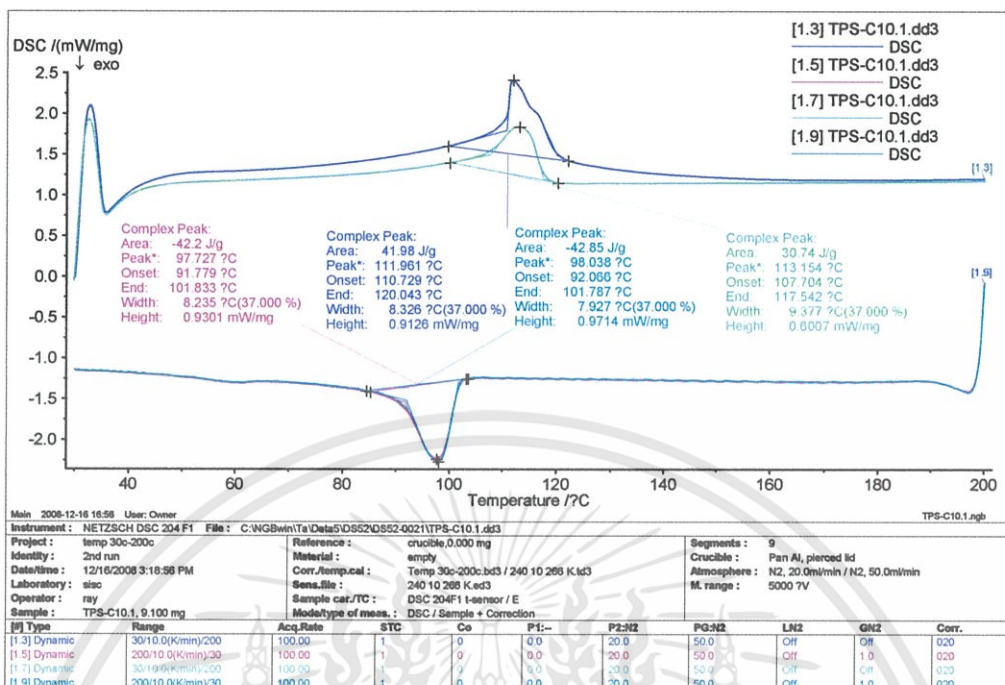


รูปที่ ๑ – 11 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/4

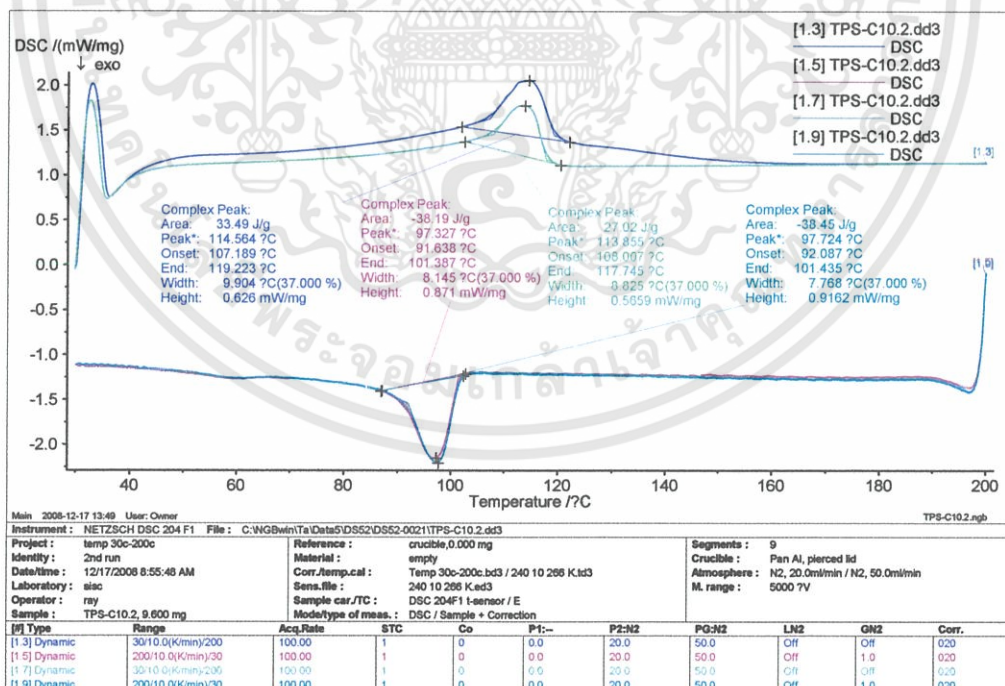


รูปที่ ๑ – 12 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C7/5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

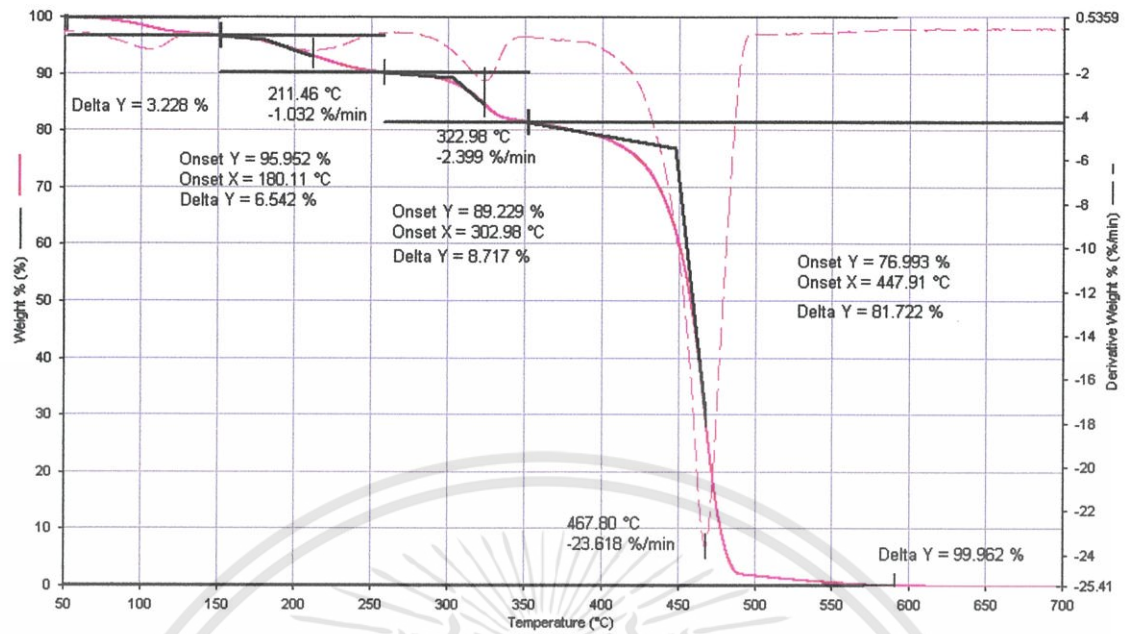


รูปที่ ง – 13 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C10/1

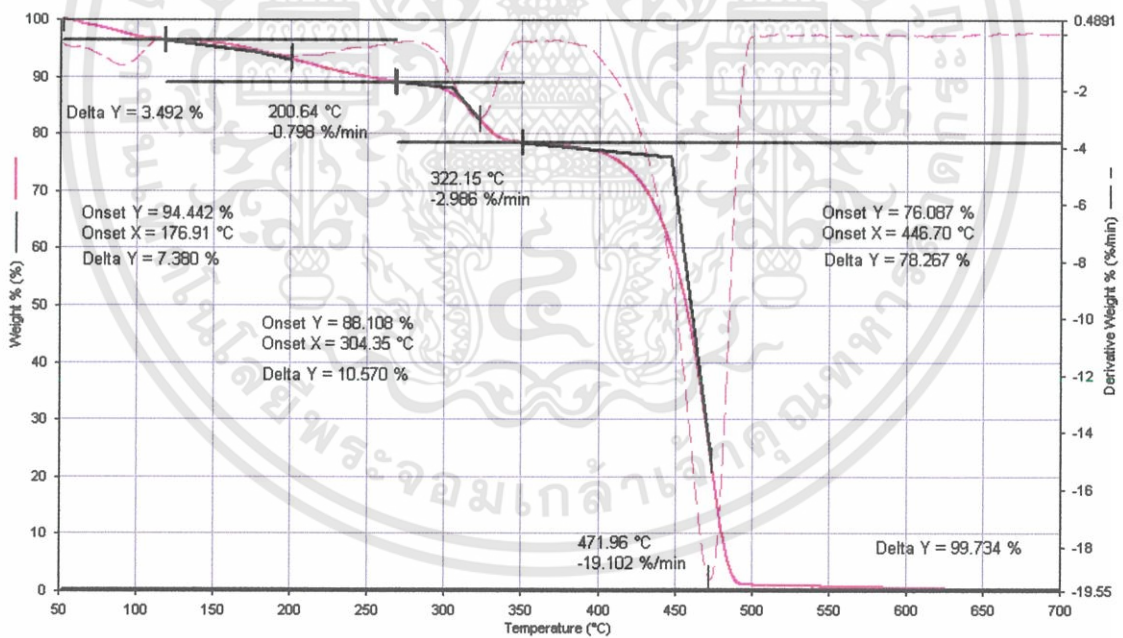


รูปที่ ง – 14 DSC thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซ์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C10/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

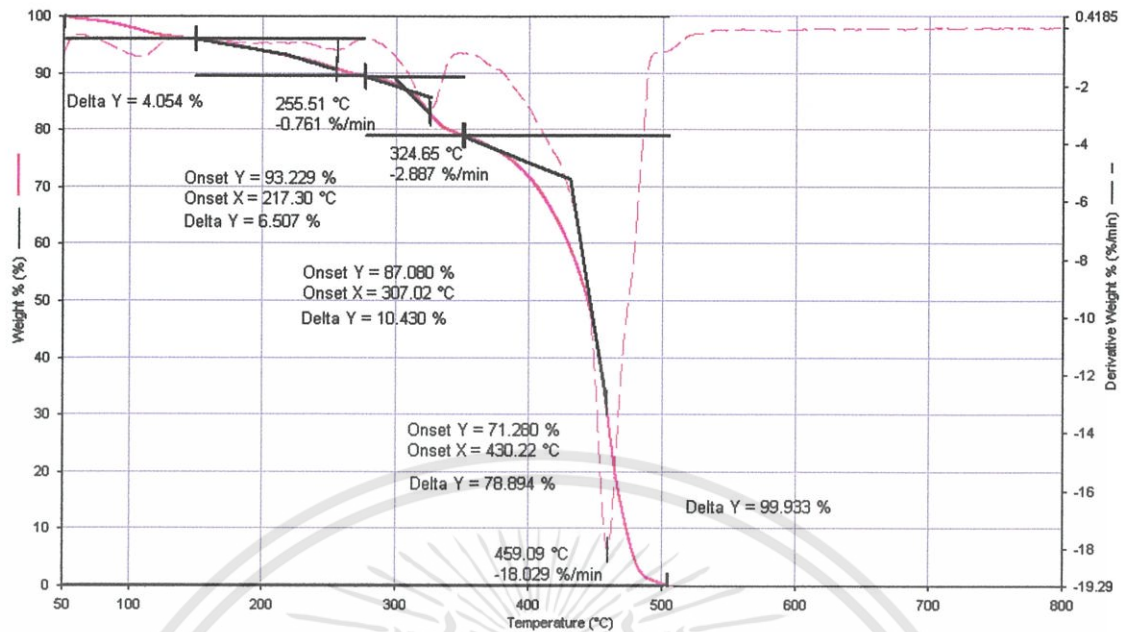


รูปที่ 15 – TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสุตร TPS 3

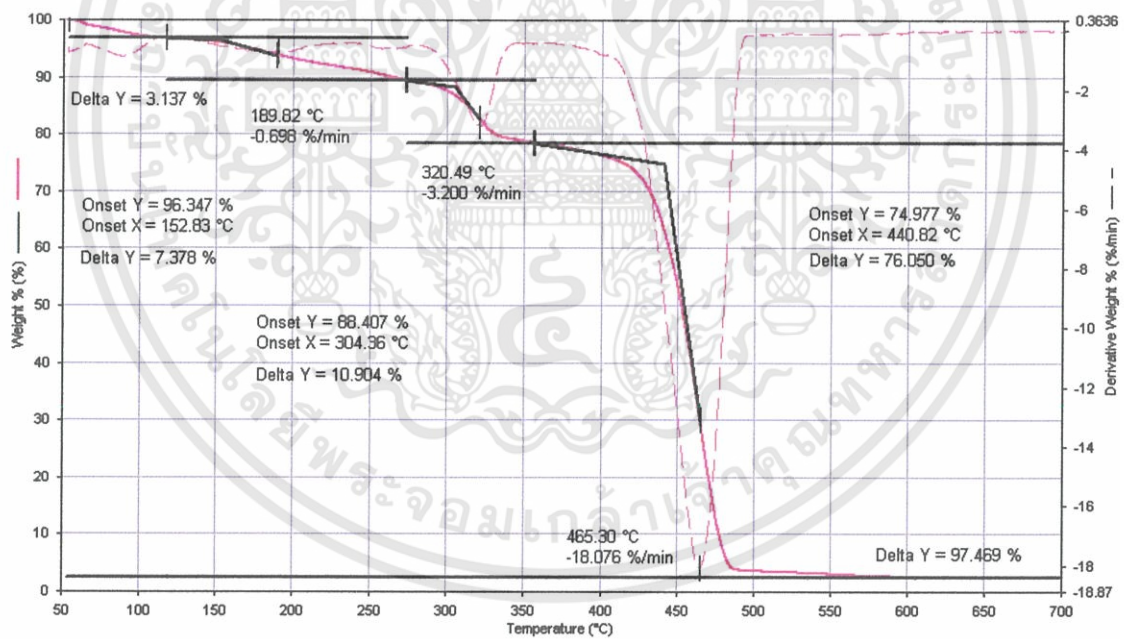


รูปที่ 16 – TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสุตร TPS 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

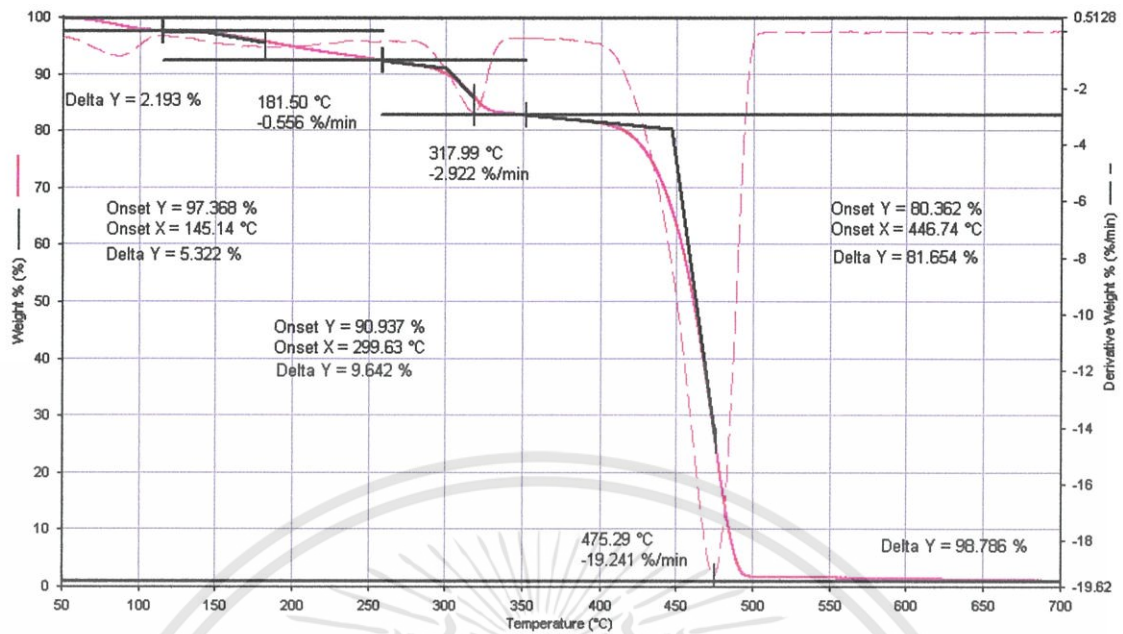


รูปที่ ง - 17 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสูตร TPS 5

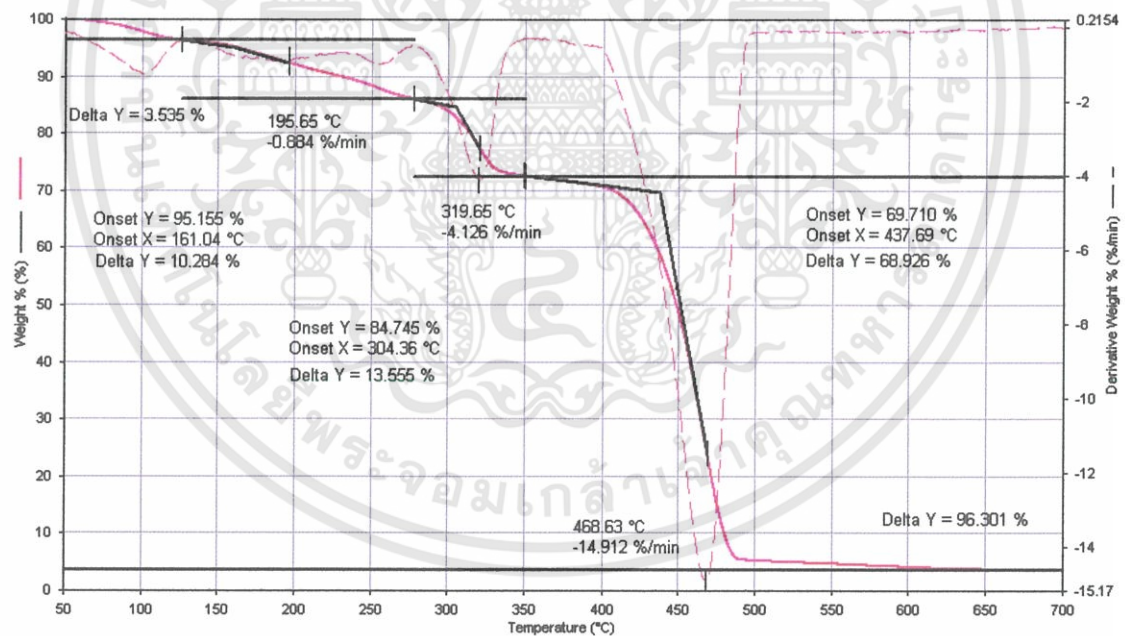


รูปที่ ง - 18 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C/3/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

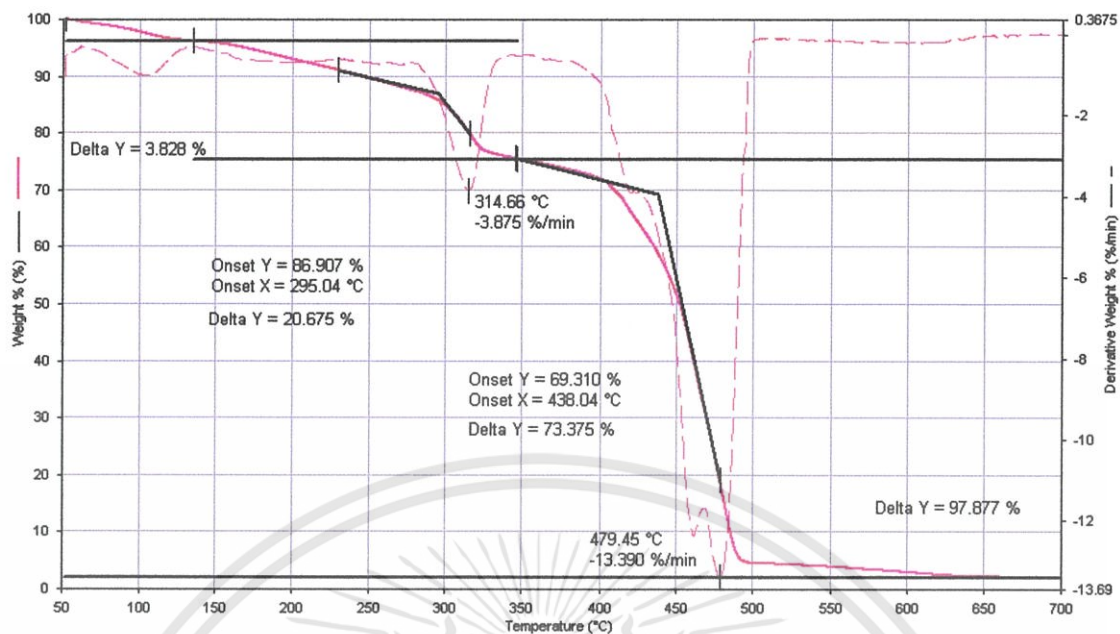


รูปที่ ๑๙ – 19 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C3/2

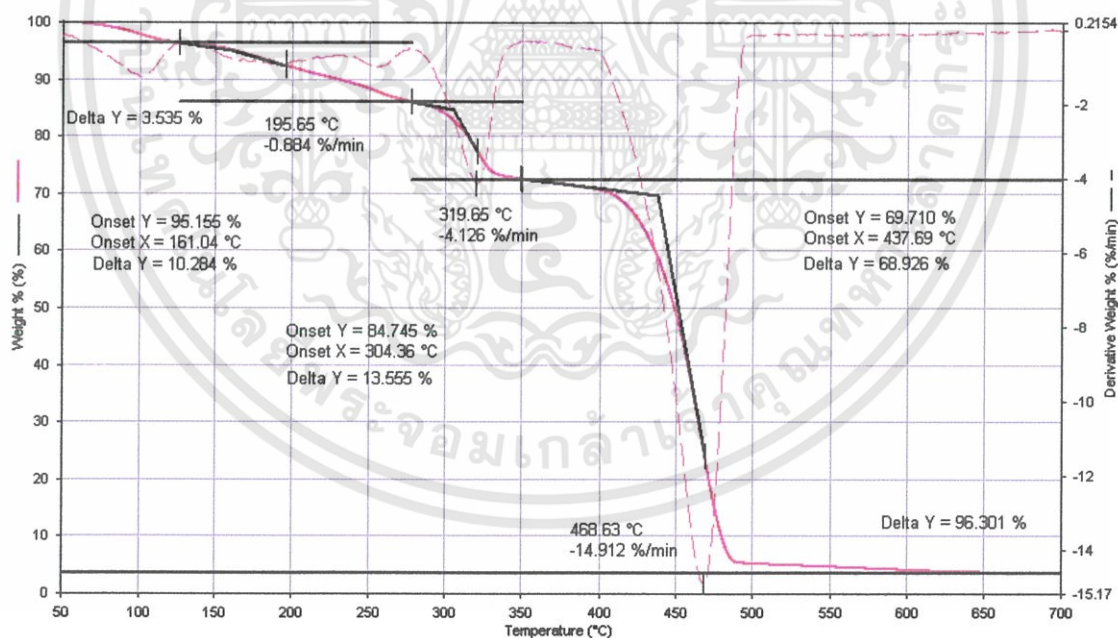


รูปที่ ๒๐ – 20 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C5/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

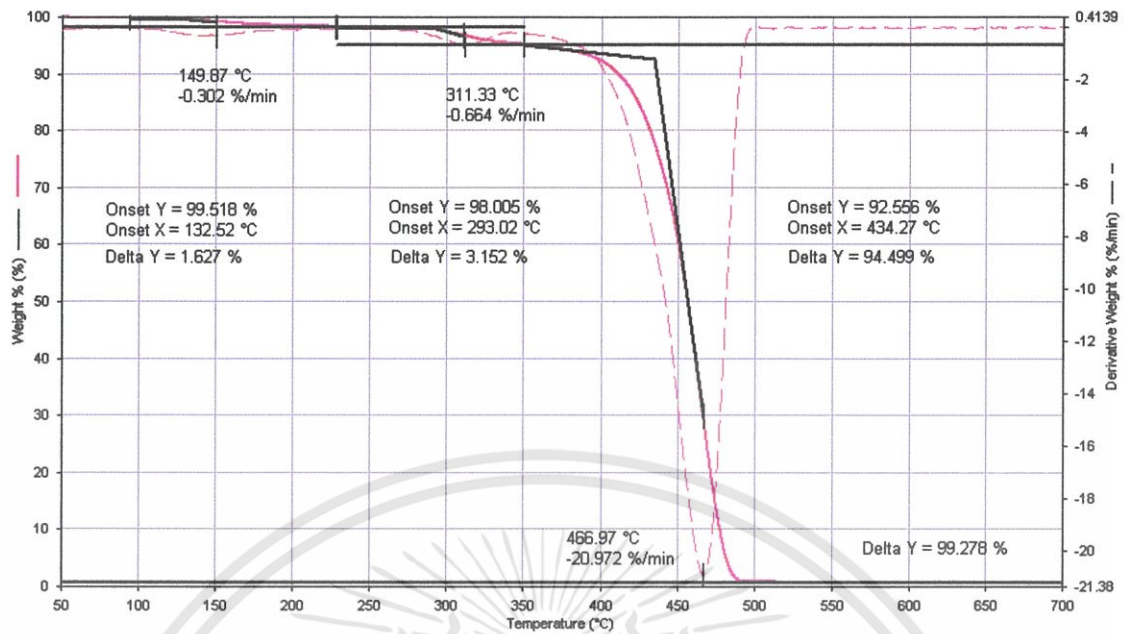


รูปที่ ง – 21 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C5/2

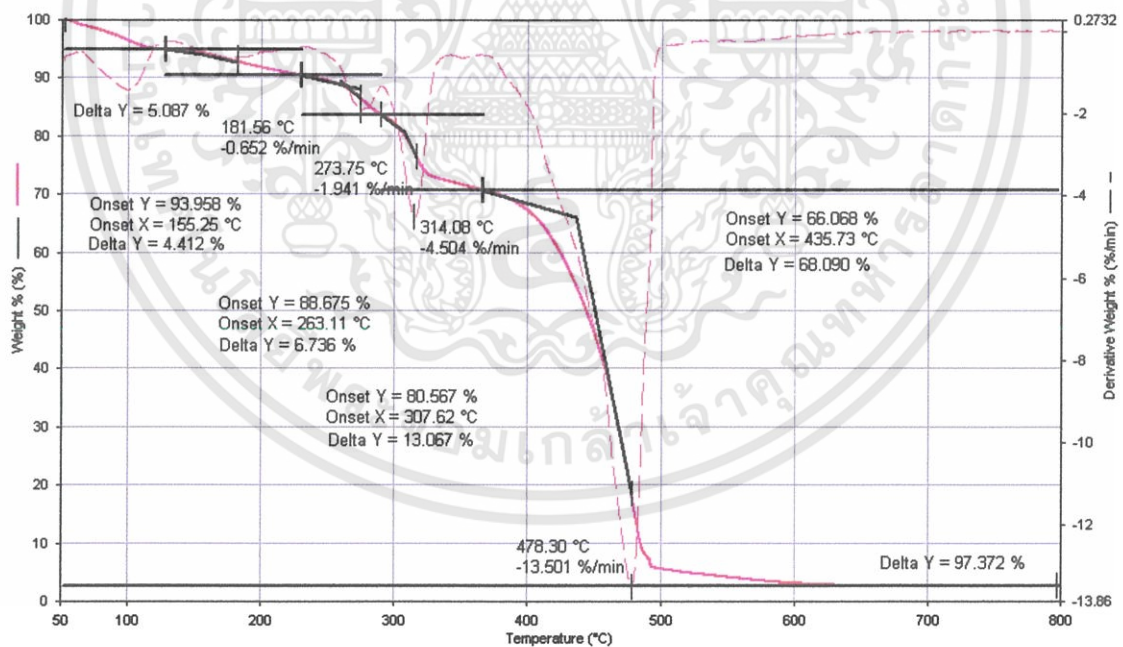


รูปที่ ง – 22 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C7/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

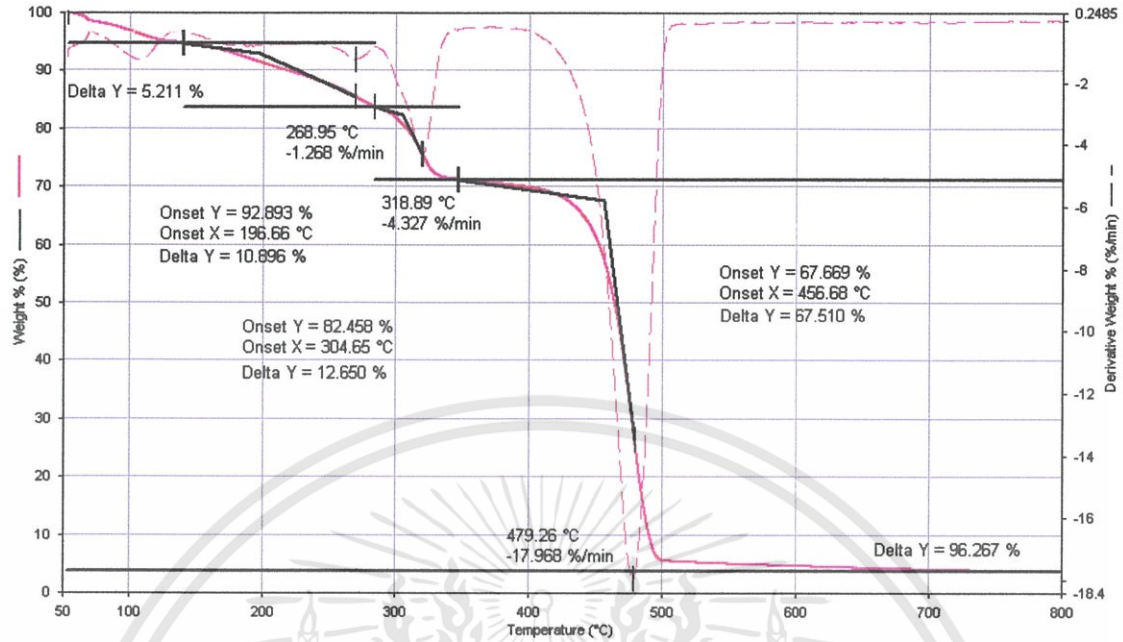


รูปที่ ง – 23 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C7/2

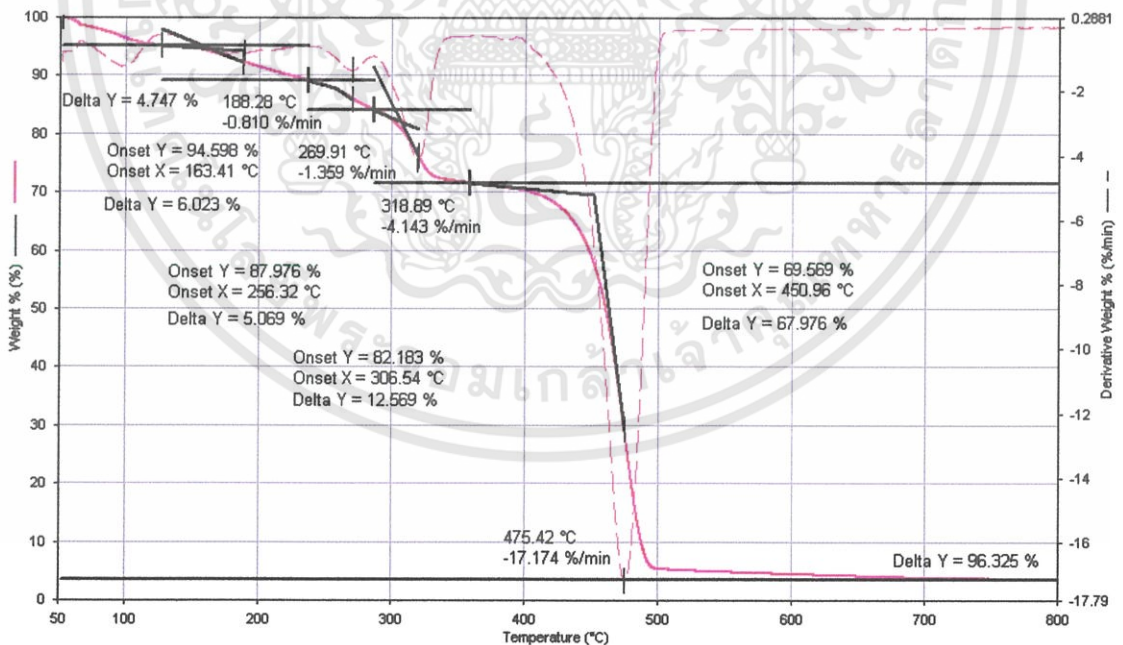


รูปที่ ง – 24 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
สูตร TPS/C7/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

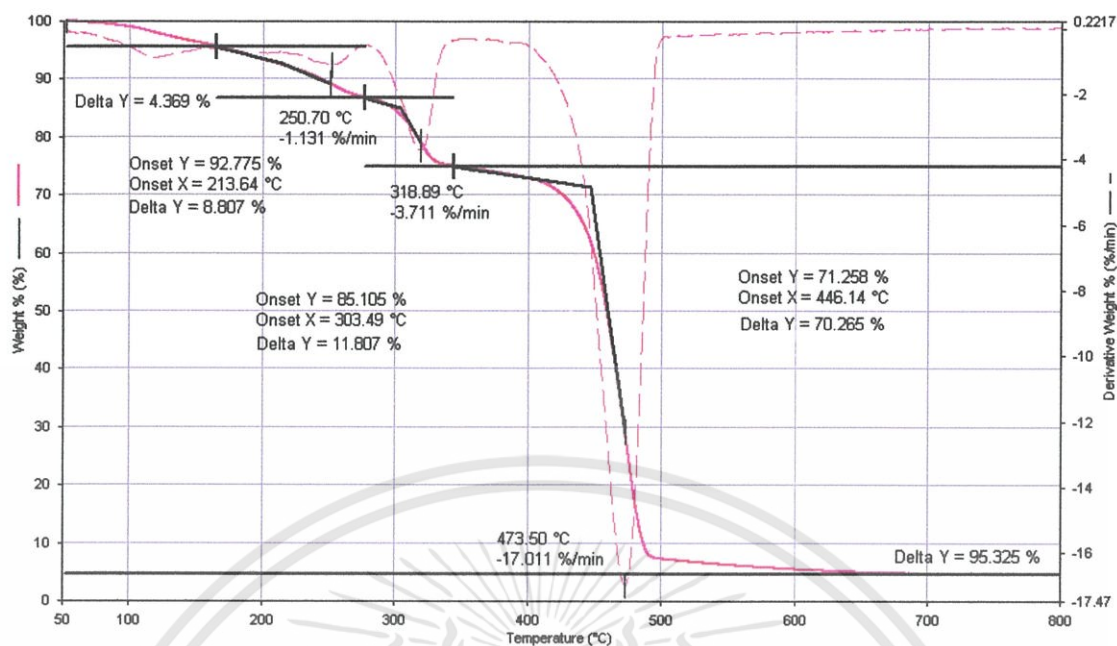


รูปที่ ง – 25 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
 สูตร TPS/C7/4

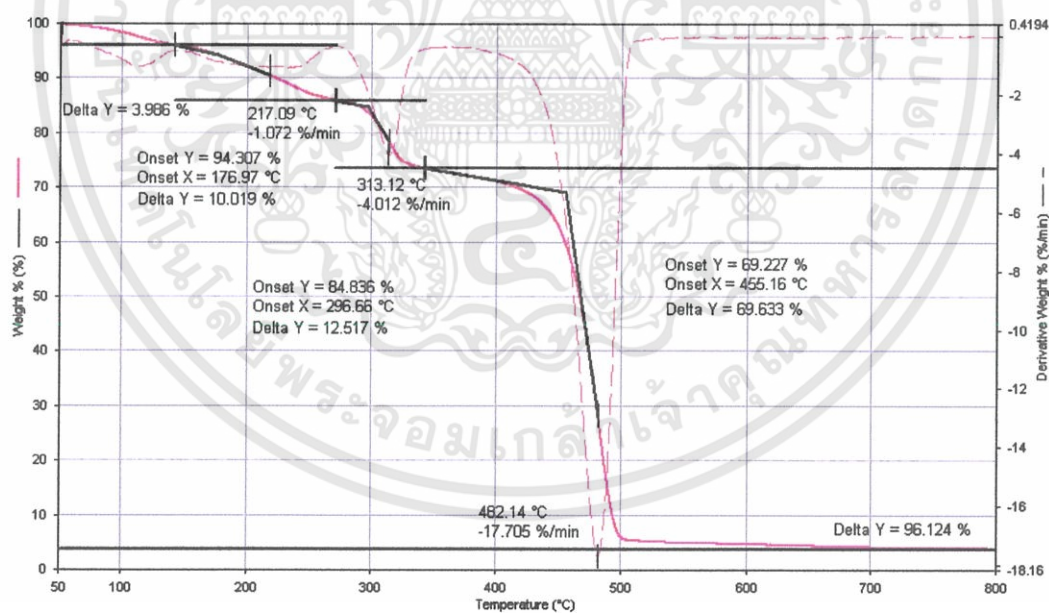


รูปที่ ง – 26 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์
 สูตร TPS/C7/5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง – 27 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C10/1



รูปที่ ง – 28 TGA thermogram ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์ สูตร TPS/C10/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก

การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f คือ Enthalpy of fusion ของสารซึ่งได้จากพื้นที่ใต้กราฟ (J/g)
 ΔH_f^0 คือ Enthalpy of fusion ของ LDPE ที่มีความเป็นผลึก 100 %
 (มีค่าเท่ากับ 276 J/g)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสุตร TPS 4

เมื่อ ปริมาณของ LDPE ในฟิล์มเป่า TPS4 = 64.73 g

$$\Delta H_f^0 = 276 \text{ J/g}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_f &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}} \\ &= \frac{31.75 \times 100}{64.73} \\ &= 49.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Crystallinity} &= \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \\ &= \frac{49.05}{276} \times 100 \\ &= 17.77 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสุตร TPS 4 เท่ากับ 17.77 %

ภาคผนวก ฉ

การทดสอบสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : *OP*)

$$OP = OP \times t$$

เมื่อ $OP = \frac{OTR}{P}$

P คือ ความดันของก๊าซออกซิเจนหรืออัตราส่วน โดยมวลของก๊าซออกซิเจน จากความดันรวม โดยความดันของก๊าซออกซิเจนในค้ำที่เป็นค้ำนำพาให้พิจารณาเป็นศูนย์ (*P*=1)

t คือ ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน (mm)

ตัวอย่างการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : *OP*) ของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1

เมื่อ $OTR = 1242 \text{ cc./m}^2 \cdot \text{day}$

$$P = 1$$

$$t = 0.0985 \text{ mm}$$

$$OP = \frac{OTR}{P} = 1242 \text{ cc./m}^2 \cdot \text{day}$$

$$OP = OP \times t$$

$$= 1242 \times 0.0985$$

$$= 122 \text{ mm.cc/m}^2 \cdot \text{day}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมกับออร์กาโนเคลย์สูตร TPS/C7/1 เท่ากับ $122 \text{ mm.cc/m}^2 \cdot \text{day}$

ตารางที่ ๑ - 1 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP)

สูตร	ความหนาของ แผ่นฟิล์ม (mm)	อัตราการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจน (cc./m ² .day)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (mm.cc/m ² .day)
LDPE	0.048	3762	181
	0.047	3891	183
ค่าเฉลี่ย	0.0475	3827	182
TPS	0.061	2164	132
	0.059	2290	135
ค่าเฉลี่ย	0.06	2227	134
TPS/C7/1	0.101	1175	119
	0.096	1309	126
ค่าเฉลี่ย	0.0985	1242	122
TPS/C7/2	0.13	857	111
	0.115	979	113
ค่าเฉลี่ย	0.1225	918	112
TPS/C7/4	0.099	916	91
	0.083	1214	101
ค่าเฉลี่ย	0.091	1087	99

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นางสาววัชรีย์ ธรรมรามา
วัน เดือน ปีเกิด	20 ธันวาคม 2527
ที่อยู่	107 หมู่ 3 ต.เชียงรากน้อย อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา 13180
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผลงานวิจัย	พ.ศ. 2549 ศึกษาการป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตของผ้าฝ้ายโดยใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (Protection – Ultraviolet Properties of Cotton Fabric with Titanium Dioxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้