

การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้
จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติก สคาร์ช

DEGRADABLE FLAME RETARDANT FILM
FROM LDPE/THERMOPLASTIC STARCH

วิไลวรรณ โพล้งมี

WILAIWAN PHONGMEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อสนองนโยบายของสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลาสติก

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KWTL-2002-SC-M-014-043

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้
จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

DEGRADABLE FLAME RETARDANT FILM
FROM LDPE / THERMOPLASTIC STARCH



T105509

วิลาวรรณ โฟงมณี

WILAIWAN PHONGMEE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105509
วัน,เดือน,ปี..... 24 พ.ย. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-SC-M-014-043

**DEGRADABLE FLAME RETARDANT FILM
FROM LDPE / THERMOPLASTIC STARCH**

WILAIWAN PHONGMEE

**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-014-043**

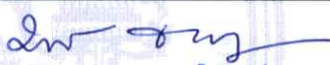



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช
Degradable Flame Retardant Film from LDPE/Thermoplastic Starch
นักศึกษา นางสาววิไลวรรณ โพล้งมี
รหัสประจำตัว 50067905
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร	
รศ.ดร.ศิริพร คำรงค์ศักดิ์กุล	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 5 ตุลาคม 2552 เวลา 09.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ ห้อง 307

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุชิต จารุณาวัดนะ)

รักษาการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 19 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช
นักศึกษา	นางสาว วิไลวรรณ โพล้งมี
รหัสประจำตัว	50067905
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยทำการผสมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการหน่วงการติดไฟให้กับฟิล์มย่อยสลายโดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดรายเป็นสารช่วยผสม และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ นำมาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง โดยทำการศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซอร์และปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม ที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช จากนั้นทำการศึกษาถึงปริมาณของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีต่อสมบัติการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL 94V-0 Test สมบัติการย่อยสลายในดิน และสมบัติอื่นๆ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณกลีเซอรอล 18% และปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลและค่าร้อยละความเปราะสูงที่สุด ผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสม

ผลการศึกษาสมบัติการเผาไหม้และสมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ พบว่าฟิล์มมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลงจนไม่เกิดการลุกติดไฟในขณะที่ทำการทดสอบ และฟิล์มมีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในดินได้เร็วขึ้น เมื่อมีปริมาณของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์ มีผลให้อุณหภูมิการ

លោកជំទាវជំទាវសម្តេចស្រីសុខាណុន អគ្គនាយកដ្ឋាន
បច្ចេកទេសស្រាវជ្រាវ និង បច្ចេកទេសស្រាវជ្រាវស្រុក ក្រុងភ្នំពេញ រាជធានីភ្នំពេញ
ក្រសួងកសិកម្ម រុក្ខាប្រមាញ់ និងនេសាទ ក្រសួងកសិកម្ម រុក្ខាប្រមាញ់ និងនេសាទ

Thesis	Degradable Flame Retardant Film from LDPE/Thermoplastic Starch
Student	Miss Wilaiwan Phongmee
Student ID.	50067905
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Somsak Woramongkolchai

ABSTRACT

This research was studied on production of degradable flame retardant film from polymer blend between low-density polyethylene and thermoplastic Starch which were mixed with aluminium trihydrate and antimony oxide as flame retardant modifier, by using polyethylene-graft-maleic anhydride(PE-g-MA) as a compatibilizer and glycerol as a plasticizer. All components were mixed by high speed mixer, compounded with twin-screw extrusion and formed with blown film process. The appropriate amount of plasticizer and compatibilizer for blending of low-density polyethylene and thermoplastic starch was studied. The amount of aluminium trihydrate and antimony oxide which affected to flammability according to UL94 V-0 test and degradation in soil and other properties were also investigated. For example, morphology, physical, thermal and mechanical properties.

The results indicated that the amount of glycerol at 18% and polyethylene-graft-maleic anhydride at 3% by weight of low-density polyethylene was suitable for blending of low-density polyethylene and thermoplastic starch which gave the optimum result of mechanical properties and percentage of crystallinity. The morphology revealed that the cassava powder of thermoplastic starch was well-dispersed in polymer.

The flammability and degradation in soil of degradable flame retardant film were also revealed that the rate of burning decreased, not ignited and faster degradation in soil with microorganism, as aluminium trihydrate and antimony oxide were increased in composition. The thermal studies showed the onset decomposition temperature of low-density polyethylene. They were increased under aluminium trihydrate and antimony oxide because of thermal resistance behavior. The mechanical properties also indicated that the flame retardant film has less effect on mechanical properties, which was corresponded to morphological studies.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ต้องขอขอบคุณหลายฝ่ายที่ได้ให้การสนับสนุน ตลอดจนให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ดังนี้

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

ขอขอบคุณบริษัท มัลติแบกซ์ จำกัด ที่ให้ทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมทั้งอนุเคราะห์ เม็ดพลาสติก LDPE สารช่วยผสมพอลิโอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ตลอดจนเครื่องทดสอบ อเนกประสงค์สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่า

ขอขอบคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร และ รศ.ดร.ศิริพร คำรงค์ศักดิ์กุล ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ คุณสุใจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และ อนุเคราะห์การทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทุกคนที่มีส่วนในการช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ ครอบครัวโพลังมี และเพื่อนทุกคนที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจ ใน การศึกษาวิจัยครั้งนี้ตลอดมา

วิไลวรรณ โพลังมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูปภาพ.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	3
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.1.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง.....	7
2.2 แป้ง.....	8
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้ง.....	8
2.2.2 การสังเคราะห์แป้ง.....	8
2.2.3 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	10
2.2.3.1 อะไมโลส (Amylase).....	11
2.2.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin).....	13
2.2.4 แป้งมันสำปะหลัง.....	14
2.2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	15
2.3 การย่อยสลายของแป้ง.....	16
2.3.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา.....	16
2.3.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์.....	17
2.3.3 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยแสง.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีอื่นๆ.....	18
2.3.5 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ.....	18
2.4 สารหน่วงการติดไฟ.....	18
2.4.1 อะลูมินาโครไฮเดรท.....	19
2.4.2 แอนติโมนีออกไซด์.....	20
2.4.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้.....	20
2.5 พอลิเอทิลีน.....	23
2.5.1 การเตรียมพอลิเอทิลีน.....	23
2.5.2 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	24
2.5.3 การใช้งานของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	25
2.6 พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย.....	26
2.7 พลาสติกไซเซอรู.....	27
2.8 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป.....	28
2.8.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	28
2.8.2 เครื่องเป่าฟิล์ม.....	30
2.8.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	30
2.8.2.2 หลักการเป่าฟิล์ม.....	32
2.8.2.3 สมบัติของฟิล์มเป่า.....	33
2.9 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์.....	34
2.9.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด.....	34
2.9.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมตริกซ์.....	36
2.9.3 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคัลเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	37
2.9.4 การตรวจสัมมนาวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด.....	38
2.10 การทดสอบสมบัติการเผาไหม้.....	39
2.10.1 การทดสอบสมบัติการจุดติดไฟ.....	39
2.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	40
2.11.1 การทดสอบแรงดึง.....	40
2.11.2 การทดสอบการฉีกขาด.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	42
2.12.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ.....	42
2.12.2 วิเคราะห์สมบัติการดูดซับน้ำ.....	42
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	51
3.3.1 การศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซอรที่ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง.....	51
3.3.2 การศึกษาหาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง.....	53
3.3.3 การศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม.....	56
3.4 การทดลองและการตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม.....	59
3.4.1 การทดสอบสมบัติการเผาไหม้ของแผ่นฟิล์ม.....	59
3.4.2 การทดสอบสมบัติการย่อยสลายของแผ่นฟิล์ม โดยวิธีการฝังดิน.....	60
3.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม.....	60
3.4.3.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม.....	60
3.4.3.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม.....	60
3.4.4 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR).....	60
3.4.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม (Morphological Analysis).....	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	61
3.4.6.1 เทคนิค Differential scanning calorimetry.....	61
3.4.6.2 เทคนิค Thermogravimetric analysis.....	61
3.4.7 ศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	62
3.4.7.1 การทดสอบแรงดึง.....	62
3.4.7.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด.....	62
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	64
ตอนที่ 1 ผลจากการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	65
4.1 ผลการศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	66
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	66
4.1.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	67
4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	71
4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	74
4.1.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	77
4.1.6 ผลการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ.....	79
4.2 ผลการศึกษาหาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	81
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	81
4.2.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	82
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	84
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	86
4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	90
4.2.6 ผลการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ.....	92

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตอนที่ 2 ผลจากการศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้.....	94
4.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงการคิดไฟที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้.....	95
4.4 ผลการศึกษาสมบัติการย่อยสลายในดิน ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้.....	99
4.5 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้.....	105
4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง.....	105
4.5.2 ผลการศึกษสมบัติทางความร้อน.....	106
4.5.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	108
4.5.4 ผลการศึกษสมบัติเชิงกล.....	112
4.5.6 ผลการศึกษปริมาณการดูดซับน้ำ.....	116
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	117
เอกสารอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	124
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก.....	137
ภาคผนวก ค การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	138
ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติอัตราการเผาไหม้.....	140
ภาคผนวก จ การคำนวณหาค่าอัตราการเผาไหม้.....	141
ภาคผนวก ฉ การศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	142
ประวัติผู้เขียน.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน.....	11
2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลสในพืชชนิดต่างๆ.....	12
2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป.....	15
2.4 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง.....	16
2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์.....	19
2.6 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแอนติโมนีออกไซด์.....	20
2.7 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์.....	22
2.8 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	24
2.9 การจัดจำแนกลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	29
3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในงานวิจัย.....	48
3.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	49
3.3 สมบัติของ Fusabond MB 226D.....	49
3.4 สมบัติของกลีเซอรอล.....	49
3.5 สมบัติของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ No.21645-51-2.....	50
3.6 สมบัติของสารแอนติโมนีออกไซด์ No.7440-36-0.....	50
3.7 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างกัน.....	52
3.8 สภาวะที่ใช้ในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	52
3.9 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง.....	53
3.10 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับ เทอร์โมพลาสติก สตาเร็กซ์ ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างกัน.....	54
3.11 อัตราส่วนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้.....	56
3.12 สภาวะที่ใช้ในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	57
3.13 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง.....	57
4.1 ความหมายของสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาเร็กซ์ ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างกัน.....	65
4.2 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเมอร์ผสม.....	67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่ได้จากเทคนิค DSC.....	77
4.4 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่ได้จากเทคนิค TGA.....	78
4.5 ความหมายของสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างกัน.....	81
4.6 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเมอร์ผสม.....	82
4.7 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่ได้จากเทคนิค DSC.....	90
4.8 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่ได้จากเทคนิค TGA.....	91
4.9 ความหมายสูตรของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนของ สารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ต่างกัน.....	94
4.10 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้.....	106
4.11 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากเทคนิค DSC.....	107
4.12 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากเทคนิค TGA.....	108
4.13 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากงานวิจัยนี้กับฟิล์มที่จำหน่ายในประเทศไทย.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างขยะที่เกิดจากพลาสติกทั่วไป.....	1
2.1 ขั้นตอนในการย่อยสลาย.....	6
2.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้.....	6
2.3 โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์.....	8
2.4 วัฏจักรแคลวิน.....	9
2.5 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน.....	10
2.6 ระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งมันฝรั่ง.....	11
2.7 โครงสร้างของอะไมโลส.....	11
2.8 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส.....	13
2.9 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน.....	13
2.10 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน.....	14
2.11 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีในตลาดโลก.....	14
2.12 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	24
2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย.....	26
2.14 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย.....	26
2.15 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	27
2.16 ส่วนประกอบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	28
2.17 ลักษณะของสกรู.....	28
2.18 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	31
2.19 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test.....	39
2.20 แบบจำลองอุปกรณ์ในการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test.....	40
2.21 เครื่องมือการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test.....	40
2.23 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens)	
(ก) ASTM Die A (Nicked Crescent) (ข) ASTM Die B (Nicked Tab End)	
(ค) ASTM Die C (Right Angle) (ง) Russian (จ), (ฉ) Trouser.....	42
3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมแป้งมันสำปะหลัง.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง.....55
3.3	แผนผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้.....58
3.4	ภาพถ่ายอย่างขึ้นงานทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test.....59
3.5	ตัวอย่างการเตรียมขึ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด (ก) ทิศทางแนวขวางเครื่องจักร(TD) (ข) ทิศทางตามแนวเครื่องจักร(MD).....63
4.1	สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....67
4.2	สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง.....68
4.3	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....69
4.4	โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....69
4.5	สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (ก) LDPE/TPS2 (ข) LDPE/TPS3 และ (ค) LDPE/TPS4.....70
4.6	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแป้งมันสำปะหลัง.....71
4.7	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (ก) ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และ ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (ข) LDPE/TPS 2 (ค) LDPE/TPS3 และ(ง) LDPE/TPS4.....72
4.8	ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....74
4.9	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....74
4.10	ค่ามอดุลัส ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....75
4.11	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....75
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวัน ของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (ก) LDPE/TPS6 (ข) LDPE/TPS7 และ (ค) LDPE/TPS8.....83
4.14	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (ก) ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และ ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (ข) LDPE/TPS 6 (ค) LDPE/TPS7 และ(ง) LDPE/TPS8.....85
4.15	ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....87
4.16	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....87
4.17	ค่ามอดูลัส ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....88
4.18	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....88
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวัน ของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....93
4.20	อัตราการเผาไหม้ของฟิล์มจากการทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test.....95
4.21	ภาพแสดงลักษณะการเผาไหม้ของฟิล์ม จากการทดสอบการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test.....98
4.22	ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 20 สัปดาห์ โดยควบคุมปริมาณน้ำในดิน 30% และ pH 7 (ก) LDPE (ข) LDPE/TPS (ค) FLAME 1 (ง) FLAME 2 (จ) FLAME 3 (ฉ) FLAME 4 (ช) FLAME 5 และ(ซ) FLAME 6.....100
4.23	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของ (ก) สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และ(ข) สารแอนติโมนีออกไซด์.....108
4.24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถ หน่วงการติดไฟได้ (ก.)LDPE/TPS (ข.) FLAME 1 (ค.) FLAME 2 (ง.) FLAME 3 (จ.) FALME 4 (ฉ.) FLAME 5 และ(ซ.) FLAME 6.....109

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	112
4.26 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	113
4.27 ค่ามอดูลัสของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	113
4.28 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช.....	114
4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวัน ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันปัญหาของการใช้พลาสติกเริ่มมีผู้ให้ความสนใจมากขึ้น ทั้งนี้เพราะพลาสติกส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการย่อยสลาย ใช้เวลานานกว่าปีจึงจะมีการสูญเสียน้ำหนักไปบางส่วนจึงเป็นการยากที่จะกำจัดขยะพลาสติกที่เหลือจากการใช้งาน โดยถ้านำไปทำลายโดยการเผาจะก่อให้เกิดก๊าซพิษ และถ้านำไปทิ้งในมหาสมุทรจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศทางทะเล การที่จะนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ (recycle) มีปัญหาในเรื่องค่าใช้จ่ายของการเก็บรวบรวมและค่าขนส่ง จึงทำให้ปริมาณพลาสติกที่เหลือใช้มากขึ้นจนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ร้ายแรงในอนาคตอย่างแน่นอน หากยังไม่มีการใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้มาทดแทน (รูปที่ 1.1)



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างขยะที่เกิดจากพลาสติกทั่วไป[1]

เนื่องจากอุตสาหกรรมพลาสติกในประเทศไทย กำลังประสบปัญหาเรื่องของต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น โดยมีผลมาจากเม็ดพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต มีการปรับราคาเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัวตามราคาน้ำมันดิบที่สูงขึ้น และคาดว่าต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมพลาสติกมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆตามราคาของน้ำมันดิบในตลาดโลก การเลือกใช้วัตถุดิบทางธรรมชาติเป็นสารตัวเติม (filler) ในกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณพลาสติกในผลิตภัณฑ์ เป็นแนวทางหนึ่งในการลด

ต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมพลาสติก โดยแป็งจัดเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัตถุดิบใช้ทดแทนพลาสติกบางส่วนของผลิตภัณฑ์ เพราะว่าแป็งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ มีลักษณะพองตัวและเปลี่ยนรูปได้ เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม หรือนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ รวมทั้งมีความบริสุทธิ์สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป็งมันสำปะหลังที่ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกรายใหญ่ของโลกส่งผลให้มีราคาถูก ปัจจุบันได้มีการนำแป็งมาผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ในรูปสารตัวเติม (*filler*) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (*thermoplastic starch*) หรือกราฟท์โคพอลิเมอร์ (*graft copolymer*) อย่างไรก็ตามในการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ต้องคำนึงถึงอัตราส่วนของแป็ง ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแล้ว ยังทำให้ราคาของผลิตภัณฑ์สามารถแข่งขันกับพลาสติกทั่วไปได้ รวมทั้งการผสมสารเติมแต่ง (*additive*) ประเภทต่างๆลงในกระบวนการผลิต ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติเค้นตามสมบัติของสารเติมแต่งที่เลือกใช้ เพื่อพัฒนาและปรับปรุงให้ผลิตภัณฑ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

รวมทั้งจากปัญหาการลुकติดไฟง่ายของพลาสติก ซึ่งสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆในชีวิตประจำวันของมนุษย์ส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่ทำจากพลาสติก ซึ่งจะสามารถก่อให้เกิดการลุกลามของเปลวไฟจนเกิดเป็นวินาศภัยได้อย่างง่ายดาย โดยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการพบเห็นการเกิดวินาศภัยจากแหล่งข่าวต่างๆเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งการเกิดวินาศภัยในแต่ละครั้ง มีสาเหตุมาจากความประมาทหรือเกิดจากอุบัติเหตุ ผลกระทบจากการเกิดวินาศภัยแต่ละครั้งล้วนก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ประสบภัยทั้งสิ้น ดังนั้นถ้าสามารถผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่มีสมบัติในการหน่วงหรือต่อต้านการลुकติดไฟได้ ย่อมเป็นผลดีในด้านช่วยเพิ่มความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินให้มากขึ้นได้

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ โดยทำให้เกิดการย่อยสลายด้วยการผสมแป็งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และศึกษาผลของการผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้และสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มย่อยสลาย แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม (*Blown-film process*) โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (*Low Density Polyethylene; LDPE*) แป็งมันสำปะหลัง และสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ โดยการที่นำแป็งมันสำปะหลังมาผสมในพลาสติก จะช่วยให้เกิดการย่อยสลายได้ตามธรรมชาติซึ่งจะส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตได้ และการที่ผสมหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ในพอลิเมอร์เป็นการเพิ่มสมบัติในการต่อต้านการลुकติดไฟที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นให้กับฟิล์ม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่หลากหลายยิ่งขึ้น เช่น ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตเป็นฟิล์มคลุมวัตถุดิบ และฟิล์มคลุมผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่ผลิตได้
3. เพื่อศึกษาผลของสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่ผลิตได้
4. เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนของปริมาณพลาสติกไซเซออร์ ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช
2. ศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสารช่วยผสม ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช
3. ศึกษาอัตราส่วนของปริมาณสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้
4. ศึกษาผลของสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้
5. ศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์

2. สามารถทราบถึงประสิทธิภาพในการหน่วงการคิดไฟของสารอะลูมิเนียมไตรไฮดรทและสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีต่อฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้
3. สามารถทราบถึงสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟที่ผลิตได้
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปเป็นพื้นฐานความรู้ทางการวิจัย โดยประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์ผสมอื่นๆได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้จากแป้ง [2,3]

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ [3]

ปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์และนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลกให้ความสนใจในพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้จะผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน ทั้งนี้ พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ

American Society for Testing and Materials (ASTM) ได้ให้ความหมายพลาสติกย่อยสลายได้ว่าเป็นพลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เนื่องจากมีการสูญเสียสมบัติ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

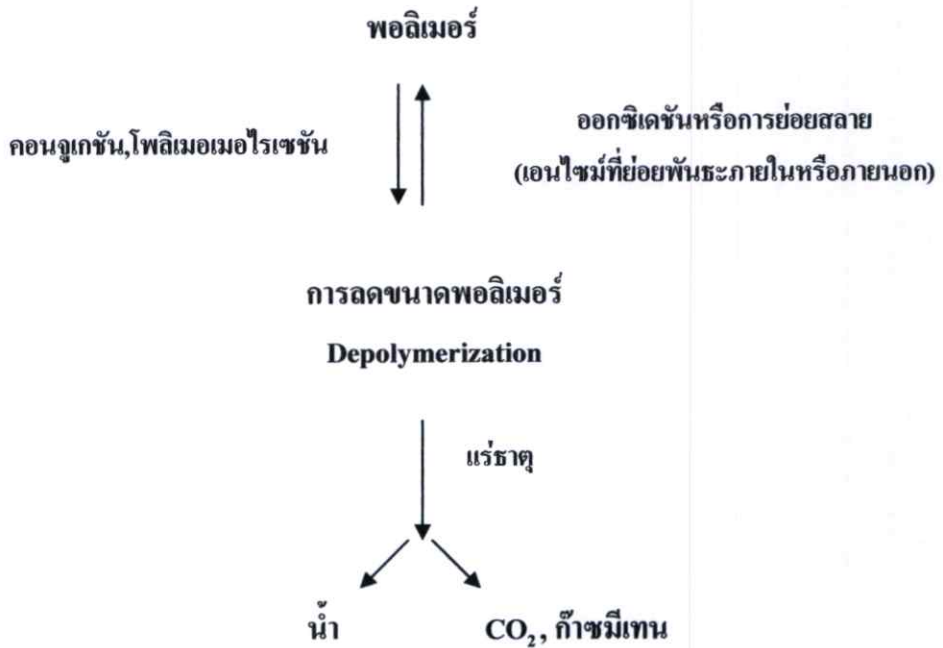
1. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)
2. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)
3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)
4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) คือ พลาสติกที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ สารประกอบคาร์บอนที่ได้จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม การย่อยสลายเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน คือ

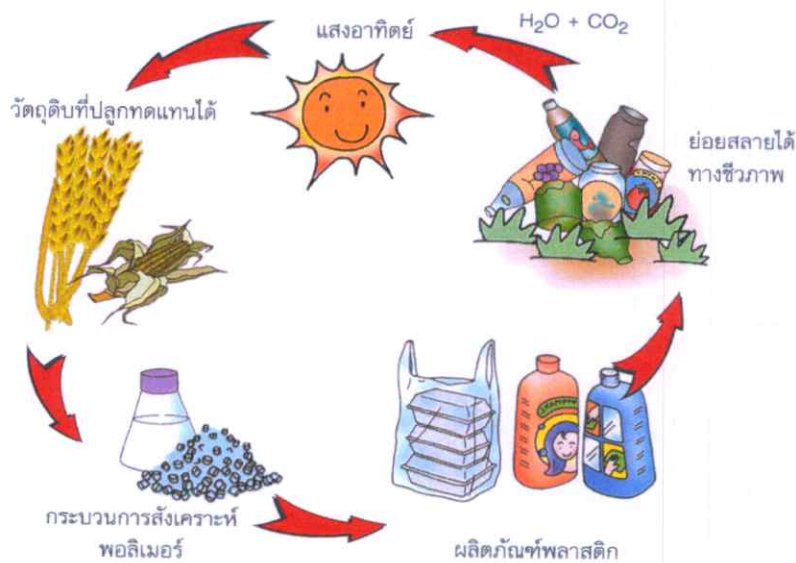
1. จะเป็นการย่อยสลายทำให้สายโซ่โมเลกุลแตกออก เรียกว่า การลดขนาดพอลิเมอร์ (Depolymerization) จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบตัดพันธะแบบสุ่ม และแบบตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ จนได้สารประกอบที่เสถียร

2. นำสารประกอบที่ได้จากการย่อยขั้นตอนแรกเข้าสู่เซลล์ แล้วถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน ก๊าซ และชีวมวล (biomass) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนโตรเจน และน้ำ เป็นต้น

การเกิดการย่อยสลายส่วนใหญ่ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลง ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม รวมทั้งประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น (รูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.1 แผนภาพขั้นตอนในการย่อยสลาย [2]



รูปที่ 2.2 วงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ [4]

จากปัญหาของการใช้พลาสติกได้ก่อให้เกิดมลภาวะต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากขึ้นตามลำดับหน่วยงานต่างๆ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้โดยผลิตจากพืชและน้ำมันพืชซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถปลูกทดแทนได้และสามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติก พลาสติกย่อยสลายที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติโดยเฉพาะแป้ง (Starch) ได้ทวีความสำคัญมากขึ้น ซึ่งมีทั้งที่ผลิตจากแป้งบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี ถั่วเหลือง มันสำปะหลัง และข้าวโพด แต่พลาสติกย่อยสลายที่ทำจากแป้งเพียงอย่างเดียวอาจจะมีสมบัติเชิงกลไม่เพียงพอ วัตถุประสงค์ และ อายุใช้งานสั้นเนื่องจากเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนผิวพลาสติกได้ ดังนั้น การผลิตพลาสติกย่อยสลาย (Biodegradable Plastic) โดยการผสมพอลิเมอร์กับแป้งจะสามารถย่อยสลายได้และเสริมความแข็งแรงให้กับแป้งโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี และ เมื่อใช้แล้วสามารถทิ้งในสิ่งแวดล้อมแล้วย่อยสลายเป็นปุ๋ยและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งกลับมายังพืชเพื่อสังเคราะห์แสงและเก็บเป็นแป้งหมุนเวียนเข้าสู่วัฏจักรต่อไป

2.1.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง [2]

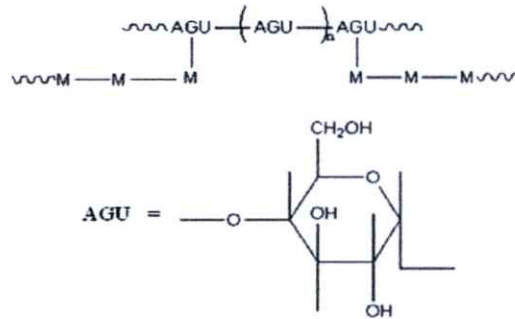
พัฒนาการทางด้านพลาสติกย่อยสลายมีมานานแล้ว โดยเริ่มต้นจากการริเริ่มนำพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีราคาถูก คือ แป้ง ไปผสมกับพลาสติกเพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูปพลาสติก และได้มีการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์โดยทั่วไป จนสามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก โดยกลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยในกระบวนการผลิตจะอาศัยกระบวนการที่ทำให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดแทนโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน เรียกว่า โฟมแป้ง ซึ่งใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

2. แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ โดยพลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่แตกต่างกัน คือส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 แบบ คือ แป้งที่อยู่ในรูปของเม็ดแป้งหรือแป้งที่ผ่านการเจลาติไนซ์ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติกเกิดเป็นรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี

3. แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ เป็นการทำปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (graft copolymerization) กับโมเลกุลของแป้ง ซึ่งแป้งที่ใช้อาจเป็นเม็ดแป้งหรือแป้งเจลาติไนซ์ โดยโครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ AUG เป็นหน่วยของกลูโคส และ M เป็นมอนอเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับแป้ง

ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ คือ ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ดูดซับน้ำ (high-water absorbing polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับของเหลวได้ดี สามารถดูดน้ำได้มากกว่าน้ำหนักตัวเองตั้งแต่ 15 เท่าขึ้นไปจนถึงหลายร้อยเท่าสามารถนำมาใช้ผลิตภัณฑ์จำพวกผ้าอ้อม ผ้าอนามัย แผ่นดูดซับที่ใช้ในโรงพยาบาล วัสดุปรับสภาพดินให้อุ่มน้ำ วัสดุแทนวุ้นใช้ในการเพาะเนื้อเยื่อ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ [2]

2.2 แป้ง [5,6]

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแป้ง

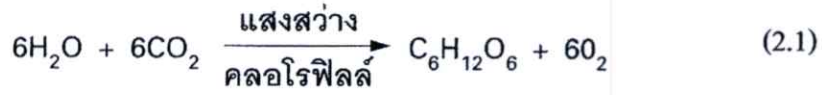
แป้งเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยกลูโคส เป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวกับน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในน้ำเย็น สามารถพบได้ในพืชทุกชนิด โดยพืชจะสะสมแป้งไว้ในเซลล์ เช่น ในเมล็ด เนื้อไม้ และรากพืช เป็นต้น

กระบวนการผลิตแป้งนั้น มีหลายวิธีขึ้นกับวัตถุดิบที่ใช้ หลักการโดยทั่วไปคือ แยกเมล็ดแป้งออกจากองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เส้นใย โปรตีน และเกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์โดยการล้างน้ำ ทำการปั่นแยกและอบแห้งต่อไป ในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งแขวนลอยอยู่ในน้ำเนื่องจากแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น

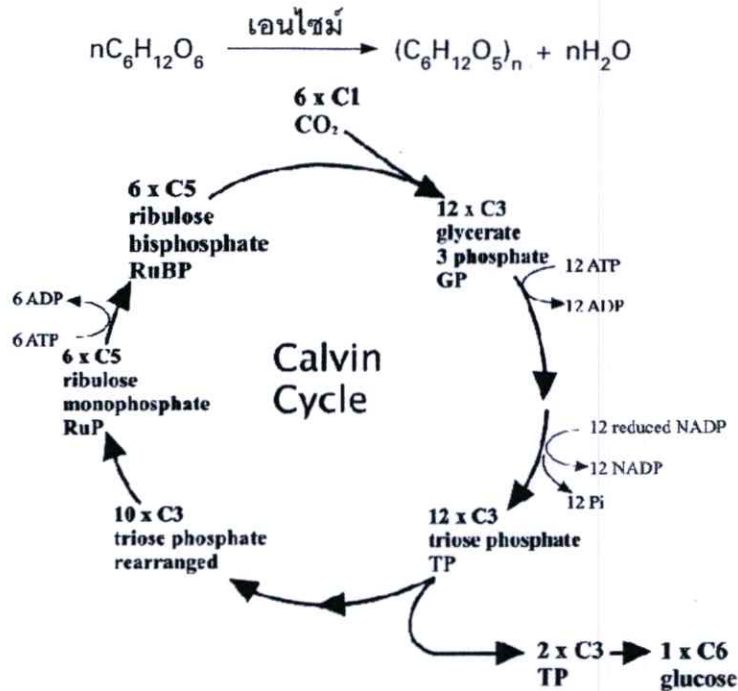
แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร และยารักษาโรค เป็นต้น ประโยชน์ของแป้งเกิดจากสมบัติความชื้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดฟิล์ม คุณภาพสามารถควบคุมได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่หาง่ายและราคาถูก

2.2.2 การสังเคราะห์แป้ง

การสังเคราะห์แป้งเกิดขึ้นในส่วนของพืชที่มีสีเขียวซึ่งมีคลอโรฟิลล์ในการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและน้ำในการสร้างกลูโคสและออกซิเจน กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการ



ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงพืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างกรดฟอสโฟกลีเซอริก (Phosphoglyceric acid; PGA) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม PGA จะผ่านวัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) ได้เป็นน้ำตาลคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงจะมีการสร้างพอลิเมอร์ของกลูโคสขึ้นมาจากการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ของกลูโคสนี้เรียกในขั้นต้นว่า “แป้ง” แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์อย่างง่าย ๆ ได้ดังนี้

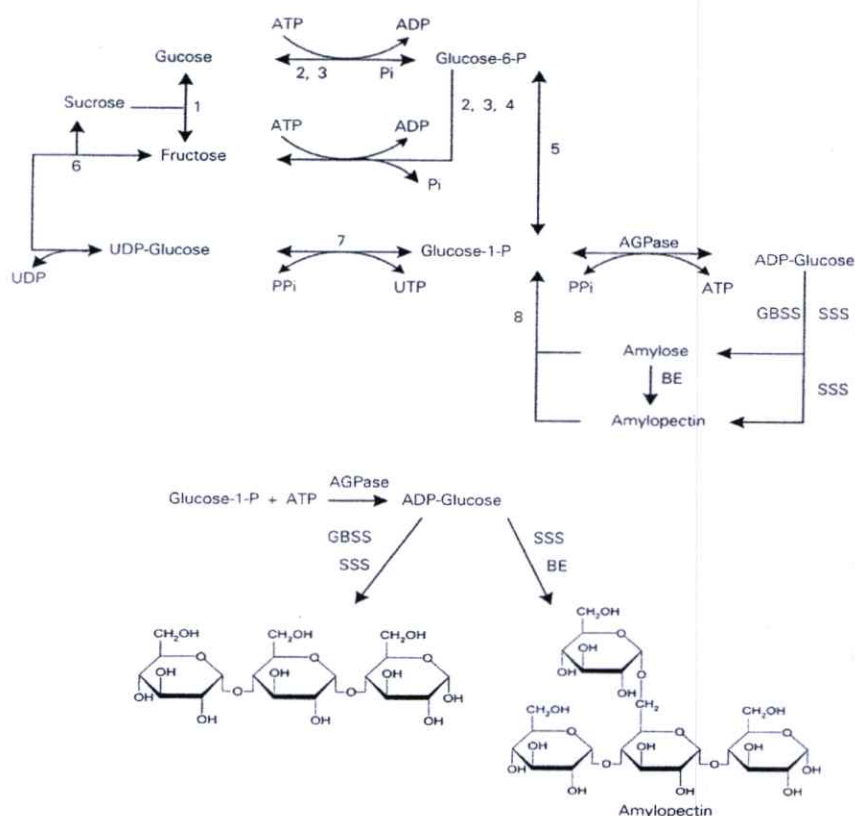


รูปที่ 2.4 วัฏจักรแคลวิน (Calvin cycle) [5]

ระหว่างการสังเคราะห์ด้วยแสงในเวลากลางวัน แป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบในรูปของเม็ดแป้งขนาด 1 ไมครอน ในช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ได้เป็นน้ำตาลซูโครส และถูกส่งไปเก็บสะสมอยู่ในรูปของแป้งที่ส่วนต่างๆของพืช เช่น เก็บไว้ในเมล็ด (ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวฟ่าง) เก็บไว้ในราก (มันสำปะหลัง) เก็บไว้ในส่วนหัว (มันฝรั่ง มันเทศ หัวขายนม่อม) เก็บไว้ในลำต้น (สาเก สับปะรด)

2.2.3 องค์ประกอบภายในแป้ง

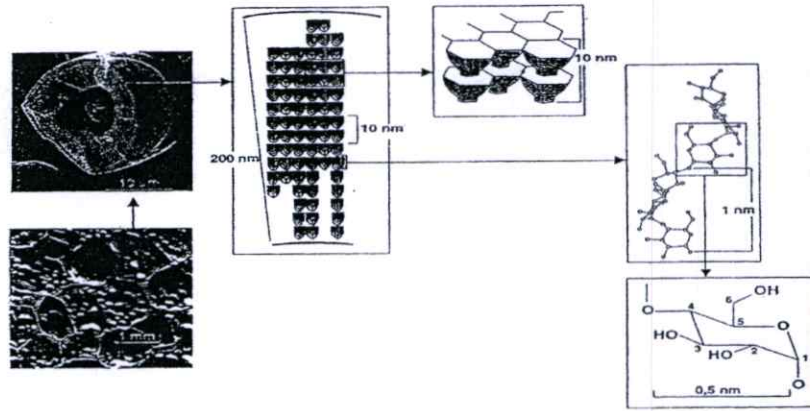
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกติน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 โดยแป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน แตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.1) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.5 วัฏจักรการสังเคราะห์อะไมโลสและอะไมโลเพกติน [2]

คำย่อ; AGPase: ADP-glucose pyrophosphorylase; G-1-P: glucose-1-phosphate; GBSS: granule-bound starch synthase; SSS:soluble starch synthase; BE:branching enzyme

เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง; 1. invertase 2. hexokinase 3.hexose-6-phosphate 4.glucose-phosphate isomerase 5. phosphoglucomutase 6.sucrose synthase 7. UDP-glucose pyrophosphorylase 8.starch phosphorylase



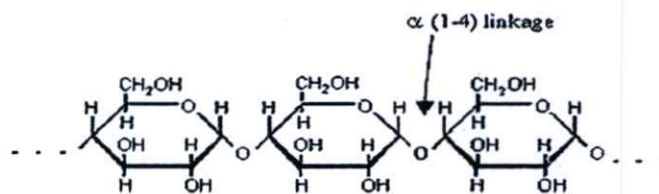
รูปที่ 2.6 ระดับโครงสร้างในเม็ดแป้งมันฝรั่ง [2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [2]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

2.2.3.1 อะไมโลส (Amylase)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลส [5]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซีปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก(Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แบ่งจากรัฐพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แบ่งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकु มีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% Waxy starch ไม่มีอะไมโลสเลย และแบ่งจาก Amylomaize มีอะไมโลสสูงมากถึง 80% น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 คาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป ในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี แป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1000 ถึง 6000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลสของแป้งหลายๆ ชนิดดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างในอะไมโลสของพืชชนิดต่างๆ [5]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะไมโลส (%)	β - Amylase Limit (%)	DP เฉลี่ย	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย เฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17	-	-	-	-	-
Indica	-	73	1000	4.0	250	49
Japonica	-	81	1100	3.4	320	31
แป้งมัน สำปะหลัง	17	75	2600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4900	9.5	240	-

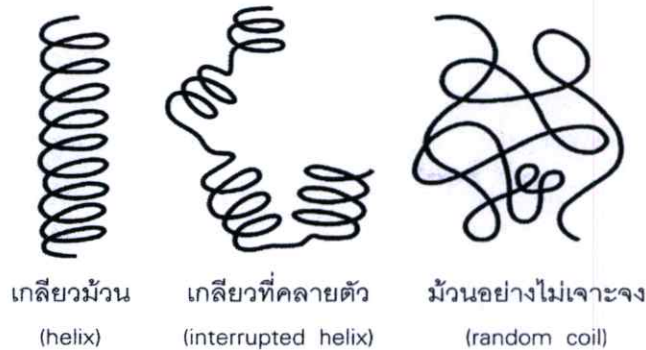
หมายเหตุ β -amylolysis = %การย่อยแป้งโดย β -amylase

DP = Degree of polymerization

NC = Number of chain

CL = Chain length

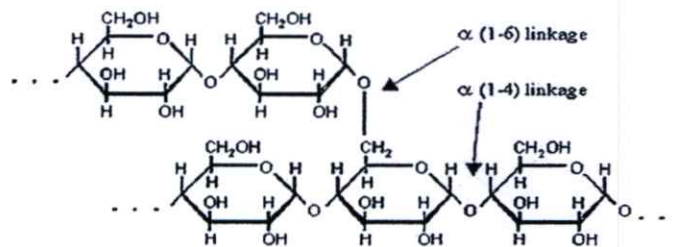
โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียว (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (Random coil) ดังรูปที่ 2.8 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 6500 ถึง 160000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลายสำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง



รูปที่ 2.8 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [2]

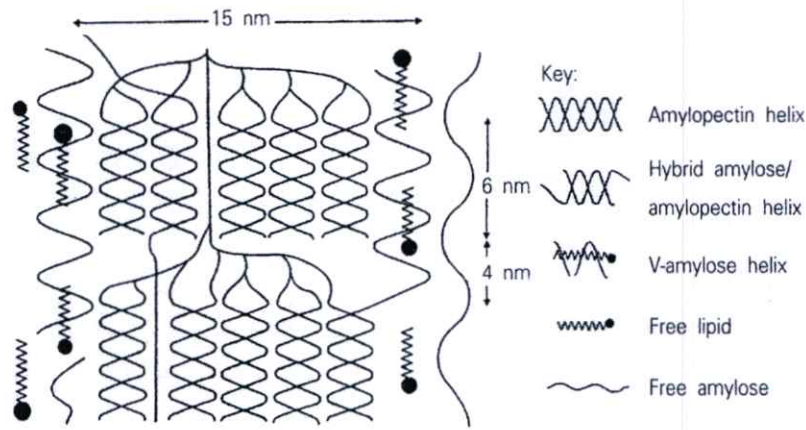
2.2.3.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin)

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic linkage ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างอะไมโลเพกติน [5]

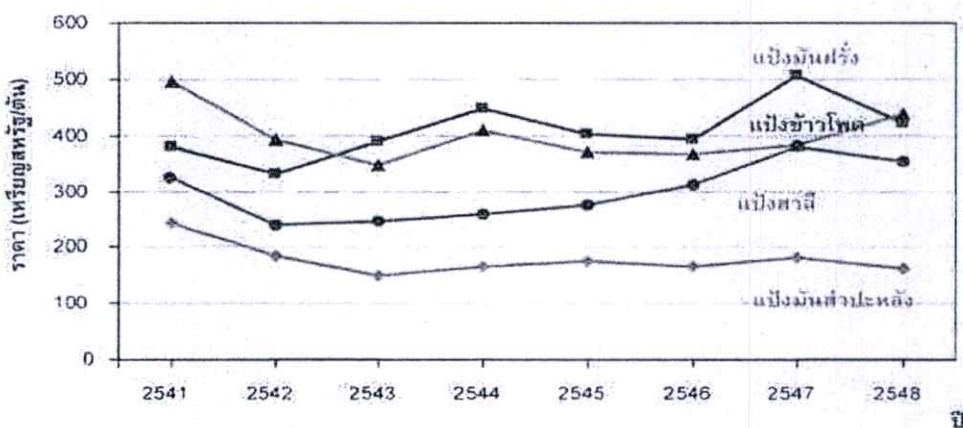
แบบจำลองของโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและ Monoacyl lipid ในส่วนผลึกของเม็ดแป้งแสดงดังรูปที่ 2.10 อะไมโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ และสภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (Double helix)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพกตินและไขมัน [2]

2.2.4 แป้งมันสำปะหลัง [3]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อุดมไปด้วยวัตถุดิบชีวมวลหรือผลผลิตจากการเกษตร ได้แก่ อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยเป็นผลผลิตจากการเกษตรที่มีส่วนประกอบของแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) น้ำตาล (กลูโคส) หรือเส้นใย (เซลลูโลส) เหล่านี้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ แต่เมื่อพิจารณาด้านความสามารถในการแข่งขันด้านราคาและความสามารถในการเพาะปลูกของประเทศไทยแล้ว อาจจัดได้ว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมมากที่สุด โดยเมื่อเทียบราคาแป้งมันสำปะหลังกับแป้งที่ทำจากพืชชนิดอื่นตามราคาตลาดโลก แป้งมันสำปะหลังจะมีราคาถูกที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ราคาที่แข่งขันได้ของมันสำปะหลังแล้ว ประเทศไทยยังสามารถส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลกด้วย



รูปที่ 2.11 ราคาแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีในตลาดโลก [6]

ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยผลิตหัวมันสำปะหลังสดได้ทั้งหมด 16.94 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 8 ของผลผลิตมันสำปะหลังโลกและจัดเป็นผู้ผลิตหัวมันสำปะหลังสดเป็นอันดับที่ 4 รองจากไนจีเรีย บราซิล และอินโดนีเซีย หัวมันสำปะหลังสด ร้อยละ 73.5 ถูกส่งออกในรูปแบบของมันอัดเม็ด มันเส้น และแป้งดิบ และเป็นประเทศผู้ส่งออกผลิตผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.6 ล้านตันหรือคิดเป็นสัดส่วนตลาดร้อยละ 85.5 คิดเป็นมูลค่าการส่งออกมากกว่า 30000 ล้านบาท โดยส่งออกให้ประเทศจีน และได้หัวมัน เป็นต้น ส่งผลให้มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย หัวมันสำปะหลังส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 26.5 ใช้บริโภคภายในประเทศ ซึ่งเกือบทั้งหมดถูกใช้ในรูปของแป้งดิบและนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมผงชูรส อุตสาหกรรมไลซีน อุตสาหกรรมให้ความหวาน อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมทอผ้า เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการมันสำปะหลังเพื่อตลาดส่งออกเป็นปัจจัยหลักต่อธุรกิจมันสำปะหลังของไทยในปัจจุบัน

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากรากที่มีลักษณะคล้ายหัวของต้นมันสำปะหลังมีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilisima* ในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า Tapioca starch, Cassava starch หรือ Monioc starch โดยมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป [7]

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

2.2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ประกอบด้วย เม็ดแป้งตั้งแต่ 2 – 8 เม็ดมารวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 4 – 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกจะมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมหาดหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำ เรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่

เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้ เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการควบน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้ เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ควบน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง [7]

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 ($^{\circ}\text{C}$)	75 - 80	65 - 70
Peak viscosity	600	1000
Swelling power ที่ 95 $^{\circ}\text{C}$	24	71
Paste viscosity	ปานกลาง	สูง
Paste and film clarity	ทึบแสง	ใส
Retrogradation rate	สูง	ต่ำ

2.3 การย่อยสลายของแป้ง [2,8]

2.3.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยด่าง

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอาชญาศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือร่อยค่างดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

3. การเกิดร่อยค่าง (Soiling)

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดร่อยค่างดำ ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ ร่อยค่างดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดร่อยค่างดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ

เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

- แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo-enzyme ซึ่งไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน

- กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่ non-reducing และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 6 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแปลงและแตกตริกลงไปเป็นกลูโคส

- เบต้า-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1, 4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลาย non-reducing

2.3.2 การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatical hydrolysis)

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแปรงคัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยใช้ Direct steam injection (Jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยระดับถึงที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใน Cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแปรงคัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส ไฮโคลเดกซ์ทริน

2.3.3 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยแสง (Photodegradable plastics)

พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยแสงจัดเป็นพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับแสง ซึ่งพลาสติกชนิดนี้จะมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) เมื่อได้รับแสงอาทิตย์จะสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สายโซ่โมเลกุลของสารพอลิเมอร์สลายตัว ดังนั้นถ้าพลาสติกชนิดนี้ไปทิ้งไว้กลางแจ้งหลังจากใช้งานแล้ว โดยปล่อยให้ทิ้งไว้ให้โดนแสงอาทิตย์ พลาสติกชนิดนี้จะเสื่อมสภาพและค่อยๆ สลายตัวไป

2.3.4 พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีอื่นๆ

พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีอื่นๆ ยังมีอีกมากมายหลายชนิด เช่น พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยน้ำ และพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทั้งทางชีวภาพและแสง เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกที่สลายตัวได้ดังกล่าวเป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก เพราะเป็นการรวมเอาข้อดีของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้แต่ละวิธีเอาไว้ เช่น พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเอโซอะโรมาติก (Azoaromatic) และหมู่คีโต (Keto group) ที่ไวต่อแสง ในระหว่างใช้งานหมู่เอโซ (Azo) จะช่วยป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสง และหลังจากการเลิกใช้งานแล้วพลาสติกชนิดนี้จะถูกทิ้งไว้ในสิ่งแวดล้อม ทำให้หมู่เอโซถูกจุลินทรีย์เข้าทำลาย และเหลือหมู่ที่สามารถสลายตัวเนื่องจากแสง ดังนั้นเมื่อทิ้งไว้กลางแจ้งจะสามารถสลายตัวได้ต่อไป

2.3.5 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ

การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพมี 3 ลักษณะ คือ

1. พลาสติกไม่ได้เสื่อมสลายเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็กลายเป็นผงละเอียด
2. การเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำต่อไป
3. การเสื่อมสลายเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือการที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นได้โดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน และ พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรทการ์เรท เป็นต้น

2.4 สารหน่วงการติดไฟ (Flame retardant) [9]

เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ผสมกับพลาสติกเพื่อความต่อต้านการติดไฟ และลดควันที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ สารเติมแต่งชนิดนี้ไม่สามารถจะหยุดยั้งการติดไฟได้โดยสิ้นเชิง แต่จะทำให้พลาสติกมีความสามารถในการต่อต้านการจุดติดไฟ (ignition resistance) หรือถ้าพลาสติกเกิดการติดไฟ สารเติมแต่งชนิดนี้จะช่วยลดการแผ่ขยายของเปลวไฟ

การจุดติดไฟ (ignition) ของพลาสติกและวัสดุอื่นๆ จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนถึงระดับที่ทำให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการแตกสลาย (pyrolysis) เกิดโมเลกุลของก๊าซที่สามารถติดไฟได้ซึ่งก๊าซเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศโดยผ่านกลไกแบบอนุมูลอิสระ ทำให้เกิดเปลวไฟอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิการจุดติดไฟของวัสดุ จะขึ้นกับองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุ หรือขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของวัสดุนั้น

ดังนั้นสารต่อต้านการติดไฟที่นำมาผสมกับพลาสติก จะต้องทำให้พลาสติกมีอุณหภูมิการจุดติดไฟสูง ซึ่งสารเติมแต่งชนิดนี้จะทำให้เกิดการสลายตัวแล้วให้ก๊าซที่ไม่ติดไฟ และสามารถลดอัตราการแผ่ขยายของเปลวไฟ โดยยับยั้งปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระในขณะที่เกิดเปลวไฟได้ โดยสารหน่วงการติดไฟที่นำมาใช้ในงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

2.4.1 อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ [10]

อะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ เป็นสารหน่วงการติดไฟที่มีประสิทธิภาพสูง มักจะสลายตัวให้อิออนน้ำ และยังทำหน้าที่ในการดึงความร้อนออกจากพลาสติกเนื่องจากการดูดพลังงานเพื่อการระเหยและระเหิด จึงสามารถลดอัตราการเกิดก๊าซที่ติดไฟของพลาสติกได้ สารหน่วงการติดไฟชนิดนี้มีราคาถูก จึงได้รับความนิยมและมีปริมาณการใช้งานมากเป็นอันดับหนึ่งในปัจจุบัน สูตรเคมีของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์คือ $Al(OH)_3$

อะลูมินาไตรไฮดรอกไซด์ จะทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการติดไฟและสามารถหน่วงการเกิดควันไฟได้ในตัวเอง โดยเมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะเกิดกระบวนการสลายตัวได้อะลูมิเนียมปริมาณ 66 เปอร์เซ็นต์ และน้ำปริมาณ 34 เปอร์เซ็นต์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบไม่ผันกลับ กระบวนการดังกล่าวจะช่วยป้องกันการจุดติดไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ตารางที่ 2.5)

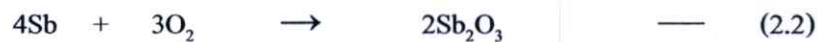
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ [10]

ลักษณะทางกายภาพ	เป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น
จุดหลอมเหลว	300 องศาเซลเซียส
ความถ่วงจำเพาะ	2.42
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ
ความเป็นกรด-เบส	มีความเป็นเบสอ่อน
จุดวาบไฟ	ขึ้นอยู่กับความอันตรายของเปลวไฟ
ความเสถียรภาพ	คงความเสถียรภาพอยู่ได้ภายใต้สภาวะปกติ

ลักษณะการนำไปใช้งาน นำไปเคลือบเป็นชั้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ นำไปผสมให้เกิดการกระจายที่ดีในพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแขวนลอยในพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ เช่น สีทาบ้าน เป็นต้น นิยมใช้กับ อุปกรณ์ไฟฟ้า สายเคเบิล แผ่นฟิล์มที่ใช้คลุมวัตถุดิบ หรือคลุมกระดาษ เบาะในรถยนต์ ชิ้นส่วนภายในรถยนต์ เป็นต้น

2.4.2 แอนติโมนีออกไซด์ [11]

แอนติโมนีออกไซด์จัดเป็นสารหน่วงการเกิดควันไฟที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ร่วมกับสารหน่วงการติดไฟประเภทสารประกอบของฮาโลเจน ซึ่ง จะก่อให้เกิดก๊าซพิษและควันพิษเป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกับสารหน่วงการติดไฟ เพื่อที่จะสามารถลดปริมาณควันไฟที่เกิดขึ้นได้ หากมีการเผาไหม้เกิดขึ้นและแอนติโมนีออกไซด์มีความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการกระจายของเปลวไฟได้ด้วย ซึ่งจะใส่ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากแอนติโมนีออกไซด์มีราคาแพง ปฏิกิริยาการเตรียมแอนติโมนีออกไซด์ แสดงดังสมการ



สูตรทางเคมีของแอนติโมนีออกไซด์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแร่แอนติโมนี ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิในการเผาค่อนข้างสูง ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนหรืออากาศ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.3 ซึ่งจะได้แอนติโมนีออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแอนติโมนีออกไซด์ [11]

ลักษณะทางกายภาพ	เป็นผงสีขาว
จุดหลอมเหลว	656 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	5.2 g/cm ³
จุดเดือด	1425 องศาเซลเซียส
ความสามารถในการละลายน้ำ	สามารถละลายน้ำได้ ในปริมาณ 1.4 มิลลิกรัมต่อน้ำ 100 มิลลิตรที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

2.4.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้ [12,13]

การพิจารณากระบวนการเผาไหม้ในระดับมหภาค (macro scale) แตกต่างกับระดับจุลภาค (micro scale) ตรงที่ระดับจุลภาคจะพิจารณาในส่วนของพอลิเมอร์เท่านั้น ในขณะที่ระดับมหภาคจะพิจารณาวัสดุพลาสติกที่รวมกับสารตัวเติม หรือสารเติมแต่ง การเผาไหม้ของวัสดุสามารถแบ่งการพิจารณาสิ่งที่เกิดขึ้นเป็น 5 ขั้นตอน

1. การให้ความร้อน (Heating) ความร้อนจากแหล่งภายนอกมาจากการได้รับจากเปลวไฟ โดยตรง (การแผ่รังสีและการพาความร้อน) หรือจากของแข็งร้อน (การนำความร้อน) อัตราของ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับ อัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิที่แตกต่างและสมบัติของวัสดุ ดังนี้

1.1 ความจุความร้อนหรือปริมาณความร้อนที่ต้องการในการทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วย วัสดุที่มีความจุความร้อนสูงอุณหภูมิจะเพิ่มช้ากว่าวัสดุที่มีความจุความร้อนต่ำ

1.2 การนำความร้อนหรืออัตราความร้อน ที่ไหลผ่านวัสดุที่มีความหนาค่าหนึ่ง ภายใต้อุณหภูมิ ที่แตกต่างค่าหนึ่ง ถ้าค่าการนำความร้อนสูง หมายความว่าความร้อนถูกถ่ายโอนเข้าไปใน 1 หน่วย มวลได้เร็วกว่าในกรณีที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ

1.3 ความร้อนแฝงการหลอมเหลว การระเหยเป็นไอหรือการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นใน วัสดุระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

2 การสลายตัว (Decomposition) วัสดุได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิการสลายตัวและเริ่ม เปลี่ยนแปลงไปเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้

2.1 ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้หรือก๊าซซึ่งสามารถเผาไหม้ในอากาศได้ กลุ่มนี้รวมถึงมีเทน อีเทน เอทิลีน ฟอรัลดีไฮด์ อะซิโตน และคาร์บอนมอนอกไซด์

2.2 ก๊าซที่ไม่เกิดการสันดาปหรือก๊าซซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ในอากาศได้ในกลุ่มนี้จะมี คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ ไฮโดรเจนโบรไมด์ และไอน้ำ

2.3 ของเหลวโดยทั่วไปเป็นพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้บางส่วนและสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลสูง

2.4 ของแข็ง โดยทั่วไปเป็น ถ่านหิน และซีเมนต์เป็นต้น

2.5 อนุภาคของแข็ง หรือเศษพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกับควัน

3. การจุดติดไฟ (ignition) ก๊าซที่เผาไหม้ได้ จะเกิดการจุดติดไฟในอากาศเมื่อมีออกซิเจนหรือ สารออกซิไดซ์เพียงพอต่อการเผาไหม้ การจุดติดไฟขึ้นกับแหล่งภายนอกของการจุดติดไฟ เช่น เปลวไฟ การเกิดจุดประกายไฟ และอุณหภูมิในการจุดติดไฟแสดงดังตารางที่ 2.7 โดยวัสดุจะเกิดการจุดติดไฟได้เมื่อมีปัจจัยดังต่อไปนี้

3.1 ก๊าซที่อยู่รอบวัสดุสามารถจุดติดไฟได้ โดยการจุดประกายไฟหรือใช้เปลวไฟ (Flash ignition temperature)

3.2 อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง (self-ignition temperature) หรืออุณหภูมิซึ่งปฏิกิริยาภายในวัสดุ ทำให้เกิดการจุดติดไฟ โดยทั่วไปอุณหภูมินี้สูงกว่าอุณหภูมิการจุดติดไฟโดยใช้เปลวไฟ เพราะ ต้องการพลังงานมากกว่า

3.3 ระดับต่ำสุดของออกซิเจน ที่ต้องการในการจุดประกายไฟ และการเผาไหม้ (Limiting oxygen concentration) โดยทั่วไปวัสดุสามารถดับไฟได้เอง (Self-extinguishing) ถ้าไม่สามารถเผาไหม้ต่อไปกับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21% และไม่เกิดการจุดติดไฟ (Non-ignition) ถ้าไม่สามารถจุดประกายไฟกับออกซิเจนที่น้อยกว่า 21%

ตารางที่ 2.7 อุณหภูมิในการจุดติดไฟของพอลิเมอร์ [13]

พอลิเมอร์	อุณหภูมิของจุดวาบไฟ (°C)	อุณหภูมิตัดไฟด้วยตัวเอง (°C)
พอลิเอทิลีน	341-357	349
พอลิไวนิลคลอไรด์	391	454
พอลิไวนิลคลอไรด์ อะซิเตท	320-340	435-557
พอลิไวนิลดีน คลอไรด์	532	532
พอลิสไตรีน	345-360	488-496
สไตรีน อะคริโลไนไตรล์	366	454
สไตรีน เมทิลเมทาคริเลท	329	485
พอลิเมทิลเมทาคริเลต	280-300	450-462
พอลิคาร์บอนเนต	375-467	477-580
ไนลอน	421	424
พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน	141	530
เซลลูลอสไนเตรท	305	141
เซลลูลอสไตรอะซิเตท (เส้นใย)	291	540
เอทิลเซลลูลอส	310	296
พอลิยูรีเทน	520-540	416
ฟีนอล	475-500	571-580

4. การเผาไหม้ (Combustion) โดยการเผาไหม้ของมวลวัสดุ 1 หน่วย ทำให้เกิดปริมาณความร้อนในการเผาไหม้ ความร้อนของการเผาไหม้ทำให้ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิของก๊าซจากการเผาไหม้ และก๊าซที่ไม่เกิดการเผาไหม้สูงขึ้น จะมีการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยการพาความร้อน แผล่ความร้อน และการนำความร้อน

5. การลุกลามของเปลวไฟ (Propagation) คือความร้อนสุทธิของการเผาไหม้ของมวลวัสดุ 1 หน่วย มีค่าลดลงโดยความร้อนสูญเสียไปกับสิ่งแวดล้อม และเพิ่มขึ้นโดยได้รับความร้อนจากแหล่งภายนอก เช่น เปลวไฟซึ่งต้องเพียงพอในการทำให้มวลวัสดุ 1 หน่วยที่อยู่ในขั้นตอนการเผาไหม้เข้าสู่ขั้นลุกลามได้

2.5 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [14,15]

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพอลิโอเลฟินชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic hydrocarbon) สูตรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนคือ $-(CH_2-CH_2)_n-$

พอลิเอทิลีนผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) ค้นพบครั้งแรกโดย เฟาเซตต์และกิบสัน (Fawcett and Gibson) ที่บริษัท ไอซีไอ (Imperial Chemical Industries Ltd. : ICI) ประเทศอังกฤษ โดยการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ความดันสูง และได้ค้นพบพอลิเอทิลีนโดยบังเอิญจากปฏิกิริยาของเอทิลีนกับ เบนซาลดีไฮด์ ปัจจุบันมีการผลิตพอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับการใช้งาน มีทั้ง LLDPE (Linear Low Density Polyethylene) MDPE (Medium Density Polyethylene) HDPE (High Density Polyethylene) และ UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene)

2.5.1 การเตรียมพอลิเอทิลีน

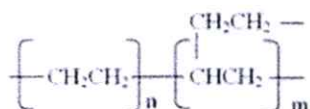
พอลิเอทิลีนได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีน โมโนเมอร์ พอลิเมอร์ที่ได้มีตั้งแต่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำมีลักษณะเป็นไข ไปจนถึงน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีความเป็นผลึกสูง กระบวนการในการเตรียมพอลิเอทิลีนมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี คือ

1. พอลิเมอไรเซชันที่ความดันสูง พอลิเมอร์ที่ได้โดยวิธีนี้เป็น LDPE จะมีลักษณะยืดหยุ่น ความหนาแน่นต่ำ
2. กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process) พอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่นปานกลางแต่สูงกว่าการใช้ความดันสูง
3. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) ผลผลิตที่ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นสูง สายโซ่โมเลกุลเกือบจะเป็นสายโซ่ตรงชนิดสมบูรณ์โดยแทบไม่มีกิ่งสาขาเลย จึงทำให้มีความหนาแน่นสูงมาก
4. กระบวนการ Standard oil กระบวนการนี้คล้ายกับกระบวนการฟิลลิปส์ และพอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันกับพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์ด้วย

พอลิเอทิลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature: T_g) ประมาณ -130 ถึง 60 องศาเซลเซียส ทำให้พอลิเอทิลีนมีลักษณะทั้งยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติ สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature: T_m) ของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ 108 ถึง 133 องศาเซลเซียส

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีความเป็นผลึกต่ำ โครงสร้างมีโซ่กิ่งสาขายาว มีความหนาแน่นต่ำ $0.926 - 0.940 \text{ g.cm}^{-3}$ พอลิเมอไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก โซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก “intramolecular back-biting”

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,000-40,000 ในเชิงพาณิชย์นิยมระบุน้ำหนักโมเลกุลด้วยค่าดัชนีการหลอมเหลว (melt index)(ASTM 1238) ซึ่งหมายถึง น้ำหนักเป็นกรัมของพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากหลอดรูเล็กมาตรฐานที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ในเวลา 10 นาที สำหรับ LDPE มีค่า melt index อยู่ในช่วง 0.1-10.9 g/10 นาที (ตารางที่ 2.8)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [16]

ตารางที่ 2.8 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [14]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิหลอมเหลว	°C	-	98.0-120.0
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0-800.0
ความแข็งแรงกระแทก	J.m ⁻¹	D256	No break
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	°C	D648	38.0-49.0

2.5.2 สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีดังต่อไปนี้

1. มีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวต่ำ เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
2. มีความเป็นผลึกต่ำ ประมาณ 50 – 70%
3. มีการไหลตัวที่ดี มีค่า Melt Flow Index อยู่ในช่วง 0.1 – 10.9 g/10 นาที
4. มีค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ดีพอสมควร
5. มีการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี เหมาะสำหรับงานที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์
6. ฟิล์มที่ได้จาก LDPE จะมีความเป็นเงามันดี (High Gloss) และมีความเป็นฝ้าต่ำ (Low Haze)

7. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ค่อนข้างดี (Good Dielectric property)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการใช้อย่างกว้างขวาง เพราะว่ามีราคาไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมากและทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้อย่างดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ

2.5.3 การใช้งานของ LDPE แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ดังนี้

กลุ่มของ Homopolymer ได้แก่ เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำทั่วไป แบ่งตามการใช้งานได้ดังนี้

1. งานแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ถุงขนาดต่างๆ ตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้บรรจุสินค้าทั่วไป ตลอดจนถึงขนาดใหญ่ที่ต้องการแบกรับน้ำหนักมาก เช่น ถุงน้ำแข็ง ถุงบรรจุอาหารแช่เย็น ใช้ทำวัสดุกันกระแทก ได้แก่ Air Bubble Sheet นอกจากนี้ แผ่นฟิล์มยังใช้งานในการรัดสินค้าให้อยู่ในสภาพทรงตัว เช่น ฟิล์มรัดกล่อง ฟิล์มรัดสินค้าบนไม้พาเลทเพื่อการขนส่ง ไปจนกระทั่งแผ่นฟิล์มขนาดใหญ่หลายๆ ใช้ในด้านการเกษตรกรรม เช่น แผ่นฟิล์มรองพื้นปลูกน้ำเพื่อการเก็บกักน้ำ เรือนเพาะชำ
2. งานเป่าเข้าแบบ ได้แก่ การเป่าทำขวดต่างๆ เช่น ขวดน้ำเกลือ ขวดยาหยอดตา ขวดน้ำดื่ม และเป่าเพื่อทำกระป๋องและกล่อง
3. งานฉีดเข้าแบบ ได้แก่ ภาชนะ ของเล่นที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่นูนเล็กน้อย งานจัดของสวยงาม เช่น ดอกไม้พลาสติก ใบไม้พลาสติก รวมทั้งเครื่องใช้ในบ้านอื่นๆ เช่น ตะกร้า ถัง ขาม อ่าง
4. งานแผ่นเคลือบหรือแผ่นประกบ ได้แก่ งานเคลือบบนผิวฟิล์มบนผิวแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ เช่น ซองบรรจุอาหารแห้งประเภทหมีกึ่งสำเร็จรูป อาหารเสริมเด็กอ่อน ซึ่งต้องการสมบัติการป้องกันความชื้นและการซึมผ่านของก๊าซต่าง ๆ
5. งานเคลือบผิวโลหะ ได้แก่ การเคลือบลดแรงเสียดทาน เช่น ตะแกรงวางสินค้า ชั้นวางของ ตะกร้า รถจักรยาน ตลอดจนงานเคลือบพิเศษ เช่น สายเคเบิล สายโทรศัพท์ สายไฟฟ้า

กลุ่มของ Copolymer มีสมบัติพิเศษกว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำชนิดธรรมดา คือ มีความอ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นสูง ใช้ผลิตหนังเทียมแทน PVC ชนิดอ่อน พื้นรองเท้า และ รองเท้ากีฬา เป็นต้น

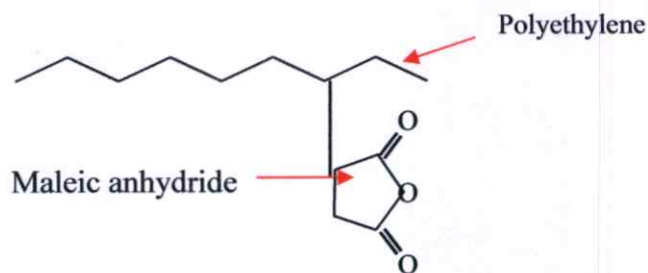
ในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดเป่าขึ้นรูป (LD 1905F) เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูป คือ มีความลื่น ไม่ติดสกรู (Slip and Antiblocking) มีความสามารถในการผลิตสูง มีความใส และสามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหารได้

2.6 พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [17]

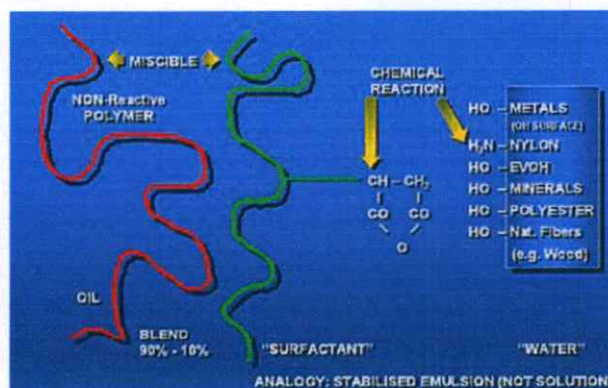
(Polyethylene grafted maleic anhydride, MAPE)

พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้

สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีการเติมสารฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี (Fusabond MB 226D) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮไดรย (MAPE : Maleic anhydride grafted Polyethylene) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.13 โดยมาเลอิกแอนไฮไดรยกราฟท์พอลิเอทิลีน เป็นการต่อกิ่งพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (physicochemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีน และความสามารถในการยึดติด พบว่าแอนไฮไดรยเป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงจะเกิดอันตรกิริยากับแป้งและสารหน่วงติดไฟ ทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [17]



รูปที่ 2.14 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [17]

2.7 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [3,18]

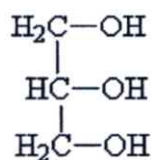
พลาสติไซเซอร์ ตามนิยามของ IUPAC หมายถึงสารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติก หรือออลาสโตเมอร์ แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนการใช้งานและการยืดตัวแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปในการสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติไซเซอร์ไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ทุติยภูมิ (secondary covalent) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง เกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว ส่วนพลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization)

สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ไม่ควรมีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติไซเซอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำผลิตภัณฑ์ให้แข็ง พลาสติกที่ดีจะมีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถคงทนความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน

พลาสติไซเซอร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอ ไค และโอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออลและลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิด

พอลิออล (Polyols) พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิออลบางชนิดพบในน้ำผลไม้ โดยเฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่นซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (hydrogenation) พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับน้ำและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล เนื่องจากถูกดูดซับน้ำได้ช้ำมากจึงสามารถใช้กับผู้ที่ เป็นโรคเบาหวานได้

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโครงสร้าง $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาลสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.15



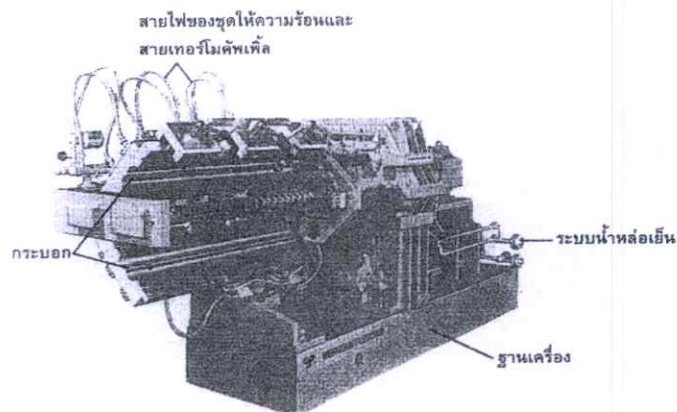
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างของกลีเซอรอล [18]

2.8 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป[19,20,21]

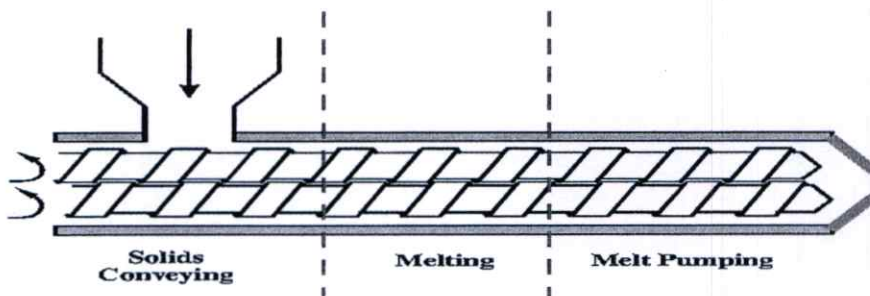
2.8.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin screw extruder) [19]

เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ป้อนเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (barrel) จะถูกอัด หลอม ผสม เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปตามท่อและออกไปทางหัวคาย ทั้งนี้โดยอาศัย ความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรูและกระบอกใส่สกรูทำให้เกิด พลังงานเฉือน (shearing energy) ช่วยในการผสมและหลอมเหลว ในกรณีของเครื่องอัดรีดแบบ เกลียวหอนคู่อาจทำให้การผสมและการเฉือนเพิ่มขึ้น โดยอาศัยอุปกรณ์เสริมไปติดเพิ่มระหว่าง ส่วนของเฟืองสกรู (screw flights) (รูปที่ 2.16-2.17)

ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ เพื่อเตรียมเม็ดเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยการนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมให้เข้ากันกับพอลิเอทิลีน รวมทั้งทำการผสมเม็ดเทอร์โม พลาสติก สตาร์ช ให้เข้ากับสารหน่วงการติดไฟและสารหน่วงการเกิดควัน เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็น พิล์มด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่[19]



รูปที่ 2.17 ลักษณะของสกรู [20]

ตารางที่ 2.9 การจัดจำแนกลักษณะของเครื่องจักรแบบเกลียวหนอนคู่ [19]

เครื่องจักรแบบมี เฟืองไม่ตรงกัน	เครื่องจักรแบบหมุนสวนทางกัน	ความยาวสกรูเท่ากัน
	เครื่องจักรแบบหมุนไปทางเดียวกัน	ความยาวสกรูไม่เท่ากัน
	เครื่องจักรแบบแกนร่วมกัน	เคลื่อนนำของเหลวไปข้างใน
		เคลื่อนกลับของเหลวไปข้างใน
เคลื่อนกลับของแข็งไปข้างใน		
		การเปลี่ยนสภาพพลาสติก ภายในและเคลื่อนกลับ
เครื่องจักรแบบมี เฟืองตรงกัน	เครื่องจักรแบบหมุนไปทางเดียวกัน	เครื่องจักรแบบความเร็วต่ำ (เครื่องจักรแบบโปรไฟล์)
		เครื่องจักรแบบความเร็วสูง
	เครื่องจักรแบบหมุนสวนทางกัน	เครื่องจักรแบบกรวย (เครื่องจักรแบบโปรไฟล์)
		เครื่องจักรแบบทรงกระบอก (เครื่องจักรแบบโปรไฟล์)

ประโยชน์ของการนำเครื่องจักรแบบเกลียวหนอนคู่มาใช้

1. มีความนิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถควบคุมความถี่ของพอลิเมอร์ได้ โดยการ ใช้การโปรแกรมสกรู (Screw programming) ซึ่งอาศัยความตรงกันของความถี่และความว่องไวต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์และสกรู
2. เวลาในการกระจายตัวต่ำ จึงสามารถควบคุมได้ง่าย เหมาะสำหรับการทำสารประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์
3. การพาว์สคูปเป็นไปในทางบวก คือ มีลักษณะคล้ายกับการนำเกียร์ปี่มาช่วยในการพาว์สคูปให้เคลื่อนที่ไปตามสกรู
4. จัดเป็นการทำงานที่อาศัยลักษณะของการระบายอากาศ เนื่องจาก ก๊าซสามารถถูกกำจัดออกไปได้โดยง่าย หรือใช้ทางระบายอากาศเป็นที่เดิมสารตัวเดิมต่างๆ ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนวัสดุทุติยภูมิ

2.8.2 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film machine) [21]

ในการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่า (Blown film extrusion) มีหลักการคือ เม็ดพลาสติกจะถูกรีดผ่านเกลียวขับ (Extruder) พร้อมทั้งให้ความร้อนไปด้วยเพื่อทำให้พลาสติกหลอมเหลว พลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกขับผ่านหัวตาย (Diehead) รูปร่างแหวนให้ไหลผ่านด้านข้าง โดยที่พอลิเมอร์นี้จะถูกบังคับให้อยู่ในขอบแกนหมุนที่อยู่ในตายและไหลออกผ่านตายเปิดรูปร่างกลม ในลักษณะที่มีผนังค่อนข้างหนาเป็นลักษณะท่อที่อยู่ในสถานะหลอมเหลวจะเกิดการขยายตัวและพองออก ซึ่งหัวตายหรือหัวเป่าเป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของเกลียวขับนี้ ทำหน้าที่ควบคุมพลาสติกเหลวให้เป่าได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยทั่วไปนิยมใช้แบบครอสเฮด (Cross head) คือ อยู่ในแนวตั้งลงข้างล่าง พลาสติกเหลวที่ออกจากหัวเป่าจะถูกเป่าให้เป็นท่อกว้างโดยเครื่องเป่าลม (Blower) ซึ่งมีการเป่าลมเย็นเพื่อไม่ให้ผิวฟิล์มติดกันและลดแรงดึงกันภายในเนื้อฟิล์ม อีกทั้งยังควบคุมความใสและขนาดของฟิล์มด้วย การเป่าลมเย็นที่ผิวทำได้ 2 ลักษณะ คือ เป่าลมเย็นที่ผิวด้านนอกและผิวด้านใน ทำให้พลาสติกเย็นตัวลงแล้ว จากนั้นใช้ลูกกลิ้งรีดกับท่อพลาสติกให้แบนแล้วม้วนเก็บ เพื่อนำไปตัดเป็นแผ่นฟิล์มหรือใช้ผลิตถุงต่อไป

ความดันของอากาศจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องอัดรีด ความเร็วในการดึง (Take-off speed) อุณหภูมิตลอดกระบวนการใส่สกรูและตายรวมทั้งปริมาณและทิศทางของอากาศที่ใช้ในการหล่อเย็นจะต้องมีการควบคุมไว้อย่างดี ความกว้างของรูเปิดตาย ซึ่งเป็นตำแหน่งของแกนหมุนที่อยู่ภายในตายจะต้องมีการปรับให้ดีด้วยเพื่อให้ความหนาของฟิล์มสม่ำเสมอ นอกจากนี้อัตราการหล่อเย็นตรงที่พองถูกทำให้เย็นก็จัดว่ามีความสำคัญในการได้ฟิล์มที่มีคุณภาพสูงสุด และช่วยป้องกันการขวางกั้น (Blocking) ในลูกกลิ้งด้านบนสุด (Nip rolls) และลูกกลิ้งม้วน (Wind-up roll) โดยทั่วไปต้องการอากาศปริมาณมากที่มีความดันต่ำมากกว่าอากาศที่มีความดันสูง นอกจากนี้ปริมาณการควบคุมและทิศทางของอากาศก็จัดว่ามีความสำคัญเพราะทั้งสองตัวแปรมีความเกี่ยวข้องกับการควบคุมความหนา

2.8.2.1 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม

1. เครื่องอัดรีด (Extruder) มีหน้าที่หลักในการหลอมเหลวพลาสติกหัวตาย (Die) โดยปกติมี 2 ชนิด ได้แก่
 - วงแหวนป้อนเข้าด้านล่าง (Annular bottom feed die)
 - วงแหวนแบบป้อนเข้าด้านล่าง (Annular side feed die)
2. ระบบการหล่อเย็น แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่
 - แบบบังคับด้วยอากาศ (Forced air)
 - ทำให้เย็นโดยอาศัยแหล่งความเย็นจากภายในหรือภายนอก (Internal or external refrigeration)
 - การหล่อเย็นด้วยน้ำ (Water cooling bath)

3. หอคอยช่วยดึงขึ้น ได้แก่

- ลูกกลิ้งดึง (Pull rolls) แบ่งเป็นแบบหลัก (Primary type) และแบบรอง (Secondary type)
- ระบบการพับฟิล์ม (Folding system)
- ระบบม้วนฟิล์ม (Wind - up system) แบ่งเป็นระบบขับโดยตรง (Direct drive) และระบบขับพื้นผิว (Surface drive)

4. อุปกรณ์อื่นๆ

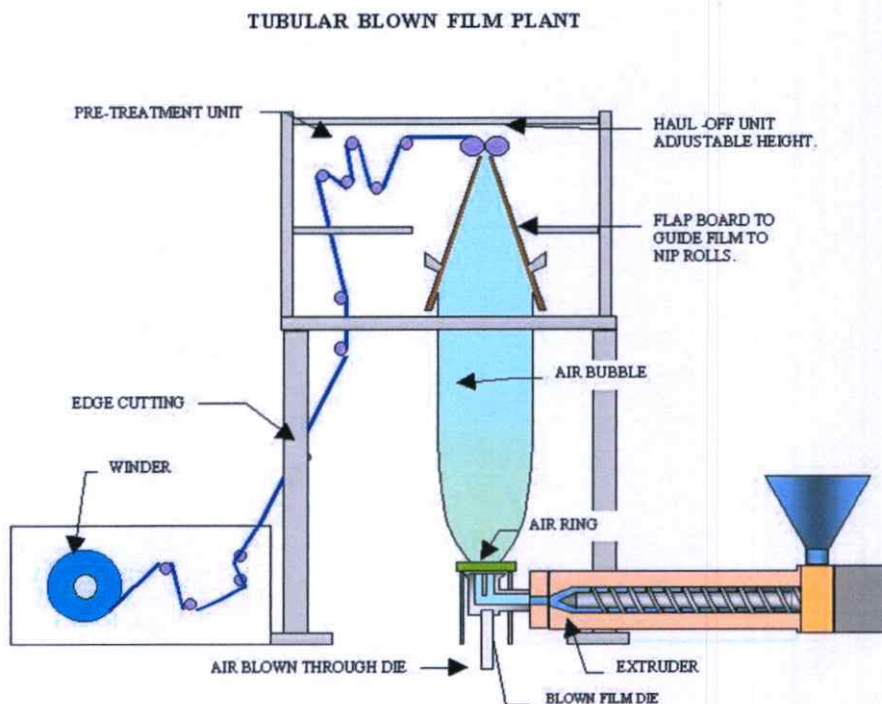
อุปกรณ์ทั่วไป

- เครื่องวัดความหนาแน่นของแผ่นฟิล์ม (Film thickness gauges)
- เครื่องวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศ (Bubble diameter)
- ระบบควบคุมวงจรรปิด (Closed loop system)

อุปกรณ์ปรับพื้นผิว

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

อุปกรณ์ช่วยเสริม เช่น เครื่องจักรสำหรับทำถุง (Bag making machine)



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [21]

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราการดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพุงฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีค่าสำคัญที่ใช้สำหรับอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยกระบวนการเป่าฟิล์ม ได้แก่

1. 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

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

3. อัตราส่วนการลดความหนา (Thickness reduction ratio) คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาที่อัดรีดออกมา (H_0) กับความหนาของฟิล์มตอนสุดท้าย (H)

สำหรับวัสดุที่ไม่ขึ้นกับความหนา (Incompressible materials) อัตราส่วนทั้งสามจะเกี่ยวข้องกันตามสมมูลมวลสาร ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$D_R = \frac{V}{V_0} \quad (2.3)$$

$$BUR \frac{V}{V_0} = \frac{H_0}{H} = BUR \times D_R \quad (2.4)$$

2.8.2.2 หลักการของฟิล์มเป่า [22,23]

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.05 cm.) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มเป่าประกอบด้วยเครื่องอัดรีดต่ออยู่กับคายประเภทวงแหวน (annular die) ซึ่งปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบท่อ (Tubular blown film) จะใช้อากาศและการดึงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งช่วยรวบฟิล์ม (Collapsing guides and nip) อยู่ทางด้านบน โดยฟิล์มจะขยายตัวออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามแนวขนาน และในขณะเดียวกัน จะถูกดึงในทิศทางตั้งฉาก ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง (Biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (Crystallization) และการแข็งตัว (Freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (Tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแบบแรงเฉือน (Shear force) เพราะความเค้นเฉือนมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอิลาสติก ทำให้แรงหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูง ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเร็ว เรียกว่า เทราโตเนียน (Troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นใน

นิวโตเนียน แต่ถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด จะมีพฤติกรรมเป็นแบบ นันเทราโตเนียน (Non – Troutonian) (พอลิเมอร์หลอมเหลวส่วนใหญ่จะเป็นแบบเทราโตเนียน) ซึ่ง แบ่งออกเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากการดึง (Tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากการดึง (Tension thinning)

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลว (Extrudate) ออกจากคายน จะค่อยๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้น และ วัสดุที่ยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อยๆ จนในที่สุดเกิดการแตกออกของฟิล์ม แต่อย่างไร ก็คือการทำให้แข็งเนื่องจากการดึง จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบ อิลาสติก มากพอที่จะชะลอการเพิ่มของความเค้น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น นอกจากนี้ อัตราการตกผลึก (Crystallization rate) ก็เป็นอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพ คือ การผลิตฟิล์มด้วย วิธีนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่า แนวเส้นแข็งตัว (Freeze line or frost line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดลูก โป่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์เกิดการตกผลึก ทำให้ความโปร่งแสงลดน้อยลง อิทธิพลของแนวเส้น แข็งตัวนี้ จะเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งตัวขึ้น ด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึง ไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง

2.8.2.3 สมบัติของฟิล์มเป่า [23]

สมบัติของฟิล์มเป่า ได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและ ทิศทางตามแนวขวาง) โดยใช้วิธีการทดสอบของเอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf) ความทนทานต่อแรง กระทบ ความใส (ความขุ่น) ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร และทิศทางตามแนวขวาง) การจัดเรียงตัว เเปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา และเปอร์เซ็นต์ความ เป็นผลึก เป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ อุณหภูมิของการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาของแผ่นฟิล์ม (วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนา) อัตราส่วนการดึงลง (Draw – down ratio) อัตราส่วนการเป่า (Blow – up ratio) ความสูงของแนวเส้น แข็งตัว (Frost line height) และความสม่ำเสมอของความดัน ซึ่งช่วยลดหรือกำจัดการเกิดเป็นคลื่น (Surging)

ความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับช่องว่างของคายน อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการ เป่า และอัตราส่วนการดึงลง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัว คือ ระยะทางเหนือคายนที่เกิดความ ขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการตกผลึกในขณะที่ยังหลอมเหลวเย็นตัวลง ซึ่งจัดเป็นตัวแปร ที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม โดยพบว่า ถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เเปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ ของผิวจะลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระทบจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ความสูงของแนว เส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการหลอมเหลว และอัตราการอัดรีดด้วย โดยเมื่อตัวแปรทั้งสอง เพิ่มขึ้น ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับอัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความ แข็งแรงต่อการดึง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวาง และลดลงในทิศทางตามแนวเครื่อง แต่จะมีผล

ตรงข้ามกับความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนการเป่าที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนการดึงลงที่เพิ่มขึ้นจะมีผลตรงกันข้าม

2.9 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

2.9.1 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนอินฟราเรด [25,26]

(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

การดูดกลืนอินฟราเรดเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร ซึ่งสารที่วิเคราะห์อาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว ก๊าซ โดยข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์ จะเกี่ยวข้องกับการเกิดการสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) ของโมเลกุลภายในสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยรังสีอินฟราเรดจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีเลขคลื่นยาวกว่าแสงวิสิเบิล (visible) รังสีอินฟราเรดนี้แบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

1. อินฟราเรดย่านใกล้ (near IR) แถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในย่านนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน ซึ่งจะเริ่มต้นตั้งแต่ 0.8-2.5 ไมโครเมตร (μm)($12500-4000\text{ cm}^{-1}$)

2. อินฟราเรดย่านกลาง (middle IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 2.5-50 ไมโครเมตร (μm)($4000-200\text{ cm}^{-1}$) ใช้ศึกษาคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ ในช่วงนี้จะแบ่งเป็นช่วงกลุ่มความถี่ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชันและช่วงลายพิมพ์นิ้วมือที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุล

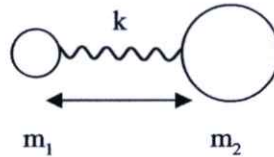
3. อินฟราเรดย่านไกล (far IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 50-1000 ไมโครเมตร (μm)($200-10\text{ cm}^{-1}$) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล เนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชันมีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของสารโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี เมื่อได้รับรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับการสั่นของโมเลกุล จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์โมเลกุลนั้นสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ เรียกว่า IR active ซึ่งจะสามารถตรวจวิเคราะห์ คำนวณหาชนิดและจำนวนของการสั่นได้ แต่ถ้าการสั่นนั้นไม่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์จะไม่เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เรียกว่า IR inactive ซึ่งไม่สามารถทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ได้

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด ความสั่นของโมเลกุลสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การยืด (Stretching) และการโค้งงอ (Bending or Deformation) โมเลกุลที่มีอะตอมที่เหมือนกัน เช่น

โมเลกุลไนโตรเจน (N_2) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ขณะสั่น โดยโมเลกุลที่ประกอบด้วย n อะตอม มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n - 5$ แบบ ส่วนโมเลกุลที่ไม่เป็นเส้นตรงจะมีรูปแบบการสั่นเท่ากับ $3n - 6$ แบบ

พิจารณาการสั่นแบบฮาร์มอนิกของอะตอม 2 อะตอม ที่ยึดกันด้วยพันธะทางเคมี ถ้าสมมติว่ามวลของอะตอมทั้งสองต่อกันขาดด้วยสปริง แล้วมีการแกว่งแบบฮาร์โมนิกอย่างง่าย (Simple harmonic oscillation) สามารถคำนวณค่าของความถี่ได้จาก



$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad (2.5)$$

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 ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความถี่ของการฮาร์มอนิกของอะตอมคู่หนึ่งได้

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง IR spectrometer มีดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง (radiation source) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการให้ความร้อนแก่โลหะแล้วปล่อยให้รังสีอินฟราเรดออกมา

2. ส่วนบรรจุสารตัวอย่าง (sample containers) ถ้าเป็นของแข็งจะทำได้หลายวิธี เช่น บดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ แล้วอัดให้เป็นเม็ดหรือทำให้เป็นแผ่นบาง เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวจะบรรจุในเซลล์หรือหยดลงบนผลึกของโซเดียมคลอไรด์ แล้วนำอีกแผ่นประกบก่อนนำไปตรวจวัด

3. ส่วนควบคุมเลขคลื่น (wavelength selector) ใช้แยกคลื่นแสงที่ต้องการ

4. เครื่องตรวจวัดสัญญาณ (detector)

5. เครื่องแปรสัญญาณและรายงานผล (signal processor and readout devices)

2.9.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมแกรวิเมตริกซ์ [27,28]

(Thermogravimetric analysis, TGA)

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เป็นเทคนิคของการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักความร้อน (thermal analysis) นำมาใช้ประโยชน์มากโดยเฉพาะการหาความทนทานต่อความร้อน (thermal stability) และหาลงค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง

เครื่อง TGA (thermogravimetric analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักของสารที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ถ้าทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป (%weight loss) ได้ ซึ่งจะตรงกับค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมแกรม ดังนั้นสามารถคำนวณหามวลโมเลกุลของสารที่สูญหายไปได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของสารที่สูญหายไป} = \frac{\%X}{100} \times \text{MWs} \quad (2.6)$$

เมื่อ %X คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารที่สูญเสียไป

MWs คือ มวลโมเลกุลของสารตัวอย่าง

นั่นคือผลจากเทอร์โมแกรมทำให้ทราบปฏิกิริยาการสลายตัวของสาร ความสามารถในการทนทานต่อความร้อน องค์ประกอบหรือสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในสารนั้นได้ และสามารถคำนวณหาปริมาณหรือร้อยละของสารที่เป็นองค์ประกอบหรือสิ่งที่เจือปนอยู่ได้จากสมการดังต่อไปนี้ ให้ A เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในสารผสม

$$\%W_{AM} = \frac{\%W_M}{\%W_A} \quad (2.7)$$

เมื่อ %W_{AM} คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักขององค์ประกอบ A

%W_M คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสารผสมที่เปลี่ยนแปลง

%W_A คือ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของสาร A บริสุทธิ์ที่เปลี่ยนแปลง

การใช้เครื่อง TGA เพื่อการวิเคราะห์ทดสอบอยู่ 2 ประการดังนี้

1. ใช้เพื่อศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของปฏิกิริยาทางจลนพลศาสตร์ เช่นปฏิกิริยาการสลายตัว ปฏิกิริยาการระเหยกลายเป็นไอ และปฏิกิริยาคีไฮเดรชัน

2. ใช้ในการศึกษาหาปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ในของผสม เช่นปริมาณสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ รวมทั้งพอลิเมอร์ผสม

ในงานวิจัยนี้จะอาศัยเทคนิคทางความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) เพื่อใช้หาเสถียรภาพทางความร้อน และปริมาณของแข็ง รวมทั้งสารหน่วงติดไฟในพอลิเมอร์ผสม

2.9.3 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ [29,30]

(Differential Scanning Calorimeter, DSC)

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC เกี่ยวข้องกับการวัดอัตราการไหลของความร้อน(Heat flow) ที่ให้แก่สารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงเป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ ในทางปฏิบัติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์และเคมีจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy; H) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีนี้ สามารถใช้ ตรวจวัด ได้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลายชนิด เช่น การเปลี่ยนแปลงมวล รูปร่าง หรือสมบัติทางแสงของสารจะส่งผลต่อการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังใช้ในการวัดความจุความร้อน (Heat capacity: C_p) ซึ่งเป็นสมบัติที่มีความสำคัญของพอลิเมอร์ เนื่องจากประวัติของกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกล และการให้ความร้อนในรูปแบบต่างๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ซึ่งใช้บ่งบอกความเป็นสารนั้นๆ ในผลิตภัณฑ์สุดท้าย บางครั้งเรียกว่า “เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ (Fingerprint)” นั่นแสดงว่าค่าพลังงานของระบบจะมีค่าเฉพาะเพียงค่าเดียวเท่านั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของ C_p เมื่อเทียบกับสารอ้างอิง สามารถใช้ในการบ่งบอกประวัติที่ผ่านมาของพอลิเมอร์ตัวอย่างนั้นได้

ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจะถูกวางอยู่ในกล่อง โลหะที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง โดยเทอร์โมคัพเพิลจะทำการวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ระหว่างตัวควบคุมความร้อนที่ให้กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ทำให้ทราบอัตราการความร้อนที่ตัวอย่างดูดซับหรือคายออกมา โดยการคำนวณ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้จะทำให้ทราบสมบัติของพอลิเมอร์ ดังนี้

1. ความจุความร้อนกับอุณหภูมิหรือเวลา ได้จากการวัดความร้อนของการหลอมเหลว ทำให้ทราบวัฏภาคผลึก วัฏภาคของผลึกเหลว และปริมาณความเป็นผลึก
2. การวัดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) บ่งบอกลักษณะของประสิทธิภาพของสารช่วยผสม และอายุการใช้งาน(aging) ของพอลิเมอร์ได้
3. ความร้อนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น สามารถนำไปใช้ศึกษาการเสื่อมคุณภาพ (Degradation) ของพอลิเมอร์ได้

ในงานวิจัยนี้จะอาศัยเทคนิคทางความร้อน(Differential Scanning Calorimeter, DSC) เพื่อใช้ในการหาปริมาณความเป็นผลึก และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของพอลิเมอร์ผสม

2.9.4 การตรวจสอบพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด [31]

(Scanning electron microscope, SEM)

การตรวจวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยอาศัยหลักการใช้ลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ผ่านจุดคอนเดนเซอร์เลนส์เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้วิ่งลงสู่เลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับจุดโฟกัสบนผิวชิ้นงาน และใช้ชุดขดลวด (scanning coil) ควบคุมการส่องกราด ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นงาน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณภาพ

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างจะมีสัญญาณที่เกิดขึ้น 3 สัญญาณ คือ

1. การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (backscattered electron, BSE) เป็นผลมาจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในลำอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างที่มีประจุบวกแล้วกระเจิงออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีพลังงานสูง
2. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron, SE) เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่อยู่ภายใน (inner shell) ของอะตอมตัวอย่าง อิเล็กตรอนชนิดนี้จะคายออกมาจากตัวอย่างและมีพลังงานต่ำ
3. รังสีเอ็กซ์ (X-ray) เกิดจากการขาดหายไปของอิเล็กตรอนในวงในของอะตอมตัวอย่างหลุดหายไป ทำให้อะตอมที่อยู่วงนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่แล้วคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์

สัญญาณทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือตรวจวัด (detector) ที่ใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นหลอดทั้งสแตนท์ที่ถูกทำให้ร้อน (heated tungsten filament) หรืออาจใช้แลนทานัม เฮกซะ โบรไรด์ (lanthanum hexaboride, LaB₆)
2. ชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ (condenser lens) ใช้เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ
3. ชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scanning coil) ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดทีละตำแหน่งจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งภาพ
4. เครื่องตรวจวัด (detector) ใช้ตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจวัด เช่น secondary electron detector จะใช้ได้หลายชนิดสัญญาณที่เป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยเรียกสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นว่า secondary electron detector (SEI)
5. จอแสดงภาพ (cathode ray tube) จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงภาพที่ได้จากเครื่องมือวัด

2.10 การทดสอบสมบัติการเผาไหม้ [32,33]

2.10.1 การทดสอบสมบัติการจุดติดไฟ

ทำการทดสอบสมบัติการจุดติดไฟ ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Thin Material Vertical Burning Test โดยยึดชิ้นงานทดสอบโดยใช้ตัวจับ (clamp) ให้อยู่ในแนวตั้ง นำสำลีมาวางไว้ด้านล่างของชิ้นงานทดสอบ โดยสำลิต้องวางห่างจากชิ้นงานทดสอบเป็นระยะห่าง 12 นิ้ว มีตะเกียงเบนเสนหรือเทียนไขวางอยู่บริเวณด้านล่างของชิ้นงานทดสอบอีกด้านหนึ่ง เพื่อให้เปลวไฟในการทดสอบ โดยให้ตะเกียงเบนเสนหรือเทียนไขเอียงทำมุม 45 องศา กับแนวราบ ตามรูปที่ 2.20 และ 2.21

ในการทดสอบถ้าชิ้นงานทดสอบไม่จุดติดไฟ เรียกว่า ไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning) แต่ถ้าในกรณีที่ชิ้นงานทดสอบจุดติดไฟต้องวัดอัตราการเกิดการเกิดเปลวไฟในหน่วยเซนติเมตรต่ออนาทีและรายงานผลการทดสอบเป็น อัตราการเผาไหม้ (rate of burning) และในกรณีที่ชิ้นงานทดสอบจุดติดไฟแล้วหยุดให้รายงานผลการทดสอบเป็น สามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง (self-extinguishing) โดยจะต้องรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นเซนติเมตร

ในการทดสอบ ถ้าชิ้นงานทดสอบจุดติดไฟ สามารถคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ได้จาก

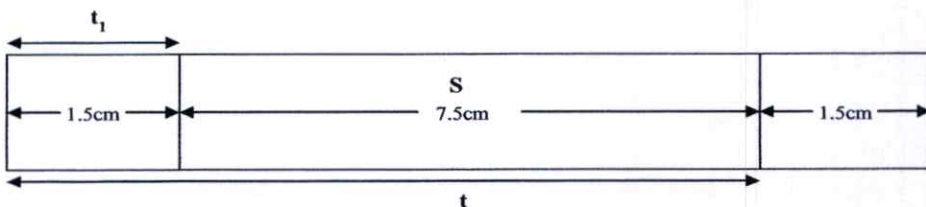
$$\text{อัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)} = \frac{S}{(t - t_1)} \quad (2.8)$$

เมื่อ S คือ ความยาวชิ้นงานในช่วงที่กำหนด (cm)

(กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7.5 cm.)

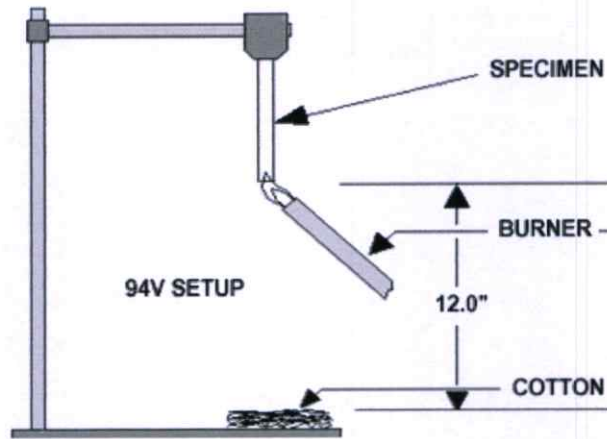
t_1 คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดแรก (sec)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดสอง (sec)

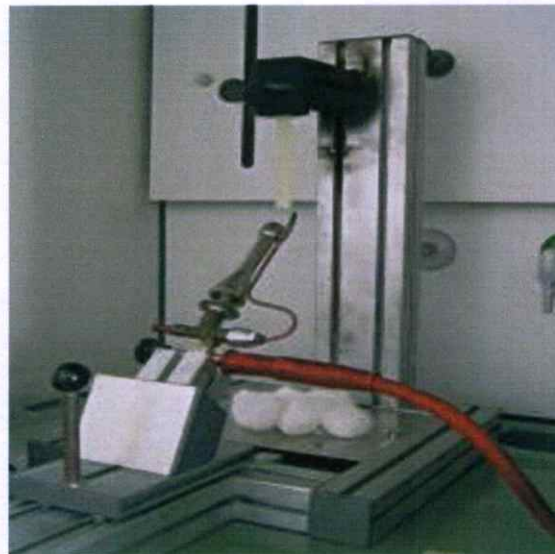


รูปที่ 2.19 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test

(Thin Material Vertical Burning Test) [32]



รูปที่ 2.20 แบบจำลองอุปกรณ์ในการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test
(Thin Material Vertical Burning Test) [32]



รูปที่ 2.21 เครื่องมือการทดสอบตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test
(Thin Material Vertical Burning Test) [32]

2.11 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [34,35,35]

2.11.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [34]

ความแข็งแรงดึง (tensile tests) มอดุลัสแรงดึง (tensile modulus) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึงคือการวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยืดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาดแตกหัก หรือเสียหาย ค่ามอดุลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งเปราะ (stiffness) ของวัสดุ สามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve)

การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ (grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะอยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่ โดยมีเซลล์วัดแรง (load cells) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตัวอย่างซึ่งพลาสติกโดยทั่วไปใช้ความเร็วในการดึง 50-100 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากอัตราเร็วนี้ต่ำเปรียบเสมือนการดึงธรรมดา ในขณะที่การดึงอัตราเร็วสูงเปรียบเสมือนการกระแทกหรือการกระตุกชิ้นงานตัวอย่าง การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะทำให้ความชันของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือค่ามอดูลัสที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น เครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้เรียกว่า เครื่องทดสอบแรงดึง (tensile testing machine) หรือ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (universal testing machine) เนื่องจากมีความหลากหลายในการใช้งาน

ในการทดสอบค่าการดึงที่ใช้ทดสอบและการยึดออกของตัวอย่าง สามารถนำมาคำนวณหาค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และความเครียดดึง จากสมการ

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength); } \sigma = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

$$\text{มอดูลัส (Tensile modulus); } E = \frac{\text{Difference in stress}}{\text{Difference in corresponding strain}} \quad (2.10)$$

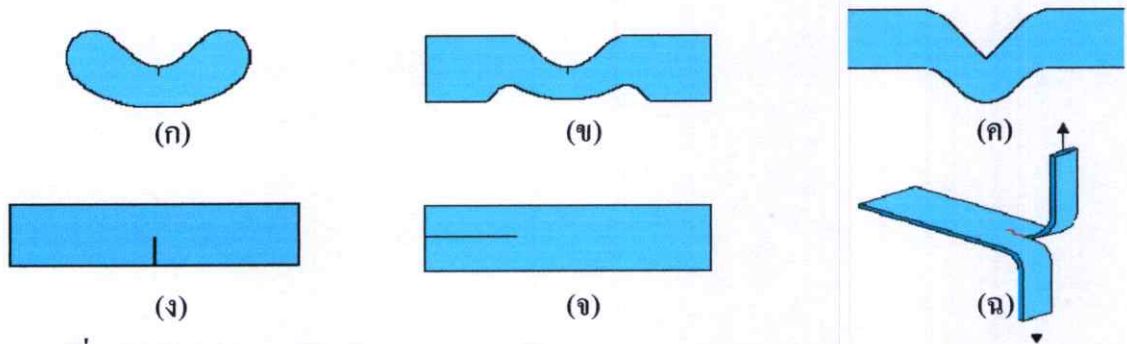
$$\text{ความเครียดดึง (Tensile strain)} = \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) * 100 \quad (2.11)$$

- เมื่อ F คือแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (N)
 A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (mm²)
 L คือระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงตัวอย่าง (mm)
 L₀ คือระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นบนตัวอย่างก่อนดึง (mm)

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐาน ASTM D 882 ในการทดสอบค่าความแข็งแรงดึง (tensile strength) และมอดูลัส (modulus) ของฟิล์มที่มีความอ่อนนุ่ม มีความหนาไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีค่าความเครียดดึงสูงที่จุดขาด (strain at break) ได้

2.11.2 การทดสอบการฉีกขาด (Tear test) [35,36]

การทดสอบการฉีกขาดขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ อัตราเร็วการฉีก และอุณหภูมิ ลักษณะตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการฉีกขาดมีหลายลักษณะ แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบการฉีกขาด (Tear specimens) [36]

(ก) ASTM Die A (Nicked Crescent), (ข) ASTM Die B (Nicked Tab End),

(ค) ASTM Die C (Right Angle), (ง) Russian และ(จ), (ฉ) Trousers

ตัวอย่างการทดสอบการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D 624 และแบบ Trousers รอยขาดจะตั้งฉากกับทิศทางแรงที่ให้ แต่การทดสอบตัวอย่างแบบ Russian จะขาดตามแนวแรง โดยรายงานผลเป็นแรงที่ใช้ในการฉีกขาดตัวอย่างที่มีความหนาตามกำหนด นิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM ว่า “ความแข็งแรงฉีกขาด (tear strength)” และนิยมเรียกผลที่ได้จากการทดสอบด้วยตัวอย่างแบบ Trousers ว่า “ความต้านทานฉีกขาด (tear resistance)”

ในงานวิจัยนี้จะตัดชิ้นงานแบบ ASTM Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 ในการทดสอบการฉีกขาด จะทำให้ทราบถึงแรงที่ทำให้ชิ้นงานเริ่มฉีกขาด ซึ่งจะเป็นค่าความเครียดสูงสุด (maximum stress) ของชิ้นงาน

2.12 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) [38,39]

2.12.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ [38]

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน โดยจะพิจารณาจากลักษณะภายนอกของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ง่าย เช่น ลักษณะพื้นผิว สีและกลิ่นของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์นี้อาจใช้วิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า และอาศัยการสัมผัสด้วยมือ

2.12.2 วิเคราะห์สมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption) [39]

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 โดยสามารถคำนวณปริมาณการดูดซับน้ำได้จากสมการ

$$M_t(\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad (2.12)$$

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ เวลาใดๆ

W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Trithankar J.N. และคณะ [40] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการหน่วงติดไฟของฟิล์มย่อยสลาย (Biodegradable film) ซึ่งขึ้นรูปเป็นฟิล์มจากเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (Thermoplastic starch) ด้วยเทคนิคการหล่อแบบ (Casting) จากนั้นจะทำการเคลือบ (Coating) สารเติมแต่งประเภทหน่วงติดไฟ (Flame retardant) ลงที่ผิวของฟิล์มย่อยสลายด้วยระบบสารละลาย (solution) ซึ่งสารหน่วงติดไฟที่งานวิจัยนี้เลือกใช้ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดบอริก สารประกอบของแอนติโมนีออกไซด์ ซึ่งเมื่อนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปทดสอบความสามารถในการหน่วงติดไฟ โดยการหาค่าดัชนีจำกัดออกซิเจน (Limiting Oxygen Index) พบว่าฟิล์มย่อยสลายที่เคลือบผิวด้วยสารหน่วงติดไฟที่กล่าวไว้จะมีค่าดัชนีจำกัดออกซิเจนที่สูงกว่า ฟิล์มย่อยสลายที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยสารหน่วงติดไฟ และเมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายตามธรรมชาติด้วยวิธีฝังกลบในดิน (soil burial test) พบว่าฟิล์มย่อยสลายที่เคลือบผิวด้วยสารหน่วงติดไฟยังสามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้

Chang Z.N. และคณะ [41] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเอทิลีนพอลิพรอพิลีนไดอีน (EPDM) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้นาโน-ไซส์ไฮดรอกซิล อะลูมิเนียม ออกซาเลด (nano-HAO) ร่วมกับ มอนต์มอริโลไนต์ (MMT) โดยทำการผสมวัตถุดิบดังที่กล่าวมา โดยระบบการผสมแบบหลอมเหลว (Melt bending) ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ และทำการผสมเอทิลีน ไวนิล อะซิเตท กราฟท์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (EVA-g-MAH) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์คอมโพสิต จากนั้นจะทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นบาง โดยการอัดรีดผ่านหัวคายน้ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำการทดสอบอัตราการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL-94 Horizontal burning tests (UL-94HB) โดยพบว่าอัตราการเผาไหม้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเอทิลีนพอลิพรอพิลีนไดอีน (EPDM) มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนาโน-ไซส์ไฮดรอกซิลอะลูมิเนียมออกซาเลด (nano-HAO) ร่วมกับ มอนต์มอริโลไนต์ (MMT) ในพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจาก นาโน-ไซส์ไฮดรอกซิลอะลูมิเนียมออกซาเลด (nano-HAO) มีส่วนช่วยในการส่งผ่านความร้อนและลดปริมาณก๊าซที่สามารถลุกติดไฟได้ โดยการปลดปล่อยไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อได้รับความร้อนจนเกิดการสลายตัวเนื่องมาจากความร้อน นอกจากนี้มอนต์มอริโลไนต์ (MMT) ยังช่วยเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟได้ดียิ่งขึ้น โดยการทำหน้าที่ด้านทานความร้อนและก๊าซที่จะเข้ามาสัมผัสกับผิวของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณนาโน-ไซส์ไฮดรอกซิลอะลูมิเนียม ออกซาเลด (nano-HAO) และมอนต์มอริโลไนต์ (MMT) ให้มากขึ้น ก็จะส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิต มีสมบัติในการต้านทานการลุกติดไฟ (Ignition) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Lei H. และคณะ [42] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการหน่วงติดไฟของฟิล์มพอลิเอทิลีนเทอพลาทาเลด โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงสารหน่วงการติดไฟทางการค้าให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ด้วยการนำเบต้า-ไซโคลเดคทรินมาทำให้เกิดเป็นสารประกอบร่วมกับสารหน่วงการติดไฟในทาง

การค้าทั่วไป โดยการนำเบต้า-ไซโคลเดคทริน ไปละลายด้วยน้ำจืดที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการผสมสารหน่วงการติดไฟทางการค้าลงไป ค่อยๆคนจนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำฟิล์มพอลิเอทิลีน เทอพลาทาเลต ไปจุ่มลงในสารประกอบดังกล่าว เพื่อทำให้เกิดการเคลือบที่ผิวของฟิล์ม นำฟิล์มไปอบให้แห้งในตู้อบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติการหน่วงการติดไฟของฟิล์มดังกล่าว ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน AACCC test method 34 ซึ่งนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์จำพวกเส้นใยสิ่งทอ ในการทดสอบจะตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างไปทดสอบไปใส่ในช่องวางตัวอย่าง ซึ่งมีตัวจับยึดชิ้นงานอยู่ ทำการเผาชิ้นงานด้วยเปลวไฟสูง 3.8 เซนติเมตร ในสภาวะที่มีอากาศ โดยจะวางเปลวไฟที่ด้านล่างชิ้นงานและห่างจากชิ้นงาน 1.9 เซนติเมตร ใช้เวลาการเผาเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำเปลวไฟออก จากนั้นพิจารณาฟิล์มโดยถ้ามีการเผาไหม้เกิดขึ้น ให้รายงานระยะที่เกิดการไหม้บนฟิล์ม จากการทดสอบพบว่า ฟิล์มพอลิเอทิลีน เทอพลาทาเลต ที่เคลือบด้วยสารหน่วงการติดไฟที่มีการปรับปรุงด้วยนาเบต้า-ไซโคลเดคทรินจะไม่เกิดการเผาไหม้และจุดติดไฟ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีน เทอพลาทาเลต ที่เคลือบผิวด้วยสารหน่วงการติดไฟทางการค้าทั่วไป ซึ่งจะเกิดการย่อยที่ผิวของฟิล์มเมื่อได้รับความร้อนจากเปลวไฟ

Narihito M. และคณะ [43] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการหน่วงการติดไฟของฟิล์มพอลิเอทิลีน ไวนิล แอลกอฮอล์ โดยใช้สารประกอบแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต เป็นสารหน่วงการติดไฟ ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยการหล่อแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติการหน่วงการติดไฟของฟิล์มพอลิเอทิลีน ไวนิล แอลกอฮอล์ ด้วยการเผาตามมาตรฐาน UL-94 TEST โดยจากการทดสอบด้วยวิธีดังกล่าวพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารประกอบแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน ไวนิล แอลกอฮอล์กับสารประกอบแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต จะทำให้สมบัติการทนไฟดีขึ้น ในอัตราส่วนของสารประกอบแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป จะทำให้ฟิล์มไม่เกิดการเผาไหม้และการจุดติดไฟ แม้จะถูกเผาด้วยเปลวไฟเป็นเวลานานมากกว่า 15 นาที และจากการทดสอบหาความร้อนที่เกิดขึ้นขณะถูกเผาด้วยเปลวไฟ ด้วย Cone Calorimeter พบว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารประกอบแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟต ในพอลิเมอร์ผสม โดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะคงที่เมื่อผสมสารประกอบแอมโมเนียม พอลิฟอสเฟตในพอลิเมอร์ผสมปริมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป

Cui W. และคณะ [44] ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติการหน่วงการติดไฟของพอลิสไตรีนชนิดทนต่อแรงกระแทกสูง ด้วยนาโนอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคทั่วไป โดยทำการผสมในระบบหลอมเหลวด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเทคนิคการหล่อแบบ (Casting) แล้วทำการทดสอบสมบัติการเผาไหม้ตาม

มาตรฐาน UL-94 TEST พบว่า พอลิस्टาไดรีนชนิดทนแรงกระแทกที่ผสมด้วยนาโนอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์จะมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลงและจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิस्टาไดรีนที่ผสมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ทั่วไป แต่จะมีต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น เนื่องจากนาโนอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์มีราคาค่อนข้างแพง

Thunwall M. และคณะ [45] ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) โดยทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลัง 2 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังทั่วไป และแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ ร่วมกับกลีเซอรอล ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซออร์ให้กับแป้งมันสำปะหลังดังกล่าว ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ที่ต่อเข้ากับเครื่องเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (Blown film) โดยในขั้นตอนการผสมจะผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะนำไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่าเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ จะมีเสถียรภาพในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่ดีกว่า และฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

Huang C.Y และคณะ [46] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารช่วยผสมที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง ศึกษาผ่าน 2 กระบวนการและทำการสังเคราะห์สารช่วยผสม 2 ชนิด คือ มาลิกแอนไฮดไรด์ต่อกิ่ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการเคลือบด้วย Plasma (Ma-g-PLDPE) และ กรดอะคิลิกต่อกิ่ง กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการด้วย Plasma (AAc-g-PLDPE) ซึ่งค่า Grafting degree ของ Ma-g-PLDPE เท่ากับ 1.90×10^4 โมล/กรัม และ AAc-g-PLDPE เท่ากับ 2.5×10^4 โมล/กรัม ดังนั้น Ma-g-PLDPE จึงเป็นสารช่วยผสมที่มีประสิทธิภาพมากกว่า AAc-g-PLDPE เพราะ หมู่ไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดความเป็นขี้ และ การเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของการผสมสารช่วยผสม คือ Ma-g-PLDPE กับ กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำแป้ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมตาม ก่อนการผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนเดี่ยว เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำให้ขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ลดลงหลังการผสม เนื่องจากหมู่แอนไฮดไรด์ที่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ โดยอนุมูลแอนไฮดไรด์จะทำให้รูปร่างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นเวลา 2 สัปดาห์พบว่า น้ำหนักของพอลิเมอร์ ลดลงไป 65 %wt โดยการเติมสารช่วยผสมที่มีหมู่แอนไฮดไรด์จะทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ลดลงมากกว่าไม่เติมสารช่วยผสม

Shujun W. และคณะ [47] ได้ศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (thermoplastic starch) กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(LLDPE) โดยทำการดัดแปรโครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ด้วยการทำให้เกิดปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อทำการปรับโครงสร้างของพอลิเอทิลีนให้มีขี้สูงขึ้นและเพิ่ม

ความสามารถในการเข้ากับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะทำการผสมด้วยกระบวนการในขั้นตอนเดียว (one-step) ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw extruder) โดยจะทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัมฐานวิทยา และวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นร่วมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จะให้สมบัติเชิงกลดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ร่วมด้วย ช่วยทำให้เทอร์โมพลาสติก สตาร์ชผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเอทิลีน โดยจากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy พบว่ามาเลอิกแอนไฮไดรด์เกิดการต่อกิ่ง (grafting) บนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน ทำให้มีความเป็นขั้วสูงขึ้นสามารถผสมเข้ากับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ได้ดีกว่า

Rodriguez-Gonzalez F.J. และคณะ [48] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (Thermoplastic starch) ด้วยกระบวนการที่แตกต่างจากทั่วไป ซึ่งจะลดกระบวนการผสมให้ได้ผลในขั้นตอนเดียว (one-step process) โดยจะทำการรวมเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw extruder) เข้ากับเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ซึ่งจะทำการผสมด้วยระบบหลอมเหลว โดยจะทำการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นจะฉีดพอลิเอทิลีนที่หลอมเหลวดีแล้วเข้าเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ที่มีเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช หลอมเหลวและผสมเข้ากันดีกับกลีเซอรอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชดังกล่าวจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่น โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลในแนวเครื่องจักร รวมทั้งสามารถทำการผสมเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นถึง 45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเป็ผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจะช่วยให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่ายยิ่งขึ้น

Chungui Z. และคณะ [49] ได้ศึกษาผลจากชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์ที่มีผลต่อฟิล์มเมทิลเซลลูโลส และฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส โดยใช้พลาสติกไซเซอร์ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล พรอพิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล ที่มีความเข้มข้นดังนี้ 0.17, 0.33, 0.50 และ 0.66 มิลลิพลาสติกไซเซอร์ตามลำดับ พบว่าค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มทั้งสองชนิดจะลดลง แต่การยืดตัวเพิ่มขึ้นและการเพิ่มความเข้มข้นพอลิเอทิลีนไกลคอลมีผลต่อความยืดหยุ่นของฟิล์ม มากกว่าพลาสติกไซเซอร์อีก 2 ชนิด ส่วนสมบัติในการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจนถึง 0.33 มิลลิพลาสติกไซเซอร์ต่อกรัมเซลลูโลส ค่าการซึมผ่านของน้ำของฟิล์มทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่านี้

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

Nakamura E.M.และคณะ [51] ได้ศึกษาการทำเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (Thermoplastic starch) โดยทำการผสมแป้งชนิดต่างๆกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อเป็นสารประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยการนำแป้งปริมาณ 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้ง แต่สมบัติอื่นๆ เช่น เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความแข็งแรงโค้งลดลง สารประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งในอัตราส่วน 20% โดยน้ำหนัก มีมอดุลัส (Modulus) มากที่สุดและจากการทดลองกับแป้งหลายๆชนิดพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อใส่ปริมาณ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Kohn J. และคณะ [52] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มพอลิเอทิลีนเป่าขึ้นรูป พบว่าปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเอทิลีนคือความหนาแน่น ความหนาของฟิล์ม และการจัดเรียงตัวของผลึก ซึ่งพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนความหนาของฟิล์มไม่มีผลต่อการซึมผ่านมากนัก เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวยังมีความสัมพันธ์กับการกระจายน้ำหนักโมเลกุลและการจัดเรียงตัวของผลึกด้วย ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแคบทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนพอลิเมอร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกว้างทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้ถึง 50% หรือมากกว่านั้น และฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกมากทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำแปรผันโดยตรงกับอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและอัตราส่วนระหว่างการดึงตามแนวขวางเครื่องจักรกับการดึงตามแนวเครื่องจักร (TD/MD ratio)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดอัคริดสำหรับเป่าฟิล์ม (LD1905FA) จาก บริษัท SCG Chemical จำกัด (มหาชน) สมบัติเฉพาะของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในงานวิจัย [53]

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	LDPE1905FA
ดัชนีการไหล	กรัม/10 นาที	ASTM1238	5.0
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM1505	0.919
ความต้านทานแรงดึง	กก./ตร.ซม	ASTM882	MD:200* TD:150*
การดึงยืดที่จุดขาด	%	ASTM638	MD:320* TD:680*
ความต้านทานแรงฉีกขาด	กรัม/25 ไมครอน	ASTM1922	MD:370* TD:210*
ความต้านทานแรงกระแทกของฟิล์ม	กรัม	ASTM1790	130*
การเกิดฝ้า	%	ASTM1003	7*
ความเงามัน	%	ASTM2457	55*
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM2117	110

ข้อมูลจากบริษัท SCG Chemical จำกัด (มหาชน)

(*) ข้อมูลที่ใช้สำหรับฟิล์มหนา 38 ไมครอน

MD: ทดสอบตามแนวเครื่องจักร, TD: ทดสอบแนวขวางเครื่องจักร

2. แป้งมันสำปะหลังคุณภาพสูง เกรดการค้าจากบริษัท แสงเพชร จำกัด สมบัติของแป้งมันสำปะหลังแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

สมบัติ	หน่วย	แป้งมันสำปะหลัง
ขนาดอนุภาค	μm	0-20
ความชื้น	%	12-13
แป้ง	%	87

ข้อมูลจากบริษัท แสงเพชร จำกัด

3. สารช่วยผสม (Fusabond[®] MB 226D) เกรดการค้าจากบริษัท Innovation Creative Polymer จำกัด สมบัติของสารช่วยผสมแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของ Fusabond[®] MB 226D [54]

สมบัติ	หน่วย	Test Method	MB226D*
Melt flow rate (190 °C/2.16 kg)	g/10 min	ASTM D1238	1.5
ความหนาแน่น	g/cm^3	ASTM D1505	0.93
จุดหลอมเหลว	°C	ASTM D3418	120

ข้อมูลจากบริษัท Innovation Creative Polymer Ltd

4. ก्लीเซอรอล เกรดการค้า จากบริษัท Thai Pure Science Ltd. สมบัติของก्लीเซอรอลแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของก्लीเซอรอล [18]

สมบัติ	หน่วย	ก्लीเซอรอล
ความหนาแน่น	g/cm^3	1.26
จุดเดือด	°C	290
จุดหลอมเหลว	°C	18
ความหนืดที่ (20 °C)	mps	1400

ข้อมูลจากบริษัท Thai Pure Science Ltd.

5. สารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรเอท(Aluminium trihydrate) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Innovation Creative polymer จำกัด สมบัติของสารหน่วงการติดไฟชนิดอะลูมิเนียมไตรไฮดรเอทแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของสารหน่วงการติดไฟชนิดอะลูมิเนียมไตรไฮดรเอท No. 21645-51-2 [54]

สมบัติ	หน่วย	No. 21645-51-2
Purity	%	99.8
Moisture Content	%	8%
Particle size (90% less than)	μm	13
Specific Gravity	g/cc	2.1
Loss on ignition at 1050 ⁰ C	%	34

ข้อมูลจากบริษัท Innovation Creative Polymer จำกัด

6. สารแอนติโมนีออกไซด์(Aluminium trihydrate) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Innovation Creative polymer จำกัด สมบัติของสารแอนติโมนีออกไซด์แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สมบัติของสารแอนติโมนีออกไซด์ No. 7440-36-0 [54]

สมบัติ	หน่วย	No. 7440-36-0
Purity	%	99.5
Density	g.cm^{-3}	6.697
Particle size (80% less than)	μm	5
Melting point	$^{\circ}\text{C}$	630.63
Boiling point	$^{\circ}\text{C}$	1587
Heat of fusion	kJ.mol^{-1}	19.79
Heat of vaporization	kJ.mol^{-1}	193.43

ข้อมูลจากบริษัท Innovation Creative Polymer จำกัด

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. เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (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. เครื่องตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ 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. เครื่องมือทดสอบการเผาไหม้อย่างง่าย ตามมาตรฐาน UL 94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test)

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาถึงปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง
ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง

นำแป้งมันสำปะหลังมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำ แป้งมันสำปะหลังออกจากตู้อบแล้วทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมให้เข้ากันกับพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ให้ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วพักทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้พลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) สามารถแทรกเข้าไปใน โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ได้ดียิ่งขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเข้ากันดีกับ

พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) และสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ทำการผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ให้ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยจะผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แป้งมันสำปะหลัง และสารช่วยผสม ในอัตราส่วน 100:30:5 และผสมพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ในปริมาณ 15-21% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ตามสูตรผสมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.7 นำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสมดังตารางที่ 3.8 แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอัดรีดแล้วทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อนำไปบดเป็นเม็ดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ(LDPE)

กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ต่างๆกัน

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

ตารางที่ 3.8 สภาวะที่ใช้ในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

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

ขั้นตอนที่ 3 การเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากตารางที่ 3.7 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจเกิดขึ้นระหว่างที่รอให้พอลิเมอร์ผสมนั้นเย็นตัว แล้วนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.9 เพื่อศึกษาลักษณะการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ท์ สูตรต่างๆ

ตารางที่ 3.9 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง (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 การศึกษาถึงปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ท์ เพื่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง

นำแป้งมันสำปะหลังมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำ แป้งมันสำปะหลังออกจากตู้อบแล้วทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมให้เข้ากันกับพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ให้ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วพักทิ้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้พลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ได้ดียิ่งขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเข้ากันดีกับพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) และสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ทำการผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ให้ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยจะผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แป้งมันสำปะหลัง และกลีเซอรอล ในอัตราส่วน 100:30:18 และผสมสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ในปริมาณ 1-9 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ตามสูตรผสมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.10 นำส่วนผสมทั้งหมด

มาผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสมดังตารางที่ 3.8 แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอัดรีดแล้วทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อนำไปบดเป็นเม็ดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ(LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน

สูตร	LDPE (g)	แป้งมันสำปะหลัง (% LDPE)	สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) (% LDPE)	พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) (% LDPE)
LDPE	100	0	0	0
LDPE/TPS 6	100	30	1	18
LDPE/TPS 7	100	30	3	18
LDPE/TPS 8	100	30	5	18
LDPE/TPS 9	100	30	7	18
LDPE/TPS10	100	30	9	18

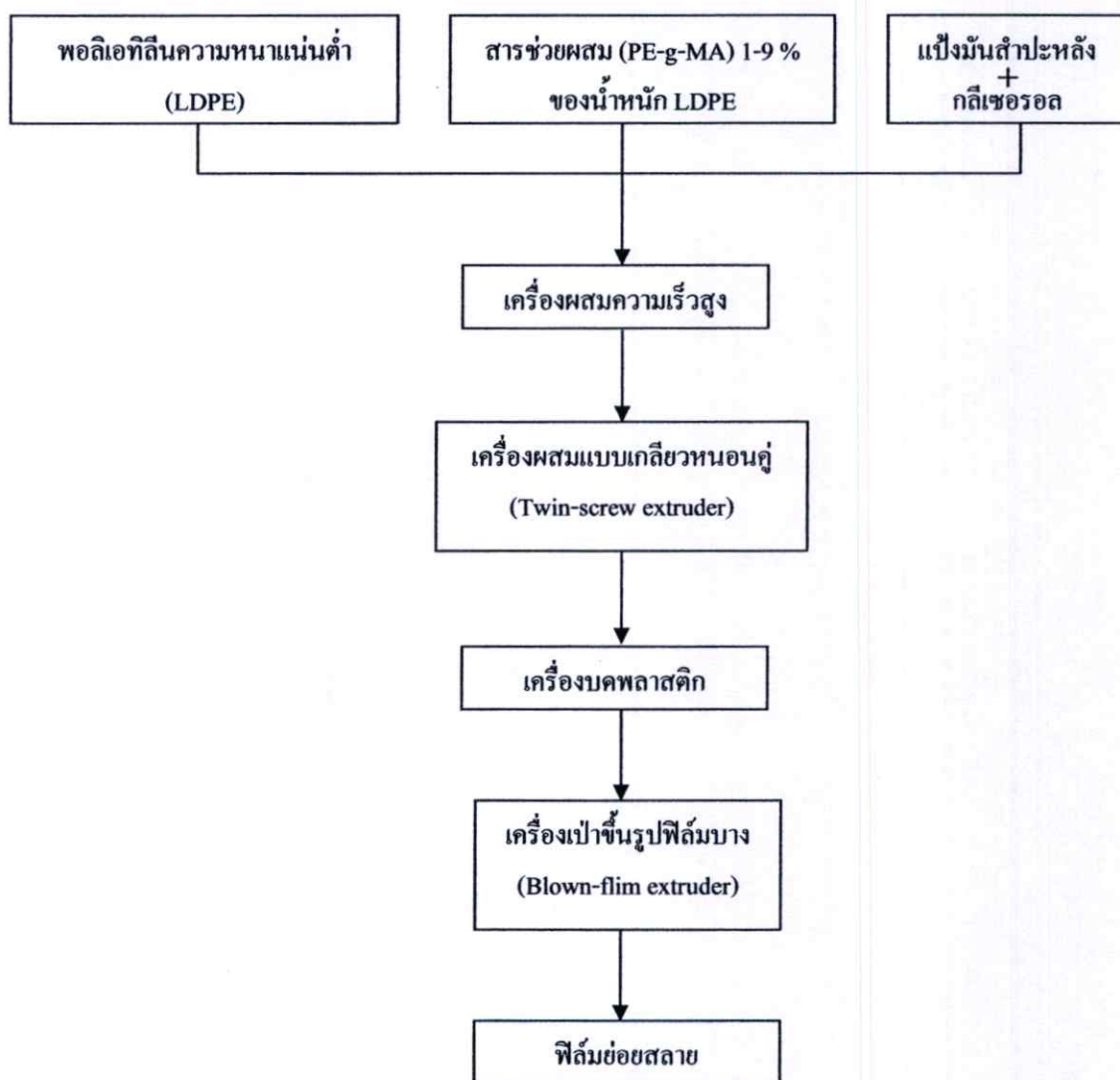
ขั้นตอนที่ 3 การเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากตารางที่ 3.10 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจเกิดขึ้นระหว่างที่รอให้พอลิเมอร์ผสมนั้นเย็นตัว แล้วนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.9 เพื่อศึกษาลักษณะการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตรต่างๆ

ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของการศึกษาถึงปริมาณพลาสติกไซเซอร์และปริมาณของสารช่วยผสมที่เหมาะสม ต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง สามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมยางมะตอยสำหรับอบแห้ง



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง

3.3.3 การศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ เพื่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ โดยทำการผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม ในอัตราส่วน 100:30:18:3 โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมาผสมกับสารหน่วงการติดไฟ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ โดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง ที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตามสูตรผสมที่ใช้ในการศึกษาดังตารางที่ 3.11 ซึ่งอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟโดยรวมคิดเป็น 10% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นำของผสมทั้งหมดไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการผสมดังตารางที่ 3.12 แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอัดรีดแล้วทิ้งไว้ให้เย็น เพื่อนำไปบดเป็นเม็ดด้วยเครื่องบดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.11 อัตราส่วนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้

สูตร	LDPE (g)	แป้งมันสำปะหลัง (% LDPE)	สารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) (% LDPE)	พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) (% LDPE)	Flame Retardant (10% LDPE)	
					อัตราส่วน ATH	อัตราส่วน Sb ₂ O ₃
LDPE	100	0	0	0	0	0
LDPE/TPS	100	30	3	18	0	0
FLAME 1	100	30	3	18	3	1
FLAME 2	100	30	3	18	3	3
FLAME 3	100	30	3	18	3	5
FLAME 4	100	30	3	18	5	1
FLAME 5	100	30	3	18	5	3
FLAME 6	100	30	3	18	5	5

ตารางที่ 3.12 สภาวะที่ใช้ในการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอกู้

สภาวะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	35 rpm
อุณหภูมิบริเวณที่ 1 (Feed zone)	160°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 2	165°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 3	170°C
อุณหภูมิบริเวณที่ 4 (Die zone)	175°C

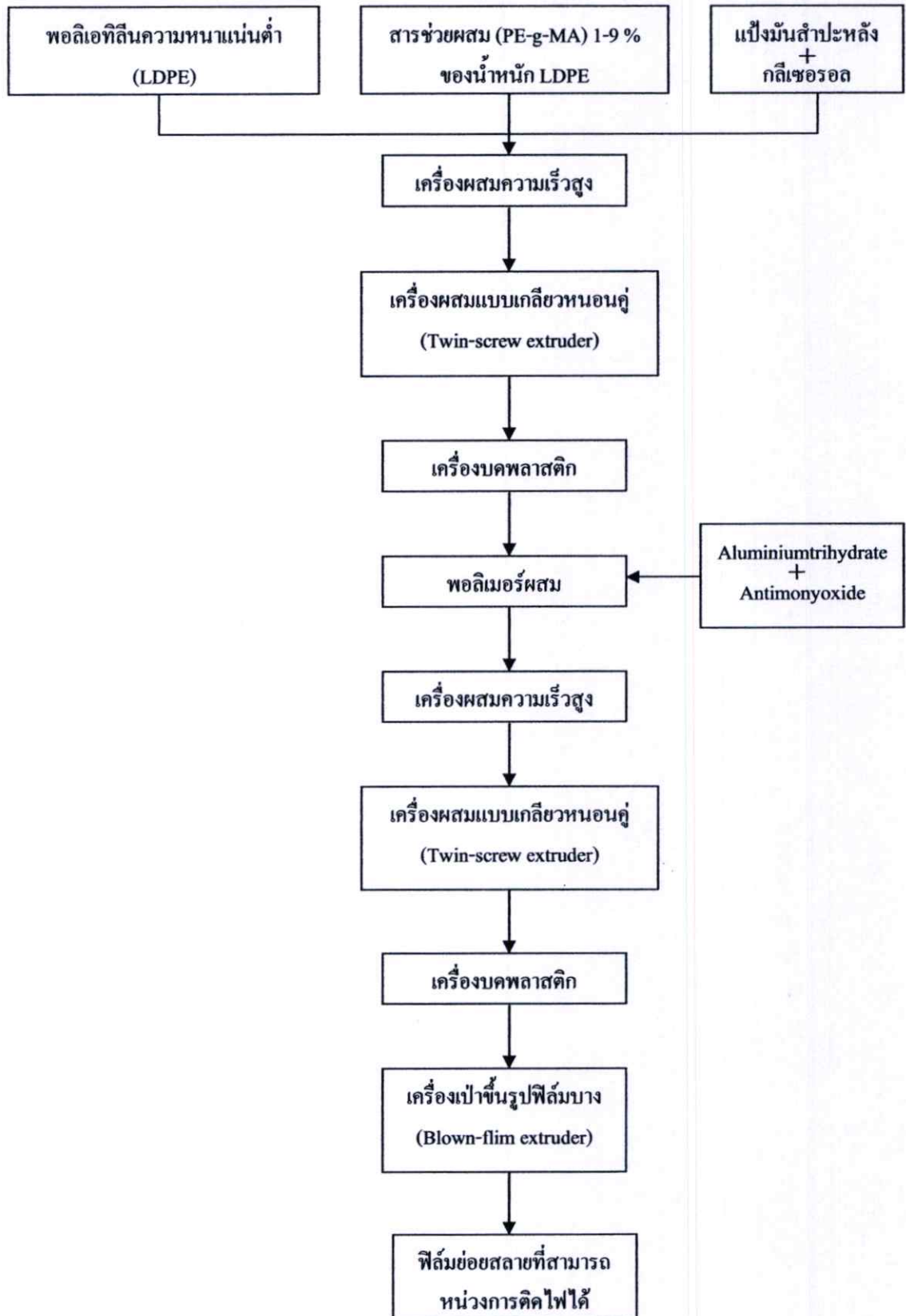
ขั้นตอนที่ 4 การเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากตารางที่ 3.11 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นที่อาจเกิดขึ้นระหว่างที่รอให้พอลิเมอร์ผสมนั้นเย็นตัว แล้วนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder) โดยมีสภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.13 เพื่อศึกษาลักษณะการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สคาร์ช สูตรต่างๆ

ตารางที่ 3.13 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง (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)	2.5 m/min

การดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สคาร์ช เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางสามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถนำวงจรคิดไฟได้

3.4 การทดลองและตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.4.1 การทดสอบสมบัติการเผาไหม้ของแผ่นฟิล์ม [32]

การทดสอบสมบัติการเผาไหม้จะทำการเปรียบเทียบสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ โดยตัดตัวอย่างฟิล์มจำนวน 5 ตัวอย่าง ขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร ยาว 125 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบด้วยอุปกรณ์การทดสอบอย่างง่าย ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test) ในการทดสอบการเผาไหม้จะทำการให้เปลวไฟที่ใช้การทดสอบกับตัวอย่างฟิล์มจำนวน 3 ครั้ง ใช้เวลาในการทดสอบครั้งละ 10 วินาที ซึ่งการให้เปลวไฟเพื่อการทดสอบแต่ละครั้ง ต้องทิ้งช่วงระยะเวลาให้ตัวอย่างฟิล์มเย็นตัวลงสักครู่ แล้วค่อยทำการให้เปลวไฟเพื่อทดสอบตัวอย่างฟิล์มในครั้งต่อไป

วิธีการรายงานผลการทดสอบการเผาไหม้ ถ้าตัวอย่างฟิล์มทดสอบไม่ลุกติดไฟ จะรายงานผลการทดสอบว่า ฟิล์มไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning) แต่ถ้าในกรณีที่ตัวอย่างฟิล์มทดสอบสามารถลุกติดไฟและเกิดการเผาไหม้ได้ จะทำการวัดอัตราการเกิดการเกิดเปลวไฟในหน่วยเซนติเมตรต่อวินาที และรายงานผลการทดสอบเป็นอัตราการเผาไหม้ (rate of burning) และในกรณีที่ตัวอย่างฟิล์มทดสอบลุกติดไฟแล้วหยุด จะรายงานผลการทดสอบเป็น สามารถดับไฟได้ด้วยตนเอง (self-extinguishing) โดยจะต้องรายงานระยะที่ถูกเผาไหม้เป็นเซนติเมตร

ในการทดสอบสามารถคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ (Rate of burning) ได้จากสมการที่ 3.1

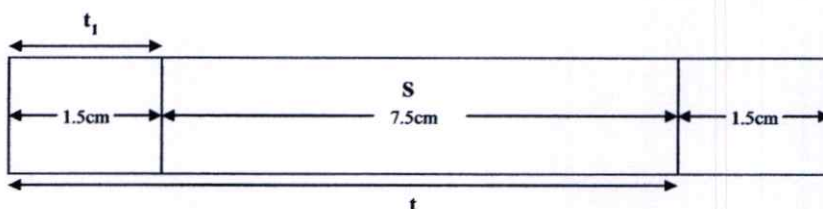
$$\text{อัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)} = \frac{S}{(t - t_1)} \quad (3.1)$$

เมื่อ S คือ ความยาวชิ้นงานในช่วงที่กำหนด (cm)

(กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7.5 cm.)

t_1 คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดแรก (sec)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดสอง (sec)



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test

(Thin Material Vertical Burning Test) [32]

3.4.2 การทดสอบสมบัติการย่อยสลายของแผ่นฟิล์ม โดยวิธีการฝังดิน (Burial Test) [55,56]

การทดสอบสมบัติการย่อยสลายจะทำการเปรียบเทียบสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ด้วยวิธีการฝังดิน โดยตัดชิ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30×120 มิลลิเมตร ฝังลงในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร เป็นเวลา 5 เดือน เมื่อครบกำหนดทุก 2 สัปดาห์ จะทำการขุดตัวอย่างฟิล์มทดสอบ ออกมาสังเกตการย่อยสลายของฟิล์ม ซึ่งชนิดของดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินที่ใช้สำหรับปลูก ต้นไม้ โดยมีการควบคุมปริมาณน้ำในดิน และค่า pH ของดินให้คงที่และเหมาะสมต่อการ เจริญเติบโตของ จุลินทรีย์ในดิน (ปริมาณน้ำในดิน 30% และค่า pH เท่ากับ 7)

3.4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม [38,57]

3.4.3.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม [38]

ตรวจสอบลักษณะของแผ่นฟิล์มโดยสังเกตลักษณะการเป่าขึ้นรูป สังเกตสีและความขุ่นของ ฟิล์ม และทำการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่อง ไมโครมิเตอร์

3.4.3.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม [57]

ทำการตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาดกว้าง 1 นิ้ว ยาว 3 นิ้ว จำนวน 10 ชิ้นต่อหนึ่งสูตร นำไปอบที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกผล จากนั้นนำไปแช่ในน้ำ กลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำความสะอาดชิ้นงานให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อ บันทึกผล นำผลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำจากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่ในน้ำกลั่น} - \text{น้ำหนักก่อนแช่ในน้ำกลั่น}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่ในน้ำกลั่น}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.4.4 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

(Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) [25]

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจ วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy การ เตรียมตัวอย่างที่เป็นฟิล์มจะตัดชิ้นงานเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 4×8 cm จากนั้นนำชิ้นทดสอบมา ติดไว้บนหน้าต่างเซลล์ แล้วบรรจุลงในที่บรรจุเซลล์ (Cell holder) เพื่อทำการวัดหาค่าหมู่ฟังก์ชัน ของสารตัวอย่าง ที่เลขคลื่นช่วง $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

3.4.5 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม (Morphological Analysis) [31]

ศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว การกระจายตัว ของแป้งมันสำปะหลัง สารหน่วงการคิดไฟ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ ภายในพื้นผิวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยจะทำการเคลือบฟิล์มตัวอย่างด้วยเรซิน จากนั้นจะนำฟิล์มที่เคลือบด้วยเรซินไปหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) จากนั้นทำการเคลือบผิวของฟิล์มที่บริเวณรอยหักด้านข้างของฟิล์มด้วยทอง แล้วนำไปส่องดูที่ผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก (Fractured surface) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope:SEM)

3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) [28,29]

3.4.6.1 เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) [28]

ทำการศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c,onset}$) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5-10 มิลลิกรัมให้มีน้ำหนักที่แน่นอน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิห้องจนถึง $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นลดอุณหภูมิด้วยอัตรา $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึง $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้ความร้อนครั้งที่ 2 ด้วยอัตรา $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนมีอุณหภูมิถึง $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามมาตรฐาน ASTM E 794 [35] การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.3)$$

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (3.4)$$

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)

3.4.6.2 เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) [29]

ทำการศึกษาอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว (T_d on set) ของพอลิเมอร์ผสม โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 20-25 มิลลิกรัม แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer โดยให้ความร้อนด้วยอัตรา $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131 [36]

3.4.7 ศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [34,37]

3.4.7.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [34]

ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile tester เพื่อวัดค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) โดยตัดตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 mm × 140 mm วัดตัวอย่างทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) มาตรฐาน ASTM D 882 [23] ใช้ชิ้นงานทดสอบ 8 ชิ้นต่อสูตร สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	500	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของชิ้นงาน (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100	นิวตัน

โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at brake) โดยสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ตามสมการที่ 3.5, 3.6 และ 3.7

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength : } \sigma) = \frac{F}{A} \quad (3.5)$$

$$\text{ค่ามอดุลัส (Modulus : } E) = \text{ความเค้น } (\sigma) / \text{ความเครียด } (\epsilon) \quad (3.6)$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด} = \left[\frac{L - L_0}{L_0} \right] \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง

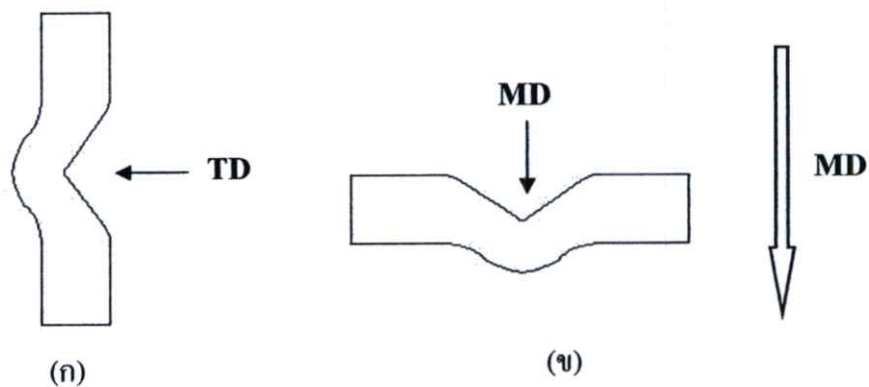
L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)

L_0 คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยืดชิ้นงาน (mm.)

3.4.7.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) [37]

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดเป็นชิ้นงานรูปปีกนก ตามมาตรฐาน ASTM D 1004 [24] ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile tester ทดสอบตามแนว MD และแนว TD โดยพิจารณาทิศทางของชิ้นงานตามการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน กล่าวคือ ฟิล์มที่ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกตามแนว MD เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรงในทิศทาง MD ฟิล์มเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงานตามทิศทาง TD จะพิจารณาเป็นค่าความแข็งแรงฉีกขาดในทิศทาง TD ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดังนี้

ความเร็วดึง (Crosshead speed)	50	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของชิ้นงาน (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	500	นิวตัน



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด

(ก) ทิศทางแนวขวางเครื่องจักร(TD) และ

(ข) ทิศทางตามแนวเครื่องจักร(MD) [37]

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ โดยฟิล์มดังกล่าวสามารถเกิดการย่อยสลาย ได้จากส่วนของเป็งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาเร็กซ์ และมีสมบัติในการหน่วงการคิดไฟได้ จากการผสมสารปรับแต่งประเภทหน่วงการคิดไฟ เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติการทนไฟให้กับฟิล์ม โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ เพื่อเป็นการเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการคิดไฟที่ดีขึ้นให้กับฟิล์ม

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน โดยตอนที่ 1 เป็นการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาเร็กซ์ โดยในขั้นตอนนี้จะศึกษาถึงปริมาณของพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) และปริมาณของสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาเร็กซ์ ได้แก่ สมบัติทางเคมี (การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด) สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง, เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรง ฉีกขาด) สมบัติทางกายภาพ (ลักษณะทางกายภาพ และปริมาณการดูดซับน้ำ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าร้อยละการเป็นผลึก และอุณหภูมิการเริ่มสลาย (T_d)) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ โดยในขั้นตอนนี้จะเลือกพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาเร็กซ์ ที่ให้สมบัติดีที่สุดจากตอนที่ 1 มาผสมกับสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง ในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์ม สมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์ม และศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ เช่น สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง, เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด) สมบัติทางกายภาพ (ลักษณะการเป่าขึ้นรูป และปริมาณการดูดซับน้ำ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าร้อยละการเป็นผลึก และอุณหภูมิการเริ่มสลาย (T_d)) และ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ตอนที่ 1 ผลจากการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน

ความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาถึงปริมาณของพลาสติกไซเซอร(กลีเซอรอล) ปริมาณของสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) และอุณหภูมิในการผสมของเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช จากนั้นจะนำพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวไปทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง เพื่อศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูป และสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางเคมี (การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด) สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด) สมบัติทางกายภาพ (ลักษณะการเป่าขึ้นรูปและปริมาณการดูดซับน้ำ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าร้อยละการเป็นผลึก และ อุณหภูมิการเริ่มสลาย (T_d)) และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

ตารางที่ 4.1 ความหมายของสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ(LDPE)

กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างกัน

สูตร	ความหมาย
LDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์
LDPE/TPS 1	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 15 % โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 2	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 16.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 3	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 18 % โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 4	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 19.5 % โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 5	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 20 % โดยน้ำหนักของ LDPE

4.1 ผลการศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาดังปริมาณของกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอร์ ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยการนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง และสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ในอัตราส่วน 100:30:5 โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ด้วยการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูป และสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ในการทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะทำการเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์เพื่อให้เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอัตราส่วนในการผสมแสดงดังตารางที่ 3.7

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

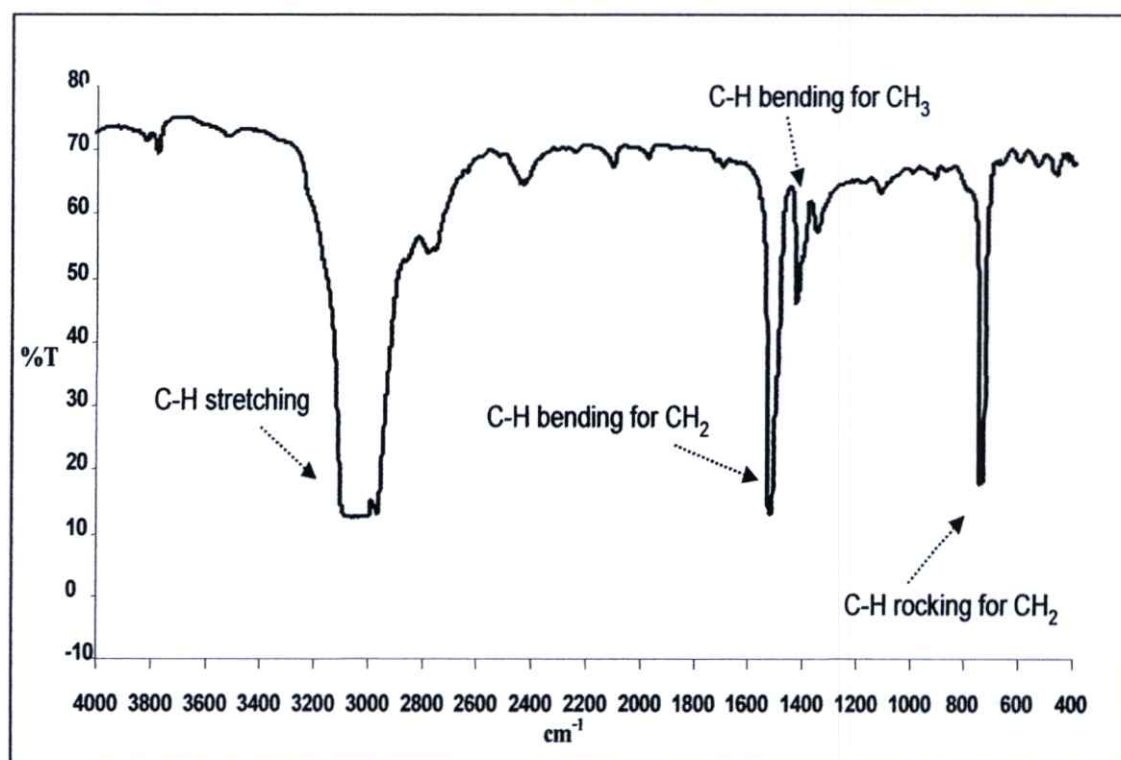
ผลจากการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 1 และ LDPE/TPS 5 ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 15 และ 21 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ จึงทำการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 2 - LDPE/TPS 4 ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 16.5, 18 และ 19.5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวสามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ แสดงดังตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ กับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พบว่า ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ บริสุทธิ์ มีความใส และไม่มีสี แต่ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม มีความขุ่นมากกว่า และมีสีขาว โดยสีและความขุ่นของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรที่เป่าขึ้นรูปได้นั้นไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อทำการวัดความหนาของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมมีความหนากว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้สาเหตุมาจาก ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม จะมีเม็ดของแป้งมันสำปะหลังกระจายตัว และแทรกตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมมีความหนาเพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและพอลิเมอร์ผสม

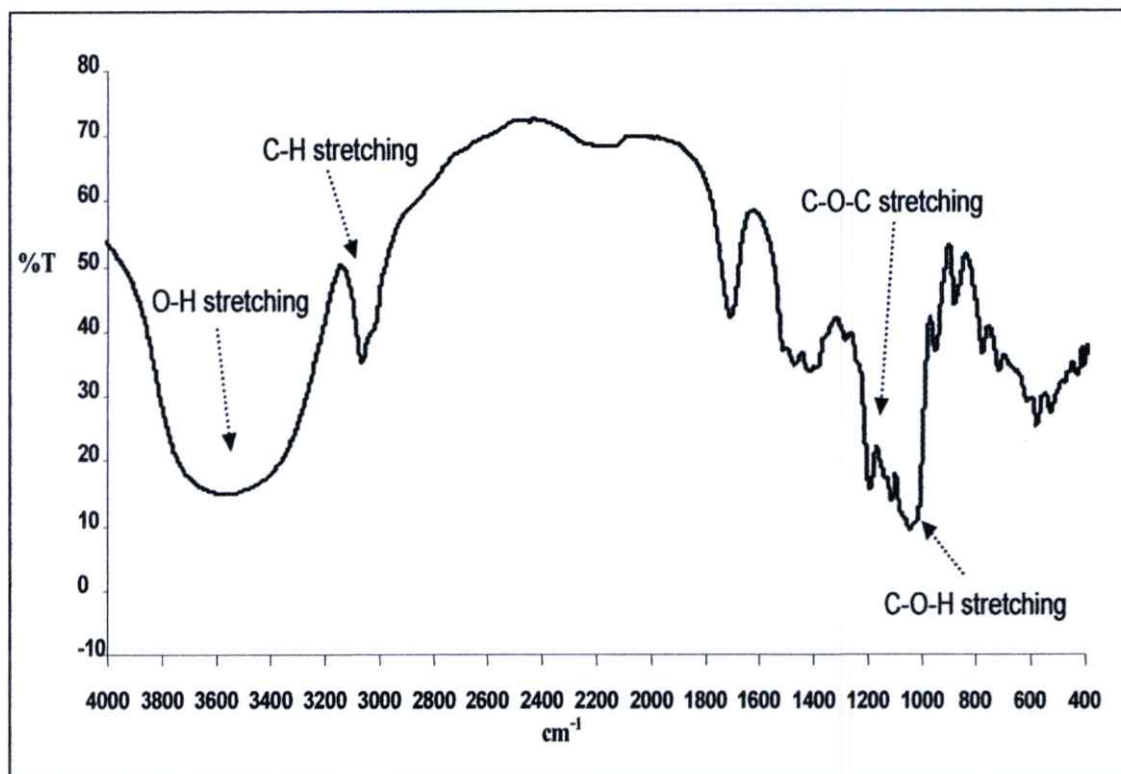
สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนา (μm)
LDPE	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	32 ± 1.74
LDPE/TPS 1	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	–
LDPE/TPS 2	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	69 ± 1.36
LDPE/TPS 3	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	71 ± 1.42
LDPE/TPS 4	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	70 ± 1.91
LDPE/TPS 5	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	–

4.1.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

งานวิจัยนี้ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เพื่อตรวจหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ผสม เช่น หมู่ฟังก์ชันO-H และหมู่ฟังก์ชันC-O-C ของแป้งมันสำปะหลัง, หมู่ฟังก์ชันC-O ของพลาสติกไซเซอรอล (กลีเซอรอล) และหมู่ฟังก์ชันC-O ของสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช รวมทั้งยังใช้การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เพื่อทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น



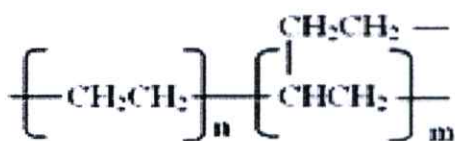
รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



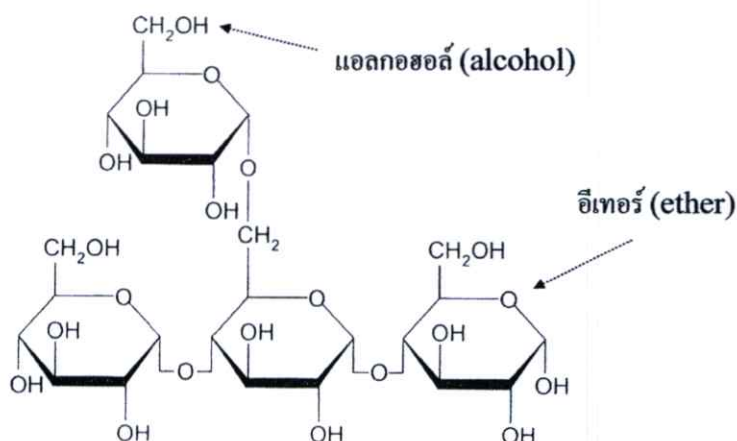
รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับแป้งมันสำปะหลัง พบว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 4.1) มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ ที่เลขคลื่น $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นของ C-H stretching ของสายโซ่คาร์บอนอิ่มตัว ที่เลขคลื่น 1470 cm^{-1} เป็นของ C-H bending ของ CH_2 ที่เลขคลื่น 1376 เป็นของ C-H bending ของ CH_3 และที่เลขคลื่น ประมาณ 720 cm^{-1} เป็นของ C-H rock ของ CH_2 ตามลำดับ [27,28] และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 4.2) พบว่า มีพีคของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญคือ ที่เลขคลื่น $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นของ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่น $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นของ C-H stretching ของสายโซ่คาร์บอนอิ่มตัว ที่เลขคลื่นประมาณ 1160 cm^{-1} เป็นของ C-O-C stretching และที่เลขคลื่น ประมาณ 1030 cm^{-1} เป็นของ C-O-H stretching ตามลำดับ [46,58]

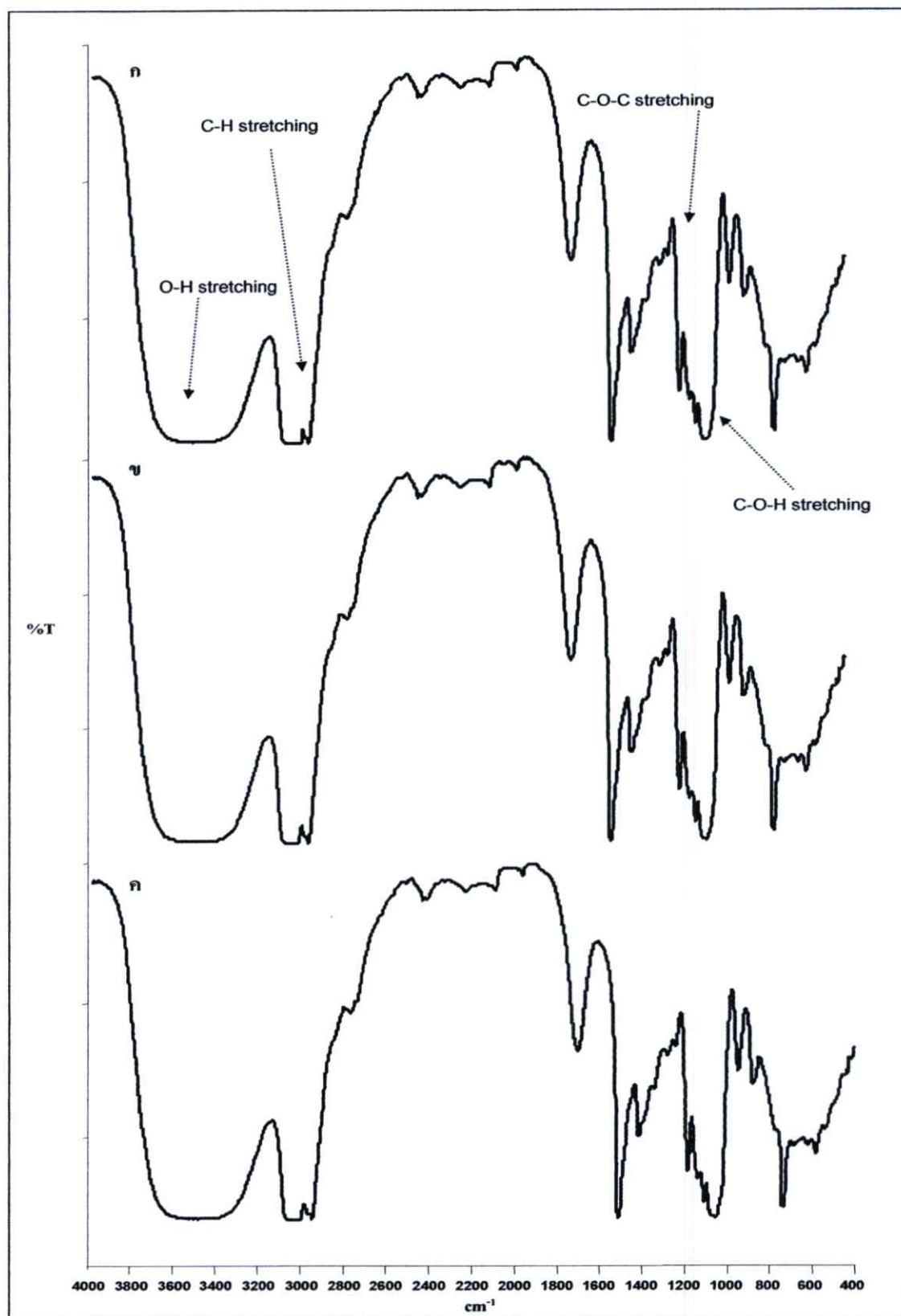
จากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าภายใน โครงสร้างมีกิ่ง สาขายาวต่อออกจากพอลิเมอร์หลัก ซึ่งโซ่กิ่งเหล่านี้จะเพิ่มปริมาตรแต่ลดความหนาแน่นของ พอลิเมอร์ลง ตลอดทั้ง โครงสร้างเป็น โมเลกุลของ CH_2 ด้วยเหตุนี้จึงพบแต่พันธะของ C-H แต่มีการ สั่น ในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป พบทั้งการสั่นแบบ stretching และ bending [27,28] แล้วเมื่อ พิจารณาสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังในรูปที่ 4.2 พบตำแหน่งของพีกที่สามารถระบุได้ถึงหมู่ ฟังก์ชันที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลังได้ 2 หมู่ คือ หมู่ฟังก์ชันของอีเทอร์ และแอลกอฮอล์ ที่ ตำแหน่งเลขคลื่น 1160 cm^{-1} และที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1030 cm^{-1} ตามลำดับ [45,53] แสดงดังรูปที่ 4.2 ทำให้ทราบถึงตำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของแป้งมันสำปะหลัง โดยสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการ ดูดกลืนรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [16]



รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [2]

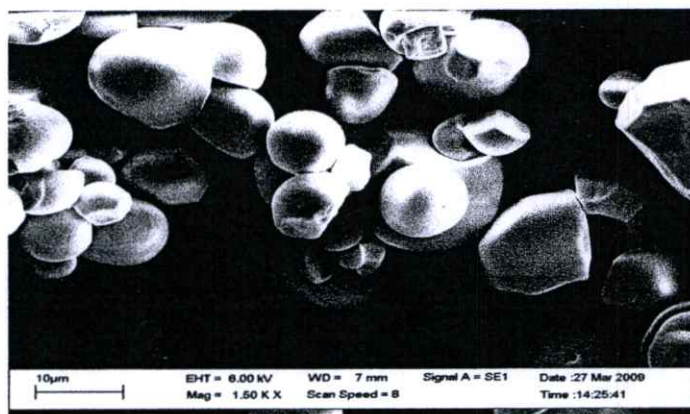


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก
สตาร์ช โดย (ก) LDPE/TPS 2, (ข) LDPE/TPS 3 และ (ค) LDPE/TPS 4

จากรูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน คือ สูตร LDPE/TPS 2 (เส้น ก) , LDPE/TPS 3 (เส้น ข) และ LDPE/TPS 4 (เส้น ค) ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 16.5, 18 และ 19.5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 4.1) พบตำแหน่งพีกที่แตกต่างกับสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ คือ ที่เลขคลื่น $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นของ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่นประมาณ 1160 cm^{-1} เป็นของ C-O-C stretching และที่เลขคลื่นประมาณ 1030 cm^{-1} เป็นของ C-O-H stretching ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการยึดเกาะกันระหว่างพันธะไฮโดรเจนของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม (พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดรย) โดยพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแตกต่างกันไปตามความแรงในการยึดเกาะกัน จากสเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่ามีโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสมอยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณกลีเซอรอลแตกต่างกัน คือ สูตร LDPE/TPS 2 (เส้น ก) , LDPE/TPS 3 (เส้น ข) และ LDPE/TPS 4 (เส้น ค) พบว่าตำแหน่งของพีกที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ผสมทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณของกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อแรงในการยึดเกาะกันระหว่างพันธะไฮโดรเจนของแป้ง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม [47]

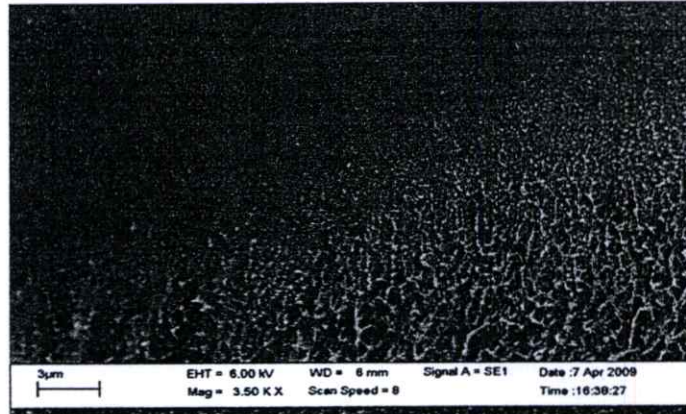
4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และศึกษาความสามารถในความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.6 – 4.7

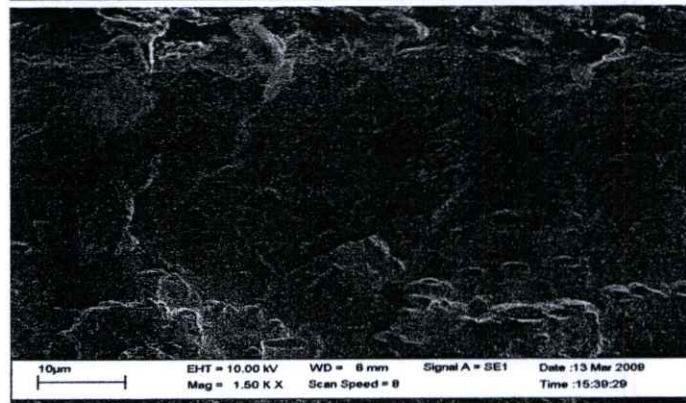


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจาก SEM ของแป้งมันสำปะหลัง

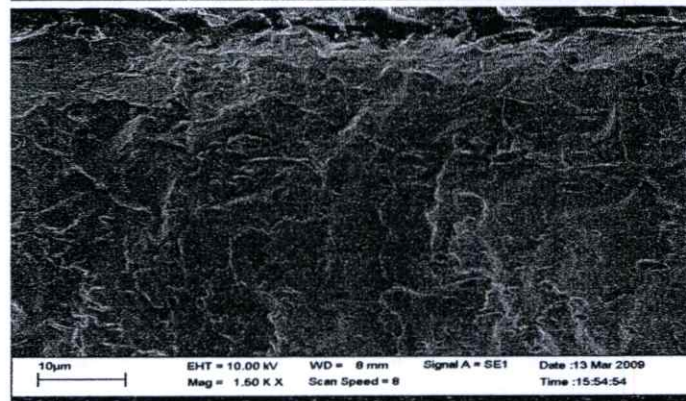
(ก)



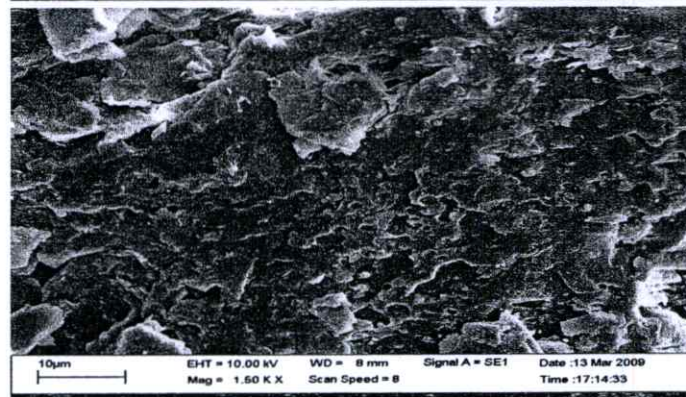
(ข)



(ค)



(ง)



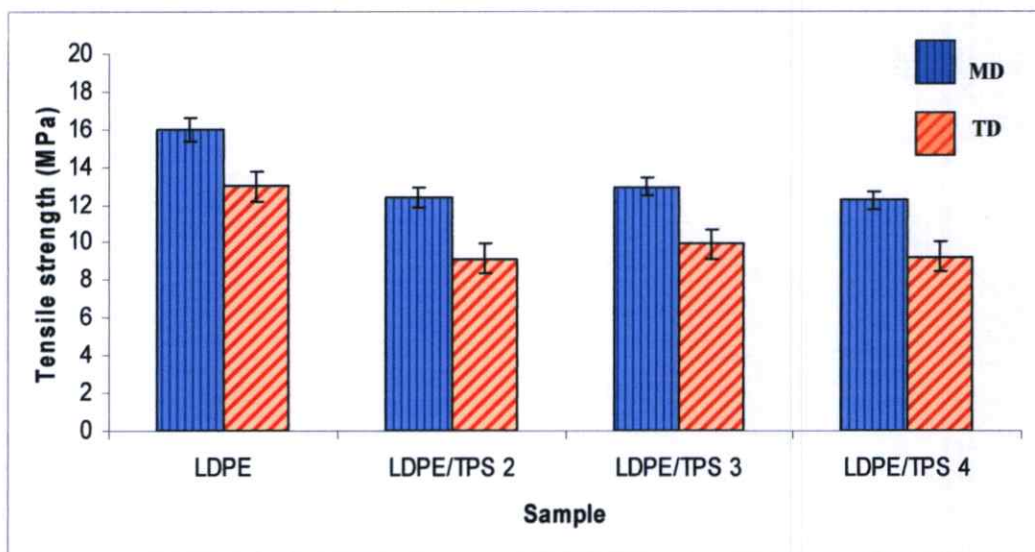
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงภาคตัดขวาง ของ (ก)ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตารีช [(ข)LDPE/TPS 2, (ค) LDPE/TPS 3 และ (ง) LDPE/TPS 4]

จากรูปที่ 4.6 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีขนาดอนุภาคประมาณ 20-25 ไมครอน และสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลให้ฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช แสดงสมบัติเป็นไอโซโทรปิก หรือแสดงสมบัติที่เหมือนกันทุกทิศทาง [7]

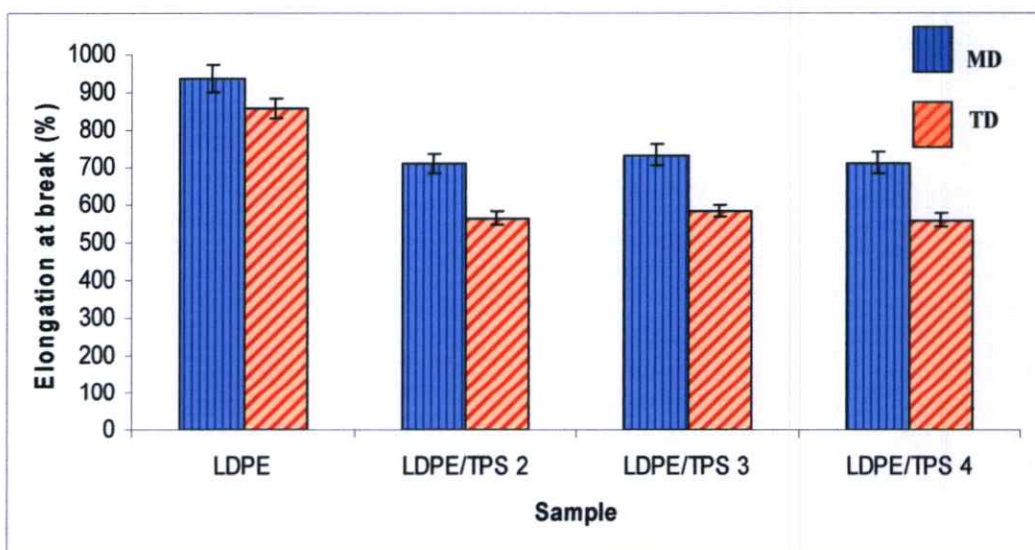
จากรูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (รูปที่ 4.7 - ก.) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน คือสูตร LDPE/TPS 2 (รูปที่ 4.7 - ข.), LDPE/TPS 3 (รูปที่ 4.7 - ค.) และ LDPE/TPS 4 (รูปที่ 4.7 - ง.) ซึ่งมีปริมาณของ กลีเซอรอล 16.5, 18 และ 19.5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำตามลำดับ พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ มีลักษณะเรียบอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เนื่องจากฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมมีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ภายในพื้นผิวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน พบว่า ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม สูตร LDPE/TPS 3 (รูปที่ 4.7 - ค.) ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 18% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังภายในพื้นผิวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกว่า สังเกตได้จากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ค่อนข้างน้อยกว่าของแป้งมันสำปะหลัง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวจึงมีความเรียบกว่า เนื่องมาจากกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ช่วยทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีความยืดหยุ่นและมีความอ่อนนุ่มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เคลื่อนที่ผ่านกันได้อย่างอิสระ และสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [45,49] แต่ถ้าใส่กลีเซอรอลในปริมาณที่มากเกินไป จะก่อให้เกิดการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์ออกจากวัสดุ (Bleeding) ไปยังพื้นผิวของฟิล์ม มากกว่าที่จะไปแทรกอยู่ตามสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังมีการกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อนและกระจายอยู่ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ รวมทั้งส่งผลให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 4 (รูปที่ 4.7 - ง.) ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 19.5% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความขรุขระเพิ่มขึ้น [50]

4.1.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

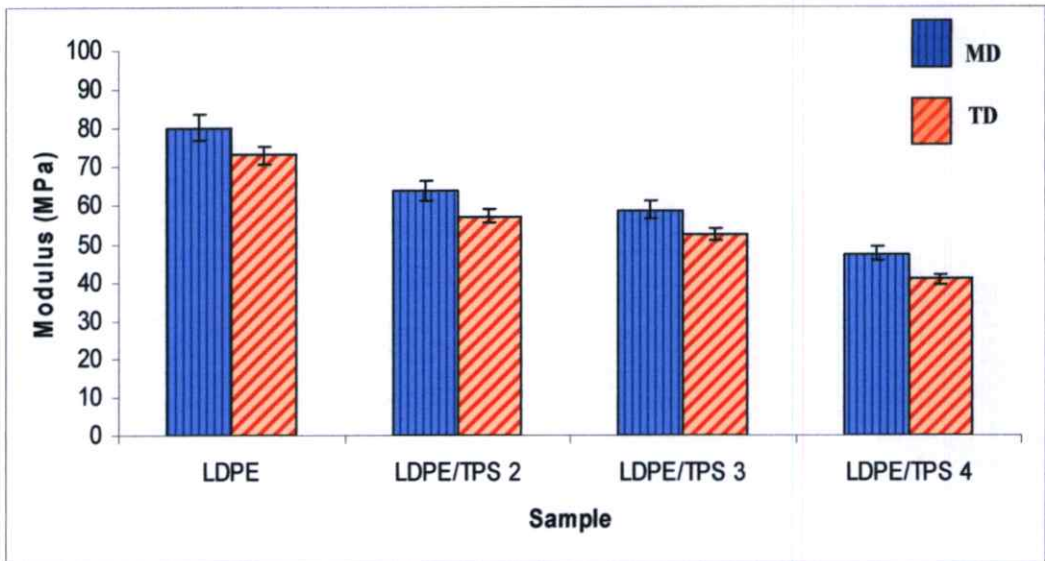
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่อง Universal testing machine เพื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างกัน ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8–4.11



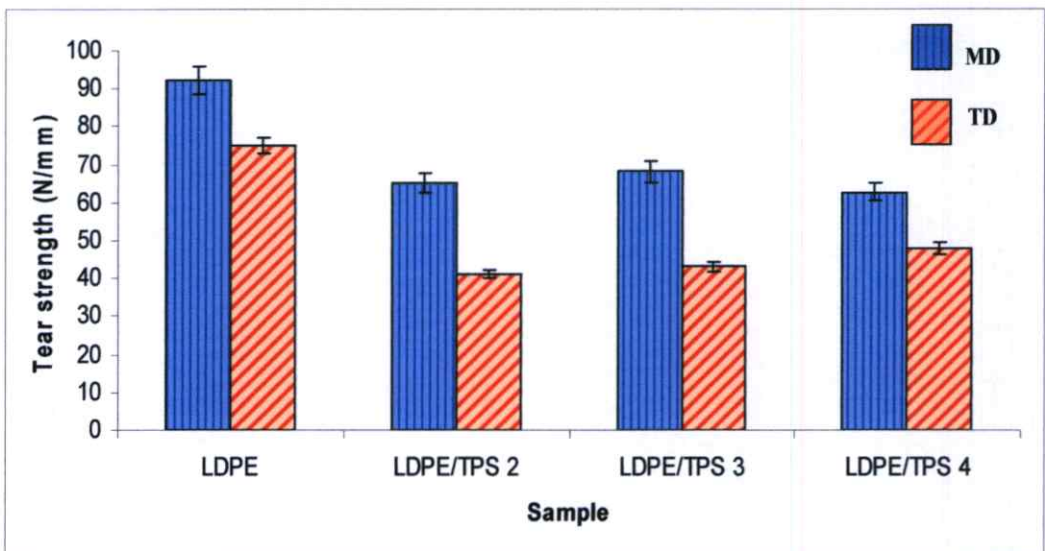
รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัส ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

จากรูปที่ 4.8-4.11 เป็นผลจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร(Transverse direction: TD) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน คือ สูตร LDPE/TPS 2, LDPE/TPS 3 และ LDPE/TPS 4 โดยมีปริมาณ

กลีเซอรอล 16.5, 18 และ 19.5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำตามลำดับ พบว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เนื่องจากอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ สามารถเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทำให้สายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ยากขึ้น และส่งผลให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกลดลง และมีส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) มากขึ้น สามารถยืดหยุ่นได้จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน [42] รวมทั้งการผสม พลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) เพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความอ่อนนุ่มให้กับสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ มีส่วนทำให้ฟิล์มนิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงและความแข็งแรงของฟิล์มลดลง ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระทำจึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ จึงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ [51]

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกันแต่ละสูตร พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 3 ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 18 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีแนวโน้มสูงที่สุด เนื่องจากกลีเซอรอลช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความอ่อนนุ่มให้กับสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ สามารถเคลื่อนที่และผสมเข้ากันกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ดียิ่งขึ้น สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวจึงดีขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม การผสมกลีเซอรอลในปริมาณที่มากเกินไป คือ ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 4 ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 19.5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะมีผลทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มโดยทั่วไปลดลง เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) จะทำให้พื้นที่ที่ขีกระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์อ่อนแอลง และอาจก่อให้เกิดการแพร่ของพลาสติกไซเซออร์ออกจากวัสดุ (Bleeding) ไปยังพื้นผิวของฟิล์ม เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ซึ่งพิจารณาได้จากผลของการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.7 - ง ซึ่งลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มสูตรดังกล่าวจะมีความขรุขระมากกว่า ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงลดลง [50]

4.1.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน โดยจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ on\ set}$) และค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) แสดงดังตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก-1 ถึง ก-4) และจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน แสดงดังตารางที่ 4.4 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก-14 ถึง ก-17)

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่ได้จากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก T_m (°C)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c\ on\ set}$ (°C)	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)
LDPE	107.1	80.8	33.5
LDPE/TPS 2	106.4	80.6	26.5
LDPE/TPS 3	106.3	81.7	27.1
LDPE/TPS 4	107.1	81.6	27.6

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และค่าอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ on\ set}$) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการผสมกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน แสดงว่าเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และพลาสติกไซเซออร์ ไม่มีผลทำให้ผลึกของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง [41] แต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าลดลง เมื่อทำการผสมกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ทั้งนี้มีผลมาจากอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สามารถกระจายตัวได้ดีในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในขณะที่หลอมเหลว ส่งผลให้เมื่อทำให้พอลิเมอร์เย็นตัวลงจึงเป็นการลดปริมาณผลึกโดยรวมของพอลิเมอร์ [47,48]

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างกัน พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ไม่มีผลทำให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิการระเหยของน้ำ (°C)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของกลีเซอรอล (°C)	อุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของแป้ง (°C)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE (°C)
LDPE	-	-	-	452.9
LDPE/TPS 2	102.0	160.1	307.3	447.2
LDPE/TPS 3	101.8	161.9	305.4	443.8
LDPE/TPS 4	102.1	159.9	303.5	441.1

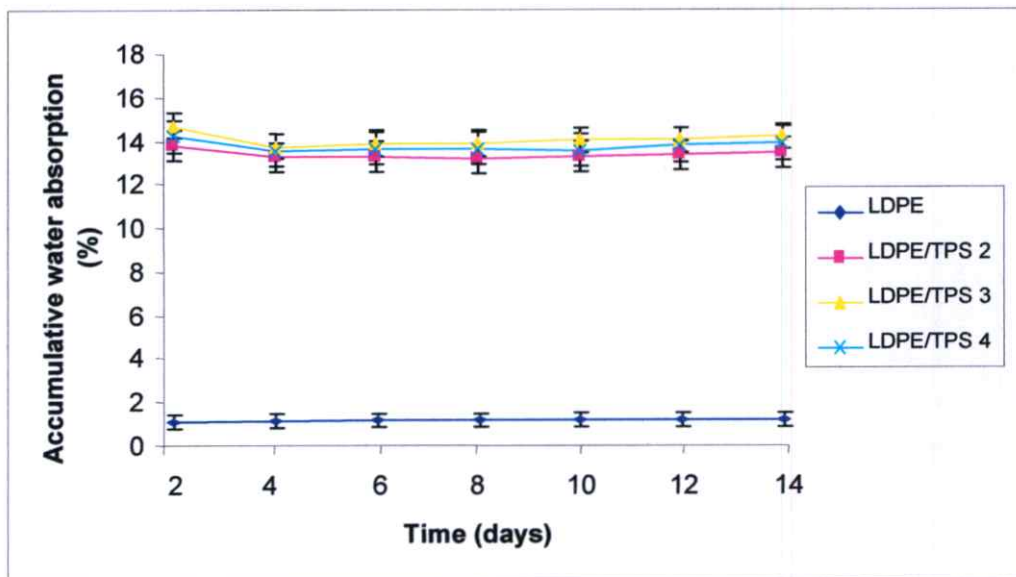
ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในฟิล์มบริสุทธิ์ โดยอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มที่ต่ำลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุจากกลีเซอรอลมีผลทำให้ความสามารถในด้านทานความร้อนของพอลิเมอร์ลดลง พอลิเมอร์จึงเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนเร็วขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจึงมีแนวโน้มที่ต่ำลง เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มากขึ้น [48]

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช แสดงดังภาคผนวก ก (รูปที่ ก-14 ถึง ก-17) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากการสลายตัวทางความร้อน 4 องค์ประกอบ ดังนี้ ที่ช่วงอุณหภูมิ 90-120 °C เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการระเหยของน้ำ ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 160-200 °C เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสลายตัวของกลีเซอรอล ที่ช่วงอุณหภูมิ 290-320°C เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง และช่วงสุดท้ายเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวแสดงดังตารางที่ 4.4 ที่แตกต่างกันไปตามปริมาณกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสม [47] และจากเทอร์โมแกรม

แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สคาร์ซ์ ไม่สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Immiscible) เนื่องจากไม่พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่มาจาก การสลายตัวของ ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว และทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสมนั้นล้วนมีองค์ประกอบที่ เหมือนกัน [48]

4.1.6 ผลการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยจะทำการคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สคาร์ซ์ ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน ตามจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสม กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สคาร์ซ์

ผลจากการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สคาร์ซ์ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ มีปริมาณการดูดซับน้ำสะสมน้อยมาก ซึ่งแสดงถึงสมบัติความไม่มีขั้ว (Hydrophobicity) จึงไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ แต่ถ้าเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สคาร์ซ์ ซึ่งมีปริมาณการดูดซับน้ำสะสมที่มากกว่า เพราะอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สคาร์ซ์ มีความสามารถในการดูด

ชั้นน้ำได้ดี เนื่องจากในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ซึ่งแสดงสมบัติความมีขั้ว (Hydrophilicity) ที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงเพิ่มขึ้น[50] และในช่วงแรกของการแช่น้ำ ฟิล์มจะสามารถดูดซับน้ำได้ดี ต่อมาจะดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่มีสาเหตุมาจากอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังสามารถดูดซับน้ำได้ดีจนเกิดการบวมตัว (Swell) จากนั้นจะไม่สามารถดูดซับน้ำเพิ่มได้อีกรวมทั้งยังพบว่าปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอลต่างๆกัน มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ากลีเซอรอลไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว [47]

จากการศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อใช้ในงานวิจัยขั้นต่อไป พบว่าปริมาณกลีเซอรอล 18% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เหมาะสมที่จะเลือกใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสม มีส่วนช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความอ่อนนุ่มให้กับสายโซ่โมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ส่งผลให้เคลื่อนที่ผ่านกันได้อย่างอิสระ และสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ซึ่งพิจารณาได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เรียบกว่า ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น[45] แต่ปริมาณกลีเซอรอลที่มากเกินไปจะมีผลทำให้ความแข็งแรงโดยทั่วไปลดลง เนื่องจากพันธะที่ยึดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์อ่อนแอลง และอาจก่อให้เกิดการแพร่ของพลาสติกไซเซอร์ออกจากวัสดุ (Bleeding) ไปยังพื้นผิว เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีความขรุขระเพิ่มขึ้น เป็นผลให้สมบัติเชิงกลลดลงตามไปด้วย [45,49] จากเหตุผลดังกล่าว ทำให้ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตรที่มี ปริมาณกลีเซอรอล 18% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จึงมีลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสูตรอื่น จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยขั้นต่อไป

4.2 ผลการศึกษาปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษากันถึงปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยการนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับแป้งมันสำปะหลัง และพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ในอัตราส่วน 100:30:18 โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้สารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ด้วยการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูป และสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ในการทดสอบสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะทำการเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เพื่อให้เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอัตราส่วนในการผสมแสดงดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 4.5 ความหมายของสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ(LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่าง ๆ กัน

สูตร	ความหมาย
LDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์
LDPE/TPS 6	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 1 % โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 7	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 3 % โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 8	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 5% โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS 9	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 7% โดยน้ำหนักของ LDPE
LDPE/TPS10	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 9 % โดยน้ำหนักของ LDPE

4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

ผลจากการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 9 และ LDPE/TPS 10 ซึ่งมีปริมาณ

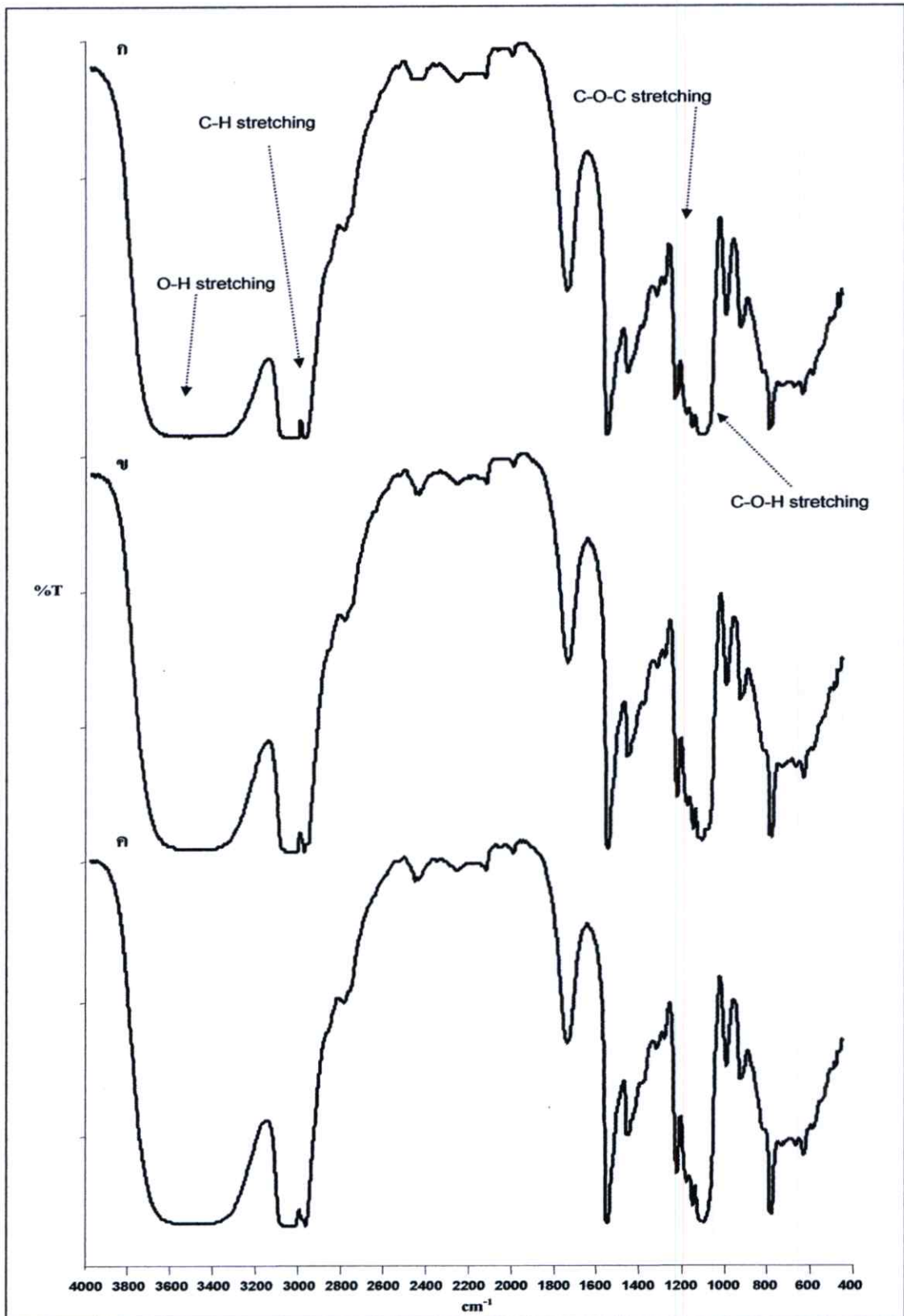
สารช่วยผสม 7 และ 9 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ จึงศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ท สูตร LDPE/TPS 6 - LDPE/TPS 8 ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากสามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.6 เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ เปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พบว่า ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ มีความใส และไม่มีสี แต่ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ท ที่เป่าขึ้นรูปได้ จะมีสีขาวและ มีความขุ่นมากกว่า โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 6 ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 1%โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีลักษณะผิวที่ ค่อนข้างขรุขระไม่สม่ำเสมอ แตกต่างจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรLDPE/TPS7 และ LDPE/TPS 8 ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 3 และ 5% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่มีลักษณะผิวเรียบสม่ำเสมอว่า เนื่องจากเกิดการกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อนของแป้งมันสำปะหลัง และ พบว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมมีความหนามากกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนา (μm)
LDPE	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	34 ± 1.45
LDPE/TPS 6	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	72 ± 2.36
LDPE/TPS 7	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	68 ± 1.22
LDPE/TPS 8	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	68 ± 0.84
LDPE/TPS 9	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	—
LDPE/TPS 10	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	—

4.2.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

งานวิจัยนี้ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เพื่อตรวจหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ผสม เช่น หมู่ฟังก์ชันO-H และหมู่ฟังก์ชันC-O-C ของแป้งมันสำปะหลัง, หมู่ฟังก์ชันC-O ของพลาสติกไซเซอร(กลีเซอรอล) และหมู่ฟังก์ชันC-O ของสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม อยู่ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ท รวมทั้งได้ติดตามการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้น สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 4.13



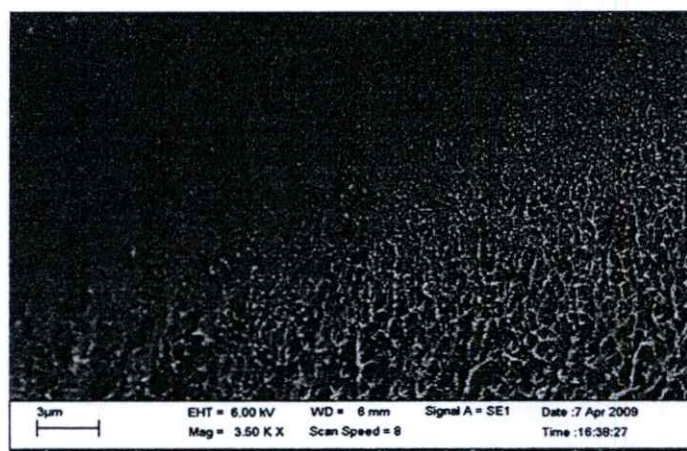
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก
สตาร์ช โดย (ก) LDPE/TPS 6, (ข) LDPE/TPS 7 และ (ค) LDPE/TPS 8

จากรูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน คือ สูตร LDPE/TPS 6 (เส้น ก), LDPE/TPS 7 (เส้น ข) และ LDPE/TPS 8 (เส้น ค) ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช(รูปที่ 4.13) และสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (รูปที่ 4.1) พบตำแหน่งพีกที่แตกต่างกับสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ คือ ที่เลขคลื่น $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ เป็นของ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่นประมาณ 1160 cm^{-1} เป็นของ C-O-C stretching และที่เลขคลื่นประมาณ 1030 cm^{-1} เป็นของ C-O-H stretching ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการยึดเกาะกันระหว่างพันธะไฮโดรเจนของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม (พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์) โดยพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวจะแตกต่างกันไปตามความแรงในการยึดเกาะกัน จากสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.13 คือ สูตร LDPE/TPS 6 (เส้น ก) , LDPE/TPS 7 (เส้น ข) และ LDPE/TPS 8 (เส้น ค) แสดงให้เห็นว่ามีโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม อยู่ในพอลิเมอร์ผสม โดยปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้พีกของ C-O-C stretching และ C-O-H stretching สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการยึดเกาะกันที่ดีขึ้นระหว่างพันธะไฮโดรเจนของแป้ง กลีเซอรอล และสารช่วยผสม [46,58]

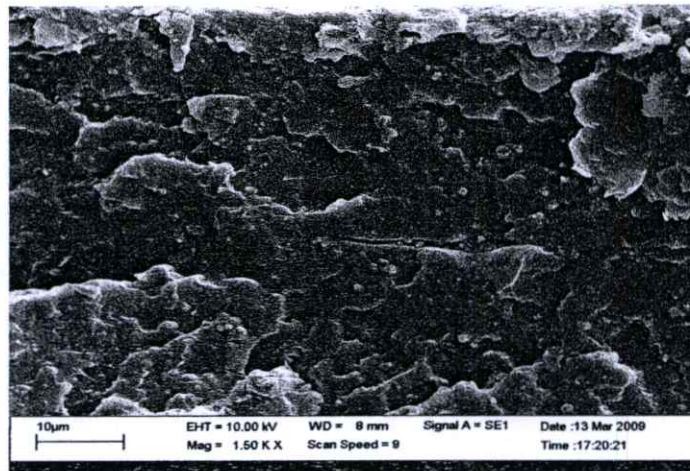
4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลัง ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และศึกษาความสามารถในความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.14

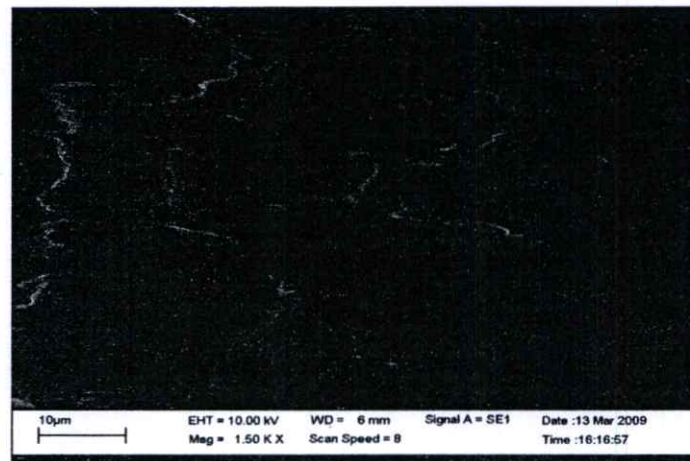
(ก)



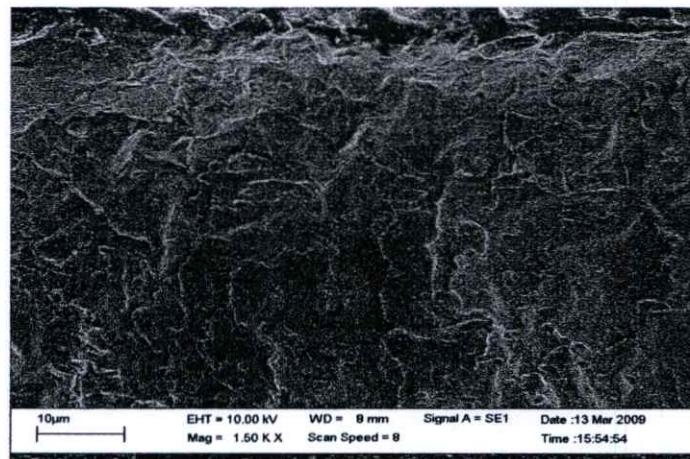
(ข)



(ค)



(ง)

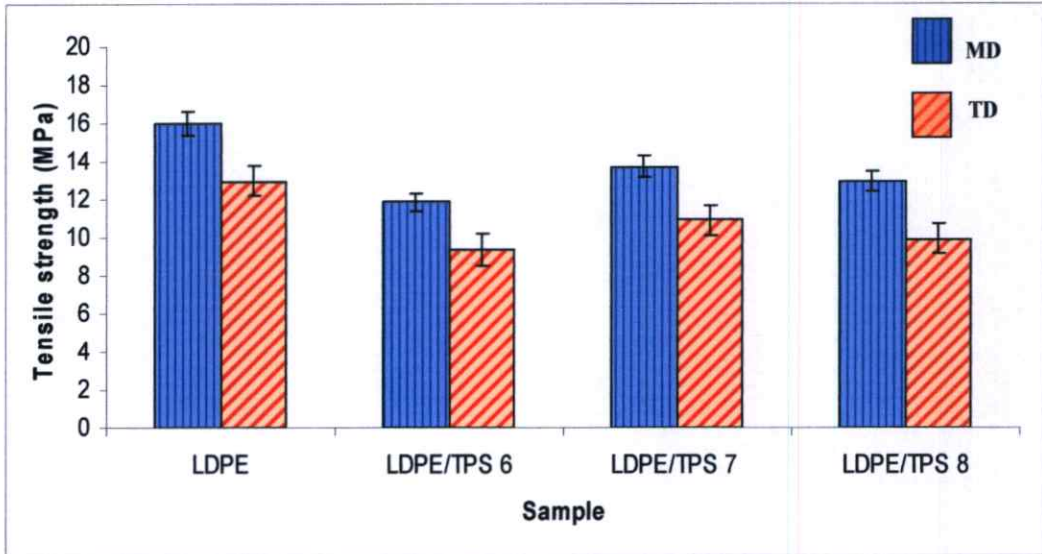


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงภาคตัดขวาง ของ (ก) ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดย (ข)LDPE/TPS 6, (ค) LDPE/TPS 7 และ (ง) LDPE/TPS 8

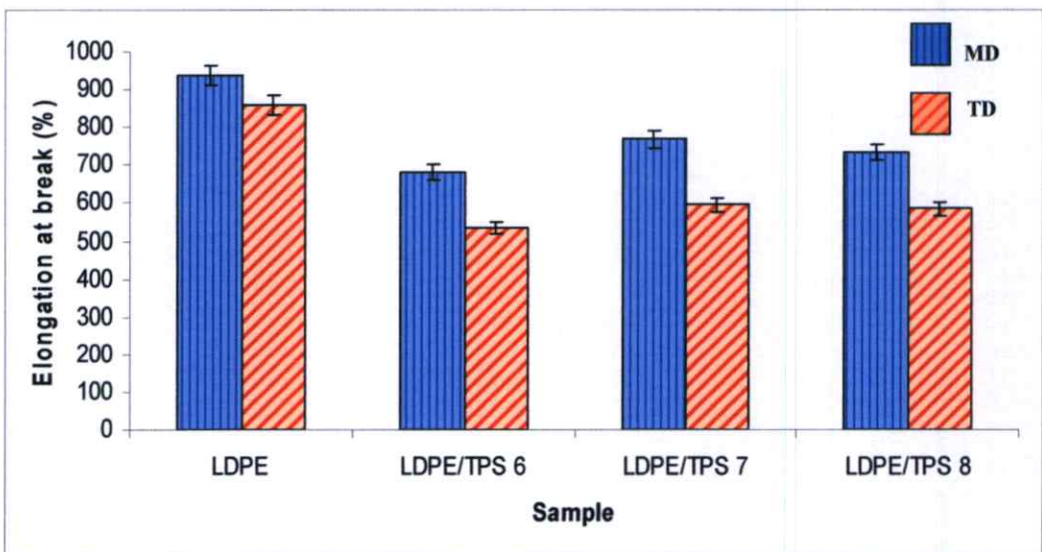
จากรูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (รูปที่ 4.14 - ก.) และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน คือสูตร LDPE/TPS 6 (รูปที่ 4.14 - ข.), สูตร LDPE/TPS 7 (รูปที่ 4.14 - ค.) และ สูตร LDPE/TPS 8 (รูปที่ 4.14 - ง.) ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำตามลำดับ พบว่าฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีลักษณะขรุขระกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เนื่องจากฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมมีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในพื้นผิวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสมต่างกัน พบว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม สูตร LDPE/TPS 7 (รูปที่ 4.14 - ค.) ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังภายในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่สม่ำเสมอกว่า จึงทำให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวมีความเรียบกว่าสูตรอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสารช่วยผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ให้กับแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แป้งมันสำปะหลังจึงสามารถกระจายตัวได้ดีและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [46] แต่ถ้าปริมาณสารช่วยผสมมากเกินไป คือ พอลิเมอร์ผสม สูตร LDPE/TPS 8 (รูปที่ 4.14 - ง.) ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 5% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะทำให้เกิดการสร้างพันธะกันเองของสารช่วยผสมแล้วเกิดการแยกวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสม ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจึงมีความขรุขระเพิ่มขึ้น [47]

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

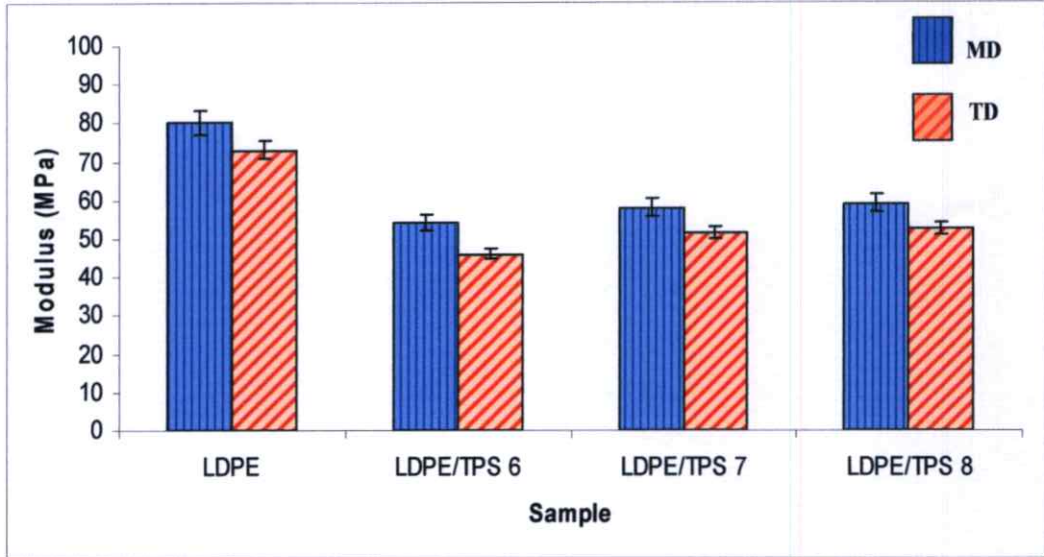
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่อง Universal testing machine เพื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.18



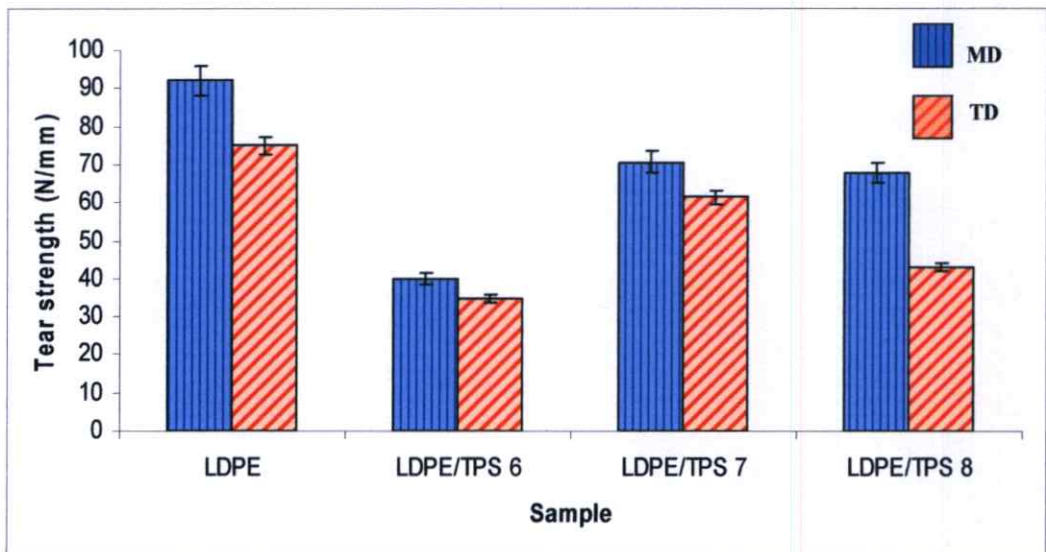
รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.17 ค่ามอดุลัส ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

จากรูปที่ 4.15-4.18 เป็นผลจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน คือ สูตร LDPE/TPS 6, LDPE/TPS 7 และ LDPE/TPS 8 ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำตามลำดับ พบว่า ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงฉีกขาดลดลง ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ต่างๆกัน [50]

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกันแต่ละสูตร พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 7 ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 3 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีแนวโน้มสูงที่สุด เนื่องจากสารช่วยผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทำให้รอยต่อระหว่างวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่งผลให้ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการรับแรงที่มากระทำได้ดีขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรดังกล่าวดีขึ้น แต่ในทางกลับกันถ้าเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมมากเกินไป คือ ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 8 ซึ่งมีปริมาณสารช่วยผสม 5 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะทำให้สมบัติเชิงกลดังกล่าวลดลง เนื่องจากสารช่วยผสมที่มากเกินไป จะก่อให้เกิดการสร้างพันธะกันเองของสารช่วยผสมแล้วเกิดการแยกวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ความสามารถในการกระจายแรงที่มากระทำลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามไปด้วย สามารถพิจารณาได้จากผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.14 – (ง) ซึ่งจะสังเกตเห็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เพิ่มขึ้น [51]

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน โดยจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c on set) และค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) แสดงดังตารางที่ 4.7 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก- 5 ถึงก- 7) และจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน ดังตารางที่ 4.8 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก- 18 ถึง ก- 20)

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก T_m (°C)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก T_c on set (°C)	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)
LDPE	107.1	80.8	33.5
LDPE/TPS 6	106.3	80.9	25.8
LDPE/TPS 7	106.2	80.9	30.3
LDPE/TPS 8	106.3	81.7	27.6

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และค่าอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c on set) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช และสารช่วยผสม ใไม่มีผลทำให้ผลึกของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง [49] แต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำลดลง เมื่อทำการผสมกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ทั้งนี้มีผลมาจากอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สามารถกระจายตัวได้ดีในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในขณะที่หลอมเหลว ส่งผลให้เมื่อทำให้พอลิเมอร์เย็นตัวลงจึงเป็นการลดปริมาณผลึกโดยรวมของพอลิเมอร์ [64]

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมมากขึ้น มีผลทำให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก

(%Crystallinity) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น มีผลมาจากสารช่วยผสมสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับพอลิเมอร์ผสม ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวชิดกันอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมมากเกินไปจนเกินที่เหมาะสม มีผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเมอร์ลดลง มีผลมาจากปริมาณสารช่วยผสมที่มากเกินไป มีโอกาสที่จะเกิดการสร้างพันธะภายในวัฏภาคของสารช่วยผสมเอง ซึ่งวัฏภาคของสารช่วยผสมที่เกิดขึ้นมีโอกาสขัดขวางการจัดเรียงตัวแบบชิดกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ [47,49]

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิการระเหยของน้ำ (°C)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของกลีเซอรอล (°C)	อุณหภูมิการเริ่มสลายตัวของแป้ง (°C)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของ LDPE (°C)
LDPE	-	-	-	452.9
LDPE/TPS 6	101.3	162.6	303.8	422.6
LDPE/TPS 7	103.7	164.8	305.9	443.5
LDPE/TPS 8	102.1	159.9	303.5	441.1

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในฟิล์มบริสุทธิ์ เนื่องจากในพอลิเมอร์ผสมมีพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) ซึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการต้านทานความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำลดลงและเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนเร็วขึ้น [46]

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างกันแต่ละสูตร พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารช่วยผสมช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ภายในพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการยึดเกาะกันที่แข็งแรงขึ้นระหว่างแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นเมื่อปริมาณสารช่วยผสมเพิ่มขึ้น โอกาสที่จะเกิดหุ้มนึ่งกันที่จะทำปฏิกิริยาในการยึดเกาะจึงเพิ่มขึ้น มีผลให้การยึดเกาะกันระหว่าง

แป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจึงแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานความร้อนของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำขึ้น และเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนช้าลง [47]

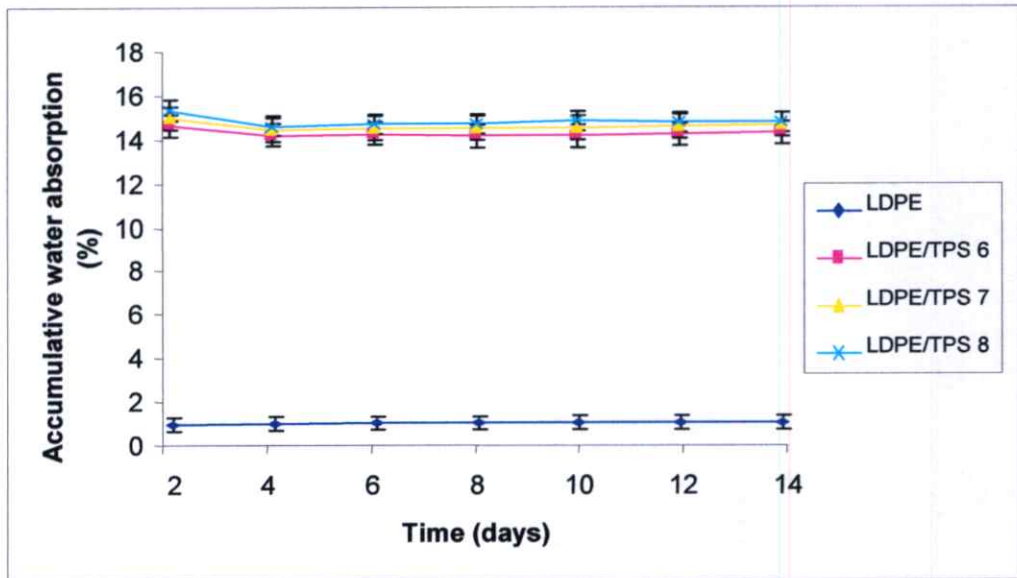
จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ภาคผนวก ก (รูปที่ ก- 18 ถึง ก- 20) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากการสลายตัวทางความร้อน 4 องค์ประกอบ ดังนี้ ที่ช่วงอุณหภูมิ 90–120 °C เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการระเหยของน้ำ ที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 160–200 °C เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสลายตัวของกลีเซอรอล ที่ช่วงอุณหภูมิ 290–310°C เป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง และช่วงสุดท้ายเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวแสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งแตกต่างกันไปตามปริมาณสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสม [45] และจากเทอร์โมแกรมแสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ไม่สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Immiscible) เนื่องจากไม่พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว และทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสมนั้นล้วนมีองค์ประกอบที่เหมือนกัน[46] รวมทั้งยังไม่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่มาจากการสลายตัวทางความร้อนของสารช่วยผสม คาดว่ามีสาเหตุมาจากปริมาณสารช่วยผสมที่ใส่ในพอลิเมอร์ผสม มีปริมาณค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในพอลิเมอร์ผสม [47]

4.1.6 ผลการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยจะทำการคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน ตามจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

ผลจากการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ มีปริมาณการดูดซับน้ำสะสมน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ซึ่งมีปริมาณการดูดซับน้ำสะสมที่มากกว่า เพราะอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมทั้งยังพบว่าปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน มีค่าใกล้เคียงกัน

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า สารช่วยผสมไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว [50]



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสม กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

จากการศึกษาปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อใช้ในงานวิจัยขั้นต่อไป พบว่าปริมาณสารช่วยผสม 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเหมาะสมที่จะเลือกใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่มีความเหมาะสม จะเป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังมีการกระจายตัวที่ดี และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดี เนื่องจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคในพอลิเมอร์ผสมลดลง เป็นผลให้ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการรับแรงที่มากกว่าได้ดี สมบัติเชิงกลโดยรวมจึงมีแนวโน้มดีขึ้น จากสาเหตุดังกล่าวจึงได้นำพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 7 ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 18% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และมีปริมาณสารช่วยผสม 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยขั้นตอนต่อไป

ตอนที่ 2 ผลจากการศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้

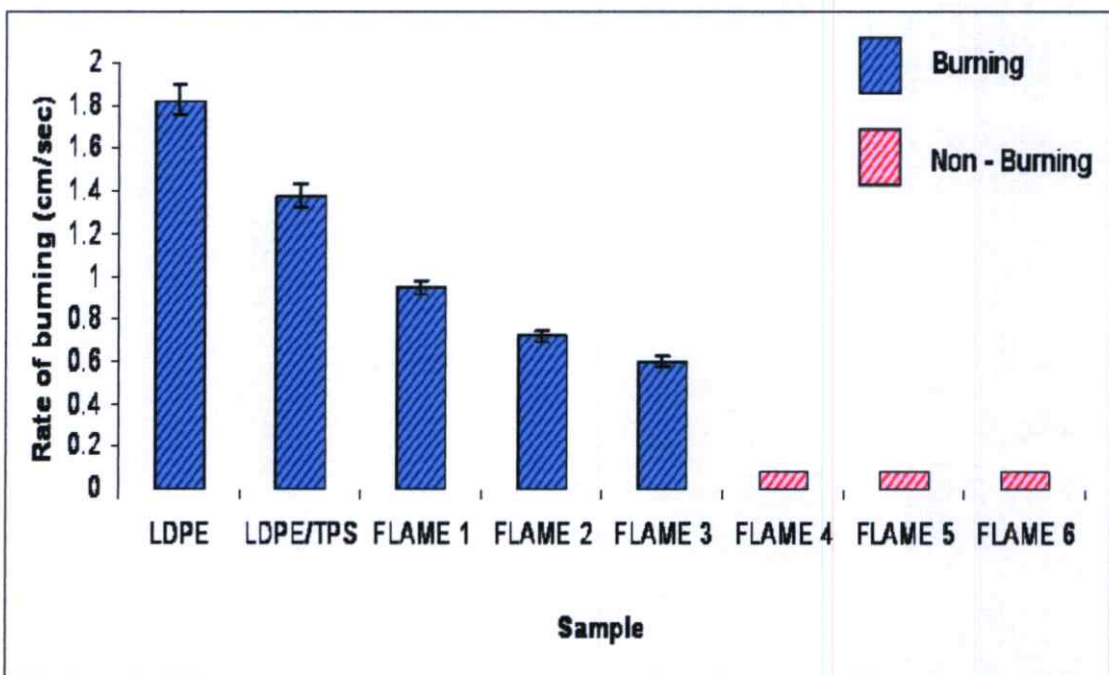
จากผลการทดลองในตอนต้นที่ 1 พบว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่เหมาะสมต่อการนำมาเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ คือ สูตร LDPE/TPS 7 ซึ่งมีปริมาณกลีเซอรอล 18% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และมีปริมาณสารช่วยผสม 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในขั้นตอนนี้จะทำการปรับปรุงสมบัติในการหน่วงการติดไฟให้กับพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว โดยการนำมาผสมกับสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง เพื่อนำไปศึกษาถึงผลของปริมาณสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ สมบัติการย่อยสลายในดิน และศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ เช่น สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ฉ. จุดขาด, มอดูลัส และความแข็งแรงฉีกขาด) สมบัติทางกายภาพ (ลักษณะการเป่าขึ้นรูป และปริมาณการดูดซับน้ำ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าร้อยละการเป็นผลึก และอุณหภูมิการเริ่มสลาย (T_d) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ตารางที่ 4.9 ความหมายสูตรของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ ที่มีอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ต่างๆกัน

สูตร	ความหมาย
LDPE	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์
LDPE/TPS	พอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณกลีเซอรอล 18 % และปริมาณสารช่วยผสม 3% โดยน้ำหนักของ LDPE
FLAME 1	ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนATH ต่อ Sb_2O_3 คือ 3:1
FLAME 2	ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนATH ต่อ Sb_2O_3 คือ 3:3
FLAME 3	ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนATH ต่อ Sb_2O_3 คือ 3:5
FLAME 4	ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนATH ต่อ Sb_2O_3 คือ 5:1
FLAME 5	ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนATH ต่อ Sb_2O_3 คือ 5:3
FLAME 6	ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีอัตราส่วนATH ต่อ Sb_2O_3 คือ 5:5

4.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ โดยการนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาผสมกับแป้งมันสำปะหลังพลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) และสารช่วยผสม (FusabondMB226D) ในอัตราส่วน 100:30:18:3 โดยจะทำการเปรียบเทียบอัตราการเผาไหม้ของฟิล์มที่มีอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์แตกต่างกัน ด้วยการทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test) ซึ่งอัตราส่วนในการผสมแสดงดังตารางที่ 3.11 การทดสอบการเผาไหม้จะทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อให้เห็นความแตกต่างของการเผาไหม้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 อัตราการเผาไหม้ของฟิล์ม จากการทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test)

จากการทดสอบการเผาไหม้ของฟิล์ม ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test) ได้กำหนดไว้ว่า ถ้าชิ้นงานฟิล์มทดสอบไม่เกิดการลุกติดไฟในขณะที่ทำการทดสอบ ให้รายงานการทดสอบการเผาไหม้ว่า ฟิล์มทดสอบนั้นไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning) ซึ่งผลจากการทดสอบการเผาไหม้ พบว่า สูตร FLAME4-FLAME6 ไม่เกิดการเผาไหม้ (non-burning) ในขณะที่ทำการทดสอบ จึงไม่สามารถรายงานอัตราการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตรดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอัตราการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ เฉพาะสูตรที่สามารถเกิดการลุกติดไฟและเกิดการเผาไหม้ได้ คือสูตร FLAME1-FLAME3 ซึ่งมีปริมาณของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วน 3:1, 3:3 และ 3:5 ตามลำดับ

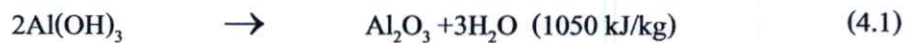
จากรูปที่ 4.20 แสดงอัตราการเผาไหม้ของฟิล์ม จากการทดสอบสมบัติการเผาไหม้ ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test) พบว่า ฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ เนื่องจากมีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังแทรกอยู่ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน ที่สามารถดูดความชื้นในอากาศไว้ได้ เมื่อได้รับความร้อนจากการทดสอบสมบัติการเผาไหม้ จึงสามารถสลายตัวเป็นไอน้ำช่วยชะลอการเผาไหม้ของฟิล์มให้ช้าลงได้ ส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีค่าลดลง [10,12]

ฟิล์มย่อยสลายจะมีสมบัติในการหน่วงการติดไฟที่ดีขึ้น เมื่อทำการผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ ซึ่งพิจารณาได้จากอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง (รูปที่ 4.20) เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่ผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ สูตร FLAME1-FLAME 6 ซึ่งมีปริมาณของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วน 3:1, 3:3, 3:5, 5:1, 5:3 และ 5:5 ตามลำดับ โดยพบว่า ฟิล์มย่อยสลายจะมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลง เมื่อผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และฟิล์มย่อยสลายจะไม่เกิดการเผาไหม้เมื่อผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่จะเกิดการหย่นเนื่องจากการเสียดสภาพทางความร้อนขณะทำการทดสอบการเผาไหม้ (รูปที่ 4.20) เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ มีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากฟิล์ม เพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอน้ำในขณะที่ทำการทดสอบการเผาไหม้ของฟิล์มได้ ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มเย็นตัวลง และไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์นั้น ยังช่วย

ป้องกันการสัมผัสกับออกซิเจนบริเวณผิวของฟิล์มได้ จึงช่วยลดอัตราการเผาไหม้และป้องกันการเกิดการเผาไหม้ของฟิล์มขณะทำการทดสอบได้ [41,42]

กลไกการหน่วงการติดไฟทางกายภาพของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ที่มีต่อฟิล์มย่อยสลายระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีดังต่อไปนี้

สารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ มีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากระบบ เพื่อใช้ในการสลายตัวเกิดเป็นไอน้ำได้ ที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ดังนั้นความร้อนภายในฟิล์มขณะที่ทำการทดสอบการเผาไหม้ของฟิล์มจึงลดลง ส่งผลให้ฟิล์มเย็นตัวลง และไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ จะปกคลุมไปทั่วบริเวณผิวของฟิล์ม เป็นการช่วยป้องกันการสัมผัสกับออกซิเจนบริเวณผิวของฟิล์ม จึงช่วยลดอัตราการเผาไหม้หรือลดการลุกลามของเปลวไฟของฟิล์มในกรณีที่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นในขณะทำการทดสอบ และป้องกันการลุกติดไฟของฟิล์มจากการทดสอบสมบัติการเผาไหม้ได้ โดยกลไกการดูดพลังงานเพื่อใช้ในการสลายตัวเป็นไอน้ำของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ แสดงดังสมการที่ 4.1 [12]

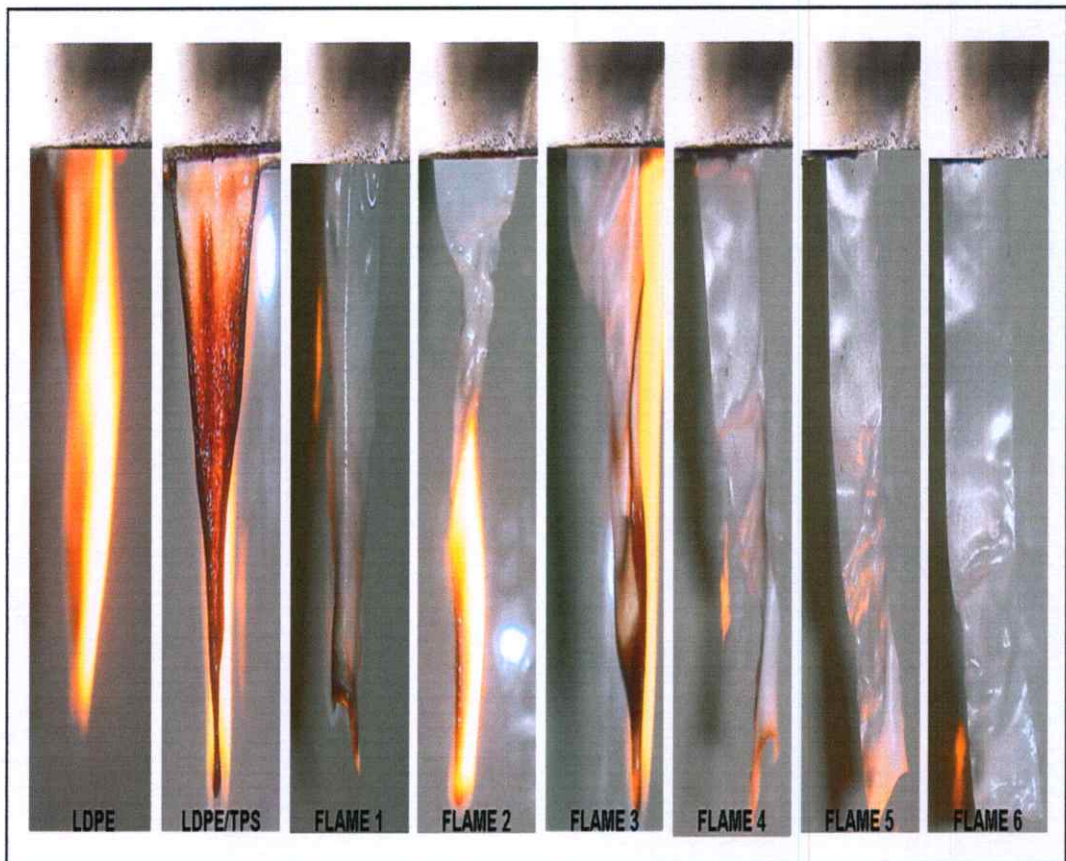


รวมทั้งสารแอนติโมนีออกไซด์ ยังมีส่วนช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการลดการลุกลามของเปลวไฟ เมื่อฟิล์มเกิดการเผาไหม้ในขณะทำการทดสอบได้อีกทางหนึ่ง สืบเนื่องมาจากอัตราการเผาไหม้ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้สูตร FLAME1- FLAME3 (รูปที่ 4.20) ซึ่งผสมสารแอนติโมนีออกไซด์ในปริมาณ 1%, 3% และ 5% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีน ตามลำดับ และสารแอนติโมนีออกไซด์ยังช่วยลดการเสียหายทางความร้อนของฟิล์ม ในกรณีที่ฟิล์มนั้นไม่เกิดการลุกติดไฟในขณะทำการทดสอบ สืบเนื่องจากการหดย่นในฟิล์มที่ลดลงของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้สูตร FLAME4-FLAME6 ซึ่งมีปริมาณของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วน 5:1, 5:3 และ 5:5 ตามลำดับ ลักษณะการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้สูตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.21

การเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟของสารแอนติโมนีออกไซด์ที่มีต่อฟิล์มย่อยสลายระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช มีดังต่อไปนี้

แอนติโมนีออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารช่วยเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟได้เมื่อใช้ร่วมกับสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ เนื่องจากแอนติโมนีออกไซด์ไม่สามารถหน่วงการติดไฟให้กับพอลิเมอร์ได้โดยตรง แต่แอนติโมนีออกไซด์ และอนุมูลอิสระของแอนติโมนี

สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการช่วยกำจัดอนุมูลอิสระที่ก่อให้เกิดการลุกลามของเปลวไฟในขณะที่ทำการทดสอบสมบัติการเผาไหม้ได้ จึงเป็นการเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการติดไฟให้ฟิล์มได้ดียิ่งขึ้น กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอนติโมนีออกไซด์แสดงดังสมการที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 [11,12]



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายแสดงลักษณะการเผาไหม้ของฟิล์ม จากการทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test)

4.4 ผลจากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์มีมาตรฐานของการทดสอบที่ได้รับความนิยมเป็นที่ยอมรับในระดับชาติโดยทั่วไปมีหลายมาตรฐาน เช่น DIN V 54900 EN 13432 รวมถึง ASTM D 6400 [55] แต่เนื่องจากในการทดสอบมาตรฐานข้างต้นต้องเสียเวลาในการเตรียมตัวอย่างก่อนชั่งนานและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบแนวเปรียบเทียบเพื่อศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่สภาวะเดียวกันในระดับเบื้องต้น โดยมีการบันทึกอุณหภูมิ ปริมาณน้ำในดิน และค่าความเป็นกรด่างของดิน

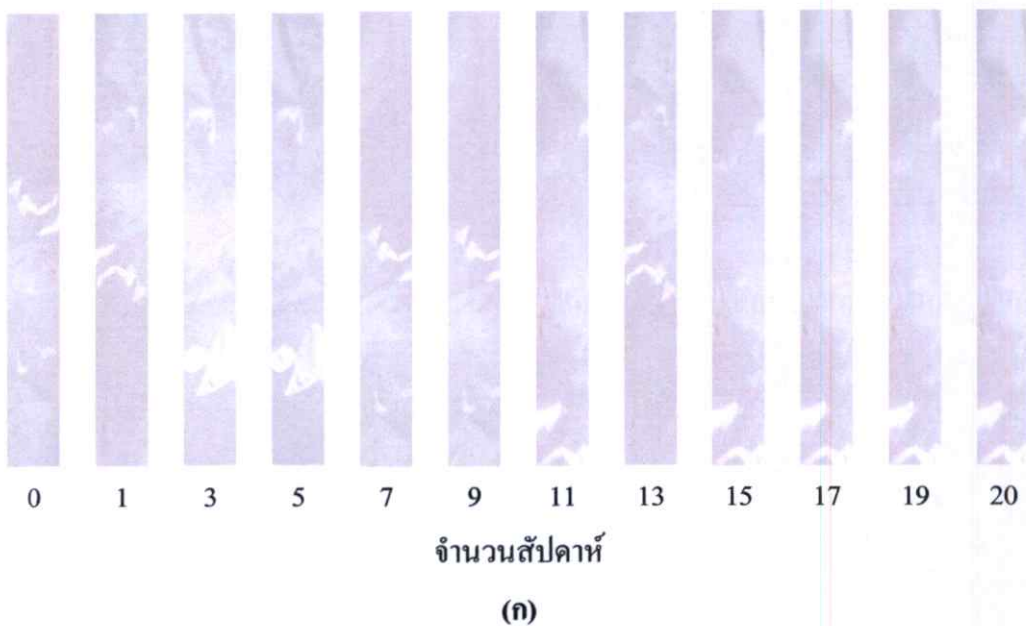
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์ม โดยการนำฟิล์มไปฝังดินเป็นเวลา 5 เดือน ในการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จะทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ และฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช เพื่อให้เห็นความแตกต่างของความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.22 (ก-ข)

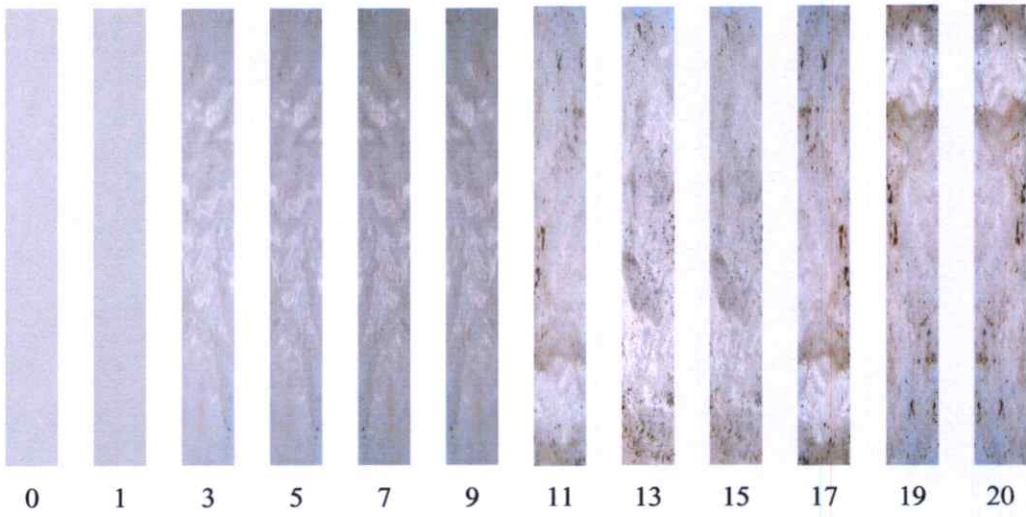
ผลจากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการฝังดินของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (รูปที่ 4.22-ข) เกิดการย่อยสลายของวัสดุได้เร็วขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์ (รูปที่ 4.22-ก) เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ทำให้ฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงสี และเกิดเป็นรอยดำที่ผิวของฟิล์ม ซึ่งแสดงถึงการเกิดกระบวนการย่อยสลายได้เร็วขึ้น มีผลมาจากในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน ซึ่งแสดงสมบัติความมีขั้ว(Hydrophilic) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ทำให้สามารถดูดซับน้ำหรือความชื้นได้มาก ทั้งนี้กระบวนการย่อยสลายของพอลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) [56] ของจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งต้องอาศัยความชื้น ดังนั้นการที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบในฟิล์มย่อมส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบการย่อยสลายของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ (รูปที่ 4.22 ก-ข) กับฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช พบว่าฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ เกิดกระบวนการย่อยสลายได้เร็วขึ้น เนื่องจากสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ มีสมบัติความมีขั้ว

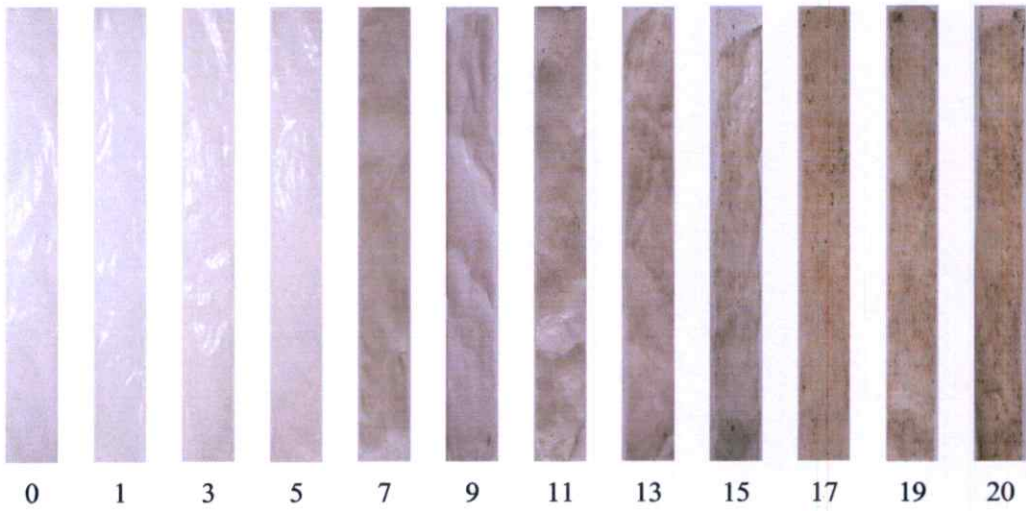
(Hydrophilicity) โดยในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิล ที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ จึงสามารถดูดซับน้ำและความชื้นในดินไว้ในฟิล์มได้ดียิ่งขึ้น ประกอบกับมีแป้งมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบ จึงเป็นการส่งเสริมให้เกิดกระบวนการย่อยสลายที่ดียิ่งขึ้น โดยกระบวนการย่อยสลายมีแนวโน้มที่เร็วขึ้น เมื่อทำการผสมสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรเอทเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้นของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ ให้ผลที่สอดคล้องกับกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของพอลิเมอร์ ที่ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 น้ำจะเกิดการแพร่เข้าไปในวัสดุ ทำให้วัสดุเกิดการบวม และเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นในวัสดุ และขั้นตอนที่ 2 จะเกิดกระบวนการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ในวัสดุ [56]

ในการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม เนื่องมาจากการเกิดกระบวนการย่อยสลายในดินได้ชัดเจน ในช่วงประมาณ 4-5 เดือน โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสี และเกิดเป็นรอยดำของการสร้างเส้นใยหรือสปอร์ของจุลินทรีย์ที่ผิวของฟิล์มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากสารหน่วงการคิดไฟและแป้งมันสำปะหลังที่กระจายอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้นเป็นผลมาจากสารหน่วงการคิดไฟและแป้งมันสำปะหลังจะดูดซับน้ำและความชื้นเอาไว้ ส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนฟิล์มได้ง่ายขึ้น

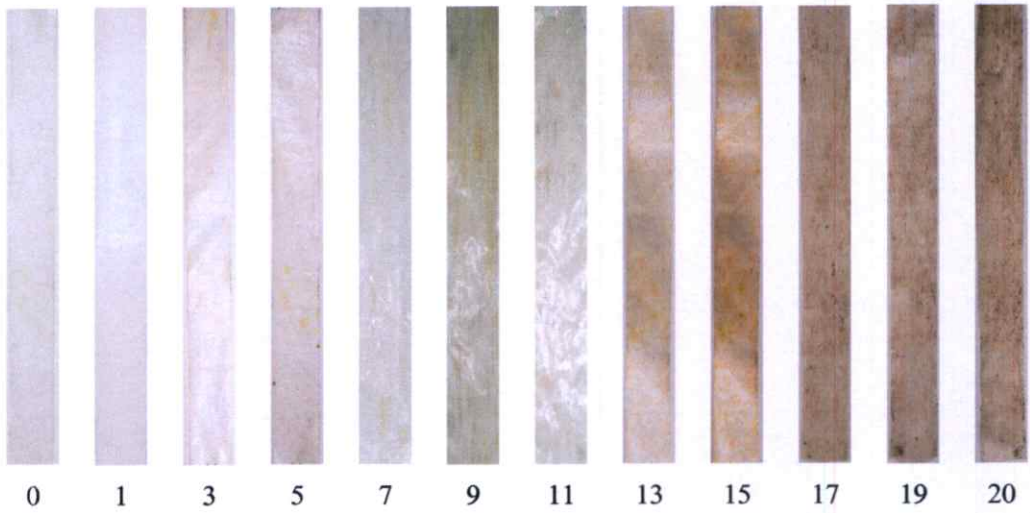




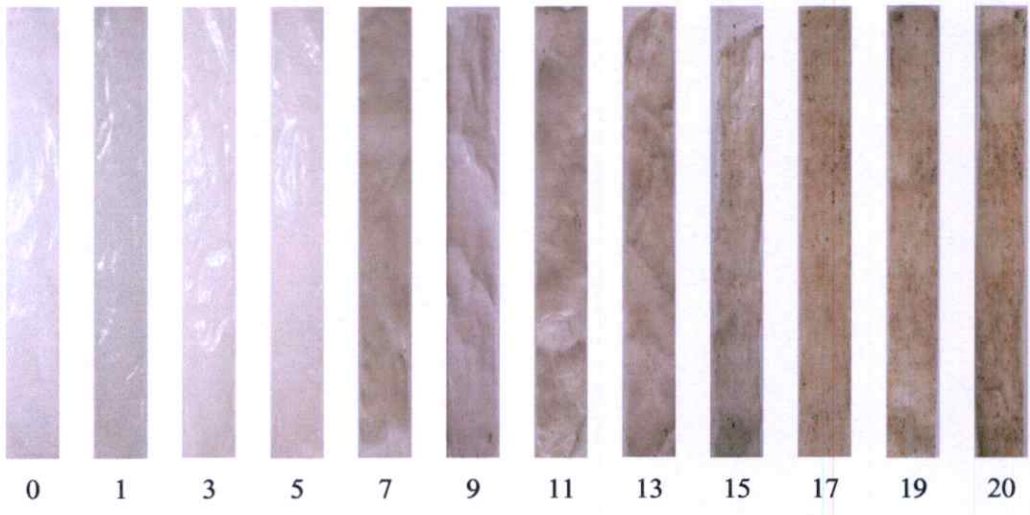
จำนวนสัปดาห์
(ข)



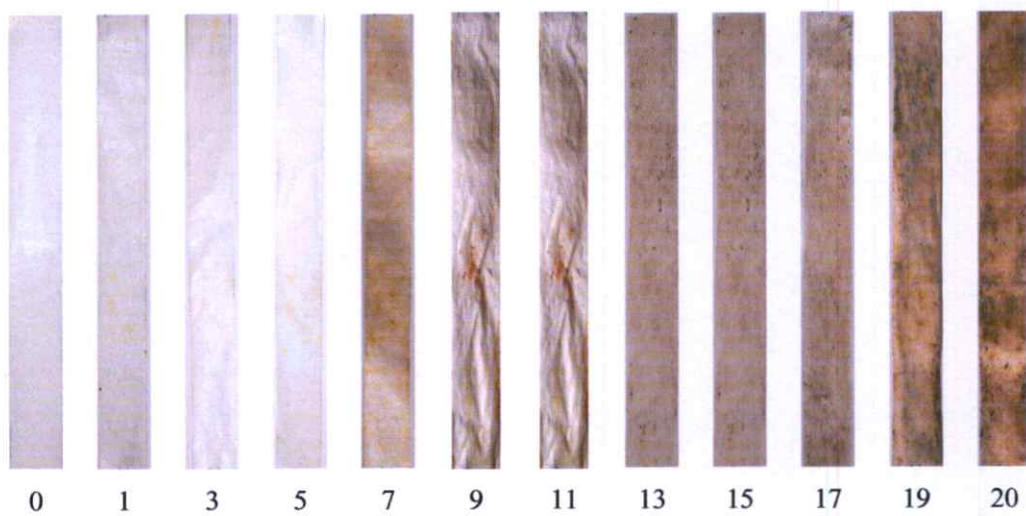
จำนวนสัปดาห์
(ค)



จำนวนสัปดาห์
(ง)

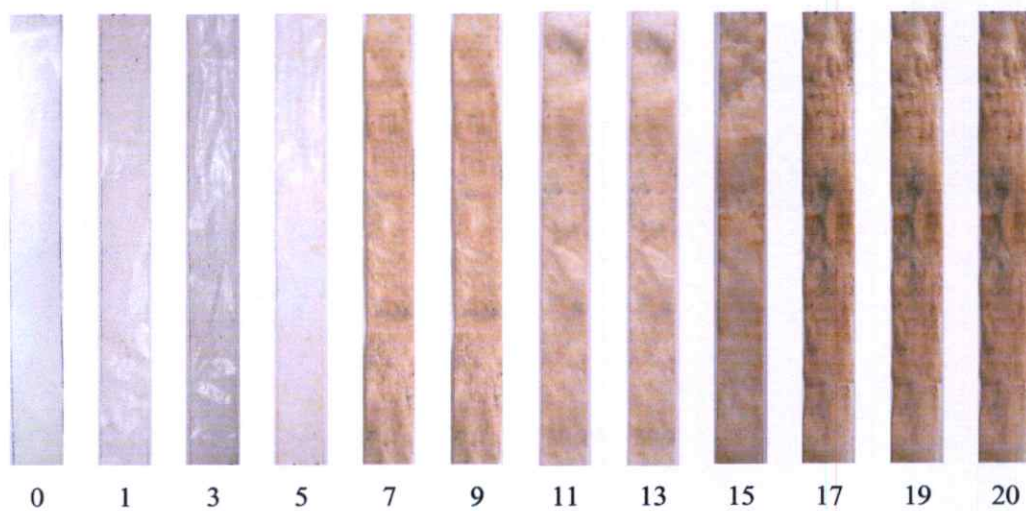


จำนวนสัปดาห์
(จ)



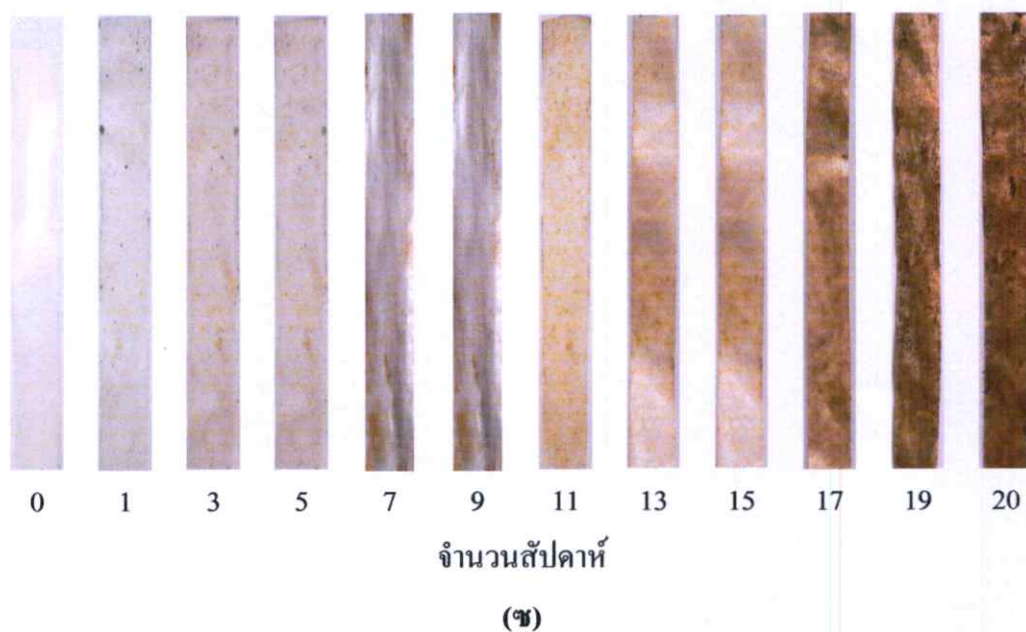
จำนวนสัปดาห์

(ก)



จำนวนสัปดาห์

(ข)



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 20 สัปดาห์
ควบคุมปริมาณน้ำในดิน 30%, pH 7 โดยที่ (ก) LDPE, (ข) LDPE/TPS,
(ค) FLAME 1, (ง) FLAME 2, (จ) FLAME 3, (ฉ) FLAME 4,
(ช) FLAME 5 และ (ซ) FLAME 6

4.5 ผลจากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของปริมาณสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ ได้ โดยการนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาผสมกับแป้งมันสำปะหลัง พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) และสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ในอัตราส่วน100:30:18:3 โดยจะทำการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ที่มีอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์แตกต่างกัน เช่น สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด, มอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด) สมบัติทางกายภาพ (ลักษณะทางกายภาพ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าร้อยละการเป็นผลึก และอุณหภูมิการเริ่มสลาย (T_d)) และ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

4.5.1 ผลการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง

ผลจากการศึกษาลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่ผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ สูตร FLAME 1- สูตร FLAME 6 ซึ่งมีอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ 3:1, 3:3, 3:5, 5:1, 5:3 และ 5:5 ตามลำดับ โดยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่ผสมสารหน่วงการติดไฟในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ สูตร FLAME1- สูตร FLAME6 สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางได้ ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มแสดงดังตารางที่ 4.10

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ที่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ กับฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสม พบว่า ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ มีความขุ่นมากขึ้น และมีสีขาว โดยสีและความขุ่นของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการวัดความหนาของฟิล์ม พบว่า ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้มีความหนาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากมีอนุภาคของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และอนุภาคของแอนติโมนีออกไซด์แทรกตัวและกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนา (μm)
LDPE/TPS	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	68 ± 1.22
FLAME 1	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	73 ± 2.07
FLAME 2	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	75 ± 1.63
FLAME 3	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	74 ± 1.80
FLAME 4	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	75 ± 2.88
FLAME 5	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	75 ± 0.81
FLAME 6	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	76 ± 1.16

4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่ผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ สูตร FLAME 1-สูตร FLAME 6 ซึ่งมีอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ 3:1, 3:3, 3:5, 5:1, 5:3 และ 5:5 ตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC เพื่อหาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ค่าอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c on set) และค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) แสดงดังตารางที่ 4.11 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก-8 ถึง ก-15) และจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ แสดงดังตารางที่ 4.12 และภาคผนวก ก (รูปที่ ก-20 ถึง ก-26) ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่า ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และค่าอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c on set) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ มีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ ไม่ได้มีผลต่อความสมบูรณ์และขนาดผลึกของพอลิเมอร์ ดังนั้นการผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับ สารแอนติโมนีออกไซด์ ในปริมาณ 4 -10 % โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c on set) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [41] แต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละความเป็นผลึก(%Crystallinity) ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และ แอนติโมนีออกไซด์ มีส่วนเข้าไปขัดขวาง

การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เรียงชิดกันอย่างเป็นระเบียบได้น้อยลง ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ จึงลดลง [43]

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก T_m (°C)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก T_c on set (°C)	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)
LDPE/TPS	106.2	80.9	30.3
FLAME 1	106.4	80.6	24.9
FLAME 2	107.2	80.3	24.6
FLAME 3	106.1	80.5	24.6
FLAME 4	107.0	81.0	24.0
FLAME 5	106.7	81.2	23.8
FLAME 6	107.4	80.8	23.7

ผลจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่า อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้มีค่าสูงกว่า ฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสม โดยอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ มีความสามารถในการดึงความร้อนออกจากระบบ เพื่อใช้ในการระเหยกลายเป็นไอน้ำเมื่อได้รับความร้อนในขณะทำการวิเคราะห์ ดังนั้นความร้อนในระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงลดลง ส่งผลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ช้าลง ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีค่าสูงขึ้น [41]

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาโรซ์ แสดงดังภาคผนวก ก (รูปที่ ก-20 ถึง ก-26) พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากการสลายตัวทางความร้อน 4 องค์ประกอบ เช่นเดียวกับการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาโรซ์ โดยอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวแสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งแตกต่างกันไปตามอัตราส่วนของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อแอนติโมนีออกไซด์ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ [42]

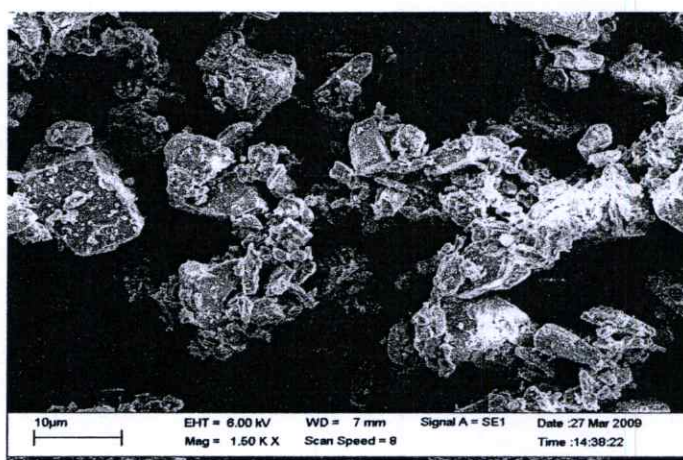
ตารางที่ 4.12 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากเทคนิค TGA

สูตร	อุณหภูมิเริ่ม สลายตัวของ น้ำ (°C)	อุณหภูมิเริ่ม สลายตัวของ กลีเซอรอล (°C)	อุณหภูมิการเริ่ม สลายตัวของ แป้ง (°C)	อุณหภูมิเริ่ม สลายตัวของ LDPE (°C)
LDPE/TPS	103.7	164.8	305.9	443.5
FLAME 1	108.5	163.3	303.7	441.5
FLAME 2	108.1	168.2	299.3	442.2
FLAME 3	105.9	165.1	306.6	443.7
FLAME 4	107.1	169.1	303.4	444.1
FLAME 5	108.7	173.0	306.8	446.9
FLAME 6	109.1	172.9	303.0	459.5

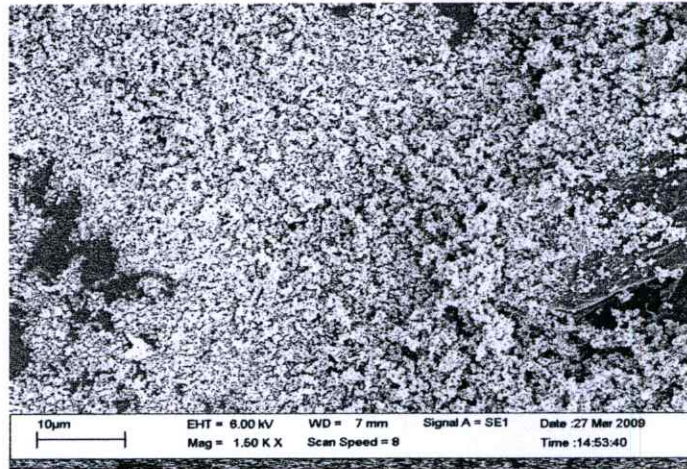
4.5.3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตรต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 4.23 – 4.24

(ก)

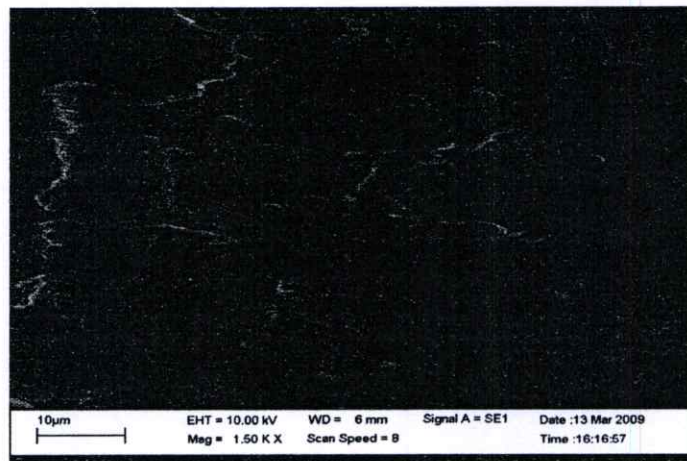


(ข)

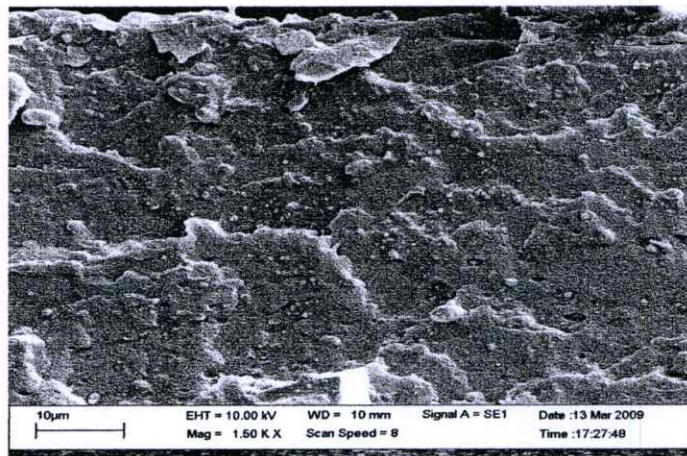


รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจาก SEM ของ (ก) สารอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ และ (ข) สารแอนติโมนีออกไซด์

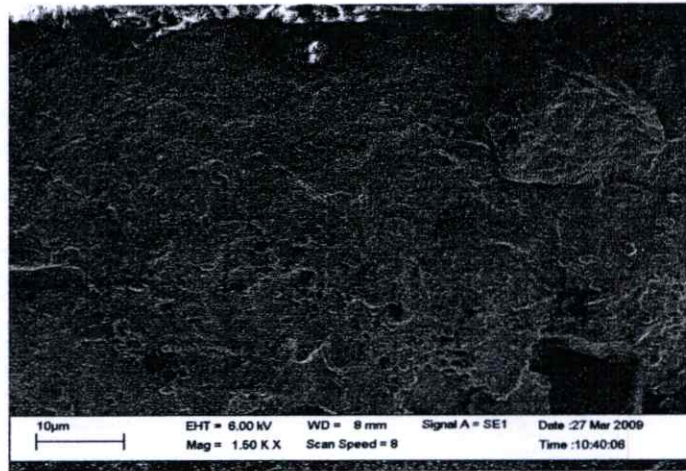
(ก)



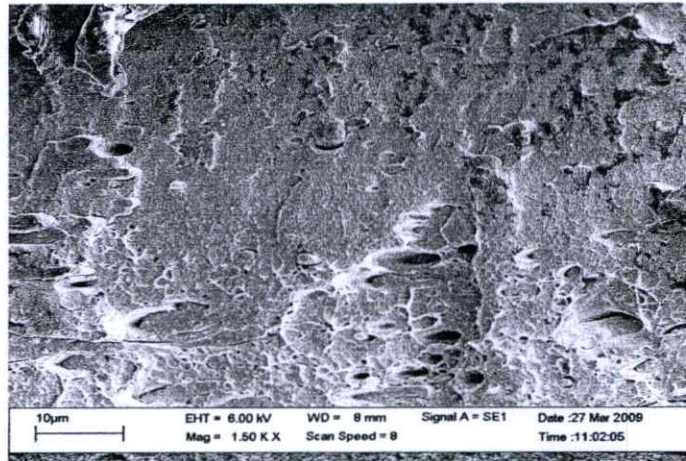
(ข)



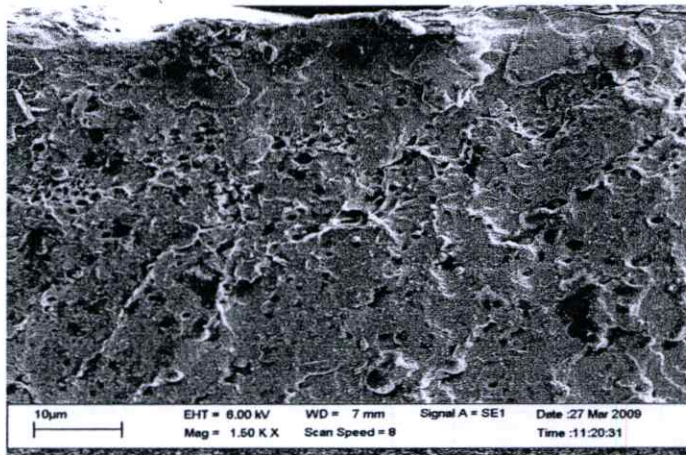
(f)



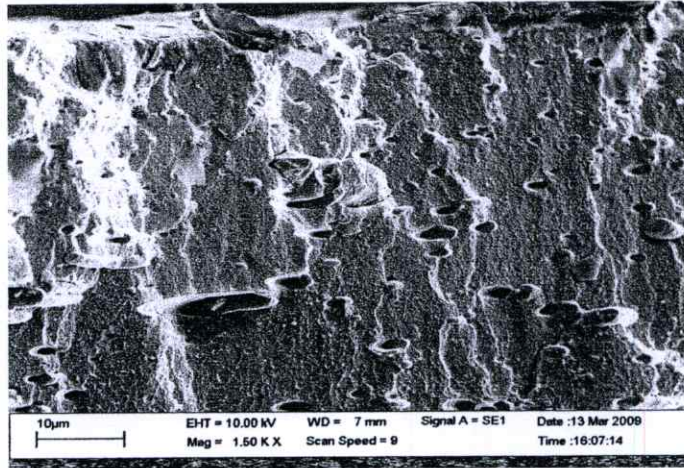
(g)



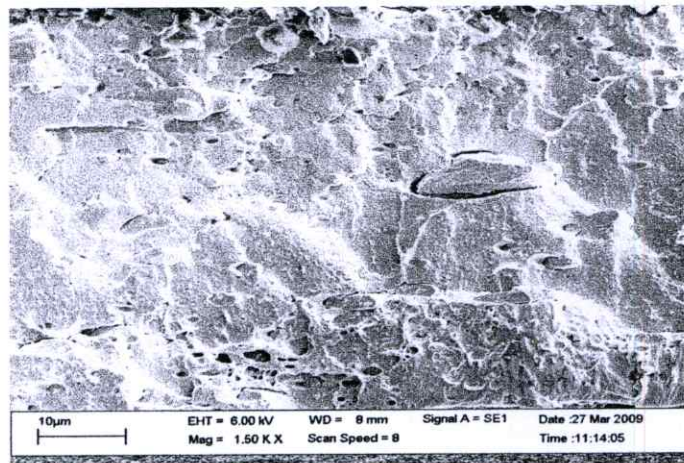
(h)



(ฉ)



(ซ)



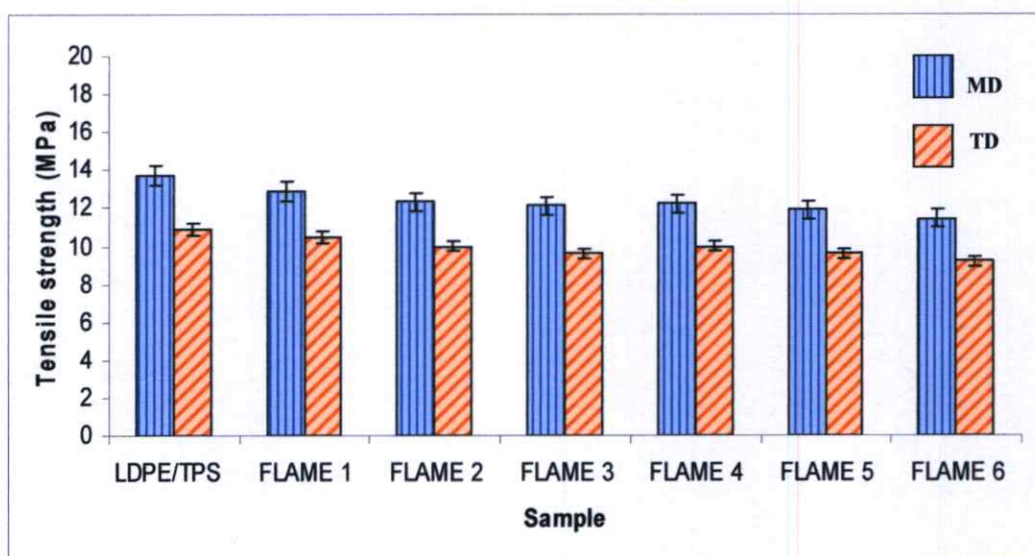
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงภาคตัดขวาง ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้
สูตรต่างๆ โดย (ก.)LDPE/TPS, (ข.) FLAME 1,(ค.) FLAME 2, (ง.) FLAME 3,
(จ.) FLAME 4, (ฉ.) FLAME และ (ซ.) FLAME 6

จากรูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ พบว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ มีขนาดอนุภาคประมาณ 10-17 ไมครอน และแอนติโมนีออกไซด์ มีขนาดอนุภาคประมาณ 5-6 ไมครอน (μm)

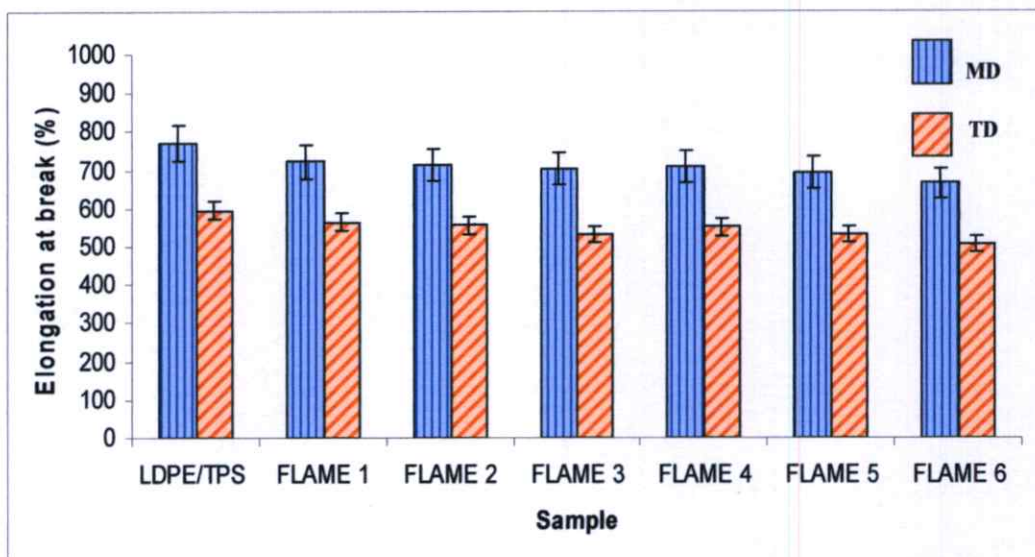
จากรูปที่ 4.24 (ก.-ข.) แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ ที่มีปริมาณสารหน่วงการติดไฟต่างๆกัน โดยพบว่า สารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์ มีการกระจายตัวค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ โดยมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของสารหน่วงการติดไฟดังกล่าวอยู่บ้างในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แต่จากสมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว

4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

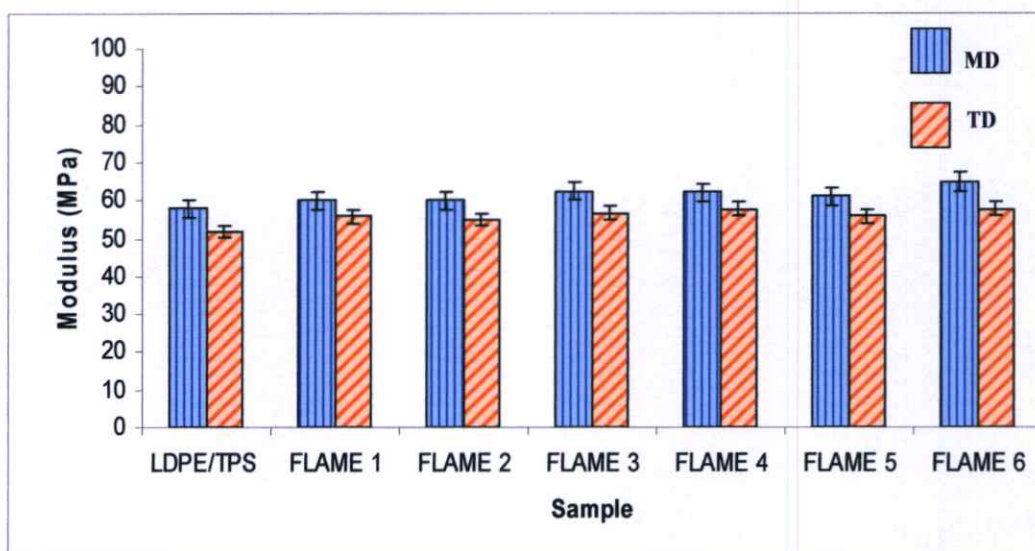
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่อง Universal testing machine เพื่อทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดุลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตรต่างๆ ซึ่งผลจากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25–4.28



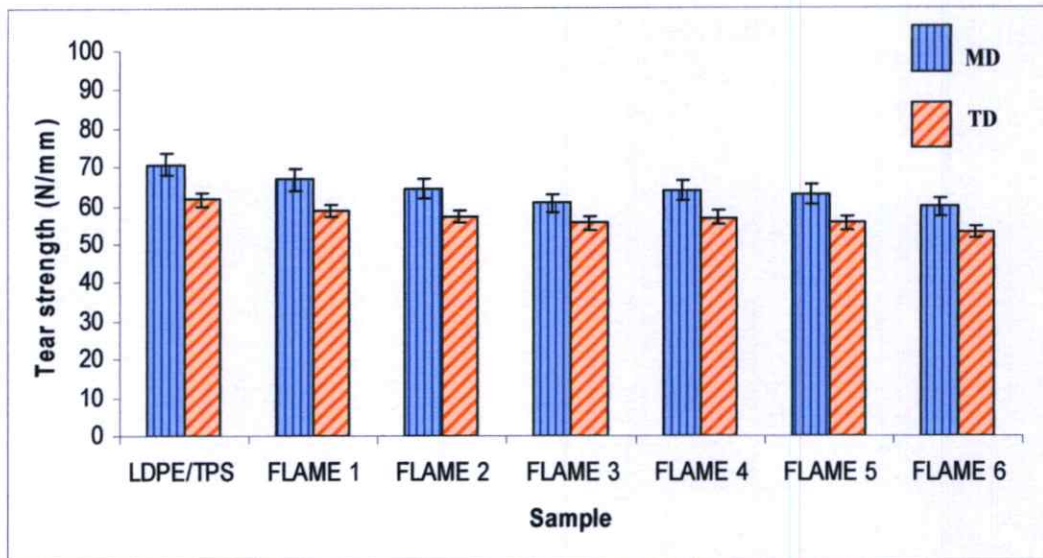
รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.26 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.27 ค่ามอดุลัส ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช



รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งแรงฉีก ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สไตรซ์

จากรูปที่ 4.25-4.28 เป็นผลจากการทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่ผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ สูตร FLAME1-สูตร FLAME6 ซึ่งมีอัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ต่อสารแอนติโมนีออกไซด์ 3:1, 3:3, 3:5, 5:1, 5:3 และ 5:5 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ค่ามอดูลัส และความแข็งแรงฉีกขาด ใกล้เคียงกับฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสม ทั้งในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD) โดยสมบัติเชิงกลดังกล่าวของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ มีแนวโน้มลดลง เมื่อทำการผสมสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์ มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กจึงสามารถกระจายตัวและแทรกตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ดี จึงไม่ได้ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการผสมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นนั้น เป็นผลให้อนุภาคของอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และอนุภาคของแอนติโมนีออกไซด์มีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (แอกไกลเมอเรต) มากกว่าที่จะเกิดกระจายตัวแบบอนุภาค ขนาดเล็ก (แอกกรีเกต) ไปในวัฏภาคของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทำ

ให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออัตราส่วนของสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับสารแอนติโมนีออกไซด์เพิ่มขึ้น [44]

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากงานวิจัยนี้กับฟิล์มที่จำหน่ายในประเทศไทย

สมบัติ	LDPE 900*	Bioplastic Film *	LDPE จากงานวิจัย	Degradable Flame Retardant Film จากงานวิจัย
ความต้านทานแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D882 (MPa)	MD:27* TD:23*	MD: 24* TD:19*	MD: 16 TD: 13	MD:13 TD:11
การดึงยึดที่จุดขาด ตามมาตรฐาน ASTM D882 (MPa)	MD:1143* TD:982*	MD:705* TD:668*	MD:937 TD:860	MD:722 TD:565
ความต้านทานแรงฉีกขาด ตามมาตรฐาน ASTM D1004 (N/m ²)	MD:98* TD:85*	MD:71* TD:68*	MD:92 TD:75	MD:67 TD:59
ค่ามอดุลัส ตามมาตรฐาน ASTM D882 (MPa)	MD:82* TD:70*	MD:77* TD:68*	MD:80 TD:73	MD:60 TD:56

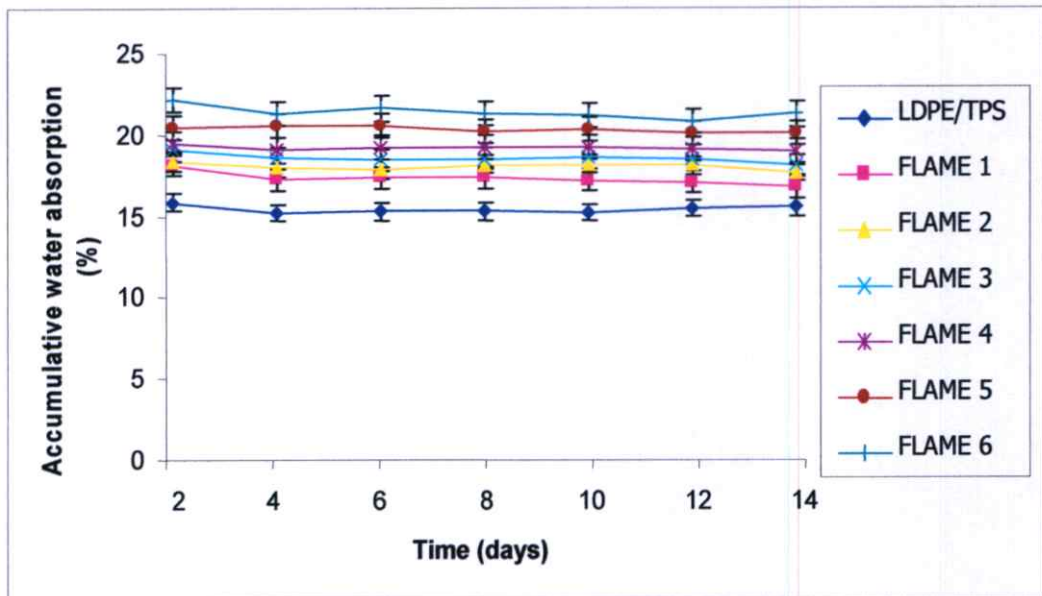
หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

(*) คือ ข้อมูลจากบริษัท จิตตราบรรจภัณฑ์ จำกัด

4.5.5 ผลการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยจะทำการคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำสะสมของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่มีปริมาณสารหน่วงการคิดไฟต่าง ๆ กัน ตามจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสม กับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้

ผลจากการศึกษาปริมาณการดูดซับน้ำของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ แสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่า ฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ มีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมโดยความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อผสมสารหน่วงการคิดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์ มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ โดยในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลและออกซิเจน ที่แสดงสมบัติความมีขั้ว(Hydrophilicity) และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ประกอบกับมีแป้งมันสำปะหลังเป็นส่วนประกอบในฟิล์ม จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้นี้เพิ่มขึ้นอีก [40,50]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช โดยทำการศึกษาดังกล่าวของพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) และปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ด้วยการศึกษสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช จากนั้นทำการศึกษาสมบัติการเผาไหม้ สมบัติการย่อยสลายในดิน และสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ที่มีปริมาณสารหน่วงการติดไฟอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และสารแอนติโมนีออกไซด์ต่างกัน เช่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาปริมาณพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช พบว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS 3 ซึ่งมีปริมาณของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ:แป้งมันสำปะหลัง:สารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ในอัตราส่วน 100:30:5 ตามลำดับ และมีปริมาณพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) 18% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีกว่า

2. การศึกษาปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) ที่เหมาะสมต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช พบว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมสูตร LDPE/TPS7 ซึ่งมีปริมาณของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ:แป้งมันสำปะหลัง:พลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) ในอัตราส่วน 100:30:18 ตามลำดับและมีปริมาณสารช่วยผสม (Fusabond MB226D) 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีกว่า

3. การศึกษาสมบัติการเผาไหม้ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ ที่มีปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆกัน พบว่า อัตราการเผาไหม้ของฟิล์มดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง จนไม่เกิดการลุกไหม้ในการทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test (Thin Material Vertical Burning Test) เมื่อปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ สามารถดึงความร้อนออกจากฟิล์มเพื่อระเหยกลายเป็นไอน้ำขณะทดสอบการเผาไหม้ของฟิล์มได้ ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มเย็นตัวลง และไอน้ำที่

เกิดขึ้นช่วยป้องกันการสัมผัสกับออกซิเจนบริเวณผิวของฟิล์ม รวมทั้งสารแอนติโมนีออกไซด์มีส่วนช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการหน่วงการคิดไฟของอะลูมิเนียมไตรไฮดรทให้ดีขึ้น โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอนุมูลอิสระที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็น การลดการลุกลามของเปลวไฟขณะทดสอบ

4. การศึกษาการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้ ที่มีปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮดรทและแอนติโมนีออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆกัน พบว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรทและแอนติโมนีออกไซด์ไม่ได้ขัดขวางกระบวนการย่อยสลาย แต่ยังคงส่งเสริมให้กระบวนการย่อยสลายในดินของฟิล์มเกิดได้เร็วขึ้น

5. การศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้แก่สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา ตามลำดับ พบว่า ปริมาณอะลูมิเนียมไตรไฮดรทและแอนติโมนีออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิในการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการคิดไฟได้มีค่าสูงขึ้น และมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันได้ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าต่ำลงเล็กน้อย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่มีการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของสารหน่วงการคิดไฟดังกล่าว

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปฟิล์มที่มีเสถียรภาพ โดยให้มีการลดปริมาณพลาสติกไซเซอร์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง
2. ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความบางเพิ่มขึ้น
3. ปรับปรุงสมบัติการทนไฟให้กับฟิล์ม เพื่อให้เกิดการป้องกันการเสียหายเนื่องจากความร้อนของฟิล์มที่สมบูรณ์ขึ้น
4. ปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดินของฟิล์มให้เร็วขึ้น เช่น การเพิ่มปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่เป็นองค์ประกอบของฟิล์มให้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

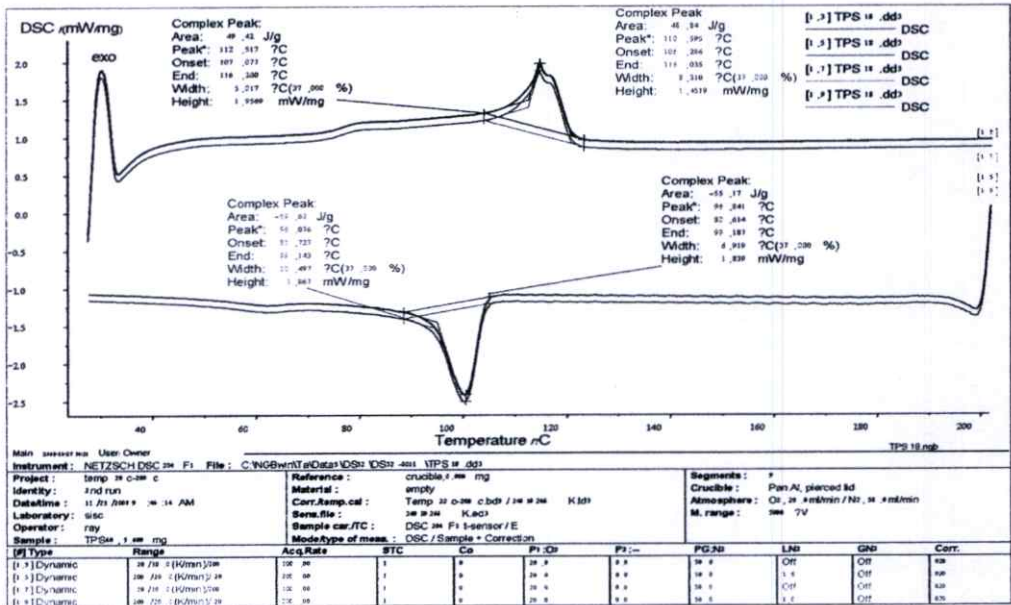
- [1] กรมควบคุมมลพิษ. ปริมาณขยะ. [Online]. Available : <http://www.pcd.go.th/>. 2006.
- [2] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] ธนาวดี ลีจากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไทยเอฟเฟคท์ สตูดิโอ. 2549.
- [4] อนันต์ เกษมพันธุ์, คุณิต อนันตรักษ์, ณัฐวดี บุญรักษ์วนิช, อรุณี เอี้ยวสีหยก และ อัญชลี ศิริพรวิดี. 2542. “พลาสติกย่อยสลายได้.” [Online]. Available : <http://www.ThaiBioplas.com/010%20Destroy%20plastic.pdf/>.
- [5] ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า. 2551. “โอกาสและศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ของไทย.” [Online]. Available : <http://www.ryt9.com.htm/>.
- [6] สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. 2550. วนสารครบรอบ 28 ปี สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. กรุงเทพฯ
- [7] มรกต ตันติเจริญ, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. “อนาคตผลิตภัณฑ์แป้งมันสำปะหลัง.” 24th ANNIVERSARY THE THAI TAPIOCA FLOUR INDUSTRIES TRADE ASSOCIATION. กรุงเทพฯ
- [8] ปราโมท. 2551. “พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).” [Online]. Available : <http://www.thaigoodview.com/node/17034.mht>.
- [9] เจริญ นาคะสุวรรณค์. 2546. เทคโนโลยีเบื้องต้นพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. โฟร์เพช.
- [10] Chemicallyland21.2546.Aluminiumtrihydrate. [Online]. Available: <http://chemicallyland21.com/industrialchem/inorganic/aloh3.htm>
- [11] Wikipedia. 2546. Antimony trioxide. [Online]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Antimony>
- [12] Lacutid F. and A. Etal.2008. Handbook of FlameRetardant Additives.England.: Mater Science.
- [13] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : บั๊คเน็ต.
- [14] ปรีชา พหลเทพ. 2540. โพลีเมอร์. กรุงเทพฯ.มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [15] บรรณเลข ศรีนิล. 2525. เทคโนโลยีพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนจำกัดภาพพิมพ์.

- [16] Thamapring. “พอลิเมอร์.” [Online]. Available : http://www.thamapring_com-Pingpong_web-Polymer-Po_clip_image001_0000_gif ของ Google.mht
- [17] [Online]. Available: <http://www.dupont.com/industrial-polymers/plastics/polymers/fusabond.html>.
- [18] เอกสารบริษัท Thai Pure Science จำกัด.
- [19] PolymerProcessing. 2008. “Twin screw extrusion.” [Online]. Available : <http://www.polymerprocessing.com/operations/tscrew/index.html>.
- [20] 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
- [21] Extrudertechnologies. “ET - TWIN SCREW EXTRUDER.” [Online]. Available : http://www_extrudertechnologies_com/diagram2_gif ของ Google.mht
- [22] เจริญ นาคะสรรค์. 2544. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพฯ :ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. โพรเพซ
- [23] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2548. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. กรุงเทพฯ : บั๊คเน็ต.
- [24] มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์. 2540. เคมีพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [26] ณรงค์ ไชยสุต. 2545. วิธีการวิเคราะห์โดยอุปกรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 8 . กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [27] Anderung L. 2545. “Thermogravimetric analysis (TGA).” [Online]. Available : <http://www.amft.tugraz.at/science/pyrolyse/pyrolyse.de.4.html>.
- [28] American Standard for Testing and Materials. 2006. **Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis.** ASTM E794. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia.
- [29] American Standard for Testing and Materials. 2008. **Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.** ASTM E1131. Annual Book of ASTM Standard 14.02., Philadelphia.
- [30] Wikipedia. “Differential scanning calorimetry.” [Online]. Available :

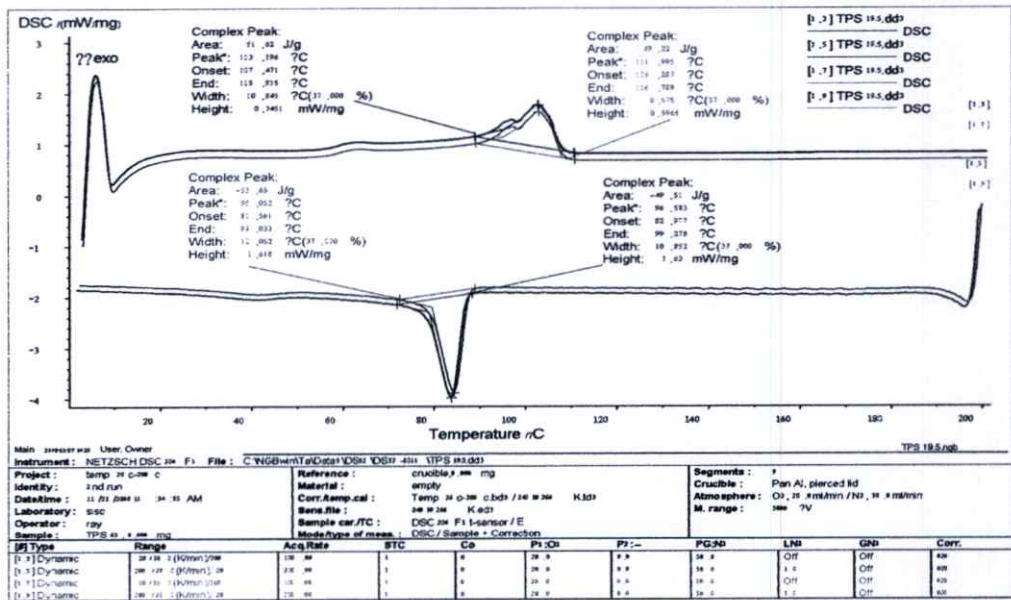
- [31] Flegler S.L., Heckmen J.W. and Klomprens K.L. 1993. **Scanning and Transmission Electron Microscopy and Introduction**. Michigan State University : Oxford University Press, Inc.
- [32] Underwriters Laboratories Inc. 1997. “**UL 94 Overview Test for Flammability of Plastics Material for Parts in Devices and Appliances.**” [Online]. Available : [http://www.boedeker.com/Boedeker Plastics UL94 Flammability.html](http://www.boedeker.com/Boedeker%20Plastics%20UL94%20Flammability.html).
- [33] Staff of Modern Plastic Magazine. 2537. **Plastics Handbook**. U.S.A.: McGraw-Hill, Inc.
- [34] 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
- [35] 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.
- [36] IDES. “**Tear strength ASTM D624.**” [Online]. Available : http://www_ides_com/property_descriptions/templates/images/ISO34-1_Trouser_Test_gif ของ Google.mht
http://upload_wikimedia_org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/Differential_scanning_calorimeter_jpg/288px/Differential_scanning_calorimeter_jpg
- [37] American Standard for Testing and Materials. 2539. **Standard Test Methode for Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting**. ASTM D 1004. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [38] กัทรพงษ์ สงวนศักดิ์. 2550. “**การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกลิ่นหอมจากวานิลลา.**” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] American Standard for Testing and Materials. 2005. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. ASTM D570. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [40] Tirthankar J. , Bidhan C. and Maiti Sukumar. 2000. Modification of the biodegradable film for fire retardancy. **Polymer Degradation and Stability**. Vol.69 : 79-82.

- [41] Chang Z.N., Guo F., Chen J.F. and Zuo L. 2007. Synergic flame retardancy mechanism of montmorillonite in the nano-sized hydroxyl aluminum oxalate/LDPE/EPDM system. **Polymer**. Vol 48 : 2892-2900
- [42] Lei H., Michael G. and Alan E. 2001. Formation of a flame retardant-cyclodextrin inclusion compound and its application as a flame retardant for poly(ethylene terephthalate). **Polymer Degradation and Stability**. 71 : 279-284.
- [43] Narihiro M., Hiroaki S., Keisuke T. and Tomoyuki I. 2003. Thermal degradation and flame retardancy of ethylene-vinyl alcohol copolymer blended with ammonium polyphosphate. **Polymer Degradation and Stability**. 79 : 13-20.
- [44] Cui W., Guo F. and Chen J. 2006. Preparation and properties of flame retardant high impact Polystyrene. **Fire safety journal**. Vol 42 : 232-239
- [45] Thunwall M., Kuthanova V., Boldizar A and Rigdahl M. 2008. Film blowing of thermoplastic starch. **Carbohydrate Polymers**. 71 : 583-590.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Rodriguez-Gonzalez F.J., Ramsay B.A. and Favis B.D. 2003. High performance LDPE/thermoplastic starch blends: a sustainable alternative to pure polyethylene. **Polymer**. 44 : 1517-1526.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Nakamura E.M., Cordi L., Duran N. and Mei H.I. 2005. Study and development of LDPE/starch partially biodegradable compounds. **Journal of Materials Processing Technology**. (Article in press).

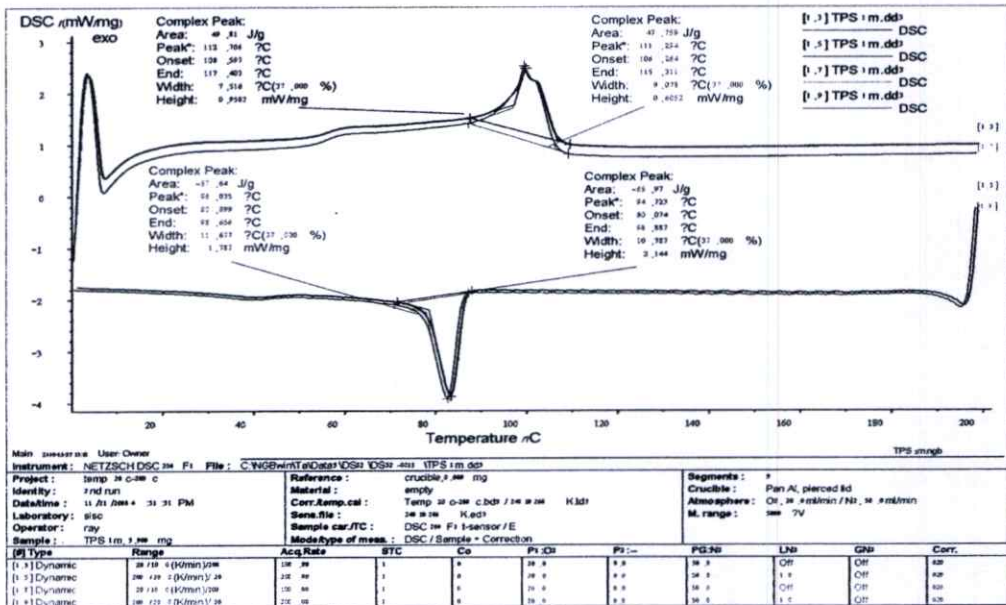
- [52] Kohn J., Tate R. and Jordy D.1997. ANTEC'97. : 1654-1658.
- [53] SCG. Plastic. **“Data sheet LDPE EL – LENE LD 1905F.”**
- [54] เอกสารบริษัท Innovation Creative Polymer จำกัด.
- [55] American Society for Microbiology. 1994. **Method for Assessment of Biodegradability of Plastic Films in Soil.** 60., Environmental Microbiology
- [56] G. Scott and D. Gilead. 1995. **Degradable polymer: principles and applications.**
- [57] Z. Guohua., L. Ya., F. Cuilan., Z. Min., Z. Caiqiong and C. Zongdao. 2006. Water resistance mechanical properties and biodegradability of methylated-cornstarch/poly(vinyl alcohol) blend film.” **Polymer Degradation and Stability.** Vol.91. : 703-711.
- [58] Robert M., Francis X. and David J.2005. **“Spectrometric Identification of Organic Compounds.”** College of Environmental Science & Forestry, New York. ED 7.
- [59] J.E. Potts. 1973. **Aspects of degradation and stabilization of polymers.** New York : Elsevier. 653.
- [60] เกศศิณี ตระกูลทิวากรม, วิภา สุโรจนะเมธากุล และ ประชา บุญญศิริกุล. 2539. **การทำฟิล์มบรีโกล์ได้จากแป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลัง.** ปรียญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [61] ปนัดดา พวงเกษม. 2540. **“การเตรียมฟิล์มบรีโกล์ได้จากแป้งมันสำปะหลังและแนวทางการใช้ประโยชน์.”** วิทยานิพนธ์ปรียญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [62] อธิธิพล แจ่มชัด. 2549. **พอลิเมอร์คอมโพสิต.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [63] Shas V. 1998. **Handbook of Plastic Testing Technology.** 2nd ed., U.S.A. : John Wiley and Sons, Inc.
- [64] Hatakeyama T. and Quinn F.X. 1994. **Thermal Analysis : Fundamentals and Applications to Polymer Science.** Ibaraki, Japan. : John Wiley and son., Ltd.
- [65] Matzions P., Tserki V., Kontoyiannis A. and Panayiotou C. “Processing and characterization of starch/polycaprolactone products.” **Polymer Degradation and Stability.** Vol.77, 2002. pp. 17-24
- [66] Robert M., Francis X. and David J.2005. **“Spectrometric Identification of Organic Compounds.”** College of Environmental Science & Forestry, New York. ED 7.
- [67] Edenbaum J.,1996 **“Plastic Additives and Modifiers Handbook.”** Chapman & Hall, London.



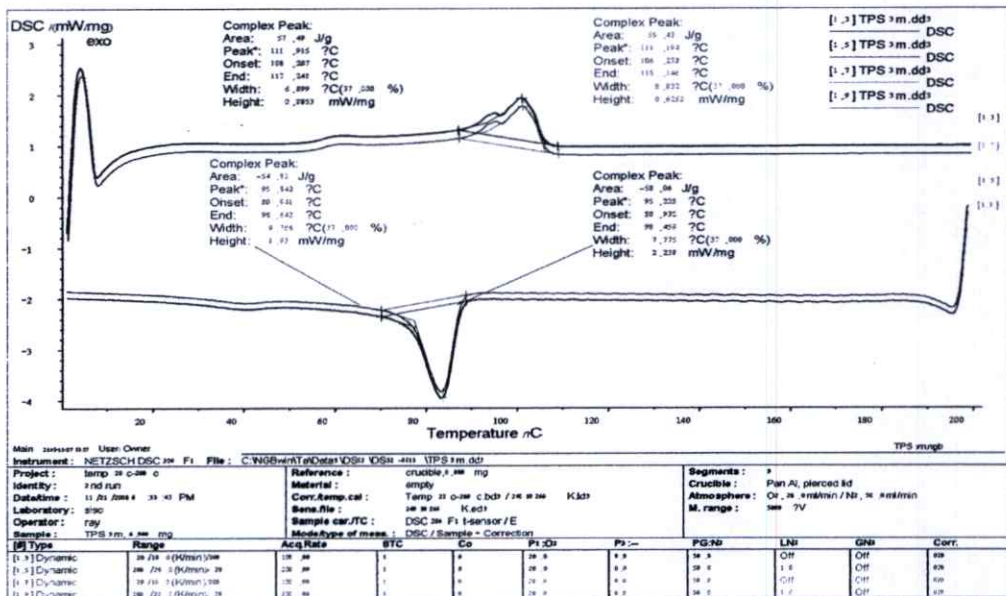
รูปที่ ก-3 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 3



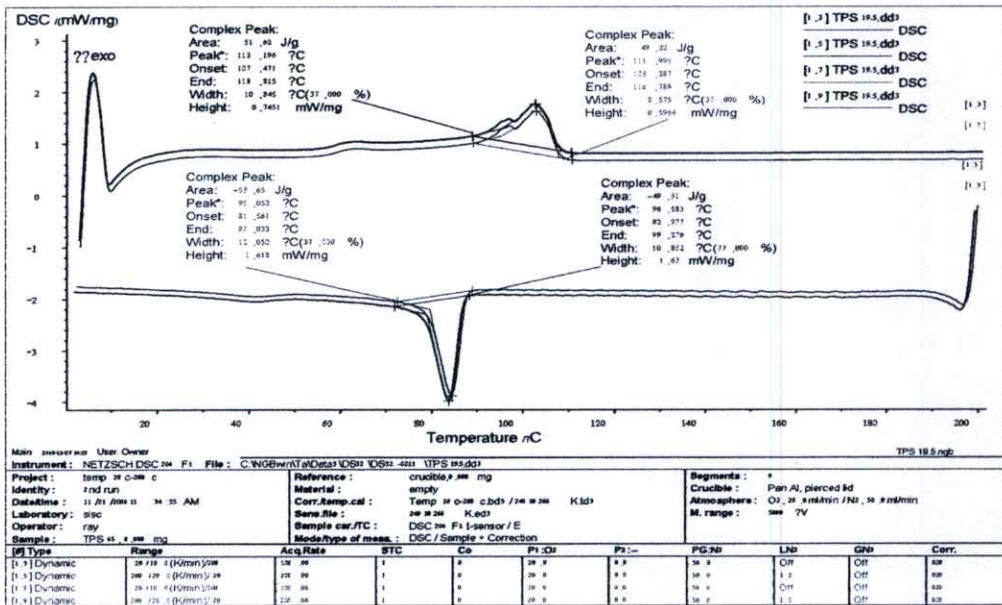
รูปที่ ก-4 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 4



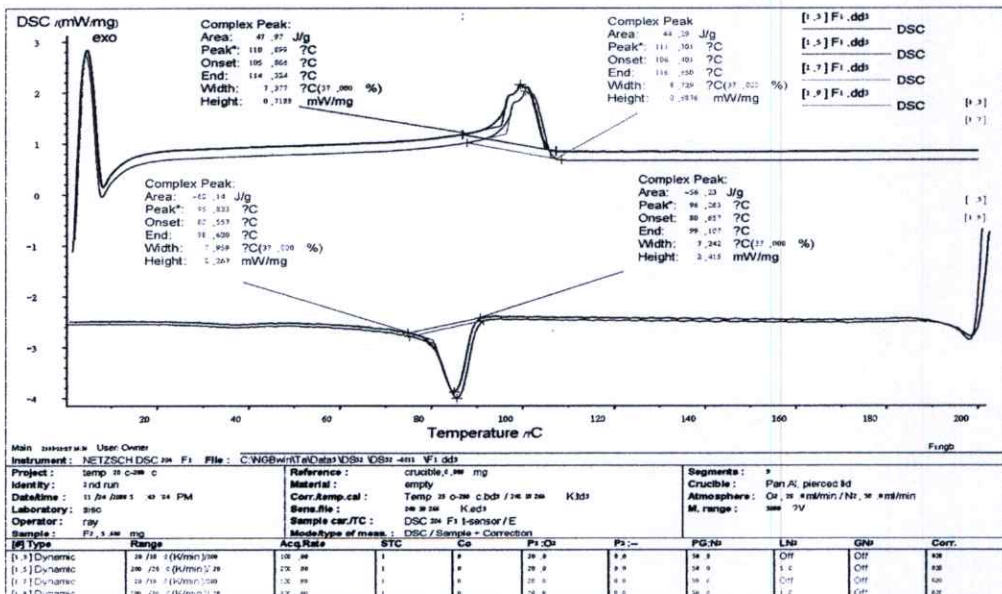
รูปที่ ก-5 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 6



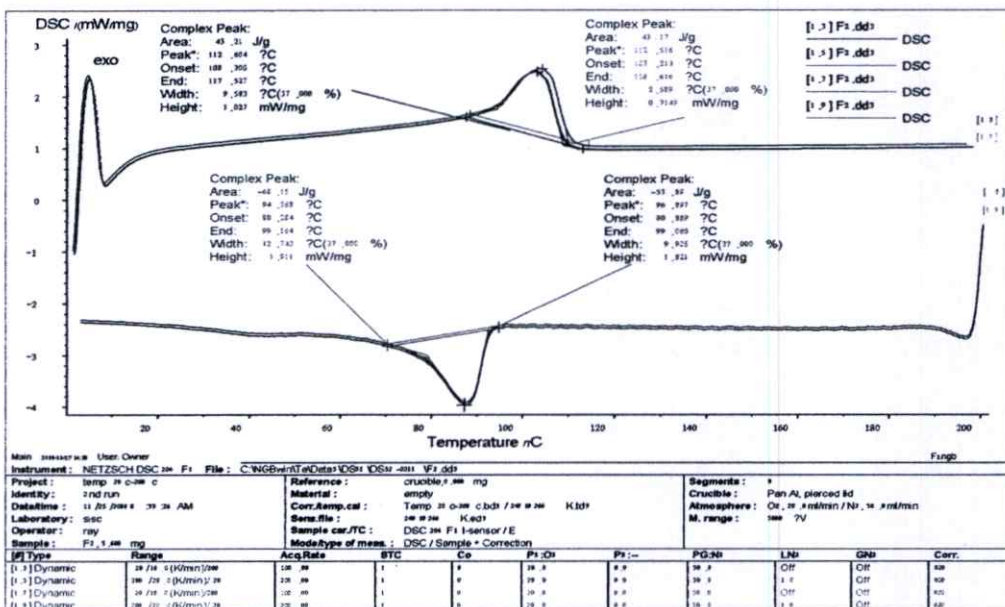
รูปที่ ก-6 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 7



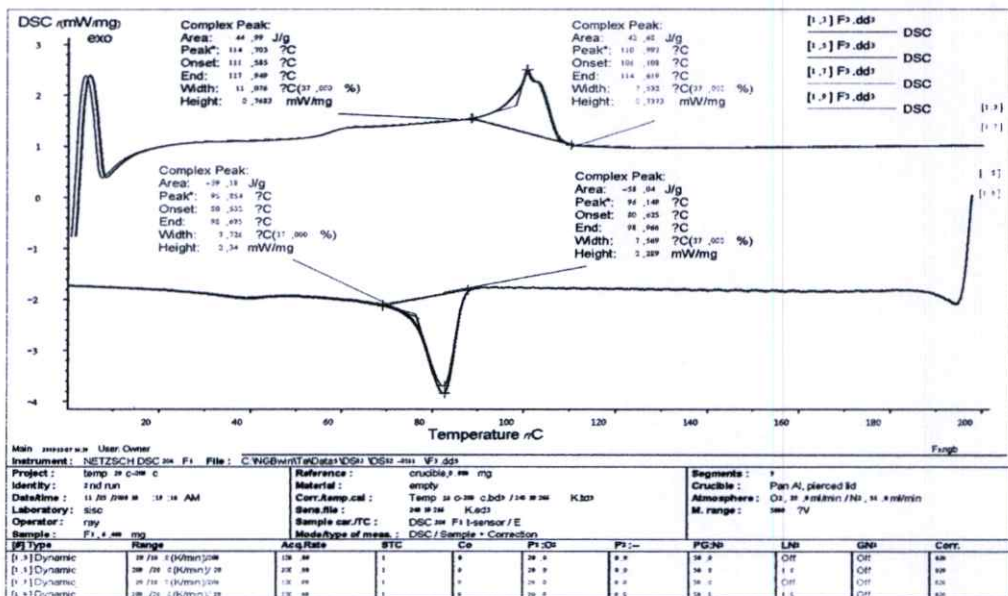
รูปที่ ก-7 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สไตร์ช สูตร LDPE/TPS 8



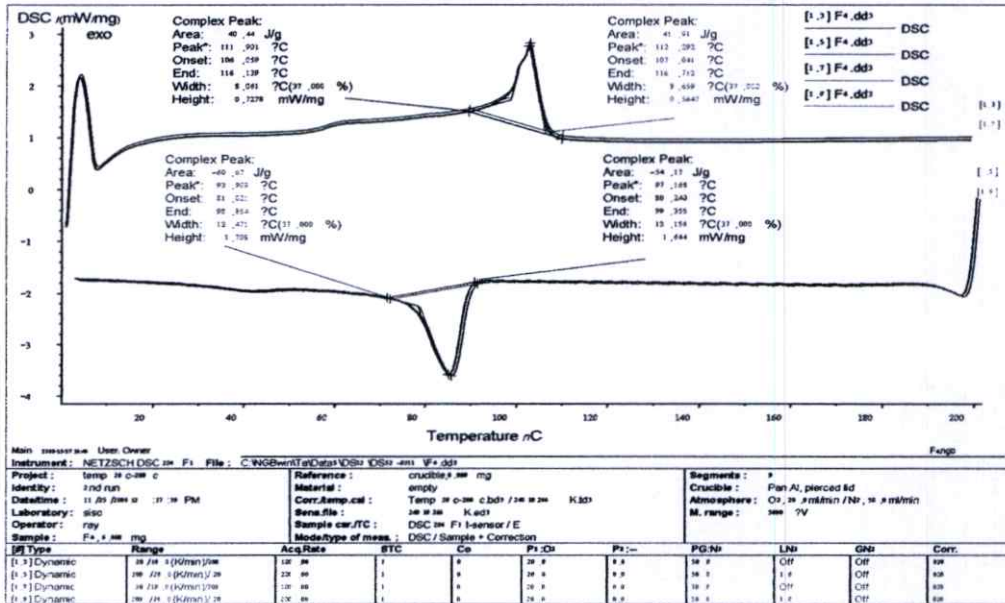
รูปที่ ก-8 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 1



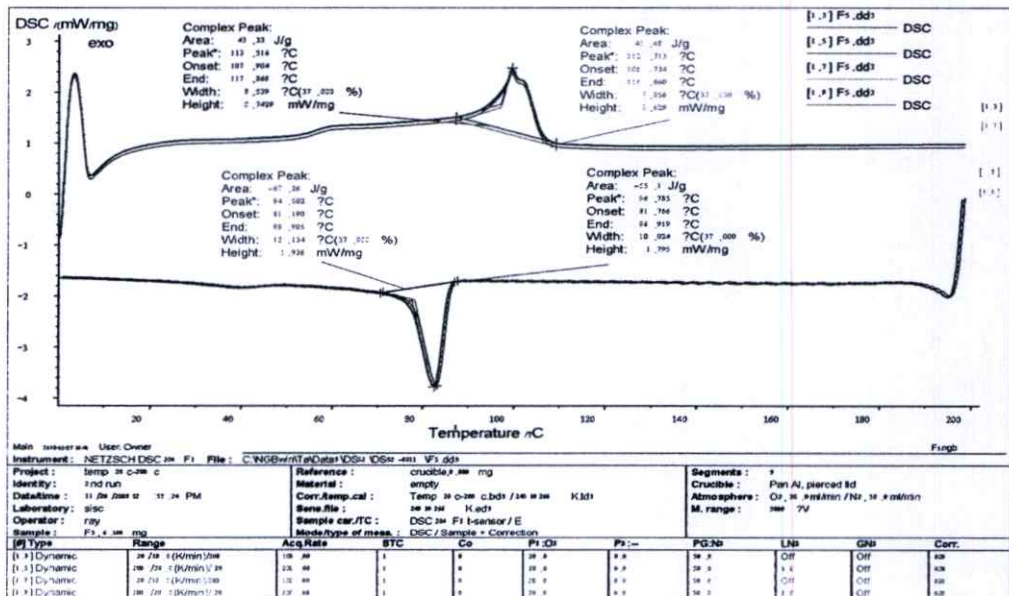
รูปที่ ก-9 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 2



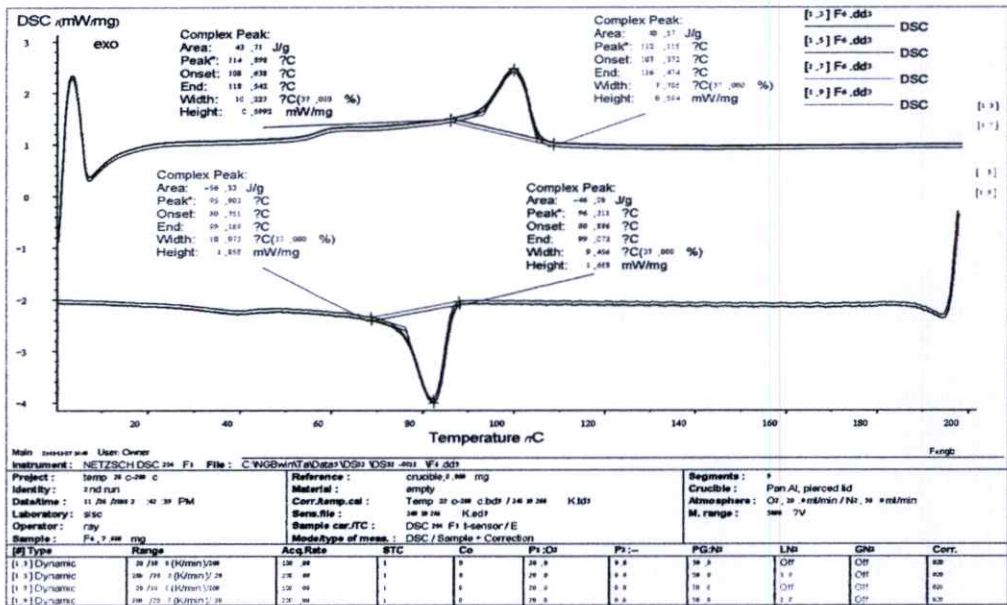
รูปที่ ก-10 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 3



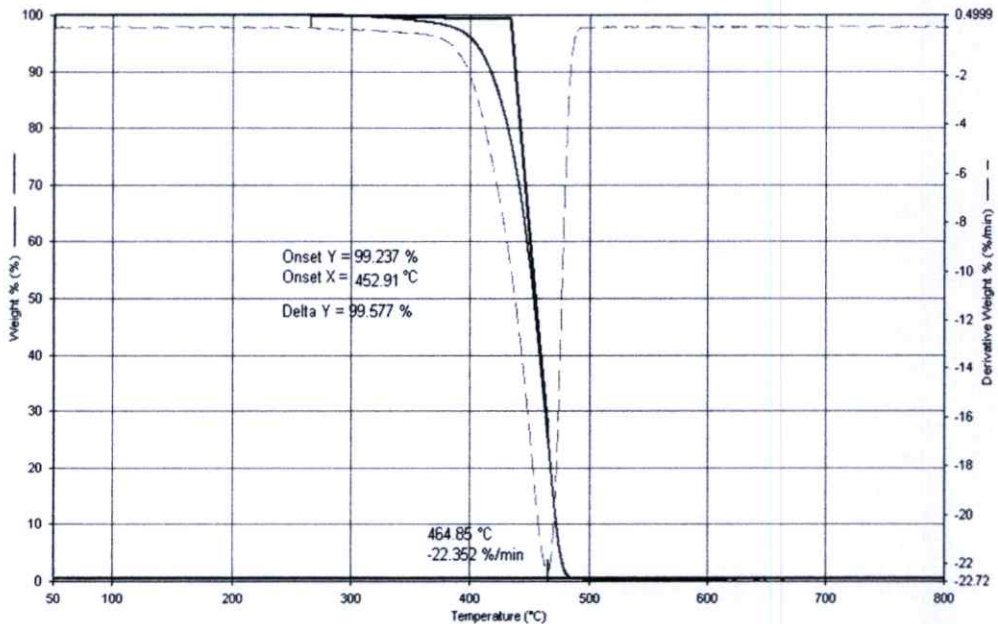
รูปที่ ก-11 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 4



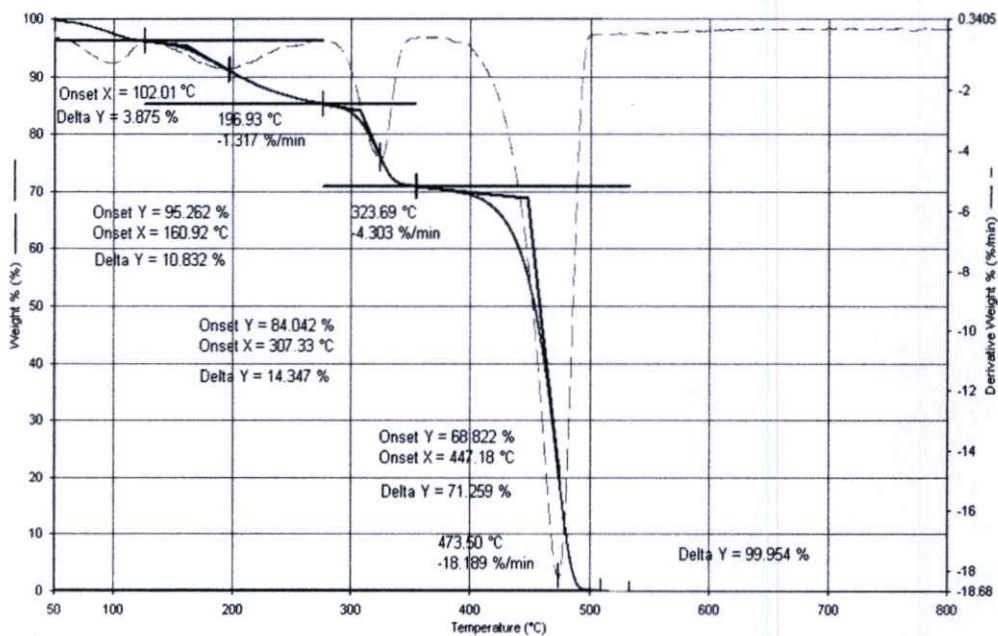
รูปที่ ก-12 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 5



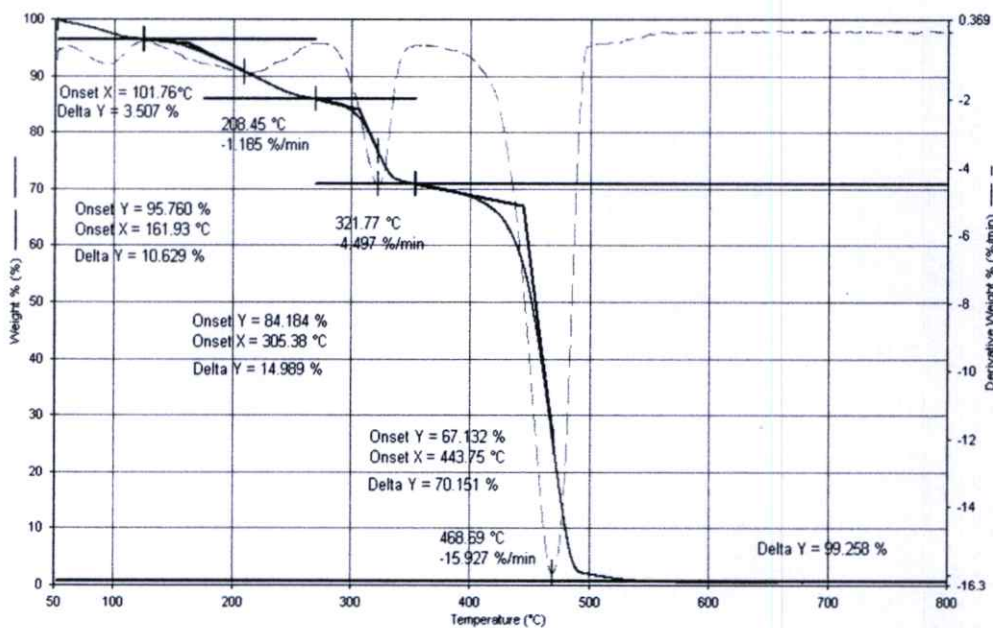
รูปที่ ก-13 DSC thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 6



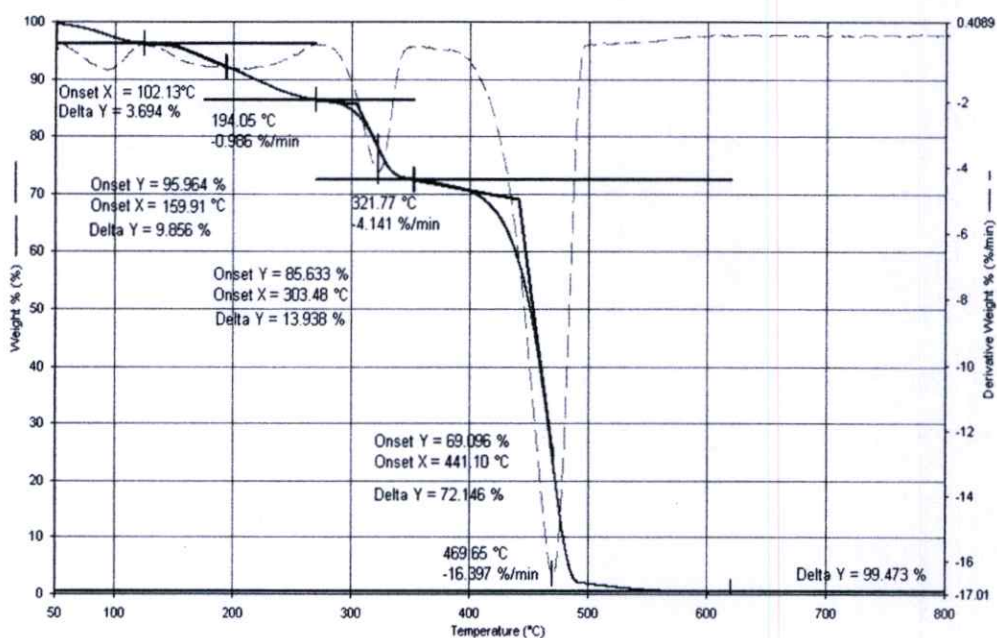
รูปที่ ก-14 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำบริสุทธิ์



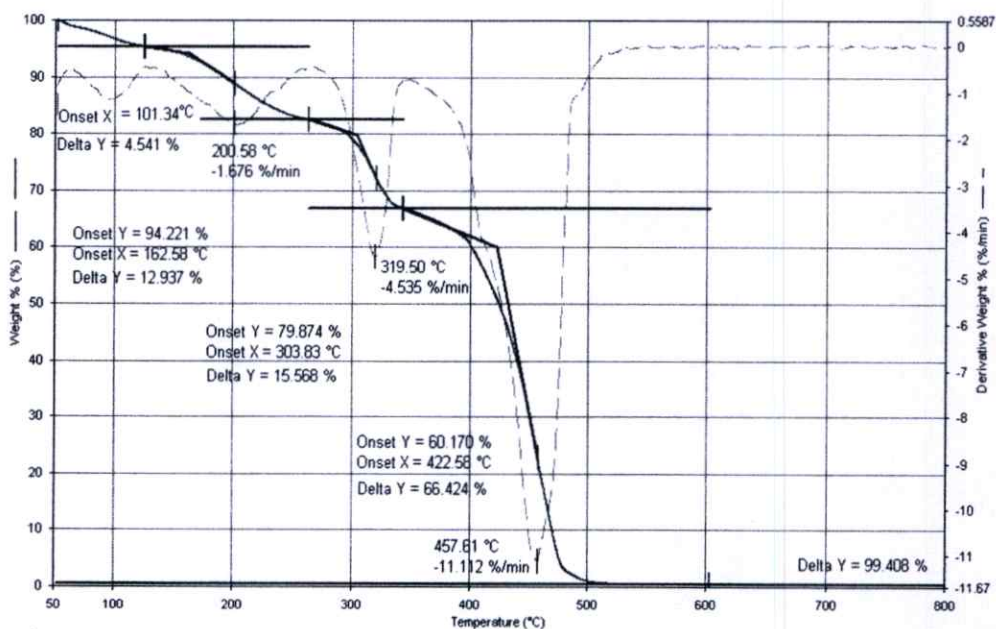
รูปที่ ก-15 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 2



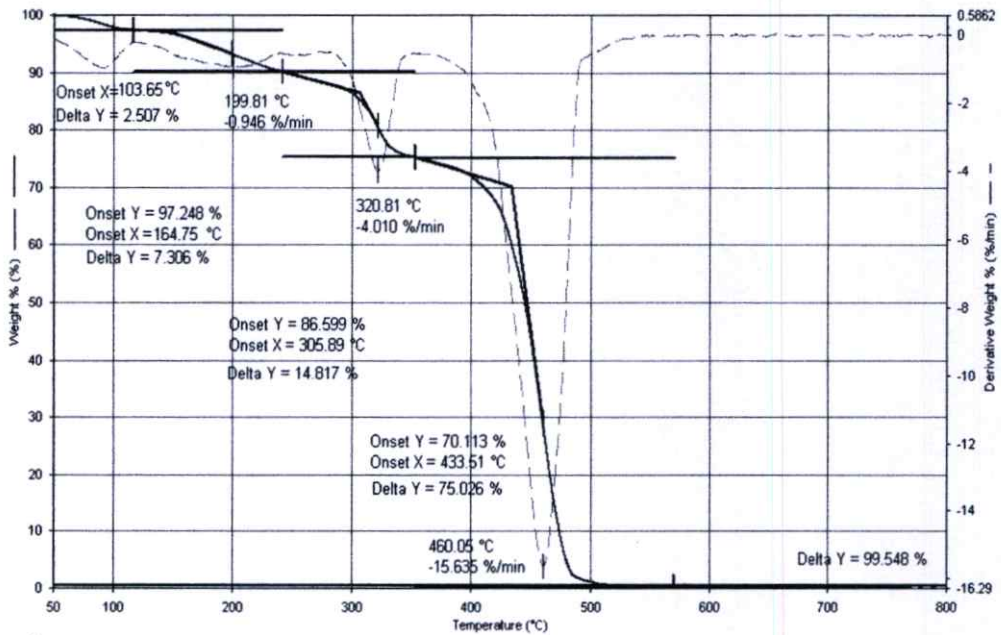
รูปที่ ก-16 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 3



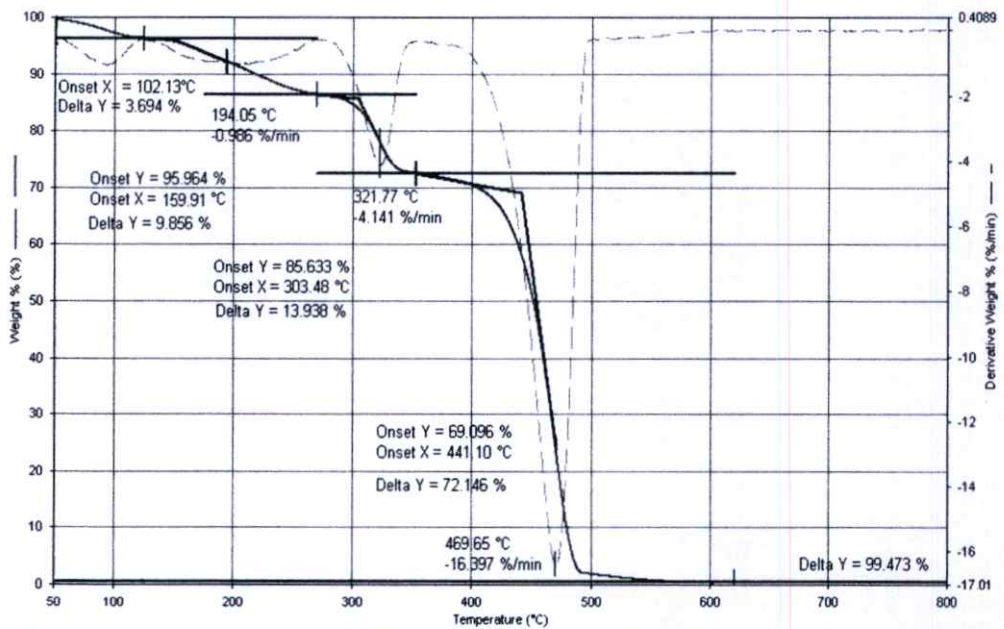
รูปที่ ก-17 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 4



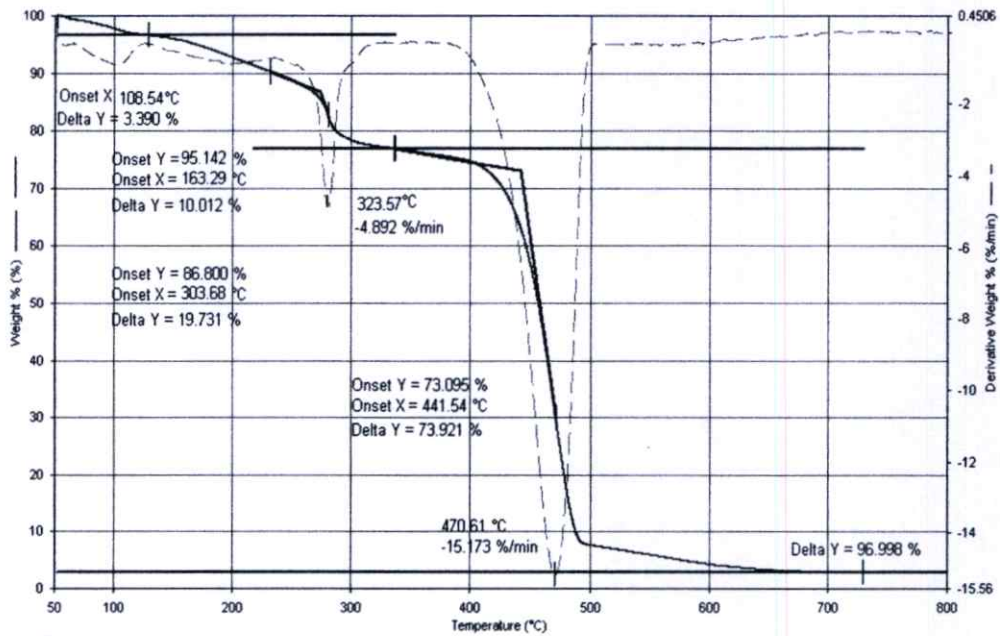
รูปที่ ก-18 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 6



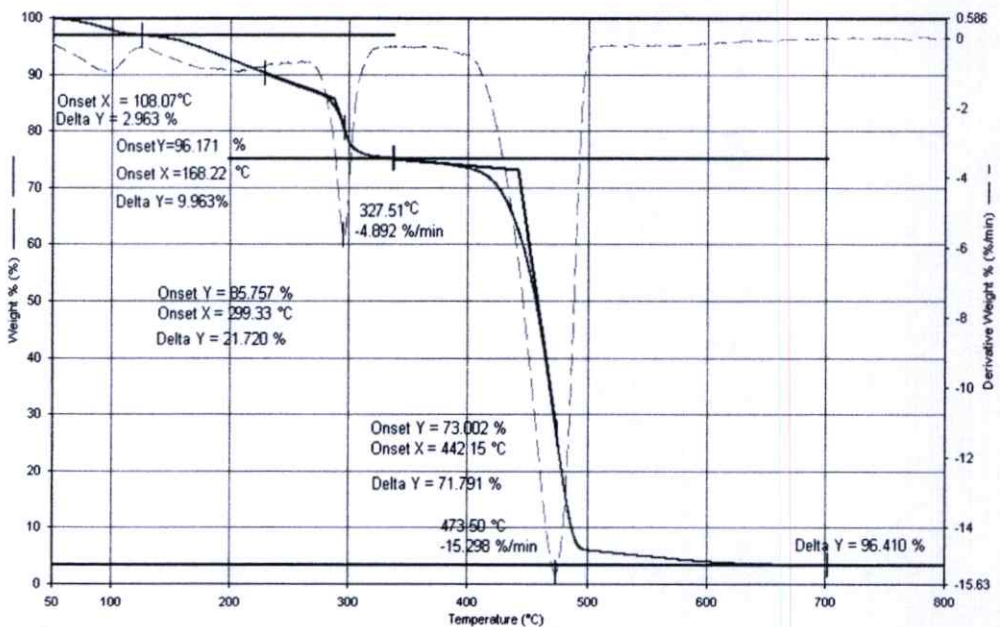
รูปที่ ก-19 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 7



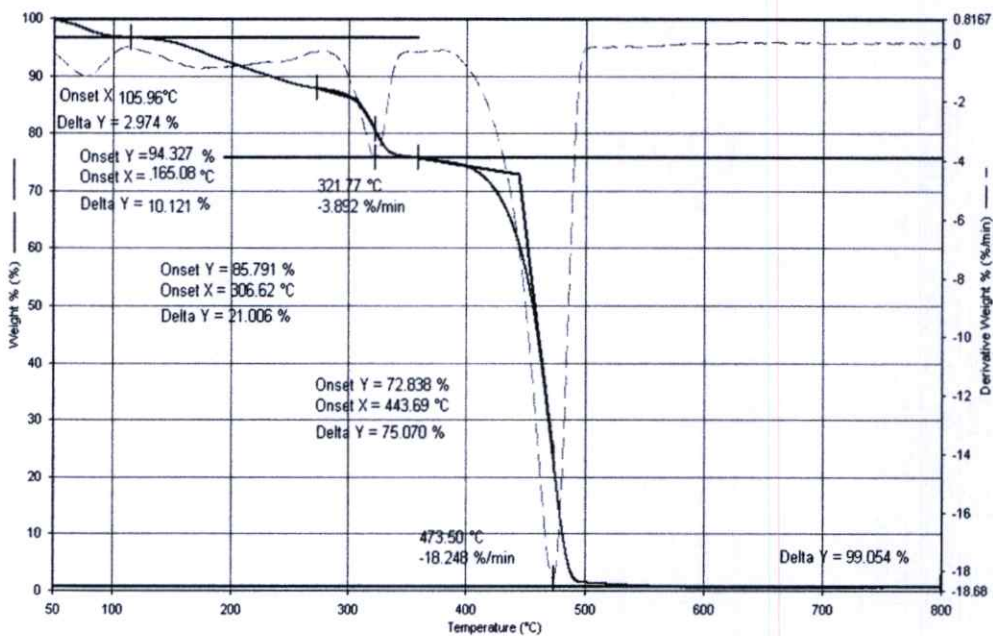
รูปที่ ก-20 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช สูตร LDPE/TPS 8



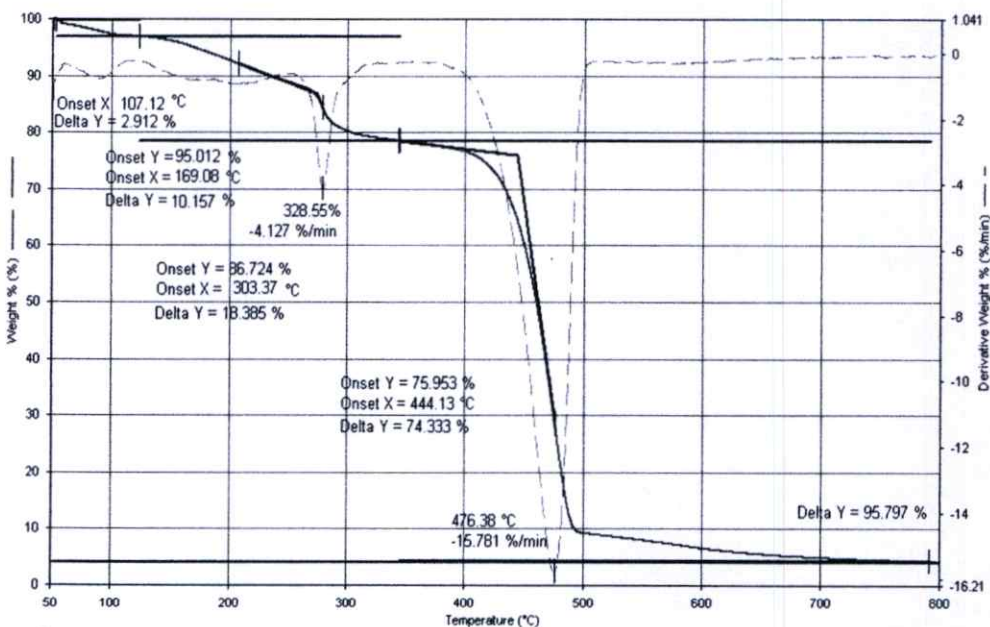
รูปที่ ก-21 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 1



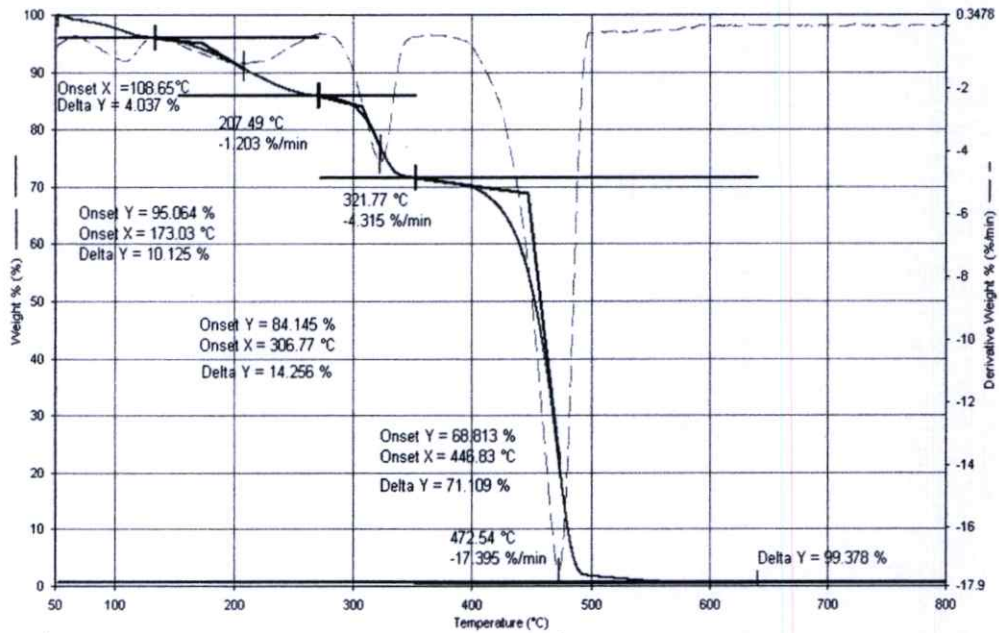
รูปที่ ก-22 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 2



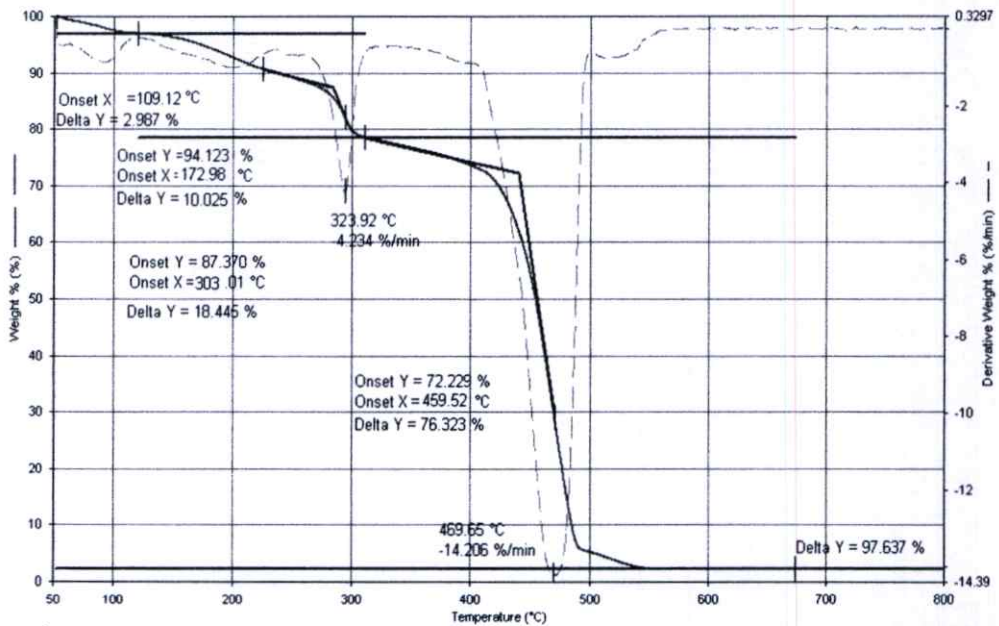
รูปที่ ก-23 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 3



รูปที่ ก-24 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 4



รูปที่ ก-25 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 5



รูปที่ ก-26 TGA thermogram ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟ สูตรFLAME 6

ภาคผนวก ข

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 ที่มีค่าความเป็นผลึก 100 %
 (มีค่าเท่ากับ 276 J/g)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มย่อยสลายสูตร LDPE/TPS 7

เมื่อ ปริมาณของ LDPE ในฟิล์มย่อยสลาย LDPE/TPS7 = 66.22 g

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

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}$$

$$= \frac{55.43 \times 100}{66.22}$$

$$= 83.70$$

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

$$= \frac{83.70 \times 100}{276}$$

$$= 30.32 \%$$

ดังนั้น ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มเป่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ TPS 7 เท่ากับ 30.32 %

ภาคผนวก ค
การทดสอบสมบัติเชิงกล

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

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืดฉีกขาด (%)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (N/mm)
LDPE	MD	16.03±1.13 ^a	937±2.17	80.32±2.60	92.00±2.40
	TD	13.01±0.31	860±0.13	73.11±0.51	75.02±1.20
LDPE/TPS 2	MD	9.83±0.12	636±0.57	63.82±1.56	54.82±2.06
	TD	6.74±0.20	505±0.91	57.20±0.82	32.31±1.29
LDPE/TPS 3	MD	12.95±0.27	734±0.71	58.91±0.58	68.12±0.67
	TD	9.91±0.06	584±2.08	52.43±0.47	43.24±1.30
LDPE/TPS 4	MD	12.23±0.14	584±1.91	47.23±1.59	60.41±3.49
	TD	9.216±0.07	513±1.97	40.71±1.06	48.5±2.78
LDPE/TPS 6	MD	11.88±0.19	680±2.82	54.20±0.66	39.71±1.19
	TD	9.37±0.48	534±2.52	46.07±0.32	34.91±0.48
LDPE/TPS 7	MD	13.72±0.11	769±1.82	58.21±0.70	70.72±1.62
	TD	10.92±0.11	596±1.04	51.70±0.74	61.64±1.07
LDPE/TPS 8	MD	12.953±1.19	734±1.12	58.91±0.70	68.07±1.62
	TD	9.915±0.91	584±1.08	52.43±0.74	43.08±1.07

หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ค - 2 (ต่อ)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (N/mm)
FLAME 1	MD	12.88±0.40 ^a	722.11±0.36	60.04±0.60	66.81±1.20
	TD	10.48±0.30	565.20±0.70	55.71±0.51	58.78±1.30
FLAME 2	MD	12.31±0.53	713.24±0.82	60.20±1.56	64.52±1.06
	TD	10±0.57	555.03±0.82	54.81±0.82	57.3±1.19
FLAME 3	MD	12.12±0.45	703.22±0.01	62.42±0.58	60.72±0.67
	TD	9.6±0.13	531.13±0.89	56.71±0.47	55.51±1.30
FLAME 4	MD	12.21±0.40	708.02±0.36	62.00±1.59	64.30±0.49
	TD	10±0.30	550.01±0.80	57.60±1.06	56.90±0.78
FLAME 5	MD	11.92±0.53	808.42±0.82	61.01±0.66	63.24±0.19
	TD	9.6±0.57	694.30±0.82	55.72±0.32	55.52±0.48
FLAME 6	MD	11.44±0.45	665.04±1.01	64.80±0.70	59.71±1.62
	TD	9.2±0.13	507.18±0.89	57.60±0.74	53.1±1.07

หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ง
การทดสอบอัตราการเผาไหม้

ตารางที่ ง- 1 ค่าอัตราการเผาไหม้(Rate of burning) และเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (Time of burning)

สูตร	อัตราการเผาไหม้ (cm/sec)	เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (t ₁) (sec)	เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (t) (sec)
LDPE	1.84±0.69 ^a	2.01±1.83	6.27±0.74
LDPE/TPS 7	1.38±0.26	2.69±0.60	8.133±0.39
FLAME 1	0.97±0.33	3.85±0.48	11.54±0.27
FLAME 2	0.72±0.71	5.37±0.50	15.79±1.83
FLAME 3	0.57±0.58	6.56±0.34	19.72±0.52

หมายเหตุ : a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก จ

การคำนวณค่าอัตราการเผาไหม้

การคำนวณหาค่าอัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)

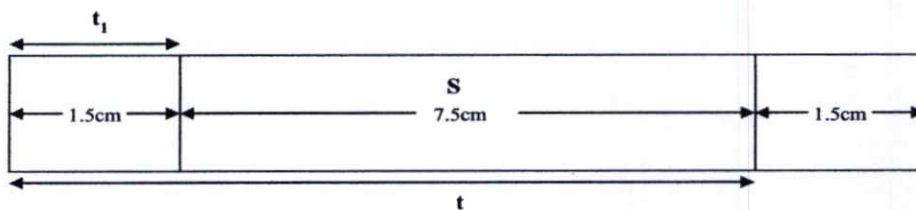
$$\text{อัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)} = \frac{S}{(t - t_1)}$$

เมื่อ S คือ ความยาวชิ้นงานในช่วงที่กำหนด (cm)

(กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 7.5 cm.)

 t_1 คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดแรก (sec)

t คือ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดสอง (sec)



รูปที่ จ-1 ภาพตัวอย่างชิ้นงานทดสอบการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL94 V-0 Test

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าอัตราการเผาไหม้ (Rate of burning) ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตร FLAME 1

เมื่อ ความยาวชิ้นงานในช่วงที่กำหนด (S) = 7.5 cm.

เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดแรก (t_1) = 3.85 sec

เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เริ่มต้นจนถึงขีดสอง (t) = 11.54 sec

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเผาไหม้ (Rate of burning)} &= \frac{S}{(t_1 - t)} \\ &= \frac{7.5}{(11.54 - 3.85)} \\ &= 0.97 \end{aligned}$$

ดังนั้น ค่าอัตราการเผาไหม้ (Rate of burning) ของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ สูตร FLAME 1 มีค่าเท่ากับ 0.97 cm/sec

ภาคผนวก ฉ.
การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ ค-1 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมของฟิล์มสูตรต่างๆ

วันที่ สูตร	2	4	6	8	10	12	14
LDPE	0.24±0.40 ^a	0.32±0.30	0.36±0.53	0.37±0.57	0.37±0.45	0.38±0.13	0.38±0.32
LDPE/TPS 2	14.80±1.25	14.18±0.69	14.26±1.39	14.13±1.42	13.89±0.58	13.94±1.59	13.93±0.96
LDPE/TPS 3	15.79±1.09	14.74±0.96	14.91±1.48	14.89±1.42	15.15±0.85	15.06±0.47	15.09±0.62
LDPE/TPS 4	15.26±0.43	14.56±0.33	14.65±0.12	14.65±0.20	14.53±0.06	14.80±0.74	14.91±1.19
LDPE/TPS 6	14.80±0.47	14.20±0.48	14.26±0.60	14.12±0.51	13.85±0.82	13.95±1.56	13.95±0.32
LDPE/TPS 7	15.26±0.74	14.56±1.07	14.65±1.62	14.60±1.19	14.35±2.78	14.30±1.30	14.30±1.29
LDPE/TPS 8	15.80±1.45	14.70±0.95	14.60±5.09	14.55±2.00	14.50±2.06	14.25±1.84	14.25±1.71
FLAME 1	17.79±1.09	16.74±1.25	16.80±0.48	16.75±1.39	16.70±1.09	16.60±1.42	16.26±0.96
FLAME 2	17.95±1.19	17.60±1.48	17.48±0.85	17.77±0.96	17.77±0.81	17.67±1.23	17.26±1.85
FLAME 3	18.74±1.23	18.25±1.89	18.06±1.73	18.16±1.52	18.25±0.90	18.06±0.88	17.67±1.19
FLAME 4	19.27±0.72	18.74±0.84	18.91±0.61	18.91±1.43	18.94±0.79	18.83±1.13	18.60±2.01
FLAME 5	20.30±0.48	20.45±0.67	20.48±0.94	20.28±2.75	20.13±1.84	19.80±0.99	19.92±1.09
FLAME 6	22.10±1.42	21.20±1.95	21.50±1.19	21.20±0.63	21.00±1.17	20.60±2.15	21.1±1.24

หมายเหตุ : a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นางสาววิไลวรรณ โพลิ่งมี
วัน เดือน ปีเกิด	10 พฤษภาคม 2528
ที่อยู่	833/2 หมู่ 7 ต.อรัญญิก อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผลงานวิจัย	การปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมโดยการทำปฏิกิริยาร่วมกับ ยางธรรมชาติเหลวดัดแปร (Improvement of surfaced filler by the reaction with modified liquid natural rubber)
พ.ศ. 2549	