

ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวของฟิล์มระหว่าง
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF BENZOPHENONE ON PHOTODEGRADATION OF FILM
BETWEEN LDPE AND CASSAVA STARCH

อัญนพ รุกรัตน์
ANUNOP RUKRAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีสโตนีเยอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2000-SC-M-014-014

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มระหว่าง
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF BENZOPHENONE ON PHOTODEGRADATION OF FILM
BETWEEN LDPE AND CASSAVA STARCH



อรรถพร รักรัตน์
AUNNOP RUKRAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....1051251
วันเดือนปี 16 พ.ย. 2552

พ.ศ.2552
KMITL-2009-SC-014-014

.b.....
.i.....

**EFFECT OF BENZOPHENONE ON PHOTODEGRADATION OF FILM
BETWEEN LDPE AND CASAVA STARCH**

AUNNOP RUKRAT

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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2009

KMITL-2009-SC-M-014-014

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง
Effect of Benzophenone on Photodegradation of Film Between LDPE and Cassava Starch
นักศึกษา นายอรรถพร รักรัตน์
รหัสประจำตัว 50067901
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี	ชัยสุภกิจสินธุ์	
รศ.ดร.สมศักดิ์	วรมงคลชัย	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวรากร	
ดร.วรัญ	แต่ไพสิฐพงษ์	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 12 พฤษภาคม 2552 เวลา 09.00 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 603

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครรัตน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่... 22เดือน... พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง
นักศึกษา	นายอรรถพร รักรัตน์
รหัสนักศึกษา	50067901
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวทางแสงที่มีต่อการสลายตัวของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้สารเบนโซฟีโนนเป็นสารเร่งการสลายตัวทางแสง มีพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ นำสารมาผสมในเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องผสมเกลียวหนอนคู่ หลังจากนั้นนำสารผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยศึกษาหาประสิทธิภาพของเบนโซฟีโนนที่มีผลต่อการสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และศึกษาสมบัติเชิงกลเชิงความร้อน ปริมาณการออกซิเดชัน สัมฐานวิทยา จากนั้นนำฟิล์มไปฉายแสงยูวีและฝังกิน แล้วติดตามผลการสลายตัวจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง และมอดุลัส) การเกิดอนุมูลคาร์บอนิล และไฮดรอกซิล อุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึก ความเป็นผลึก และสัมฐานวิทยา

จากการทดลองพบว่า เบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังจะทำให้ความทนแรงดึง และมอดุลัสลดลง แสงยูวีมีผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงแต่ทำให้มอดุลัสเพิ่มขึ้น และพบว่าเบนโซฟีโนนช่วยเร่งการสลายตัวภายใต้แสงยูวีทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก จากการศึกษาปริมาณออกซิเดชัน พบว่า แสงยูวีมีผลทำให้เกิดอนุมูลคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และอนุมูลคาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทำการทดลอง โดยฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจากฟิล์มปกติ แต่ฟิล์มที่ฝังกินไม่พบอนุมูลคาร์บอนิล เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายแป้ง ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าแสงยูวีมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกลดลงเล็กน้อยในทุกสูตร เนื่องจากเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่การฝังกินทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึก พบว่าแสงยูวีทำให้ร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่ทุกสภาวะการทดลองไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึก ผลการศึกษาสัมฐานวิทยา พบว่า แสงยูวีทำให้พื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นรูพรุน แคร็ก ร้าว เปราะ แต่การฝังกินพบว่าพื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งเกิดรูพรุน แต่ไม่แคร็ก ร้าว และเปราะเหมือนการฉายแสงยูวี

แสดงว่าเบนโซฟีโนนช่วยเร่งการสลายตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้เร็วกว่าการ
ย่อยสลายด้วยการฝังดิน

Thesis Title	Effect of Benzophenone on Photodegradation of Film Between LDPE and Cassava Starch
Student	Mr. Aunnop Rukrat
Student ID.	50067901
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Somsak Woramongkolchai

ABSTRACT

In this research, the effects of photo-sensitizer on film decomposition between low-density polyethylene (LDPE) and cassava starch were studied. The photo-sensitizer; benzophenone, the compatibilizer ; polyethylene-graft-maleic anhydride (PE-g-MA) and the plasticizer ; glycerol were mixed in intensive mixer and twin-screw extruder before passing them through blown-film process. The efficiency of benzophenone on LDPE and cassava starch blend was investigated by mechanical thermal properties, oxidation and morphology. The UV light and burial test were also further to reveal the decomposition effect by changing of mechanical properties (tensile strength and modulus), carbonyl and hydroxyl formation, melt crystallization temperature, crystallinity and morphology.

The results indicated that benzophenone had no significant effects on blend film properties, but cassava starch addition into the blend film expressed that tensile strength and modulus were decreased as compared with those of neat LDPE. The UV light decreased tensile strength but enhanced modulus. It was further investigated that benzophenone was accelerated decomposition under UV light leading to lower in mechanical properties. The oxidation endences revealed that the UV light had increased. Particularly, benzophenone film could enhance oxidation reaction more than regular film. However, it was not found carbonyl group for burial test film because it had no oxidation reaction. Except hydroxyl group was decrease from starch decomposition under microorganism action. The thermal studies showed the melt crystallization temperatures in all formulae were a little bit decreased under UV light condition because the polymer chains were lessen down into small chain. This was opposite to burial test, the melt crystallization temperatures were not much increased because of microorganism decomposition. The crystal structure inspection indicated that percent of crystallinity was increased under UV light but all experimental conditions

had no effect on crystal structure. The morphology studies disclosed that UV light caused the porosity, brittleness and cracking of the blend film surfaces but the burial test revealed that there were no brittleness and cracking as UV light, except the porosity formation from cassava starch in the blend film. It was meant that the benzophenone had faster photodegradability of LDPE than the burial test of microorganism.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอพระขอบคุณ รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำ ความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ที่ได้รับเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ รศ. ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ รศ. ดร. จุฑารัตน์ ปรีญาวารากร และ ดร. วรรษ แต่ไพสิฐพงษ์ กรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประคิษฐ์ และ คุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการวิจัย

ขอขอบคุณ ครอบครัว ญาติพี่น้อง คุณอังคณา รักรัตน์ คุณอารีย์ รักรัตน์ และคุณปิยนันท์ กันตะเพ็ง ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณ บริษัท มัลติแบริคส์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้การช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมายเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

อฉฉพ ร้กร้คณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	5
2.1.1.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	6
2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง.....	8
2.1.2.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเล็ตของพอลิเมอร์.....	9
2.1.2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง.....	12
2.1.2.2.1 การถ่ายโอนพลังงาน.....	12
2.1.2.2.2 การแผ่รังสี.....	13
2.1.2.3 กระบวนการทางเคมีทางแสง.....	13
2.1.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	18
2.1.3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน.....	18
2.1.3.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	19
2.1.3.3 การวิเคราะห์ Infrared Spectroscopy.....	19
2.1.3.4 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3.5 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD	22
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	24
2.2.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถ ในการผสมเข้ากันได้.....	25
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีน.....	26
2.4 แป้ง.....	32
2.4.1 โครงสร้างแป้ง.....	32
2.4.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	33
2.4.3 การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้.....	34
2.4.3.1 การใช้แป้งเป็นวัสดุโดยตรง.....	34
2.4.3.2 การใช้แป้งเป็นสารตัวเติม.....	35
2.4.3.3 การใช้งานในรูปของเม็ดแป้ง.....	35
2.4.3.4 การใช้งานในรูปของแป้งเจล.....	35
2.4.3.5 การใช้แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติก.....	36
2.4.4 การย่อยสลายทางชีวภาพของแป้งโดยเชื้อรา.....	36
2.4.4.1 การทำลายทางกายภาพ.....	36
2.4.4.2 การทำลายทางเคมี.....	36
2.4.5 การย่อยสลายของแป้งโดยใช้เอนไซม์.....	37
2.4.5.1 เอนไซม์ย่อยภายนอก.....	37
2.4.5.2 เอนไซม์ย่อยภายใน.....	37
2.5 พลาสติกไซเซออร์.....	37
2.6 สารดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต	39
2.6.1 เบนโซฟีโนน.....	40
2.7 กระบวนการเป่าฟิล์ม.....	42
2.7.1 องค์ประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	43
2.7.1.1 กระจบออครีด.....	43
2.7.1.2 หัวคาย.....	44
2.7.1.3 แกนปรับเสถียรภาพของลูกโป่ง.....	45
2.7.1.4 หน่วยการหล่อเย็น และแผนปรับขนาดของลูกโป่ง.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1.5 ลูกหนีบและเครื่องมือ.....	45
2.7.2 สภาวะในการเป่าฟิล์มและสมบัติของแผ่นฟิล์มที่สำคัญ.....	45
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน.....	52
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	53
3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นและวัตถุดิบผสม.....	53
3.3.2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม.....	56
3.3.3 การทดลองและตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม.....	57
3.3.3.1 การทดสอบการย่อยสลายได้ของฟิล์ม.....	57
3.3.3.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม.....	58
3.3.3.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	59
3.3.3.2.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	59
3.3.3.2.3 การทดสอบ โครงสร้างทางสัณฐานวิทยา.....	60
3.3.3.2.4 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	60
3.3.3.2.5 การทดสอบหาปริมาณการเกิดออกซิเดชัน.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	63
4.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	63
4.1.1 สมบัติความทนแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ยังไม่ได้รับการฉายแสงยูวีและฟ้งคืน.....	64
4.1.2 สมบัติความทนแรงดึงเมื่อได้รับการฉายแสงยูวีและฟ้งคืน เป็นเวลา 4 เดือน.....	65
4.1.3 ค่ามอดูลัสเมื่อได้รับการฉายแสงยูวีและฟ้งคืน เป็นเวลา 4 เดือน.....	79
4.2 การหาปริมาณการออกซิเดชัน.....	96
4.2.1 การหาปริมาณดัชนีคาร์บอนิล.....	103
4.2.2 การหาปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล.....	105
4.2.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิล.....	109
4.3 สมบัติทางความร้อน.....	112
4.3.1 ความเป็นผลึก.....	114
4.4 การเปลี่ยนแปลง โครงผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	116
4.5 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	117

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวอย่าง.....	119
4.5.2 ลักษณะพื้นผิวตัวอย่างก่อนและหลังการทดลอง.....	123
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	127
เอกสารอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก ก แสดงสถานะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า.....	138
ภาคผนวก ข ลักษณะเม็ดแป้งที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	140
ภาคผนวก ค ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	141
ภาคผนวก ง ความทนแรงดึงและมอดุลัส.....	144
ภาคผนวก จ กราฟ FTIR พอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการทดลองและหลังการทดลอง.....	158
ภาคผนวก ฉ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลัง ทำการทดลองในสถานะต่างๆ.....	176
ภาคผนวก ช โคเอแกรม X-ray ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการทดลองและหลัง ทำการทดลอง.....	193
ประวัติการศึกษา.....	209

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พลังงานในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.3 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของพอลิเมอร์และความยาวคลื่น โซลาร์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับการเสียดคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์.....	10
2.4 พลังของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างกันและพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์.....	11
2.5 สรุปลักษณะของลักษณะของเม็ดพลาสติกที่มีต่อสมบัติต่างๆ สำหรับ PE.....	28
2.6 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	29
2.7 สมบัติของสารBenzophenone.....	41
2.8 ค่า Compression Ratio และ L/D ที่เหมาะสมสำหรับ PE	44
3.1 สมบัติของ LDPE ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	51
3.3 สมบัติของสารเบนโซฟีโนน.....	51
3.4 สมบัติของ Fusabond® MB 226D.....	51
3.5 สมบัติของกลีเซอรอล.....	52
3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่.....	53
3.7 อัตราส่วน โดยน้ำหนักของสูตรผสมแต่ละสูตร.....	54
4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิคDSC.....	112
4.7 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็น เวลา4 เดือน ด้วยเทคนิค DSC.....	113
4.8 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน ด้วย เทคนิค DSC	113
ก.1 สภาพที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า.....	138
ก.2 ลักษณะของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม.....	139
ง.1 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม.....	144
ง.2 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 1 เดือน.....	145
ง.3 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 2 เดือน.....	146

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.4 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 3 เดือน.....	147
ง.5 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน.....	148
ง.6 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 1 เดือน.....	149
ง.7 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 2 เดือน.....	150
ง.8 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 3 เดือน.....	151
ง.9 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 4 เดือน.....	152
จ.1 ค่า %Transmittance ในช่วงที่เกิดหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน.....	153
จ.2 ค่า %Transmittance บริเวณ $3,382\text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน.....	154
จ.3 ค่า %Transmittance บริเวณ 3382 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฝังดินเป็น เวลา 4 เดือน.....	155
จ.4 ค่า %Transmittance บริเวณ 2020 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฉายแสงยูวีเป็น เวลา 4 เดือน.....	156
จ.5 ค่า %Transmittance บริเวณ 2020 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฝังดินเป็น เวลา 4 เดือน.....	157

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นกับระดับพลังงาน.....	10
2.2 โครงสร้างของฟิวซาบอนด์.....	26
2.3 สูตร โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน.....	27
2.4 เปรียบเทียบสมบัติการไหลหรือความหนืดของ LDPE 3 ชนิด ที่มี MI เท่ากันแต่มี MWD ต่างกัน.....	31
2.5 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส.....	33
2.6 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน.....	33
2.7 โครงสร้างกลีเซอรอล.....	39
2.8 โครงสร้างทางเคมีของ Benzophenone	40
2.9 ลักษณะทางกายภาพของ Benzophenone.....	41
2.10 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blow film process).....	42
2.11 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเป่าฟิล์ม.....	43
2.12 ลักษณะของสภาวะที่สำคัญในการเป่าฟิล์ม.....	48
3.1 แผนผังขั้นตอนการผสม.....	59
3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	60
3.3 แผนผังขั้นตอนการทดสอบการย่อยสลาย.....	61
4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	64
4.2 กราฟเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	64
4.3 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน....	65
4.4 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของ น้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	67
4.5 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของ น้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	68
4.6 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของ น้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	68
4.7 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	72

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 มอคูล์สของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	88
4.34 มอคูล์สของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	88
4.35 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	89
4.36 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	90
4.37 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	90
4.38 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	91
4.39 มอคูล์สในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	92
4.40 มอคูล์สในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	93
4.41 มอคูล์สในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	93
4.42 มอคูล์สในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 กราฟ FTIR แสดงการเปรียบเทียบช่วง 1500-2000 cm^{-1} ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	97
4.44 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	99
4.45 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง มันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	100
4.46 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	101
4.47 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง มันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	102
4.48 การเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง มันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	103
4.49 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	105
4.50 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง มันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	106
4.51 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสม เบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	107
4.52 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสม แป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	108
4.53 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสงยูวีของ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	109
4.54 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสงยูวีของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	110
4.55 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสงยูวีของ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ.....	110
4.56 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสงยูวีของพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนัก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 เปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในสภาวะก่อน และหลังฉายแสงยูวี และฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน.....	115
4.58 กราฟXRD ของพอลิเมอร์ผสมในสภาวะก่อนการทดลอง และหลังการฉายแสงยูวี และฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน.....	117
4. 59 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ก่อนการทดลอง.....	119
4. 60 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	120
4. 61 ภาพ SEM แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม หลังฝังคืน เป็นเวลา 4 เดือน.....	121
4. 62 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนการทดลอง...	123
4.63 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	124
4.64 ภาพ SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฝังคืน เป็นเวลา 4 เดือน.....	125
ข.1 ภาพถ่ายจาก SEM ขนาดของเม็ดแป้งที่ใช้ในการทดลอง.....	137
ข.2 แสดงลักษณะพื้นผิวเม็ดแป้งที่ใช้ในการทดลอง.....	137
ค.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนก่อน การทดลอง.....	138
ค.2 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	139
ค.3 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน ภายหลังจากฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน.....	139
จ.1 กราฟ FTIR พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน.....	155
จ.2 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน.....	156
จ.3 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 1 เดือน.....	157

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.4 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน.....	158
จ.5 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 2 เดือน.....	159
จ.6 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	160
จ.7 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 3 เดือน.....	161
จ.8 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน.....	162
จ.9 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนE หลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน.....	163
จ.10 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	164
จ.11 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดิน เป็นเวลา 1 เดือน.....	165
จ.12 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และ เบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน.....	166
จ.13 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดิน เป็นเวลา 2 เดือน.....	167
จ.14 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน.....	168
จ.15 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดิน เป็นเวลา 3 เดือน.....	169
จ.16 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน.....	170

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ.14 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน.....	186
ฉ.15 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน.....	187
ฉ.16 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและ เบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน.....	188
ฉ.17 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	189
ฉ.18 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	190
ช.1 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน.....	191
ช.2 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และ เบนโซฟีโนน.....	192
ช.3 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 1 เดือน.....	193
ช.4 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและ เบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน.....	194
ช.5 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 2 เดือน.....	195
ช.6 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและ เบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	196
ช.7 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 3 เดือน.....	197
ช.8 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและ เบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน.....	198
ช.9 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน.....	199
ช.10 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและ เบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.....	200

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.11 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน.....	201
ข.12 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน.....	202
ข.13 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน.....	203
ข.14 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน.....	204
ข.15 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน.....	205
ข.16 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน.....	206
ข.17 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	207
ข.18 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน.....	208

อาจก่อให้เกิดปัญหาการชะล้างของสารเคมีหรือโลหะหนักที่เดิมเข้าไปในเนื้อพลาสติกสู่น้ำใต้ดินได้ สำหรับการกำจัดขยะโดยวิธีการเผาในเตาเผา นั้น สามารถใช้กำจัดมูลฝอยที่มีพลาสติกปนอยู่ได้ แต่ต้องออกแบบเตาเผาพิเศษ มีการควบคุมก๊าซพิษที่เกิดจากการเผาอย่างดี หากไม่มีการควบคุมที่ดี อาจก่อให้เกิดปัญหาเถ้าที่เกิดจากการเผาและปัญหามลพิษทางอากาศได้ เช่น การปนเปื้อนของโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว ดีบุก หรือ สังกะสี ไฮโดรเจนคลอไรด์ และไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ไดออกซิน ฟุน และ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

ในปัจจุบันวิธีการแก้ไขปัญหามลพิษพลาสติกที่เหมาะสมมีหลายวิธี ได้แก่ การฝังกลบ การแปรรูปของใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ และการย่อยสลาย เมื่อพิจารณาในแต่ละวิธีพบว่า การกำจัดมูลฝอยพลาสติกด้วยวิธีการฝังกลบมีปัญหาด้านสถานที่ เนื่องจากขยะพลาสติกใช้เนื้อที่ในการฝังกลบมาก เมื่อขาดแคลนพื้นที่และที่ดินมีราคาแพงทำให้วิธีการกำจัดขยะวิธีนี้มีต้นทุนสูง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเกิดการปนเปื้อนในแหล่งดินหรือน้ำ การกำจัดขยะ โดยการแปรรูปของใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่เป็นการนำเอาพลาสติกชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันมาผสมกันแล้วนำกลับมาใช้ใหม่เป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ แต่พบว่าอาจก่อให้เกิดพลาสติกชนิดใหม่ที่ย่อยสลายได้ยากกว่าเดิม และปัจจุบันเทคโนโลยีนี้ค่อนข้างมีราคาสูง ดังนั้นการกำจัดขยะ โดยการย่อยสลายพอลิเมอร์ทั้งทางแสง ความร้อน หรือจุลินทรีย์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่นิยมใช้ในการกำจัดขยะพลาสติก ซึ่งในปัจจุบันมีความพยายามทำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ในรูปแบบต่างๆ เพิ่มขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากมูลฝอยพลาสติก

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นประเด็นหลักในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานในอนาคต ซึ่งแบ่งตามแหล่งกำเนิดวัตถุดิบได้ 2 ประเภท คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petroleum-Based Biodegradable Plastics) และ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio-Based Biodegradable Plastics) ซึ่งในปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง โดยนักวิทยาศาสตร์ตลอดจนนักธุรกิจและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในระดับนานาชาติทั่วโลกกำลังตื่นตัวในการคิดค้นหาวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Biomass) ในการผลิตพลาสติกชนิดใหม่ เช่น พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic Acid, PLA) หรือพอลิแลคไทด์ (Polylactide) เป็นต้น

อย่างไรก็ดีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพกลับมาใช้นั้นต้องคำนึงถึงกระบวนการแยกประเภทพลาสติก และสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ว่ามีความสำคัญมาก โดยความท้าทายของการนำพลาสติกทางชีวภาพใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ได้แก่ การสร้างความเชื่อมั่นว่าวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการใหม่จะมีสมบัติเหมือนกับพลาสติกเดิม เนื่องจากพลาสติกที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการใหม่และประกอบด้วยวัสดุย่อยสลายได้ทางชีวภาพอาจมีสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป เช่น อัตราการไหล ความแข็งแรง เป็นต้น และอาจทำให้วัสดุเสียสภาพจากการย่อยสลาย ซึ่งการเสียสภาพ

เพียงเล็กน้อยเป็นปัญหาสำคัญต่อการนำไปใช้งาน และทำลายความเชื่อมั่นต่อสมบัติของพลาสติก แปรรูปที่นำกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเกือบทั้งหมดเป็นพอลิเมอร์มีขั้ว เช่น พอลิเอสเทอร์ (Polyester) พอลิคีโตน (Polyketone) และพอลิแอลกอฮอล์ (Polyalcohol) ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการย่อยโดยจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ธรรมชาติความมีขั้วของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพทำให้สามารถดูดซับความชื้นจากบรรยากาศ โดยในสภาวะสมดุลจะมีปริมาณน้ำสูงถึงร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก [2] โดยเฉพาะพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทแป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติกสามารถใช้น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นได้ โดยในกระบวนการอัดรีดพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้จะผลิตน้ำออกมาทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศ และรอยแตกระหว่างการอัดเม็ดและการทอ ดังนั้นจึงไม่นิยมนำพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพกลับมาใช้ใหม่ โดยประเด็นสำคัญในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้คือ การลดระยะเวลาในการย่อยสลาย และปรับปรุงกระบวนการสลายตัวให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเน้นที่ผลิตภัณฑ์ต้องส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ดังนั้นจึงมีผู้สนใจนำสารเร่งการสลายตัว (Prodegradant) มาใช้เพื่อเร่งการย่อยสลายในระยะเวลาที่สั้นลงและทำให้การย่อยสลายสมบูรณ์มากขึ้น เพื่อเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อม [3]

โดยที่สารเร่งการสลายตัวเป็นสารเคมีแต่งชนิดหนึ่งที่ใช้ผสมกับพลาสติก เพื่อลดระยะเวลาการสลายตัวของพลาสติกที่ตกค้างอยู่ในสภาพแวดล้อม โดยสารเร่งการสลายตัวแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดกับสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยา เช่น สารเร่งการสลายตัวทางชีวภาพ สารเร่งการสลายตัวโดยแสง และสารเร่งการสลายตัวด้วยความร้อน เป็นต้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของสารเร่งการสลายตัวแต่ละชนิดแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมที่เป็นอยู่ขณะนั้น [4] โดยการเติมสารเร่งการสลายตัวทางแสงลงในพอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นแนวทางหนึ่งที่เป็นไปได้ โดยสารเร่งการสลายตัวโดยแสงที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น สารเบนโซฟีโนนที่เป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเคมีแต่งของพอลิเมอร์ และใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง และสารกำจัดแมลงศัตรูพืช เป็นต้น

ด้วยเหตุที่กล่าวมางานวิจัยนี้จะศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวทางชีวภาพ และทางแสง โดยศึกษาการสลายตัวของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกับสารเร่งการสลายตัวทางชีวภาพ และทางแสง ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน ตามลำดับ โดยเน้นศึกษาประสิทธิภาพของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มเป่าผสมแป้งมันสำปะหลัง เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนให้สามารถสลายตัวได้เร็วขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เช่น ถุงเพาะชำ และฟิล์มคลุมผิวดิน เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มเป่าย่อยสลายได้ โดยมีแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนเป็นส่วนประกอบ
2. เพื่อศึกษาการสลายตัวของชีวภาพและทางแสงของฟิล์มเป่าที่เติมสารเร่งการสลายตัว ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน ตามลำดับ
3. เพื่อศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวของชีวภาพที่มีต่อสมบัติ และการขึ้นรูปฟิล์มเป่าผสมแป้งมันสำปะหลัง
4. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการสลายตัวของฟิล์มเป่าผสมแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้สารเบนโซฟีโนนเป็นตัวเร่งการสลายตัวของชีวภาพ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวของชีวภาพ และทางแสงที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
2. หาอัตราส่วนของสารเร่งการสลายตัวของชีวภาพและทางแสงที่ช่วยเพิ่มการสลายตัวให้กับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้มากที่สุด
3. หาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน โดยกระบวนการเป่าฟิล์ม
4. ศึกษาสมบัติเชิงกล อัตราการสลายตัว เสถียรภาพทางความร้อน สัมฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ ของฟิล์มพอลิเมอร์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. คาดว่าจะสามารถผลิตฟิล์มเป่าย่อยสลายทางชีวภาพและทางแสง เพื่อประยุกต์ใช้ในภาคเกษตรกรรม เช่น ฟิล์มคลุมดิน
2. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของฟิล์มเป่าย่อยสลายทางชีวภาพ ด้วยการเร่งการย่อยสลายทางแสง
3. เป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเป่าย่อยสลายทางชีวภาพและช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable Plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable Plastics) หมายถึง พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้ โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ โดยจัดเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติกทั่วไป เมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น แสง ความชื้น และจุลินทรีย์ เป็นต้น โดยแบ่งออกเป็น 4 ประเภท [5] ได้แก่

1. พลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพ (Biodegradable plastics)
2. พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable plastics)
3. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastics)
4. พลาสติกย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics)

2.1.1 พลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพ (Biodegradable Plastics)

พลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพมีคำจำกัดความตามมาตรฐาน (DIN103.2) ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a Plastic material) คือ กระบวนการที่พลาสติกถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์นั้น สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดต้องถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์มากกว่าร้อยละ 90 โดยที่สภาพแวดล้อม [5] และอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (Composting) เป็นต้น

ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการศึกษาทั้งหมด 3 กลุ่มใหญ่ๆตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ ได้แก่

1. กลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากพืช เช่น แป้ง และ เซลลูโลส เป็นต้น
2. กลุ่มพอลิเมอร์ที่ผลิตได้โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น พอลิเบตาไฮดรอกซีบิวทิเรต (Poly-β-Hydroxybuturate) และพอลิแลคเตท (Polylactate) เป็นต้น
3. กลุ่มพอลิเมอร์จากการตัดแปรรพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ผลิตจากแป้ง (Starch Based Polymer) ที่มีการผสมสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือ ซอร์บิทอล (Sorbitol) ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อปรับสมบัติ เช่น ความยืดหยุ่น และความแข็งแรงให้ดีขึ้น

2.1.1.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถถูกจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียหรือเชื้อรา ใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงเปลี่ยนสภาพของพลาสติกให้เป็น โมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายหลังจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พลาสติกจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หน่วย [6] ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic polyester) เป็นต้น จากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ เช่น โปรตีน เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น พบว่าการย่อยสลายเริ่มจากจุลินทรีย์จะใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดอนุมูลอิสระจนทำให้เกิดการย่อยสลายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500 หน่วย [6] ซึ่งสามารถตรวจวัดอัตราการสลายตัวได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยตรวจวัดหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีแนวโน้มสูงขึ้นซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจึงเกิดการย่อยสลาย [6] โดยการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกมีทั้งหมด 3 ลักษณะ ดังนี้

1. พลาสติกที่ไม่ได้สลายตัวเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด

2. การสลายตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายตัวต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต่อไป

3. การสลายตัวเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้น โดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน (Polycaprolactone) และ พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรทการ์เลท (Poly hydroxybutyrate garleate) เป็นต้น

ผลจากการสลายตัวของพลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงบวกที่สำคัญ คือ ในกระบวนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพ พบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานในการผลิต และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจก (Green

House Gas, GHG) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี [7] นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว จะไม่มีการผลิตคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเห็นชัดเจนในกรณีของพลาสติกที่ใช้แป้งเป็นวัตถุดิบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกขึ้นมาใหม่ ทำให้เกิดการหมุนเวียน และสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ปริมาณการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่างๆ ได้ถูกประมวลไว้ในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ตามลำดับ การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม เช่น สภาพของน้ำทะเลภายในดิน ในระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือการหมักทำปุ๋ย เป็นต้น ซึ่งในแต่ละสภาวะจะมีจุลินทรีย์ที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายที่แตกต่างกัน [7] โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกมีอยู่หลายองค์กร เช่น ASTM, CEN และ ISO เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 พลังงานในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [7]

พอลิเมอร์	พลังงาน (MJ/kg)
Low density polyethylene	81
Polyhydroxyalkanoate- fermentation process	81
High density polyethylene	80
Polycaprolactone	77
Poly vinyl alcohol	58
Poly lactic acid	57
Thermoplastic starch + 60% Polycaprolactone	52
Thermoplastic starch + 52.5% Polycaprolactone	48
Thermoplastic starch	25
Thermoplastic starch + 15% Poly vinyl alcohol	25

ตารางที่ 2.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [7]

พอลิเมอร์	การปล่อยก๊าซเรือนกระจกx10 [kg CO ₂ eq./kg]
Poly lactic acid	53
Low density polyethylene	50
High density polyethylene	49
Poly vinyl alcohol	42
Thermoplastic starch + 60% Polycaprolactone	36
Thermoplastic starch + 52.5% Polycaprolactone	33
Thermoplastic starch + 15% Poly vinyl alcohol	17
Thermoplastic starch	11
Poly lactic acid	n/a
Polyhydroxyalkanoate- fermentation process	n/a

2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable Plastics) [8]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสงเป็นพลาสติกที่จะเกิดการแตกหักของสายโซ่หลักเมื่อได้รับพลังงานแสงหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต พลาสติกประเภทนี้ได้จากการสังเคราะห์โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่มีความว่องไวต่อแสงในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น คาร์บอนิลในรูปไวนิลคีโตน (Vinyl ketone) หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) เป็นต้น เข้าไปในโมเลกุล เมื่อได้รับแสงแคดโมเลกุลของพลาสติกจะดูดกลืนพลังงานทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ส่งผลให้สมบัติเชิงกล และกายภาพเสื่อมลง และยังเป็นกรช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้นด้วย เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลง และมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น [8]

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพด้วยแสงมี 3 วิธี [8]

1. เตรียมฟิล์มจาก Poly-1-butene หรือมี Polyisobutylene oxide และ Polybutadiene เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสง โดยเพิ่มหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง หมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยา Norrish type I สลายให้อนุมูลอิสระ และ Norrish type II จะเกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้โซ่หลักขาด

3. การเติมสารไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสงลงในพลาสติกที่ใช้ในบรรจุภัณฑ์ ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิชัน (Transition metal) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเม็คซี เป็นต้น ปัจจุบันมีการพัฒนาสารไวแสงจาก Dialkyldithiocarbamates ซึ่งเมื่อเติมลงในพลาสติกจะทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะสลายตัว พลาสติกระบบนี้มีประโยชน์มาก โดยเฉพาะใช้ทำฟิล์มทางการเกษตร เช่น เบนโซฟีโนน (Benzophenone) ไทโอแชนโทน (Thioxamton) ไอรอนไดอัลทิลไดไทโอคาร์บามेट (Iron (III) dialkyldithio carbamate) เป็นต้น

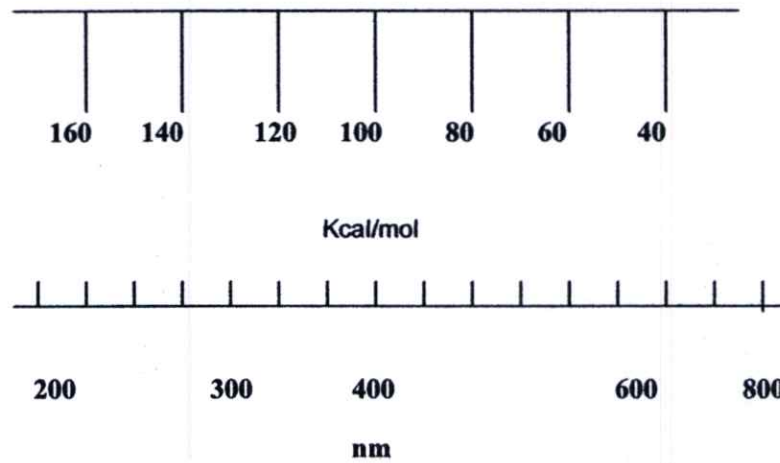
2.1.2.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเลตของพอลิเมอร์ (Ultraviolet Stabilization) [9]

โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์จะมีพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ที่มีความเสถียร โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตและพอลิเมอร์ ซึ่งการสังเคราะห์สารอินทรีย์ในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้จากการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์ของสารอินทรีย์ที่นำมาสังเคราะห์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมมีความจำเป็นที่จะศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์ เพื่อใช้ปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์บางประเภทยังมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์และการนำไปใช้เป็นเวลานานอีกด้วย [9]

สำหรับพันธะโคเวเลนต์ที่ได้รับพลังงานจันอเล็กตรอนหลุดจากสถานะเสถียรไปอยู่ในสถานะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามีผลทำให้พันธะโคเวเลนต์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ในสภาวะแวดล้อมโดยทั่วไปพลังงานกระตุ้นได้จากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.1 ตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ เมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตของดวงอาทิตย์แพร่เข้ามายังบรรยากาศโลก จะถูกกรองผ่านโดยชั้นบรรยากาศโอโซนซึ่งจำกัดความยาวคลื่นแสงที่สั้นกว่า 290 นาโนเมตร (nm) ด้วยเหตุนี้การแผ่รังสีอัลตราไวโอเลตจาก 290 ถึง 400 นาโนเมตร จึงเกิดขึ้นได้แค่ประมาณร้อยละ 5 ของการแผ่รังสีทั้งหมดมายังโลก ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า 400 นาโนเมตร จะเป็นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและความร้อนอินฟราเรด โดยการเสถียรภาพของพลาสติกในสภาพบรรยากาศภายนอกเริ่มต้นจากการกระตุ้นของรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ และออกซิเจนในบรรยากาศ รวมถึงความชื้นและฝุ่นที่เกิดจากลมพัด เป็นตัวริเริ่มเกิดการสลายตัวด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน [9] เป็นต้น

การเสถียรภาพของพลาสติกด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเริ่มต้นเมื่อพลาสติกดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ซึ่งในทางทฤษฎีถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก ยกตัวอย่างเช่น ไฮโดรคาร์บอนประเภทอะลิฟาติกบริสุทธิ์ดูดกลืนแสงได้มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 220 นาโนเมตร

พอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนดูดกลืนแสงได้ต่ำกว่า 220 นาโนเมตร เป็นต้น โดยความเป็นจริงแล้ว พอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งหมดดูดกลืนแสงได้ต่ำกว่า 300 นาโนเมตรเท่านั้น ซึ่งจะไม่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มาถึงยังโลก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานว่าเกิดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีสิ่งเจือปนอยู่ หรือ โครงสร้างของพอลิเมอร์เอง [10]



รูปที่ 2.1 ความยาวคลื่นของแสงกับระดับพลังงาน [10]

ตารางที่ 2.3 ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของพอลิเมอร์และความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการเสียคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์ [10]

พอลิเมอร์	ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุด (nm)	ความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (nm)
พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	<150	300
พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)	<200	310
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly vinyl chloride)	<210	310
พอลิเมทิลเมทาคริเลท (Poly (methyl methacrylate))	<240	290-315
พอลิไวนิลอะซิเตท (Polyvinyl acetate)	<250	<280
พอลิสไตรีน (Polystyrene)	<260	318
พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)	260	295
พอลิเอทิลีนเทอเรฟทาเลท (Polyethylene terephthalate)	~290	290-320

ตารางที่ 2.4 พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างกัน และพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์ [10]

ความยาวคลื่น (nm)	พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสี		ชนิดของพันธะ	พลังงานพันธะ (kJmole ⁻¹)
	kcal	kJ		
290	100	419	C-H	380-420
300	95	398	C-C	340-350
320	90	375	C-O	320-380
350	81	339	C-Cl	300-340
400	71	297	C-N	320-330

ปกติโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกอาจจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงถึง 350 นาโนเมตร และจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงขึ้นเมื่อสร้างพันธะคอนจูเกตกับหมู่ไม่อิ่มตัวของโมเลกุลสารอื่นๆ เช่น โครงสร้างของหมู่คาร์บอนิล (C=O) จะดูดกลืนคลื่นแสงได้ในช่วง 270 ถึง 360 นาโนเมตร และนอกจากนี้พวกพอลิเมอร์ที่มีขั้ว ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ พอลิยูรีเทน และพอลิเอไมด์ พบว่ามีโครงสร้างของคาร์บอนิลจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนได้ในระหว่างกระบวนการทดลอง ดังนั้นสามารถอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในทางทฤษฎีได้ว่า พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่นแสงที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลที่ได้จากการออกซิเดชันจะมีช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงประมาณ 320 นาโนเมตร ต่อมาจะเกิดเป็นหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์จะดูดกลืนคลื่นแสงได้มากกว่า 300 นาโนเมตร ด้วยเหตุนี้การอธิบายการเสถียรภาพโดยแสงจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการสลายตัวโดยแสงของพอลิเมอร์ชนิดนั้น [9]

ในทางทฤษฎีการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตยังขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งและสิ่งเจือปนอื่นๆ ซึ่งอาจเกิดจากสารเชิงซ้อนระหว่างพอลิเมอร์และออกซิเจนได้ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตในตอนเริ่มต้นได้ เมื่อระบบของพอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต จะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานและออร์บิทัลที่สูงขึ้น ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพต่อการถูกกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อม จึงมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสถานะพื้น (Ground state) จะถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานสูงกว่า จึงมีผลทำให้ระดับพลังงานการสั่นสะเทือนของอิเล็กตรอนสูงขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนเกิดการหมุน (Spin electron) ซึ่งการหมุนของอิเล็กตรอนมีลักษณะเป็นคู่ในสถานะเดี่ยว (Single state) และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะสามารถเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานสูงกลับมายังสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานต่ำได้ด้วยเส้นทางการเคลื่อนที่ต่างๆกัน เรียกว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นนี้

ว่า กระบวนการกายภาพทางแสง (Photophysical process) ถ้ากระบวนการที่เกิด ไม่มีผลทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรจนเกิดการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์เรียกว่ากระบวนการนี้ว่า กระบวนการเคมีทางแสง (Photochemical process) [10]

2.1.2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง [9]

อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นอาจจะกลับมายังสถานะพื้นได้ 3 แบบ ได้แก่ การถ่ายโอน พลังงาน (Energy transfer) การแผ่รังสี (Radiation) และความร้อน (Heat)

2.1.2.2.1 การถ่ายโอนพลังงาน

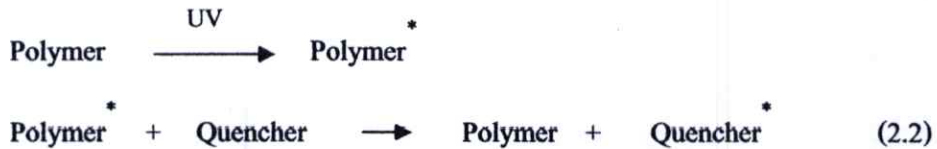
พลังงานของการกระตุ้นอาจถูกถ่ายโอนไปยังอีกที่หนึ่งภายใน โมเลกุล (Intra-molecular) หรือ ระหว่างโมเลกุล (Inter-molecular) ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกันได้ พลังงานคลื่นแสง อัลตราไวโอเลตอาจถูกดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric group) ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเคลื่อนย้ายไปตามโมเลกุลตรงจุดที่ไม่สามารถดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตได้ โดยตรงจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาที่จุดอื่นๆต่อไป [9]

โดยปกติโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มต้น และถูกกระตุ้นโดยทันที จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง เมื่อได้รับ ปฏิกิริยาสูงสุด (Ultimate reaction) ในบางกรณีสิ่งเจือปน หรือสารปรับแต่งที่ดูดกลืนแสง อัลตราไวโอเลตเริ่มแรกจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสง อัลตราไวโอเลตได้เองแต่สามารถกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการ 2.1



สิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งจะเร่งการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์โดยแสง อัลตราไวโอเลต เช่น เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างเฉื่อย หรือการเกิดเป็นสาร เชิงซ้อนกับพอลิเมอร์ [9] เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตมากจนเกินไป จะทำให้เกิด ความไม่เสถียรที่จะใช้กับงานภายนอกได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสถียรได้โดยการเติมสารระงับ พลังงาน (Quencher) ลงไปเพื่อถ่ายโอนพลังงานที่มากเกินไปดังสมการ 2.2 เทคนิคนี้มีประ โยชน์ทำ ให้พอลิโอฟีนสามารถนำไปใช้ในงานภายนอกได้โดยมีสารเสถียรภาพช่วยระงับพลังงานจากแสง อัลตราไวโอเลต



2.1.2.2.2 การแผ่รังสี

โดยทั่วไปกระบวนการกายภาพทางแสงจะสิ้นสุดลงเมื่อปล่อยพลังงานในสถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นสูงกลับไปยังระดับพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำ โดยระดับพลังงานในสถานะเดี่ยวที่ถูกกระตุ้น (S_1) จะปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเพียง 10^{-9} ถึง 10^{-6} วินาที เรียกว่าช่วงคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ส่วนในสถานะสามที่ถูกกระตุ้น (T_1) อาจจะปล่อยพลังงานกลับมาช้ากว่าซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 10^{-3} ถึง 20 วินาที เรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบรามาน (Raman vibrations) ของอิเล็กตรอน อะตอม หรือ โมเลกุล [10]

พลังงานที่ปล่อยออกมาจากสถานะกระตุ้นจะกระจายผ่านชั้นของระดับพลังงาน จนทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจนกลายเป็นความร้อน ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ปล่อยออกมามีผลทำให้เกิดการจัดเรียงตัวภายใน โครงสร้างของ โมเลกุลสารขึ้นใหม่เป็นแบบทาวโทเมอร์ริค (Tautomeric) ซึ่งจะสามารถผันกลับเป็นโครงสร้างรูปแบบเดิมก่อนการถูกกระตุ้นได้ชั่วคราว แล้วกลายเป็นความร้อน เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นในรูปของพลังงานสั่นสะเทือน และความร้อน ในบางครั้งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อน (Hot ground – State reaction) ซึ่งจัดเป็นการเสียคุณภาพโดยความร้อนที่เกิดจากการกระตุ้น โดยคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อนเป็นปฏิกิริยาที่บ่งบอกความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางกายภาพของแสง และกระบวนการเคมีทางแสงได้ [10]

2.1.2.3 กระบวนการเคมีทางแสง [9]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารอินทรีย์มีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกแยกของพันธะ โคเวเลนต์ นำไปสู่กระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยน โครงสร้างทางเคมีอย่างถาวรจึงทำให้สารอินทรีย์เกิดการเสียคุณภาพ โดยทั่วไปพันธะโคเวเลนต์ใน โมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ แต่เมื่อพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจะทำให้ความแข็งแรงของพันธะโคเวเลนต์มีค่าน้อยลง ซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ติดกับพันธะโคเวเลนต์ได้ [9] ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นที่ตำแหน่งที่สามในสายโซ่พอลิเมอร์จะมีพลังงานน้อยกว่าถ้าเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์แทน เช่น พันธะ C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ถูก

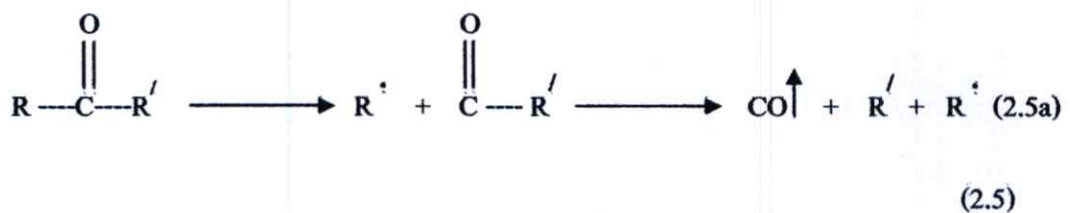
คู่กลืนโคระบบพอลิเมอร์อาจจะเพียงพอที่จะทำให้พันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกออกจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิส ปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.3 โดยจะส่งผลต่อกระบวนการเคมีทางแสง ที่จะนำไปสู่การเสียดคุณภาพในที่สุด ซึ่งกระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกแยก (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็ก ๆ (Elimination of Small molecule) ความไม่อิ่มตัวของโมเลกุล (Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization) การเชื่อมโยงของโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) การออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรลิซิส (Photohydrolysis) เป็นต้น การเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตทำให้เกิดการแตกแยกของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolytic cleavage) โดยเริ่มจากโมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ชนิดหนึ่งไปเป็น โมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดเล็กกว่า 2 โมเลกุล [9] ดังสมการ 2.4



การเกิดโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolysis) ทำให้เกิดผลแบบแยกออกจากกัน (Cage effect) คือ อนุภาคทั้งสองจะต้องมีการเคลื่อนที่มากพอที่จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันและกันอย่างถาวร ไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ ด้วยเหตุนี้ อุณหภูมิ และการแพร่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป ซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญ ได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 (Norrish type I + II) [9]

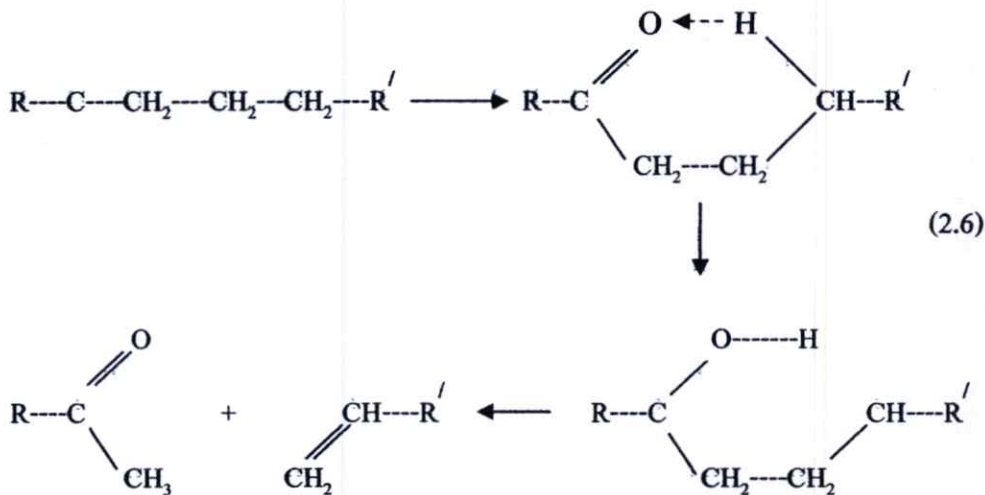
นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I)

สารที่ทำให้เกิดแตกแยกแบบโฟโตไลติกชนิดนี้ จะเกิดเมื่ออยู่ใกล้กับหมู่คาร์บอนิล เป็นผลให้เกิดการเสียดคุณภาพได้โดยตรงดังสมการ 2.5 เมื่อได้อนุภาคแยกออกจากกันแล้ว อนุภาคนี้อาจเข้าทำปฏิกิริยาอื่นต่อไปเพื่อเกิดการเสียดคุณภาพในที่สุด [9]



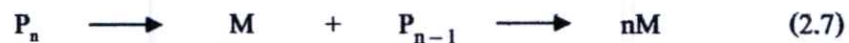
นอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

หมู่คาร์บอนิลซึ่งอยู่ในตำแหน่งแกมมา (Gamma) ของพันธะ C-H สามารถกระตุ้นให้เกิดการแตกแยกโดยผ่านกลไกเชิงซ้อนที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมอยู่ชั่วคราวและมีรัศมีที่สมมาตรกัน ดังสมการ 2.6 ปฏิกริยานอร์ริชแบบที่ 2 เป็นที่นิยมน้อยกว่านอร์ริชแบบที่ 1 แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งระหว่างปฏิกริยานอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลเฉพาะทั้งสองและสภาวะเฉพาะในระหว่างการเสื่อมคุณภาพ [9]



ปฏิกริยาการเสื่อมคุณภาพทางแสง (Photodegradation) ของพอลิเมอร์เป็นผลทำให้เกิดการกำจัดโมเลกุลเล็ก ๆ ออกในรูปของผลิตภัณฑ์ร่วม (By-Products) ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นต้น โดยจะถูกปล่อยออกมาในระหว่างการเสื่อมคุณภาพโดยปฏิกริยานอร์ริชแบบที่ 1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ปฏิกริยาคัดพอลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Depolymerization) หรือปฏิกริยาการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์หลังการเกิดปฏิกริยาซึ่งมีผลทำให้เกิดกระบวนการแตกออก (Unzipping process) ซึ่งเป็นปฏิกริยาผกผันของปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชันของไวนิล ดังสมการ 2.7

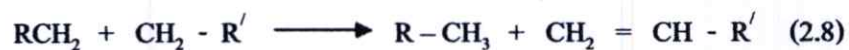


โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่เสถียรมากต้องการพลังงานสลายพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรน้อย แสดงว่าโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์ และพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่พลังงานความร้อนจะมีผลต่อความเสถียรของพอลิเมอร์ เช่นที่อุณหภูมิสูงจะมีผลทำให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ จากการศึกษาพบว่าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่ขาดอะตอมของเทอซีเรียไฮโดรเจน จะมีอนุพลอิสระที่เกิดขึ้นซึ่งจะเสถียรมากกว่าโครงสร้างโมเลกุลแบบอื่น ภายหลังจาก

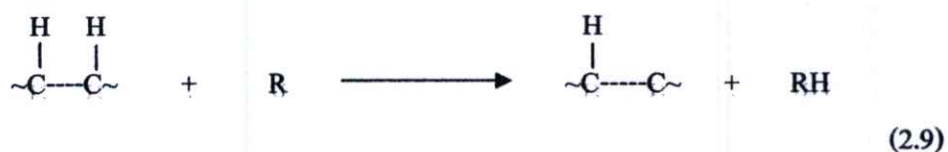
เกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์จะทำให้เกิด โมเลกุลเล็กๆ เช่น มีเทน (Methane) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide) สาร โมเลกุลเล็กๆเหล่านี้อาจใช้ในการวิเคราะห์กลไกของการเสถียรภาพของพอลิเมอร์ได้

บางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจไม่มีการสลายพันธะใน โมเลกุลพอลิเมอร์ แต่เกิดปฏิกิริยาร่วมทำให้โครงสร้างภายใน โมเลกุลเปลี่ยนเป็น โครงร่างคายจอนปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ปฏิกิริยาคังกล่าวได้แก่ ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Dehydrochlorination) ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรแฮโลเจน (Dehydrohalogenation) และปฏิกิริยาการกำจัดแฮโลเจน (Dehalogenation) ออกจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามการเกิดออกซิเดชันโดยแสงจะเกิดช้ามากและไม่สมบูรณ์ เว้นเสียแต่ว่าจะเกิดการเสถียรภาพทางชีวภาพทุกกันไป

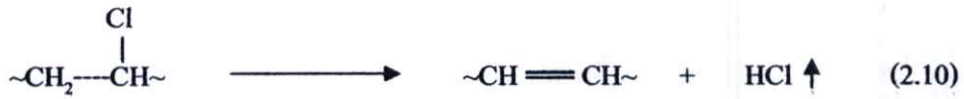
ปฏิกิริยาการเสถียรภาพทางแสงมากมายเกิดจากการเกิดพันธะคู่ของ C=C ที่ไม่อิ่มตัว ปฏิกิริยาที่ควรกล่าวถึงได้แก่ ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 ทำให้เกิดการแตกแยกโดยคิสพรอพอชันเนชันโดยตรงได้เป็นพันธะคู่ C=C ปฏิกิริยาคิสพรอพอชันเนชันระหว่างอนุมูลที่สลายตัว 2 ชนิดที่ทำให้เกิดการสิ้นสุดและเกิดความเสถียรผ่านทางปฏิกิริยาคิสพรอพอชันเนชันแบบเดียวกันกับที่พบเห็นกัน โดยทั่วไปได้แก่ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชันของไวนิล ดังสมการ 2.8



การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระบน โมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้อะตอมใน โมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหดตัวส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวใน โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดังสมการ 2.9

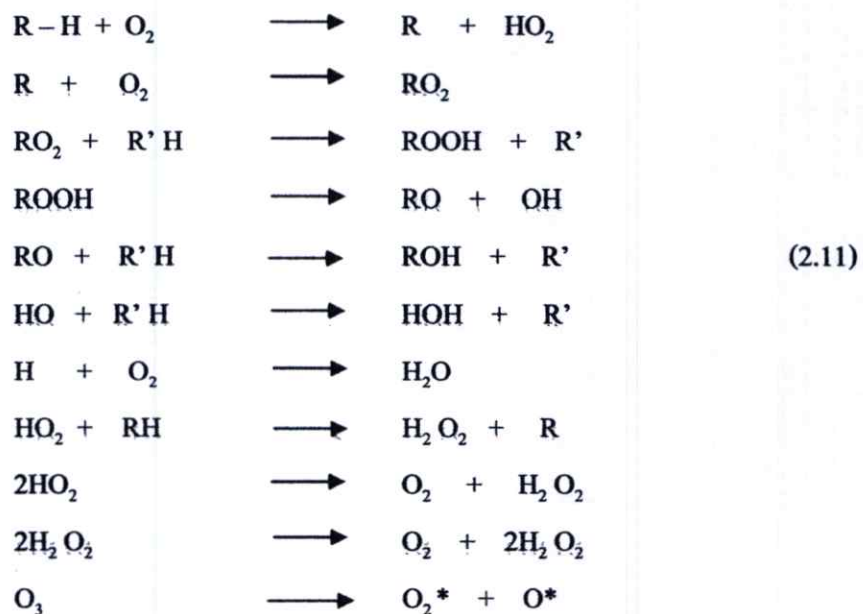


ตัวอย่างการกำจัด โมเลกุลเล็ก ๆ เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เปลี่ยนเป็น โมเลกุลที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว มีผลทำให้เกิดกระบวนการเสถียรภาพได้มากที่สุด



จากปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาจะเกี่ยวข้องกับการแตกแยกของพันธะและการเสียคุณภาพในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้ อาจเกิดเป็นวง หรือ เชื่อมโยง โครงร่างตาข่าย เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงเกิดจากการทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สูงขึ้นและเกิดเป็นเจลในลักษณะ 3 มิติ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาการแตกแยกของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลต่ำๆ เมื่อไรก็ตามที่อนุมูลอิสระในพอลิเมอร์สองตัวเกิดขึ้นและมีเสถียรภาพเพียงพอ หรือมีช่วงชีวิต (Life time) น้อยที่สุด จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุมูลอิสระภายในสายโซ่ก่อนจะสลายตัวต่อไป ซึ่งแนวโน้มที่จะรวมกันเกิดเป็น โครงร่างตาข่ายที่จุดนี้ ซึ่งความสมดุลระหว่างการแตกแยกเป็น โมเลกุลที่เล็กลงกับการเชื่อมโยงของสายโซ่ตาข่ายเป็นร่างแหใหญ่ 3 มิติ จะถูกกำหนดโดยความมีเสถียรภาพสัมพันธ์ระหว่างอนุมูลของพอลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้น (Intermediate polymer) ความง่ายในการเคลื่อนที่ (Migration) และการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) เป็นต้น

ปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดมีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีและทางการทดลอง โดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน แต่ในการทดลองสภาวะของอากาศปกติและแสงอัลตราไวโอเล็ตในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ซึ่งกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตได้มีการศึกษาแล้วว่ามีกรออกซิเดชันรวมอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันเป็น ดังสมการ 2.11



กระบวนการเสียคุณภาพอาจเกิดเป็นแบบผสมระหว่างแสงอัลตราไวโอเลตและการออกซิเดชันได้ด้วย ($RH + O_2 + UV$) โดยสามารถเกิดการกระตุ้นการถ่ายโอนของประจุ (Charge Transfer Excitation) และการกระตุ้นที่เกิดการก่อตัวของออกซิเจนได้เป็นแบบเดี่ยว (Singlet) และแบบสาม (Triplet) และสามารถเกิดการออกซิเดชันด้วยแสงได้ด้วย

พอลิเอสเตอร์และพอลิเอไมด์และโครงสร้างพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เกิดการกระตุ้นด้วยแสง (Photoactivation) และความชื้นในบรรยากาศซึ่งเป็นผลมาจากกลไกของการไฮโดรลิซิส ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการแตกแยกได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจนได้เป็นพวกมอนอเมอร์ และพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

เมื่อศึกษาโดยใช้แถบแสงอัลตราไวโอเลตและการแผ่รังสี ทำให้ทราบว่ากลุ่มโครโมฟอร์จะดูดกลืนคลื่นแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสม เฉพาะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสียคุณภาพของพอลิเมอร์เท่านั้น อย่างไรก็ตามกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงในสภาพอากาศทั่วไป พบว่าในสภาพอากาศปกติจะมีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่กว้าง โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายแบบและซับซ้อนซึ่งทำให้วิเคราะห์และทำความเข้าใจได้ยาก นอกจากการเกิดเสถียรภาพหรือไม่เกิดเสถียรภาพขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

2.1.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการสลายตัว [12]

2.1.3.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน

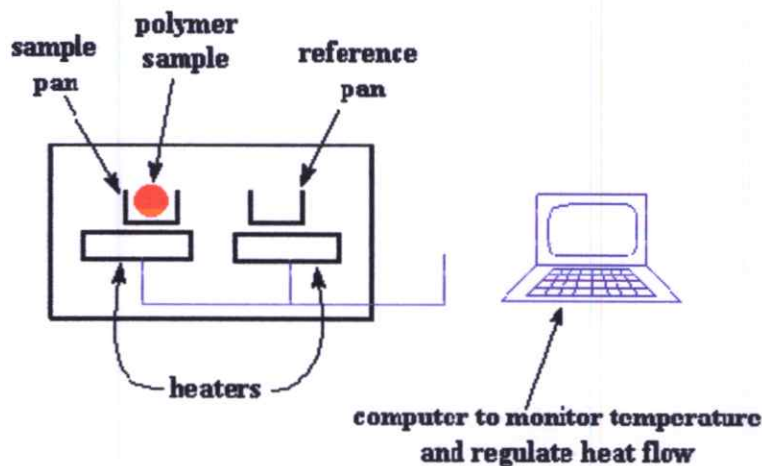
การวิเคราะห์ทางความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ เทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA) หรือเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยจะทำการวิเคราะห์จากชิ้นงานก่อนที่จะทำการทดสอบการสลายตัว แล้วนำมาเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการสลายตัวแล้ว พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการสลายตัวแล้วจะมีส่วนของอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเมอร์ลดลง แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการย่อยสลายลักษณะของอสัณฐานของพอลิเมอร์จะลดลง ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการย่อยสลายก่อน [12]

Differential Scanning Calorimeter เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยวัดปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิต่างๆของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงแล้ว บันทึกข้อมูลทางความร้อนและแสดงผลทางรูปกราฟบนจอคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (melt temperature) ความร้อนของการหลอมเหลว ความจุความร้อนที่ความดันคงตัว และข้อมูลที่ได้จากปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ได้แก่ อุณหภูมิการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึก เป็นต้น [12]

เครื่อง DSC ประกอบด้วยขดลวดต้านทานที่ให้ความร้อน (Heat resistance) อยู่ภายใต้เตาความร้อนสองเตาที่ทำจากแพลตินัม-อิริเดียม (platinum-iridium) ซึ่งเป็นเตามวลต่ำ (low mass furnace) มีประสิทธิภาพตอบสนองต่อความร้อนอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ตั้งแต่ 0.1 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึง

500 องศาเซลเซียสต่อนาที ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -170 องศาเซลเซียส ถึง 725 องศาเซลเซียส สามารถลดหรือเพิ่มอุณหภูมิที่ละ 0.1 องศาเซลเซียส เตาทางด้านซ้ายมือสำหรับใส่ตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ ของแข็ง ของเหลว แผ่นฟิล์ม เส้นใย หรือยางพารา และเตาทางขวาใส่สารอ้างอิง โดยมีลวดต้านทานตรวจวัดอุณหภูมิที่ทำจากแพลตตินัม สำหรับตรวจวัดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสารตัวอย่างและสารอ้างอิง ซึ่งวัดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิได้ถึง 0.00001 องศาเซลเซียส ซึ่งตรวจวัดอุณหภูมิและขดลวดต้านทานที่ให้ความร้อนจะทำงานร่วมกัน [12]

เตาให้ความร้อนทั้งสองฝังอยู่ในซิงค์อลูมิเนียมร้อน (Aluminum heat sink) ซึ่งอยู่ด้านล่างของเครื่อง DSC มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเตาสารตัวอย่าง และเตาอ้างอิงให้อยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันตลอดเวลา โดยมีความเที่ยงตรงของอุณหภูมิ (Temperature precision) และความแม่นยำของอุณหภูมิ (Temperature accuracy) เป็น 0.1 องศาเซลเซียส ถ้าทำการทดลองสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะต้องใส่น้ำเย็นในซิงค์อลูมิเนียม ถ้าทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส จะใช้ใน ไตรเจนเหลวในการทำความเย็นและในขณะที่ทำการทดลองจะต้องปิดเตา เพื่อให้เตาอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่อยู่ในสภาวะก๊าซเฉื่อย [12]



Differential Scanning Calorimeter

2.1.3.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy FTIR)

การใช้วิธี Infrared Spectroscopy ในการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุพลาสติกสามารถยกตัวอย่างได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพลาสติก โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้จากปริมาณของแป้งที่หายไปจากการย่อยสลายซึ่งแป้งจะเป็นส่วนที่เกิดการย่อยสลายได้ก่อนพลาสติก ซึ่งในขณะที่แป้งถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จะเกิดบริเวณที่ผิวของพอลิเมอร์ผสม โดยที่รูเหล่านี้มีการสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งสามารถทำการตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคดังกล่าว [7]

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เป็นหนึ่งในเทคนิคทางด้าน Infrared

Spectroscopic ที่มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมี ในโมเลกุล รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด เทคนิค FTIR นี้มีความไว ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบน้อยกว่าเทคนิคอื่นๆ [12]

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าแสง Visible โดยรังสีอินฟราเรดแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ

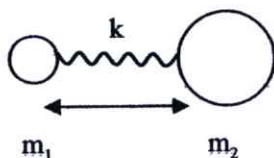
- อินฟราเรดระยะใกล้ (Near IR) แถบการดูดกลืนแสงของโมเลกุลในระยะนี้ส่วนใหญ่เกิดจากโอเวอร์โทน ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่ 0.8 – 2.5 ไมโครเมตร

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

- อินฟราเรดระยะไกล (Far IR) แถบการดูดกลืนแสงอยู่ระหว่าง 50 – 1,000 ไมโครเมตร จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการหมุนของโมเลกุล เนื่องจากพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการทรานซิชั่นมีระดับพลังงานค่อนข้างต่ำ

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 [12]

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



$$\nu = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

เมื่อ V 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 ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าความถี่ของการสั่นระหว่างอะตอมคู่หนึ่งได้

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) มีประโยชน์มากสำหรับการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เมื่อไม่นานมานี้ เพื่อใช้ในงานที่ต้องการความรวดเร็วและความไวสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ Dispersive วิเคราะห์ได้ยากหรือเกือบจะเป็นไปไม่ได้ [12]

2.1.3.3 การตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

การตรวจวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา (Morphology) จะช่วยยืนยันความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้ง ทั้งที่มีการเติมและไม่เติมสารเร่งการสลายตัว โดยตัวอย่างที่จะนำไปวิเคราะห์ต้องนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว ก่อนจะนำไปทำให้แตกหัก แล้วนำตัวอย่างที่หักแล้วไปเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำก่อนการทดสอบ โดยตั้งสถานะของเครื่อง SEM ในการวิเคราะห์ โดยใช้พลังงาน 10 kV scan speed = 8 และกำลังขยาย 5000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ใช้สำหรับดูพื้นผิวของวัสดุตัวอย่าง โดยภาพที่เกิดขึ้นจะเกิดจากลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ผ่านชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้วิ่งลงสู่เลนส์วัตถุที่ทำหน้าที่ปรับโฟกัสบนผิวชิ้นงาน และใช้ชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นงาน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพื่อแปลงเป็นสัญญาณภาพ [12]

เมื่อลำอิเล็กตรอนกระทบกับตัวอย่างจะมีสัญญาณที่สำคัญเกิดขึ้น 3 สัญญาณ คือ

1. การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (Backscattered electron : BSE) เป็นผลมาจากแรงกระทำทางไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนอิสระในลำอิเล็กตรอนกับแวนนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่างที่มีประจุบวกแล้วกระเจิงออกจากพื้นผิวของชิ้นงาน โดยลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจะมีพลังงานสูง

2. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอิเล็กตรอนที่อยู่ภายใน (inner shell) ของอะตอมตัวอย่าง อิเล็กตรอนชนิดนี้จะคายออกมาจากตัวอย่างและมีพลังงานต่ำ

3. รังสีเอ็กซ์ (x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนในวงในของอะตอมตัวอย่างหลุดหายไป ทำให้อะตอมที่อยู่ภายนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเข้ามาแทนที่แล้วคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ โดยสัญญาณทั้งหมดจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังนั้นการตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือตรวจวัด (Detector) ที่ใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [12]

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นหลอดทั้งสแตนท์ถูกทำให้ร้อน หรืออาจใช้แลนทานัม เฮกซะ โบรไรด์ (LaB₆) โดยจะต้องให้ลำอิเล็กตรอนมีพลังงานเพียงค่าเดียว

2. ชุดคอนเด็นเซอร์เลนส์ (Condenser lens) ใช้เพื่อปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดตามต้องการ

3. ชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (Scanning coil) ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดที่ละตำแหน่งจนกระทั่งได้ข้อมูลทั้งภาพ

4. เครื่องตรวจวัด (Detector) ใช้ตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น สามารถใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับความต้องการในการตรวจวัด เช่น secondary electron detector จะใช้ในการตรวจวัดสัญญาณที่เป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำ โดยเรียกสัญญาณภาพที่เกิดขึ้นว่า secondary electron image (SEI)

5. จอแสดงภาพ (Cathode ray tube) จะเป็นอุปกรณ์ที่แสดงภาพที่ได้จากเครื่องมือวัด

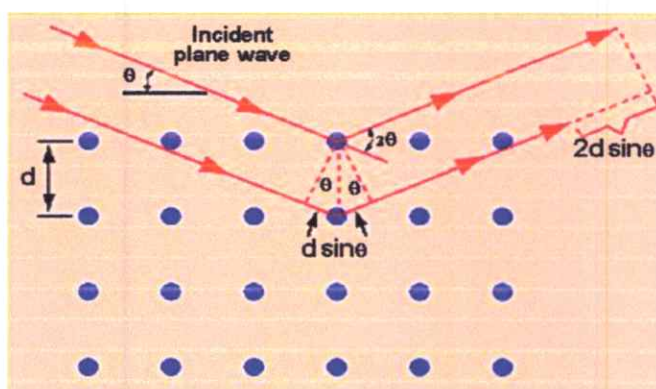
2.1.3.4 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg เทคนิคนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ คีเอ็นเอ รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น [12]

XRD เป็นเทคนิคที่คอยเสริมเทคนิค spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence; XRF) โดยที่ XRF จะสามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร [12]

หลักการพื้นฐานและวิธีการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ.1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ θ รังสีเอ็กซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ(เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อน θ เท่ากับมุมตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่ง ความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่างๆ ถูกเสนอในรูปแบบการ " Bragg's Law "



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

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

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

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้สมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก โดยวัสดุที่เป็นผลึก คือ วัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึกซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg [12]

2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends) [13]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ พอลิเมอร์ผสม ซึ่งหมายถึงการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม ทั้งนี้การผสมกันของพอลิเมอร์มีประโยชน์หลายประการ เช่น

- เพื่อให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีขึ้น แต่มีราคาถูกลง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่น การทำพอลิเมอร์ผสมของเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานต่อแรงกระแทกได้สูงกับอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ซึ่งไม่เปราะแต่มีความแข็ง (Stiffness) ต่ำ เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติรวมแตกต่างจากสมบัติพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น สภาพในการผสม สมบัติการไหล สัมฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ
- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- เพื่อช่วยประสิทธิภาพในกระบวนการผสมของอุตสาหกรรมการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น นำเศษพลาสติกหลายๆชนิดกลับมาขึ้นรูปใหม่

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [12] คือ

1. พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) พอลิเมอร์ประเภทนี้เป็นการนำพอลิเมอร์ที่มีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกันมาผสมกันแล้วทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

2. พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะแยกออกจากกันเป็น 2 ภูมิภาคอย่างชัดเจน โดยที่พอลิเมอร์ที่มีปริมาณน้อยเป็นภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) พอลิเมอร์ที่มีปริมาณมากเป็นภูมิภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จัดอยู่ในประเภทนี้ เช่น พอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน เป็นต้น

3. พอลิเมอร์ที่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้บางส่วน (Partially miscible blend) พอลิเมอร์ผสมประเภทนี้จะรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้บางส่วนเท่านั้น และส่วนที่เหลือจะไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งถ้าจะทำให้พอลิเมอร์รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด ต้องใช้ปริมาณของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่นำมาผสมไม่เท่ากัน โดยต้องมีพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งน้อยกว่า ถ้าอัตราส่วนเท่ากันจะแยกออกเป็น 2 ภูมิภาค พอลิเมอร์อาจจะแทรกเข้าไปอยู่ในระหว่างผิวของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งจะช่วยให้ภูมิภาคมีแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้มีสมบัติ

2.2.1 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้

(Miscibility and Compatibility) [9]

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับโมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวคือ เมื่อสามารถละลายเข้ากันได้จะทำให้เกิดระบบภูมิภาคเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด และโดยทั่วไประบบภูมิภาคเนื้อเดียวจะมีความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับสัดส่วนความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ

ซึ่งการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการค้า ซึ่งต้องใช้หลักการในการผสมและความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (Molecular miscibility) จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิดได้แก่

- น้ำหนักโมเลกุล
- ความเป็นผลึกมีค่าเป็นศูนย์
- ความมีขั้วคล้ายกัน
- พันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ในระดับโมเลกุล อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ไม่ละลาย (Immiscible) ในระดับโมเลกุลและแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (Strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาค และเกิดเป็นคุณสมบัติของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถได้จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง [9]

การเติมสารช่วยผสม แบ่งเป็น 2 ชนิด [9] คือ

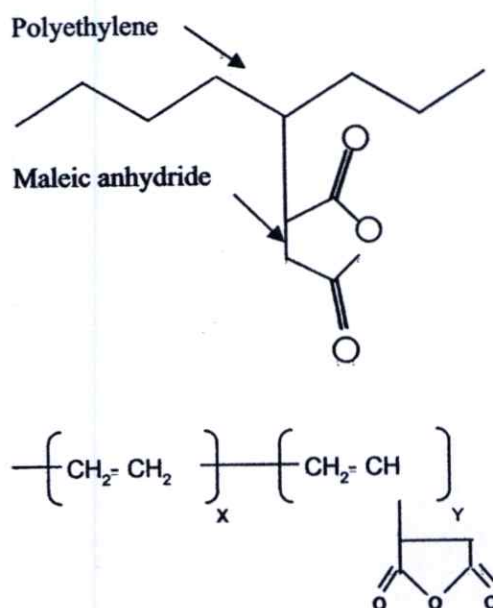
1. Non-reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้สารช่วยผสมควรมีสตอร์ โครงสร้างเหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ ดังนั้นสารช่วยผสมที่ใช้ต้องเป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบคอกิ่ง (Graft copolymer) แบบโคบล็อก (Diblock copolymer) แบบไตรบล็อก (Triblock copolymer) หรือแบบสุ่ม (Random copolymer)

2. Reactive blending เป็นการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์แบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดการคอกิ่งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

โดยสารช่วยผสมอาจเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกหรือกราฟท์ ซึ่งสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม ทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้าน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุลสูงมากเกินไป ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปพอลิเมอร์ผสมก็ต่ำเช่นเดียวกัน

สำหรับการวิจัยนี้จะมีการเติมสารฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226 ดี (Fusabond MB 226D) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคอกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MAPE : Maleic anhydride Grafted Polyethylene) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสม

กับวัสดุอื่นที่มีขั้ว มักมีสมบัติต้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้ โดยการเติมสารอีกชนิดหนึ่งลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ [13] มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีน เป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้เสถียรภาพเมื่อได้รับแสงยูวีเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มสภาพความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีนทำให้สภาพความเป็นขั้ว (Hydrophilicity) เพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น [14]

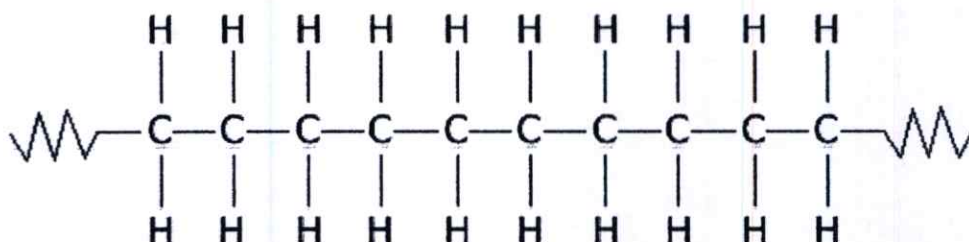
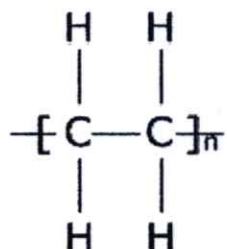


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพีวซาบอนด์ [15]

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene PE) [15]

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกสังเคราะห์จำพวกเทอร์โมพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา เมื่ออยู่ในรูปแผ่นบางสามารถพับงอได้ดี เมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจะคงรูปรับแรงดึงและแรงอัดได้น้อย มีความยืดตัวได้สูงถึง 500 เปอร์เซ็นต์ลักษณะขาคายก มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ไม่เกาะติดน้ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีมาก ทนความร้อนได้น้อยแต่ทนความเย็นได้ดี โดยไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลง ทนกรดและด่างอ่อน ไม่ทนน้ำมันและไขมัน โดยเฉพาะน้ำมันก๊าด น้ำมันเบนซิน แม้ว่าจะไม่ดูดซับความชื้นแต่ยอมให้ก๊าซผ่านได้ จึงเหมาะสมสำหรับใช้บรรจุอาหารสดต่างๆ เช่น ผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์ นอกจากนี้ยังไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามก็ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์หลายๆ ชนิด ณ อุณหภูมิประมาณ 50-70 องศาเซลเซียส [14] โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนจะมีลักษณะใสเมื่อเป็นแผ่นบางแต่จะมีสีขุ่นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น สามารถทำเป็นสีต่างๆ ได้ตามต้องการ โมเลกุลของพอลิเอทิลีนไม่มีกรุปที่มีขั้ว (Polar Groups) เลยจึงมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติการยึดออกได้มาก โดยไม่กินสู่อสภาพเค็ม ณ อุณหภูมิสูงๆพอลิเอทิลีนจะหมด

ความแข็งแรงและอ่อนตัวลง ส่วนผิวหน้าของพอลิเอทิลีนค่อนข้างมันคล้ายมีไข ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการพิมพ์ ตกแต่ง ต้องเตรียมผิวด้วยการลนด้วยเปลวไฟหรือเปลวไฟจากแก๊สหุงต้ม เพื่อให้เกิดออกไซด์ที่บนหน้าอีกชั้นหนึ่งก่อนหรืออาจทำการกัดผิวหน้าด้วยสารเคมี [14] สูตร โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สูตร โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [16]

ลักษณะของพอลิเอทิลีนที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นดัชนีบ่งบอกถึงสมบัติทางกายภาพและเชิงกลซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปอิทธิพลของลักษณะเม็ดพลาสติกข้างต้นที่มีต่อสมบัติต่างๆ สำหรับพอลิเอทิลีนได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สรุปอิทธิพลของลักษณะของเม็ดพลาสติกที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของพอลิเอทิลีน[17]

สมบัติ	ความหนาแน่น ของพอลิเอทิลีน	ดัชนีการหลอมไหล ของพอลิเอทิลีน
ความเหนียวของพลาสติกหลอมเหลว	ไม่เปลี่ยนแปลง	ลดลง
อุณหภูมิ ณ จุดอ่อนตัว	เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	ลดลงเล็กน้อย
การทนแรงดึงที่จุดคราก	เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	ลดลงเล็กน้อย
การทนแรงดึงที่จุดขาด	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย	ลดลง
เปอร์เซ็นต์การยืดเมื่อรับแรงดึง	ลดลง	ลดลง
ความทรงรูป	เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว	ลดลงเล็กน้อย
การทนแรงกระแทก	ลดลง	ลดลง
ความแข็งที่ผิว	เพิ่มขึ้น	ลดลง
การทนต่อสภาพแวดล้อม	ลดลง	ลดลง
การซึมผ่านของก๊าซ	ลดลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
การไหลตัวของพลาสติกเหลว	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย	เพิ่มขึ้น
ความเสถียรภาพของลูกโป่ง	ลดลงเล็กน้อย	ลดลง
ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (การทนสารเคมี)	ลดลง	ลดลง
การทนอุณหภูมิสูง	เพิ่มขึ้น	ลดลงเล็กน้อย
ความใส	ลดลง	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
ความมันเงาของผิว	ลดลง	เพิ่มขึ้น

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) อาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนที่มีสาขาโซ่ (Branched Polyethylene) เพราะ โครงสร้างประกอบด้วยโซ่ยาวของ CH_2 ที่มีการแตกกิ่งก้านสาขาออกไป โดยจะมีทั้งกิ่งสั้น (Short Chain Branch : SCB) และ (Long Chain Branch : LCB) หรืออาจเรียกว่า พอลิเอทิลีนความดันสูง (High Pressure Polyethylene) เพราะกระบวนการผลิตใช้ความดันสูงมาก [15] โดยมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [18,19,20,21]

สมบัติ	หน่วย	ASTM	LDPE
ความถ่วงจำเพาะ	-	D792	0.91-0.93
ความเป็นผลึก	%	-	50.0-70.0
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	$^{\circ}\text{C}$	-	-120
อุณหภูมิหลอมเหลว	$^{\circ}\text{C}$	-	98.0-120.0
อุณหภูมิสลายตัว	$^{\circ}\text{C}$	-	340-440
ความแข็งแรงดึง	MPa	D638	4.10-16.0
มอดุลัส	GPa	D638	0.10-0.26
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด	%	D638	90.0-800.0
ความทนแรงฉีกขาด	g/25 μm	-	200-300
ความแข็งแรงกระแทก , Notch Izod	ft/lb/in notch	-	>16
อุณหภูมิเบี่ยงเบนทางความร้อน	$^{\circ}\text{C}$	D648	38.0-49.0
การซึมผ่านของน้ำ	%	-	<0.01
การทนการเผาไหม้	-	-	เผาไหม้ได้เปลวไฟ สีน้ำเงิน

สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณของสาขาโซ่ โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกต่ำ สมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น จุดหลอมเหลวและความแข็งก็ต่ำลงด้วย เพราะความหนาแน่นที่ต่ำกว่านี้เองทำให้การแพร่ผ่านของก๊าซและความชื้นสูงกว่า อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยกระบวนการใช้ความดันสูง จะมีความเป็นผลึกปานกลาง (ทั่วไปมีความเป็นผลึก 50-60 %) มีจุดหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 110 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 0.91-0.925 g/cm^3 ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทั้งสิ้นที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ในตัวทำละลายจำพวกไฮโดรคาร์บอน [18]

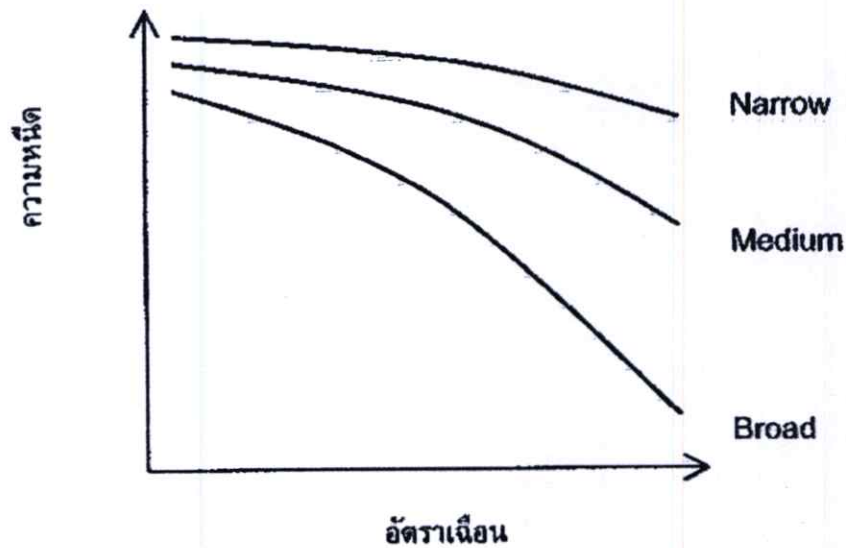
นอกจากนี้พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่านี้ มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมและเฉื่อยเป็นพิเศษต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป สามารถทนต่อกรดและด่างได้เป็นอย่างดี เมื่อให้พอลิเมอร์นี้สัมผัสกับแสงแดดและออกซิเจนเป็นเวลานานๆ พอลิเมอร์นี้จะเสื่อมคุณภาพได้ เช่น สูญเสียความแข็งแรง ความสามารถในการยืดหยุ่นและความสามารถในการต่อต้านการสึกหรอและฉีกขาด ทั้งนี้ เป็นเพราะเกิดการสูญเสียอะตอมของไฮโดรเจน [19]

สมบัติต่างๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Average Molecular Weight) ปริมาณการเกิดผลึก (Crystallinity) และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight Distribution : MWD) หากใช้กระบวนการสังเคราะห์ที่เหมาะสมจะได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ความหนาแน่นและการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลตามต้องการ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดที่ใช้ในการผลิตฟิล์มจะมีค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index : MI) อยู่ในช่วง 0.1-20 กรัม/10 นาที ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (MI ต่ำ) จะได้ฟิล์มที่มีความทนแรงดึงและทนแรงกระแทกสูงแต่สมบัติทางแสงจะลดลง อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากมีความหนืดและจุดหลอมเหลวสูง [19]

กิ่งยาวๆ (LCB) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีอิทธิพลต่อการเกิดผลึกและความหนาแน่นน้อยมาก แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวมากขึ้น ทั้งนี้เพราะกิ่งยาวๆ (LCB) จะเพิ่มการพันกันของสายโซ่โมเลกุลมีผลทำให้เสถียรภาพของลูกโป่ง (Bubble Stability) เพิ่มมากขึ้น ไม่แตกง่ายในขณะเป่าฟิล์ม

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลจากต่ำไปจนถึงสูงมาก ซึ่งการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นการอัตรการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่โมเลกุลเหล่านี้ ซึ่งจะมีทั้งการกระจายที่กว้างมาก (Broad) กว้างปานกลาง (Medium) หรือแคบ (Narrow)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถมีดัชนีการไหล และความหนาแน่นเท่ากันได้ แต่จะมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน เมื่อนำพอลิเมอร์ที่มีค่าการกระจายของน้ำหนักโมเลกุล นำไปเป่าเป็นฟิล์มจะมีลักษณะที่แตกต่างกันรวมทั้งสมบัติของฟิล์มที่ได้จะแตกต่างกันด้วยโดยรูปที่ 2.4 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติการไหลหรือ ความหนืดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 3 ชนิด ที่มีดัชนีการไหลเท่ากัน แต่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน จะเห็นว่าพอลิเมอร์ที่มี MWD กว้างจะไวต่ออัตราเฉือน (Shear Rate) มากกว่า ดังนั้น เมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลงมากกว่าพอลิเมอร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบ [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติการไหลหรือความหนืดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 3 ชนิด ที่มีดัชนีการไหลเท่ากัน แต่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน [22]

สมบัติทางกายภาพของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไม่ได้ขึ้นกับสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเมอร์เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับสถานะของกระบวนการขึ้นรูปอีกด้วย สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จะเปลี่ยนแปลงไปตามดัชนีการไหล ความหนาแน่น และการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลฟิล์มที่ได้จากกระบวนการเป่าฟิล์มจะมีการจัดเรียงตัวตามแนวขวางมากขึ้นในขณะที่ถูกโป่งขยายออก ฟิล์มที่ได้จึงมีความทนแรงกระแทกมากขึ้นและมีสมบัติการหดตัวดีขึ้น [22] ในงานขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไปจะใช้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์มาพิจารณาเพื่อเลือกใช้กระบวนการผลิตให้เหมาะสม พอลิเมอร์ที่มีค่าดัชนีการไหลสูงๆ จะนิยมใช้ในงานฉีด เพราะพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ได้ง่าย ค่าดัชนีการไหลต่ำๆ จะใช้ในงานเป่า นอกจากนี้งานในแต่ละประเภทยังมีการนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ไปอีกจึงจำเป็นต้องพิจารณาสมบัติอื่นๆ ประกอบไปด้วย

เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีจุดหลอมเหลว (Melting Point) ประมาณ 110 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัว (Softening Point) 40-50 องศาเซลเซียส [20] จึงไม่ควรนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูงนั้น คือ ไม่เหมาะที่จะทำภาชนะบรรจุอาหาร ร้อนๆ เหมาะจะใช้ทำถุงเย็น เช่น ใส่อิสเลียง ซาค้าเย็น กาแฟเย็น อื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ในตู้เย็นไม่ว่าจะเป็นช่องแช่แข็งหรือช่องธรรมดา เอาไว้ใส่พลาสติก กุ้งสด อาหารทะเลสดโดยไม่กรอบแตก เป็นต้น

2.4 แป้ง (Starch) [11]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในโภชนาการของมนุษย์ แต่จากสมบัติเฉพาะตัวของแป้งจึงได้นำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

แป้งเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสและไม่ละลายในน้ำเย็น ถ้าส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นแป้งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งโดยทั่วไปแป้งจะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบมากที่สุด รองลงมาคือ โปรตีน นอกจากนี้ยังมีไขมัน เถ้า วิตามิน สารสี เอนไซม์และความชื้น [11]

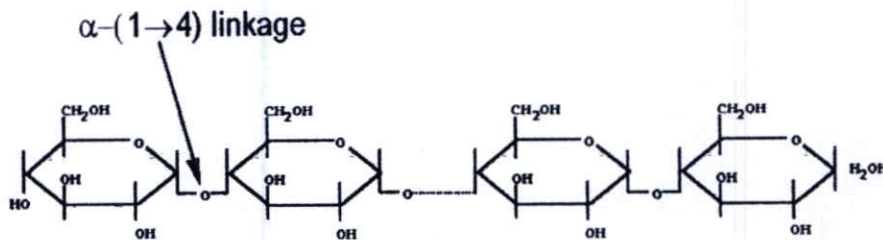
แป้งในการผลิต หมายถึงคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก แต่เมื่อสิ่งเจือปนถูกขจัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่า แป้ง (Starch) เนื่องจากแป้งมีความบริสุทธิ์สูง จึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในรูปของสารเคมีเพื่อการทำปฏิกิริยามากมาย [11]

2.4.1 โครงสร้างแป้ง

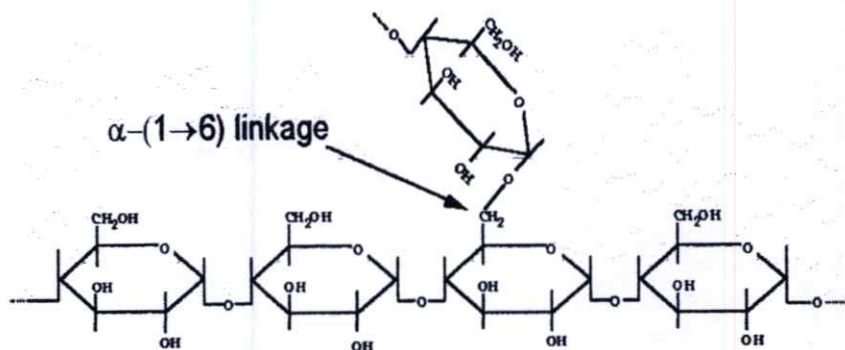
แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสซึ่งประกอบด้วยหน่วยของแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่หนึ่งทางด้านคอนปลายของสายพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสบางชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) [11]

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-Glucosidic linkage ลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีความยาวค่อนข้างมาก อะไมโลสไม่ละลายน้ำ แต่เมื่อเติมน้ำลงไป อะไมโลสจับคู่กับอะไมโลส โมเลกุลอื่นๆเป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นโครงสร้างตาข่ายที่มีขนาดใหญ่ ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลสตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐานและส่วนผลึก โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะม้วนเป็นเกลียว (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือเรียงตัวอย่างอิสระ (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิสูงอะไมโลสจะอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวคลายตัว [23]

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์โซ่กิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-Glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาเป็นพอลิเมอร์สายสั้นมีระดับการเกิดพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-Glucosidic linkage และมีปริมาณร้อยละ 5 ของหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักประมาณ 100 เท่าของอะไมโลส [23]



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส [22]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน [22]

2.4.2 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง [24]

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์สูง โดยจะมีสตาร์ชอยู่มากกว่า 95 % ของน้ำหนักแป้ง และมีปริมาณ โปรตีนและไขมันอยู่น้อยกว่า 1 % ของน้ำหนักแป้ง ลักษณะของเม็คแป้งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีรูปร่างเป็นเม็คกลมหรือรูปไข่และอาจมีรอยบุ๋มที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ค เม็คแป้งส่วนใหญ่จะมีขนาดปานกลางอยู่ในช่วง 3-40 ไมครอน มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 12-15 ไมครอน และมีปริมาณผลึกประมาณ 15-18% ของโมเลกุลแป้ง

แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะไมโลสปริมาณค่อนข้างต่ำคือ 18-23%ของน้ำหนักแป้ง และมีขนาดต่างๆกัน โดยมีค่าองศาพอลิเมอร์ไรเซชันประมาณ 1100-3220 หน่วย โครงสร้างของอะไมโลสจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงและส่วนที่เป็นโซ่กิ่ง [24]

สมบัติในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำเป็นสมบัติที่สำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้รับความร้อน พลังงานความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปจับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระของเม็ดแป้งได้ เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสต่ำจึงมีการพองตัวที่ดี และมีความสามารถในการละลายประมาณ 35 % ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ลักษณะการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างๆ จะเป็นขั้นตอนเดียว (Single stage swelling) ในระหว่างที่ให้ความร้อนกับเม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำและเม็ดแป้งเริ่มดูดซึมน้ำจากภายนอกนั้น เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวพร้อมๆกับที่เม็ดแป้งสูญเสียความสามารถในการเบี่ยงเบนแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ลักษณะเช่นนี้ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งเป็นแบบผันกลับไม่ได้ โดยปกติเม็ดแป้งที่พองตัวเมื่อได้รับความร้อน เม็ดแป้งจะเปลี่ยน ไปอยู่ในรูปของแป้งเปียก (Paste) ที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเมื่อแป้งเปียกเย็นลงจะเกิดเป็นเจลขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลจะอยู่ในช่วง 58-70 องศาเซลเซียส แป้งเปียกที่เกิดขึ้นจะไม่คงตัวมากนักซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้แป้งมันสำปะหลัง จึงจำเป็นต้องมีการคัดแปรแป้งเพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก ทำให้เมื่อเย็นตัวลงความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะไมโลสต่ำ แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวต่ำ และให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใสและไม่ทึบแสง [24]

2.4.3 การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ [11]

การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเลือกใช้แป้งให้เกิดประโยชน์ได้สูงสุด ซึ่งในการใช้งานในลักษณะดังกล่าวสามารถทำการแบ่งได้ออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

2.4.3.1 การใช้แป้งเป็นวัสดุโดยตรง

การใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักในการผลิตเป็นวัสดุ จะทำได้โดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยแป้งเป็นลักษณะแป้งผสมน้ำ (Dough) จะถูกอัดรีดผ่านรูทางออกหรือคाय (Die) และเกิดการพองตัวเนื่องจากความดันลดลง จากนั้นพอลิเมอร์ที่ไหลออกมา จะเกิดการเย็นตัวและได้ของแข็งที่มีรูพรุนสำหรับอุ้มอากาศได้ สำหรับแป้งที่ใช้ในการเตรียมอาจเป็นแป้งที่ผ่านกระบวนการแปรรูปหรือไม่ผ่านก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ นอกจากนี้ยังอาจมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่นความหนาแน่น [11] เป็นต้น

2.4.3.2 การใช้แป้งเป็นสารตัวเติม

การใช้แป้งเป็นสารตัวเติมผสมลงไปในพลาสติกจะทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแป้งซึ่งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพลาสติก (ซึ่งอาจจะเกิดการย่อยสลายได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกนั้นๆ) โดยแป้งที่ใช้ผสมลงไปในที่นี้อาจจะมีได้ 2 ลักษณะ คือ ในรูปของเม็ดแป้งและในรูปของเจล ในกรณีที่ใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิเอทิลีนซึ่งงานที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายจะไม่เกิดการย่อยสลายโดยสมบูรณ์ จากนั้นส่วนที่เหลือจะถูกทำลายด้วยวิธีต่างๆ เช่น แรงทางกล การย่อยสลายทางเคมี [11] เป็นต้น

2.4.3.3 การใช้งานในรูปของเม็ดแป้ง

การใช้งานในรูปของเม็ดแป้ง จะทำการผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของแป้งในเนื้อพลาสติก จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งเกิดการแตกตัวออก โดยก่อนการทำการผสมแป้งจะถูกทำให้แห้งจนความชื้นที่เหลืออยู่น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีด หรือบางครั้งอาจมีการให้เม็ดแป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผิวของเม็ดแป้งเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างแป้งกับพลาสติก และนอกจากนี้อาจมีการเติมสารเอสเทอร์ที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated ester) เช่น น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean) หรือน้ำมันข้าวโพด (Corn oil) ซึ่งเป็นสารเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Auto oxidant) ซึ่งจะช่วยให้การย่อยสลายของพลาสติกดีขึ้น โดยสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะ (Metal salt) ภายในดินจากสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะไปย่อยสลายสารพอลิเมอร์ให้เป็นสาร โอลิโกเมอร์ (Oligomer) [11] ที่เล็กลง

2.4.3.4 การใช้งานในรูปของแป้งเจล

การใช้งานในรูปของแป้งเจล (Gelatinized starch) จะต้องทำให้แป้งผ่านกระบวนการเจลาติไนท์ก่อน แล้วจึงนำแป้งเจลไปผสมกับพลาสติกและขึ้นรูปต่อไป จากการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิคาโพลีเอทิลีน ซึ่งเลือกใช้รูปแบบต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของเม็ดแป้งและแป้งเจลด้ากว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทั้งประเภทเม็ดแป้งและแป้งเจลจะไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งในรูปแป้งเจลสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า [11]

2.4.3.5 การใช้แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติก

การเติมแป้งในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณมากมักทำให้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวขึ้นรูปได้ยาก เนื่องจากความหนืดสูงและชั้นงานที่ได้มีความเปราะ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติ

ดังกล่าว โดยการเติมน้ำลงไปผสม ซึ่งในที่นี้น้ำจะทำหน้าที่เป็นคล้ำยสารเพิ่มสภาพพลาสติกช่วยให้ความหนืดลดลงและแป็งกลายเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous) โดยเรียกแป็งที่อยู่ในรูปนี้ว่า แป็งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) ในการเตรียมแป็งเทอร์โมพลาสติกจะทำการคัดแปรโครงสร้างทางกายภาพ โดยทำให้เม็ดแป็งเกิดการแตกออกทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นผลึก จากนั้นจึงนำแป็งที่ได้มาผ่านเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิสูงก็จะได้เทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีความเป็นผลึกของแป็งเหลืออยู่เลย [11]

2.4.4 การย่อยสลายทางชีวภาพของแป็งโดยเชื้อรา (Biodegradation by Fungi) [11]

เชื้อราสามารถเข้าทำลายหรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยด้า

2.4.4.1 การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่นการกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในทางอาชญาศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2.4.4.2 การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองเป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือ รอยด้าดำซึ่งเกิดขึ้นบนสิ่งทอ ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยด้า (Soiling) ซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราเอง และเชื้อราก็ทำให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่ไปรงแสงจนทึบ หรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยด้าดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยด้าของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้ว โดยการเจริญของเส้นใยเชื้อรา สืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะ จากที่ได้รับจากอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโดยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ เอนไซม์สำคัญที่เชื้อจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายแป็งและน้ำตาล [11] มีดังนี้

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

- กลูโคส - อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ในโมเลกุลของแป็งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่อนรีควิง และสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,6 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพกติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป็งและเดกตรินไปเป็นกลูโคส

- เบต้า - อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลายโซ่อนรีควิ่ง

2.4.5 การย่อยสลายของแป้งโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatical Hydrolysis) [11]

แป้งย่อยโดยใช้เอนไซม์เป็นแป้งคัดแปรที่ได้จากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลิตโดยผสมสารละลายแป้งกับเอนไซม์ นำไปเจลาติไนซ์โดยใช้ Direct steam injection (jet-cooker) เมื่อเอนไซม์ย่อยถึงระดับที่ต้องการ หยุดปฏิกิริยาเอนไซม์โดยเพิ่มอุณหภูมิภายใน cooker ให้สูงขึ้น เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้งมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งคัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรุกโตส ไฮโดรแลกซ์ทริน เมื่อพิจารณาตามลักษณะของการทำงานของเอนไซม์ จะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

2.4.5.1 เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo-enzyme)

เบต้าอะไมเลส พบเอนไซม์นี้ในพืชชั้นสูง เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวสาลี และพบได้ในถั่วหรือมันฝรั่งหวานจัดเป็น Extracellular enzyme ในเชื้อจุลินทรีย์ เช่น *Bacillus cereus* เป็นต้น เบต้าอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะจากด้านนอกเข้ามาด้านใน โดยเริ่มจากปลายของอะไมเลส หรืออะไมโลเพคตินจากปลายด้านที่ไม่คุณสมบัติรีควิ่ง เอนไซม์จะตัดพันธะแอลฟา -1,4 ไกลโคซิดิกของโมเลกุลกลูโคสเป็นคู่ ๆ ไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลมอลโตสดังรูป เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50 กิโลดาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{++}) ร่วมทำกิจกรรม เอนไซม์ชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 125-150 กิโลดาลตัน มีความเสถียรภาพที่พีเอช 4-9 และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส [11]

เอนไซม์กลูโคสอะไมเลส สามารถผลิตได้จากเชื้อราในสกุล *Aspergillus*, *Penicillium* และ *Rhizopus* ยีสต์และแบคทีเรีย กลูโคสอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ตัดน้ำตาลกลูโคสที่จับกันด้วยพันธะแอลฟา -1,4 ไกลโคซิดิก และพันธะกิ่งแอลฟา -1,6 ไกลโคซิดิก โดยการตัดพันธะกิ่งจะเกิดขึ้นช้ากว่าการตัดพันธะแอลฟา -1,4 ไกลโคซิดิก ถ้าการย่อยเกิดอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ กลูโคส ดังรูป เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50-110 กิโลดาลตัน มีความเสถียรที่ pH 3.5-5 และที่อุณหภูมิ +/- 55°C [11]

2.4.5.2 เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo-enzyme)

แอลฟาอะไมเลส จัดเป็น extracellular enzyme คือเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตและถูกขับออกมานอกเซลล์ พบได้ในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์หลายชนิด เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายในโมเลกุลแป้ง โดยจะย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา -1,4 ไกลโคซิดิก ดังแสดงในรูป แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา -1,6 ไกลโคซิดิก ที่ตำแหน่งกิ่งก้านของแป้งได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง คือ มอลโตส (Maltose) กลูโคส (Glucose) และลิมิตเดกซ์ทริน

(Limitextrin) เอนไซม์ชนิดนี้มีมวลโมเลกุลประมาณ 50 กิโลดาลตัน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนร่วมทำกิจกรรม เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 5.5-9 และที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในทางอุตสาหกรรมจะใช้เอนไซม์ที่ได้จากเชื้อราและแบคทีเรีย เมื่อใช้แอลฟาอะไมเลสในการย่อยแป้งจะทำให้ความหนืดและความสามารถในการข้อมดิลีไอโอซินลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ Reducing power เพิ่มขึ้นด้วย [7]

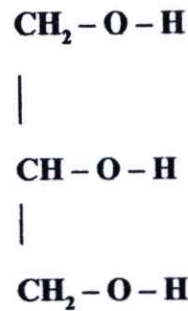
เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง เช่น ไอโซอะไมเลส เป็นเอนไซม์ที่ข่อยจุดที่เป็นกิ่งก้านของไกลโคเจนและอะไมโลเพคตินได้ดี ไอโซอะไมเลสไม่ต้องการโคแฟกเตอร์ในการทำงาน สามารถดำเนินกิจกรรมได้ดีในช่วงพีเอช 3-4 และมีความเสถียรที่อุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถแยกได้จากพืชสัตว์ และจุลินทรีย์

พุลูลานเนส เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิกของพุลูลาน และ อะไมโลเพคติน แต่การทำกิจกรรมไม่สมบูรณ์เท่ากับการย่อยโดยไอโซอะไมเลส และทำกิจกรรมกับไกลโคเจนได้ยากสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2-3 หน่วย ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย เอนไซม์ชนิดนี้พบได้ในพืช สัตว์และแบคทีเรีย เอนไซม์มีความเสถียรที่พีเอช 4.5-5.5 และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส [7]

2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [20,25]

พลาสติไซเซอร์ ตามนิยามของ IUPAC หมายถึง สารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติกหรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomer) แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนการใช้งาน และการยืดตัวของพลาสติไซเซอร์แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปในการสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติไซเซอร์ไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโคเวเลนต์ทุติยภูมิ (Secondary covalent) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันอ่อนลงเกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว และพลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารเติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารร่วมช่วยในการเกิดพอลิเมอร์ร่วม (Copolymerization)

สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดี นอกจากนี้ควรไม่มีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติไซเซอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำผลิตภัณฑ์ให้แห้ง พลาสติกที่ดีต้องมีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถทนความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน โดยพลาสติไซเซอร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอ (Mono) ไค (Di) และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosacaride) พอลิอล (Polyol) และลิพิด (Lipid) หรืออนุพันธ์ของลิพิด ในที่นี้จะกล่าวถึงกลีเซอรอลดังแสดงในโครงสร้างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างกลีเซอรอล (Glycerol) [26]

กลีเซอรอลมีสมบัติดังนี้ คือ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เป็นแอลกอฮอล์ที่มีรสหวาน สูตรโมเลกุล คือ $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ความถ่วงจำเพาะ 1.26 มีจุดเดือดที่ 290°C และมีจุดหลอมเหลวที่ 18°C กลีเซอรอลเหลวด้านการแข็งตัว เป็นผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ละลายในน้ำได้บางส่วน ละลายในแอลกอฮอล์ได้ดี ไม่ละลายในอีเทอร์และสารอินทรีย์อื่นๆ กลีเซอรอลมีลักษณะพิเศษ คือ สามารถเกิดเป็นสารประกอบทำให้มวลโมเลกุลสูงขึ้น เช่น กลีเซอรินจะหมายถึงกลีเซอริน (กลีเซอรอลละลายในสารละลายอื่น) หรือสารละลายที่เตรียมได้จากกลีเซอรอล ไขมันและน้ำมันเป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับกลีเซอรอล [27]

กลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมสบู่ โดยใช้ไขมันและน้ำมันทำปฏิกิริยากับด่างได้เป็นสบู่ กลีเซอรอลทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่น การผลิตกลีเซอรอลในอเมริกา 40% มาจากการทำสบู่ ส่วนที่เหลือได้จากสังเคราะห์ Allyl alcohol $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ หรือพรอพิลีน C_3H_6 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี หรือ ปฏิกิริยาของไฮโดรเจนกับน้ำตาลที่อุณหภูมิและความดันสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กลีเซอรอลส่วนมากใช้ในการผลิตเป็น อัลคิลเรซิน การประยุกต์ใช้งานที่สำคัญ ได้แก่ อุปกรณ์การเตรียมยา อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องน้ำ องค์ประกอบของยาสีฟัน ใช้เป็นพลาสติกไซเบอร์ของกระดาษเซลโลเฟน ใช้เป็นสารเพิ่มความชื้นในผลิตภัณฑ์ยาสูบ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำจึงนิยมใช้อย่างกว้างขวาง [27]

2.6 สารดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต (UV Absorbers)

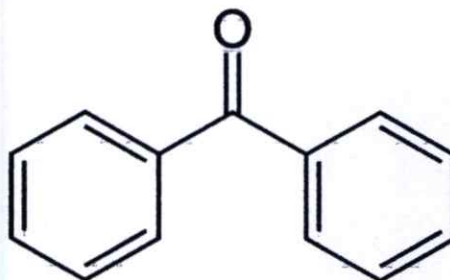
สารเติมแต่งสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้ดีและสมบูรณ์ก่อนที่จะมาถึงพอลิเมอร์ และสารเติมแต่งสามารถปล่อยแสงอัลตราไวโอเลตที่มีพลังงานสูงออกมากโดยไม่เกิดอันตรายร้าย กระบวนการทางกายภาพของแสง (Photo-physical processes) ทำให้พอลิเมอร์ไม่ได้รับอันตราย สารเติมแต่งที่นิยมใช้เป็นตัวดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต ได้แก่ ออร์โทไฮดรอกซีเบนโซฟีโนน (o-hydroxy benzophenone) และออร์โทไฮดรอกซีเฟนิล เบนโซไทรอาโซล (o-hydroxy

benzotriazoles) กระบวนเรโซแนนซ์และทาวโทเมอร์ริค (Tautomeric) ทำให้เกิดเสถียรภาพต่อพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตที่สูงและสามารถปล่อยพลังงานออกมาใหม่ในระดับที่เกิดอันตรายเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้การมีหมู่แอลคิลต่อกับวงแหวนเบนซีนจะช่วยควบคุมความมีขั้ว ด้วยเหตุนี้จึงสามารถละลายในพอลิเมอร์ต่างๆ ได้ดี [11]

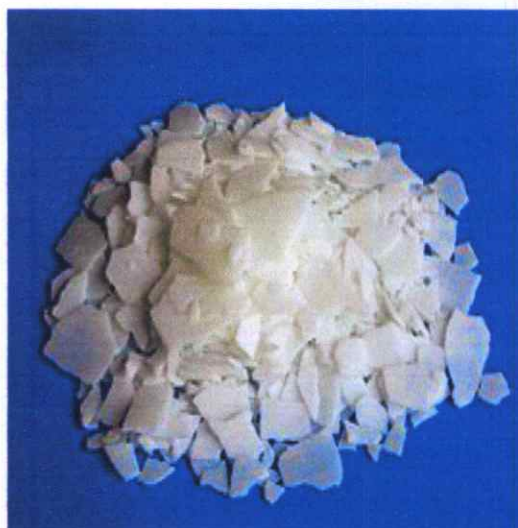
สารเติมแต่งนี้ช่วยยึดอายุพอลิเมอร์โดยปกติตัวดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตจะไม่หยุดที่ตอนปลายของแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่จะขยายไปยังแถบที่มองเห็นได้ (Visible spectrum) ซึ่งอยู่ในช่วงการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินแล้วส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ผสมสารดูดกลืนแสงมีสีเหลือง โดยปกติราคาค่อนข้างแพงคือ 1 ปอนด์ราคา 5-10 ดอลลาร์หรือมากกว่าจึงไม่เป็นที่นิยม โดยความเข้มข้นที่ใช้กับพอลิเมอร์ทั่วไปประมาณ 0.1-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [11]

2.6.1 เบนโซฟีโนน (Benzophenone) [28]

เป็นสารประกอบอินทรีย์อะโรมาติกคีโตน (Aromatic ketones) มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_5)_2CO$ หรือ Ph_2CO เบนโซฟีโนนใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อได้รับแสงยูวี การสังเคราะห์เบนโซฟีโนน ทำได้โดยใช้สารตั้งต้นคือ เบนซีน (Benzene) กับ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือ เตรียมจากปฏิกิริยา (Friedel-Crafts acylation) ระหว่าง เบนซีน กับ เบนโซอิลคลอไรด์ (Benzoyl chloride) โดยใช้ อะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยลักษณะทางเคมีและกายภาพของเบนโซฟีโนนดังรูปที่ 2.8 , 2.9 และ ตารางที่ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ benzophenone [28]



รูปที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของ Benzophenone [28]

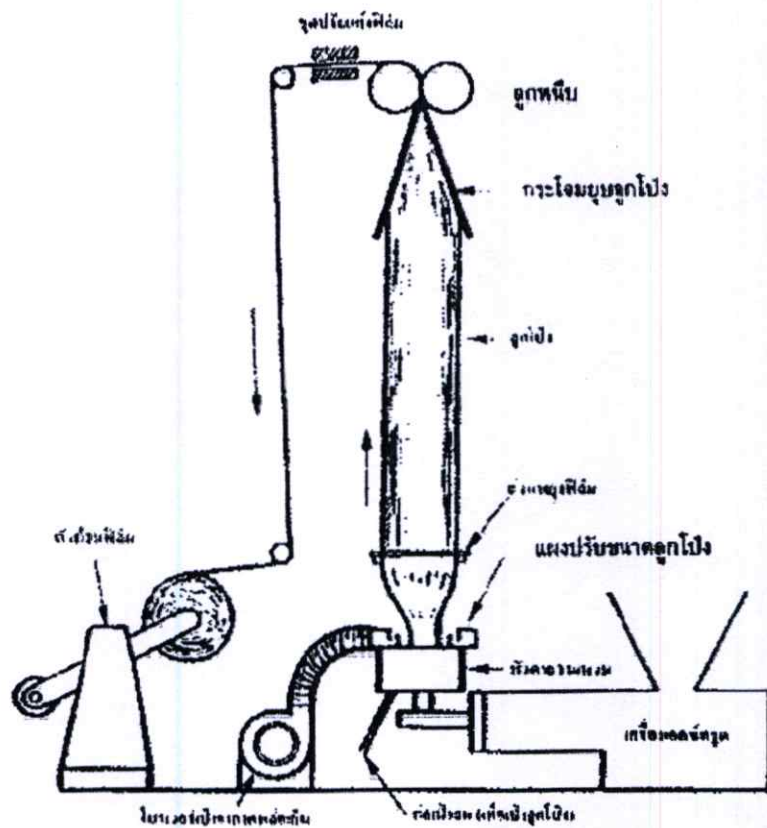
ตารางที่ 2.7 สมบัติของสาร Benzophenone [28]

ชื่อ IUPAC	เบนโซฟีโนน
ชื่อสามัญ	ไดฟีนิลเมทาโนน, ไดฟีนิลคีโตน, เบนโซอิลเบนซีน
สูตรโครงสร้าง	$C_{13}H_{10}O$
น้ำหนักโมเลกุล	182.217 g/mol
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็งสีขาว
ความหนาแน่น	1.11 g/cm ³ , ของแข็ง
จุดหลอมเหลว	47.9 °C
จุดเดือด	305.4 °C
ความสามารถในการละลายน้ำ	ไม่ละลายน้ำ
ความสามารถในการละลาย	ละลายในเบนซีน, เอทานอล, โพรพิลีนไกลคอล

2.7 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown-film Extrusion) [15]

พลาสติกหลอมเหลวจะถูกอัดด้วยกระบอกอัดรีดผ่านหัวตาย (Die) ทรงกระบอกออกมาเป็นหลอด หลังจากนั้นจะถูกเป่าออกด้วยแรงดันลมภายในหลอดจนมีลักษณะคล้ายท่อที่มีผนังบางเรียกว่า ลูกโป่ง (Bubble) ความหนาและความกว้างของฟิล์มสามารถปรับได้ด้วยแรงดันของลมภายในลูกโป่ง หลังจากนั้นลูกโป่งจะได้รับการหล่อเย็นอย่างเพียงพอแล้วก็จะถูกขูดด้วยลูกกลิ้งหนีบ และเข้าม้วนเก็บเพื่อรอการตัดและฉีกเป็นถุงต่อไป ฟิล์มที่ผลิตจากกระบวนการแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายท่อกลวง โดยกระบวนการเป่าฟิล์มยังสามารถแบ่งแยกได้ 2 ประเภทตามระบบการหล่อเย็น [15] คือ

- 1) เครื่องจักรที่ใช้ระบบหล่อเย็นด้วยลม นิยมใช้พลาสติกจำพวก HDPE, LDPE และ LLDPE
 - 2) เครื่องจักรที่ใช้ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ นิยมใช้กับพลาสติกจำพวก PP, LDPE และ LLDPE
- ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blow film process) [15]

2.7.1 องค์ประกอบของเครื่องเป่าฟิล์ม [15]

เครื่องเป่าฟิล์มจะมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้คือ

2.7.1.1 กระบอบอกอัดรีด (Extruder)

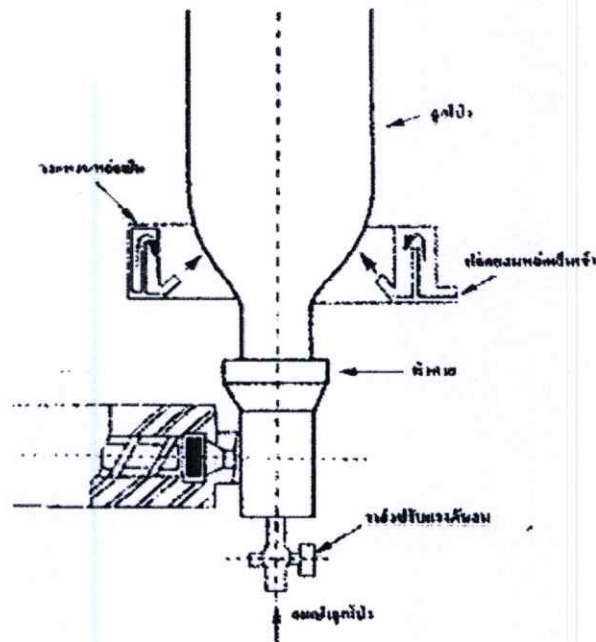
มีหน้าที่หลอมเหลวอัดรีดพลาสติกอย่างสม่ำเสมอ โดยจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ 2 ส่วนคือ

ก) สกรู (Screw)

การทำงานของสกรูขับออกจะแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ ช่วงป้อน, ช่วงจับ, และช่วงส่ง ซึ่งแต่ละช่วงจะมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นความลึกของช่องสกรูและความยาวของสกรูจะถูกกำหนดให้แตกต่างกันดังนี้

1. ช่วงป้อน (Feed Zone) จะมีหน้าที่ส่งเม็ดพลาสติกส่งเข้าไปยังส่วนสกรูขับอย่างสม่ำเสมอ ในช่วงนี้จะมีการใช้อุณหภูมิในการผลิตที่ต่ำ และอาจมีการหล่อเย็นเพื่อเพิ่มแรงเสียดระหว่างเม็ดพลาสติกกับผนังกระบอบอกอัดรีดมากขึ้นซึ่งจะทำให้การไหลของเม็ดพลาสติกในสกรูดีขึ้น ในช่วงนี้จะมีร่องของสกรูที่ลึกที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ
2. ช่วงอัด (Compression zone) ในช่วงนี้ พลาสติกจะเริ่มหลอมและมีแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้พลาสติกไหลจากช่วงป้อนผ่านไปยังช่วงส่งซึ่งในช่วงนี้พลาสติกจะหลอมละลายอย่างสมบูรณ์และมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ การออกแบบสกรูในช่วงนี้ จะมีความลึกของร่องเกลียวค่อยๆตื้นขึ้นมา
3. ช่วงส่ง (Metering zone) หน้าที่หลัก คือ จะส่งผ่านพลาสติกหลอมเหลวไปยังหัวคายให้สม่ำเสมอ และเกิดแรงดันกลับมากพอที่จะทำให้การผสมผสานเป็นอย่างสมบูรณ์ ช่วงนี้จะมีร่องความลึกของสกรูตื้นที่สุดในทั้ง 3 ช่วง

ช่องระหว่างผนังของกระบอบอกกับสกรูควรอยู่ที่ระหว่าง 0.075-0.125 มม. เพื่อให้พลาสติกไหลไปยังหัวคายได้สมบูรณ์ถ้ากว้างมากกว่า 0.125 มม. จะทำให้เนื้อพลาสติกไหลไปได้ไม่ดี หรือมีการไหลวนอยู่ภายในสกรูมากเกินไปสำหรับพอลิเอทิลีน [17] สกรูที่ใช้จะมีลักษณะดังตารางที่



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเป่าฟิล์ม [17]

ตารางที่ 2.8 แสดงค่า Compression Ratio และ L/D ที่เหมาะสมสำหรับ PE

	HDPE	LLDPE	LDPE
Compression Ratio	3-4	2-4	3-4
L/D	16-25	20-30	20-30

2.7.1.2 หัวคายน (Die Head)

หัวคายนที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม เป็นคายนรูวงแหวนสองชั้น (Annular Die) ซึ่งประกอบด้วย ส่วนนอกของคายน (Outer Die Body) และส่วนแกน (Die Mandrel) คายนที่ใช้ในการเป่าฟิล์มส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2.5 ถึง 15 เซนติเมตร แต่ก็ยังมีบางกระบวนการแปรรูปต้องการคายนที่มีขนาดใหญ่มากถึง 40 เซนติเมตรและบางเทคนิคต้องการคายนที่มีขนาดเล็กมาก เช่น 0.5 เซนติเมตรและสำหรับขนาดของระยะปากคายน (Die Gap) ที่เหมาะสมกับขนาดหัวคายนดังนี้ (หัวคายนขนาด 50-100 มม.) [17]

Die Gap	HDPE \approx 0.8-1.1 มม.
	LDPE \approx 1.0-2.0 มม.
	LLDPE \approx 1.0-1.5 มม.

การปรับแต่งความกว้างของ Die Gap ให้สม่ำเสมอสามารถทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ใช้ Joint Bolt (คันทิ่มเข้า Die Gap จะกว้างขึ้น)
2. ใช้ Push Bolt (คลายออกจะทำให้ Die Gap กว้างขึ้น)

2.7.1.3 แกนปรับเสถียรภาพของลูกโป่ง (Stabilizing Mandrel)

จะช่วยให้ลูกโป่งไม่ส่ายสามารถใช้ลมได้แรงขึ้น ทำให้เพิ่มกำลังการผลิตได้มากขึ้น แต่ มักจะทำให้อัตราการเบ่งที่แท้จริงลดลง ทำให้ความแข็งแรงของถุงลดลง พบว่าแกนปรับเสถียรภาพที่เหมาะสมควรมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอคของลูกโป่ง (Neck in) สำหรับวัสดุที่ใช้ทำแกนปรับเสถียรภาพของลูกโป่ง อาจจะใช้ไม้หรืออลูมิเนียมหุ้มด้วยกัมมะหยี่ชนิดทนความร้อนด้านนอก

2.7.1.4 หน่วยการหล่อเย็น และแผงปรับขนาดของลูกโป่ง (Cooling and Sizing Plate)

จากลูกโป่งที่เป่าขณะร้อน จะมีการหล่อเย็นโดยการเป่าลมเย็น โดยใช้โบรเวอร์ (Blower) เป็นตัวเป่าลมผ่านวงแหวนหล่อเย็น (Cooling Ring) วงแหวนจะเป็นตัวปรับทิศทางลมให้กระทบลูกสูบในแนวตั้งฉาก และทำให้กระแสนลมเป่ามีความสม่ำเสมอไม่พุ่งออกไปตำแหน่งใด ตำแหน่งหนึ่ง แผงปรับขนาดลูกโป่ง ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับลูกโป่ง จัดและปรับให้ลูกโป่งอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ใต้ฉากและอยู่ในแนวศูนย์กลางของหัวคายและเป็นจุดค้ำจุนไม่ให้ลูกโป่งแกว่ง เนื่องจากอิทธิพลของลมเป่าหล่อเย็นที่มีความแรงสูง ด้านบนของแผงปรับขนาดลูกโป่งจะมีแผ่นรวบ และพับฟิล์ม เป็นส่วนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและความสวยงามของฟิล์ม กระโอบขุบลูกโป่ง (Collapsing Frame) ควรมีส่วนที่สัมผัสกับผิวลูกโป่งยาวประมาณ 1.5-2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่ง

2.7.1.5 ลูกทึบและเครื่องม้วน (Nip Rolls and Winder)

ทำหน้าที่ในการดึงแผ่นฟิล์ม โดยมีอัตราการดึงที่เหมาะสม และสอดคล้องกับขนาดของลูกโป่ง และความเร็วรอบของสกรู

2.7.2 สภาวะในการเป่าฟิล์มและสมบัติของแผ่นฟิล์มที่สำคัญได้แก่ [12]

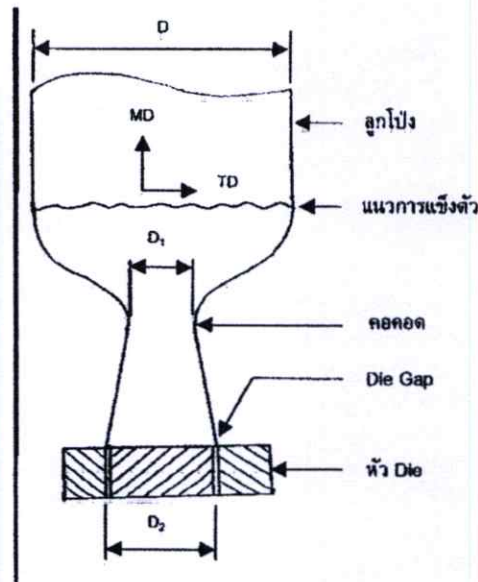
ความสูงของแนวการแข็งตัว (Frost Line Height) สามารถอธิบายเมื่อแนวการแข็งตัวของลูกโป่งสูงขึ้นอุณหภูมิที่คอคอคของลูกโป่งจะต่ำลง ทำให้แรงดึงเมื่อหลอมเหลว (Melt Tension) ในบริเวณดังกล่าวสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อลูกโป่งถูกเบ่งออกโมเลกุลจะมีการเรียงตัวในแนว TD มากขึ้น ทำให้แรงต้านการฉีกขาดของฟิล์มในแนว MD เพิ่มขึ้น สำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแนวการแข็งตัวมีผลต่อความแข็งแรงของฟิล์มค่อนข้างน้อย จะมีผลต่อความใสของฟิล์มอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ถ้าแนวการแข็งตัวของลูกโป่งสูงเกินไป จะทำให้เสถียรภาพของลูกโป่งลดลง [17]

อัตราการเป่า (Blow Up Ratio : BUR) อัตราเป่าคืออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของคาน การใช้แรงเป่าที่สูงขึ้นจะทำให้โมเลกุลของพลาสติกมีการจัดเรียงตัวกันในแนว TD มากขึ้น ดังนั้นความต้านต่อการฉีกขาดในแนว MD จะสูงขึ้นในขณะที่ความต้านต่อการฉีกขาดในแนว TD จะลดลง เนื่องจากการจัดเรียงตัวในแนว MD และ TD มีความสมดุลมากขึ้นความต้านต่อการกระแทกของฟิล์มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าการจัดเรียงตัวในแนว TD สูงขึ้นเกินไปจนทำให้ทำให้ความต้านต่อการฉีกขาดในแนว TD ต่ำเกินไป ความต้านทานต่อการกระแทกของฟิล์มจะลดต่ำลงโดยทั่วไปความต้านทานต่อการกระแทกของฟิล์มจะสูงสุดเมื่ออัตราส่วนระหว่างความต้านต่อการฉีกขาดในแนว MD และในแนว TD มีค่าประมาณ 1:15 [13]

อัตราเร็วในการผลิต (Take Up Speed) เมื่ออัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการเป่าของลูกโป่งจะสั้นลง ทำให้โมเลกุลมีการเรียงตัวในแนว TD มากขึ้นดังนั้น แรงต้านการฉีกขาดในแนว TD จะลดลง และแรงต้านการกระแทกจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้คอคอดของลูกโป่งจะคอคอดมากขึ้น เนื่องจากต้องใช้ลมเป่าแรงขึ้นเพื่อให้แนวการแข็งตัวของลูกโป่งคงเดิม ทำให้ความดันของลมเป่าสูงขึ้น การที่คอคอดของลูกโป่งคอคอดเข้ามากขึ้นจะทำให้อัตราการเป่าที่แท้จริงสูงขึ้นและโมเลกุลมีการเรียงตัวในแนว TD มากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าอัตราเร็วในการผลิตสูงเกินไปโมเลกุลจะมีการเรียงตัวในแนว TD มากเกินไปและแรงต้านการฉีกขาดในแนว TD ต่ำเกินไป สำหรับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำไม่ควรใช้อัตราการผลิตต่ำไปเพราะจะมีผลต่อเสถียรภาพของลูกโป่ง [17]

อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลว (Melt Temperature) เมื่ออุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวสูงขึ้นความแข็งแรงดึงเมื่อพลาสติกหลอมเหลวจะลดลง ทำให้โมเลกุลมีการเรียงตัวในแนว TD น้อยลงเมื่อลูกโป่งถูกเป่าออก อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะอยู่ในช่วงประมาณ 150-180 °C [13]

ความหนาของฟิล์มมีผลต่อความแข็งแรงฟิล์มน้อยมาก ถ้าความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นก็จะทำให้คอคอดของลูกโป่งจะขยายออก ทำให้อัตราส่วนการเป่าที่แท้จริงลดลง ทำให้โมเลกุลมีการเรียงตัวในแนว TD ลดลง ดังนั้น แรงต้านการฉีกขาดในแนว MD เพิ่มมากขึ้นแต่ก็เป็นสัดส่วนที่ไม่มากนัก โดยลักษณะของสภาวะต่างๆที่ต้องการศึกษาขณะขึ้นรูปฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะของสภาวะที่สำคัญในการเป่าฟิล์ม [17]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2000 Kaczmarek et.al [29] ได้ศึกษาผลการย่อยสลายทางแสงต่อพอลิस्टไตรีน โดยใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ ได้แก่ Benzophenone, Anthraquinone และ Benzoyl peroxide ศึกษาสมบัติการไหลและความถ่วงจำเพาะ โดยใช้ FTIR และ UV-vis spectroscopy พบว่าสารทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายโดยการเกิดออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน โมเลกุลเมื่อได้รับแสงยูวี แต่ทำให้เกิดพันธะคู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งสาร Benzophenone มีประสิทธิภาพในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสงมากที่สุด

ในปี ค.ศ. 2004 Abd El-Remhim H.A. et.al. [30] ได้ศึกษาผลการฝังดินและการฉายแสงที่มีต่อการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมแป้ง โดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายกับไม่ทดสอบ ใช้สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งที่ไม่ทดสอบการฝังดินและฉายแสงเป็นตัวมาตรฐาน นำฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมาทดลองฝังดินจากนั้นนำมาฉายแสง UV พบว่า ค่าความทนแรงดึง ลดลง 20-66% การฝังดินอย่างเดียวทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง 10-26% และเกิดการเปลี่ยนแปลง สมบัติทางความร้อน โครงสร้างภายในโมเลกุล และสัณฐานวิทยา ซึ่งวัดจากเทคนิค DSC , FTIR และ SEM ตามลำดับ พบว่าแสงยูวีเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้นทำให้เกิดการย่อยสลายทางแสง ส่งผลทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น

ในปี ค.ศ. 2005 Chi-Yuan Huang [31] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารช่วยผสมที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง ศึกษาผ่าน 2 กระบวนการและทำการสังเคราะห์สารช่วยผสม 2 ชนิด คือ มาลิกแอนไฮดรยด์ต่อกิ่ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการเคลือบด้วย Plasma (Ma-g-PLDPE) และ กรดอะคิลิกต่อกิ่ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการเคลือบด้วย 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 หมู่ไฮดรยด์ทำให้เกิดความเป็นขั้ว และการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของการผสมสารช่วยผสม คือ Ma-g-PLDPE กับ กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำแป้งกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมตามก่อนการผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนเดี่ยว เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำให้ขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ลดลงหลังการผสม เนื่องจากหมู่แอนไฮดรยด์ที่แตกตัวเป็นอนุภาคอิสระไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ โดยอนุภาคแอนไฮดรยด์จะทำให้รูปร่างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นเวลา 2 สัปดาห์พบว่า น้ำหนักของพอลิเมอร์ลดลงไป 65 %wt โดยการเติมสารช่วยผสมที่มีหมู่แอนไฮดรยด์จะทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ลดลงมากกว่าไม่เติมสารช่วยผสม

ในปี ค.ศ. 2005 Wang Shujun และ Yu Jiugao [32] ศึกษาการวิธีการผสม Thermoplastic starch (TPS) กับ LLDPE ผสมในเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ มาลิกแอนไฮดรยด์เป็นสายช่วยผสม และแป้งข้าวโพดที่มีอัตราส่วนปริมาณอะไมโลเพคตินต่ออะไมโลส เป็น 70:30 โดยน้ำหนักแป้ง จากนั้นศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัมฐานวิทยา สมบัติการไหล และ องค์ประกอบต่างๆ ภายในเนื้อฟิล์ม จากการทดสอบพบว่า มาลิกแอนไฮดรยด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้ ซึ่ง TPS ที่ผสมกับ LLDPE จะทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น สมบัติการไหลลดลง และ สามารถตรวจสอบความเข้ากันได้ของ TPS ที่ผสม LLDPE และ มาลิกแอนไฮดรยด์ ด้วยเทคนิค FTIR

ในปี ค.ศ. 2006 Da Roz et. al. [32] ได้ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อ Thermoplastic starch โดยเน้นการศึกษากระบวนการหลอมเหลว ศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การแพร่ผ่านของน้ำ ของ Thermoplastic starch พบว่าพลาสติกไซเซอร์จำพวก Monohydroxyl alcohols และ High molecular weight glycol ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับแป้ง จากการทดลองพบว่า Glycol โมเลกุลเล็กๆ และ Sorbitol มีประสิทธิภาพมากกว่าในการผสมเข้ากับแป้ง โดย

ชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร်ไม่มีผลต่อความเป็นผลึกของ Thermoplastic starch แต่มีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกล จะทำให้สมบัติการไหลดีขึ้น และการเติมพลาสติกไซเซอร်จะเกิดปฏิกิริยาบริเวณออสถฐานเป็นส่วนใหญ่

ในปี ค.ศ. 2007 Roy P.K. et. al. [34] ได้ศึกษาผลของปฏิกิริยา Photo-oxidative degradation ต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมสารเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ Cobalt stearate ใช้ปริมาณตั้งแต่ 0.5-5% ค่อน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แล้วผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนกู่ จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าฟิล์ม (Blow film process) นำฟิล์มตัวอย่างที่มีความหนา 70 ไมโครเมตรไปทดสอบในตู้อบภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงและ ทดสอบด้วยการฉายแสง UV ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าแสงยูวีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด คาร์บอนิล (Carbonyl Index) ออสถฐานวิทยา และ ความเป็นผลึก โดยสาร Cobalt stearate สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยของฟิล์มได้ โดยการลดระยะเวลาในการสลายตัวของฟิล์มเมื่อได้รับแสงและความร้อน

ในปี ค.ศ. 2007 Dintcheva T.N. และ La Mantia F.P. [35] ได้ศึกษาผลของแสงที่มีต่อพอลิเมอร์ที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ฟิล์มที่สังเคราะห์จากแป้งข้าวโพด และใช้สาร UV-stabilizer ได้แก่ Benzophenone, Benzotriazoles, Triazine และ Hindered amine จากนั้นทดสอบการเกิดปฏิกิริยา Photo-oxidation และ Photo-stabilization สำหรับใช้ทางการเกษตร ภายหลังจากย่อยสลายโดยแสง ผ่านปฏิกิริยา Photo-oxidation ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ ความความทนแรงดึง และ ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด หลังการฉายแสงยูวีทำให้ค่าร้อยละการดึงยืลดลงอย่างรวดเร็ว แต่สาร UV-stabilizer สามารถช่วยฟิล์มมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อได้รับแสง UV ดังนั้น UV-stabilizer จึงไม่เหมาะที่จะนำมาปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้ง และสาร Benzophenone มีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสงมากที่สุด เนื่องจากเป็นตัวช่วยดูดกลืนรังสี UV ในช่วงที่กว้างขึ้น ทำให้ดูดกลืนรังสี UV ได้มากขึ้น เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระได้มากขึ้น ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น

ในปี ค.ศ. 2008 Thunwall M. et. al. [36] ได้ศึกษาการทำฟิล์มเป่าจาก Thermoplastic starch ใช้วัตถุดิบคือ แป้ง กลีเซอรอล และ น้ำ ซึ่งใช้แป้งแบ่งเป็น 2 เกรด ได้แก่ แป้งปกติกับแป้งออกซิไดซ์ ทำการผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนกู่ จากนั้นนำไปขึ้นรูปฟิล์มเป่า แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ความเป็นผลึก สมบัติการไหล และ สภาวะที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปฟิล์มเป่า จากการทดลองพบว่า ฟิล์มเป่าที่ผสมแป้งออกซิไดซ์สามารถขึ้นรูปได้ง่ายกว่าแป้งธรรมดา

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

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

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	LDPE1905FA
ครรชนีการไหล	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. สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาทางแสง (Benzophenone) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Mayzo จำกัด สมบัติของสารเบนโซฟีโนนแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของสารเบนโซฟีโนน No. 119-61-9

สมบัติ	หน่วย	No. 119-61-9
Purity	% min	99.5
Melting Point	$^{\circ}\text{C}$	45-49
Volatiles	% max	0.1

ข้อมูลจากบริษัท Mayo จำกัด

4. สารช่วยผสม (Fusabond[®] MB 226D) เกรดการค้าจากบริษัท Innovation Creative Polymer Ltd. สมบัติของสารช่วยผสมแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของ Fusabond[®] MB 226D

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

ข้อมูลจากบริษัท Innovation Creative Polymer Ltd

5. กลีเซอรอล เกรดการค้า จากบริษัท Thai Pure Science Ltd. สมบัติของสารแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของกาลีเซอรอล

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

ข้อมูลจากบริษัท Thai Pure Science Ltd.

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก (Electronic balance) ความละเอียด 4 ตำแหน่ง
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic Grinder): Bosco Engineering รุ่น PL-20
3. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed Mixer): Lab Tech Engineering Co.,Ltd. รุ่น 0023
4. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ (Twin-screw extruder) รุ่น TL200 Intro Engineering Ltd.
5. เครื่องขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า (Blown Film Extrusion): Labtech Engineering Co.,Ltd. รุ่น LF 400
6. เครื่องปั๊มลม : Hitachi Co., Ltd. รุ่น BEBICON 400
7. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Digimatic Outside Micrometer): Mitutoyo รุ่น 99MAB002W
8. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Test Machine): LLOYD Instrument Co., Ltd. รุ่น LLOYD LR 5 K
9. เครื่องทดสอบทางความร้อน Differential Scanning Calorimeter, DSC: Shimadzu Co.,Ltd. รุ่น DSC-50
10. เครื่องเอ็กซ์เรย์ (X-ray Diffractometer): Bruker AG Thailand รุ่น D8 Advance
11. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR): Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum Gx
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM): JEOL Co.,Ltd รุ่น JSM-5410
13. ตู้อบ (Oven)
14. ตู้อบแสงอัลตราไวโอเลต บริษัท Labtech Engineering Co.Ltd. (Hg-lamp contain mercury): Philips TUV PL-S, 9 Watt

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นและวัตถุดิบผสม

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแป้ง

นำแป้งมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2 การผสมพอลิเมอร์กับสารช่วยผสม

นำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาผสมกับสารช่วยผสม (PE-g-MA) ในอัตราส่วนร้อยละ 95 : 5 โดยน้ำหนัก นำไปผสมในเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยใช้อุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.6 และตั้งความเร็วของเกลียวหนอนคู่ไว้ที่ 30 รอบต่อนาที นำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอัดรีดไปตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.6 อุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่

โซนสกรู	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
ช่วงที่ 1 (Feed Zone)	160
ช่วงที่ 2 (Compression zone)	165
ช่วงที่ 3 (Metering zone)	170
หัวคายน (Die zone)	175

ขั้นตอนที่ 3 การผสมสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ผสม

นำพอลิเมอร์ผสมจากขั้นตอนที่ 2 มาผสมกับแป้งจากขั้นตอนที่ 1 กลีเซอรอล และเบนโซฟีโนนในอัตราส่วนต่างๆดังตารางที่ 3.7 โดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำของผสมทั้งหมดไปผสมในเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ และตั้งอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.6 ตั้งความเร็วของเกลียวหนอนคู่ไว้ที่ 30 รอบต่อนาที แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการอัดรีดไปตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสูตรผสมแต่ละสูตร

สูตรที่	LDPE (g)	แป้ง ⁽¹⁾ (g)	กลีเซอรอล ⁽²⁾ (g)	PE-g-MA ⁽³⁾ (g)	Benzophenone ⁽⁴⁾ (g)
(ก)	100	-	-	-	-
(ข)	100	-	-	-	1
(ค)	100	-	-	-	1.5
(ง)	100	-	-	-	2
(จ)	100	30	19.5	5	-
(ฉ)	100	30	19.5	5	1
(ช)	100	30	19.5	5	1.5
(ซ)	100	30	19.5	5	2

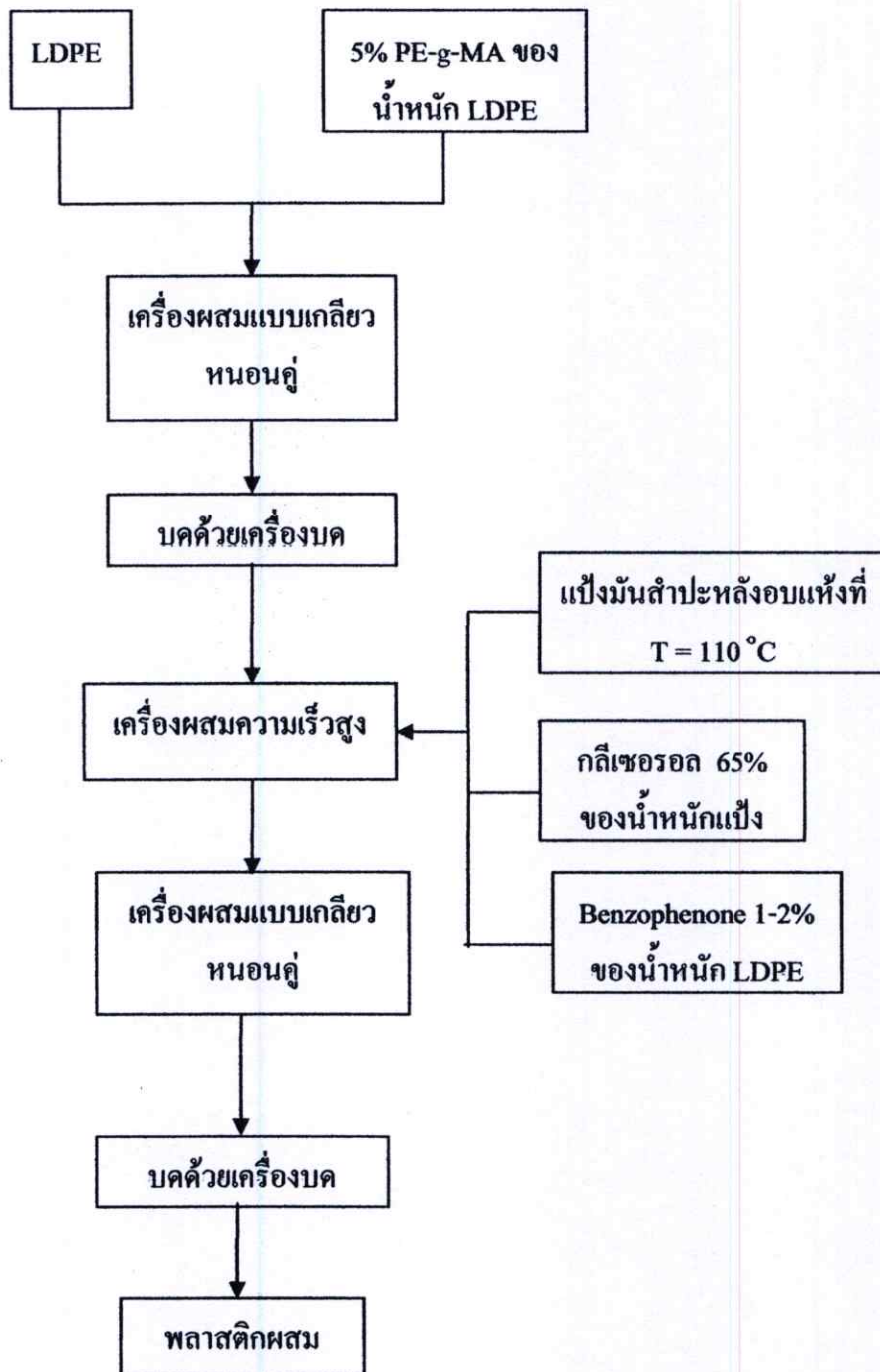
หมายเหตุ (1) อัตราส่วนปริมาณแป้งเปรียบเทียบกับ LDPE

(2) อัตราส่วนปริมาณกลีเซอรอลเทียบกับแป้ง

(3) อัตราส่วนปริมาณ PE-g-MA เทียบกับ LDPE

(4) อัตราส่วนปริมาณ Benzophenone เทียบกับ LDPE

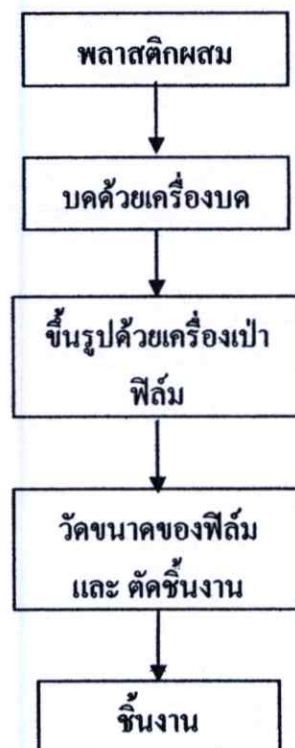
แผนผังแสดงการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการผสม

3.3.2 การขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

นำพอลิเมอร์ผสมในหัวข้อ 3.3.1 มาขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกแบบเป่า โดยตั้งอุณหภูมิที่เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวที่อุณหภูมิหัวคาย 160 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรูของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวเท่ากับ 125 รอบต่อนาที อุณหภูมิบริเวณส่วนท่อโค้งที่ต่อเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวกับเครื่องเป่าฟิล์ม 165 องศาเซลเซียส บริเวณส่วนท่อตรงด้านล่าง 170 องศาเซลเซียส ส่วนท่อตรงด้านบน 180 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการดึงเก็บม้วนฟิล์มคือ 4.0 เมตร/นาที ยกเว้นสูตรที่ 5-8 ที่ใช้อัตราดึงม้วนฟิล์มคือ 3 เมตร/นาที เนื่องจากความหนืดสูงมากทำให้สารไหลออกมาช้า จึงต้องลดอัตราการดึงเก็บ แล้วจึงเก็บตัวอย่างเมื่อฟิล์มมีลักษณะผิวเรียบและการกระจายตัวสม่ำเสมอ จากนั้นนำฟิล์มที่ผลิตได้ในแต่ละสูตรมาวัดความหนาและความกว้างของฟิล์มทุกสูตรด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ โดยวัดให้ทั่วความยาวของฟิล์มประมาณ 20 จุด ซึ่งแสดงแผนผังการเตรียมชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

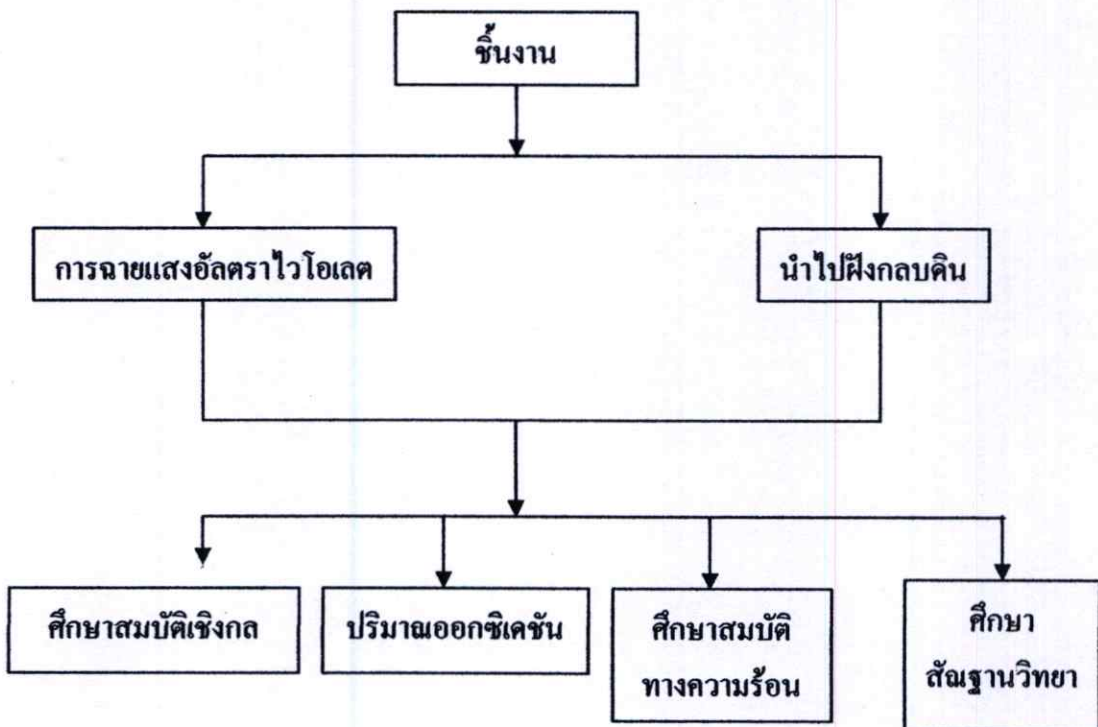
3.3.3 การทดลองและตรวจสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.3.3.1 การทดสอบการย่อยสลายได้ของฟิล์ม

นำชิ้นงานที่ขึ้นรูปเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียบร้อยแล้วแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งใส่ตู้ยิว โดยใช้หลอดยิว (Hg-lamp contain mercury, 9 Watt) ฉายแสงวันละ 12 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 4 เดือน แล้วนำไปทดสอบ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณออกซิเดชัน และสัณฐานวิทยา

ส่วนที่สองนำชิ้นงานไปทดสอบการเสียดสภาพในดิน เป็นระยะเวลา 4 เดือน เก็บชิ้นงาน ไปล้างแล้วอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3-5 ชั่วโมง นำมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ปริมาณออกซิเดชัน และสัณฐานวิทยา

นำดินใส่ถังพลาสติกให้มีความสูง 2.5 เซนติเมตร โดยต้องควบคุมความชื้นภายในดิน (25-30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดิน) และ สภาพ酸碱 (pH ~7) ให้คงที่ และเพื่อให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในดิน จากนั้นนำชิ้นงานที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าใส่ในถังพลาสติก แล้วนำดินมากลบให้ทั่ว มีความสูงจากชิ้นงาน 15 เซนติเมตร [36] ทำเช่นเดียวกันทุกสถานะแสดงขั้นตอนการทดลองได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดสอบการย่อยสลาย

3.3.3.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม

3.3.3.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.3.2.1.1 สมบัติความแข็งแรงดึง (tensile strength) และ มอดุลัส (Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [37]

นำฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular) มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงและต้านแรงฉีกขาด โดยมีสภาวะการทดสอบดังนี้

ความเร็วของแท่นตัดขวาง (Crosshead speed)	500	มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length)	50	มิลลิเมตร
น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	250	นิวตัน

นำผลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)} = F/A$$

$$\text{มอดุลัส (Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด} = ((L-L_0) / L_0) \times 100$$

เมื่อ	F	คือ	แรงดึงชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นนิวตัน:N)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร: mm ²)
	L	คือ	ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง (หน่วยเป็นมิลลิเมตร: mm)
	L ₀	คือ	ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงชิ้นงานเป็นระยะที่แคบที่สุดและมีพื้นที่ขนานกัน (Gauge Length หน่วยเป็นมิลลิเมตร: mm)

$$\begin{aligned}
 \% \text{ Crystallinity} &= \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \\
 &= \frac{51.11}{293} \times 100 \text{ J/g} \\
 &= 17.4
 \end{aligned}$$

3.3.3.2.3 การทดสอบโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

ชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำรอยบากเล็กๆตรงบริเวณที่จะทำการหักชิ้นงานจากนั้นนำไปแช่ในโครเจนเหลว เป็นเวลา 20 นาทีก่อนทำการหักชิ้นงาน แล้วนำชิ้นงานมาวางบนแท่นรอง (Stub) ก่อนนำไปเคลือบผิวด้วยทอง จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้ Secondary electron detector เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ แล้วทำการบันทึกภาพบริเวณรอยหักชิ้นงาน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์และการกระจายตัวของแป้งในเนื้อฟิล์ม

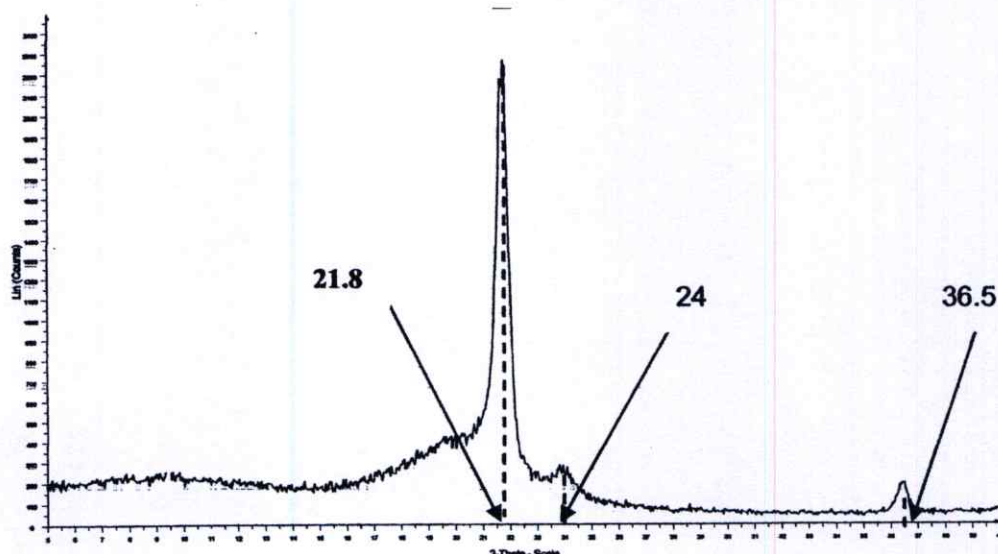
3.3.3.2.4 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

นำชิ้นงานมาตรวจสอบ โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมแป้งกับเบนโซฟีโนน โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ซึ่งสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากสมการของ Bragg equation เมื่อทราบความยาวคลื่นแสงของหลอดรังสีเอ็กซ์ เท่ากับ 1.45 \AA และมุม $2 - \text{Theta}$ ที่วัดได้ แล้วนำมาคำนวณหาค่า d ได้ ซึ่งสามารถจะบอกระยะห่างระหว่างผลึก ระบายของผลึกได้

สมการของ Bragg equation

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

ตัวอย่างการคำนวณค่า d ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



จากโคแองแกรม X-ray พบว่า มีพีค 2- Theta เกิดขึ้นสามช่วงได้ 21.8 , 24, 36.5 องศา ตามลำดับ
นำไปคำนวณหาค่า d จากสมการ ให้ $n = 1$ และ $2\theta = 21.8$ ดังนั้น $\theta = 10.9$

$$\begin{aligned} d &= \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \text{ \AA} \\ &= \frac{1.45}{2 \sin(10.9)} \\ &= 4.1 \text{ \AA} \end{aligned}$$

3.3.3.2.5 การทดสอบหาปริมาณการออกซิเดชัน

เตรียมชิ้นงานตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามมาตรฐาน ASTM D882 ใส่ในตู้ยวี่ และการฝังกลบ ไปวิเคราะห์โดยเครื่อง FTIR Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของหมู่คาร์บอนิลที่เลขคลื่น $1,640 - 1,780 \text{ cm}^{-1}$ และหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขที่คลื่น $3,300 - 3,400 \text{ cm}^{-1}$ ทั้งก่อนและหลังการฉายแสง เพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใน โมเลกุลพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสลายตัวโดยแสงและจุลินทรีย์ การคำนวณดัชนีคาร์บอนิล (CI) จากสูตร [39]

$$C.I. = [\log [100/\%T]/d]$$

เมื่อ $\%T = \%transmittance$

$d =$ ความหนาชิ้นงาน (μm)

การคำนวณหาหมู่ไฮดรอกซิล จากสูตร [40]

$$\text{ปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล} = \frac{\text{Absorbance ที่ } 3,382 \text{ cm}^{-1}}{\text{Absorbance ที่ } 2,020 \text{ cm}^{-1}}$$

แสดงตัวอย่างการหาดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหมู่ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (ฟิล์มมีความหนาเท่ากับ 53 ไมโครเมตร)

$\%transmittance$ ของพีคที่เกิดบริเวณของหมู่คาร์บอนิล เท่ากับ 93.93

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณดัชนีคาร์บอนิล (C.I.)} &= [\log [100/\%T]/d] \\ &= \log \frac{[100/93.93]}{53 \mu\text{m}} \\ &= 0.01 \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล} = \frac{\text{Absorbance ที่ } 3,382 \text{ cm}^{-1}}{\text{Absorbance ที่ } 2,020 \text{ cm}^{-1}}$$

$$\begin{array}{r} = \quad 96.67 \\ \hline \quad 95.66 \\ = \quad 1.01 \end{array}$$

บทที่ 4

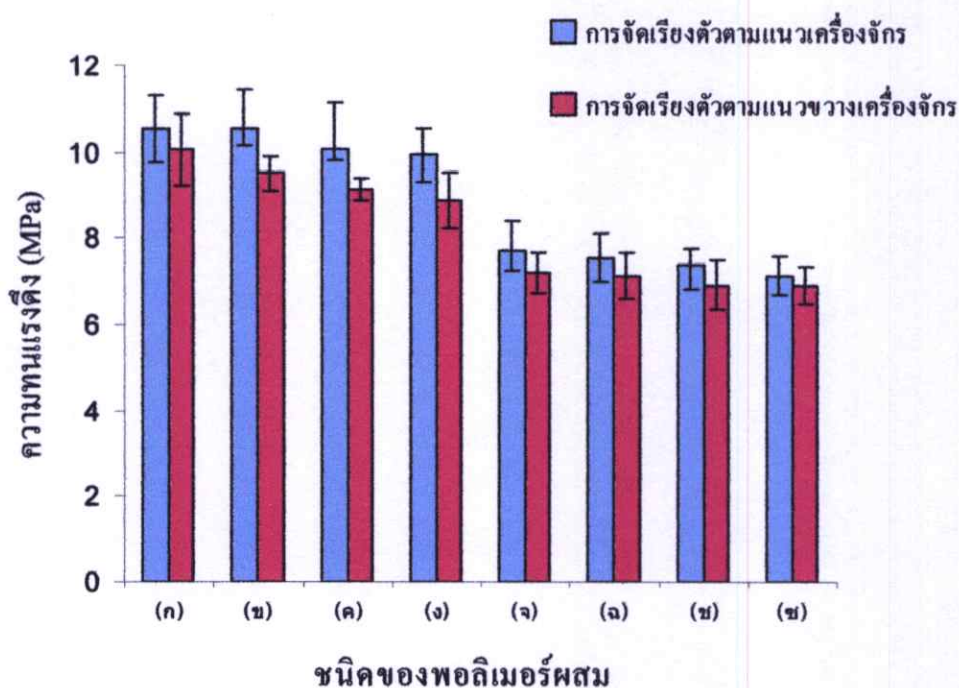
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มเป่าระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แป้ง มันสำปะหลัง และ เบนโซฟีโนน โดยใช้ลิเซอร์อลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และสารช่วยผสมเป็น PE-g-MA เริ่มต้นจากการนำส่วนผสมทั้งหมดผสมเข้าด้วยกันในเครื่องผสมความเร็วสูงที่ความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที และเครื่องผสมเกลียวหนอนคู่ที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์มบางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-7 นิ้ว หนา 50-80 ไมโครเมตร (ภาคผนวก ก) นำฟิล์มเป่าที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ทดสอบสมบัติเชิงกล สถิติสภาพทางความร้อน ปริมาณออกซิเจน ปริมาณและ โครงสร้างผลึก และสัณฐานวิทยา หลังจากนั้นนำไปทดสอบการสลายตัวโดยการฉายแสงยูวีและฟังคินเป็นเวลา 4 เดือน แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล ปริมาณและ โครงสร้างผลึก ปริมาณออกซิเจน สมบัติทางความร้อนและ สัณฐานวิทยา ผลการทดสอบนี้จะเป็นการยืนยันประสิทธิภาพการสลายตัวของฟิล์มเป่า

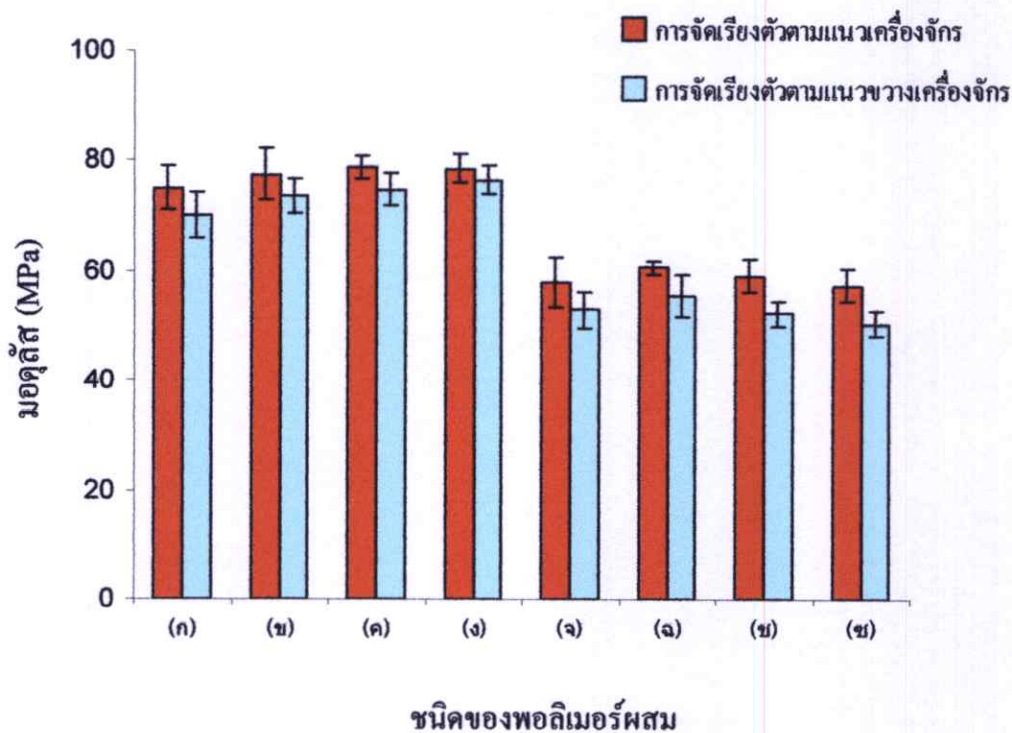
4.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

4.1.1 สมบัติความทนแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ยังไม่ได้รับการฉายแสงยูวีและฟังคิน

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยนำฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนการทดลองมาตรวจวัด สมบัติความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 (ภาคผนวก ง) โดยทดสอบในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction: MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction: TD)



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

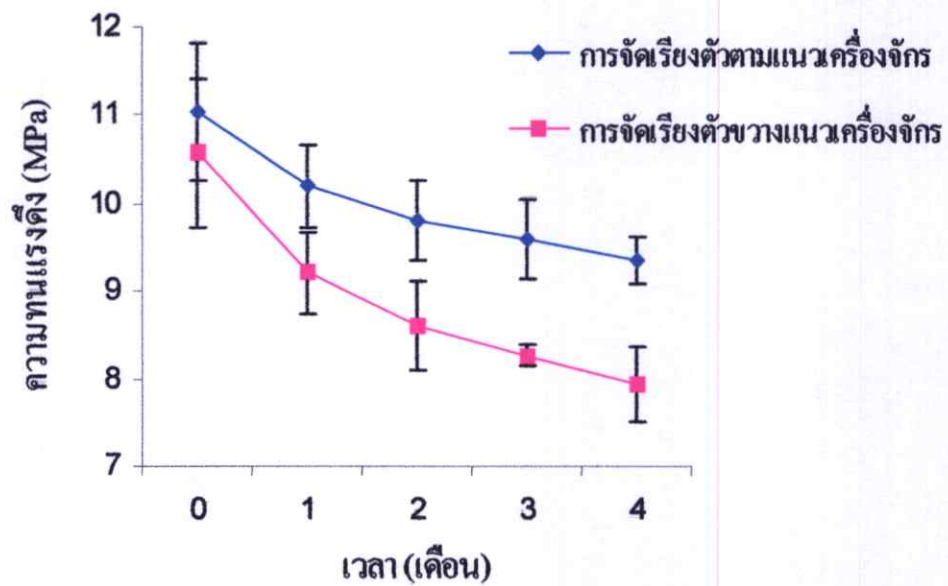
จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรเท่ากับ 11 MPa (รูปที่ 4.1 ก) และมอดูลัส เท่ากับ 75 MPa (รูปที่ 4.2 ก) ในแนวขวางเครื่องจักรมีความทนแรงดึงเท่ากับ 10.1 MPa (รูปที่ 4.1 ค) และค่ามอดูลัส เท่ากับ 70.1 MPa (รูปที่ 4.2 ค) โดยฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนมีผลทำให้ความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งค่าความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรอยู่ในช่วง 9.9 -10.5 MPa (รูปที่ 4.1 ข,ค,ง) และ ค่ามอดูลัสอยู่ในช่วง 77.4-78.6 MPa (รูปที่ 4.2 ข,ค,ง) ในแนวตามขวางเครื่องจักรมีค่าความทนแรงดึงในช่วง 8.8-9.5 MPa (รูปที่ 4.1 ข,ค,ง) และค่ามอดูลัสอยู่ในช่วง 73.5-76.6 MPa (รูปที่ 4.2 ข,ค,ง) จากการทดลองพบว่า ภายหลังจากการเติมเบนโซฟีโนนลงในฟิล์ม ค่าความทนแรงดึงและค่ามอดูลัสไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากในการทดลองใช้เบนโซฟีโนนปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และเบนโซฟีโนนสามารถหลอมละลายระหว่างกระบวนการผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนคู่ ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 47.9 องศาเซลเซียส [28] ดังนั้นเบนโซฟีโนนจึงไม่สามารถแทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ทำให้ไม่เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่มีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยสามารถยืนยันผลการทดลองจากภาพ SEM ดังรูปที่ 4.59 ข และ รูปที่ 4.62 ข ตามลำดับ

ฟิล์มที่ผสมแป้ง (รูปที่ 4.1 จ) มีผลทำให้ค่าทนแรงดึงและค่ามอดุลัส (รูปที่ 4.2 จ) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อพิจารณาผลการศึกษาด้านฐานวิทยา (SEM) ดังรูปที่ 4.59 ค และ รูปที่ 4.62ค ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของอนุภาคแป้งในพอลิเมอร์ และมีรอยต่อระหว่างวัฏภาคเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แป้งยังมีสมบัติที่แข็งแต่เปราะ ไม่มีความอ่อนตัว [11] ดังนั้นจึงทำให้สูตรที่มีแป้งผสมอยู่มีสมบัติเชิงกลที่ค่อยลง ซึ่งจากงานวิจัยของ St-Pierre และคณะ [41] กล่าวว่า การเติมเม็ดแป้งในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากเม็ดแป้งมีความแข็ง และเปราะ ส่งผลให้ความทนแรงดึงลดลง แต่ถ้าใส่เม็ดแป้งตั้งแต่ ร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะทำให้ค่าสมบัติเชิงกลลดลง ทั้งความทนแรงดึงและมอดุลัส ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งภายในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยนี้ โดยฟิล์มผสมแป้งมีค่าความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรอยู่ในช่วง 7.1-7.7 MPa (รูปที่ 4.1 ฉ,ซ,ช) และค่ามอดุลัสอยู่ในช่วง 55.2-60.5 MPa (รูปที่ 4.2 ฉ,ซ,ช) ในแนวตามขวางเครื่องจักรมีค่าความทนแรงดึงในช่วง 6.8-7.2 MPa (รูปที่ 4.1 ฉ,ซ,ช) และค่ามอดุลัสอยู่ในช่วง 50.5-55.3 MPa (รูปที่ 4.2 ฉ,ซ,ช) โดยเบนโซฟีโนนที่เติมในฟิล์มที่ผสมแป้ง ไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เนื่องจากใช้ปริมาณเบนโซฟีโนนเพียงร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และสารเบนโซฟีโนนเป็นสารอะโรมาติกคิโตนที่เป็นสารอินทรีย์ ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และเป็นโมเลกุลมีขั้ว [28] จึงสามารถผสมเข้ากับแป้งที่เป็นโมเลกุลที่มีขั้วได้ จึงทำให้ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างชัดเจน

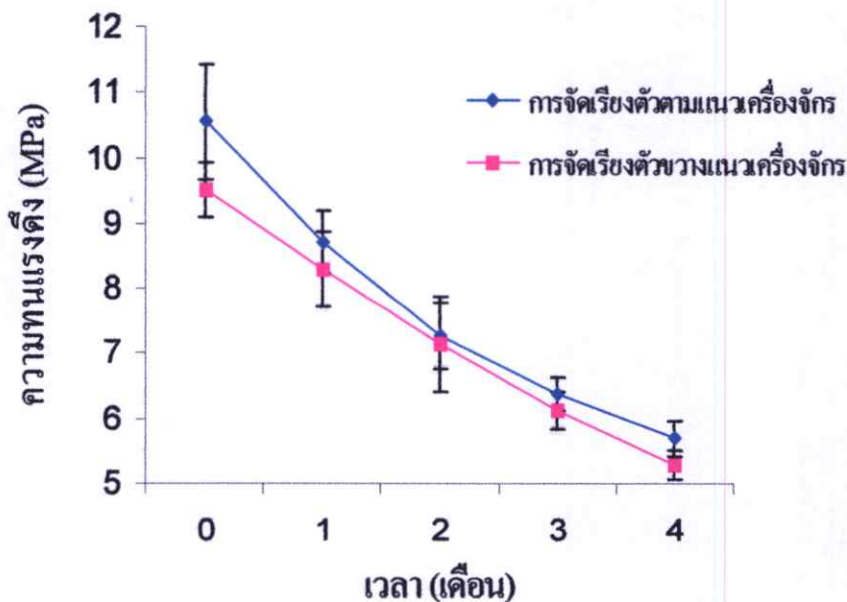
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มในแนวการจัดเรียงตัวแนวตามเครื่องจักร และแนวขวางเครื่องจักร พบว่าการจัดเรียงตัวแนวตามเครื่องจักรมีสมบัติเชิงกลมากกว่าในทิศทางแนวขวางเครื่องจักร เนื่องจากงานวิจัยใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป มีแรงที่ใช้ในการดึงฟิล์ม 2 ทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บในแนวตามเครื่องจักร และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์มในแนวขวางเครื่องจักร ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลทั้งสองทิศทาง [15] โดยแรงที่ใช้ในการดึงม้วนในแนวตามเครื่องจักรมีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์มากกว่าการเป่าขยายฟิล์มในแนวขวางเครื่องจักร [13] และเนื่องจากขนาดเครื่องที่ใช้เป็นเครื่องเป่าฟิล์มในห้องปฏิบัติการ หัวคายนี้นขนาดเล็ก ไม่สามารถเป่าฟิล์มขนาดใหญ่ที่มีอัตราส่วนการเป่าขยาย (Blow-up ratio) มากๆ ได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการเป่าในแนวขวางเครื่องจักร ส่งผลให้สมบัติเชิงกลในทิศทางตามเครื่องจักรมากกว่าแนวขวางเครื่องจักร [13]

4.1.2 สมบัติความทนแรงดึงเมื่อได้รับการฉายแสงยูวีและฝังดิน เป็นเวลา 4 เดือน

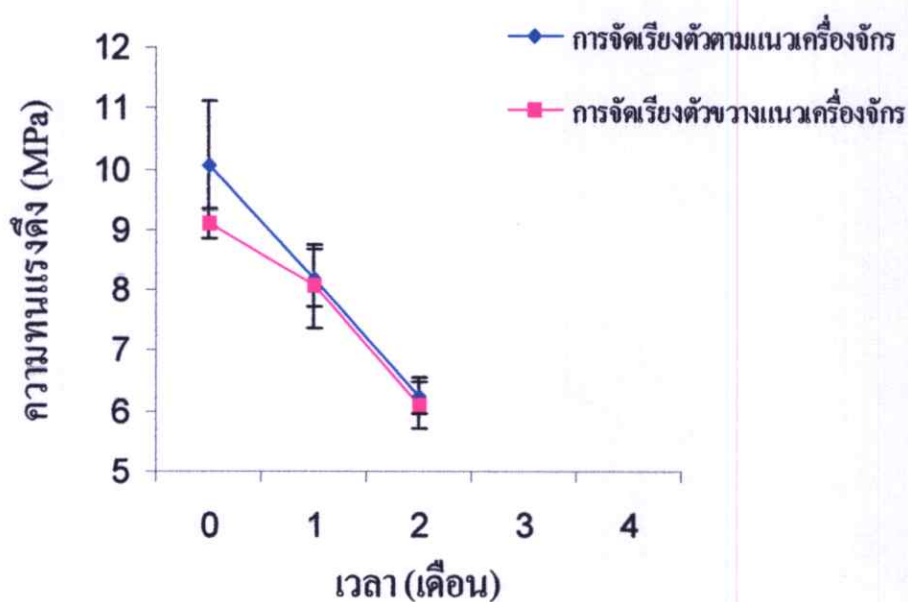
นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรหลังการทดลองมาฉายแสงยูวี (รูปที่ 4.3-4.10) และฝังดิน (รูปที่ 4.11-4.19) เป็นเวลา 4 เดือน แล้วทดสอบความทนแรงดึง ได้ผลดังนี้



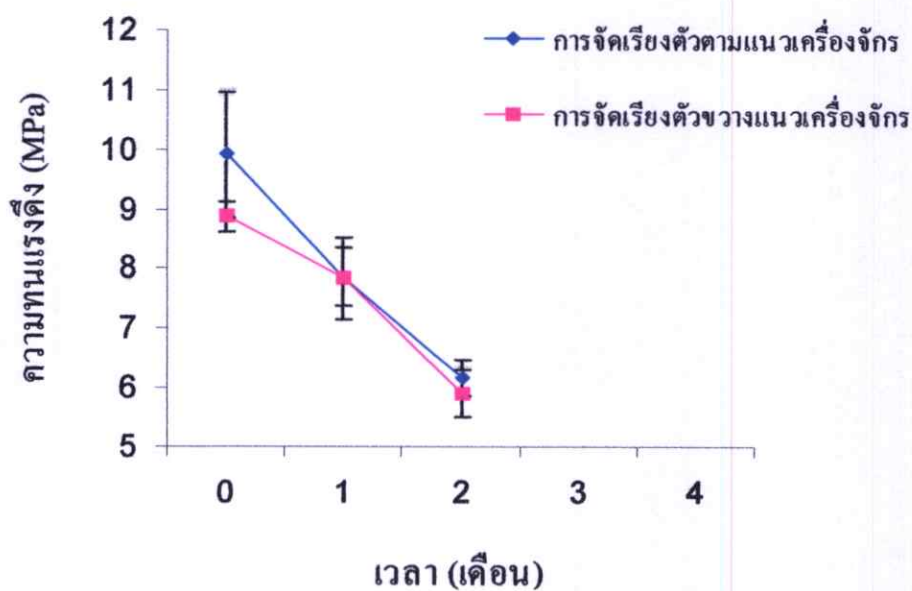
รูปที่ 4.3 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.4 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



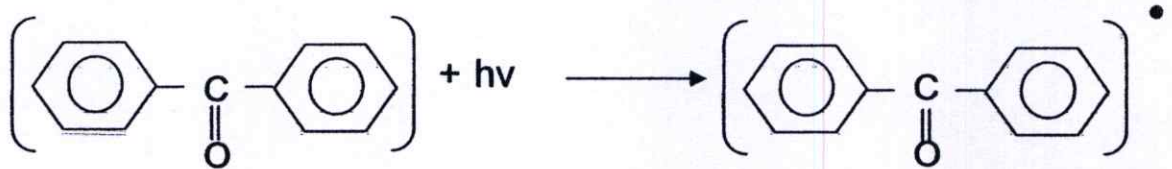
รูปที่ 4.5 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



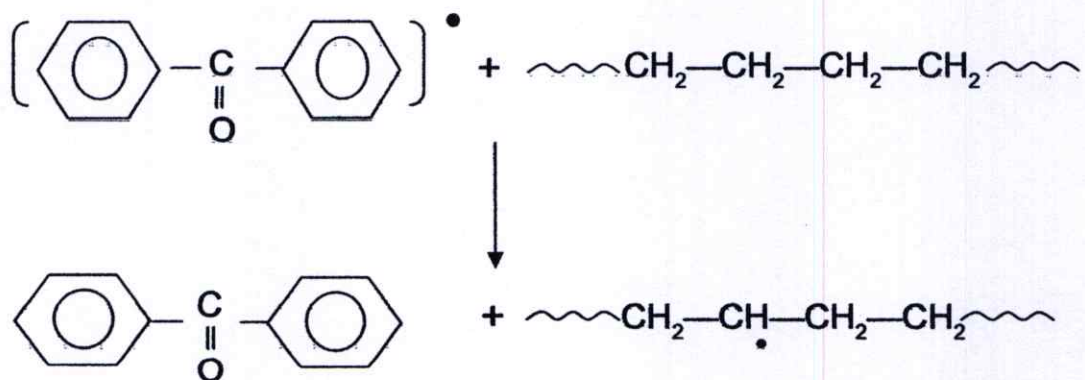
รูปที่ 4.6 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.3-4.6 พิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงภายหลังการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าความทนแรงดึงของฟิล์มทุกสูตรลดลง โดยเบนโซฟีโนนมีผลทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มลดลงมากขึ้น ซึ่งปริมาณเบนโซฟีโนนที่ใช้มีผลทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มลดลง โดยฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะมีความทนแรงดึงลดลงมากที่สุดจนไม่สามารถนำไปทดสอบได้ ภายหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน เนื่องจากชิ้นงานแตกกรอบ เพราะเบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของแสงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระในสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน จนทำให้เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และเกิดการตัดขาดของสายโซ่ ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ส่งผลสมบัติเชิงกลลดลงอย่างชัดเจน [44] โดยสามารถแสดงกลไกของปฏิกิริยาได้ดังนี้

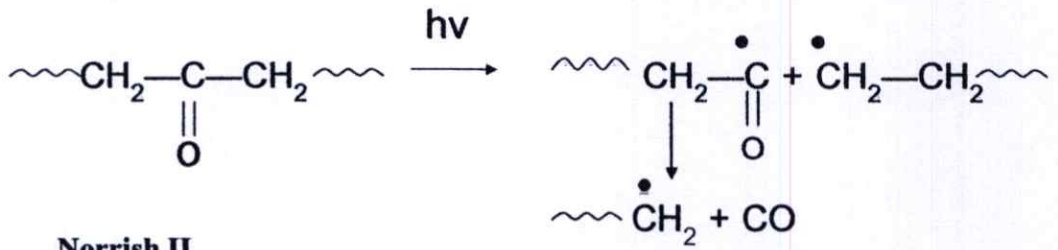
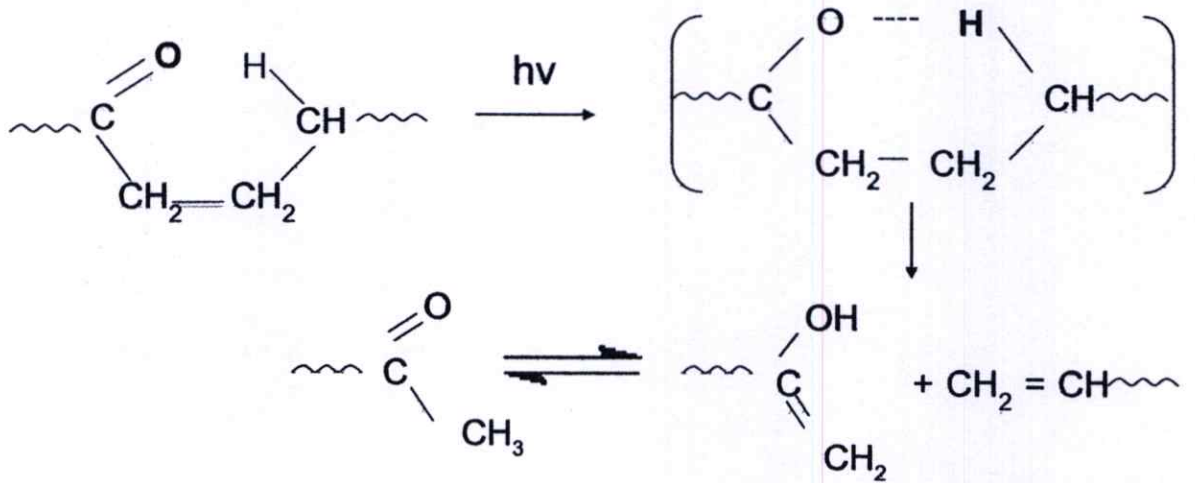
เมื่อเบนโซฟีโนนได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงยูวีจนเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะกระตุ้น



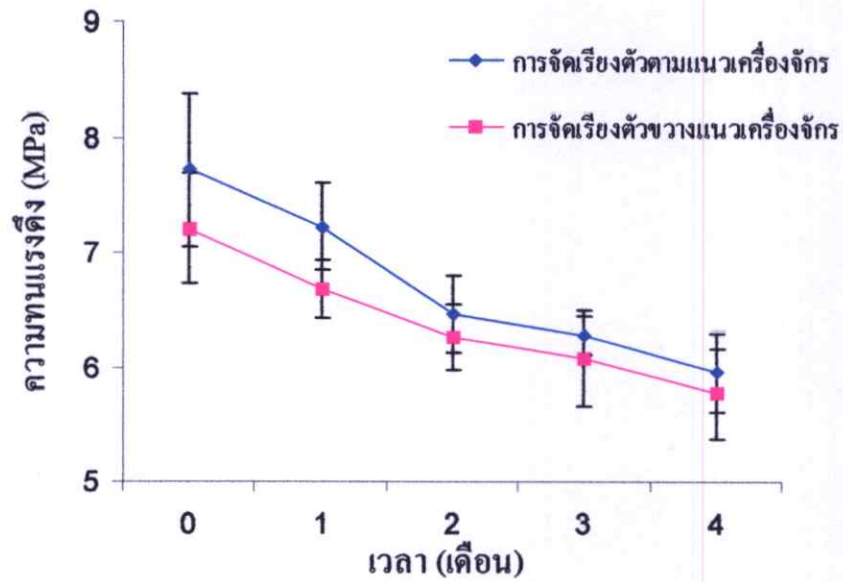
เบนโซฟีโนนในสถานะกระตุ้นจะทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนจนเกิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่



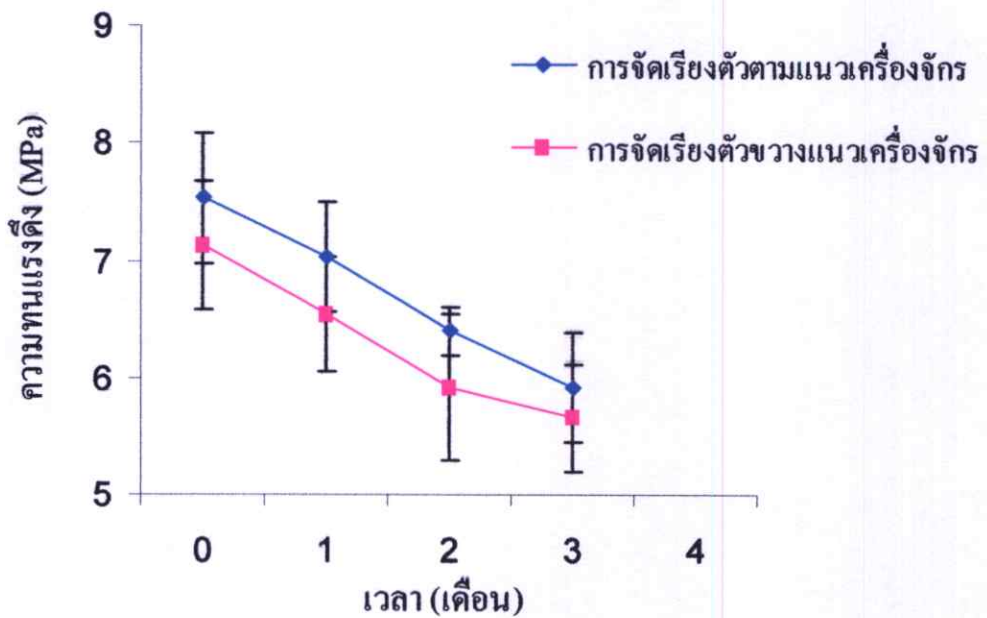
LDPE free radical

Norrish I**Norrish II**

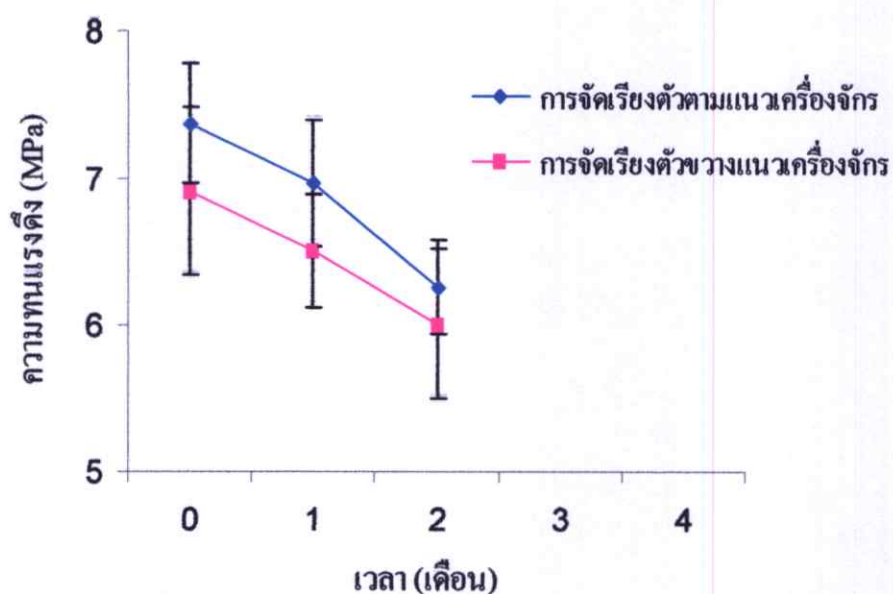
เมื่อพิจารณาความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงดังรูปที่ 4.7-4.10



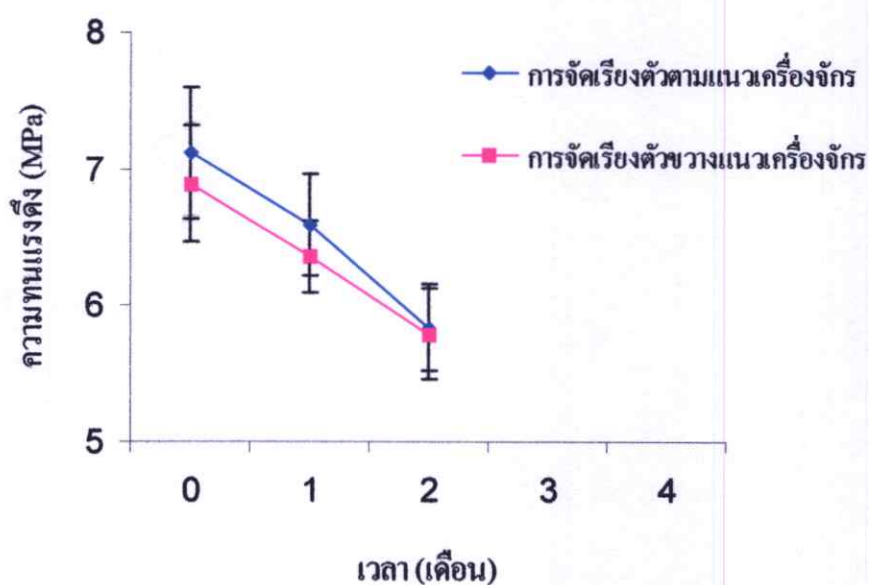
รูปที่ 4.7 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.8 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซอินร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



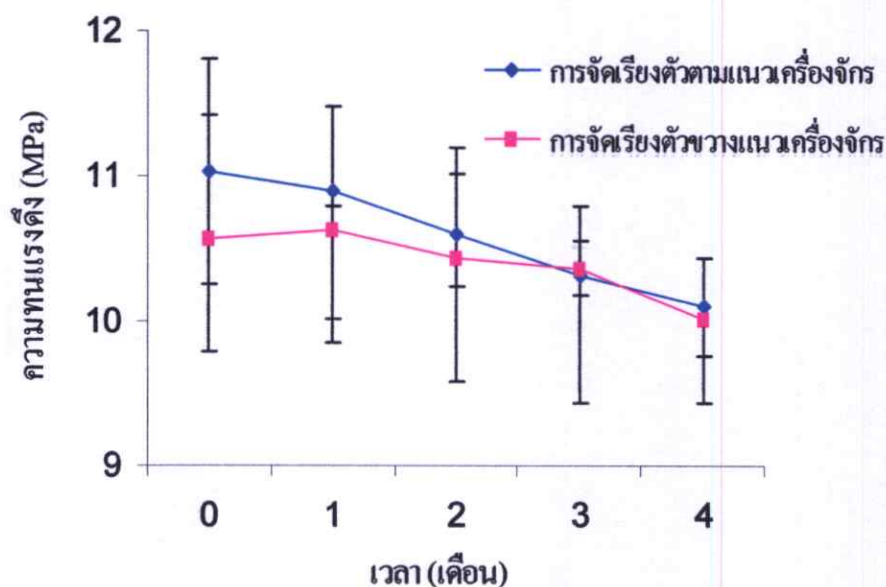
รูปที่ 4.9 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



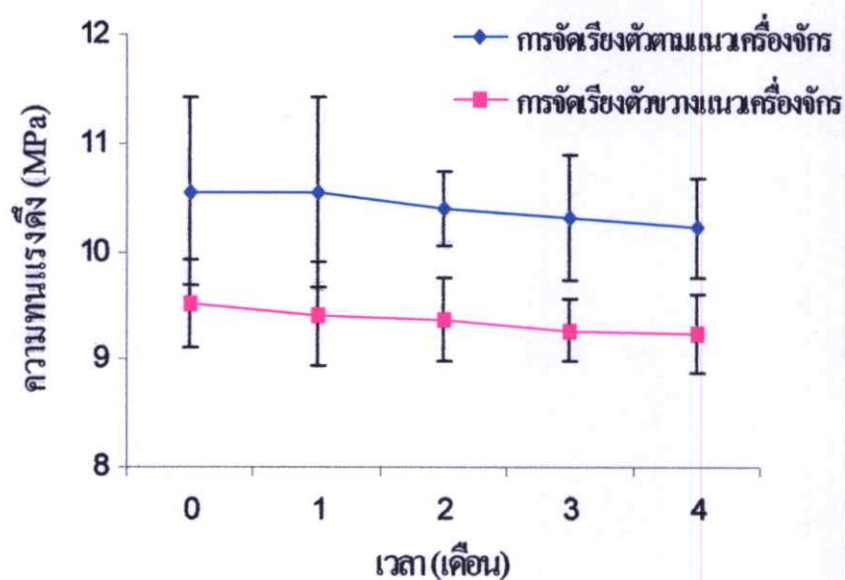
รูปที่ 4.10 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.7-4.10 พบว่า ภายหลังจากฉายแสงยูวีฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังมีค่าความทนแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มปกติ โดยเมื่อผสมแป้งและเบนโซฟีโนนจะมีผลทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มยิ่งลดลง และจะลดลงมากขึ้นตามปริมาณสารเบนโซฟีโนนที่ใส่ลงไปตั้งแต่ร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ตามลำดับ โดยการเติมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีผลทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงมากที่สุด แสดงว่า ฟิล์มที่ผสมแป้งและเบนโซฟีโนนทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผสมแป้ง เนื่องจากแป้งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จาก ภาพ SEM ดังรูปที่ 4.62 ก ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปบริเวณพื้นผิวของฟิล์มได้ง่ายขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น ซึ่งสนับสนุนให้เบนโซฟีโนนที่อยู่ในแป้งและเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะช่วยกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น [45] และส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณพื้นผิวของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จาก ภาพ SEM รูปที่ 4.62 ง จึงทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลงมากที่สุด

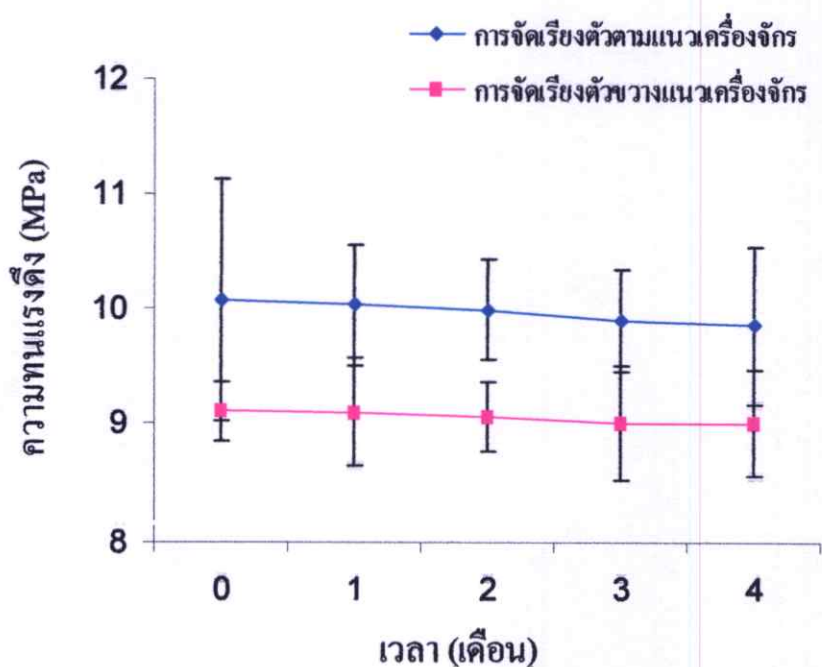
เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงดังรูปที่ 4.11-4.14



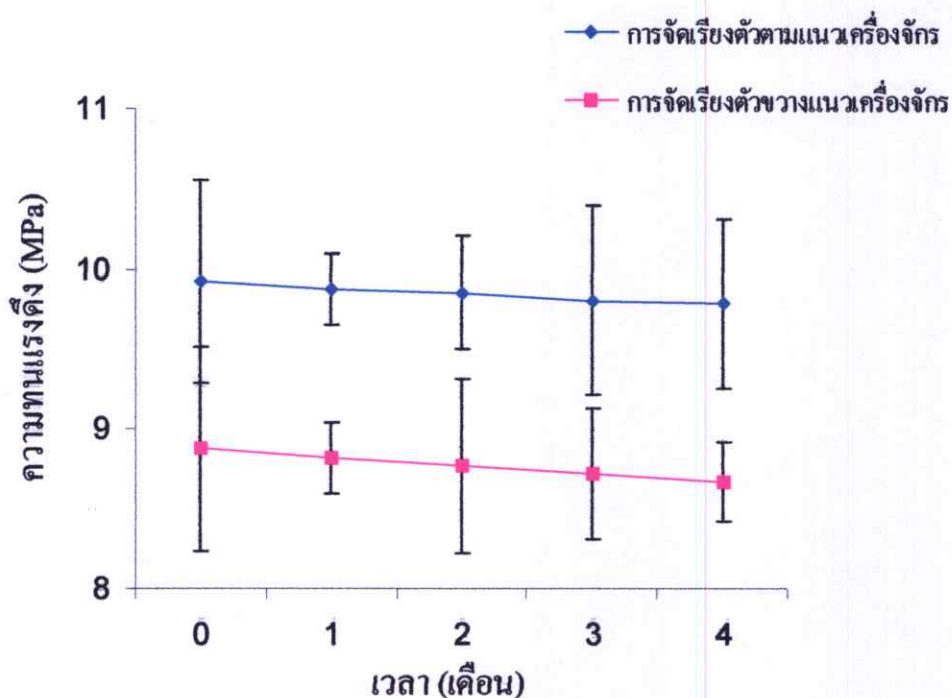
รูปที่ 4.11 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.12 ค่าความทนแรงดึงฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน



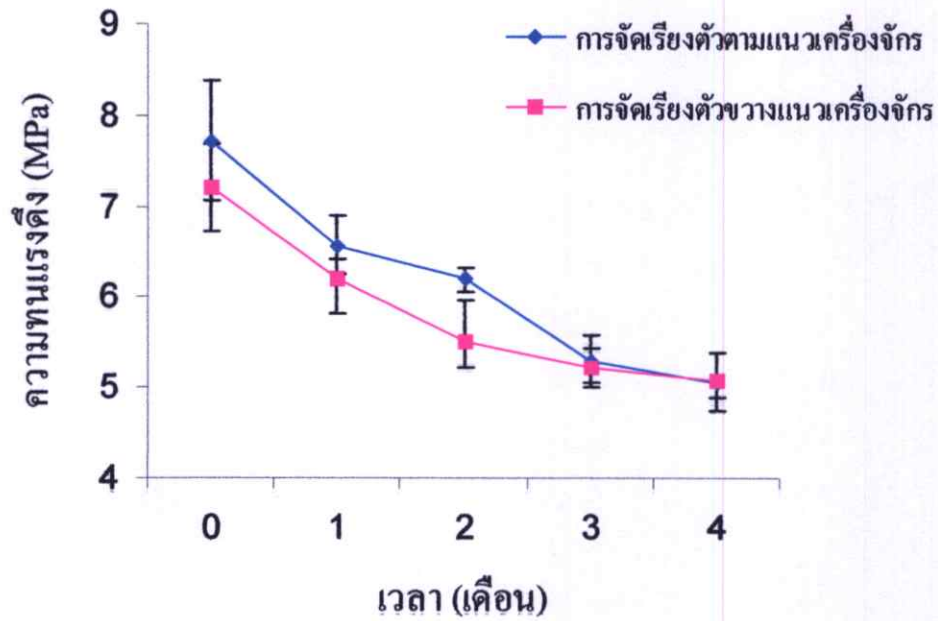
รูปที่ 4.13 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน



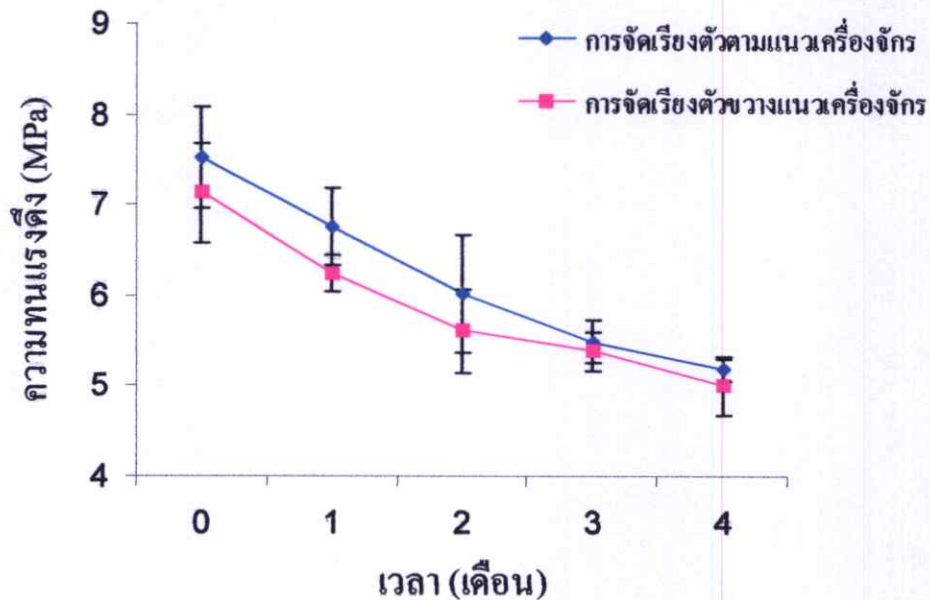
รูปที่ 4.14 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.11-4.14 พบว่า ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน ฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีผลทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มตามแนวเครื่องจักรและขวางเครื่องจักรมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน โดยฟิล์มที่ไม่ได้ผสมเบนโซฟีโนนมีผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนน ทั้งนี้เป็นเพราะ เบนโซฟีโนนมีฤทธิ์ต่อต้านจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน เนื่องจากเป็นสารอะโรมาติกคีโตน [28]

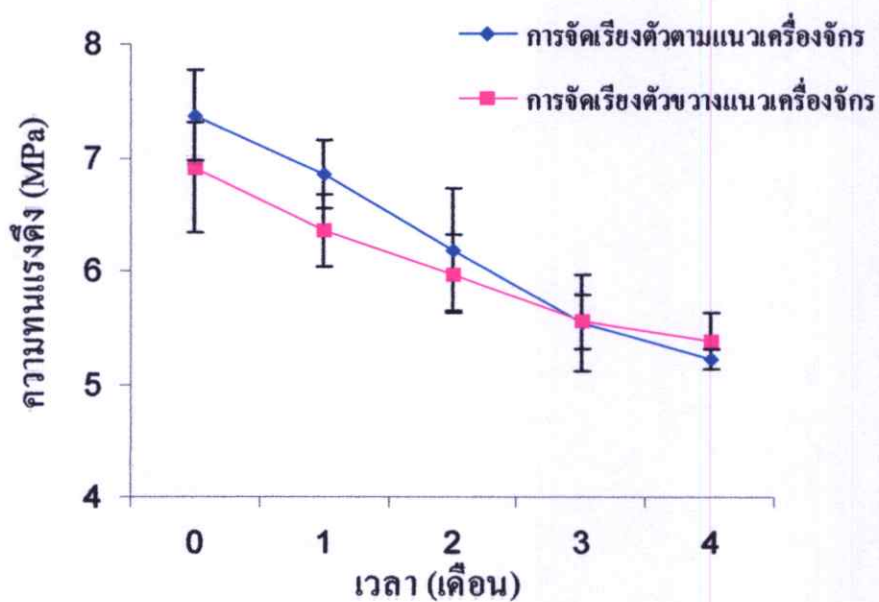
เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงดังรูปที่ 4.15-4.18



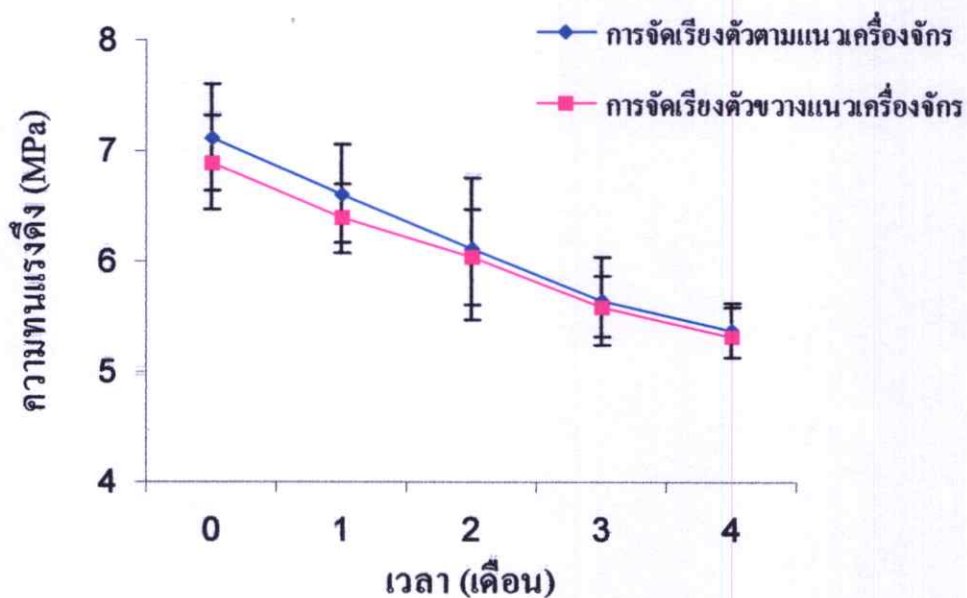
รูปที่ 4.15 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักรวมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.16 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซไฟโนร้อยละ 1 ของน้ำหนักรวมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.17 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

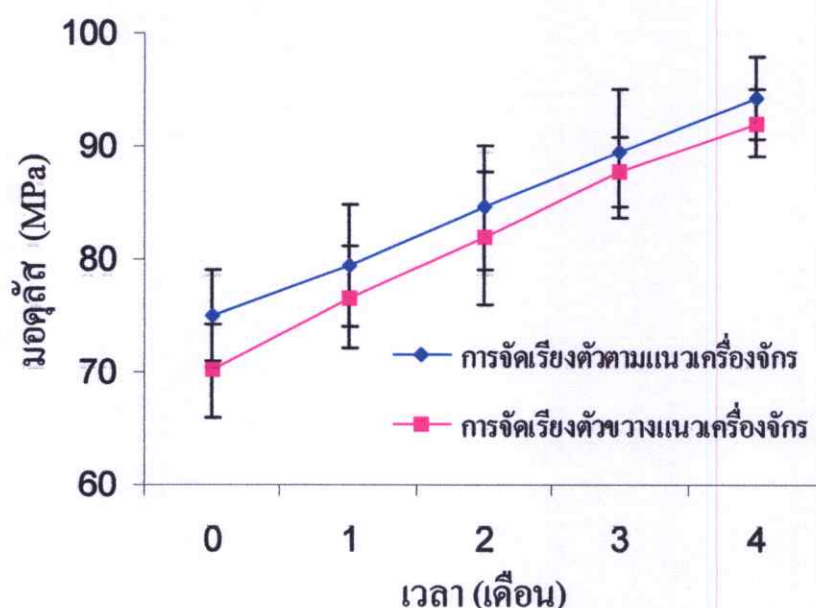


รูปที่ 4.18 ค่าความทนแรงดึงของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

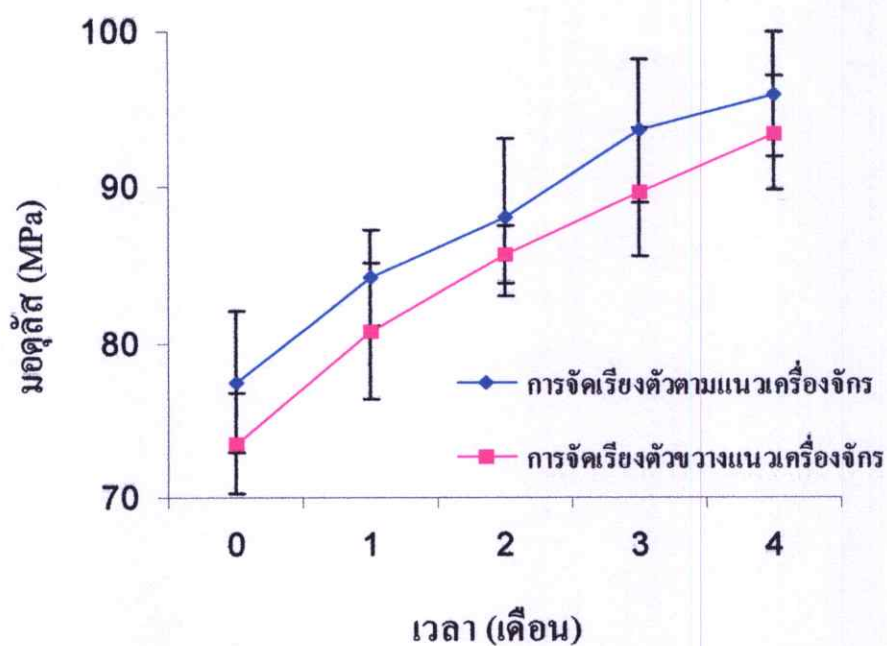
จากรูปที่ 4.15-4.18 พบว่าภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังมีผลทำให้ความทนแรงดึงทั้งแนวตามเครื่องจักรและขวางเครื่องจักรลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก การย่อยสลายของจุลินทรีย์ภายในดิน บริเวณเม็ดแป้งที่แทรกตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ [47] ซึ่งสามารถยืนยันผลการทดสอบจากภาพ SEM ดังรูปที่ 4.64 ค โดยจะพบร่องรอยและหลุมที่เกิดจากเม็ดแป้งถูกย่อยสลาย ซึ่งปริมาณเบนโซฟีโนนที่เติมลงในฟิล์มผสมแป้งไม่มีผลทำให้ความทนแรงดึงของฟิล์มลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถยืนยันผลการทดสอบจากภาพ SEM ดังรูปที่ 4.64 ง จะพบร่องรอยคล้ายคลึงกับฟิล์มผสมแป้งที่ไม่ได้เติมเบนโซฟีโนน เนื่องจากปริมาณเบนโซฟีโนนที่ใช้ในการทดลองเพียงร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และเป็นสารอินทรีย์จึงไม่สามารถออกฤทธิ์ด้านการทำงานของจุลินทรีย์ภายในดินได้อย่างชัดเจน [28]

4.1.3 ค่ามอดูลัสเมื่อได้รับการฉายแสงยูวีและฝังดิน เป็นเวลา 4 เดือน

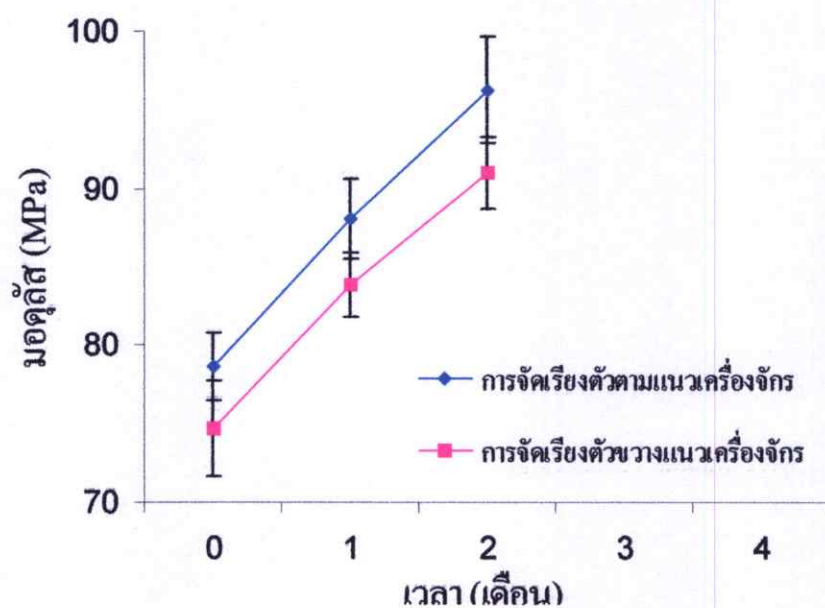
นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรหลังการทดลอง ฉายแสงยูวี (รูปที่ 4.19-4.26) และฝังดิน (รูปที่ 4.27-4.31) เป็นเวลา 4 เดือน แล้วทดสอบค่ามอดูลัส ได้ผลดังนี้



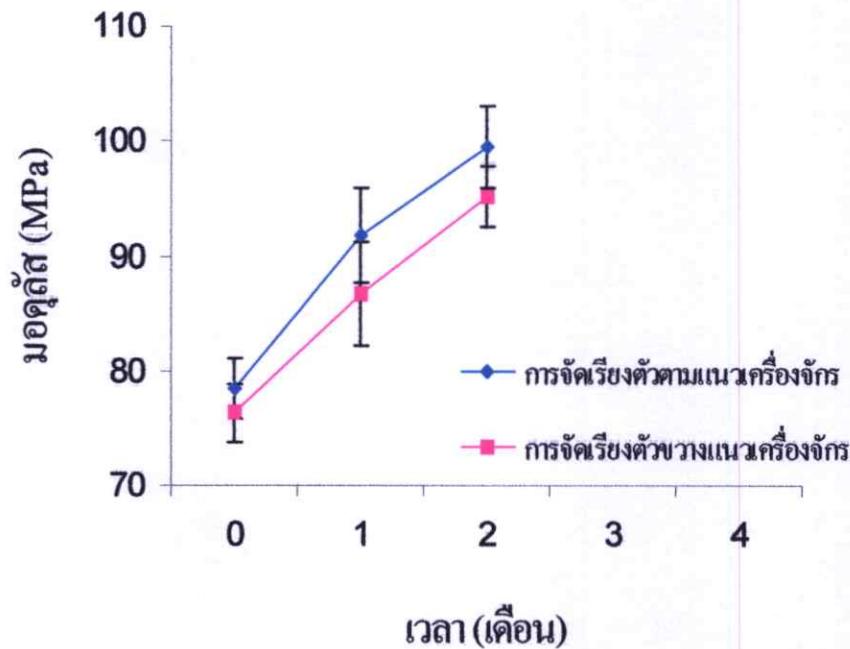
รูปที่ 4.19 มอดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.20 มอดุลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



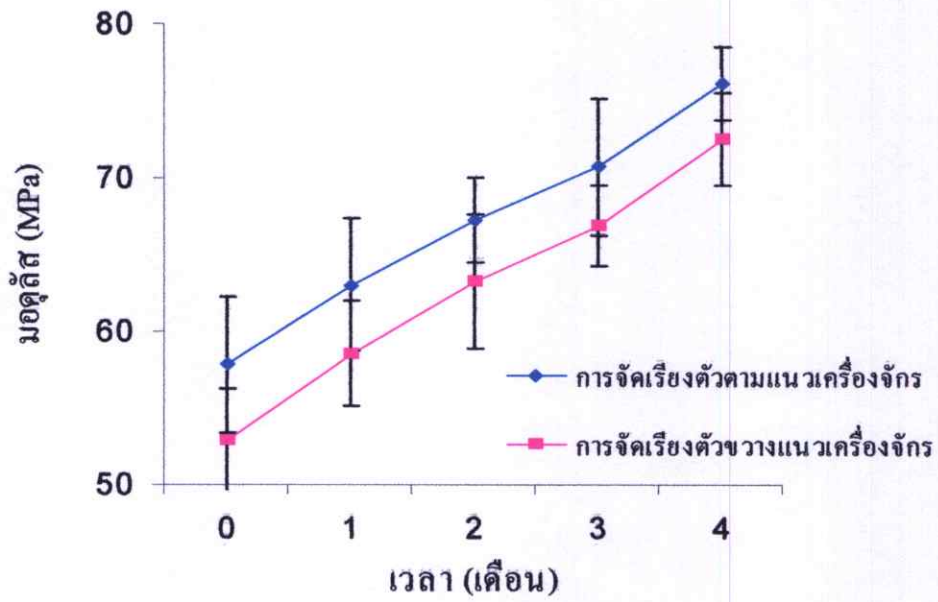
รูปที่ 4.21 มอดุลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



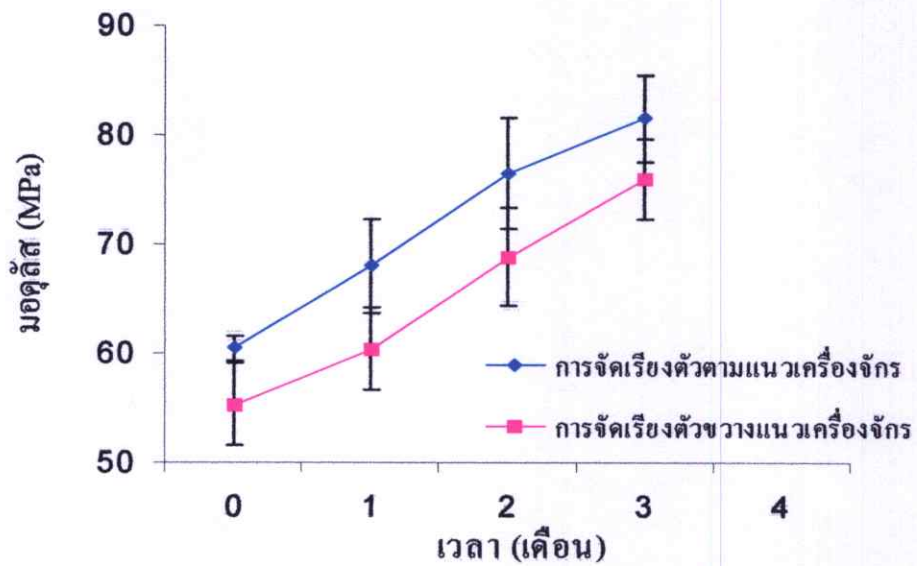
รูปที่ 4.22 มอดุลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.19-4.22 พบว่าค่ามอดุลัสทั้งตามแนวเครื่องจักรและขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนมีค่าเพิ่มขึ้น ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ภายใต้แสงยูวี ตามกลไกปฏิกิริยาที่ได้กล่าวมาแล้ว ทำให้ฟิล์มมีความแข็งเปราะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น โดยให้เหตุผลสอดคล้องกับค่าความทนแรงดึงที่ลดลงของฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนเมื่อได้รับแสงยูวีเป็นส่วนสนับสนุน

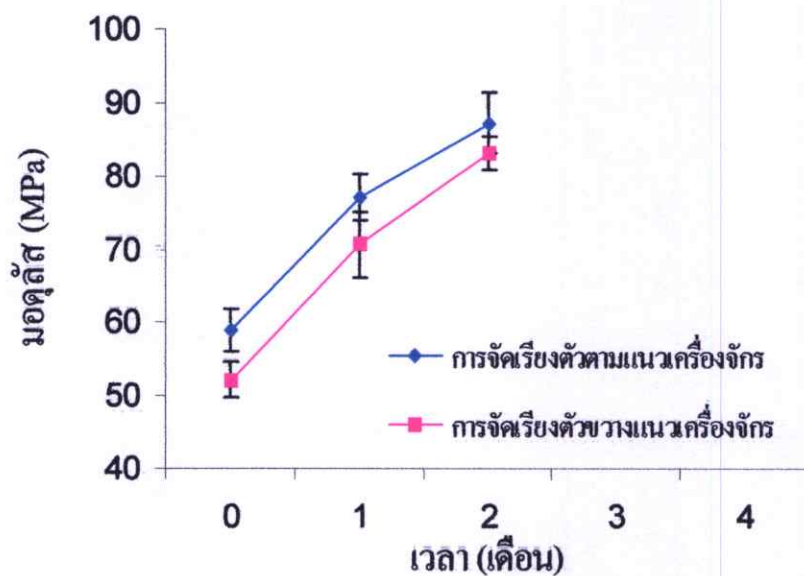
เมื่อพิจารณาค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสดังรูปที่ 4.23-4.26



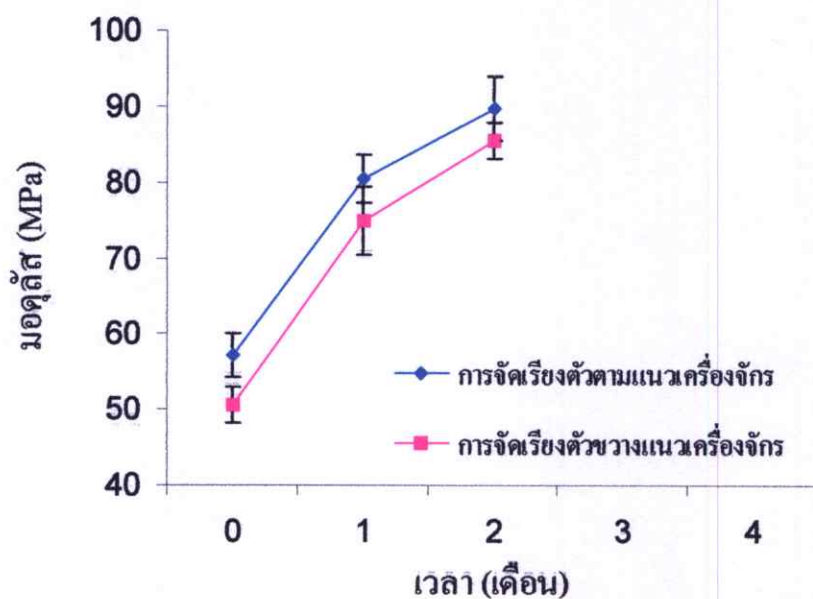
รูปที่ 4.23 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.24 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



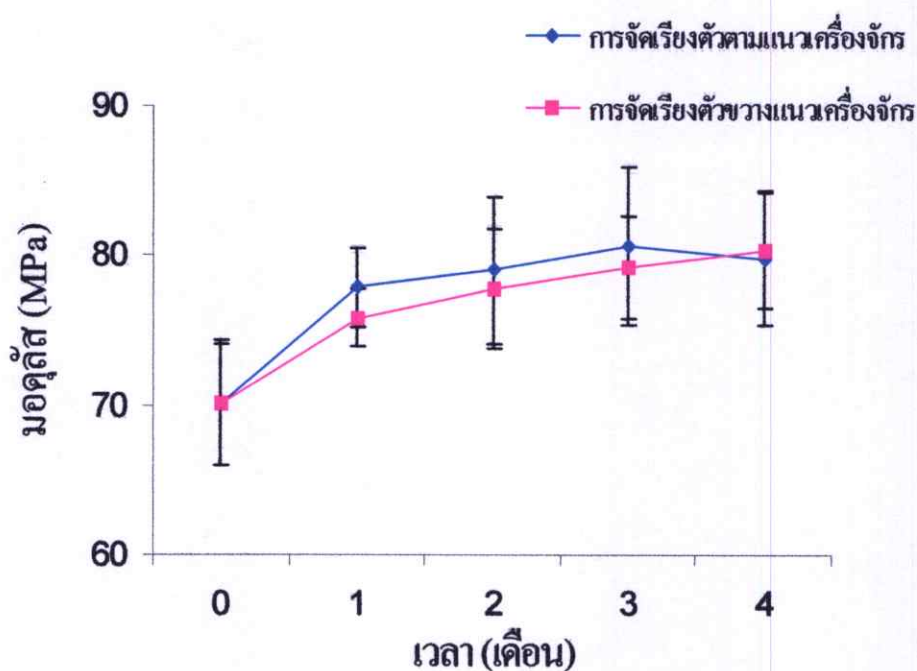
รูปที่ 4.25 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



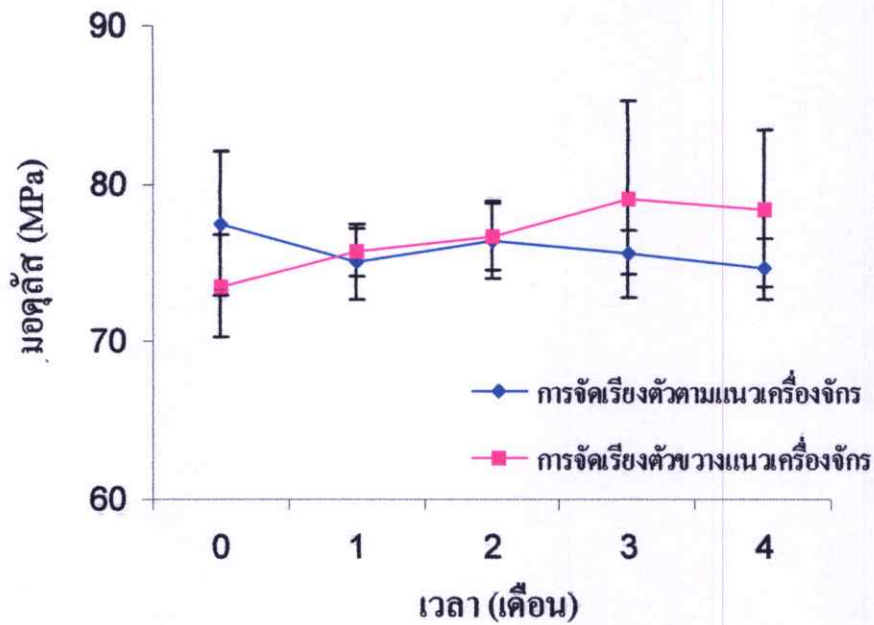
รูปที่ 4.26 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.23-4.26 พบว่าภายหลังการฉายแสงยูวี พอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนนมีค่ามอดุลัสทั้งแนวตามเครื่องจักรและขวางเครื่องจักรเพิ่มขึ้นแต่น้อยกว่าฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนเพียงอย่างเดียวโดยฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5-2 ของน้ำหนัก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จะมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นมากที่สุดจนไม่สามารถนำไปทดสอบได้ ภายหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน เนื่องจากชิ้นงานแตกกรอบเพราะเป็งและเบนโซฟีโนนมีส่วนสนับสนุนให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสลายตัวมากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น [45] ซึ่งใช้เหตุผลจากค่าความทนแรงดึงที่ลดลงของฟิล์มผสมแป้งและเบนโซฟีโนนเป็นส่วนสนับสนุน

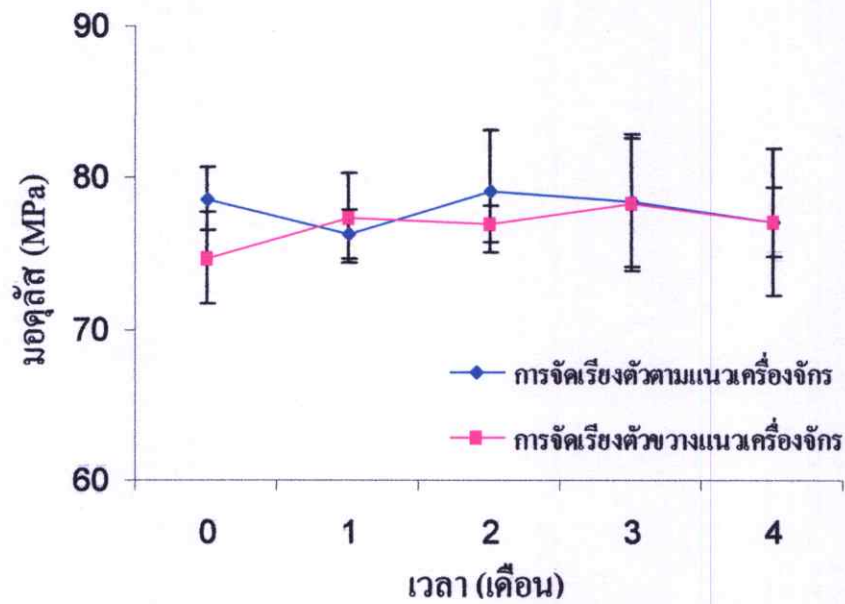
ในส่วนของค่ามอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน ภายหลังการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสดังรูปที่ 4.27-4.30



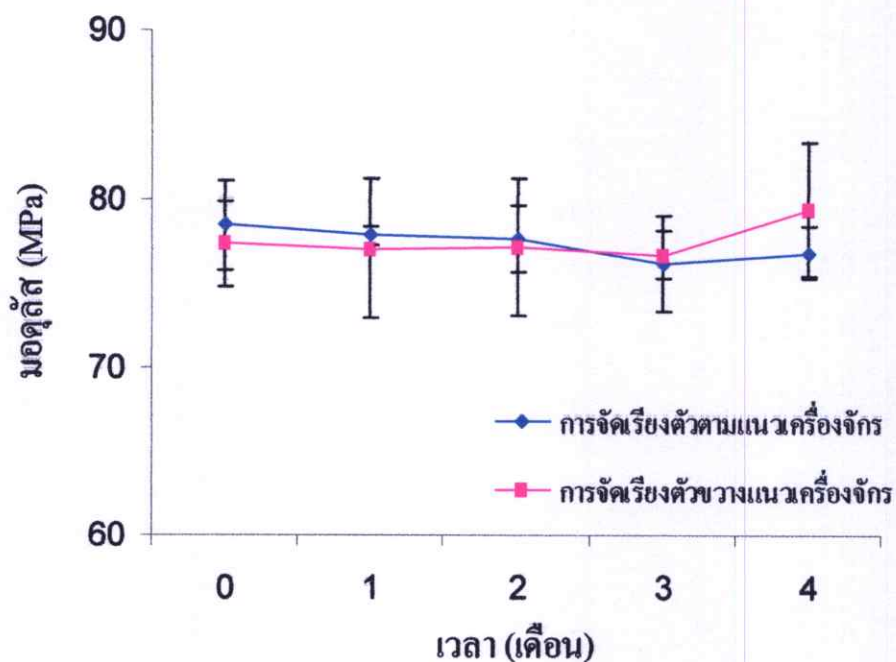
รูปที่ 4.27 มอดุลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.28 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของ น้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



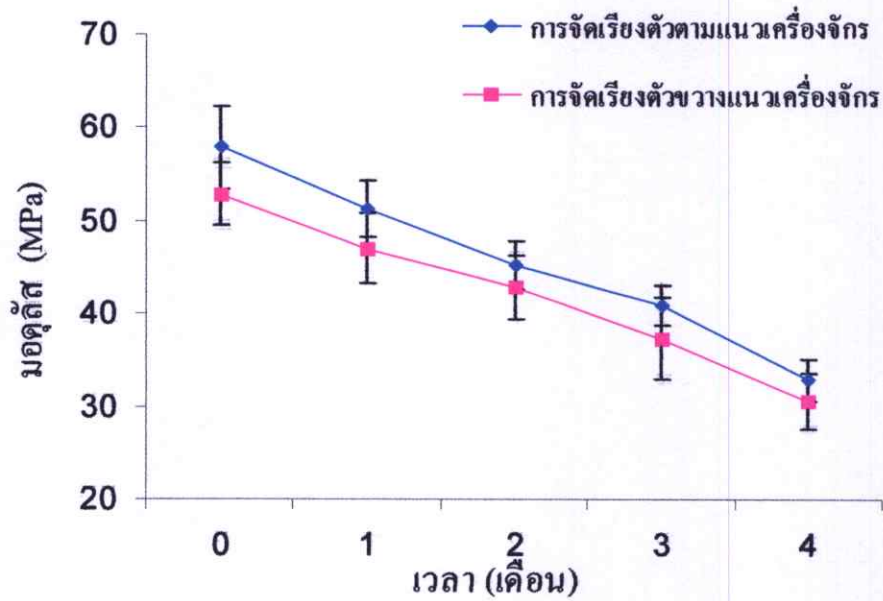
รูปที่ 4.29 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของ น้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



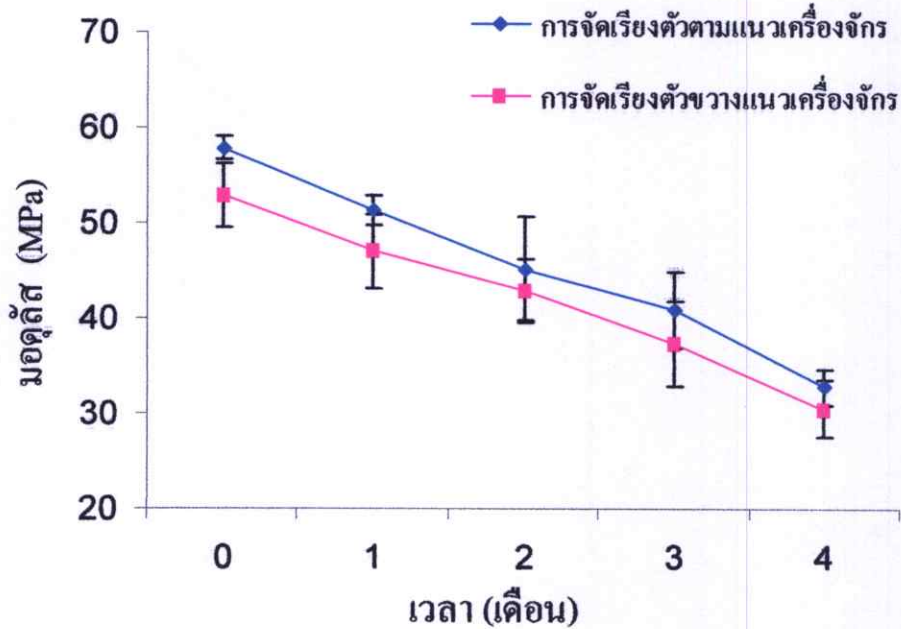
รูปที่ 4.30 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของ น้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.27-4.30 พบว่าภายหลังการฝังคืน ค่าโมดูลัสทั้งตามแนวเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากการฝังคืน ไม่มีผลต่อความทนแรงดึงอย่างชัดเจนจึงส่งผลให้ค่าโมดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงเด่นชัด [47]

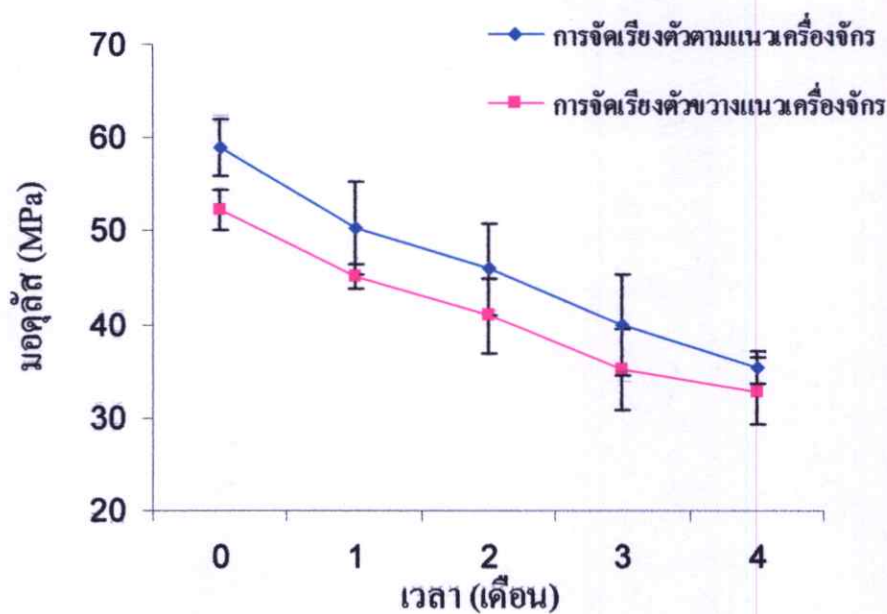
เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน ภายหลังการฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสดังรูปที่ 4.31-4.34



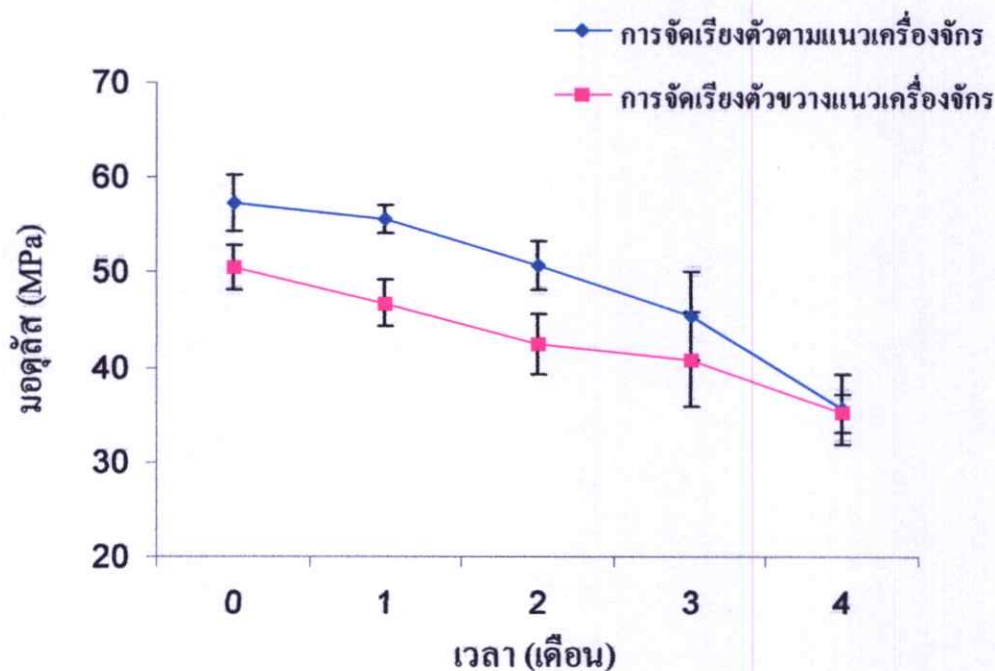
รูปที่ 4.31 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักรวมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.32 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักรวมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



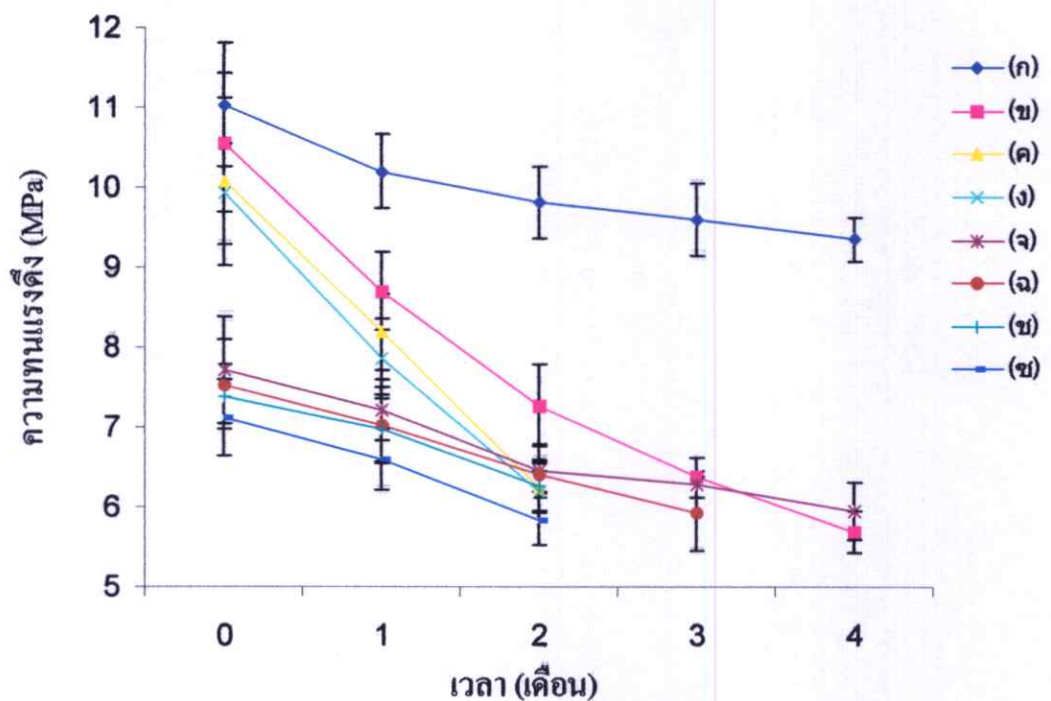
รูปที่ 4.33 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



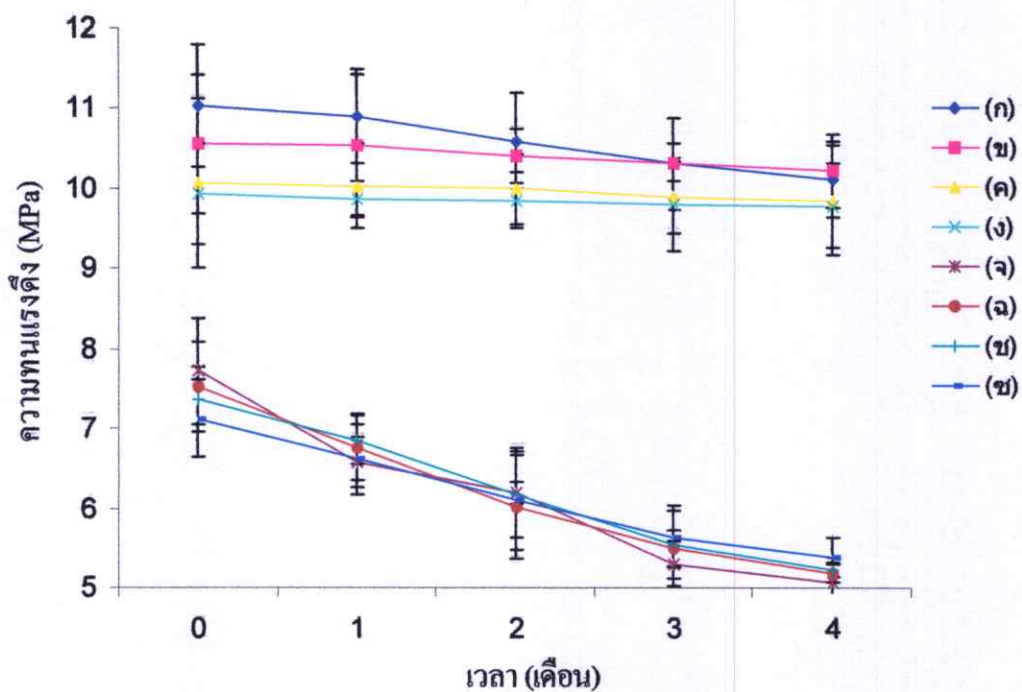
รูปที่ 4.34 โมดูลัสของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

จากรูปที่ 4.31-4.34 พบว่าภายหลังการฝังดินค่ามอดูลัสทั้งตามแนวเครื่องจักรและขวางเครื่องจักรของฟิล์มผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนมีค่าลดลง โดยปริมาณเบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อค่ามอดูลัสอย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากบริเวณที่เป็นแป้งในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะเป็นบริเวณที่เกิดการย่อยสลายของโพลีเมอร์ภายในดิน ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง [47] ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความทนแรงดึงของฟิล์มผสมแป้งที่มีค่าลดลงภายหลังการฝังดิน

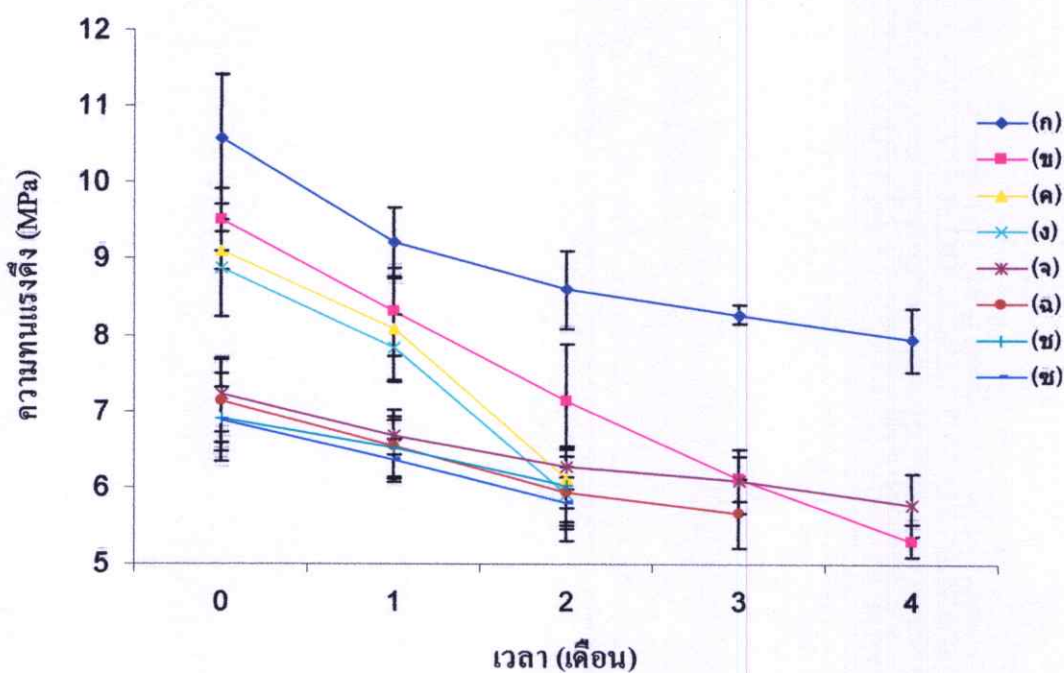
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ในแนวตามเครื่องจักร และแนวขวางเครื่องจักรภายหลังการฉายแสงยูวี แสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.37 ภายหลังการฝังดินแสดงดังรูปที่ 4.36 และ 4.39



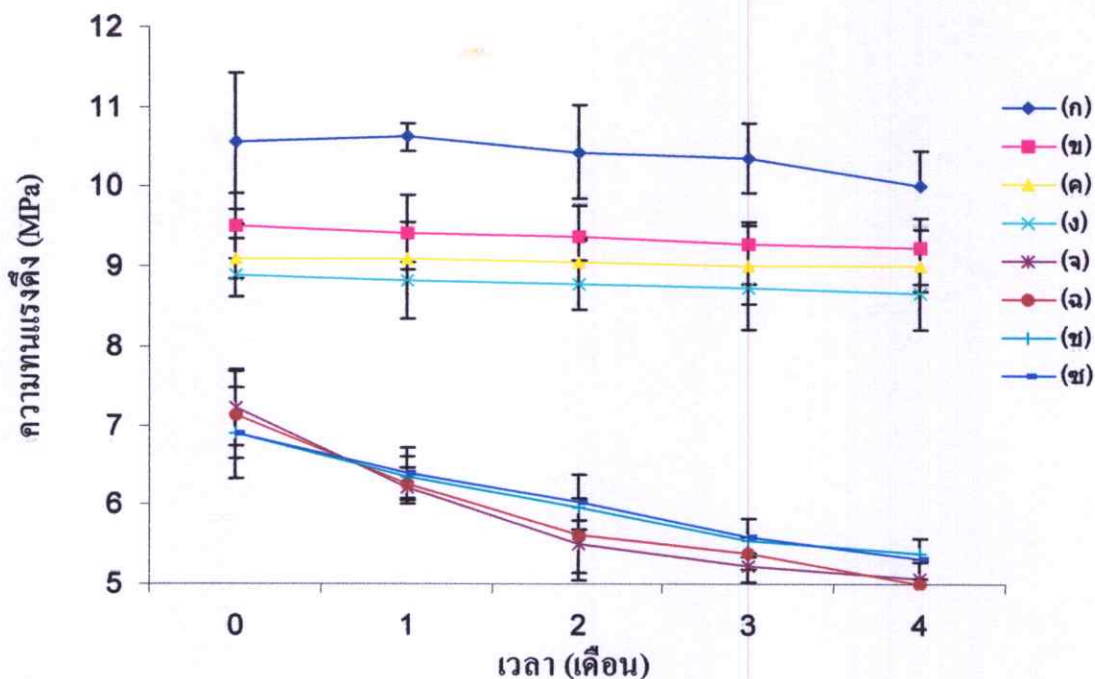
รูปที่ 4.35 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.36 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.37 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

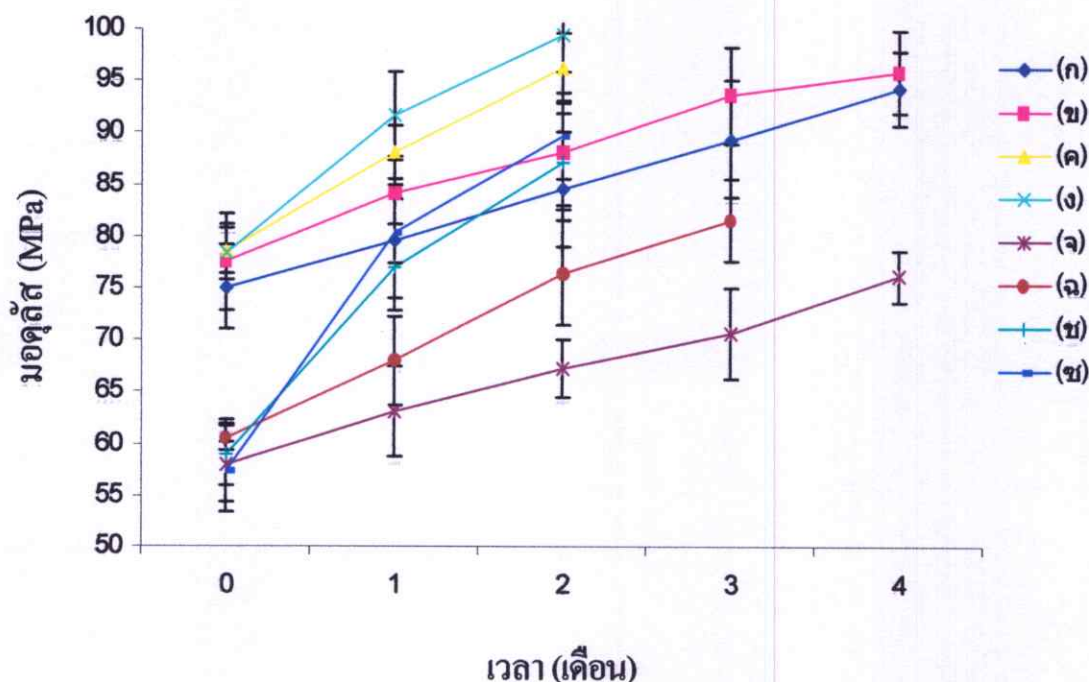


รูปที่ 4.38 ความทนแรงดึงในแนวการจัดเรียงตัวขวางแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

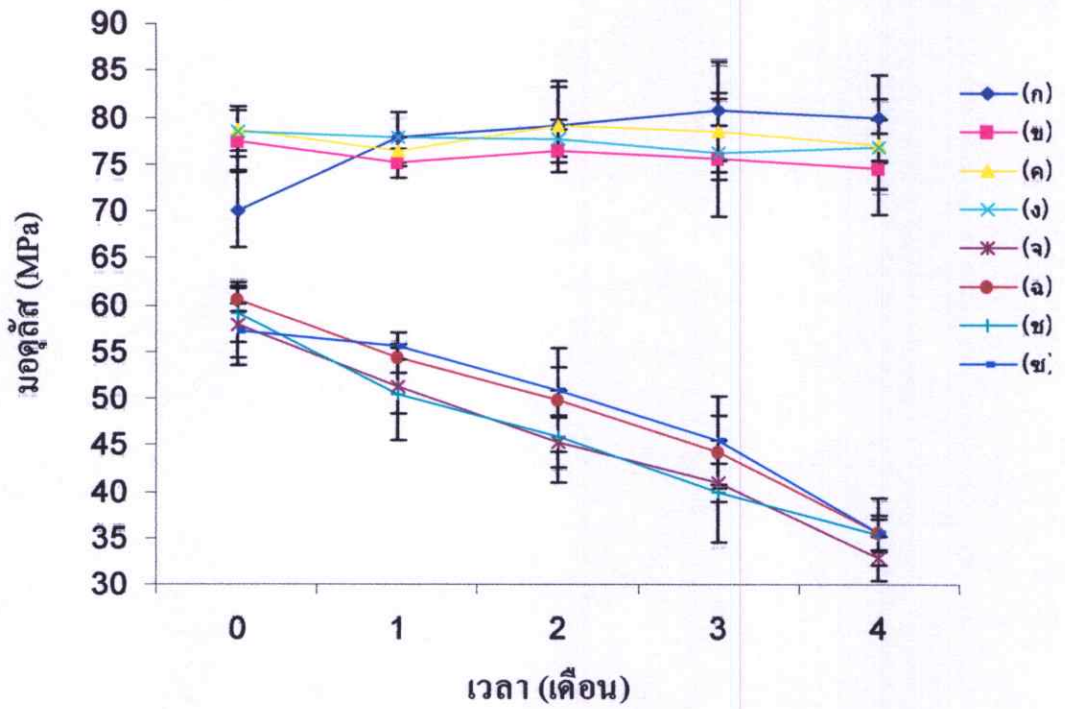
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 4.35-4.38 พบว่าภายหลังการฉายแสงยูวีและฝังดินค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรมีค่ามากกว่าแนวจัดเรียงตัวตามแนวขวางเครื่องจักร ภายหลังจากฉายแสงยูวีมีผลทำให้ฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนมีค่าความทนแรงดึงลดลง ซึ่งปริมาณเบนโซฟีโนนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความทนแรงดึงยิ่งลดลง โดยแสงยูวีมีผลทำให้ฟิล์มปกติที่ผสมเบนโซฟีโนนมีความทนแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มผสมแป้งและเบนโซฟีโนน เพราะเบนโซฟีโนนสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสงในฟิล์มปกติได้มากกว่าฟิล์มผสมแป้ง เนื่องจากฟิล์มผสมแป้งมีการเติมสารเติมแต่ง ได้แก่ สารช่วยผสม และกลีเซอรอล ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของเบนโซฟีโนนลดลง แต่ภายหลังฝังดินฟิล์มผสมแป้งมีผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มปกติ เนื่องจากปฏิกิริยาการย่อยสลายเม็ดแป้งในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีน โดยจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งเบนโซฟีโนนไม่ผลต่อการสลายตัวภายหลังการฝังดิน

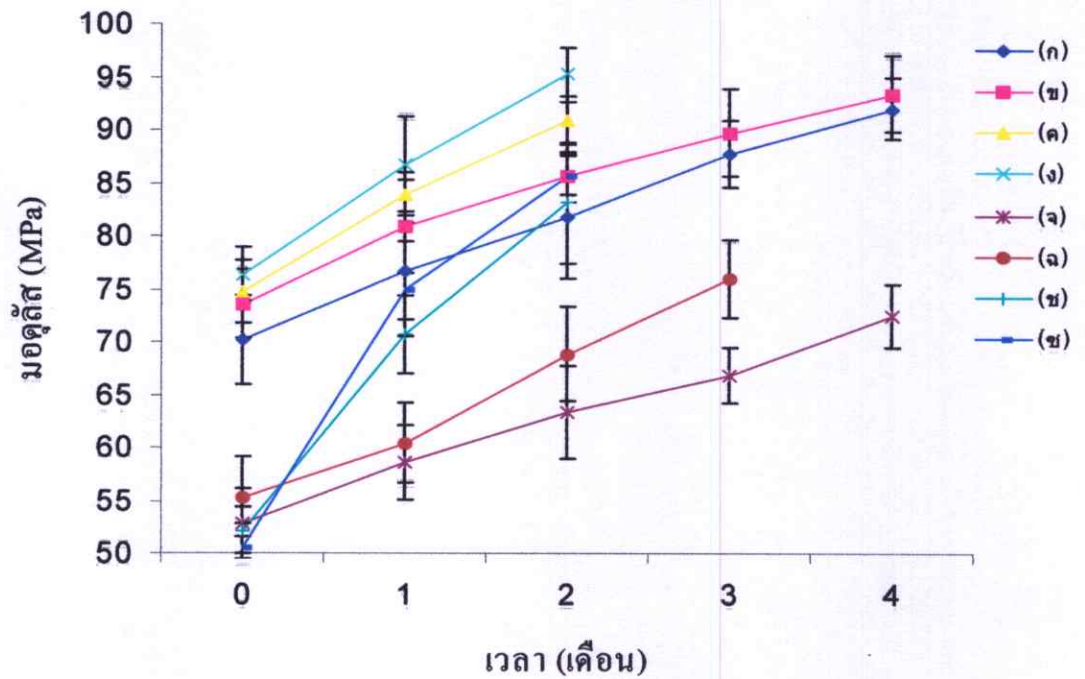
เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ในแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรภายหลังจากการฉายแสงยูวี แสดงดังรูปที่ 4.39 และ 4.41 ภายหลังจากฝังดิน แสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.42



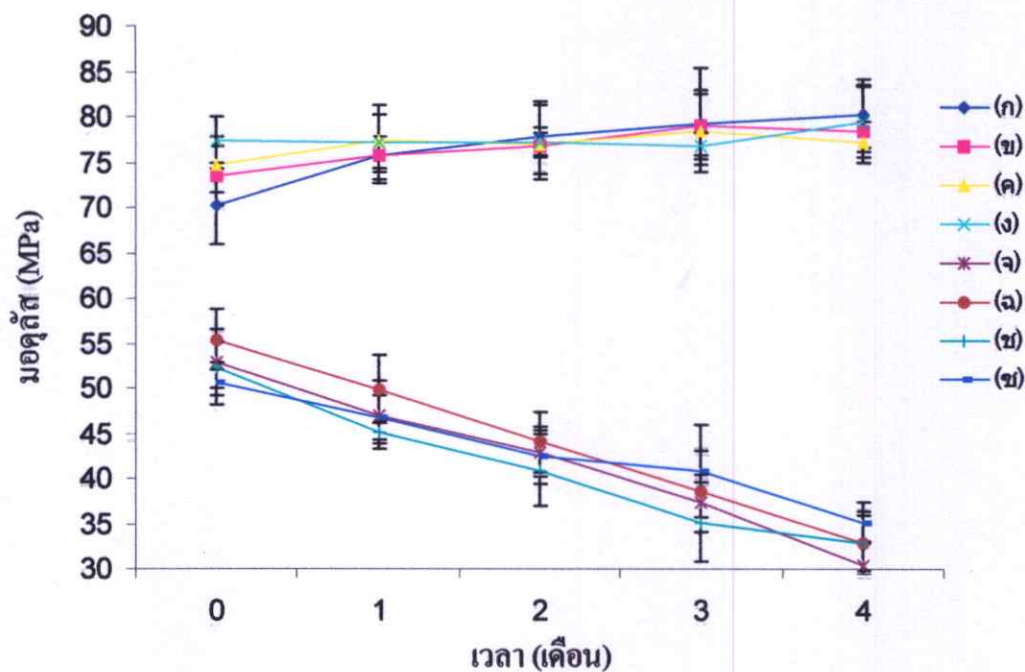
รูปที่ 4.39 มอดูลัสในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.40 มอดุลัสในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.41 มอดุลัสในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ 4.42 มอดุลัสในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวขวางเครื่องจักรของฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

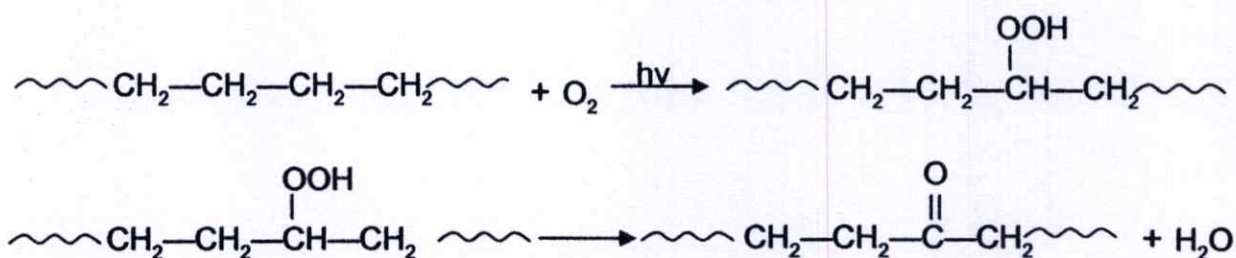
จากรูปที่ 4.35-4.38 พบว่าภายหลังจากฉายแสงยูวีและฝังคีนค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนวการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรมีค่ามากกว่าแนวจัดเรียงตัวแนวขวางเครื่องจักร ภายหลังจากฉายแสงยูวีมีผลทำให้ฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโซฟีโนนที่เติมลงไป ซึ่งสอดคล้องกับผลของความทนแรงดึง เพราะฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ภายหลังจากฝังคีนฟิล์มผสมแป้งมีผลทำให้ค่ามอดูลัสลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการย่อยสลายเม็ดแป้งในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีน โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของจุลินทรีย์ในดิน ทำให้ลักษณะฟิล์มมีความเปื่อยยุ่ย เนื่องจากความชื้นและเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้ค่ามอดูลัสลดลง โดยที่ฟิล์มปกติที่เติมเบนโซฟีโนนจะไม่มีผลทำให้ค่ามอดูลัสเปลี่ยนแปลงชัดเจนหลังการฝังคีน

จากการทดสอบความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ภายหลังจากฉายแสงยูวี และฝังคีน พบว่า แสงยูวีมีผลทำให้ฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนมีค่าความทนแรงดึงลดลงแต่ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจาก เบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้นภายใต้แสงยูวี ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์ขึ้นในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลง [29]

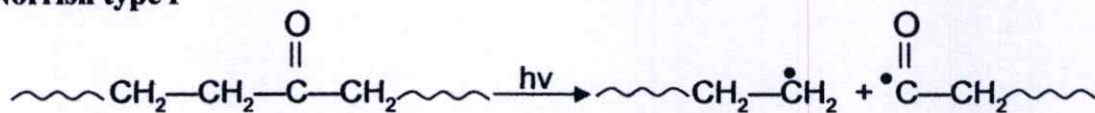
ฟิล์มที่ผสมแป้งภายหลังจากฝังคีนจะทำให้ค่าความทนแรงดึง และค่ามอดูลัสลดลง เนื่องจากอนุภาคแป้งจะแทรกตัวอยู่ระหว่างเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดเป็นรอยต่อระหว่าง ภูมิภาค ทำให้แสงและออกซิเจนแพร่ผ่านเข้าไปในเมทริกซ์ได้มากขึ้น ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเสถียรภาพ [47] นอกจากนี้การที่เติมแป้งลงไปอาจทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของผลึกในพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์มีค่าความเป็นผลึกลดลง ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน และสูตรที่ผสมมีการใส่พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ปริมาณ 65% ของน้ำหนักแป้ง ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่า พลาสติกไซเซอร์ทำให้วัสดุนิ่มขึ้น ความแข็งแรง และความแข็งแรงลดลง ดังนั้น เมื่อได้รับแรงดึงจึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้น [49]

4.2 การหาปริมาณออกซิเดชัน

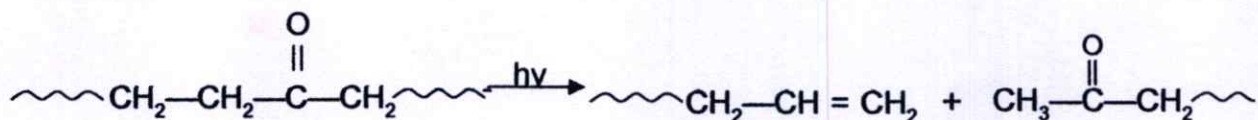
การวัดประสิทธิภาพการสลายตัวของพอลิเมอร์ สามารถวัดได้จากปริมาณออกซิเดชันที่เกิดขึ้น จากนั้นจะเกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นโมเลกุลที่มีพันธะคู่ได้ง่าย ซึ่งทำให้เสถียรภาพของพอลิเมอร์น้อยลง เกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้น [46] ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่ได้แสดงไว้ เมื่อผสมพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แป้ง กลีเซอรอล PE-g-MA และ เบนโซฟีโนนตามสูตรต่างๆ นำไปวิเคราะห์ด้วย FTIR (ภาคผนวก จ) แล้วนำผลของสูตรต่างๆมาเปรียบเทียบการเกิดพันธะคู่ โดยพิจารณาช่วง $1500-2000 \text{ cm}^{-1}$ [47] ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดหมู่คาร์บอนิลผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR แสดงคัมรูปที่ 4.43 มีกลไกของปฏิกิริยาดังนี้

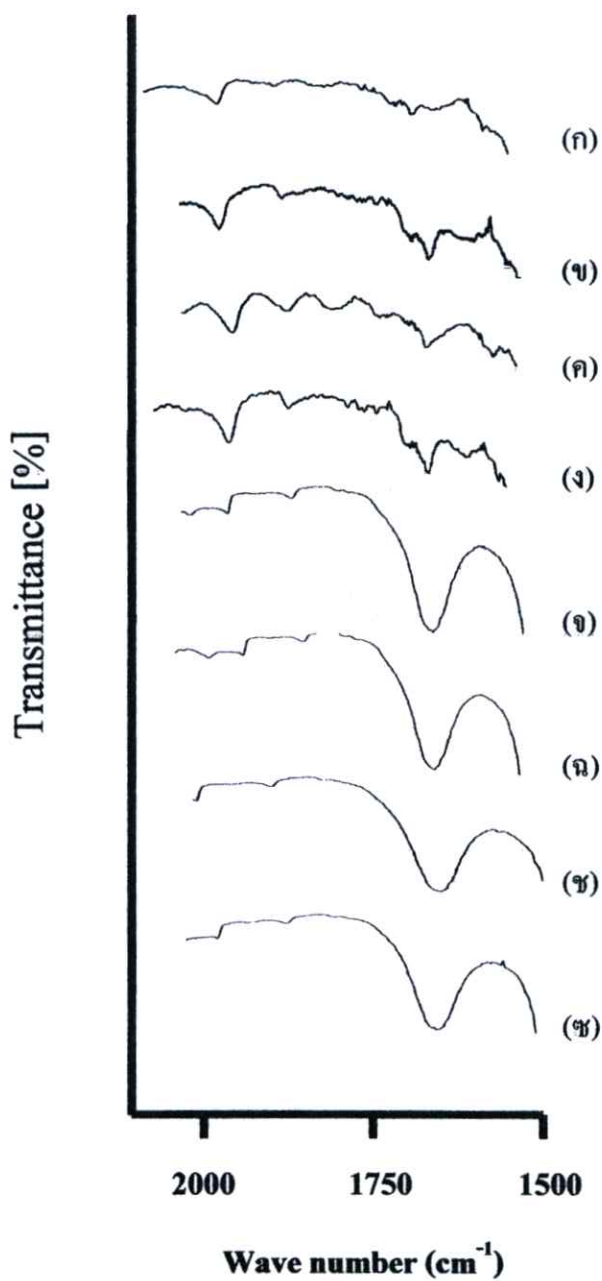


Norrish type I



Norrish type II





รูปที่ 4.43 กราฟ FTIR แสดงการเปรียบเทียบช่วง $1500-2000 \text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

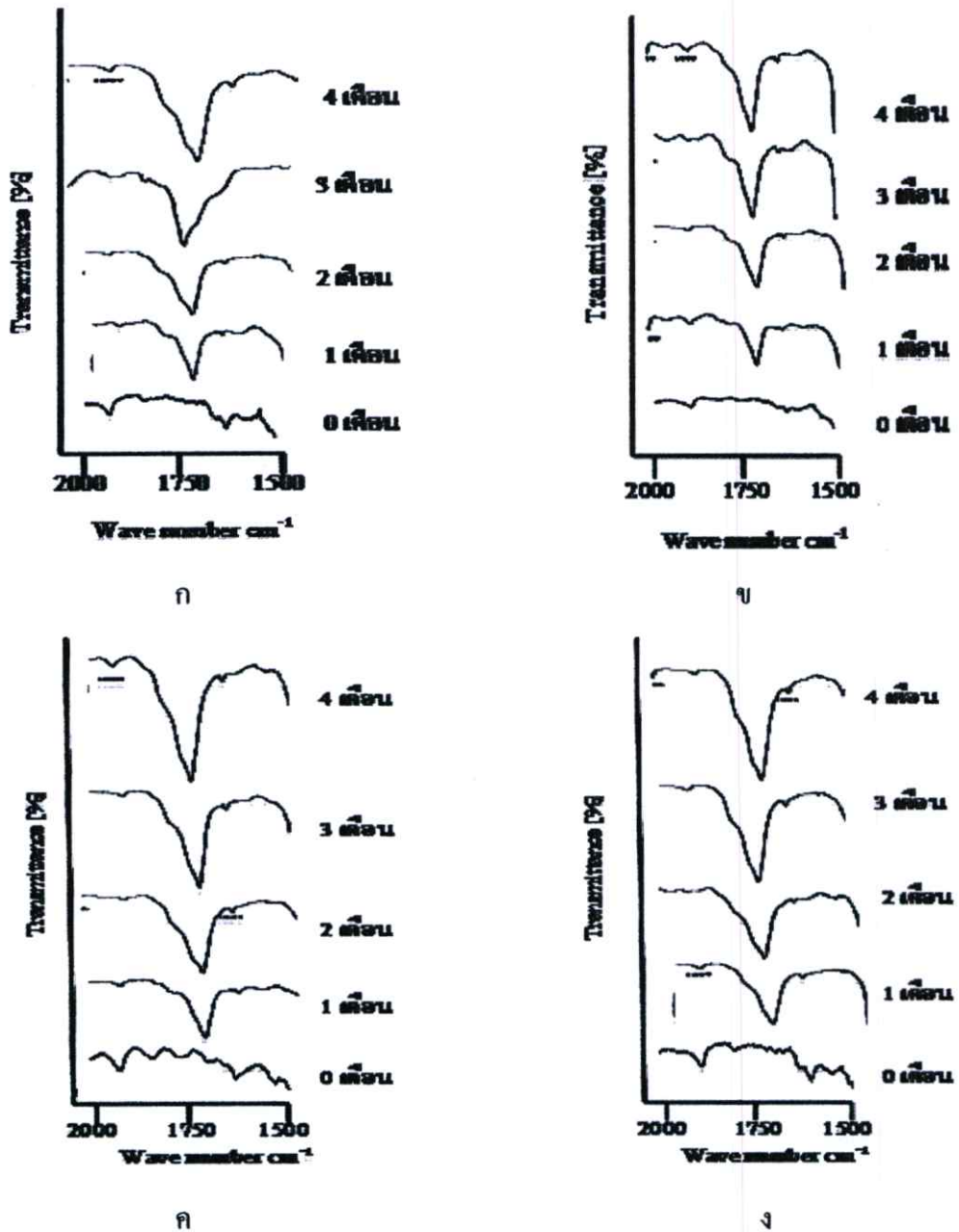
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนน
ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนน
ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนน
ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 4.43 พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีพีคหมู่คาร์บอนิลที่ $1,646-1,650 \text{ cm}^{-1}$ โดยสูตร
ที่ผสมแป้งมันสำปะหลังจะแสดงพีคที่เด่นชัดกว่า ทั้งนี้เกิดจากบริเวณ $1,640-1,650 \text{ cm}^{-1}$ เป็นบริเวณ
ที่เกิดหมู่ CH_2 bending ของสายโซ่พอลิเมอร์ [12] และเกิดหมู่ O-H ของแป้งที่ดูดความชื้น [48]
รวมกัน จึงทำให้พีคของสูตรที่ผสมแป้งเด่นชัดกว่า

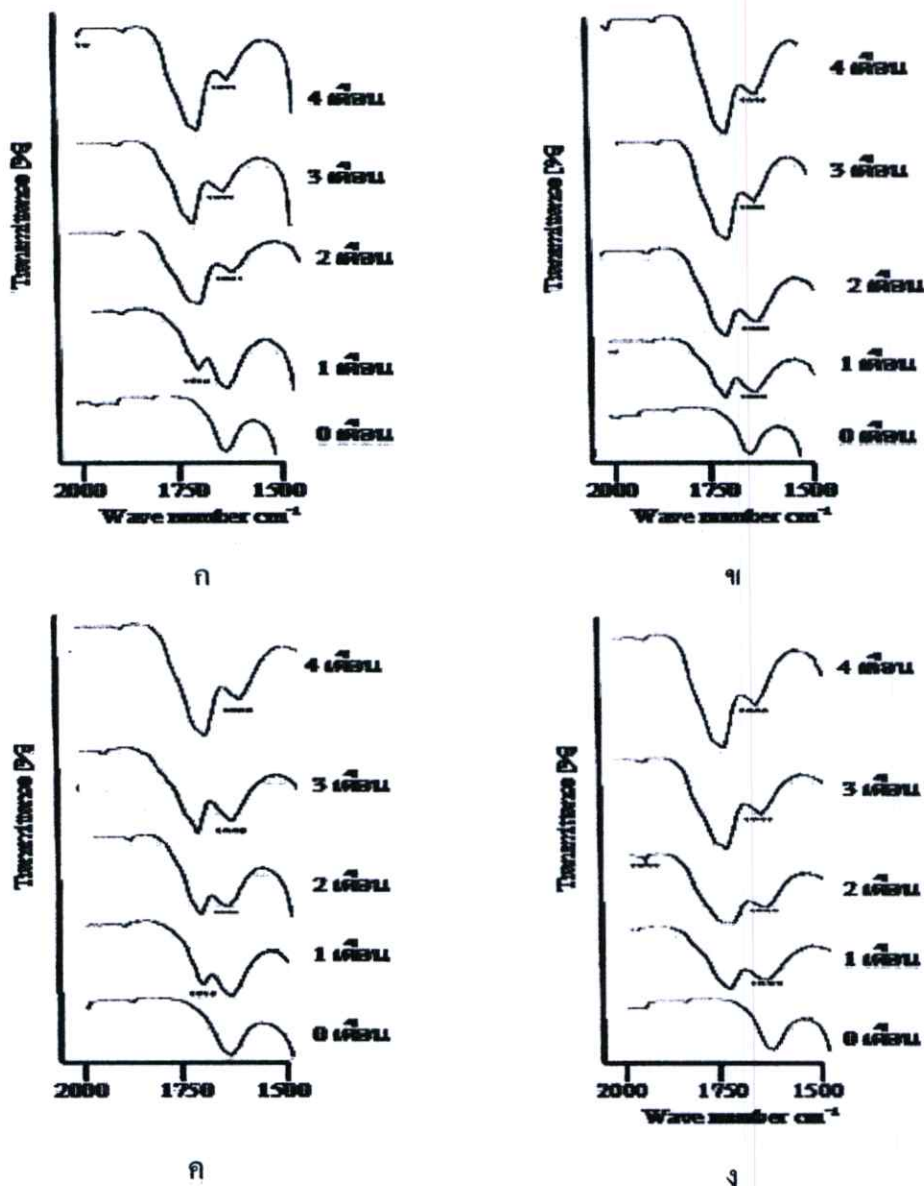
เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมภายหลังการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าแสงยูวีทำ
ให้มีหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้น โดยฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนมีผลทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นมากกว่า
ฟิล์มที่ไม่ได้ผสมเบนโซฟีโนน ทั้งนี้เนื่องมาจาก เบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นเกิดปฏิกิริยา
ออกซิเดชันได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น [46] และหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นตาม
ระยะเวลาในการฉายแสงยูวีโดยจะเพิ่มมากที่สุดเมื่อฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน โดยฟิล์มที่ผสม
เบนโซฟีโนนจะมีพีคที่เกิดหมู่คาร์บอนิลในช่วง $1,713-1,715 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดหมู่
C=O stretching ของสารประกอบคีโตน [49] ที่อาจเกิดจากเบนโซฟีโนนที่เป็นสารอะโรมาติก
คีโตน และฟิล์มที่ผสมแป้ง และเบนโซฟีโนนจะมีพีคที่เกิดหมู่คาร์บอนิลสองช่วง คือ $1,640-1,646$
 cm^{-1} ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิด CH_2 bending ของสายโซ่พอลิเมอร์ และเกิด O-H ของแป้งที่ดูดความชื้น
และ $1,713-1,715 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ C=O stretching ของสารประกอบคีโตน ตามลำดับ ผลการทดลอง
แสดงดังรูปที่ 4.44-4.45

หลังการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าไม่มีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร
ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายจากจุลินทรีย์ภายในดินแทนปฏิกิริยาออกซิเดชัน
จากแสงยูวี เพราะแสงยูวีเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิล ดังนั้น
การฝังดินจึงไม่พบหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้น จึงส่งผลสายโซ่พอลิเมอร์ไม่ถูกตัดขาดทำให้ไม่เกิดพันธะคู่
ของแอลคีนที่เป็นส่วนที่ไม่เสถียรในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์
สลายตัวได้ง่ายขึ้น [47] ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.46-4.47



รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

- ก. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



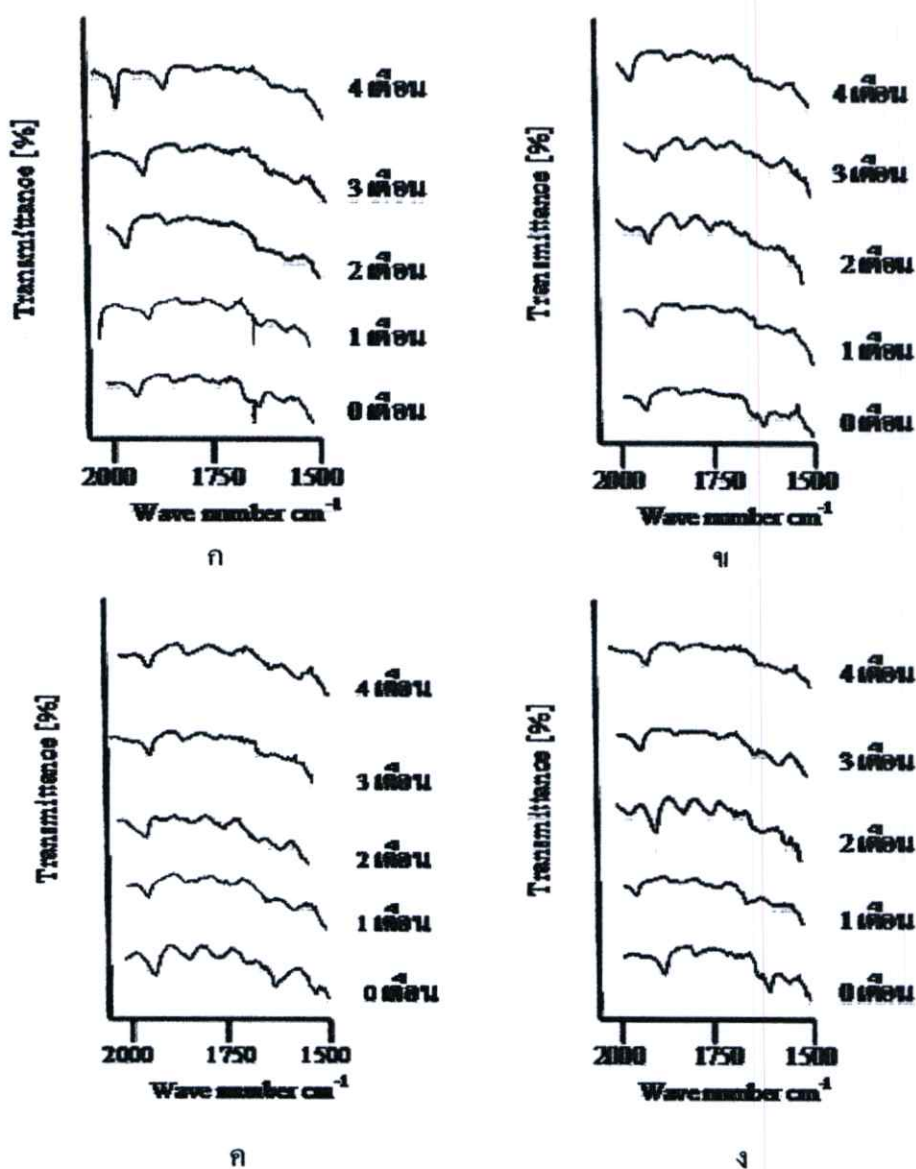
รูปที่ 4.45 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

ก. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

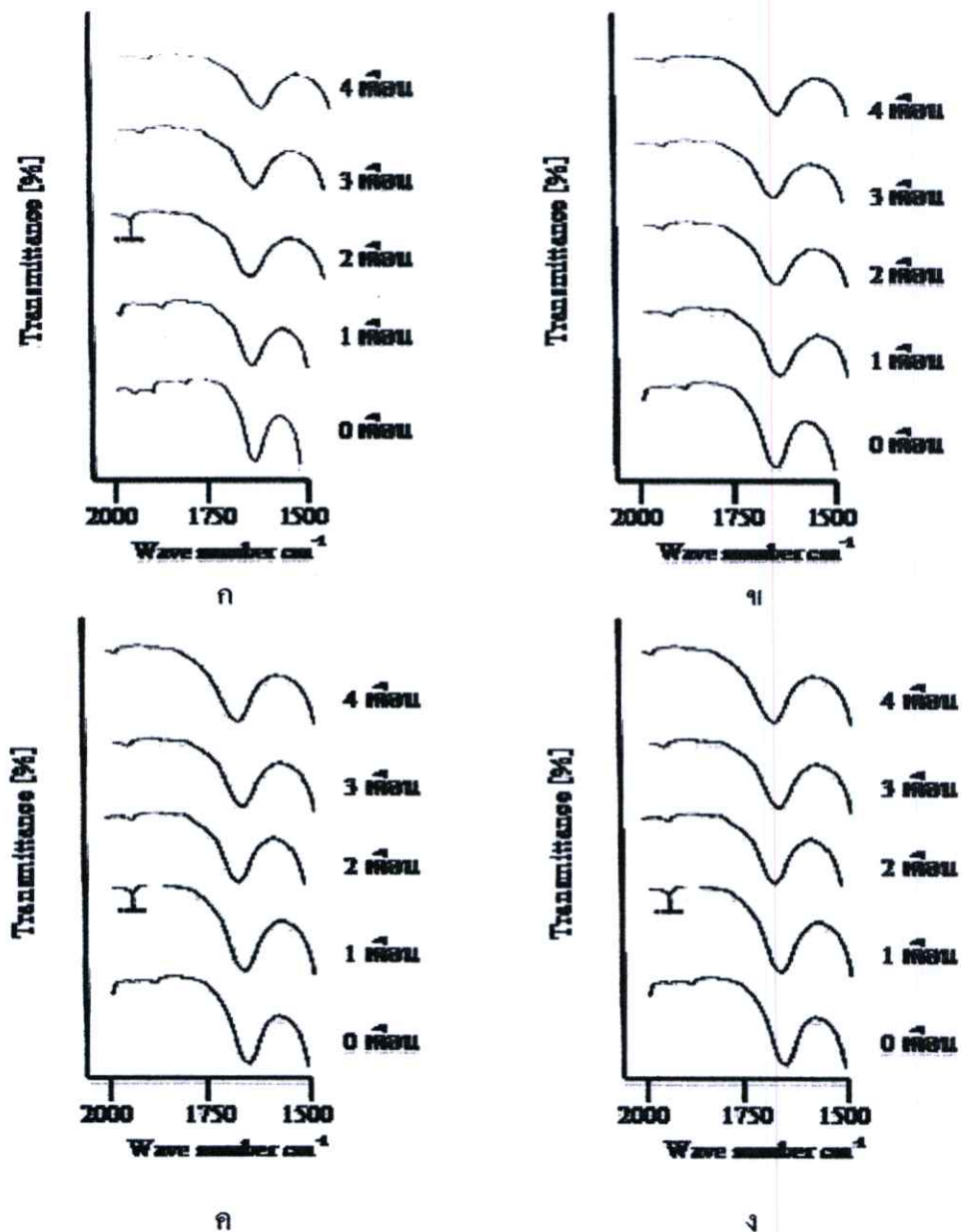
ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 4.46 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

- ก. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



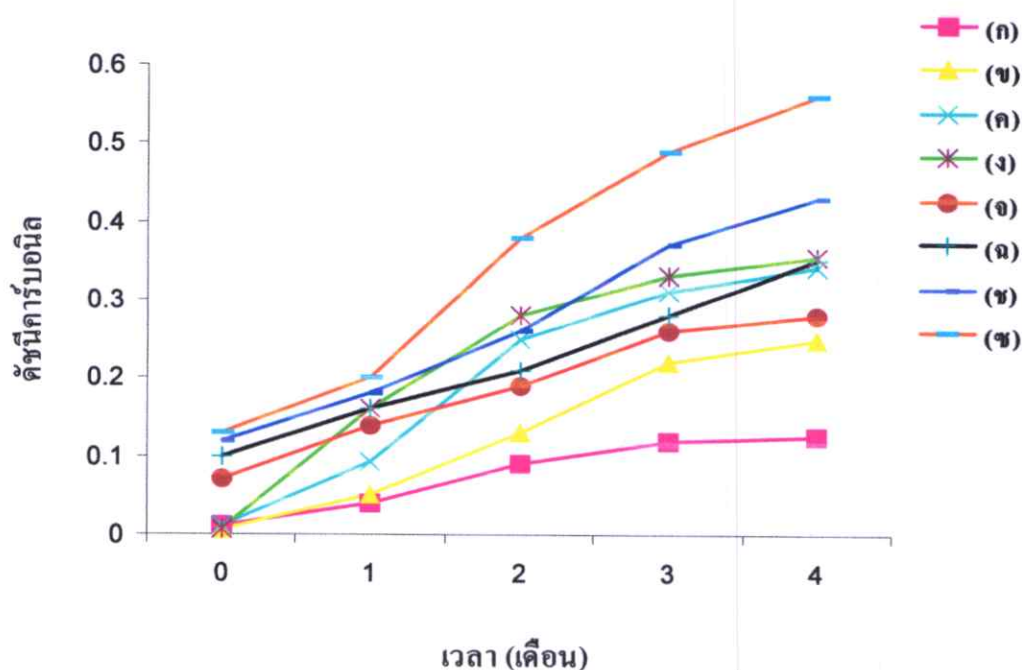
รูปที่ 4.47 การเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสม
 แป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน
 ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนัก
 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ละแวนโซฟีโนน
 ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน
 ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน
 ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

4.2.1 การหาปริมาณดัชนีคาร์บอนิล [39]

นำฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการทดลองฉายแสงยูวี และฝังดิน ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR (ภาคผนวก จ) เพื่อหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและศึกษาประสิทธิภาพการสลายตัวของพอลิเมอร์ จากผลการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลง %transmittance ในบริเวณที่เกิดหมู่คาร์บอนิล (ตารางที่ จ1) แล้วนำค่า %transmittance มาคำนวณหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl index or CI) โดยใช้สูตร

$$\Delta CI = \frac{[Iog [100/\%T]/d]}{\text{เมื่อ } \%T = \%transmittance}$$

$$d = \text{ความหนาชิ้นงาน } (\mu\text{m})$$



รูปที่ 4.48 การเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

(ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

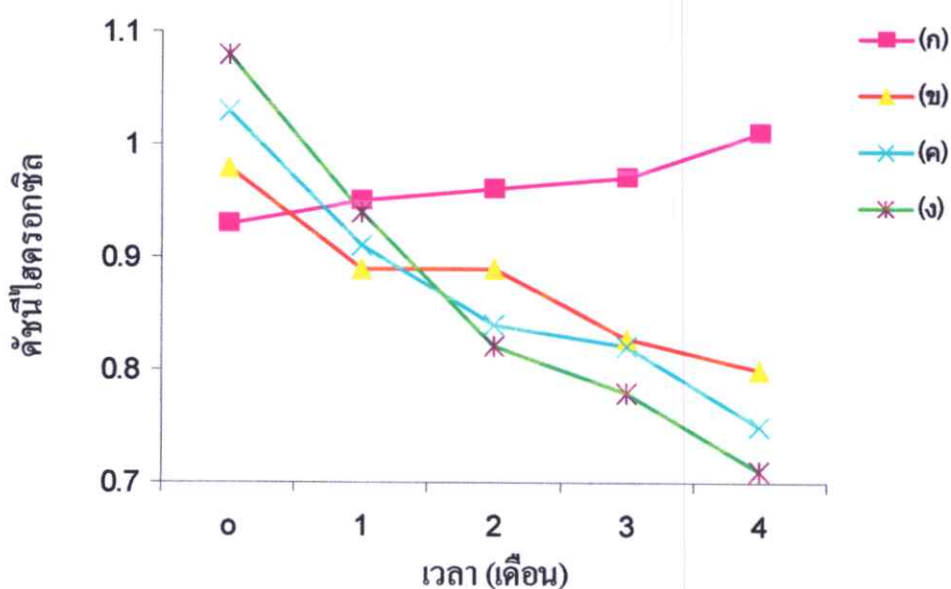
จากรูปที่ 4.48 พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการฉายแสงยูวี โดยสังเกตจากค่าดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากแสงยูวีเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดโครงสร้างที่เป็นหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น [46] และพบว่า ฟิล์มที่ผสมแป้ง และเบนโซฟีโนนจะสลายตัวได้ดีกว่าฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งจะทำให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จาก ภาพ SEM ดังรูปที่ 4.63 ค ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปบริเวณพื้นผิวของฟิล์มได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น ซึ่งสนับสนุนให้เบนโซฟีโนนที่อยู่ในแป้งและเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำช่วยกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น [45] และแป้งมีผลทำให้ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำลดลง ทำให้ส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นซึ่งง่ายต่อการสลายตัว โดยเบนโซฟีโนนมีผลทำให้เกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น โดยสังเกตจากดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นเรียงตามปริมาณเบนโซฟีโนนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ $2 > 1.5 > 1$ ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ตามลำดับ ขณะที่การทดลองฝังดินจะไม่มีเปลี่ยนแปลงหมู่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรเหมือนการฉายแสงยูวี เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากจุลินทรีย์ภายในดินมีผลน้อยกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากแสงยูวี จึงส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์อาจไม่ถูกตัดขาด [47]

4.2.2 การหาปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล [40]

นำฟิล์มพอลิเมอร์ก่อนและหลังการทดลองฉายแสงยูวี และฝังดินไปตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR (ภาคผนวก จ) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการสลายตัวของพอลิเมอร์ นำกราฟมาหาปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลออกไซด์โดยใช้สูตร

$$\text{ปริมาณดัชนีไฮดรอกซิล} = \frac{\text{Absorbance ที่ } 3,382 \text{ cm}^{-1}}{\text{Absorbance ที่ } 2,020 \text{ cm}^{-1}}$$

บริเวณ 3382 cm^{-1} ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลของ แป้ง กลิเซอรอล และ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ [51] โดยการเปลี่ยนแปลง %Transmittance ที่บริเวณ $3,382$ กับ $2,020 \text{ cm}^{-1}$ และดัชนีไฮดรอกซิลหลังการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน แสดงดังภาคผนวก จ (ตารางที่ จ1 และ จ2) และ รูปที่ 4.49-4.50 ตามลำดับ และภายหลังการฝังดิน เป็นเวลา 4 เดือน แสดงดังภาคผนวก จ (ตารางที่ จ3 และ จ4) และ รูปที่ 4.51-4.52 ตามลำดับ



รูปที่ 4.49 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสม เบนโซฟีโนน

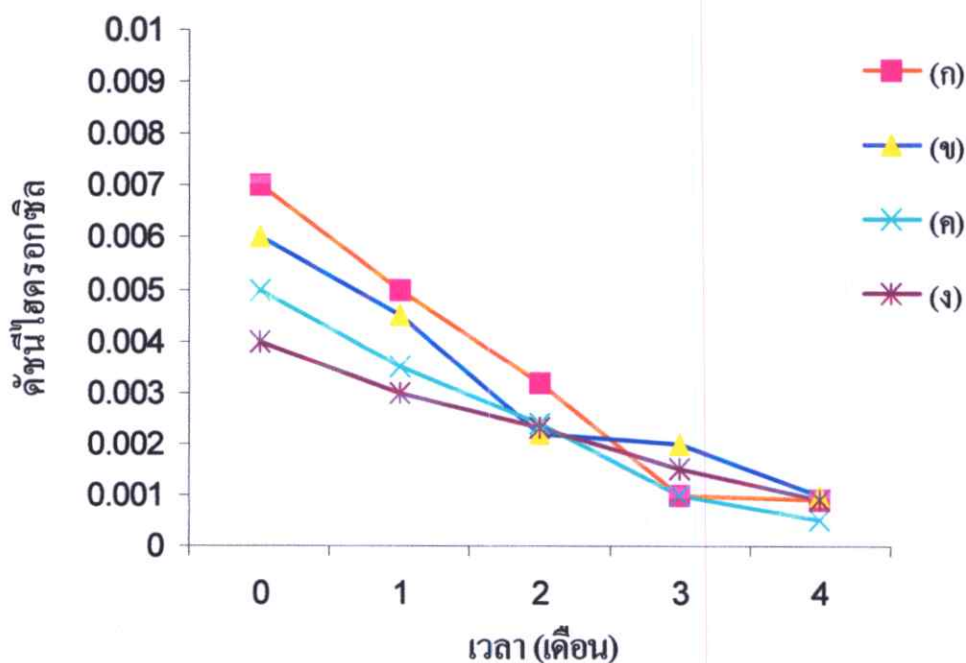
สูตรต่างๆ ภายหลังการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

(ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

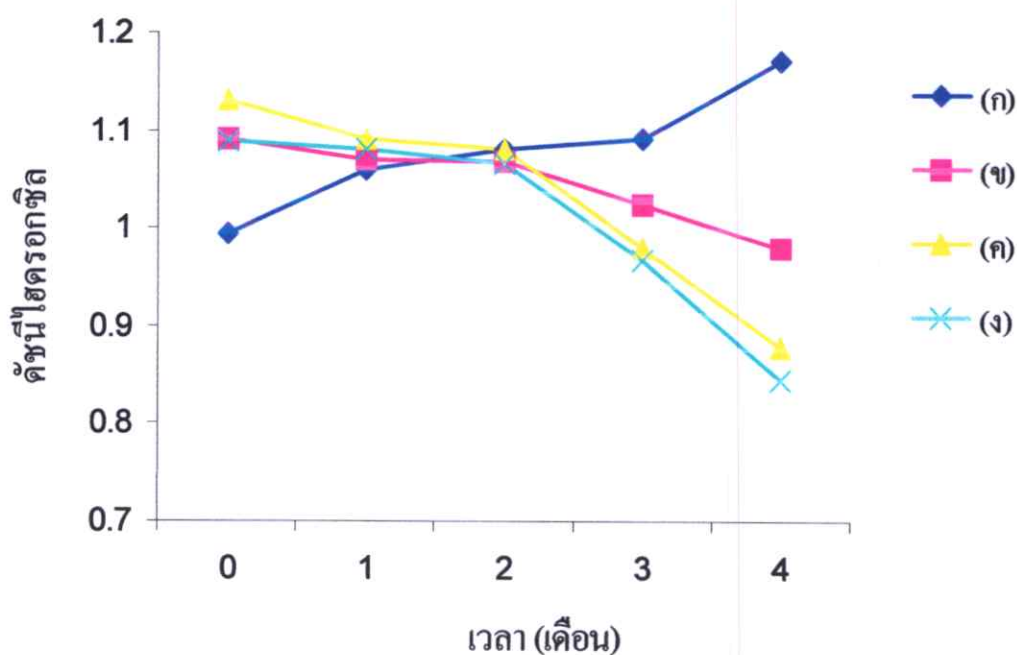
(ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



- รูปที่ 4.50 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 4.49-4.50 ผลการฉายแสงยูวี พบว่าดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณดัชนีไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการฉายแสงยูวีที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าแสงยูวีทำให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดออกซิเดชันจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ [45] แต่พอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น แสดงว่าแสงยูวี และเบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวของแป้งได้ จนเกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่ออกไซค์ที่เกิดจากการออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ส่งผลโดยรวมของไฮดรอกซิลที่ได้มีแนวโน้มลดลง [52]

ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าแสงยูวีทำให้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดออกซิเดชันเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และสลายตัวให้หมู่คาร์บอนิลในที่สุด ซึ่งในทุกสูตรของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ สำหรับสูตรที่มีแป้งให้ปริมาณหมู่คาร์บอนิลมากกว่าสูตรพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ไม่ผสม เนื่องจากการผสมสารตัวเติมเหล่านี้ทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมขึ้นอันผลจากภาพ SEM (รูปที่ 4.63 ค) ซึ่งช่วยให้ออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาเมื่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ง่ายขึ้นเกิดเป็นไฮโดรเปอร์ออกไซด์ และสลายตัวให้หมู่คาร์บอนิลได้มากขึ้น [52]



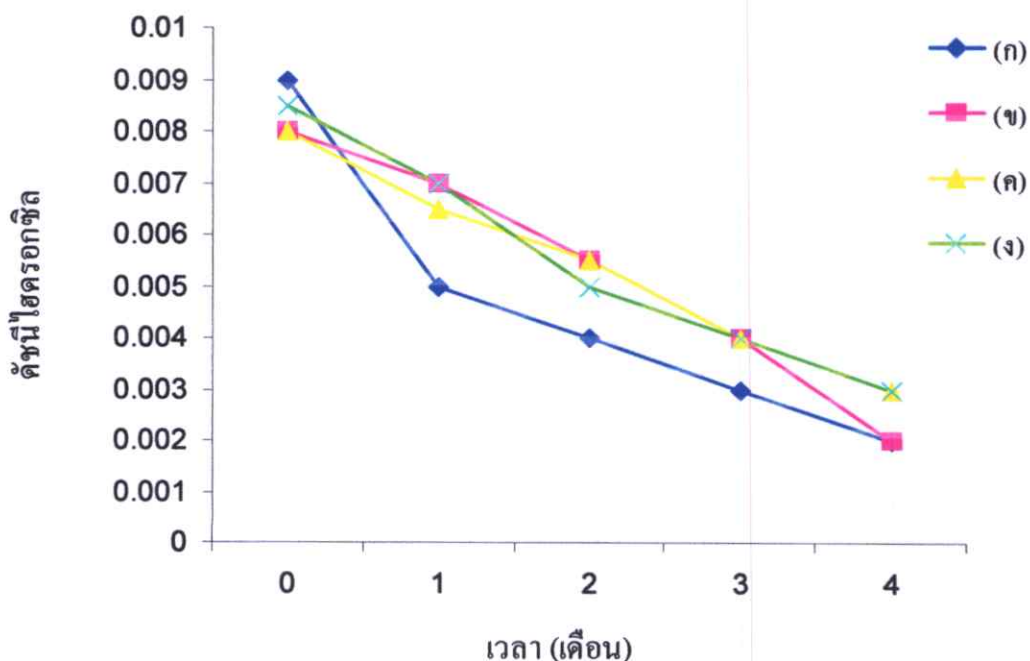
รูปที่ 4.51 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

(ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

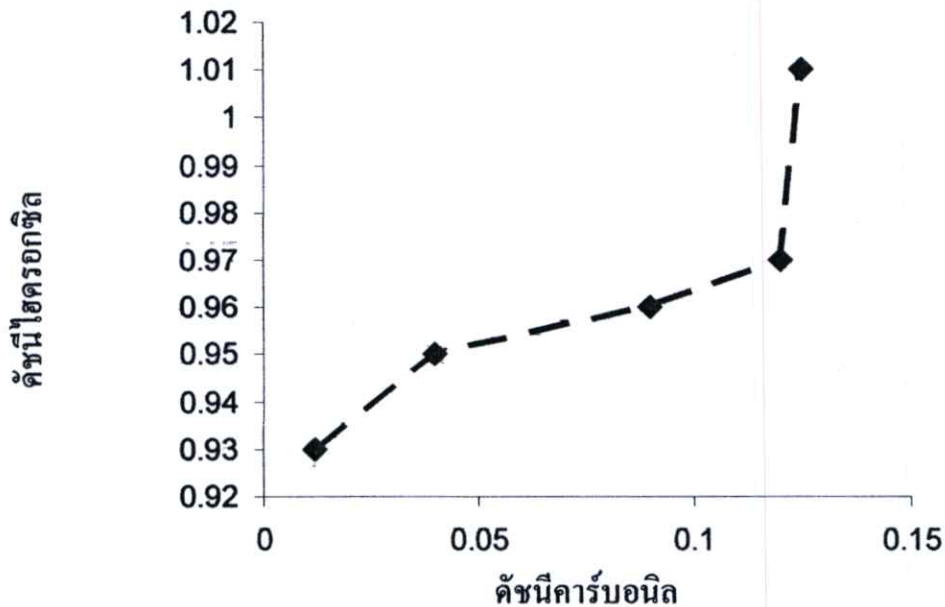


- รูปที่ 4.52 การเปลี่ยนแปลงดัชนีไฮดรอกซิลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน สูตรต่างๆ ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 4.51-4.52 ผลการฝังดิน พบว่าดัชนีไฮดรอกซิลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีแนวโน้มเหมือนกับการฉายแสงยูวี แต่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อพิจารณาพร้อมกับปริมาณหมู่คาร์บอนิล ซึ่งไม่เกิดขึ้นในสภาวะการฝังดิน อาจวิเคราะห์ได้ว่า ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลงอาจไม่ใช่หมู่ไฮดรอกซิลของเปอร์ออกไซด์ เพราะถ้าเป็นหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์จะพบปริมาณหมู่คาร์บอนิลเกิดขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ลดลงนี้อาจเป็นหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสที่มีอยู่ในแป้งเป็นการลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายแป้ง [52] เพราะ โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสที่

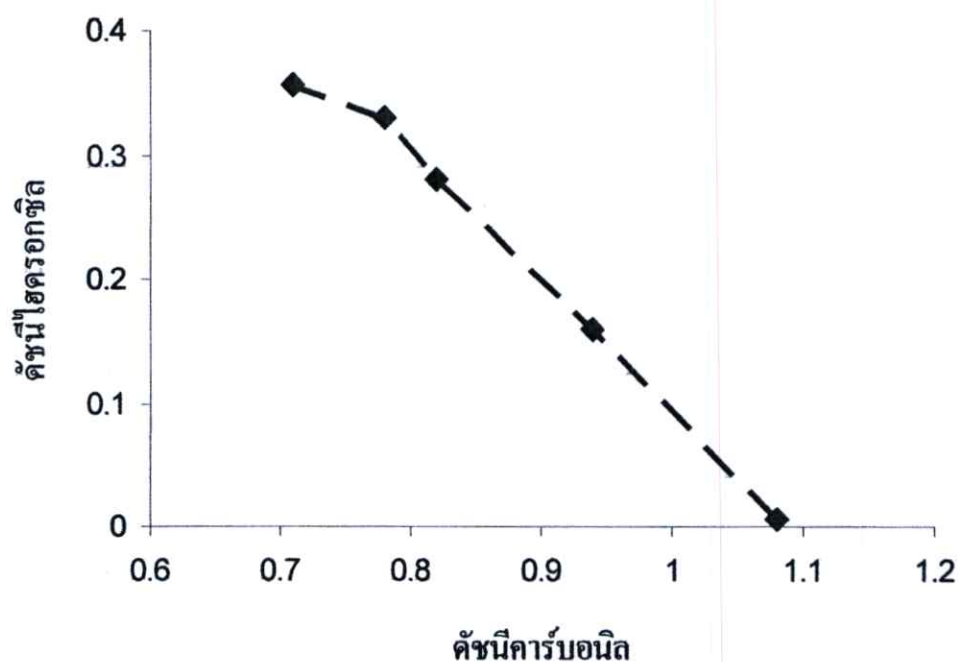
มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลโดยรวมที่ลดลงน่าจะเป็นหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง [7]

4.2.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิล

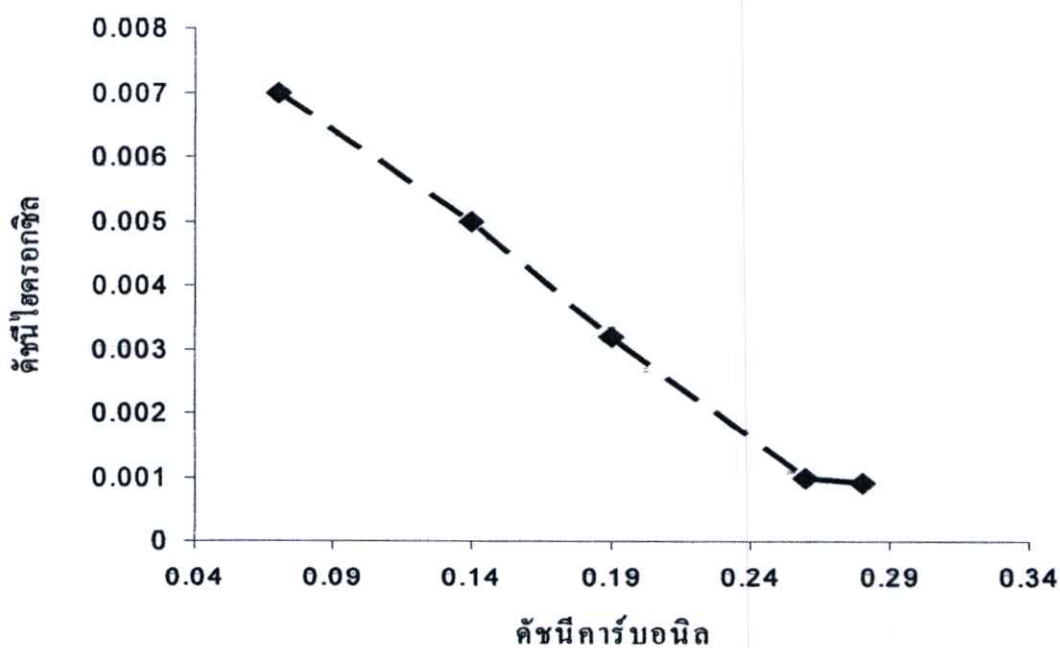


รูปที่ 4.53 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสงยูวีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

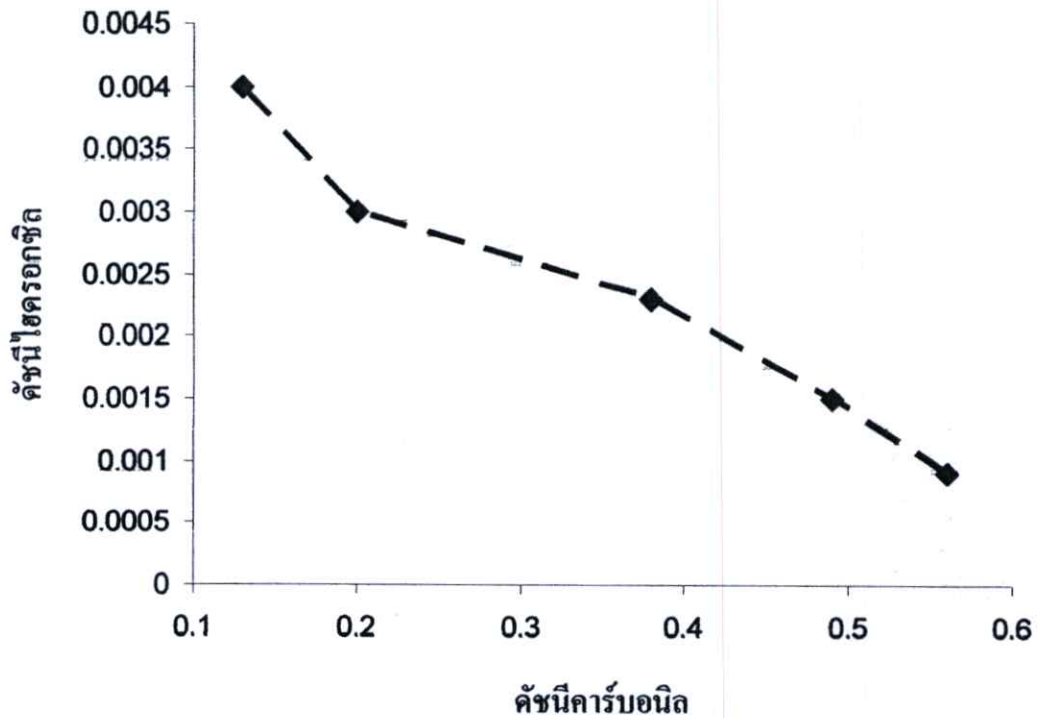
จากรูปที่ 4.53 พบว่าเมื่อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้รับแสงยูวีมีผลทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิล และหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่ทำให้แนวโน้มของหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น และเมื่อสารประกอบเปอร์ออกไซด์แตกตัวอาจทำให้เกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดเป็น โครงสร้างหมู่คาร์บอนิล จึงทำให้แนวโน้มของดัชนีคาร์บอนิลมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.54 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไนโตรเจนหลังฉายแสงยูวีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 4.55 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไนโตรเจนหลังฉายแสงยูวีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 4.56 กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีคาร์บอนิลและดัชนีไฮดรอกซิลหลังฉายแสงยูวีของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 4.54-4.56 พบว่าแป้งและเบนโซฟีโนนมีผลทำให้แนวโน้มของดัชนีคาร์บอนิลโดยรวมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดัชนีไฮดรอกซิลโดยรวมลดลง ซึ่งสนับสนุนว่าเบนโซฟีโนนเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากแสงยูวี ทำให้เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น จึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลโดยรวมในโมเลกุลลดลงมากขึ้นจนเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบคีโตนและน้ำมีผลทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และคาดว่าหมู่ไฮดรอกซิลโดยรวมที่ลดลงอาจรวมถึงหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากโมเลกุลของแป้งที่มีกลูโคสเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นแนวโน้มที่เกิดขึ้นคาดว่าคือการสลายตัวทางแสงผ่านหลักการของกระบวนการนอร์ริชแบบที่ 2 แสดงว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นหมู่คาร์บอนิลตรงกับกระบวนการนอร์ริชแบบที่ 2

4.3 สมบัติทางความร้อน

ทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ทุกสูตร เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังฉายแสงยูวีและฟังกิน (ภาคผนวก ฉ) ได้ผลดังนี้

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เพื่อหาค่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m (°C))
Low density polyethylene	109.29
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	108.35
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	108.06
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	108.87
Low density polyethylene + 30 %Starch	107.43
Low density polyethylene + 30 %Starch + 1% Benzophenone	107.39
Low density polyethylene + 30 %Starch + 1.5% Benzophenone	107.85
Low density polyethylene + 30 %Starch + 2% Benzophenone	107.06

* % base on Low density polyethylene

จากตารางที่ 4.1 ผลการทดลองพบว่า ก่อนการทดลองฉายแสงยูวีและฟังกินฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 107-109 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ คือ 110 องศาเซลเซียส (เป็นค่าของวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวจะเกิดขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ [53]

ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน โดย DSC ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี และฟังกิน เป็นเวลา 4 เดือน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน ด้วยเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m (°C))			
	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	107.84	105.31	105.51	105.20
Low density polyethylene + 1%Benzophenone	108.15	107.62	105.54	104.83
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	106.08	106.03	105.78	105.57
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	106.67	105.51	105.51	104.86
Low density polyethylene + 30 %Starch	107.43	106.06	106.36	105.66
Low density polyethylene + 30 %Starch+ 1% Benzophenone	106.13	106.31	106.24	105.14
Low density polyethylene + 30 %Starch+ 1.5%Benzophenone	107.74	106.81	106.77	105.82
Low density polyethylene + 30 %Starch+ 2% Benzophenone	108.24	107.47	106.60	105.43

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน ด้วยเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m (°C))			
	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	108.40	108.08	108.74	108.87
Low density polyethylene + 1%Benzophenone	108.73	110.18	109.49	109.85
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	107.09	109.29	107.53	108.14
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	107.36	107.41	107.76	108.99
Low density polyethylene + 30 %Starch	107.31	107.06	108.03	109.24
Low density polyethylene + 30 %Starch+ 1% Benzophenone	106.11	107.09	107.01	109.09
Low density polyethylene + 30 %Starch+1.5%Benzophenone	107.28	108.21	107.88	108.41
Low density polyethylene + 30 %Starch+ 2% Benzophenone	106.91	107.21	107.97	107.67

* % base on Low density polyethylene

จากตารางที่ 4.2 ผลการทดลองพบว่า ในสภาวะการฉายแสงยูวีฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญในทุกสูตร เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจุด

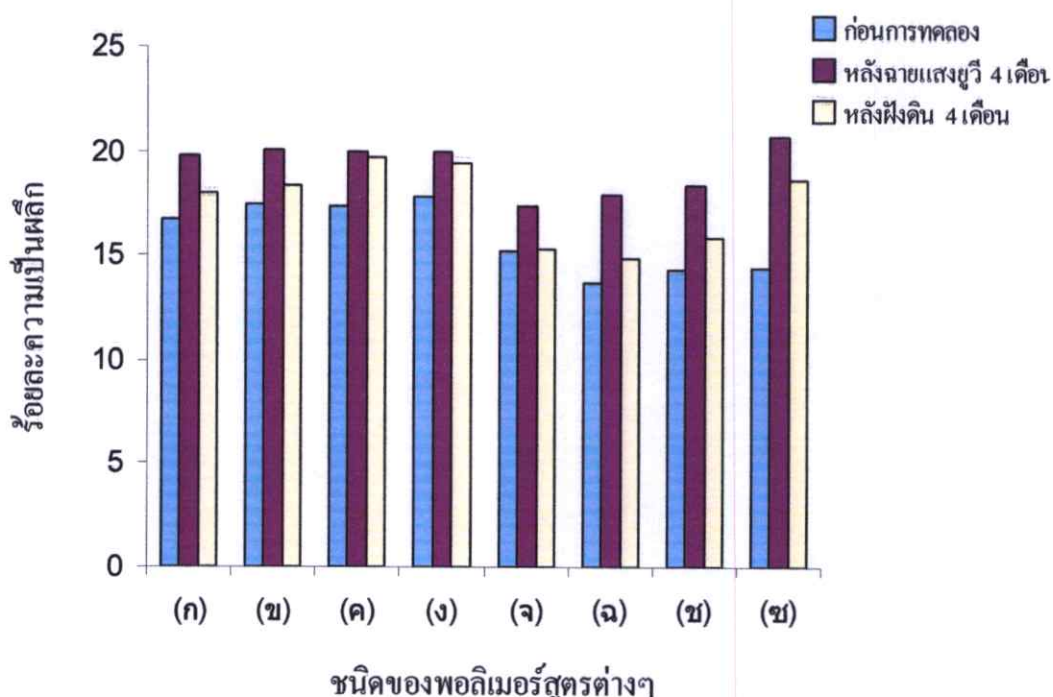
หลอมเหลวก่อนการทดลอง และอยู่ในช่วง 104-108 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีแสงยูวีเป็นตัวกระตุ้น [47]

จากตารางที่ 4.3 ผลการทดลองพบว่า ในสภาวะการฝังดินฟิล์มพอลิเมอร์ผสมค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญในทุกสูตร เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวก่อนการทดสอบ และอยู่ในช่วง 106-109 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเข้าทำลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสบริเวณเม็คแป็งที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ อาจทำให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ในส่วนอสัณฐานขึ้นได้ [46]

เมื่อเปรียบเทียบการทดสอบระหว่างการฉายแสงยูวีและการฝังดิน พบว่า การฉายแสงยูวีมีผลทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวลดลงมากกว่าการฝังดิน เนื่องจากแสงยูวีมีผลทำให้เกิดการออกซิเดชันและการสลายตัว รวมทั้งเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ความเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลงมีผลต่ออุณหภูมิจุดหลอมเหลว [47]

4.3.1 ปริมาณความเป็นผลึก

การหาปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ หาได้จากเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ผลการทดลอง สามารถหาค่าปริมาณร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนและหลังการฉายแสง ยูวี และฝังดิน ดังรูปที่ 4.57



รูปที่ 4.57 เปรียบเทียบร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมในสภาวะก่อน และหลังฉายแสงยูวี และฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

(ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

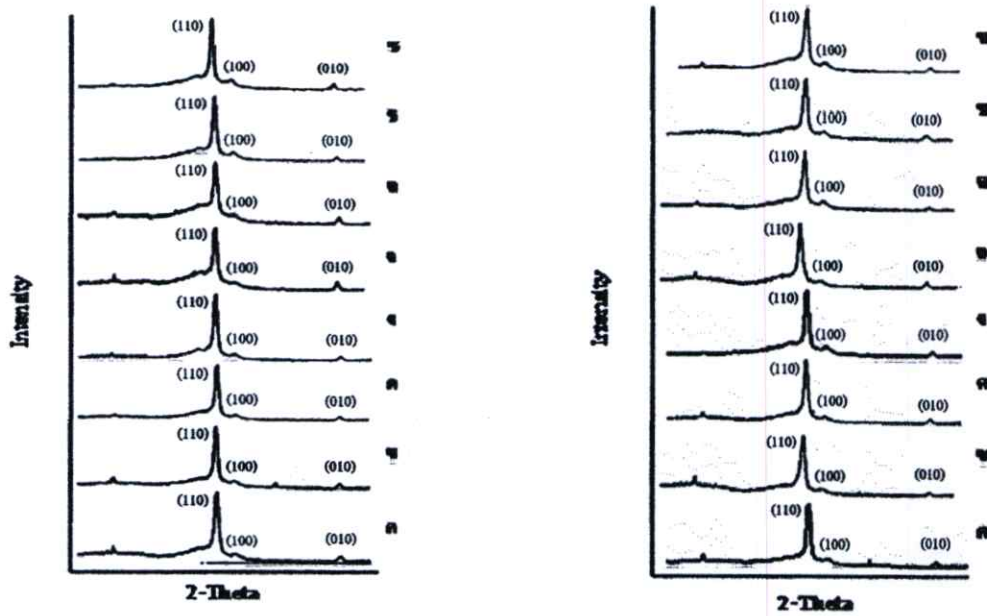
จากรูปที่ 4.57 พบว่าก่อนการทดลองฉายแสงยูวีและฝังดิน ปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เคมเบน โซฟี โนนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ชัดเจน เนื่องจากใช้ปริมาณเบนโซฟี โนนเพียงร้อยละ 1-2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ แสดงว่าเบนโซฟี โนนไม่มีผลต่อความสมบูรณ์ และขนาดของผลึก (รูปที่ 4.57 ก, ข, ค, ง)

เมื่อเคมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะทำให้ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำลดลง ทั้งนี้เป็นผลจากการที่อนุภาคแป้งเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันอย่างเป็นระเบียบน้อยลง ความเป็นผลึกจึงลดลง นอกจากนี้การผสมแป้งจะทำให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีความหนืดเพิ่มขึ้นทำให้สายโซ่เคลื่อนไหวยากขึ้น [53] ทำให้ความสามารถในการเกิดผลึกลดลงอีกด้วย (รูปที่ 4.57 จ, ฉ, ช, ซ)

ภายหลังการฉายแสงยูวี และฝังดิน พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการตกผลึกที่เกิดจากการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ในส่วนที่เป็นอสัณฐานจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากแสงยูวี [55] และอาจเกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นจากการเข้าทำลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ภายในดิน เพราะการสลายตัวของพอลิเมอร์ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถทำให้สายโซ่ในส่วนอสัณฐานถูกตัดขาดหรือเกิดการเกี่ยวพันขึ้นใหม่ได้ เพราะพอลิเมอร์มีการคลายความเค้นและความเครียดหลังการสิ้นสุดปฏิกิริยา [54]

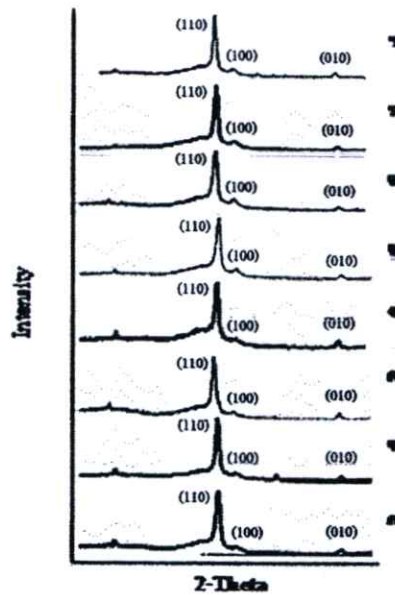
4.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากแสงยูวีและเอนไซม์จากจุลินทรีย์ภายในดิน สามารถตรวจวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนและหลังการฉายแสงยูวีและฝังดิน โดยใช้ X-Ray-Diffraction (XRD) (ภาคผนวก ช) ได้ผลดังรูปที่ 4.58



ก่อนการทดลอง

หลังฉายแสงยูวี



หลังฝังดิน

รูปที่ 4.58 กราฟ XRD ของพอลิเมอร์ผสมในสภาวะก่อนการทดลอง และหลังการฉายแสงยูวีและฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน
 (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

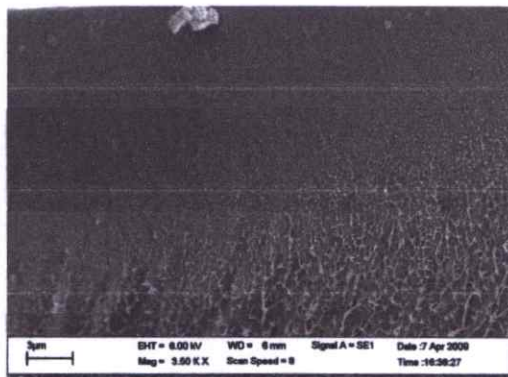
จากรูปที่ 4.58 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรก่อนและหลังการทดลองฉายแสงยูวีและฝึงคินเป็นเวลา 4 เดือน มีพีค 2-Theta อยู่ในช่วง 21.8-22.2 องศา (ดัชนีระนาบเท่ากับ 110) มีค่า d เท่ากับ 4.1 °A ที่พีค 24.4-24.6 องศา (ดัชนีระนาบเท่ากับ 100) มีค่า d เท่ากับ 3.6 °A และ ที่พีค 36.8-37.1 องศา (ดัชนีระนาบเท่ากับ 010) มี d เท่ากับ 2.5 °A ซึ่งพีคของฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสูตรที่เกิดขึ้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน [56]

ฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสูตรในสภาวะก่อนและหลังการทดลองฉายแสงยูวี และฝึงคิน มีค่า 2-Theta และ d ไม่แตกต่างกัน สรุปได้ว่าระยะห่างระหว่างโครงผลึกและระนาบของผลึกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจเกิดจากแป้งไม่ได้เข้าไปอยู่ในโครงผลึกแต่เข้าไปอยู่บริเวณที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์แทน ซึ่งสนับสนุนว่าการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์ [54]

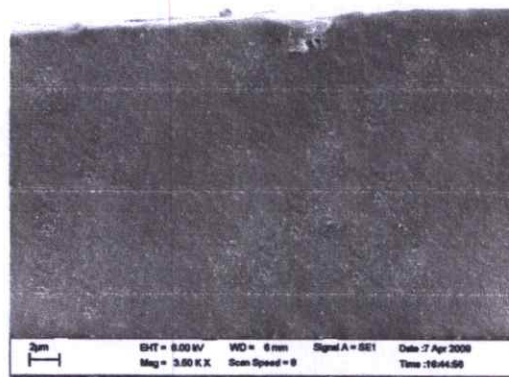
4.5 ลักษณะวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

4.5.1 ศึกษาพื้นฐานวิทยาของตัวอย่าง

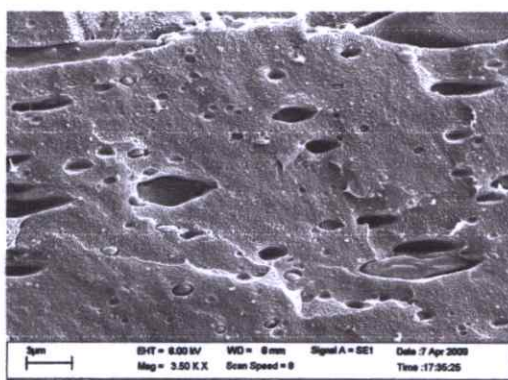
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มพอลิเมอร์บริเวณภาคตัดขวางและการกระจายตัวของเม็ดแป้งบริเวณภาคตัดขวาง โดยนำไปวิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 3500 เท่า ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.59-4.61



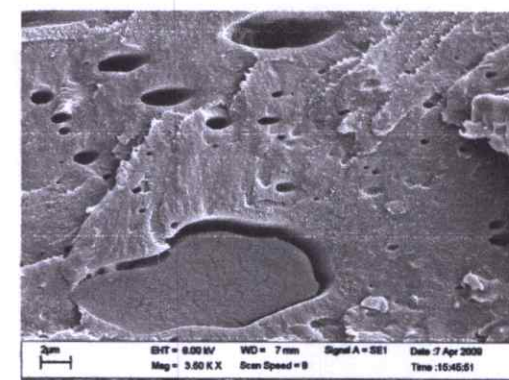
(ก)



(ข)



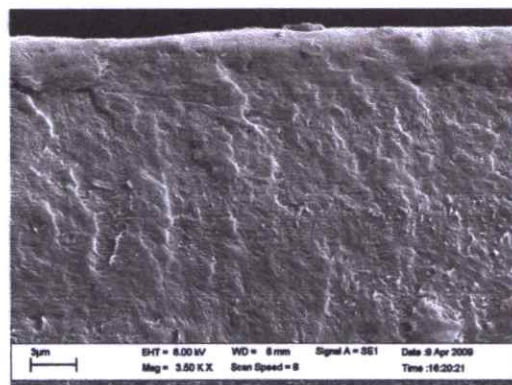
(ค)



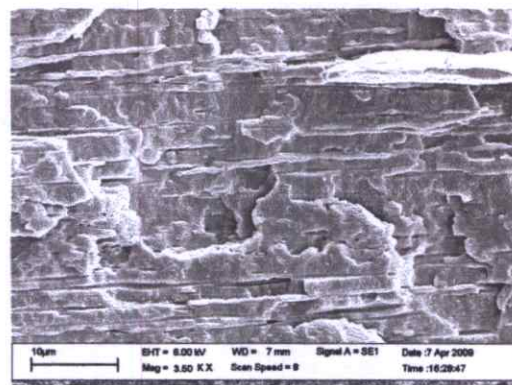
(ง)

รูปที่ 4.59 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนการทดลอง

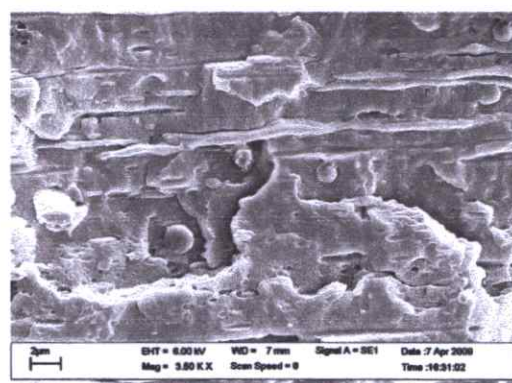
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



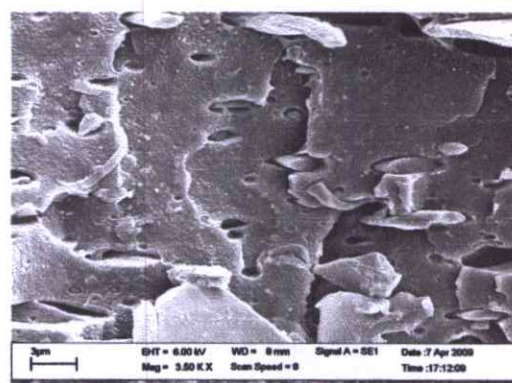
(ก)



(ข)



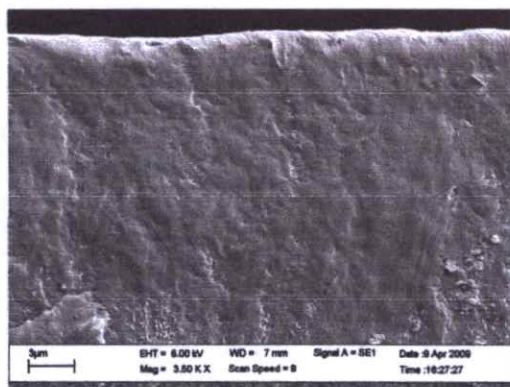
(ค)



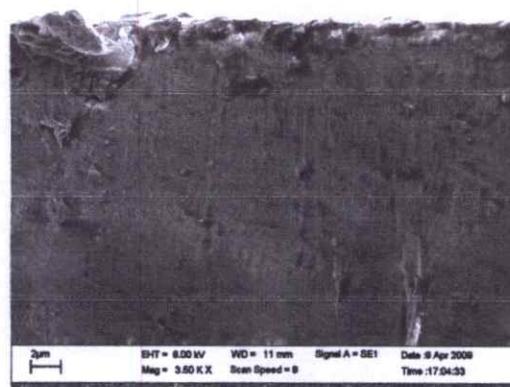
(ง)

รูปที่ 4.60 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

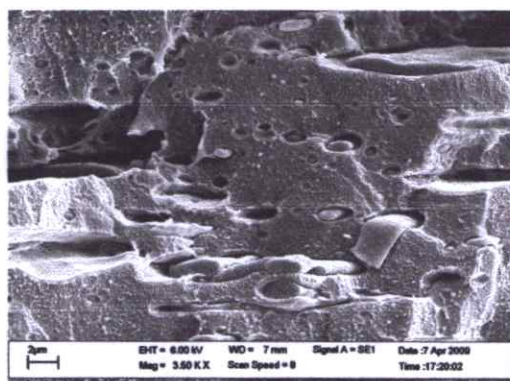
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



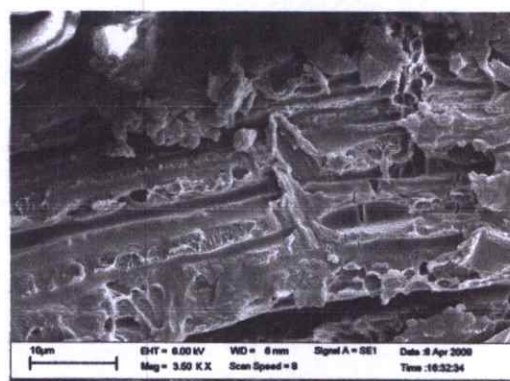
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.61 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบภาคตัดขวางของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

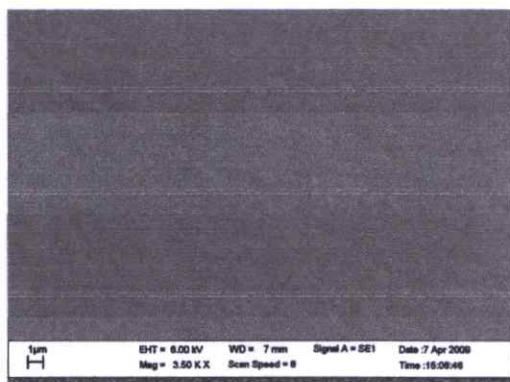
จากรูปที่ 4.59 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ก่อนการทดลอง พบว่าบริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมเบนโซฟีโนนจะมีลักษณะเรียบ ดังภาพ (ก) และ (ข) แต่ฟิล์มที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนนจะสังเกตเห็นเม็ดแป้งแทรกตัวอยู่และเป็นหลุมกระจัดกระจายทั่วไป ซึ่งเป็นบริเวณที่เม็ดแป้งหลุดออกไปแล้ว โดยขนาดของหลุมขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดแป้งที่หลุดออกไป ซึ่งส่งผลให้เกิดช่องว่างเล็กน้อยบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ดังภาพ (ค) และ (ง) หรือรอยต่อระหว่างวัฏภาคของฟิล์มผสมแป้งอาจเกิดจากในขณะเป่าขึ้นรูป เนื่องจากพอลิเมอร์สามารถยึดตัวได้มากกว่าแป้ง หรืออาจเกิดจากการเตรียมตัวอย่างจากการแช่ในโครเจนเหลว ซึ่งพอลิเมอร์และแป้งมีการขยายตัวได้ไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป แป้งจึงสามารถเปลี่ยนรูป (Deformation) จากทรงกลม (ภาคผนวก ค) ไปเป็นวงรี เนื่องจากมีการให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บ และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์ม ซึ่งเม็ดแป้งค่อนข้างนัม จึงถูกดึง และเปลี่ยนรูปได้ ซึ่งรอยต่อระหว่างวัฏภาคเกิดจากการแทรกตัวของเม็ดแป้งในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีนหรือเกิดจากวิธีการทดลองจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลง และทำให้เกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้น [58]

จากรูปที่ 4.60 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ภายหลังจากการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน พบว่าแสงยูวีทำให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นเกิดรอยขรุขระเพิ่มขึ้น ดังภาพ (ก) แต่ฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนและแป้งจะเกิดการรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดเกิดรอยขรุขระเพิ่มขึ้น ดังภาพ (ข) (ค) และ (ง) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเบนโซฟีโนนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ภายหลังจากฉายแสงยูวี โดยเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดขาด [57] และยังมีแป้งที่ช่วยให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลยิ่งด้อยลง และทำให้เกิดการสลายตัวภายใต้แสงยูวีได้มากขึ้น

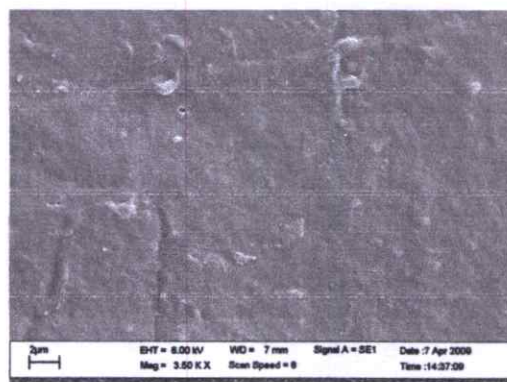
จากรูปที่ 4.61 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่า ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนเกิดเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน ดังภาพ (ก) และ (ข) แต่ฟิล์มที่ผสมแป้งมีผลทำให้เกิดร่องรอยและหลุมเพิ่มมากขึ้น ดังภาพ (ค) และ (ง) เนื่องจากเกิดการย่อยสลายเม็ดแป้งผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จากจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน [59] ส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลง ทำให้ฟิล์มเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น

4.5.2 ลักษณะพื้นผิวตัวอย่างก่อนและหลังการทดลอง

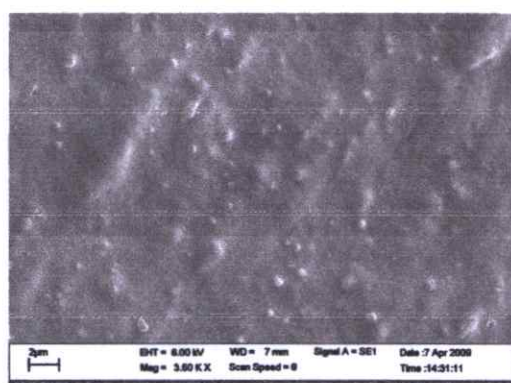
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิวและการกระจายตัวของเม็ดแป้งบริเวณพื้นผิว ก่อนและหลังการทดลองฉายแสงยูวี และฟุ้งคินเป็นเวลา 4 เดือน โดยนำไปวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์ SEM 3500 เท่า ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.62-4.64



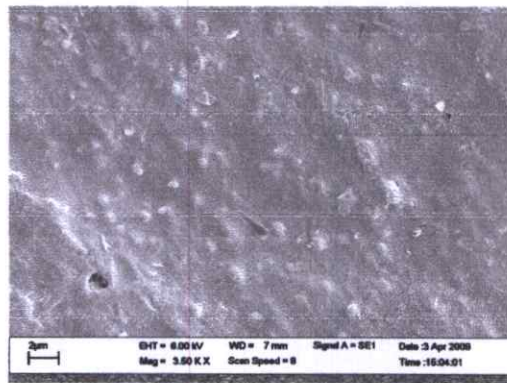
(ก)



(ข)



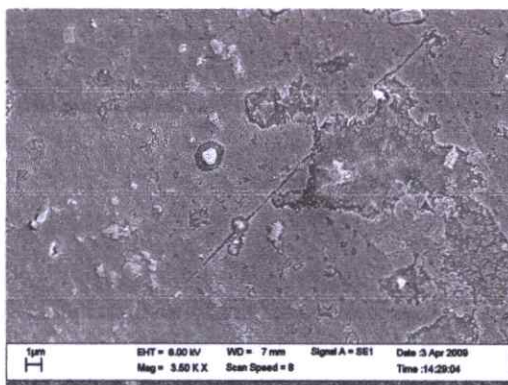
(ค)



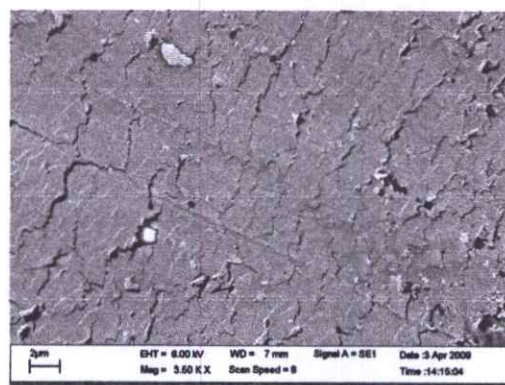
(ง)

รูปที่ 4.62 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนการทดลอง

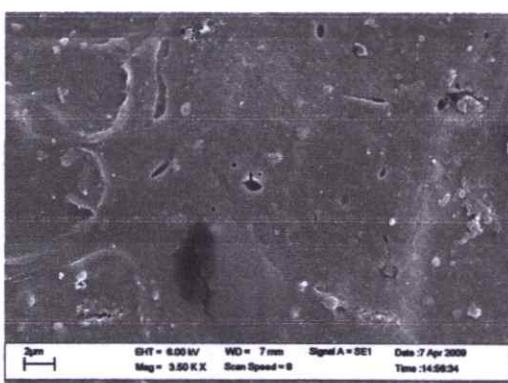
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



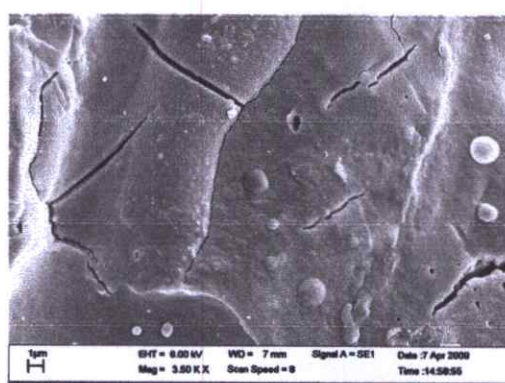
(ก)



(ข)



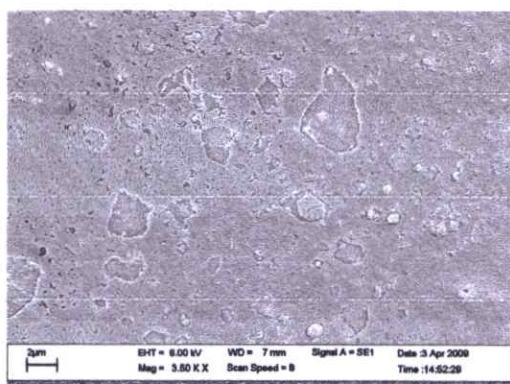
(ค)



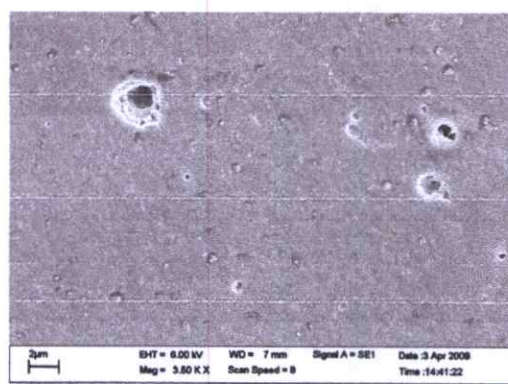
(ง)

รูปที่ 4.63 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน

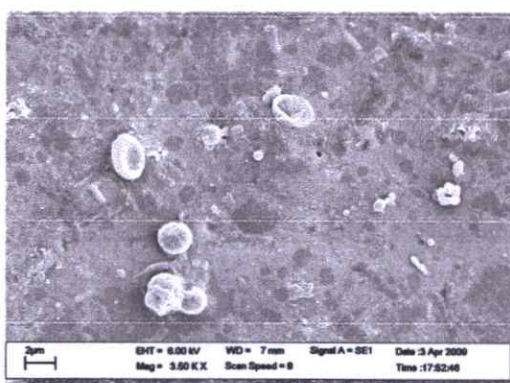
- (ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



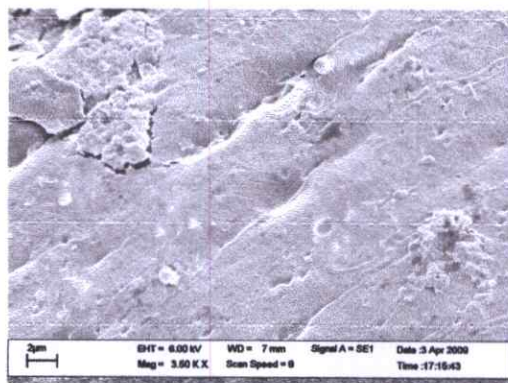
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.64 ภาพจาก SEM แสดงการเปรียบเทียบพื้นผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

(ก) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

(ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 4.62 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ก่อนการทดลอง พบว่าพื้นผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำก่อนการทดลองจะเรียบ และเมื่อผสมเบนโซฟีโนนแล้วจะไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ดังภาพ (ก) และ (ข) แต่ฟิล์มที่ผสมแป้งพื้นผิวจะมีความขรุขระเพราะไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ดังภาพ (ค) และ (ง) เนื่องจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และแป้งมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นอะไมโลส และอะไมโลเพกตินซึ่งจัดเป็นโครงสร้างที่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ [59] และอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนจนทำให้พื้นผิวขรุขระ แม้ว่าจะมีการเติมสารช่วยผสมและกลีเซอรอลก็ตาม

จากรูปที่ 4.63 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ภายหลังจากฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน พบว่า ผิวหน้าของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดร่องรอยเพิ่มขึ้น ดังภาพ (ก) แต่ฟิล์มที่ผสมเบนโซฟีโนนจะเกิดการแตกร้าวบริเวณพื้นผิวเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังภาพ (ข) (ค) และ (ง) เนื่องจาก เบนโซฟีโนนเป็นสารที่ช่วยกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นภายใต้แสงยูวี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่สามารถแตกตัวทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดขาด เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลด้อยลงและเกิดการสลายตัวภายใต้แสงยูวีได้มากขึ้น [44]

จากรูปที่ 4.64 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน พบว่า ผิวหน้าของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เกิดร่องรอยขรุขระและหลุมขึ้นเล็กน้อย ดังภาพ (ก) และ (ข) แต่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้ง พบว่า เกิดรูพรุนกระจายตัวบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งเป็นลักษณะร่องรอยของเม็ดแป้งที่ผสมอยู่ในฟิล์ม โดยสารเบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์มหลังการฝังดิน ดังภาพ (ค) และ (ง) ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสลายบริเวณพื้นผิวที่เป็นเม็ดแป้ง ทำให้เกิดหลุมกระจายอยู่ทั่วแผ่นฟิล์ม มีผลทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนนสูตรต่างๆ โดยมีอัตราส่วนตามตารางที่ 3.1 นำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ มาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ตรวจสอบปริมาณคาร์บอนิลและไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และสัณฐานวิทยา โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนและหลังการทดลองผ่านการฉายแสงยูวีและ ฝังดิน ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. แสงยูวีมีผลทำให้ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังสลายตัวได้มากกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำปกติ แต่เมื่อผสมเบนโซฟีโนนลงในฟิล์มทั้งสองชนิดพบว่าหลังฉายแสงยูวีเบนโซฟีโนนมีผลต่อการสลายตัวของฟิล์มปกติมากกว่าฟิล์มผสมแป้ง แต่การฝังดินทำให้ฟิล์มผสมแป้งเกิดการสลายตัวได้มากกว่าฟิล์มปกติ ซึ่งเบนโซฟีโนนที่เติมลงในฟิล์มปกติและฟิล์มผสมแป้งไม่มีผลต่อการสลายตัวภายหลังการฝังดิน จากการทดลองพบว่าแสงยูวีมีผลทำให้เกิดการสลายตัวมากกว่าการฝังดิน เพราะเบนโซฟีโนนจะถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เมื่อได้รับแสงยูวีเท่านั้น

2. สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนแรงดึง และมอดุลัส ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำลดลงเมื่อเติมแป้ง โดยการเติมเบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลอย่างชัดเจน แต่หลังฉายแสงยูวีฟิล์มปกติที่ผสมเบนโซฟีโนนมีผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงแต่มอดุลัสเพิ่มขึ้นมากกว่าฟิล์มผสมแป้งและเบนโซฟีโนน ซึ่งปริมาณเบนโซฟีโนนที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติดังกล่าวยิ่งเพิ่มมากขึ้น แต่หลังฝังดินพบว่าฟิล์มผสมแป้งมีผลทำให้ความทนแรงดึงลดลงมากกว่าฟิล์มปกติ นอกจากนี้ระยะเวลาฉายแสงยูวีและฝังดิน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลค่อยลงและช่วยให้เกิดการสลายตัวได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาบทบาทของสารตัวเติมพบว่าเมื่อได้รับการฉายแสงยูวีแป้งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลงน้อยกว่าเบนโซฟีโนน แต่เมื่อฝังดินฟิล์มผสมแป้งเกิดการสลายตัวได้มากกว่าฟิล์มผสมเบนโซฟีโนนเพียงอย่างเดียว โดยเบนโซฟีโนนมีผลน้อยมากต่อการสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมภายใต้สภาวะฝังดิน

3. ปริมาณออกซิเดชันที่เกิดขึ้นหลังฉายแสงยูวี พบว่าเบนโซฟีโนนเป็นสารเร่งการสลายตัวที่ดีในฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง การเพิ่มปริมาณเบนโซฟีโนนมีผลทำให้ดัชนีคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มผสมแป้งจะมีปริมาณดัชนีคาร์บอนิลเพิ่มขึ้นมากกว่าฟิล์มปกติ ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของดัชนีไฮดรอกซิล แสดงว่าแสงยูวีทำให้ปริมาณหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์และคาร์บอนิลของพอลิเมอร์ทุกสูตรเพิ่มขึ้น เป็นการสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันและการสลายตัว ส่วนการฝังกลบไม่พบหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นและยังทำให้หมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ลดลง อันเนื่องจากจุลินทรีย์ในดินย่อยสลายแป้ง

4. फिल्मपोलिเอथिलिनความหนาแน่นต่ำมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกสูงกว่าฟิล์มพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังเพียงเล็กน้อย แสดงว่าการฉายแสงยูวีและฝังดิน ไม่มีผลทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

5. फिल्मพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำมีร้อยละความเป็นผลึกมากกว่าฟิล์มพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง แต่หลังฉายแสงยูวีและฝังดินจะทำให้ร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรเพิ่มขึ้น และพบว่าการฉายแสงยูวีมีผลทำให้ร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นมากกว่าการฝังดิน แต่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงผลึกของพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำ สามารถอธิบายได้ว่าการสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดปฏิกิริยาสลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ในชั้นอสัณฐาน

6. การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนจะมีพื้นผิวลักษณะเรียบเนียน แต่ฟิล์มพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังพบรูพรุนและร่องรอยของเม็ดแป้งที่แทรกตัวในเมทริกซ์ของพอลิเอथิลินความหนาแน่นต่ำ ซึ่งสนับสนุนว่าแป้งทำหน้าที่ช่วยเร่งการเกิดรูพรุนที่ผิวพอลิเมอร์ ภายหลังจากฉายแสงยูวีพบว่าฟิล์มผสมแป้งและเบนโซฟีโนนเกิดร่องรอยการแตกร้าวและความขรุขระที่ผิวมากกว่าฟิล์มปกติ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้น และหลังการฝังดินทำให้ฟิล์มผสมแป้งเกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นมากกว่าฟิล์มปกติ เนื่องจากจุลินทรีย์ย่อยสลายบริเวณเม็ดแป้ง

ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มระยะเวลาฉายแสงยูวีและฝังดินมากกว่า 4 เดือนเพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มขึ้น
2. ควรทดสอบการสลายตัวด้วยวิธีการอื่นๆเพิ่มขึ้น เช่น ทดสอบภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง เช่น ตากแดดกลางแจ้ง และฝังดินตามธรรมชาติ
3. ควรเพิ่มอัตราส่วนปริมาณแป้งค่อน้ำหนักพอลิเอथิลินเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายตัว
4. ควรทดลองใช้สารธรรมชาติอื่นๆ เช่น ขี้เถ้า หรือ กากน้ำตาล เป็นต้น ที่ทำให้พอลิเอथิลินสลายตัวได้โดยแสงและจุลินทรีย์ในดิน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลาย
5. ควรทดลองนำตัวอย่างหลังการฝังดินแล้วไปฉายแสงยูวีต่อทันทีเพื่อจะให้เห็นประสิทธิภาพของสารสลายตัวได้ชัดเจนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] พลาสติกย่อยสลายได้ .2552. เทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. [Online]
http://www.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html
- [2] Albertsson, A.C., C. Barenstedt and S. Karlsson . 1994. "Spectroscopic and mechanical change in irradiated starch-fill LDPE" **Polymer Degradation and Stability**. 45 : 173-178
- [3] Chiellini, E , A. Cori and G. Swift . 2003. "Biodegradation of themally-oxidized, fragmented low-density polyethylenes" **Polymer Degradation and Stability**. 81 : 341-351
- [4] Patel, M. 2001.**Review of Life Cycle Assessments for Bioplastics**. Department of Science, Technology and Society,Utrecht University, Netherlands.
- [5] ธนาวดี ลีจากภัย. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .วารสารสมาคมพอลิเมอร์แห่งประเทศไทย. 6(1):3.
- [6] Bonhome, S., A. Cuer, A-M. Delort, J. Lemaire, M. Sancelme and Scott. 2003. "Environmental biodegradation of polyethylene" **Polymer Degradation and Stability**. 81 : 441-452
- [7] Raghavan, D. 1995. "Characterization of Biodegradable Plastic" .**Polymer-Plastic Technology Engineering**, Vol.34, p41-63.
- [8] มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์. "พลาสติกกรีโซเคล". เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] สมศักดิ์ วรรณกุลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท บุ๊คเน็ต จำกัด.
- [10] Gachter, R. and H. Mülle . 1993. **Plastic Additive Handbook**. Hanser Publishers. Munich Vienna.
- [11] ก้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2 , สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [12] แม้น อมรสิทธิ์และอมร เพชรสม. 2535. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์.
- [13] Paul, D.R. and C.B. Bucknall. 1998. **Polymer Blends**. Vol.1. U.S.A. : John Wiley and Sons, Inc.

- [14] Dupont Polymer Modifiers. 2549. **Compatibilizers improve the value of blended or recycled polymers.** [Online]. Available: www.dupont.com/industrial-polymer/plastic/polemers/fusabond.html
- [15] เจริญ นาคะสรรค์, มนัส แซ่ด่าน และ ดำรง เกล้าดี. **การวัดสมบัติการไหลของพลาสติกเหลวในเครื่องเอ็กซ์ทรูด** (รายงานฉบับสมบูรณ์เสนอต่อศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, MTEC), 2544.
- [16] Wikipedia. 2551. **Low density polyethylene.** [Online]. <http://en.wikipedia.org/wiki/LDPE>
- [17] เทคนิคการขึ้นรูปพลาสติกประเภท FILM. มปป. สมาคมการค้าและอุตสาหกรรมปิโตรเคมีไทย และ บมจ. อุตสาหกรรมปิโตรเลียมเคมีกัลป์ไทย.
- [18] Daniel, C.A. 1989. **Polymer ; Structure and Propeties.** USA : Technomic,
- [19] Ruben J., **Plastic Packaging Properties, Processing, Application, and Regulation.** USA : Hanser Publisher, 2000.
- [20] Sacharow, S. 1976. **Handbook of Package Materials.** The AVI publishing Company. Inc., Westport, Connecticut.
- [21] Susan E. M. 1997. **Understanding Plastic Packaging Technology.** USA : Hanser Publisher,.
- [22] รัชชยา อโนชาเวช. 2539. “การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นโดยเทคนิคการทำพอลิเมอร์ผสม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [23] Google. 2551. **amylose.** [Online]. www.cheng.cam.ac.uk/.../Starchstructure.html.
- [24] Whistler, R. L. and E.F. Paschall. 1967, **Starch Chemistry and Technology**, Vol.2, Academic Press, New York, PP. 637-647.
- [25] Bauer, W.H. 1981. **Plasticizer.** In Modern Plastics Encyclopedia 58 (10A). A McGraw-Hill Publication, New York.
- [26] Glycerol. 1997. **Microsoft Encarta** [online]. Encyclopedia 2000 : <http://Encarta.msn.Com/index.Htm>.
- [27] Windholz, M., S. Budvari, L. Y. Stroumtsos and M.N. Fertig. 1976. **The Merck Index.** Ninth Edition, Merck Co., Rahway, New Jersey.
- [28] Wikipedia. 2550. **Benzophenone.** [Online]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Benzophenone>
- [29] Kaczmarek. H, A. Kaminsica, M. Swialek and S. Samyal. 2000. “Photoinitiated degradation of polystyrene on the presene of molecular organic compound” **European polymer juornol.** 36:1167-1173

- [30] Abd El-Rehim H.A., E.S.A. Heagazy and A.M. Ail. 2004. "Synergistic effect of combining UV-Sunlight-soil burial treatment on the biodegradation rate of LDPE/starch blends" **Potochemistry and Photobiology**. 163 : 547-556
- [31] Huang, C.Y., M. L. Roan,, M.C. Kuo and W.L. Lu . 2005. "Effect of compatibiliser on the bio degradation and mechanical properties of high-content starch/low-density polyethylene blends" **Polymer Degradation and Stability**. 90 : 95-105
- [32] Shujun W. 2005. "Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends" **Polymer Degradation and Stability**. 87 : 395-401
- [33] Da Roz, A.L., A.J.F. Carvalho, A. Gandini and A.A.s. Curvelo. 2006. "The effect of plasticizers on Thermoplastic starch composition obtained by melt processing" **Carbohydrate Polymers**. 63 :417-424
- [34] Roy, P.K.. 2007. "Studies on the photo-oxidative degradation of LDPE films in the presence of oxidized polyethylene" **Polymer Degradation and Stability**. 92 : 1151-1160
- [35] Tzankova, N. and F.P. La Mantia. 2007. "Durability of a starch-based biodegradable polymer" **Polymer Degradation and Stability**. 92 : 630-634
- [36] Thunwall, M , A. Boldizar and M. Rigdahl. 2008. "Film blowing of thermoplastic starch" **Polymer Degradation and Stability**. 71 : 583-590
- [37] Kiatkamjornwong S., P. Thakeow and M. Sonsuk. 2001. "Chemical modification of cassava starch for degradable polyethylene sheets". **Polymer Dagradaation and Stability**.73:363-375
- [38] ASTM D 882 Committee on standard "**Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic.**", Philadelphia: American Society for testing and Material., 1992.
- [39] Jan, R.F. 1993. **Polymer Photodegradation**. London: Chapman&Hall
- [40] Roger, C.F. 1993. **Polymer Durability**. Chicago : Polymer Chemistry Inc.
- [41] Albano, C. 1999. "Themal stability of blend of polyolefins and sisal fiber" **Polymer Degradation and Stability**. 66 : 179-190
- [42] ASTM E 794 . 1992. Committee on standard "**StandradTest Method for Melting and Crystallization Temperatures by Themal Analysis**",Philadelphia American Society for testing and Material.,
- [43] St-Pierre, N. , B.D. Favis, B.A. Ramsay and J.A. Verhoogt . 1997 "Processing and characterization of thermoplastic starch/polyethylene blends" **Polymer**. 38 647-659

- [44] Rabek, JF. 1996. Photodegradation of polymer : Physical characteristics and application. Berlin : Springer. Verlog.
- [45] Robek, JF. 1999. **Polymer photodegradation Mechanisms and Experimental Method.** London: Chapman and Hall.
- [46] Koutny M., J. Lemaire and A.M. Delort. 2006. "Biodegradation of polyethylene film with prooxidant additives" **Chemphere.**64:1243-1252
- [47] David, M.W. and G. Scolt. 2006. "Polyolefin with controlled environmental degradability" **Polymer Degradation and Stability.**91:1581-1591
- [48] Zuchowska, D., R. Steller and W. Meissner. 1994. "Physical structure of polyolefins-starch blends after ageing" **Polymer Degradation and Stability.** 64 : 339-346
- [49] Mali, S., L.S. Sakanaka, F. Yamashita and M. V. E. Grossmann. 2005. "Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect" **Carbohydrate Polymer.**60:283-289
- [50] Goheen, S. M. and R.P. Wool 1991. "Degradation of Polyethylene-Starch Blends in soil" **Journal of Applied Polymer Science.** 42 : 269-270
- [51] สมเจตน์ เขียววานิช. 2545. " พอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมกับพอลิแซ็กคาไรด์". วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [52] Ratanakamnoun., U .2000."Photo-Biodegradation of LDPE/banana starch film" M.S. Thesis of Science and Textile Technology Chulalongkorn Univerity.
- [53] Michler, G.H. 1992. "Correlation between molecular weight , morphology and micromechanical deformation process of polyethylene s". **Collid Polym Sci.** 270:627-638
- [54] Greizerstein, H.B. 1993. Degradation of starch modifile polyethylene bags in a compost field study " **Polymer Degradation an Stability.** 39:251-259
- [55] Mazinos, P., D. Bikiaris, S. Kokkou, and C. Panayiotou. 2001. "Processing and Characteristerization of LDPE/starch Product". **Journal of Applied Polymer Science.** 79:258-2557
- [56] Khabbaz, F. A. Albertsson and S. Karlsson. 1999. "Chemical and morphological of environmentally degradable polyethylene film exposed to thermo-oxidation" **Polymer Degradation an Stability.** 63:127-138
- [57] Pedroso A.G. and D.S. Rosa.2005. "Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blend".**Carbohydrate Polymer.**59:1-9

- [58] Potts, J.E.. 1973. "**Aspects of degradation and Stabilization of Polymers**".
Elsevier.New York. 653p.
- [59] Rodriguez-Gonzalez, F.J., B.A. Ramsay and B.D. Favis. 2003. "High performance
LDPE/thermoplastic starch blends a sustainable alternative to pure
polyethylene"**Polymer.44:1517-1526**

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า

ตัวแปรที่ใช้ในการขึ้นรูป	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง
อัตราเร็วของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ในการผสมสูตร	30 รอบ/นาที
อุณหภูมิเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ในการผสมสูตร (จากส่วนป้อนสารจนถึงหัวคาย)	165-170-175-180 °C
อัตราเร็วของเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวในการขึ้นรูปฟิล์มเป่า	160-165-170-160 °C
ความเร็วในการดึงของลูกกลิ้ง	3.5-4 เมตร/นาที
เส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม	4-5 นิ้ว
ความหนาของฟิล์ม	50-80 ไมโครเมตร

ก.2 ผลการศึกษาหาปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแล้วสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียม LDPE ผสมกับแป้งมันสำปะหลังและสารช่วยผสม (Fusabond MB 226D) ในอัตราส่วน 100 : 30 : 5 และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ โดยศึกษาจากผลการเป่าขึ้นรูป ความเข้ากันได้ และสมบัติเชิงกลของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม

ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม

จากการทดลอง พบว่า ฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ใช้กลีเซอรอล 50 และ 55 % โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้ จึงได้ทำการศึกษาผลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ใช้กลีเซอรอล 60, 65 และ 70 % โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง ตามลำดับ ซึ่งสามารถเป่าขึ้นรูปได้ โดยแสดงรายละเอียด ดังตารางที่ ก.2 และเมื่อสังเกตสีของฟิล์มเป่าที่ได้ พบว่า ฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำจะมีสี และมีความใส แต่ฟิล์มเป่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังจะมีสีขาว และมีความขุ่นมากขึ้น โดยฟิล์มผสมแป้งแต่ละสูตรจะมีสีและความขุ่นไม่แตกต่างกันมากนัก

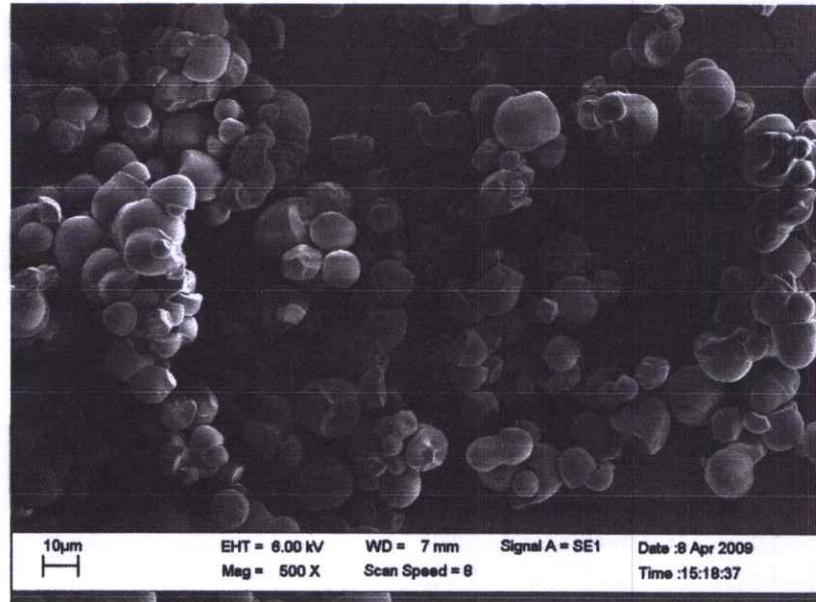
ตารางที่ ก.2 ลักษณะของฟิล์มเป่าพอลิเมอร์ผสม

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป	ความหนาเฉลี่ย (μm)
Low density polyethylene	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	53 ± 8
Low density polyethylene +30%Starch+50%Glycerol	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	-
Low density polyethylene +30%Starch+55%Glycerol	ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปอย่างต่อเนื่องได้	-
Low density polyethylene +30%Starch+60%Glycerol	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	75 ± 5
Low density polyethylene +30%Starch+65%Glycerol	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	70 ± 7
Low density polyethylene +30%Starch+70%Glycerol	สามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง	73 ± 8

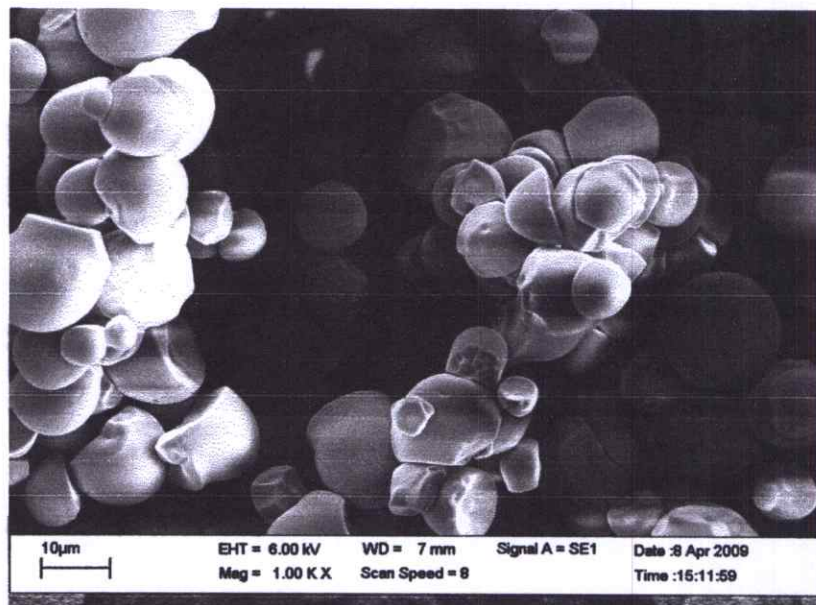
จากการทดลองพบว่า ฟิล์มผสมแป้งและกลีเซอรอล 65 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้งจะมีลักษณะเนื้อฟิล์มและความต่อเนื่องของท่อฟิล์มขณะเป่าดีที่สุด โดยการสังเกตจากลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้

ภาคผนวก ข.

ข.1 ลักษณะเม็ดแป้งที่ใช้ในการขึ้นรูป



รูปที่ ข.1 ขนาดของเม็ดแป้งที่ใช้ในการทดลองผลภาพถ่ายจาก SEM

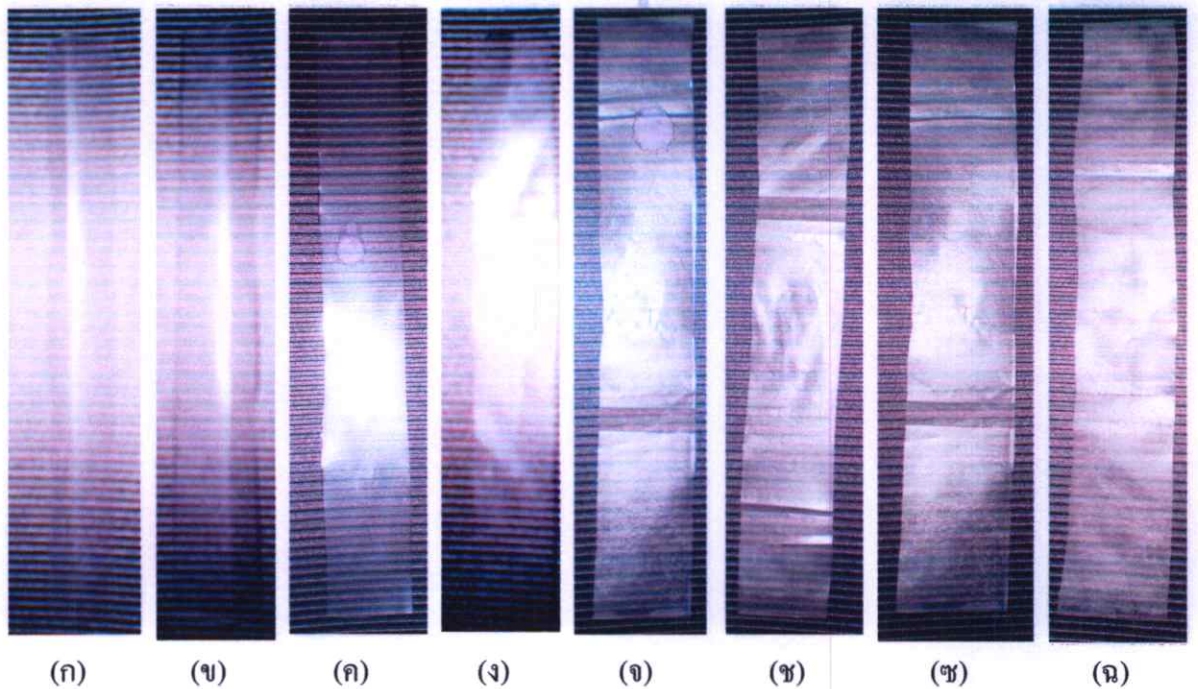


รูปที่ ข.2 แสดงลักษณะพื้นผิวเม็ดแป้งที่ใช้ในการทดลอง

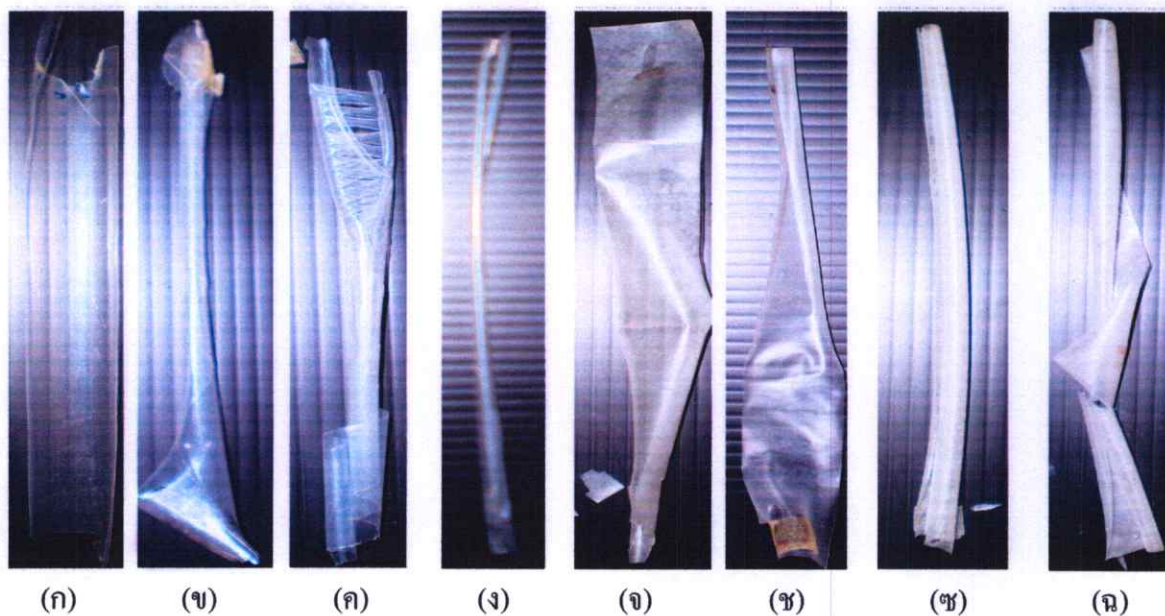
ภาคผนวก ค.

ค.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

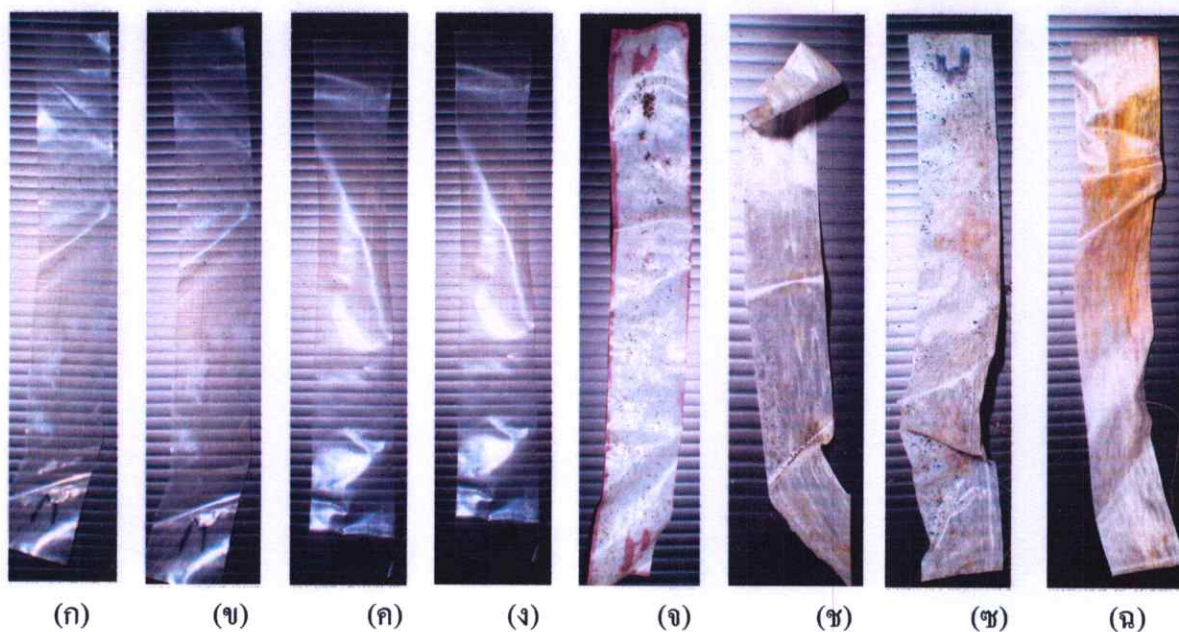
แสดงลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าก่อนและหลังการทดลองฉายแสงยูวีและฟังคินเป็นเวลา 4 เดือน



รูปที่ ค.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนก่อนการทดลอง



รูปที่ ค.2 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน ภายหลังการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน.



รูปที่ ค.3 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน ภายหลังการฟุ้งดินเป็นเวลา 4 เดือน.

- (ข) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ค) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ง) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (จ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ฉ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนน
ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ช) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนน
ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- (ซ) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนน
ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค.2 เปรียบเทียบพลังงานแสงยูวีของตู้ยูวีกับแสงยูวีตามธรรมชาติ

ตู้ยูวีใช้หลอดคลื่นแสงยูวี ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ซึ่งมีกำลัง 9 วัตต์ต่อชั่วโมง

การทดลองฉายแสงยูวีวันละ 12 ชั่วโมง $9 \times 12 = 108$ วัตต์

แสงยูวีธรรมชาติความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร มีกำลังเท่ากับ 1.163 วัตต์ต่อชั่วโมง

เปรียบเทียบกับ การทดลองฉายแสงยูวี 12 ชั่วโมง $1.163 \times 12 = 13.95$ วัตต์

ดังนั้นการทดสอบในตู้ยูวีจะใช้พลังงานมากกว่าแสงยูวีจากธรรมชาติประมาณ $108/13.95 = 7.7$ เท่า
การทดลองใช้เวลา 4 เดือน โดยฉายแสงยูวีวันละ 12 ชั่วโมง ระยะเวลาฉายแสงทั้งหมดเท่ากับ
1464 ชั่วโมง

ดังนั้น แสงยูวีจากตู้ยูวีเป็นเวลา 4 เดือนมีค่าพลังงานเท่ากับ $9 \times 1464 = 13,176$ วัตต์

แสงยูวีตามธรรมชาติเป็นเวลา 4 เดือนมีค่าพลังงานเท่ากับ $1.163 \times 1,464 = 1702$ วัตต์

แสงยูวีจากตู้ยูวีเป็นเวลา 4 เดือนมีพลังงานมากกว่าแสงยูวีตามธรรมชาติ เท่ากับ
 $13176 - 1702 = 11,474$ วัตต์

สรุปว่าการเปรียบเทียบการทดลองฉายแสงยูวีในตู้ยูวีเทียบกับแสงยูวีตามธรรมชาติเป็น
เวลา 4 เดือน พบว่าการฉายแสงยูวีในตู้ยูวีมีผลทำให้เกิดการสลายตัวได้เร็วกว่าแสงยูวีในธรรมชาติ
เท่ากับ $11,474/12 = 956$ วัน ดังนั้นตู้ยูวีมีผลทำให้เกิดการสลายตัวได้มากกว่าแสงยูวีธรรมชาติถึง
2 ปี 6 เดือน

ภาคผนวก ง.

ความทนแรงดึงและมอดุลัส

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการทดสอบด้วยการฉายแสงยูวี และการฝังดิน เป็นเวลา 4 เดือน

ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	11.031 ±1.46	75.047±4.05	10.057 ±0.84	70.132±4.18
Low density polyethylene + 1% benzophenone	10.559 ±0.86	77.496±4.59	9.511 ±0.40	73.512±3.24
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	10.070 ± 1.05	78.631±2.14	9.130 ± 0.25	74.712±2.99
Low density polyethylene + 2% benzophenone	9.928±0.63	78.479±2.68	8.889±0.63	76.631±2.58
Low density polyethylene + 30% starch	7.723±0.66	57.840±4.43	7.210 ±0.48	52.863±3.36
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	7.531 ±0.56	60.487±1.18	7.132±0.54	55.340±3.76
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	7.371±0.40	58.978±3.00	6.917 ±0.57	52.191±2.21
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	7.125±0.48	55.254±2.94	6.892 ±0.42	50.543±2.31

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๓.2 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 1 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	10.020±0.47	79.475±5.36	9.213±0.46	76.628±4.55
Low density polyethylene + 1% benzophenone	8.701±0.48	84.225±3.09	8.300±0.57	80.810±4.38
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	8.193±0.47	88.080±2.54	8.078±0.69	83.900±2.01
Low density polyethylene + 2% benzophenone	7.863±0.49	91.740±4.10	7.842±0.43	86.713±4.48
Low density polyethylene + 30% starch	7.225±0.37	63.063±4.36	6.687±0.25	58.563±3.48
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	7.037±0.46	68.008±4.27	6.545±0.48	60.435±3.76
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	6.974±0.42	77.072±4.17	6.519±0.38	70.653±3.67
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	6.598±0.37	80.428±3.101	6.369±0.26	75.007±4.47

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ 3.3 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 2 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	9.817±0.44	89.338±5.65	8.602±0.50	81.847±5.80
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	7.276±0.50	88.042±5.08	7.145±0.74	85.695±1.83
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	6.254±1.05	96.236±3.40	6.118±0.39	90.947±2.29
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	6.183±0.26	99.441±3.60	5.915±0.35	95.205±2.58
Low density polyethylene + 30 %starch	6.467±0.33	67.263±2.71	6.268±0.27	63.291±4.31
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1% Benzophenone	6.409±0.20	76.485±5.02	5.926±0.62	68.802±4.48
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1.5% Benzophenone	6.264±0.32	87.207±4.69	6.010±0.50	83.119±5.66
Low density polyethylene + 30 %starch+ 2% Benzophenone	5.842±0.32	89.652±4.15	5.791±0.33	85.561±2.34

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ 3.4 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 3 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	9.596±0.45	89.338±5.65-	8.279±0.11	87.719±3.10-
Low density polyethylene + 1% benzophenone	6.371±0.25	93.576±4.60-	6.112±0.29	89.886±4.15-
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 2% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 30% starch	6.286±0.16	70.701±4.39	6.089±0.42	66.839±2.61
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	5.902±0.46	81.518±3.96	5.667±0.45	75.887±3.68
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	-	-	-	-

* % base on Low density ployethylene

ตารางที่ 3.5 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength	Young's modulus	Tensile Strength	Young's modulus
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Low density polyethylene	9.354±0.27	94.237±3.58	7.941±0.42	92.011±2.95
Low density polyethylene + 1% benzophenone	5.693±0.26	95.865±3.99	5.304±0.22	93.421±3.61
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 2% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 30% starch	5.955±0.34	76.123±2.41	5.765±0.39	72.471±3.01
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	-	-	-	-
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	-	-	-	-

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๓.6 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 1 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength	Young's modulus	Tensile Strength	Young's modulus
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Low density polyethylene	10.906±0.57	77.894±2.63	10.625±0.17	75.809±1.93
Low density polyethylene + 1% benzophenone	10.549±0.88	75.064±2.40	9.427±0.48	75.682±1.52
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	10.032±0.52	76.327±1.59	9.091±0.47	77.319±2.96
Low density polyethylene + 2% benzophenone	9.872±0.22	77.868±2.65	8.822±0.24	77.091±4.11
Low density polyethylene + 30% starch	6.573±0.31	51.285±2.94	6.214±0.38	47.047±3.82
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	6.765±0.41	50.380±4.95	6.258±0.20	49.871±1.56
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	6.855±0.30	50.380±4.95	6.365±0.32	45.064±1.26
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	6.610±0.44	55.586±1.43	6.394±0.30	46.797±2.42

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๓.7 ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 2 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	10.591±0.62	79.026±4.89	10.433±0.58	77.739±3.99
Low density polyethylene + 1% benzophenone	10.403±0.34	76.413±2.41	9.374±0.37	76.674±2.19
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	10.032±0.52	79.137±4.03	9.091±0.47	76.938±1.24
Low density polyethylene + 2% benzophenone	9.853±0.35	77.663±1.98	8.776±0.54	77.174±4.08
Low density polyethylene + 30% starch	6.190±0.13	45.216±2.62	5.517±0.29	42.839±3.35
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	6.021±0.65	49.828±5.49	5.614±0.46	44.021±2.57
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	6.180±0.53	45.895±1.26	5.974±0.34	40.894±3.92
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	6.116±0.63	50.756±1.43	6.033±0.43	42.472±3.16

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๖.๘ ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 3 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	10.327±0.22	80.671±5.26	10.365±0.43	79.170±4.52
Low density polyethylene + 1% benzophenone	10.317±0.57	75.657±1.36	9.278±0.28	79.074±6.23
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	9.898±0.45	78.381±4.22	9.002±0.56	78.364±4.46
Low density polyethylene + 2% benzophenone	9,808±0.58	76.164±2.86	8.721±0.41	76.727±1.39
Low density polyethylene + 30% starch	5.307±0.28	40.955±2.08	5.227±0.17	37.314±4.47
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	5.499±0.23	44.263±3.91	5.389±0.20	38.636±3.18
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	5.543±0.43	39.985±5.41	5.555±0.24	35.141±4.36
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	5.648±0.40	45.413±4.73	5.591±0.27	40.825±5.00

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๙.๑ ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมหลังฝังดิน เป็นเวลา 4 เดือน

Sample	Machine Direction		Transverse Direction	
	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
Low density polyethylene	10.118±0.46	79.820±4.52	10.024±0.41	80.309±3.83
Low density polyethylene + 1% benzophenone	10.229±0.46	74.620±1.88	9.247±0.36	78.422±4.99
Low density polyethylene + 1.5% benzophenone	9.858±0.69	80.446±4.88	9.001±0.45	77.080±2.25
Low density polyethylene + 2% benzophenone	9.783±0.52	76.807±1.54	8.674±0.25	79.381±3.92
Low density polyethylene + 30% starch	5.068±0.31	32,837±2.32	5.075±0.19	30.494±3.00
Low density polyethylene + 30% starch + 1% benzophenone	5.181±0.12	35.603±1.91	5.005±0.31	33.427±2.33
Low density polyethylene + 30% starch + 1.5% benzophenone	5.229±0.09	35.274±1.73	5.381±0.25	32.874±3.55
Low density polyethylene + 30% starch + 2% benzophenone	5.383±0.25	35.130±2.06	5.339±0.25	35.196±3.66

* % base on Low density polyethylene

ภาคผนวก จ.

ตารางที่ จ.1 ค่า %Transmittance ในช่วงที่เกิดหมุ่คาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนและหลังการฉายแสงยูวี เป็นเวลา 4 เดือน

สูตร	%Transmittance ช่วงที่เกิดหมุ่คาร์บอนิล				
	0 เดือน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	93.93	80.57	59.19	50.79	51.46
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	96.15	72.58	49.11	30.04	32.74
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	93.53	61.29	22.35	38.93	41.63
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	96.16	43.476	30.08	33.37	25.28
Low density polyethylene + 30 %starch	58.77	37.00	25.67	34.74	23.07
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1% Benzophenone	41.98	45.33	21.99	13.50	17.07
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1.5% Benzophenone	40.70	48.35	15.29	7.23	6.67
Low density polyethylene + 30 %starch+ 2% Benzophenone	41.89	31.45	6.88	3.03	1.89

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๑.2 ค่า %Transmittance บริเวณ $3,382\text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

สูตร	%Transmittance บริเวณ 3382 cm^{-1}				
	0 เดือน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	96.66	92.15	87.04	82.79	79.12
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	97.69	84.15	81.17	64.67	86.50
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	52.90	83.54	67.94	81.73	72.60
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	93.85	76.42	76.24	74.34	69.9
Low density polyethylene + 30 %starch	0.62	0.50	0.15	0.12	0.076
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1% Benzophenone	0.56	0.38	0.22	0.14	0.18
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1.5% Benzophenone	0.25	0.26	0.19	0.11	0.19
Low density polyethylene + 30 %starch+ 2% Benzophenone	0.52	0.23	0.20	0.07	0.11

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๑.3 ค่า %Transmittance บริเวณ 3382 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

สูตร	%Transmittance บริเวณ 3382 cm^{-1}				
	0 เดือน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	96.66	98.68	79.37	87.52	95.08
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	87.82	98.49	91.93	99.85	95.79
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	98.99	96.17	89.39	96.77	96.96
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	97.55	94.19	95.23	95.65	96.72
Low density polyethylene + 30 %starch	1.39	1.66	0.20	0.23	0.07
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1% Benzophenone	0.81	1.47	0.12	0.17	1.58
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1.5% Benzophenone	0.78	0.58	0.21	0.13	0.17
Low density polyethylene + 30 %starch+ 2% Benzophenone	0.76	0.28	0.62	0.12	0.14

* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๑.4 ค่า %Transmittance บริเวณ 2020 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฉายแสง
ยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

สูตร	%Transmittance บริเวณ 2020 cm^{-1}				
	0 เดือน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	95.66	96.42	88.92	84.56	82.90
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	95.20	93.83	90.81	78.64	95.63
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	98.37	84.45	82.53	95.17	86.12
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	99.52	83.80	86.16	90.55	97.71
Low density polyethylene + 30 %starch	88.18	87.08	85.12	77.79	91.10
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1% Benzophenone	77.40	70.67	97.8	69.34	88.86
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1.5% Benzophenone	76.70	89.13	85.24	94.56	85.65
Low density polyethylene + 30 %starch+ 2% Benzophenone	71.40	84.11	82.16	75.66	69.05

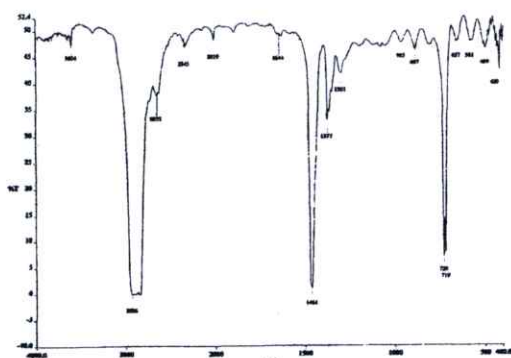
* % base on Low density polyethylene

ตารางที่ ๑.5 ค่า %Transmittance บริเวณ 2020 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังฝังดิน
เป็นเวลา 4 เดือน

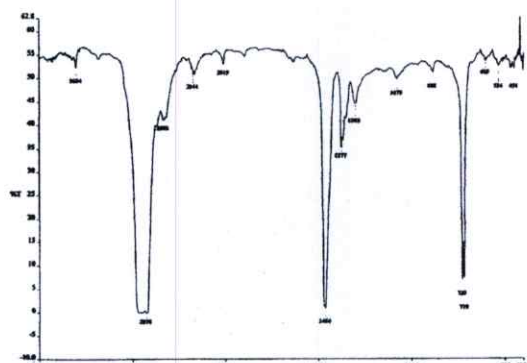
สูตร	%Transmittance บริเวณ 2020 cm^{-1}				
	0 เดือน	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน	4 เดือน
Low density polyethylene	88.10	84.01	80.16	82.49	87.52
Low density polyethylene + 1% Benzophenone	87.76	96.23	93.54	93.61	89.41
Low density polyethylene + 1.5% Benzophenone	98.85	87.71	87.72	88.83	88.94
Low density polyethylene + 2% Benzophenone	91.15	87.35	89.83	89.77	88.96
Low density polyethylene + 30 %starch	97.13	65.98	90.38	90.38	79.70
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1% Benzophenone	94.09	93.16	64.21	81.23	81.2
Low density polyethylene + 30 %starch+ 1.5% Benzophenone	89.36	67.40	68.39	61.64	79.00
Low density polyethylene + 30 %starch+ 2% Benzophenone	90.53	71.73	65.12	87.65	94.29

* % base on Low density polyethylene

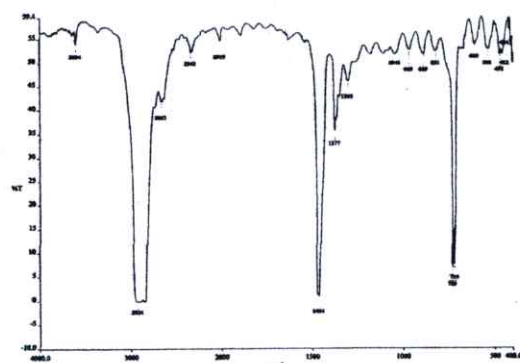
กราฟ FTIR พอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการทดลองและหลังการทดลอง



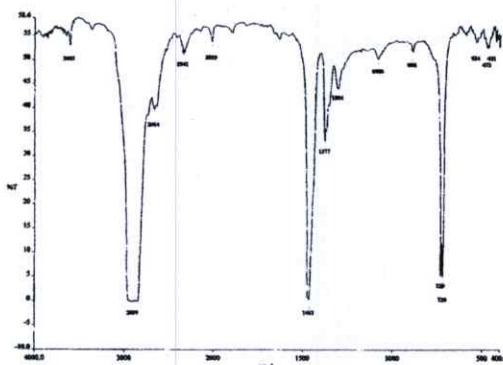
ก



ข



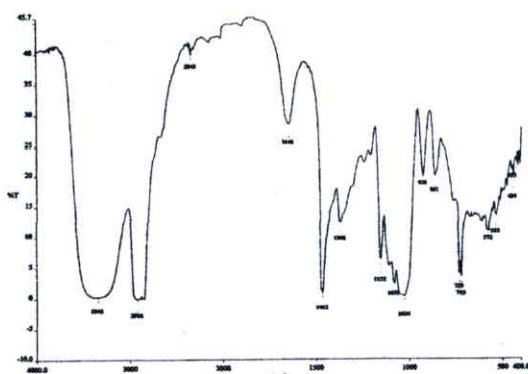
ค



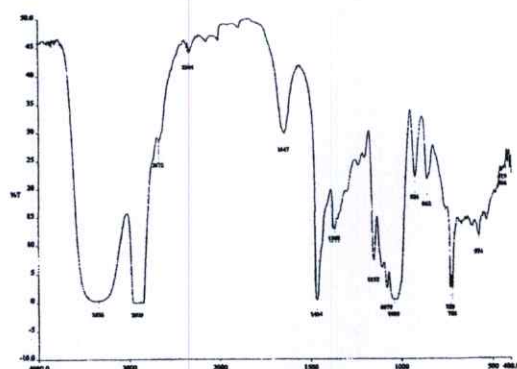
ง

รูปที่ จ.1 กราฟ FTIR พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน

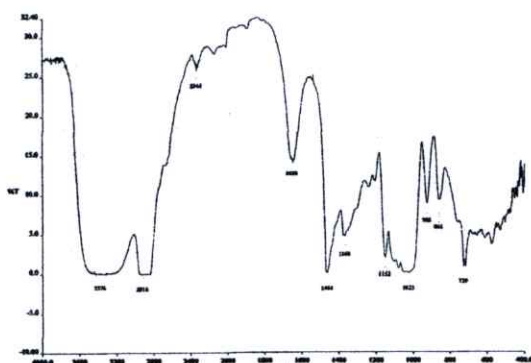
- ก. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



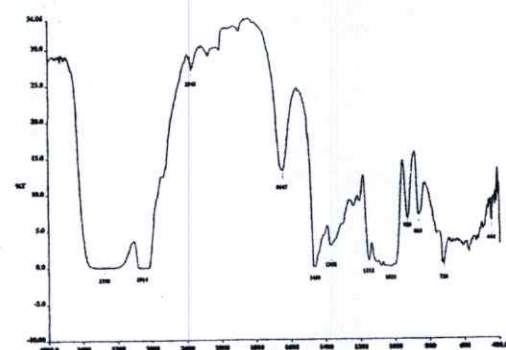
ก



ข



ค



ง

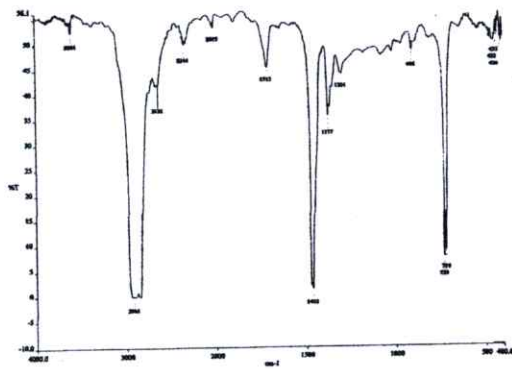
รูปที่ จ.2 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

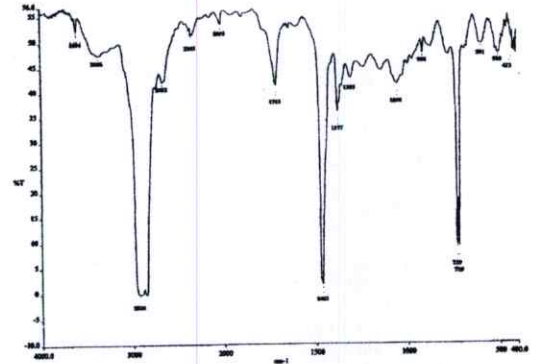
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

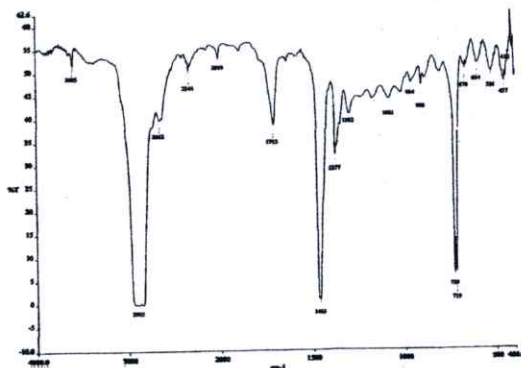
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



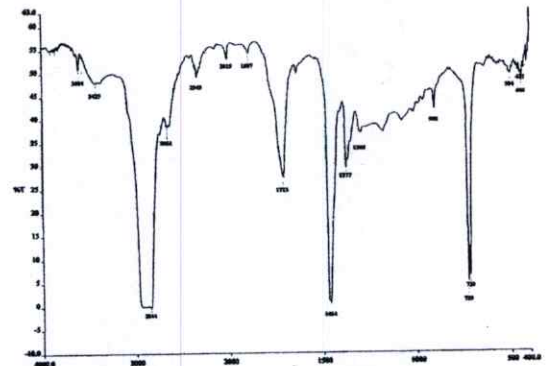
ก



ข



ค



ง

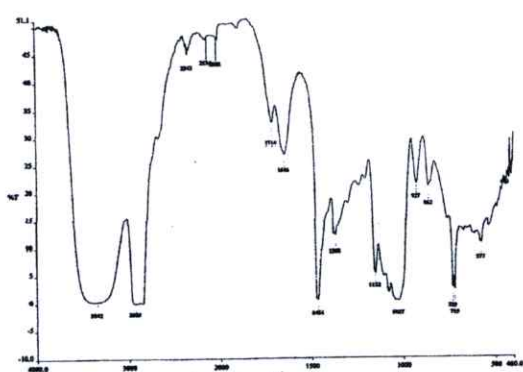
รูปที่ จ.3 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

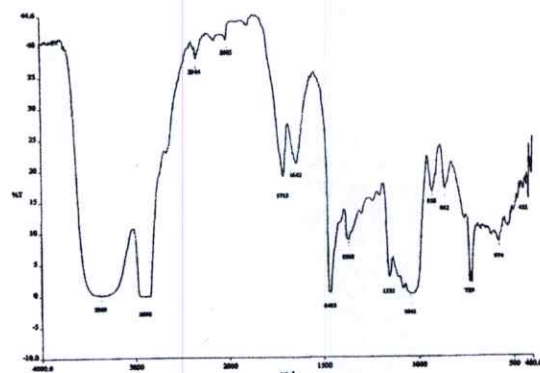
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

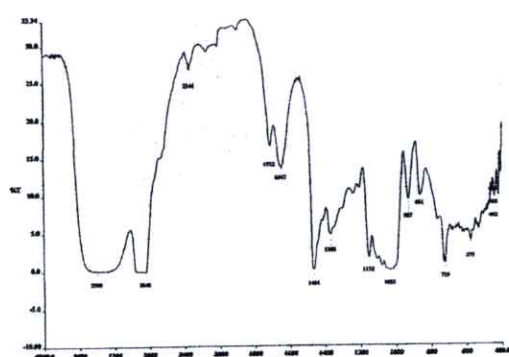
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



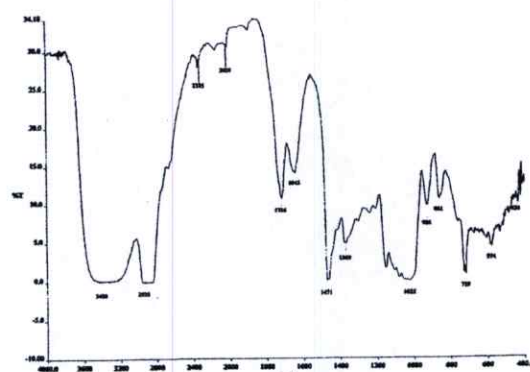
ก



ข



ค



ง

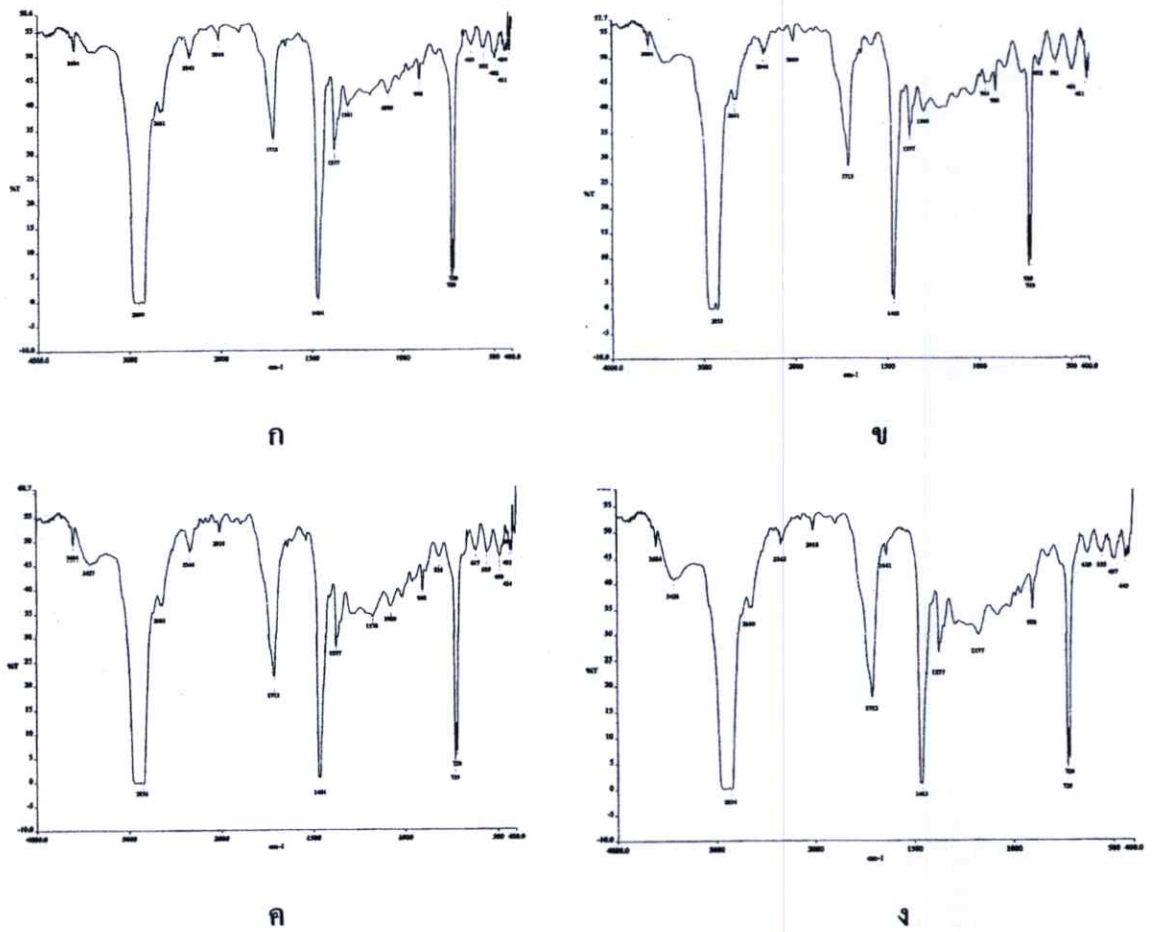
รูปที่ จ.4 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน
หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อย
ละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อย
ละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อย
ละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



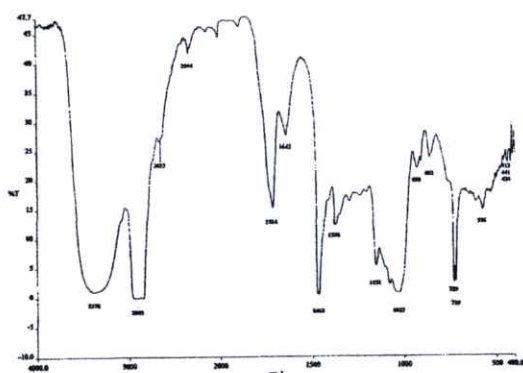
รูปที่ ๑.5 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังจากฉายยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

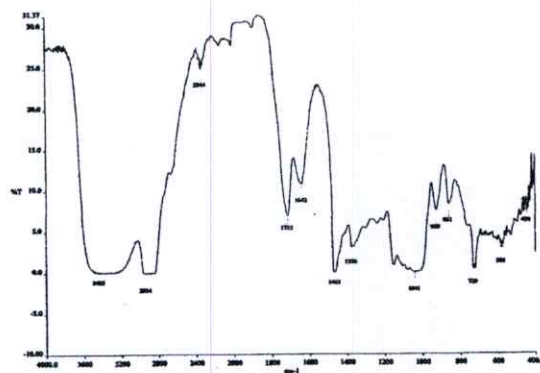
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

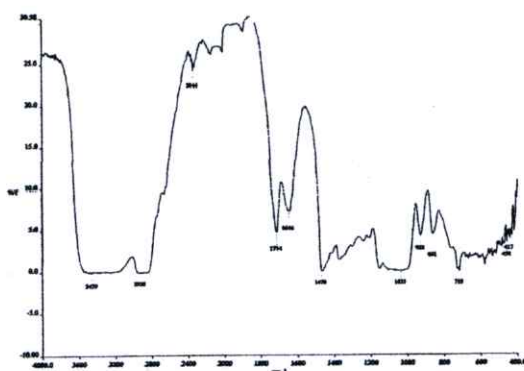
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



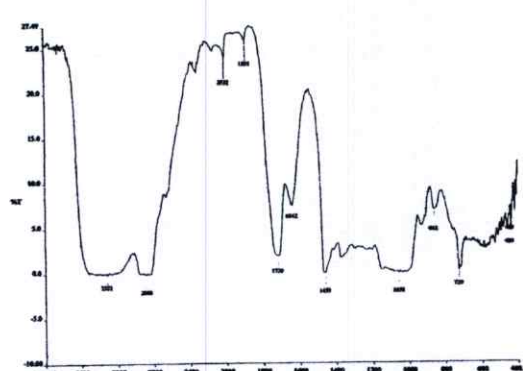
ก



ข



ค



ง

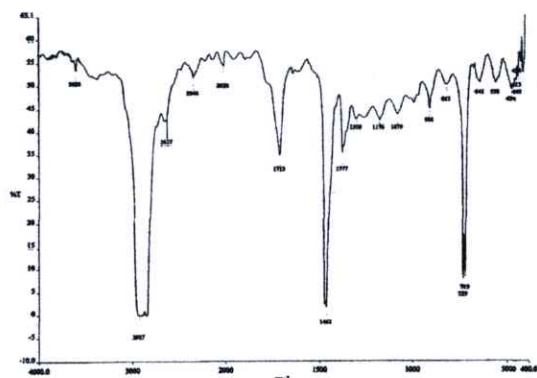
รูปที่ จ.6 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน
หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนัก
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

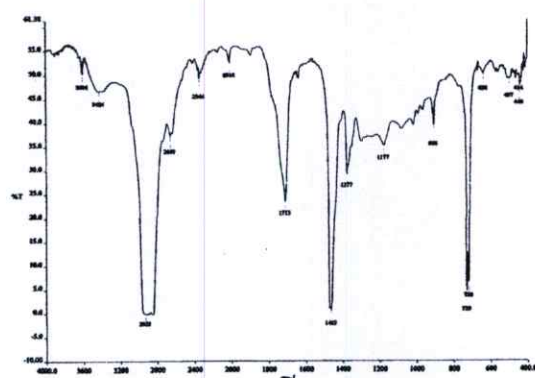
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อย
ละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อย
ละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

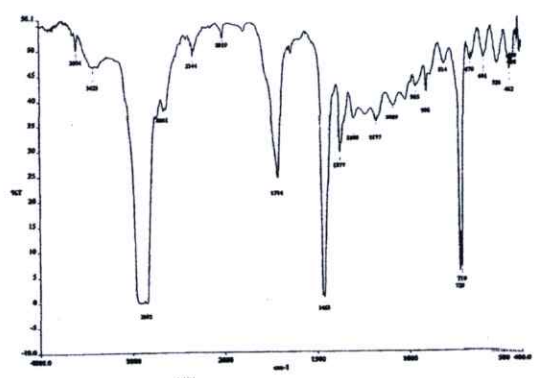
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อย
ละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



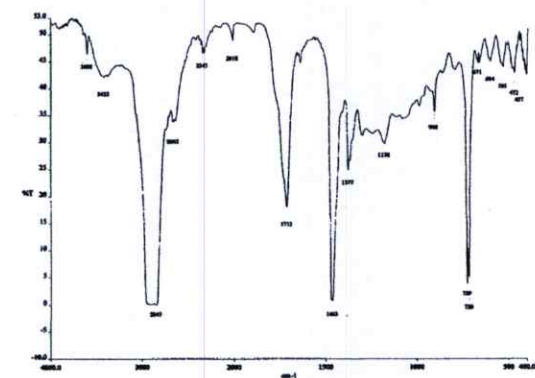
ก



ข



ค



ง

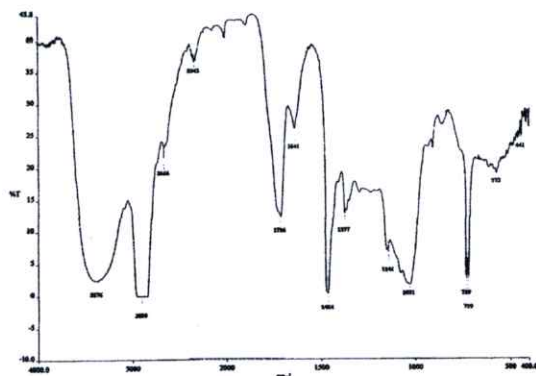
รูปที่ จ.7 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

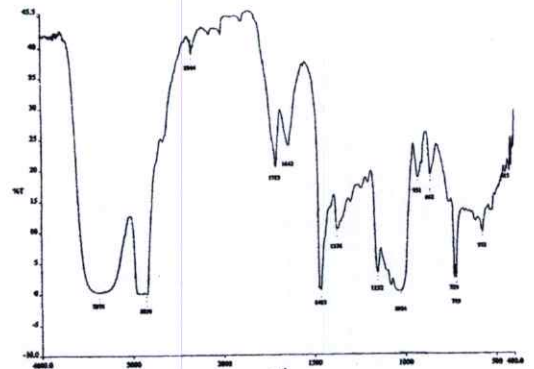
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

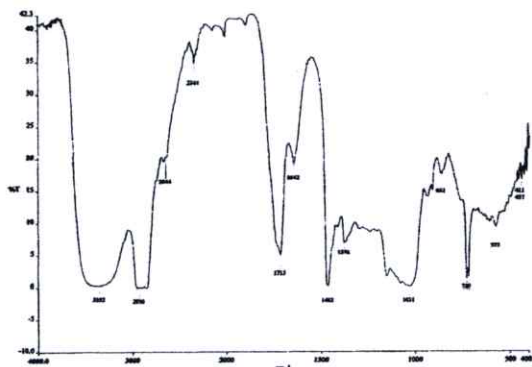
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



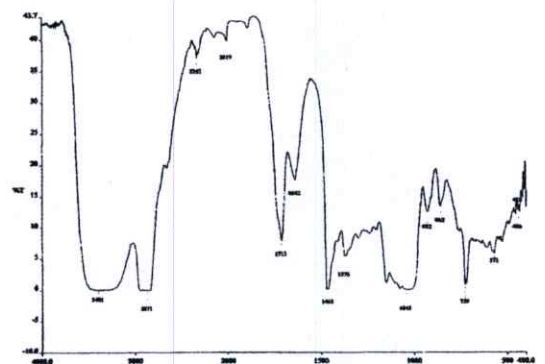
ก



ข



ค



ง

รูปที่ ๖.๘ กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน

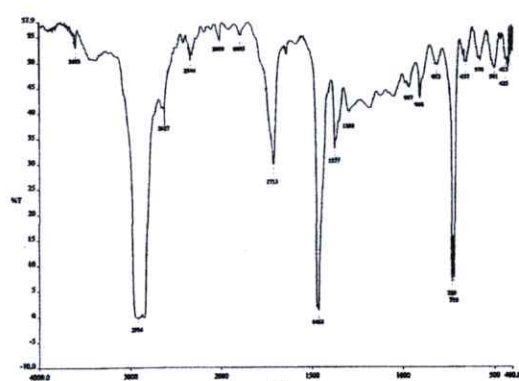
หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

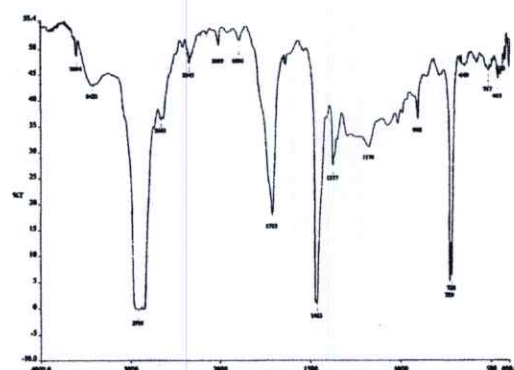
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

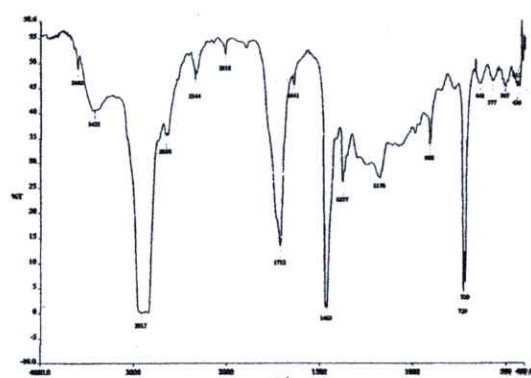
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนน ร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



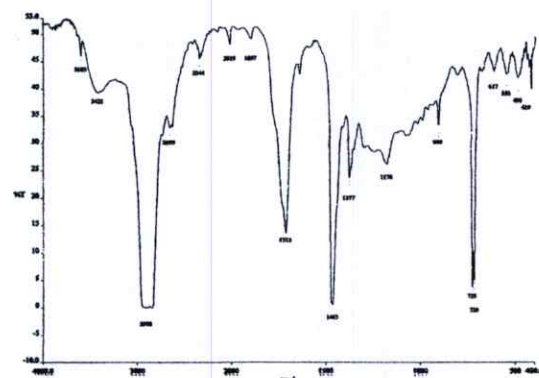
ก



ข



ค



ง

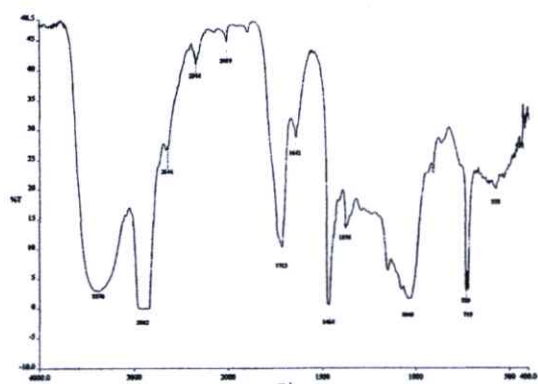
รูปที่ ๑.๑ กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

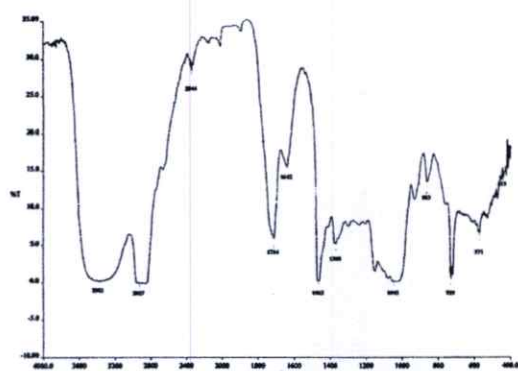
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

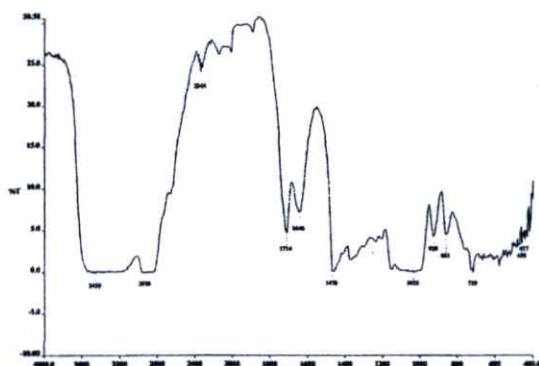
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



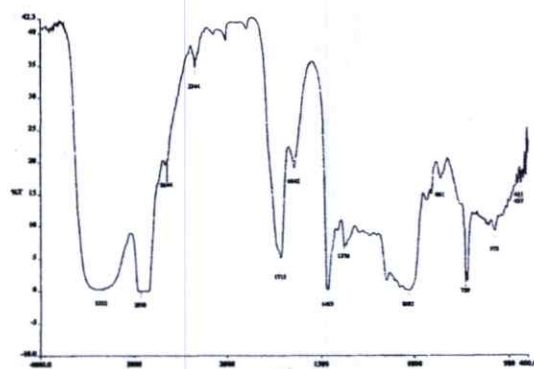
ก



ข



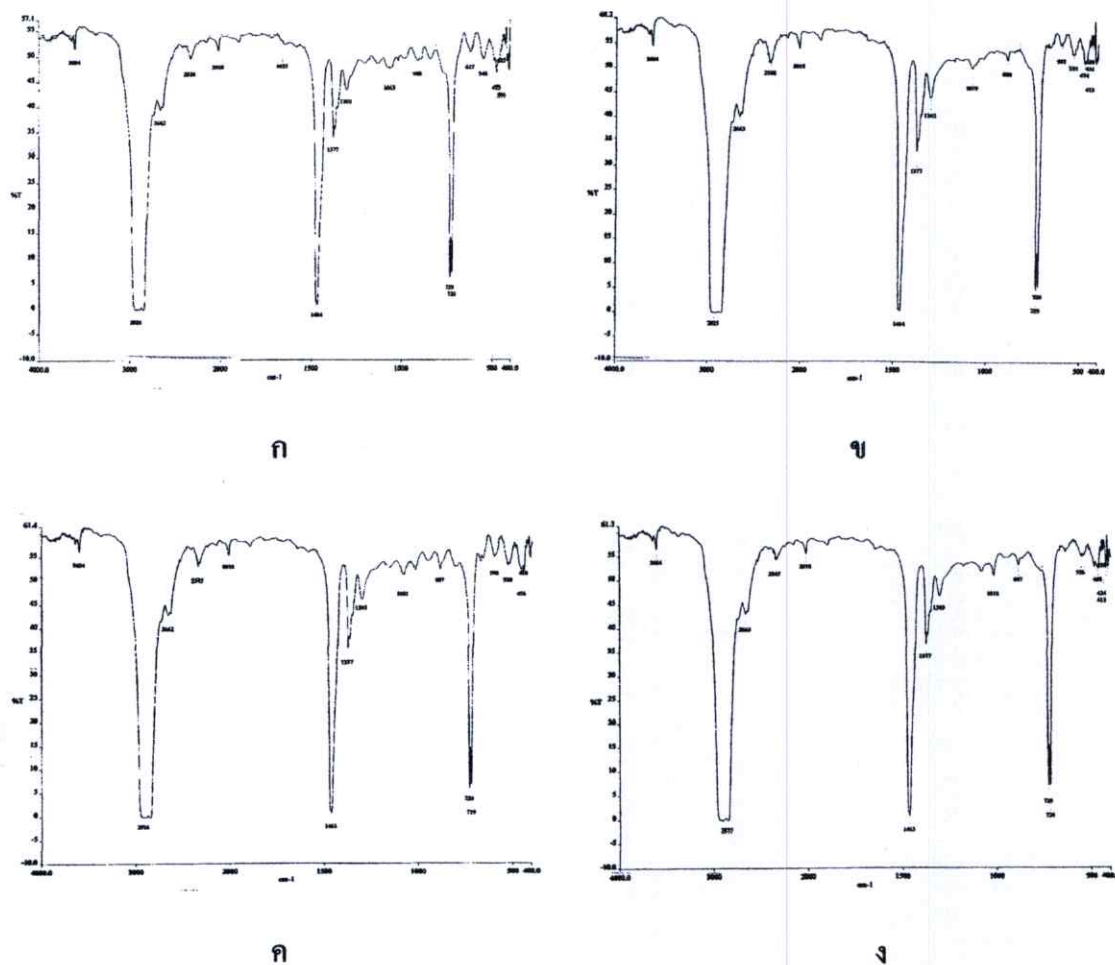
ค



ง

รูปที่ จ.10 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

- ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



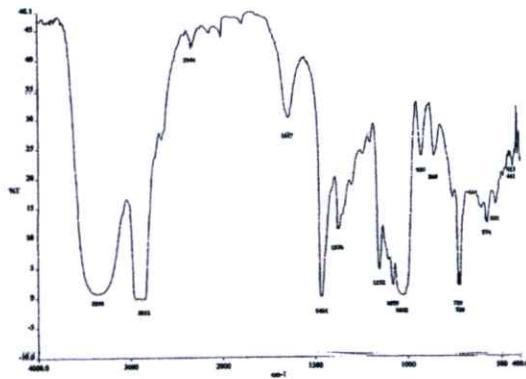
รูปที่ จ.11 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

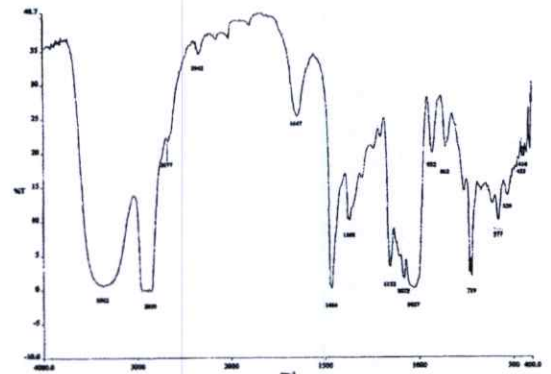
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

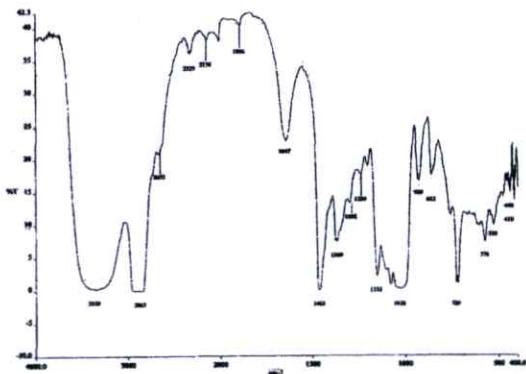
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



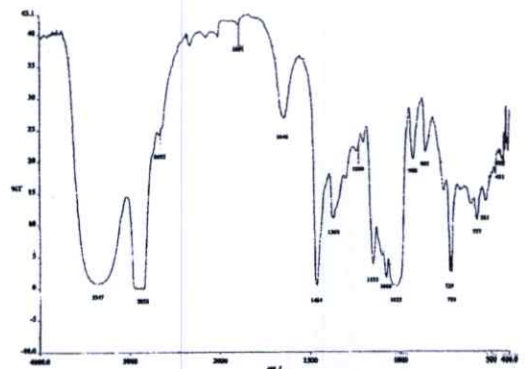
ก



ข



ค



ง

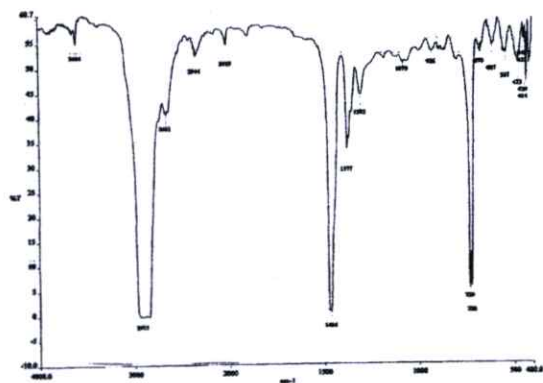
รูปที่ จ.12 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังคืนเป็นเวลา 1 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

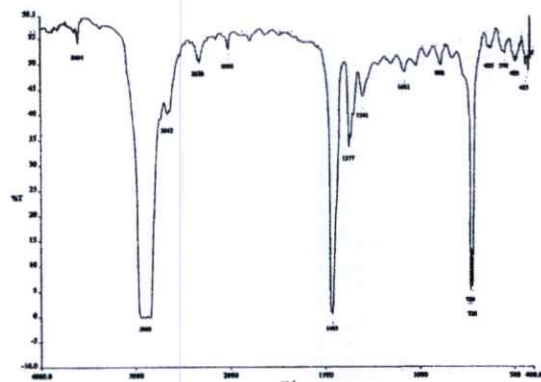
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

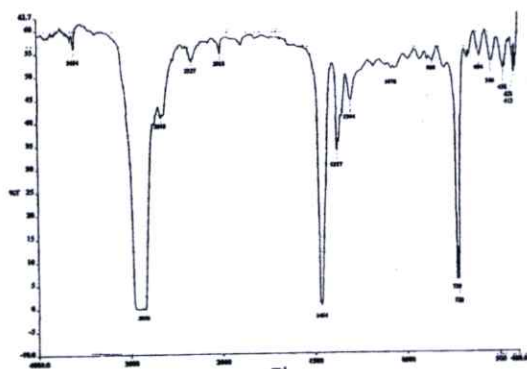
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



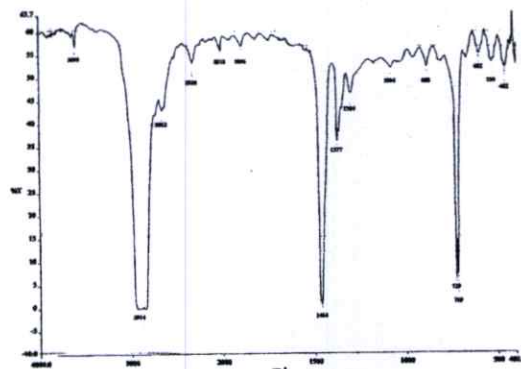
ก



ข



ค



ง

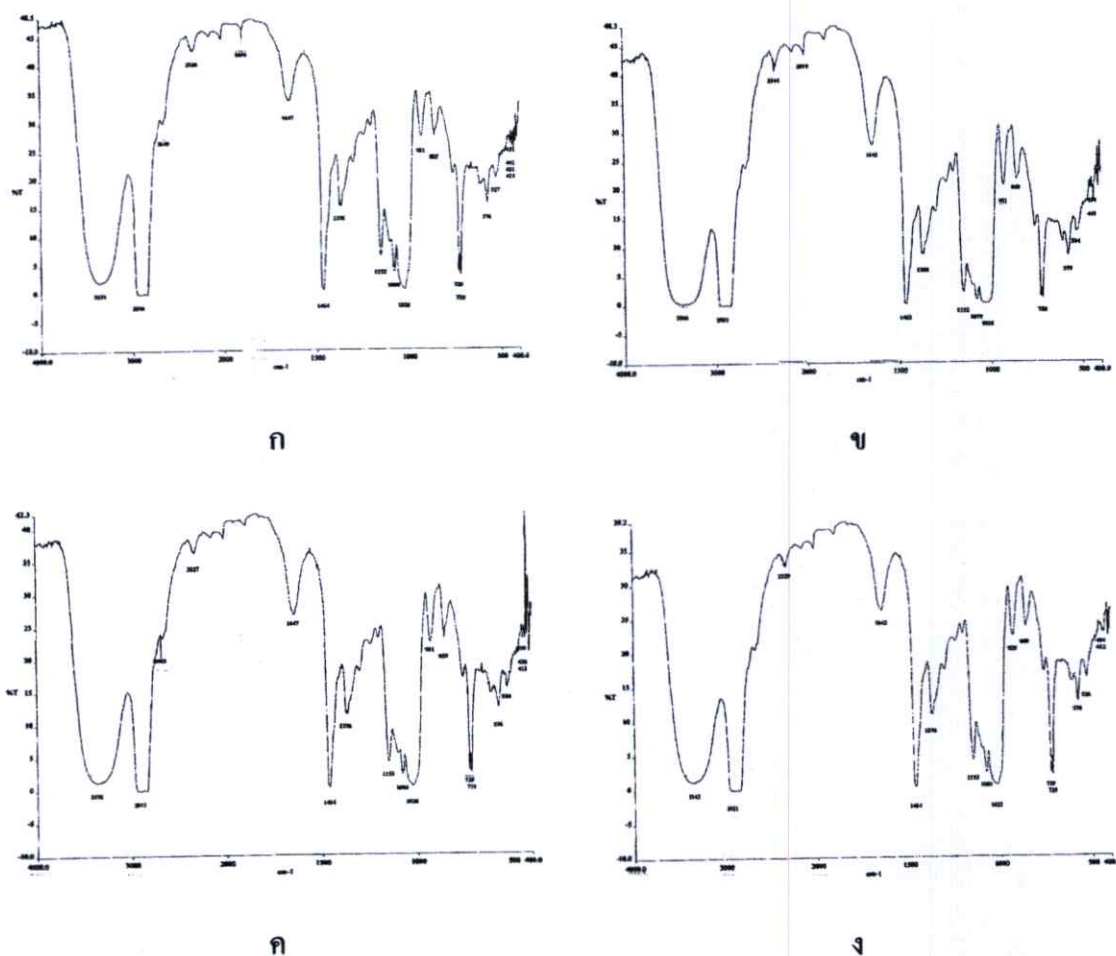
รูปที่ จ.13 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

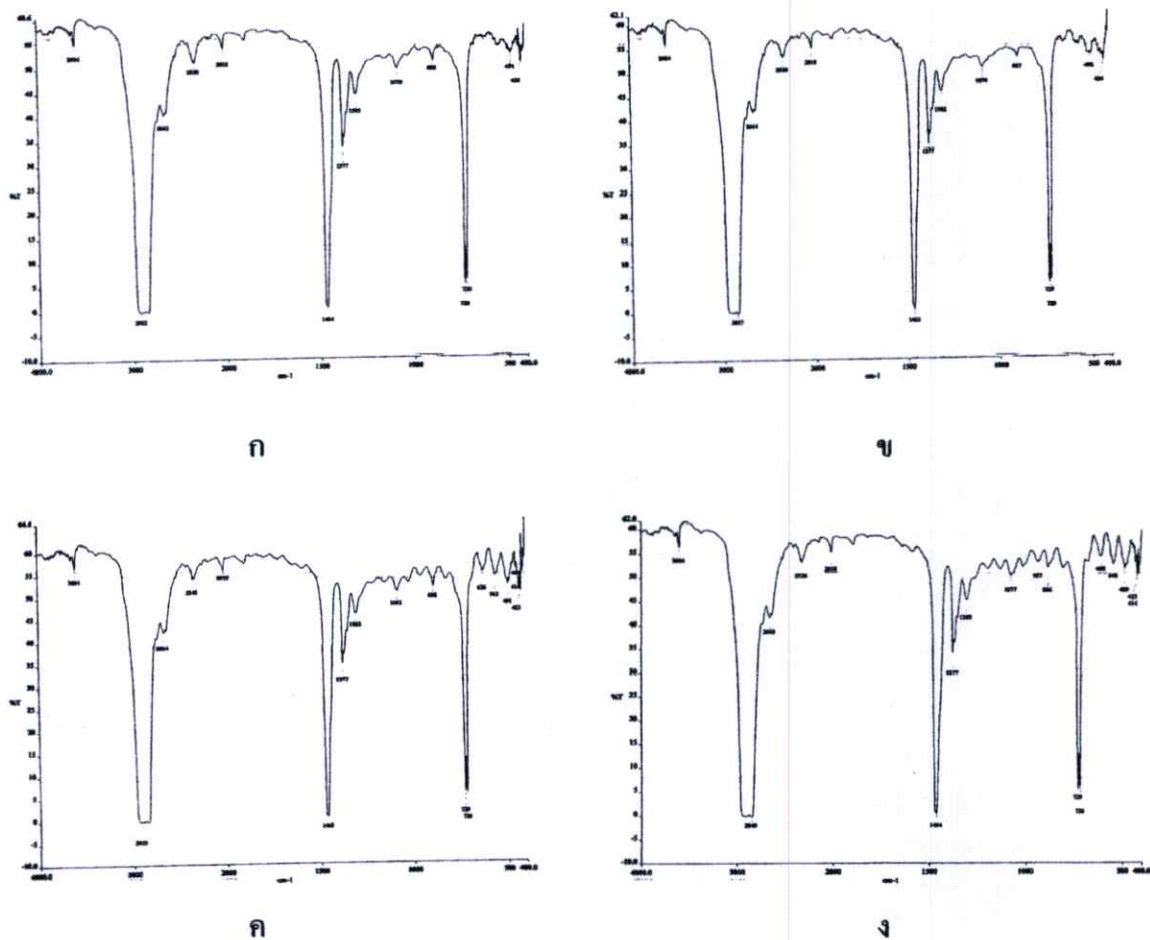
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



- รูปที่ จ.14 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน
- ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



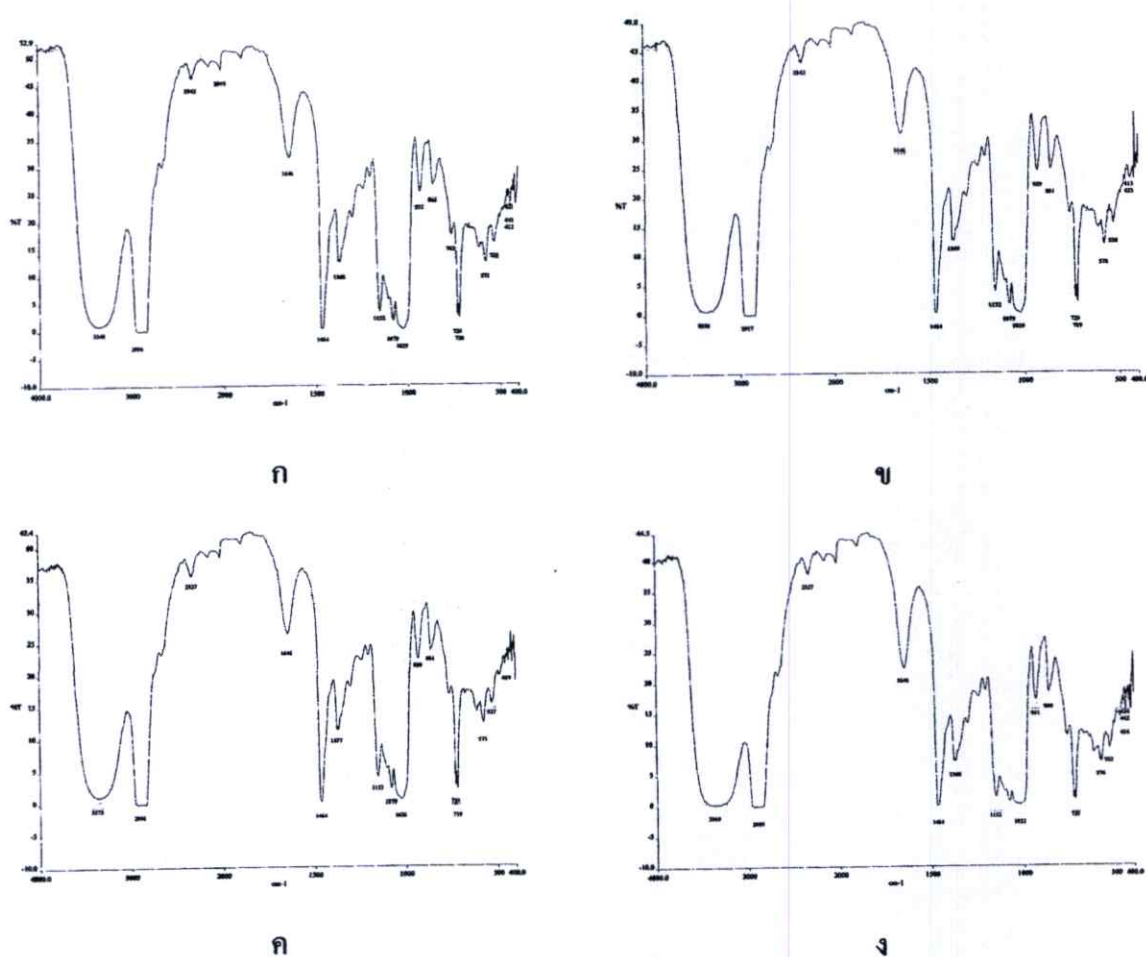
รูปที่ จ.15 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังคินเป็นเวลา 3 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

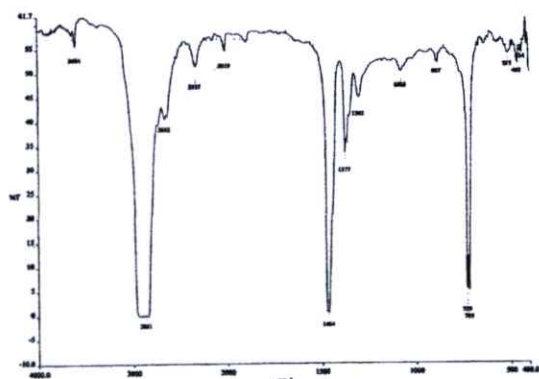
ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

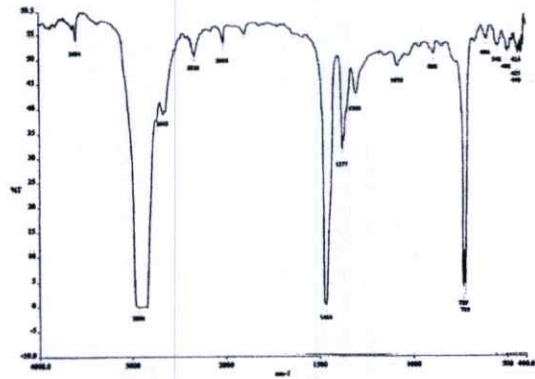


รูปที่ จ.16 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน

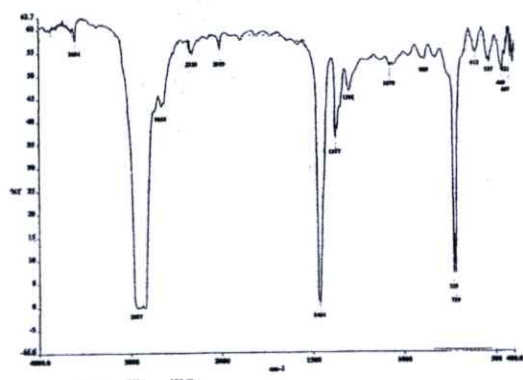
- ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



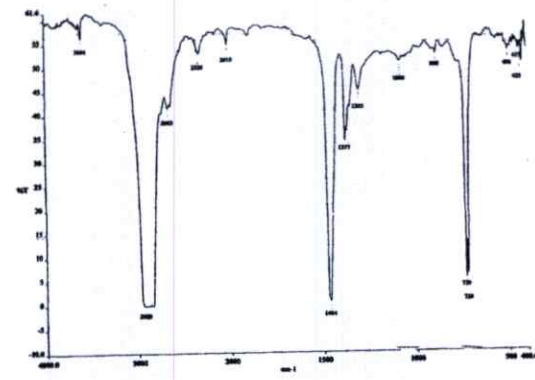
ก



ข



ค



ง

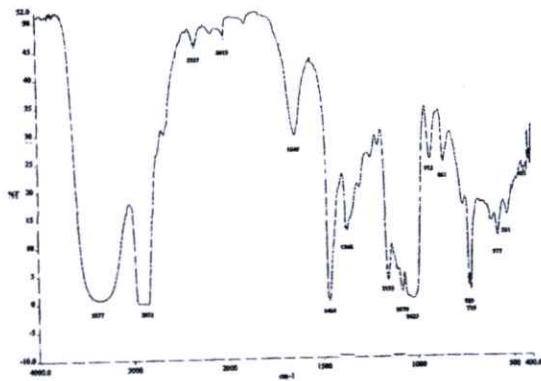
รูปที่ จ.17 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

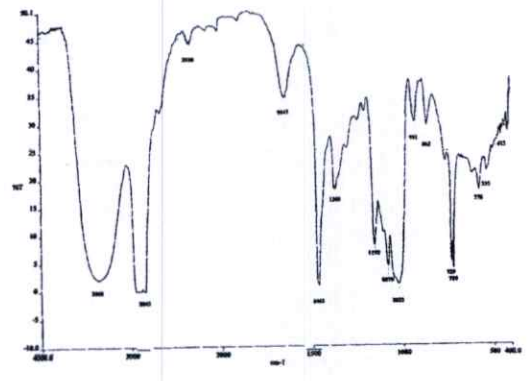
ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

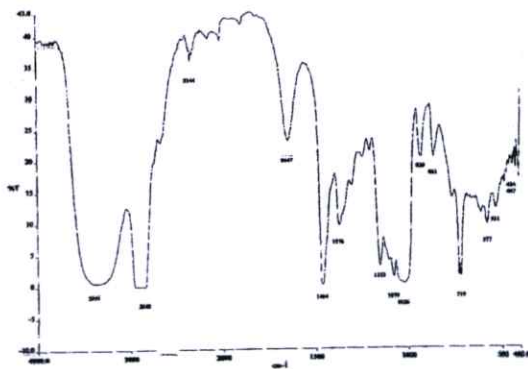
ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



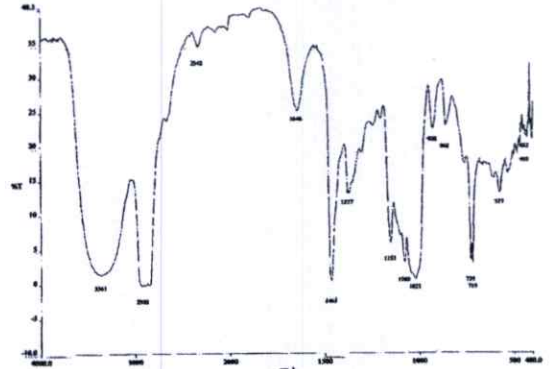
ก



ข



ค

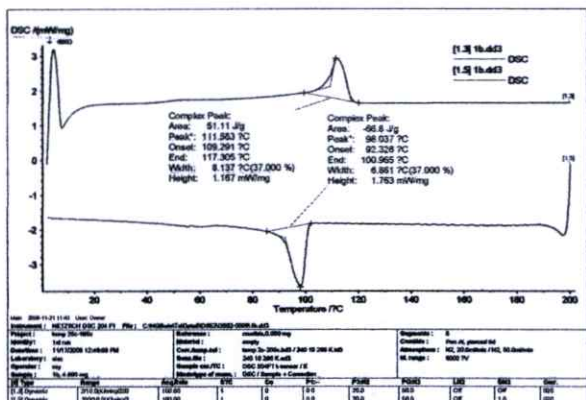


ง

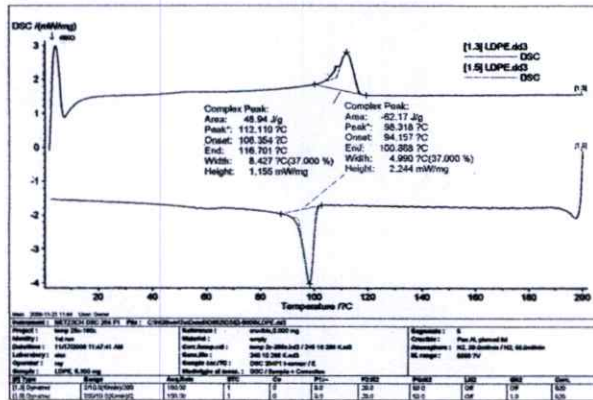
- รูปที่ ๑.18 กราฟ FTIR ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน
- ก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ข พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ค พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ง พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ภาคผนวก ฉ

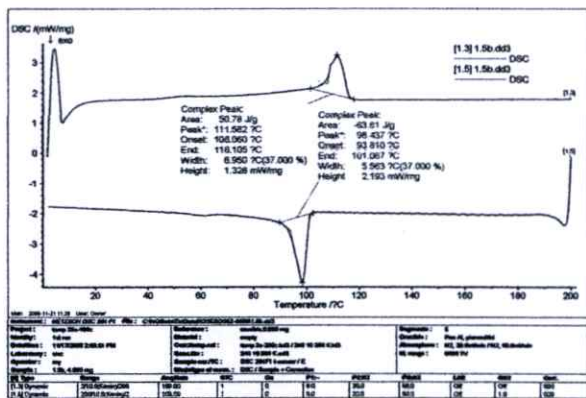
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆก่อนและหลังทำการทดลองในสภาวะต่างๆ



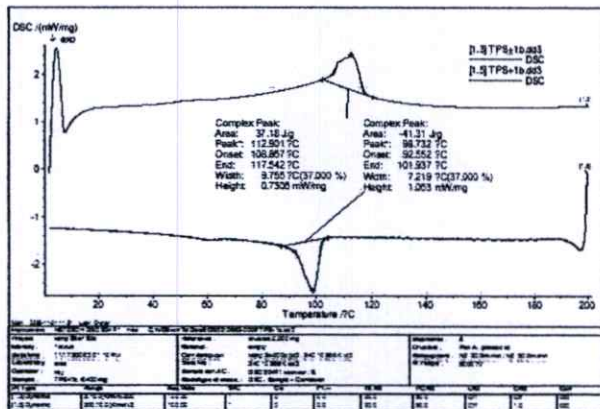
ก



ข



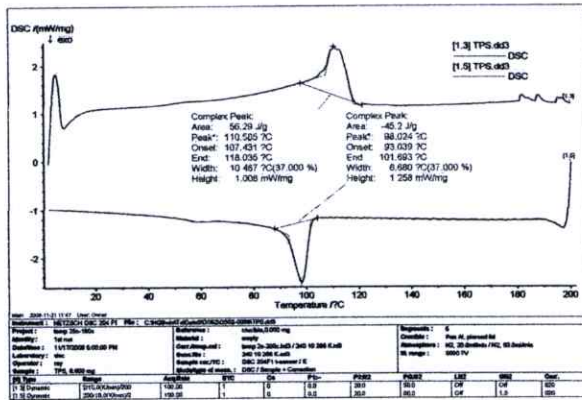
ค



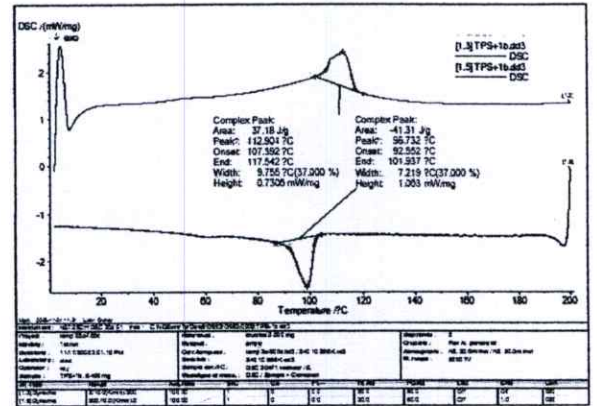
ง

รูปที่ ฉ.1 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน

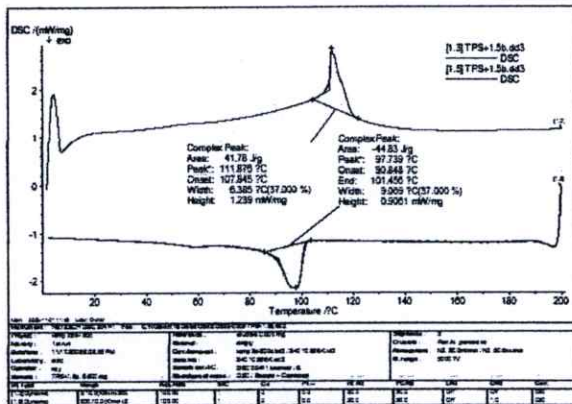
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



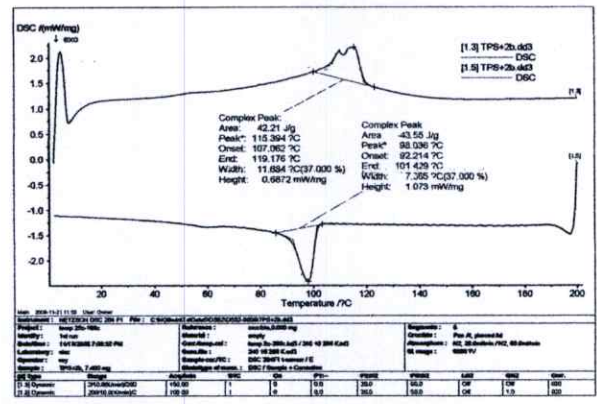
ก



ข



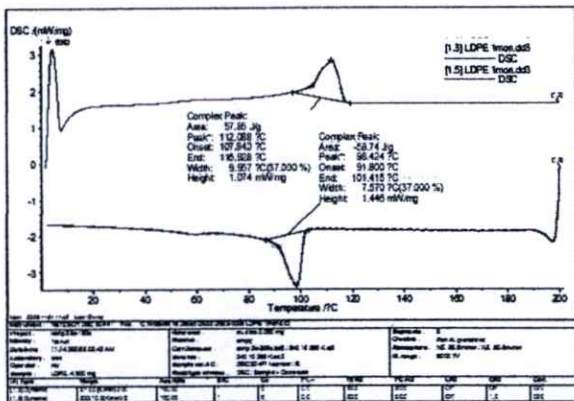
ค



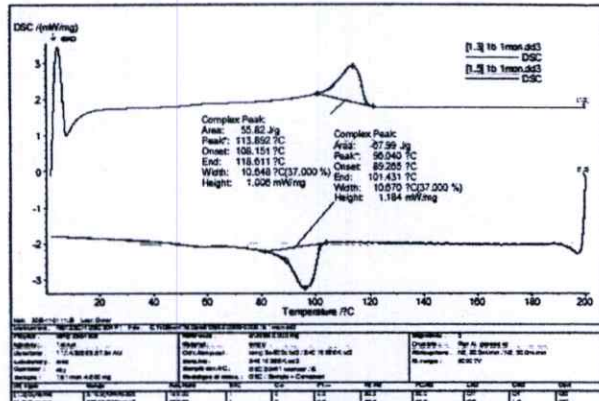
ง

รูปที่ ๒.2 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน

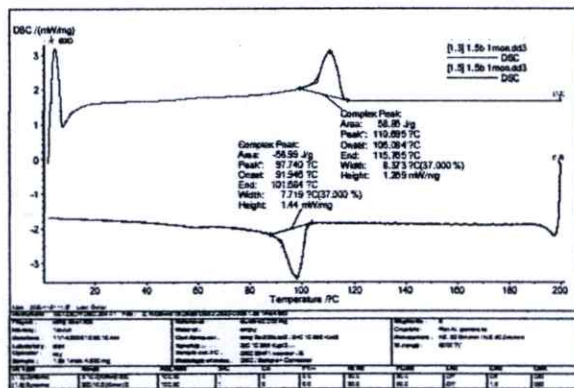
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



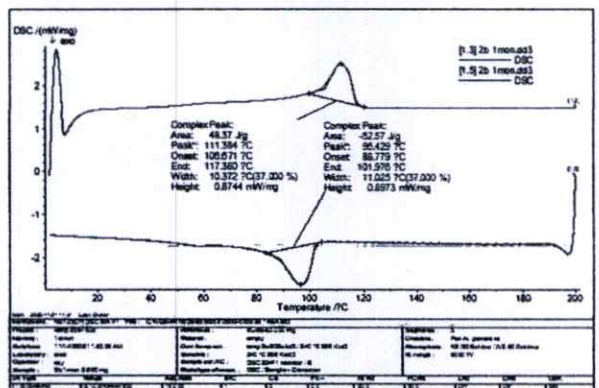
ก



ข



ค

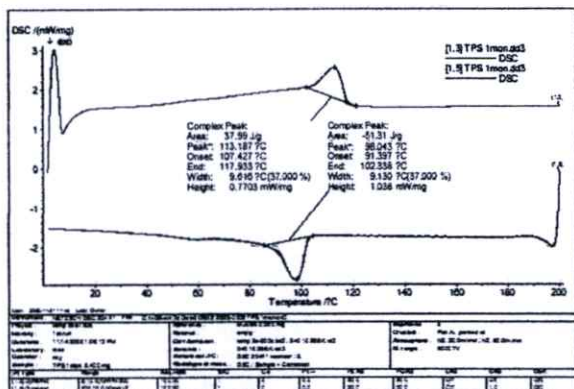


ง

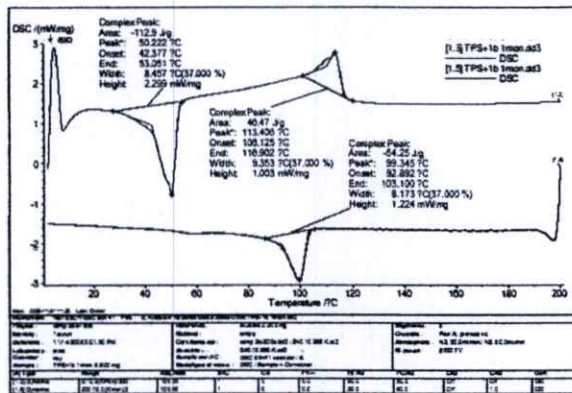
รูปที่ ๓.3 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน

หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน

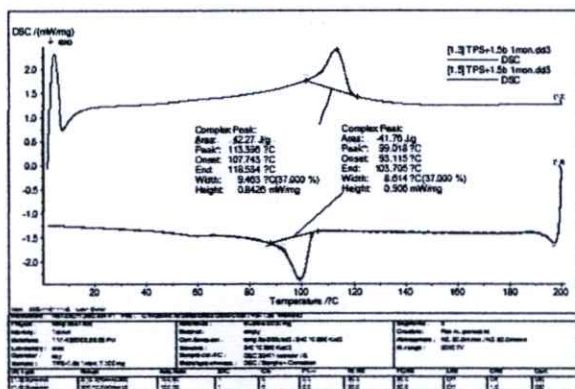
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



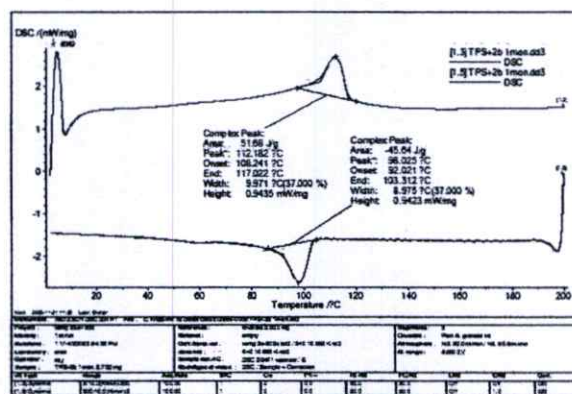
ก



ข



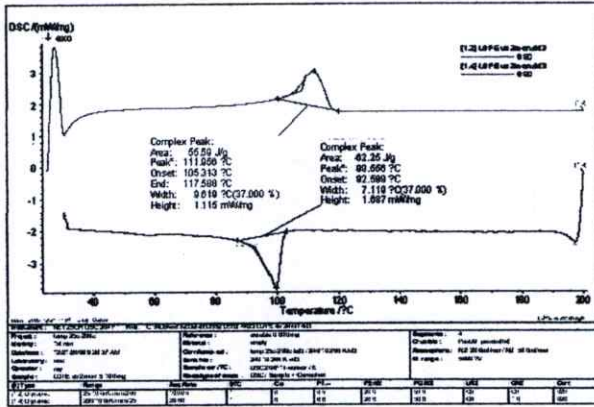
ค



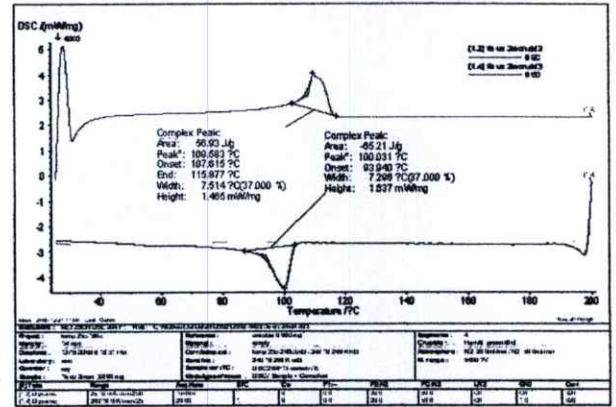
ง

รูปที่ ๓.4 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน

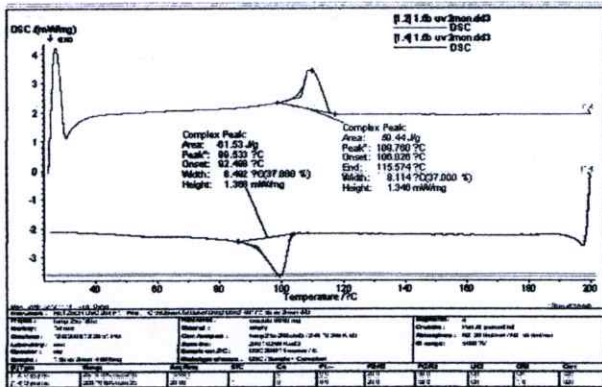
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



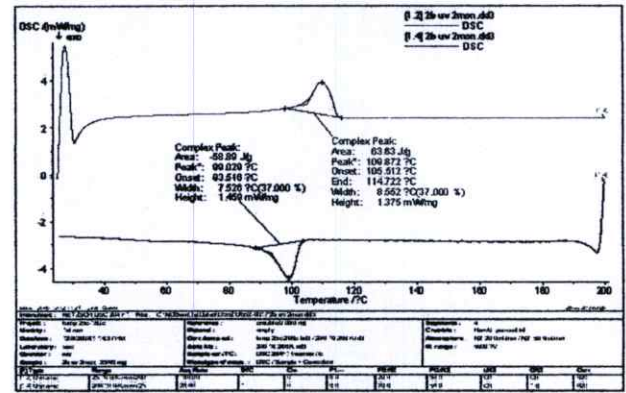
ก



ข



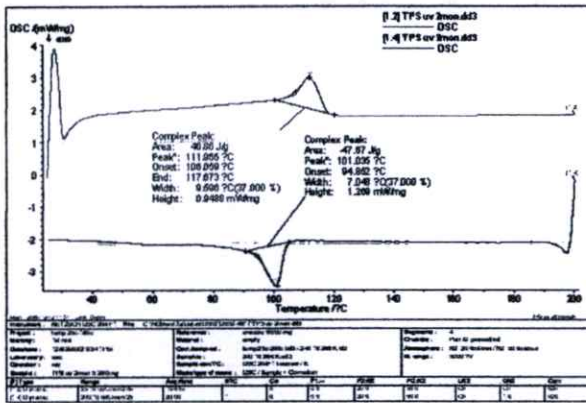
ค



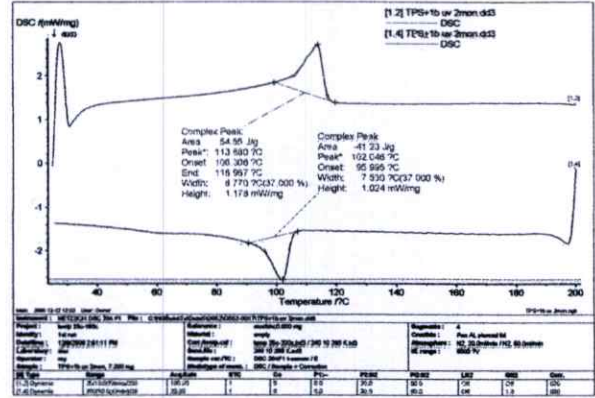
ง

รูปที่ ๓.5 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

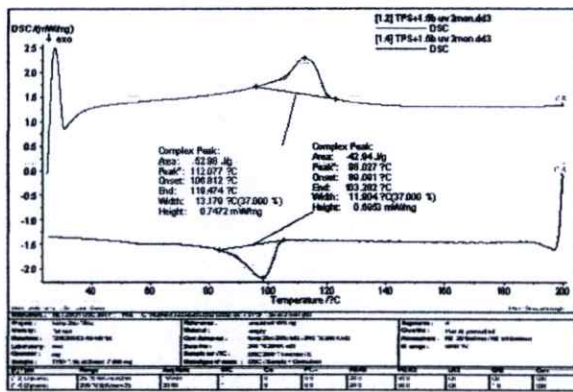
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



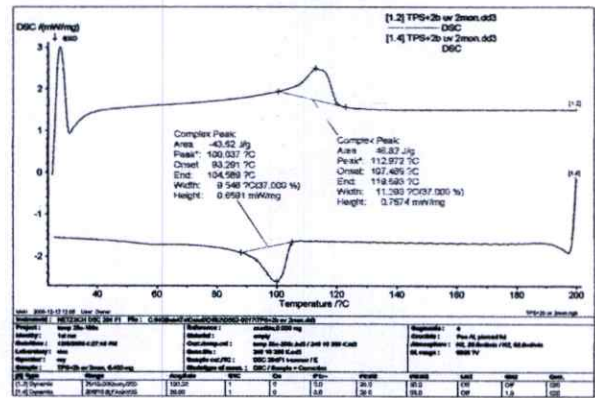
ก



ข



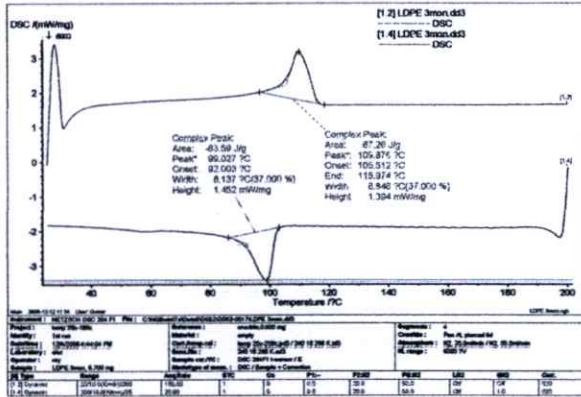
ค



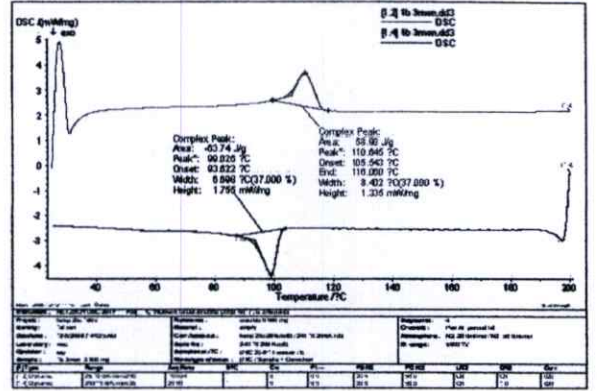
ง

รูปที่ ๓.6 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

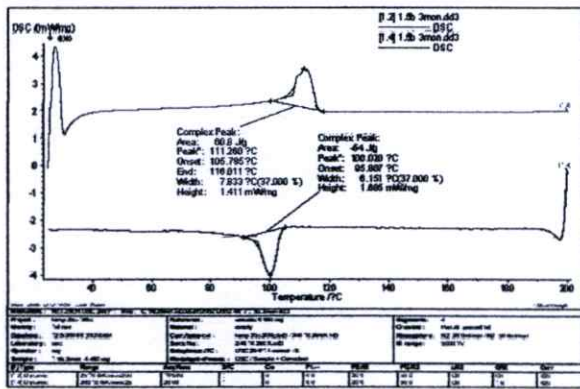
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



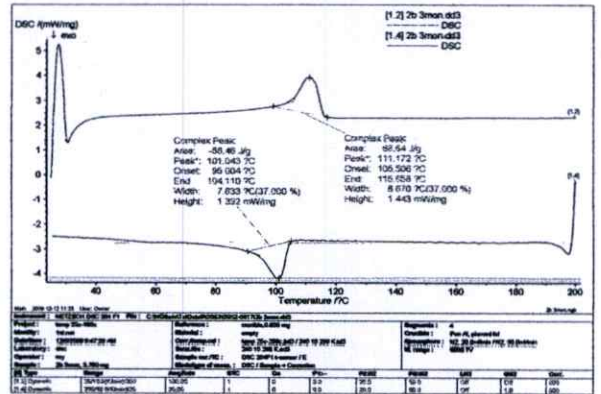
ก



ข

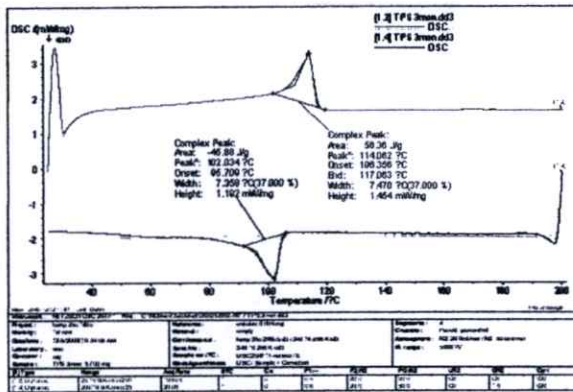


ค

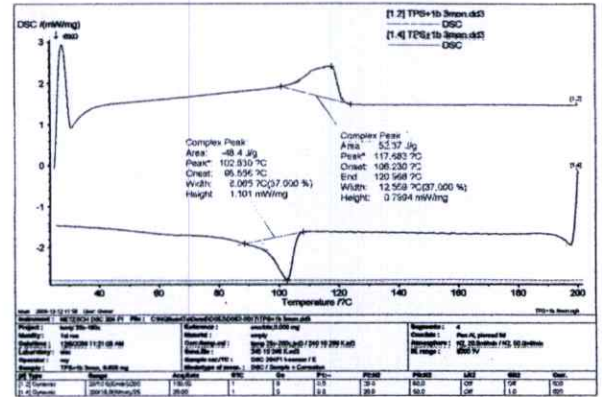


ง

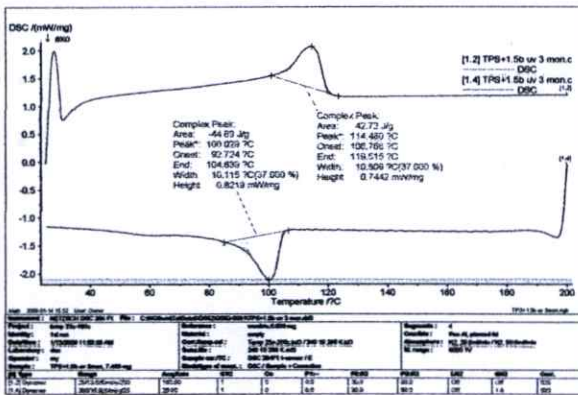
- รูปที่ ๗.7 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน
 หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



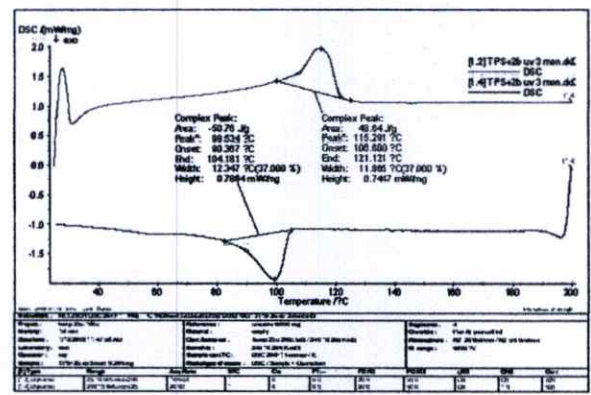
ก



ข



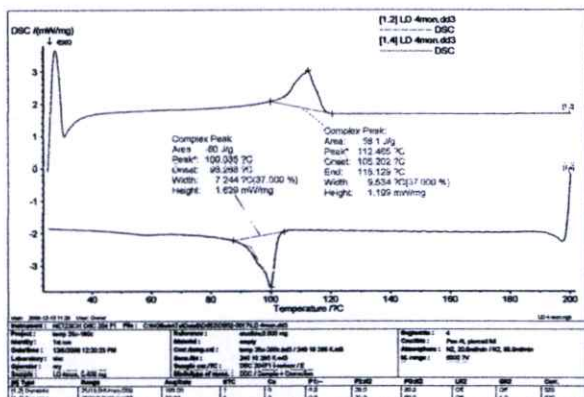
ค



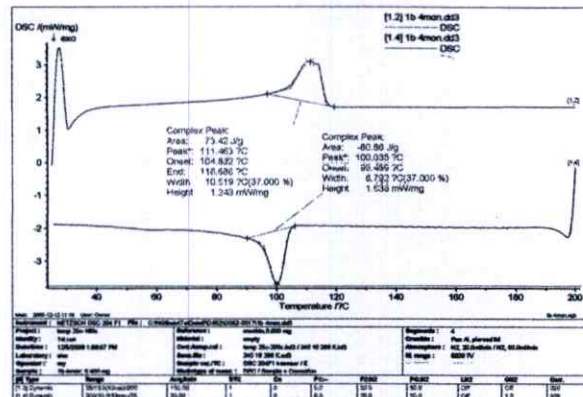
ง

รูปที่ 8.8 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน

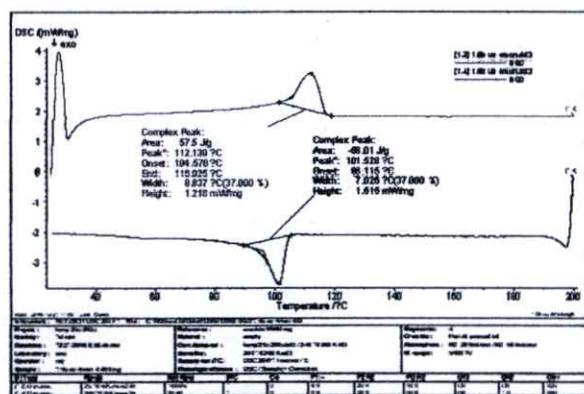
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



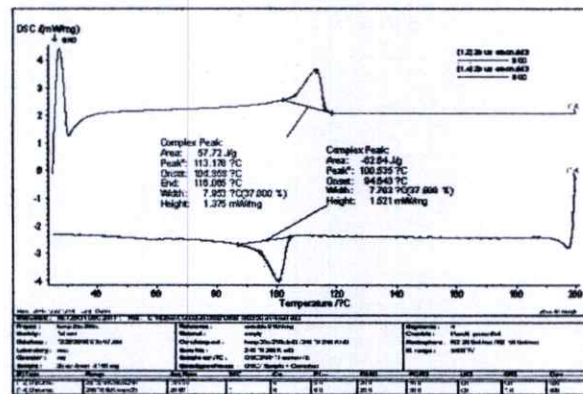
ก



ข



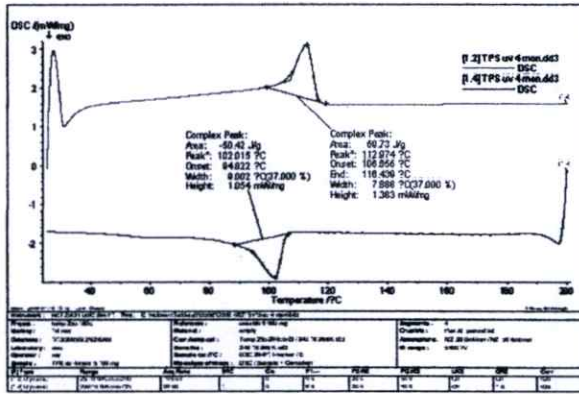
ค



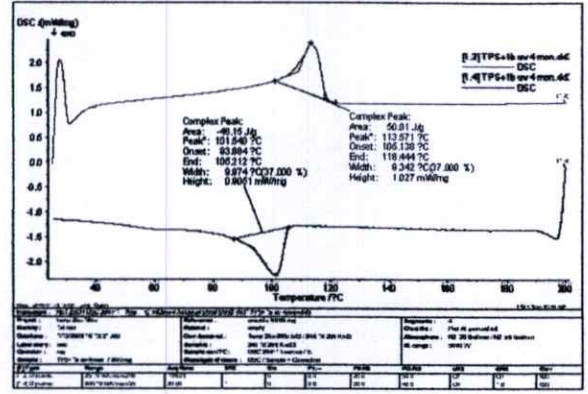
ง

รูปที่ 9 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

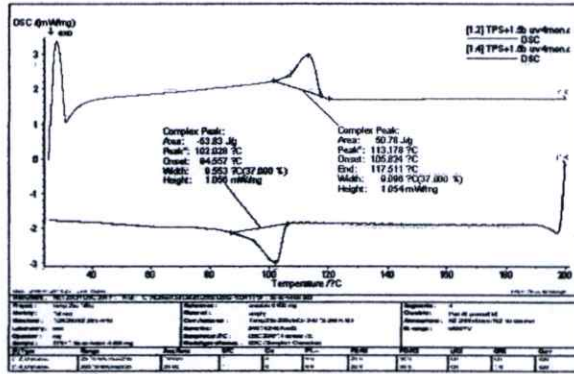
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



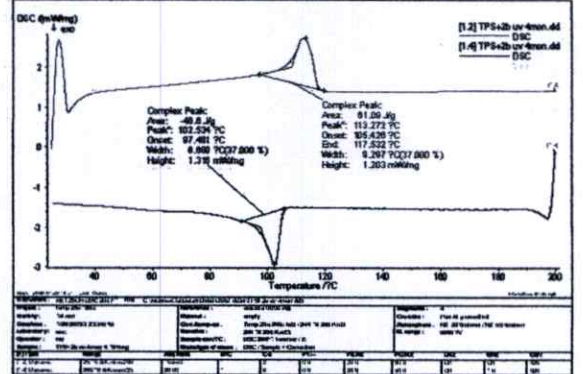
ก



ข



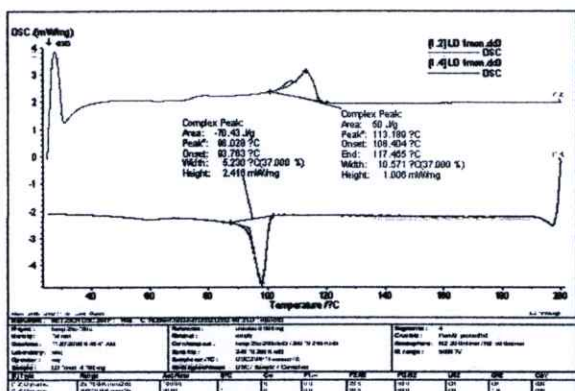
ค



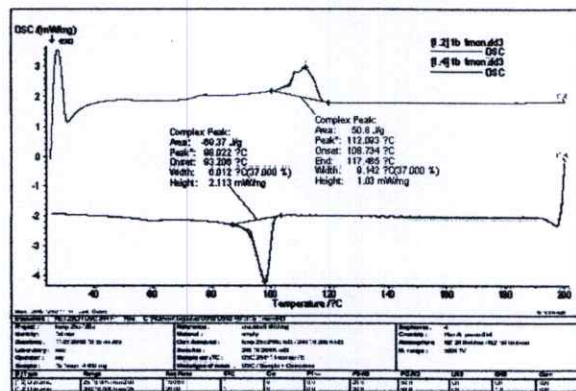
ง

รูปที่ ๑.10 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

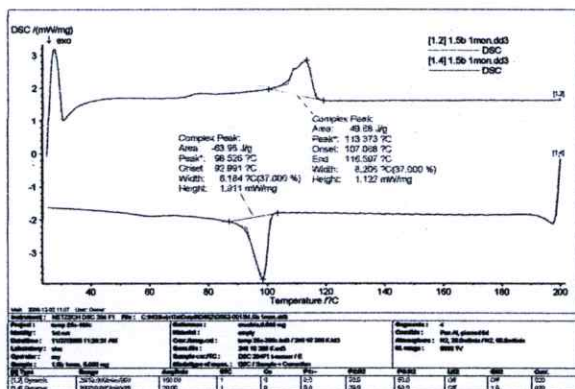
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



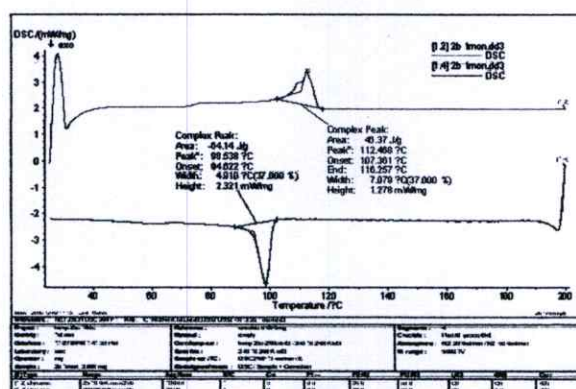
ก



ข



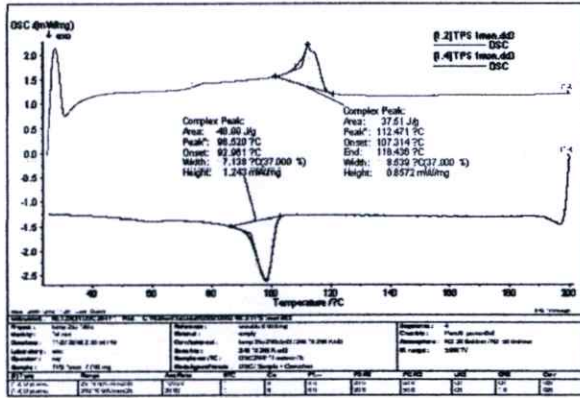
ค



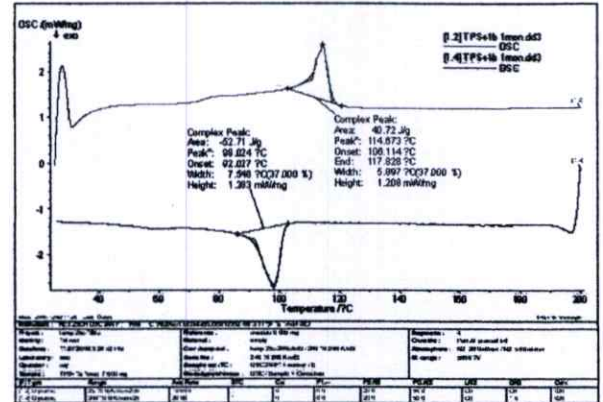
ง

รูปที่ ๑.11 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน

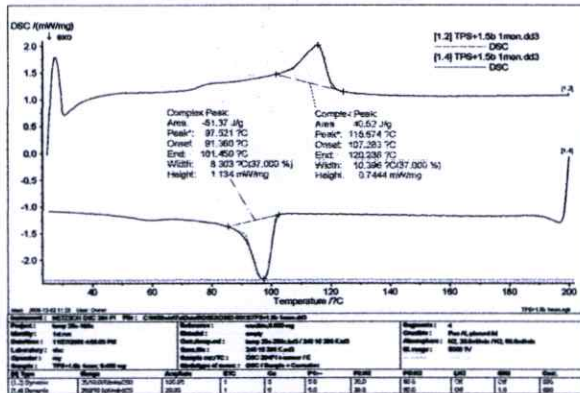
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



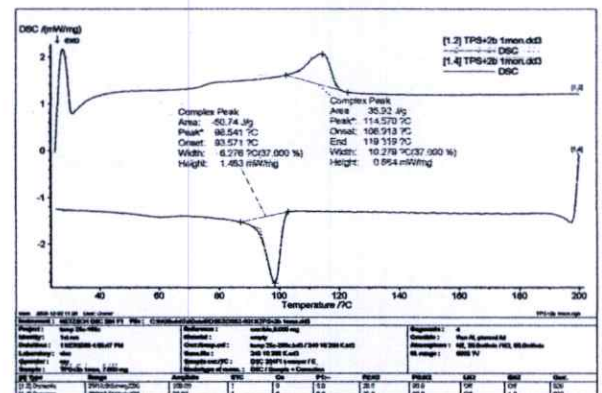
ก



ข



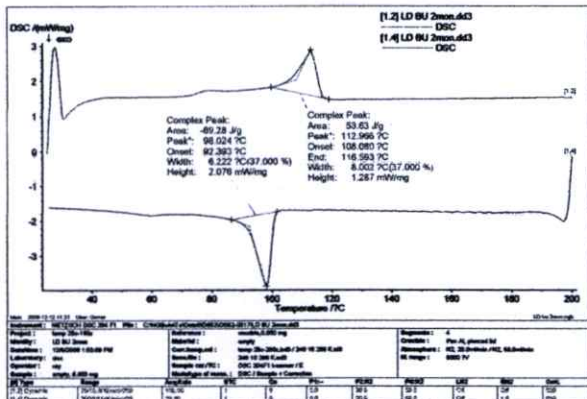
ค



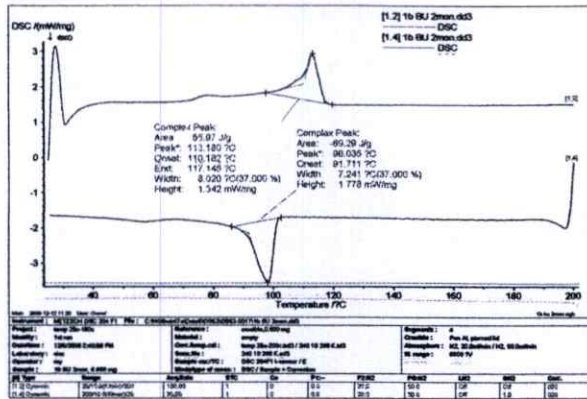
ง

รูปที่ ๑.12 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน

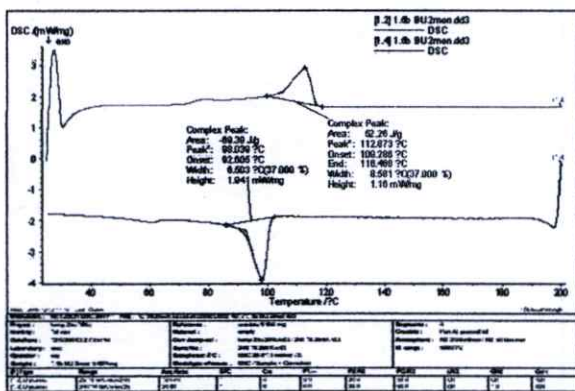
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 15 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



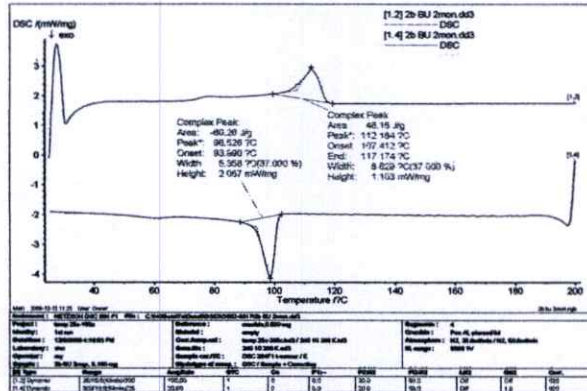
ก



ข



ค

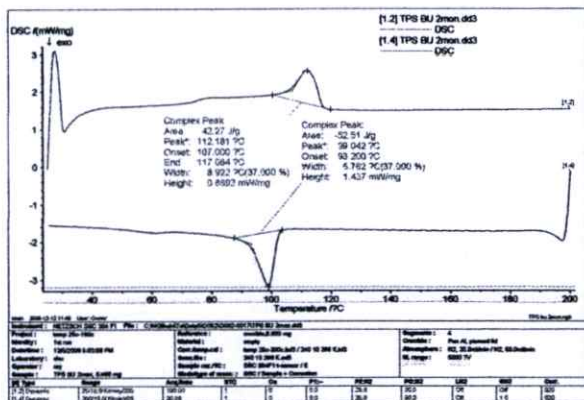


ง

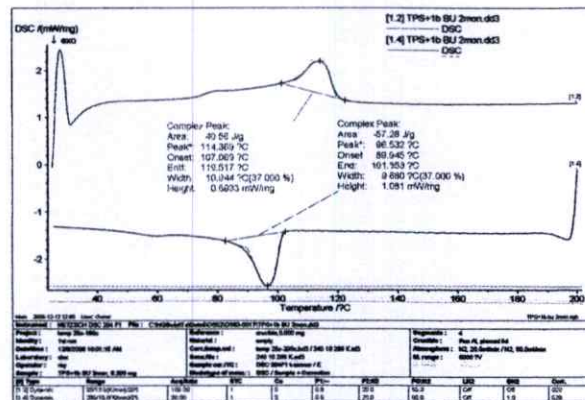
รูปที่ 13 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน

โนน หลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน

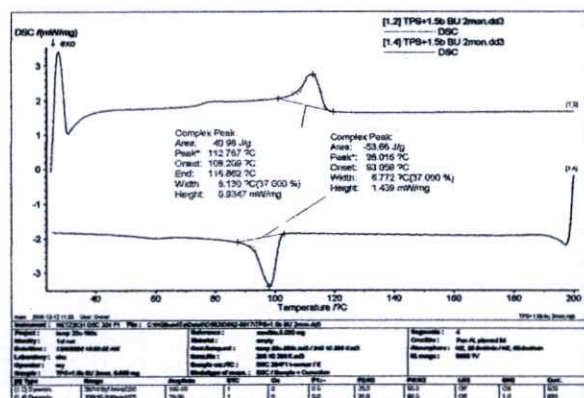
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



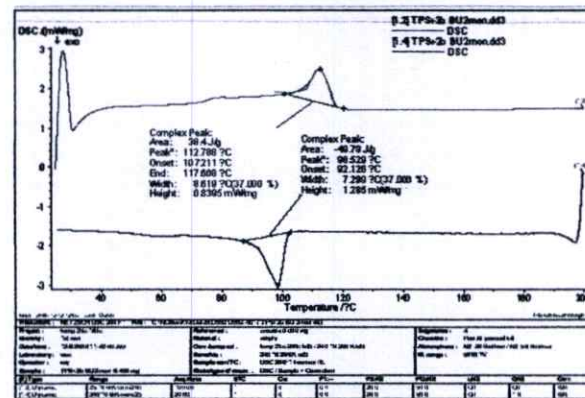
ก



ข



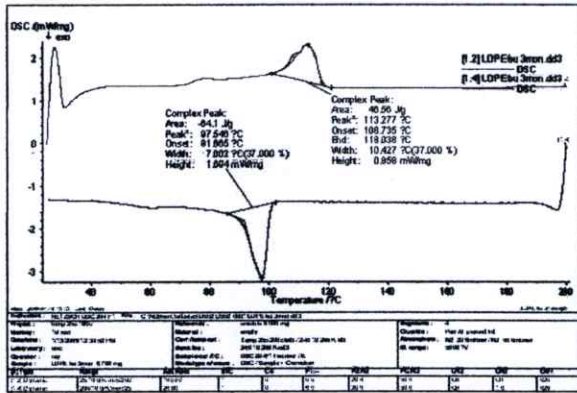
ค



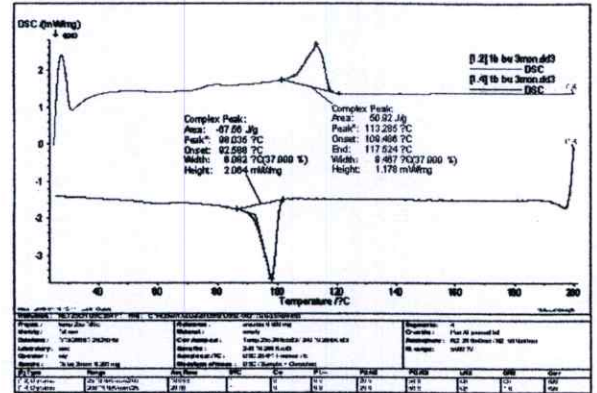
ง

รูปที่ ๑.14 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวหลักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน

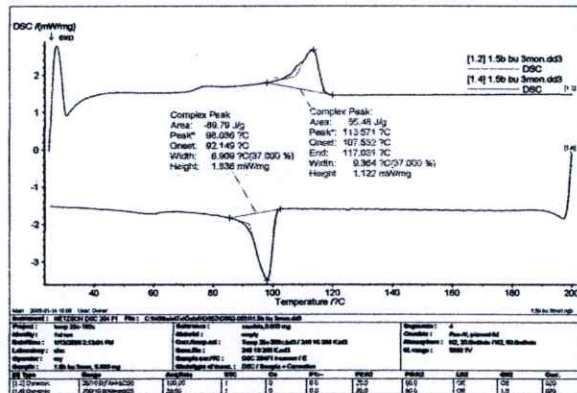
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



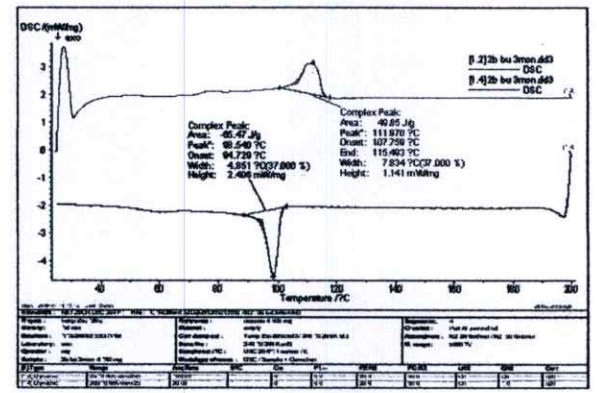
ก



ข



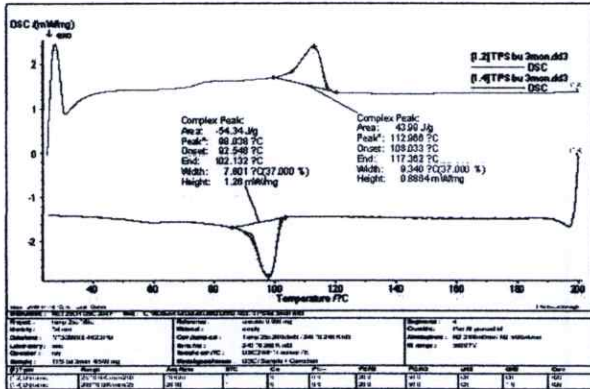
ค



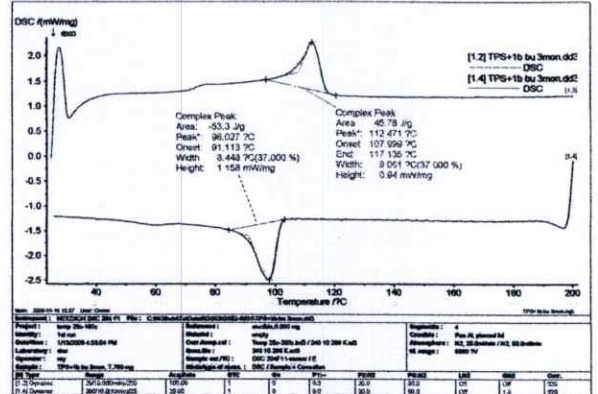
ง

รูปที่ ๑.15 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังคืนเป็นเวลา 3 เดือน

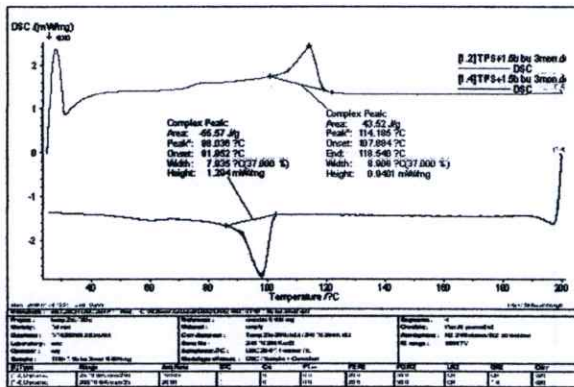
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



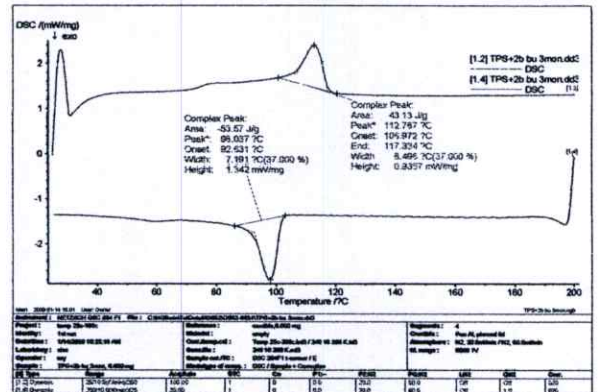
ก



ข



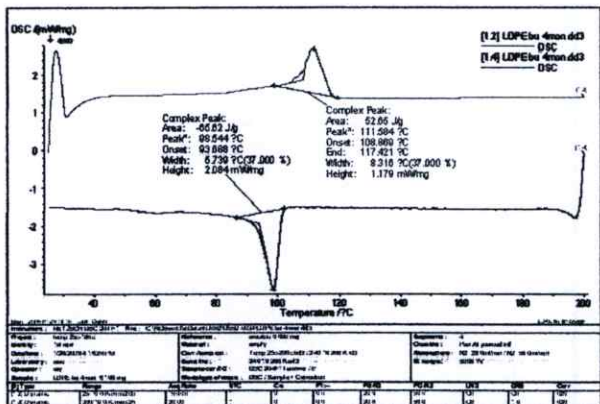
ค



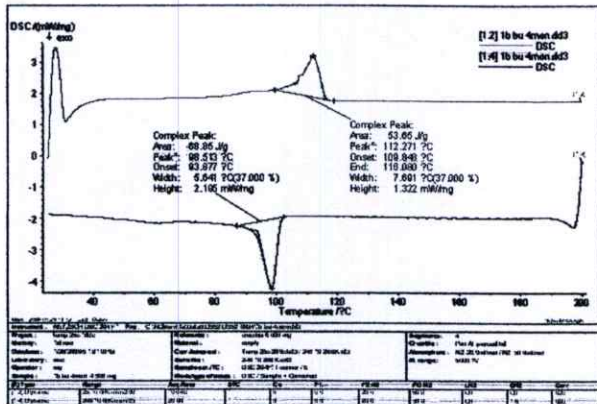
ง

รูปที่ ๑.16 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน หลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน

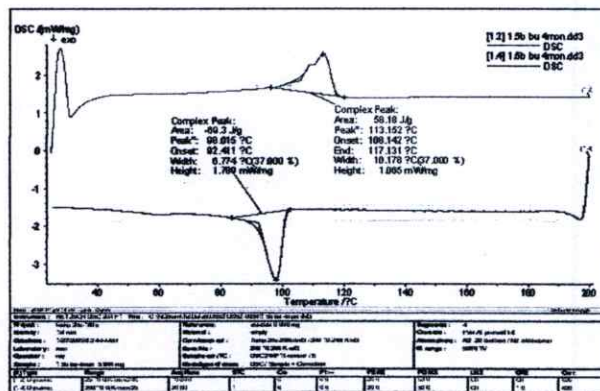
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



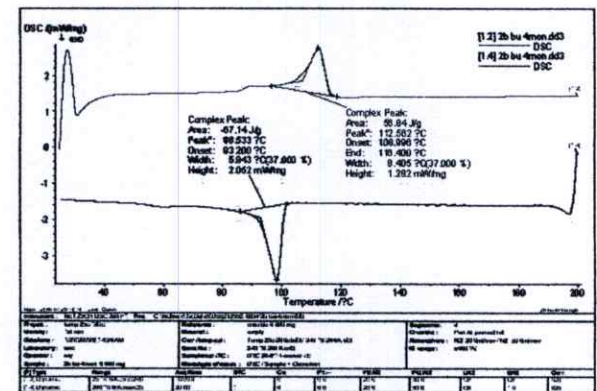
ก



ข



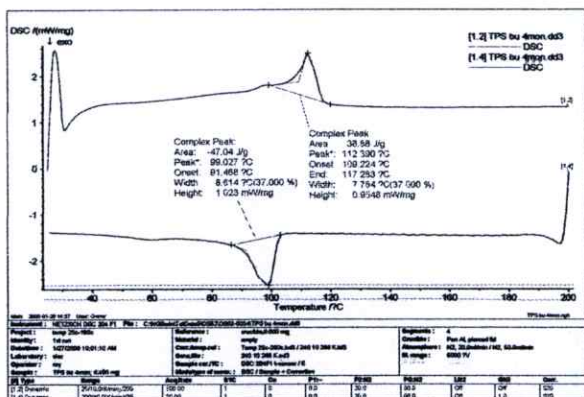
ค



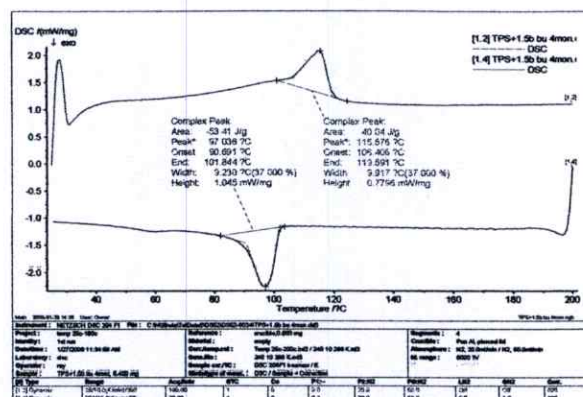
ง

รูปที่ ๑.17 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน

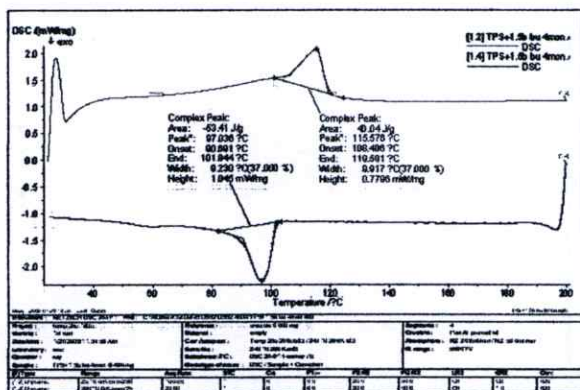
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



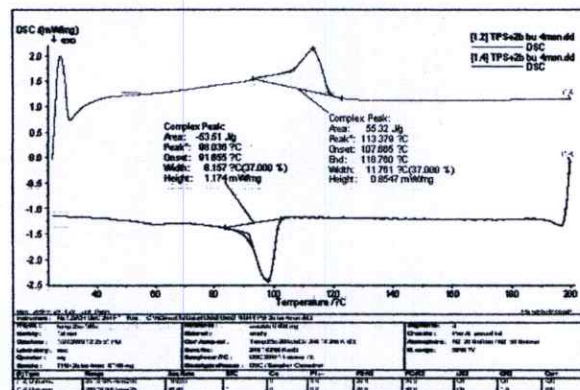
ก



ข



ค



ง

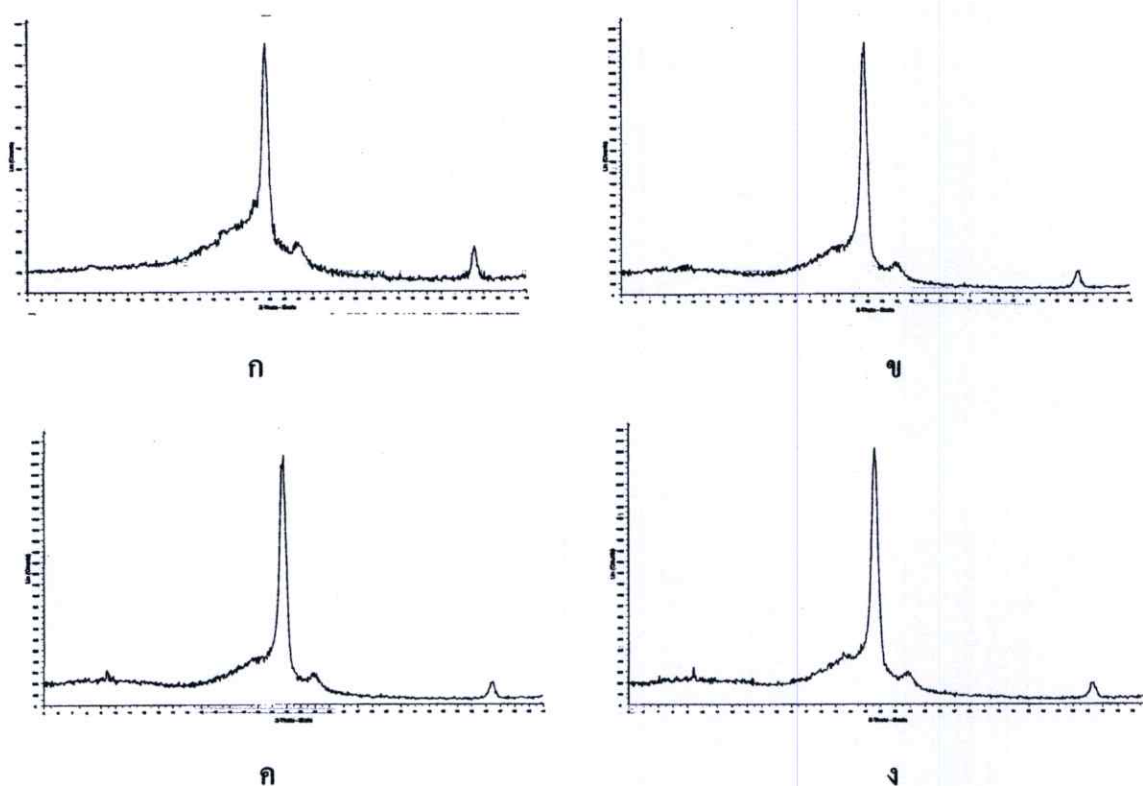
รูปที่ จ.18 แสดงค่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน หลังฝังคืนเป็นเวลา 4 เดือน

- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ภาคผนวก ข

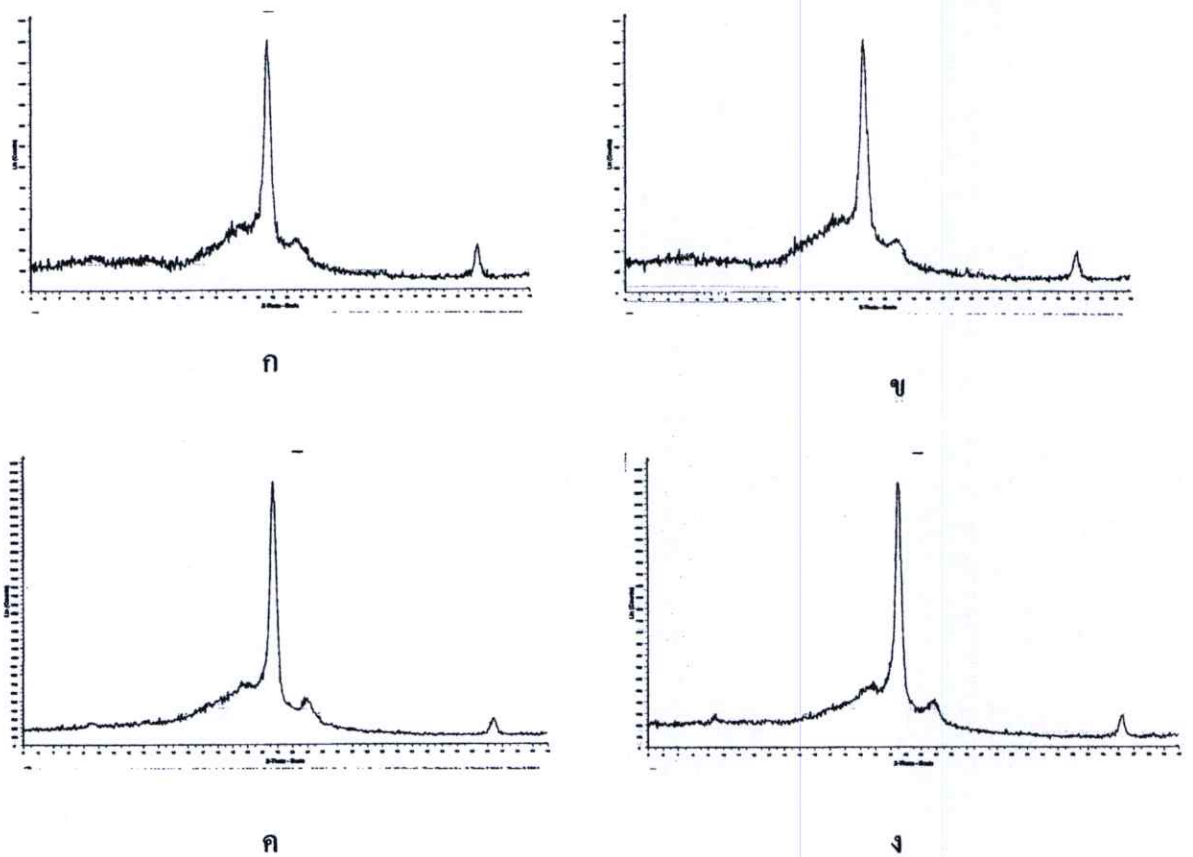
ไคอะแกรม X-ray ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ก่อนทำการทดลองและหลังการ

ทดลอง



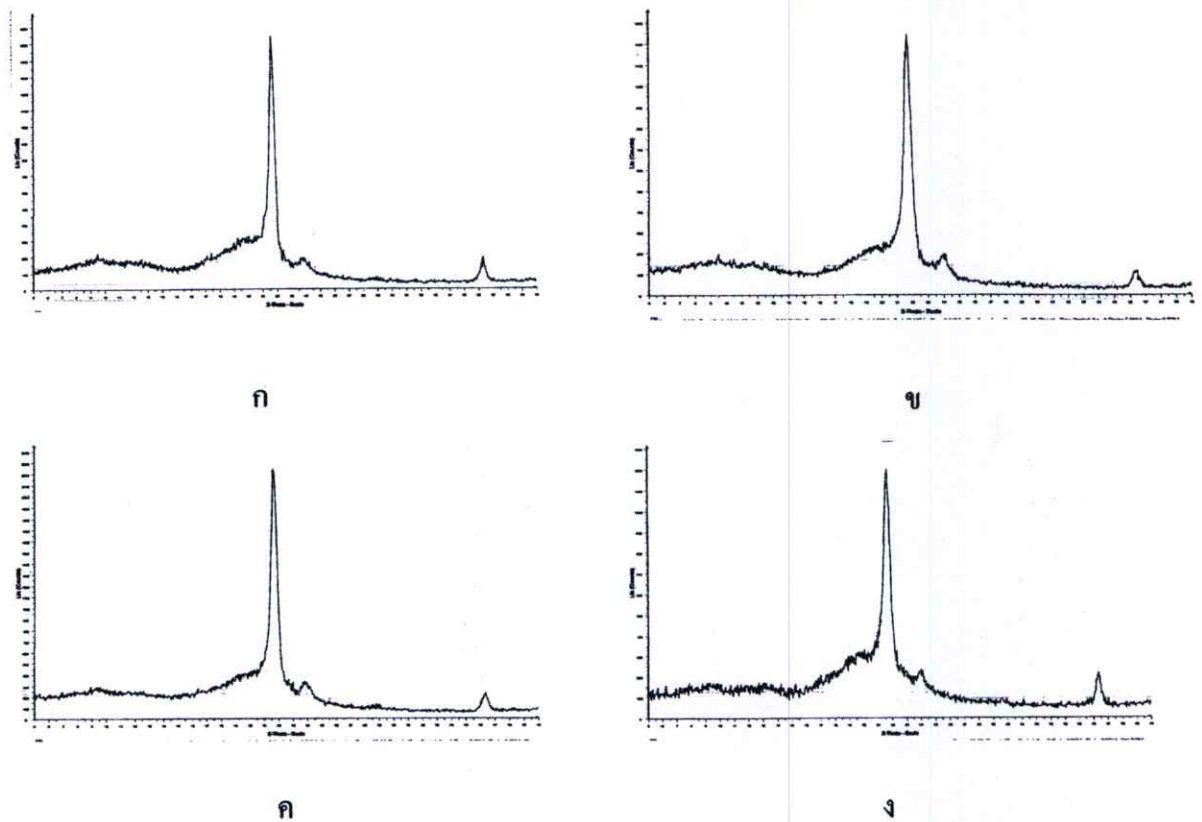
รูปที่ ข.1 ไคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนน

- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



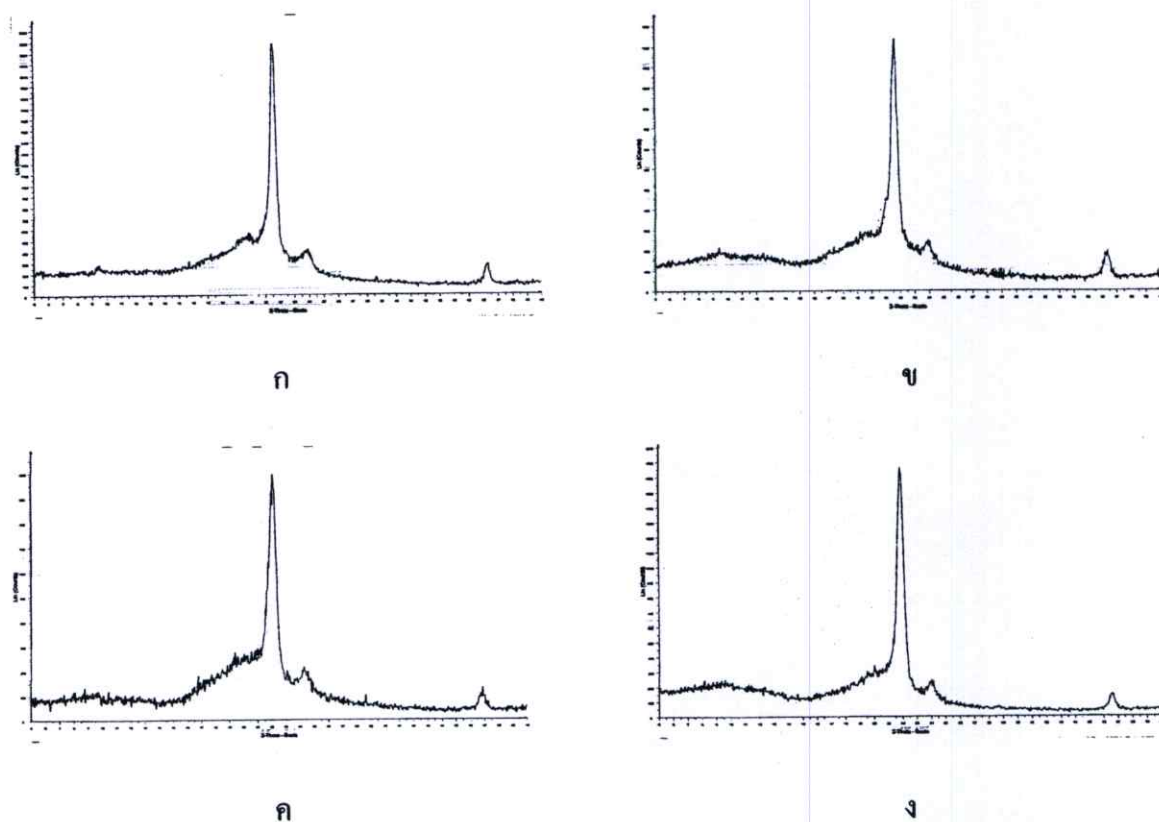
รูปที่ ข.2 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนน

- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



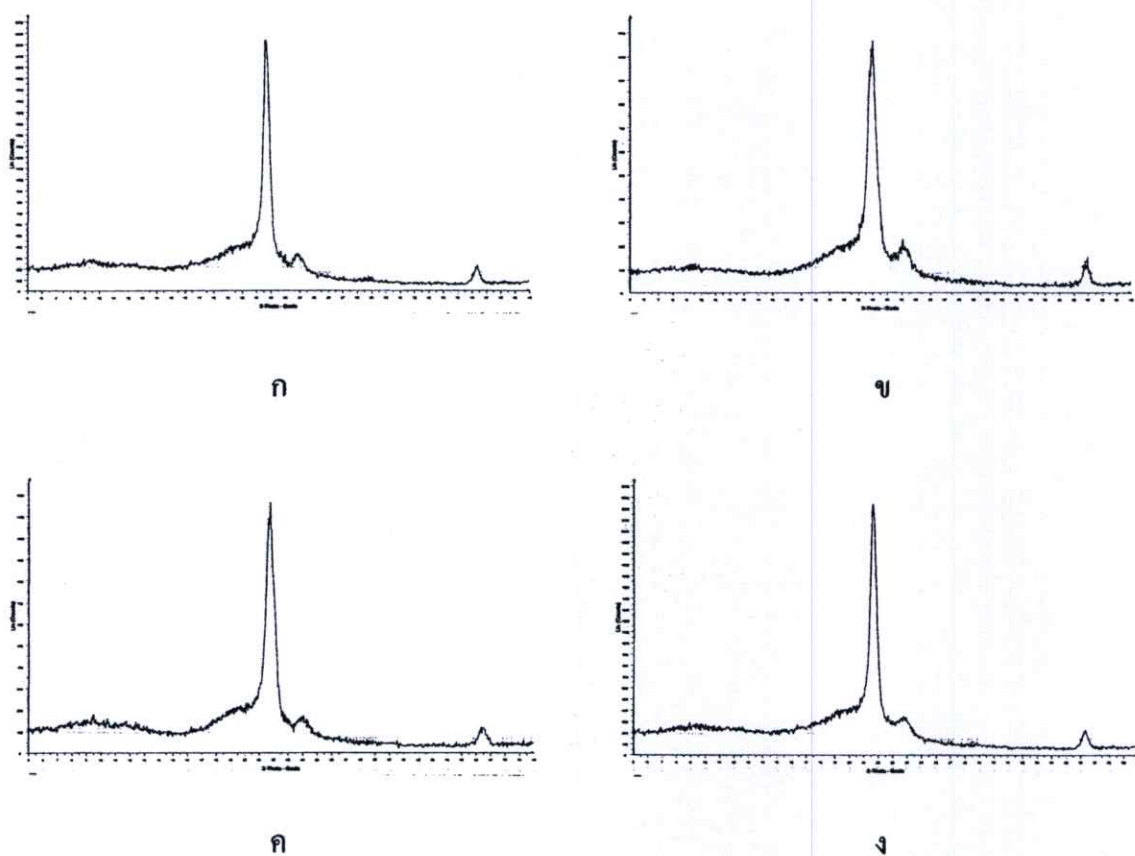
รูปที่ ๓.3 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 1 เดือน

- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ๔.4 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และ เบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1 เดือน

- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และ เบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



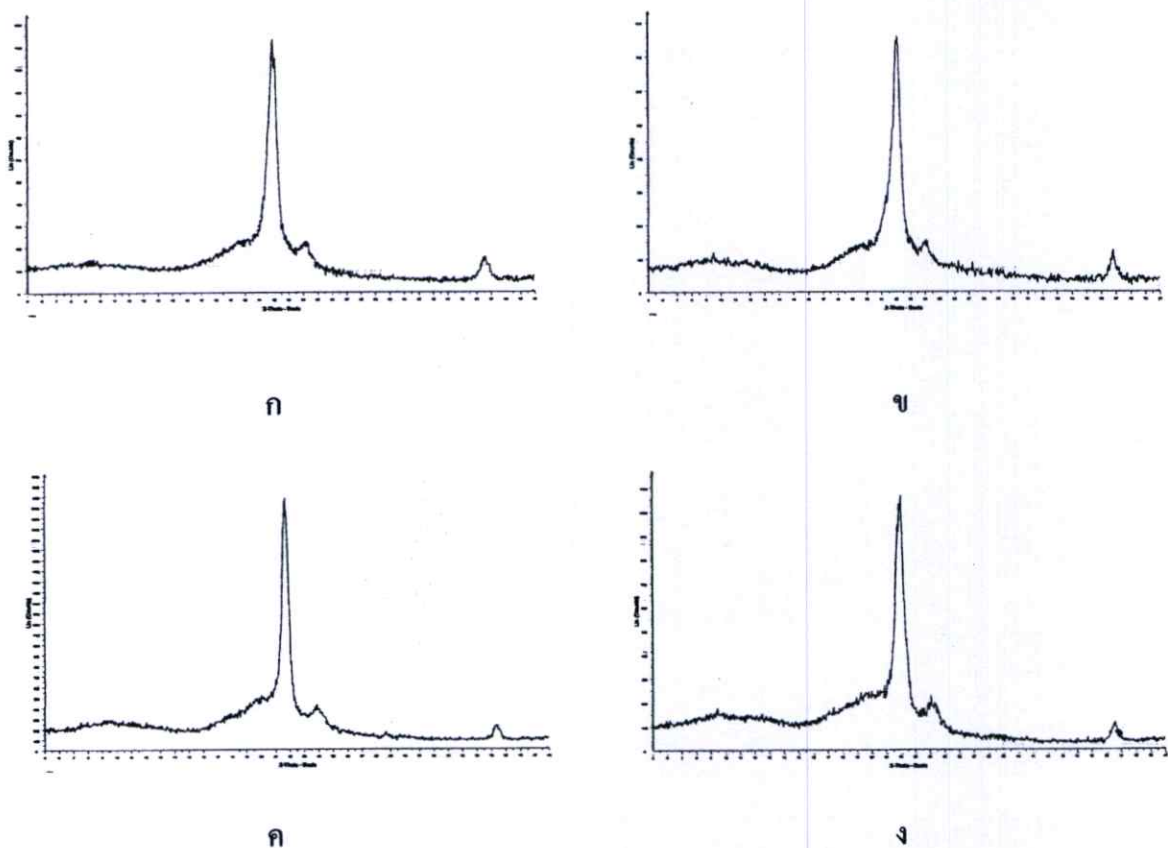
รูปที่ ๕.5 ไดอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังจากแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

ก. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ข. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

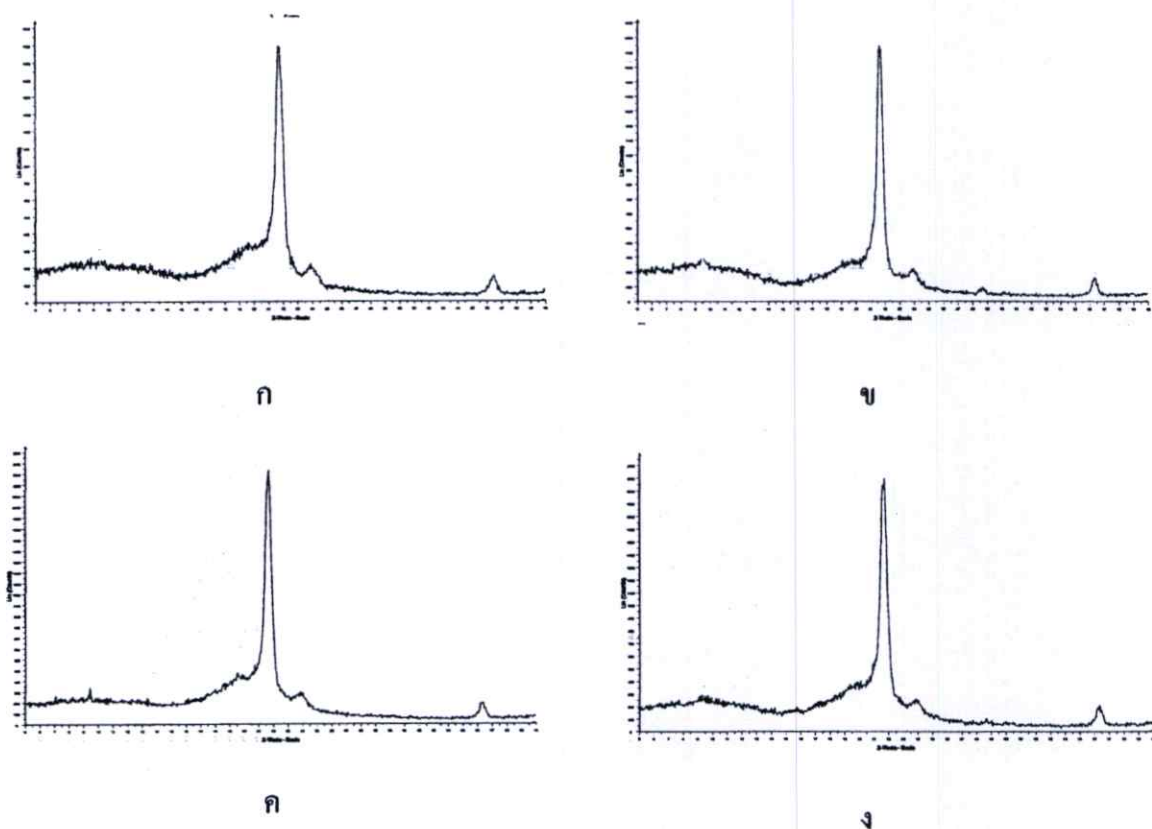
ค. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ง. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



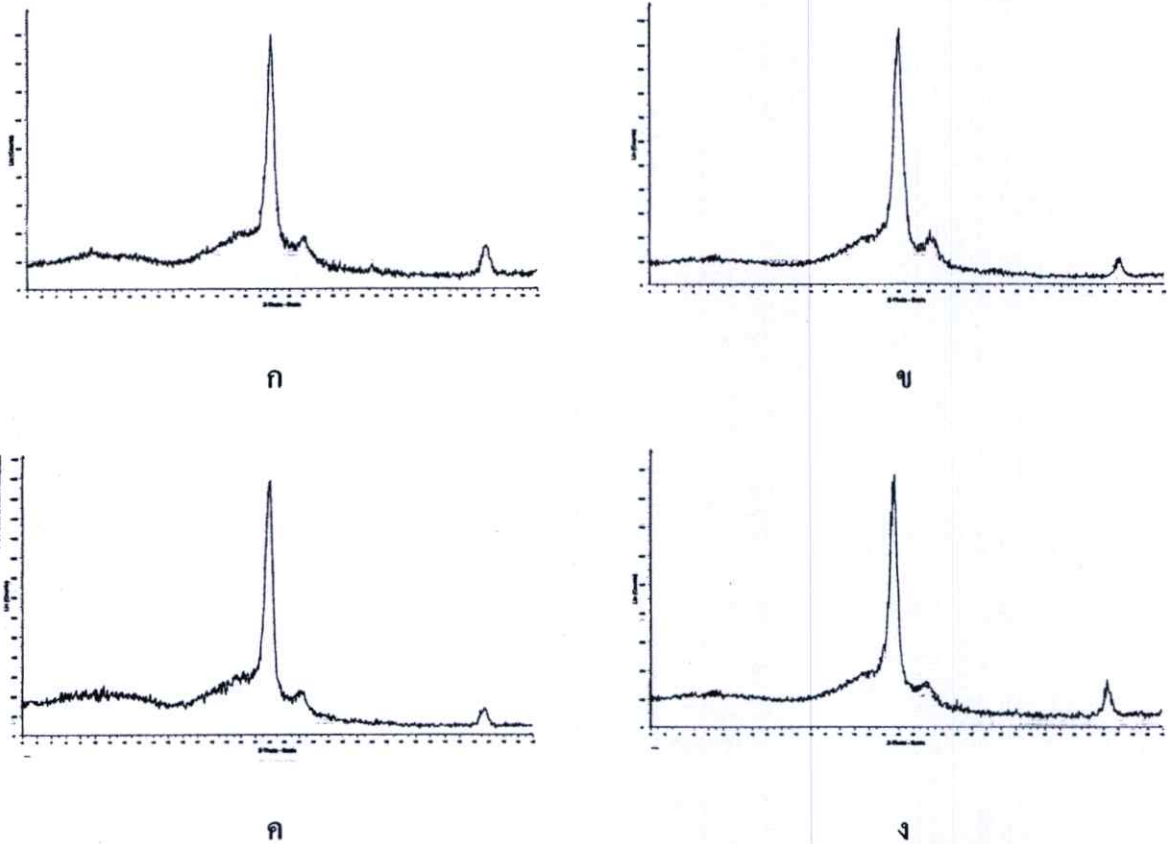
รูปที่ ๕.6 โคแองแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

- ก พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ข.7 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี เป็นเวลา 3 เดือน

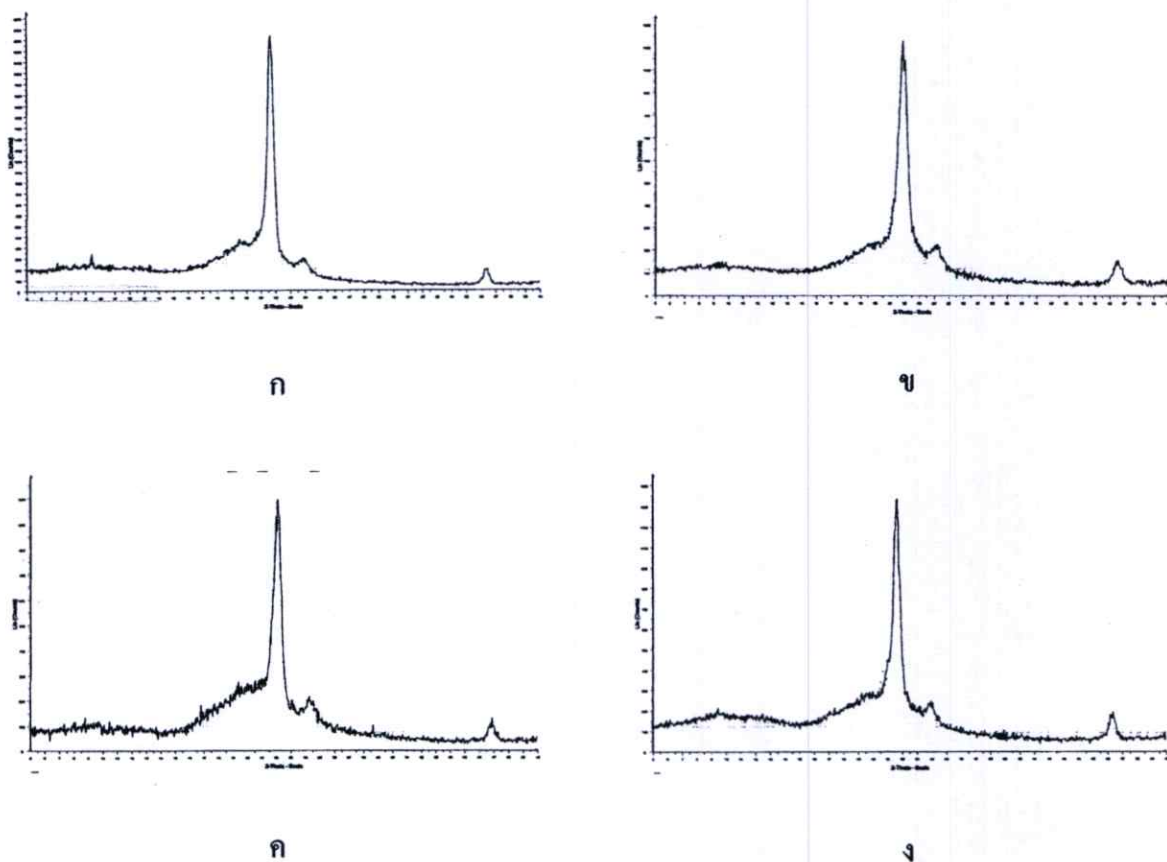
- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ๘.8 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบน

โซฟีนอนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 3 เดือน

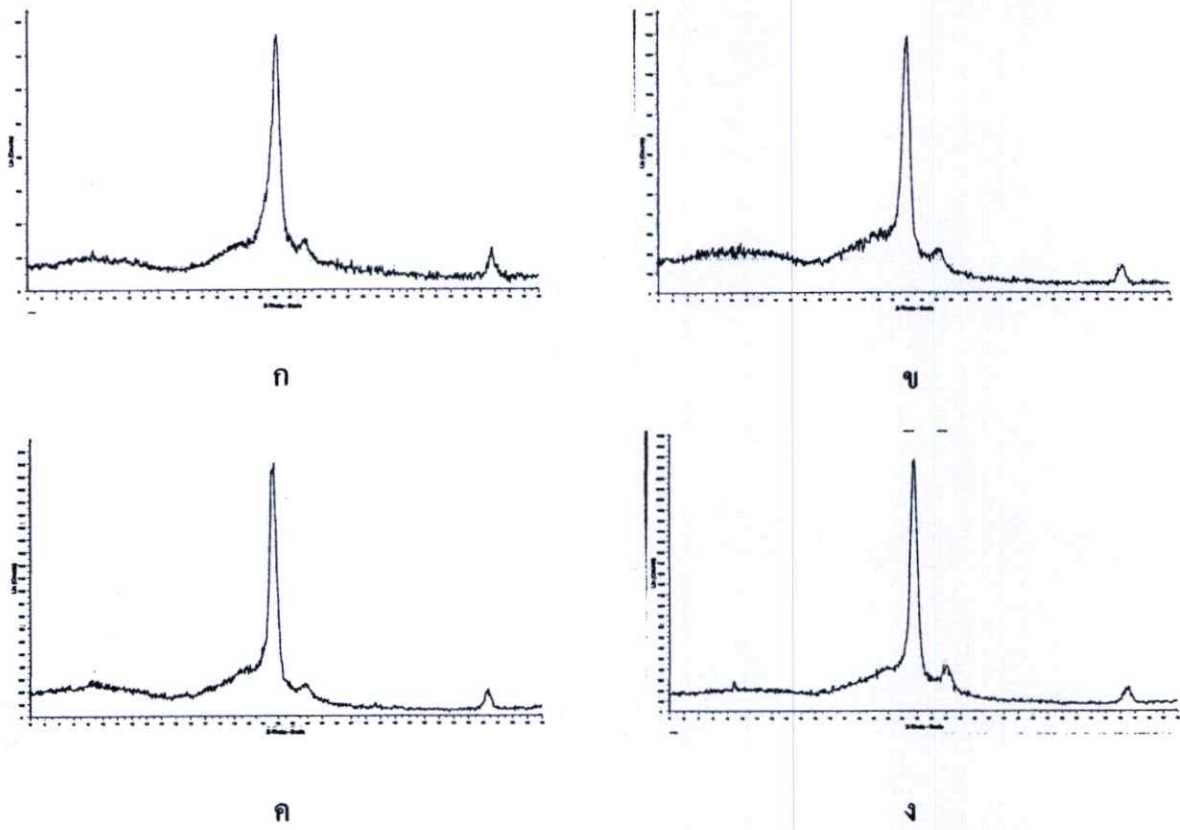
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ๙.๑ โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวี

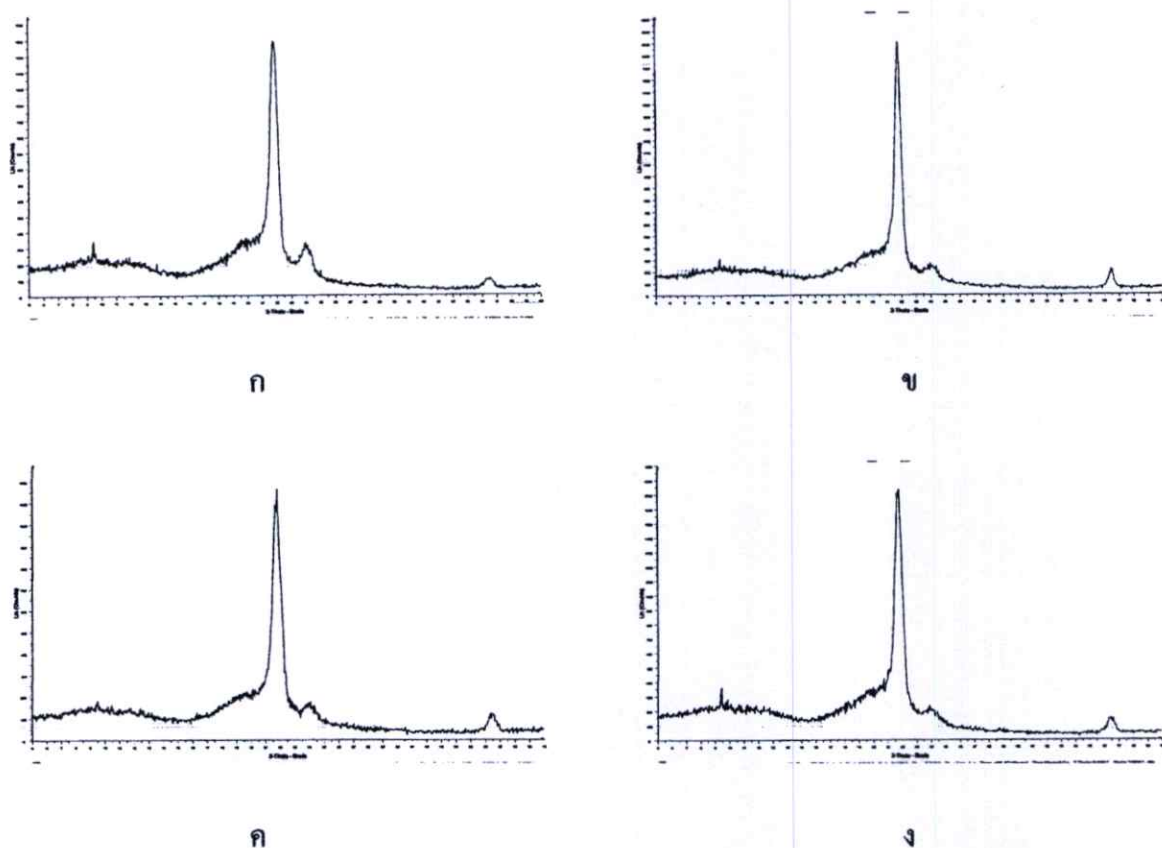
เป็นเวลา 4 เดือน

- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



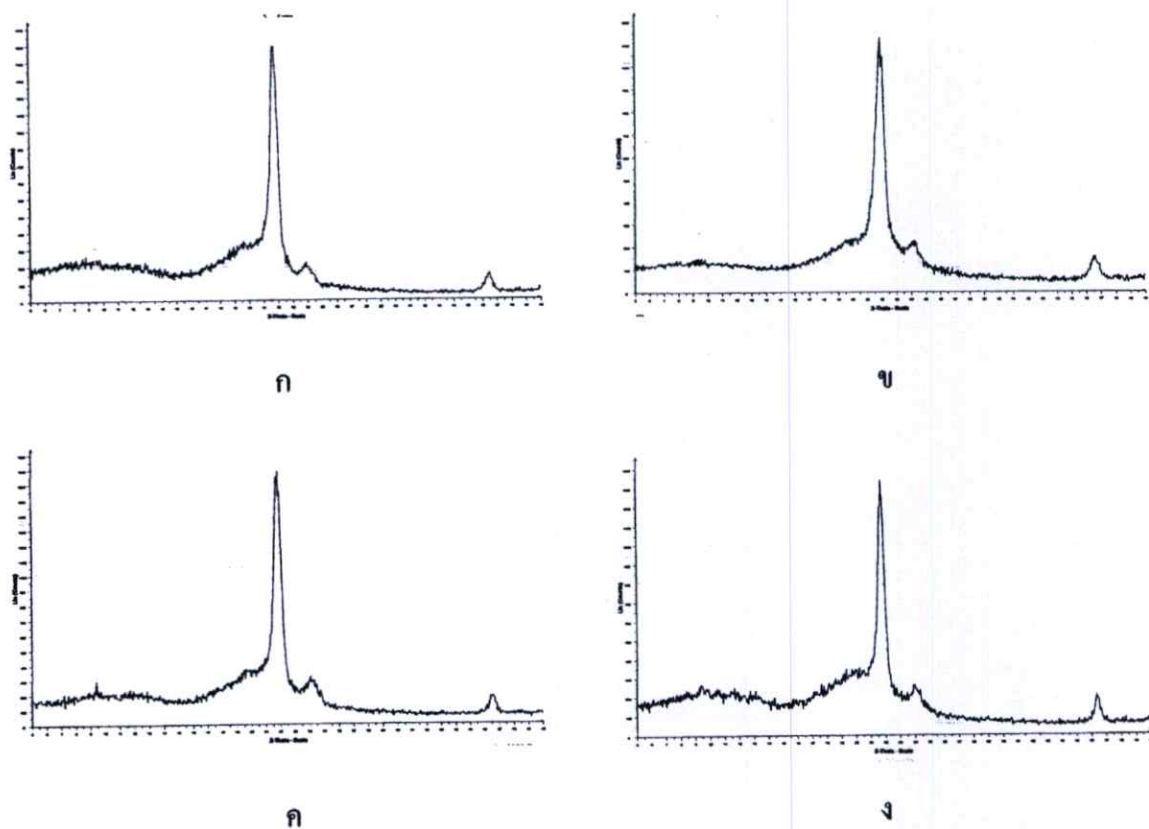
รูปที่ ข.10 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฉายแสงยูวีเป็นเวลา 4 เดือน

- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

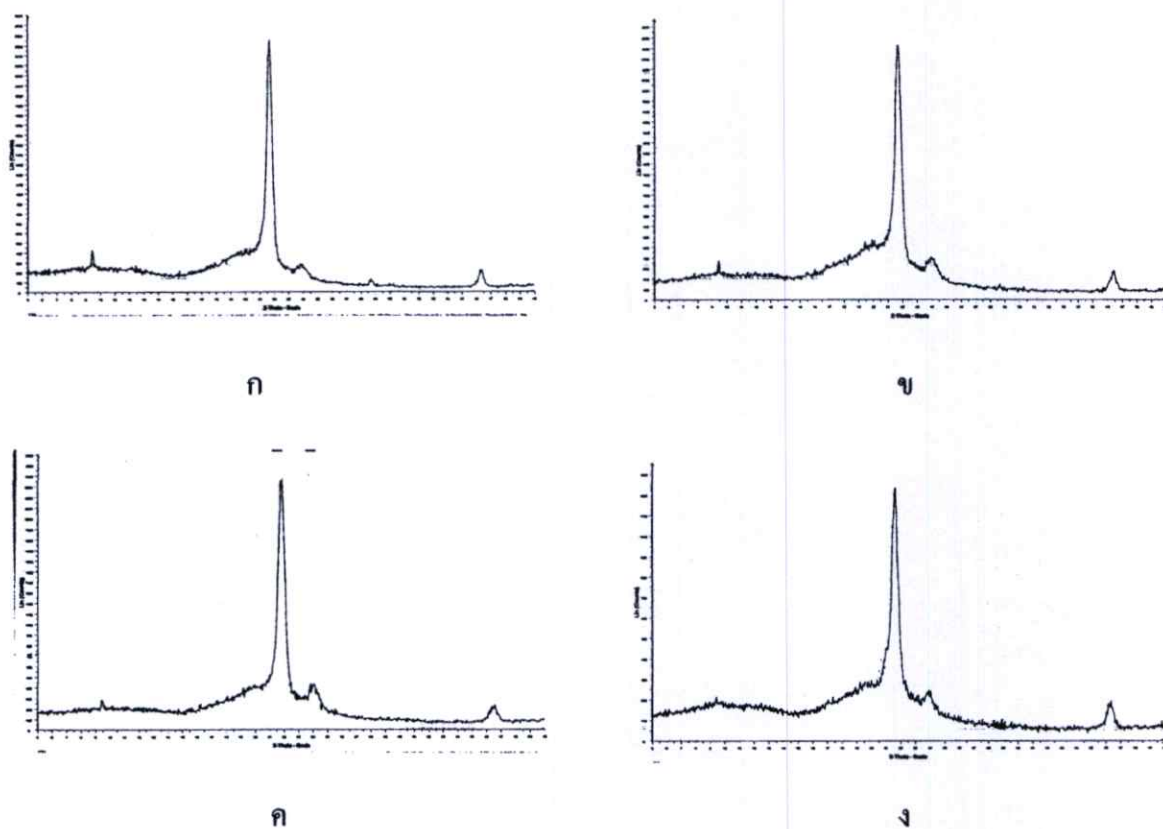


รูปที่ ข.11 ไดอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 1 เดือน

- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

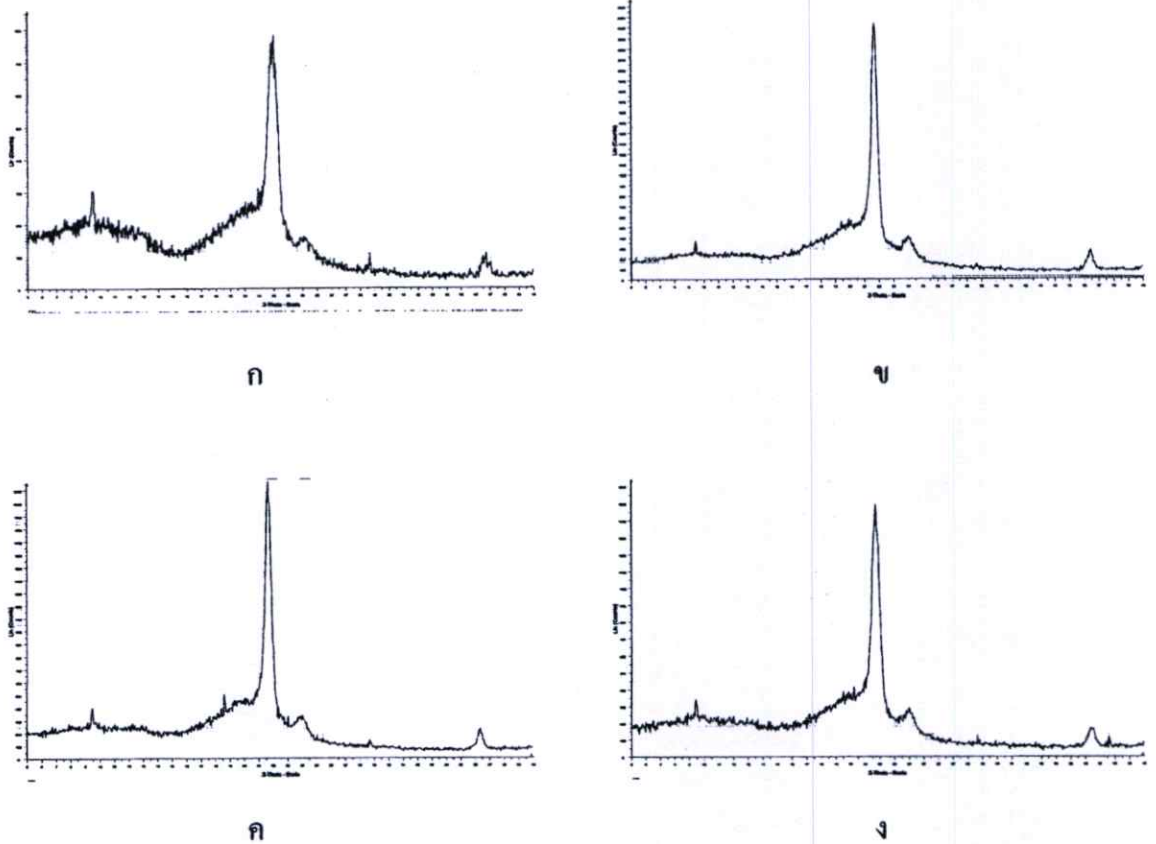


- รูปที่ ๑๒.12 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังคืนเป็นเวลา 1 เดือน
- ก. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ข. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ค. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
 - ง. พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



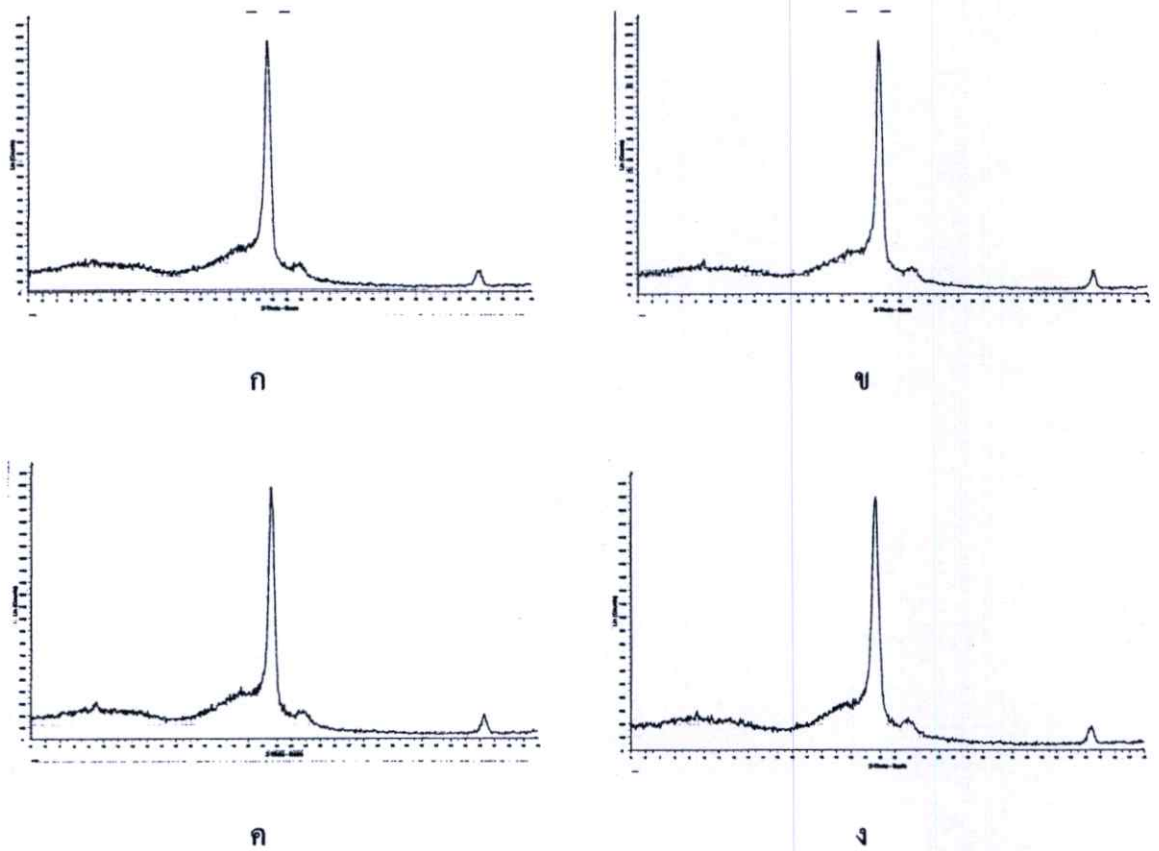
รูปที่ ข.13 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน

- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ข.14 ไคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 2 เดือน

- ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



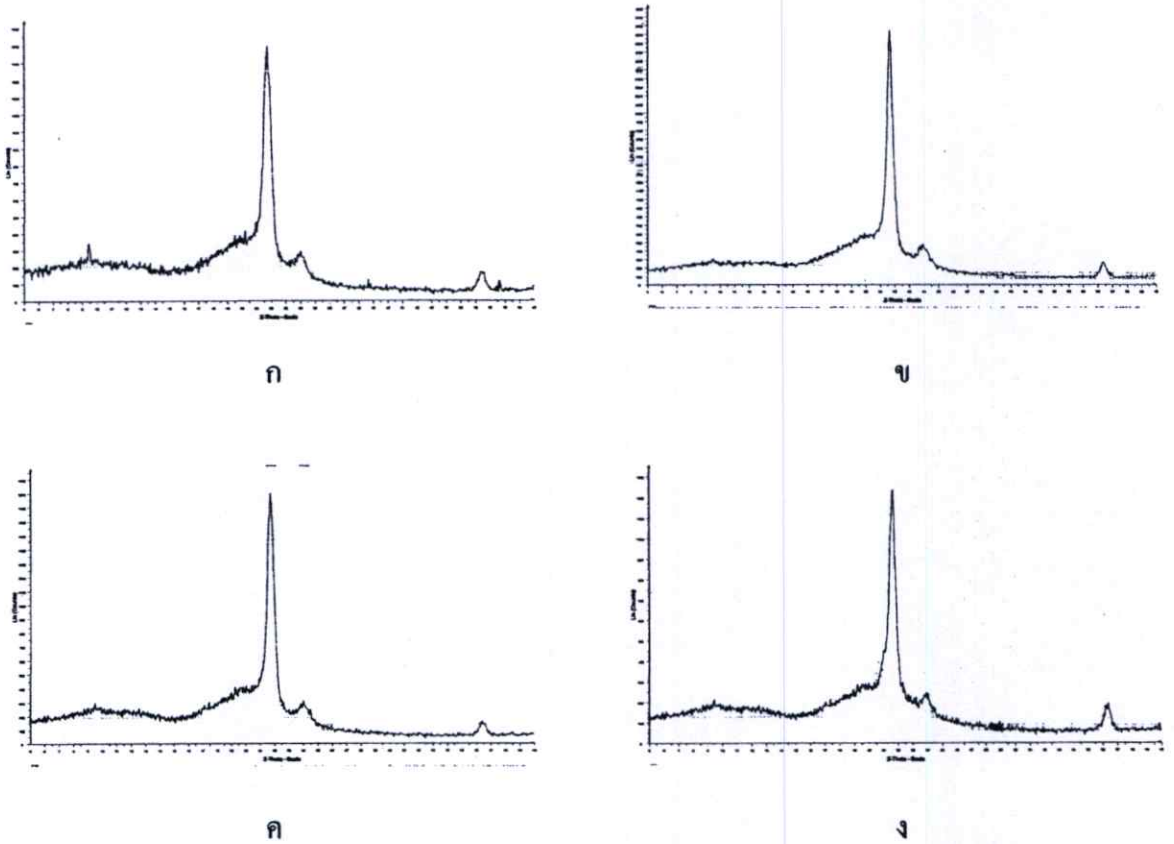
รูปที่ ข.15 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน

ก. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ข. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

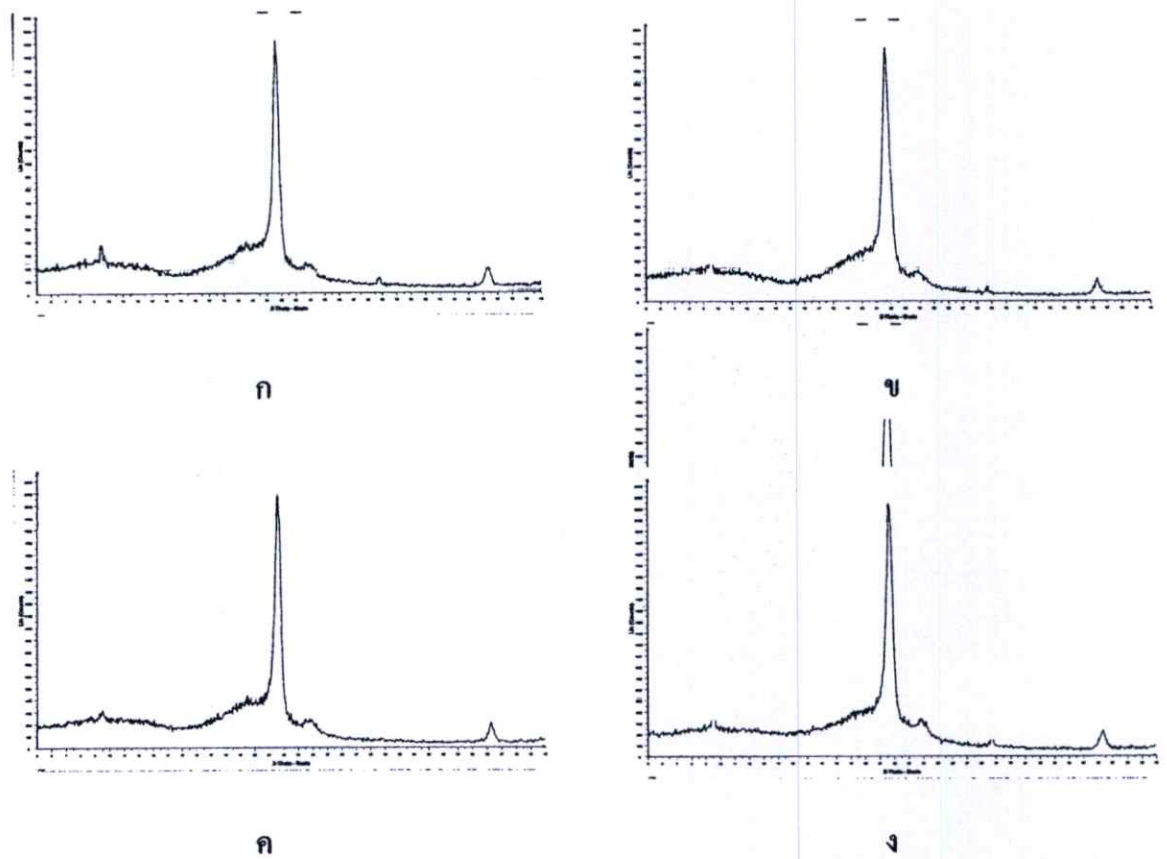
ค. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ง. फिल्मพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ๑๖ โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน

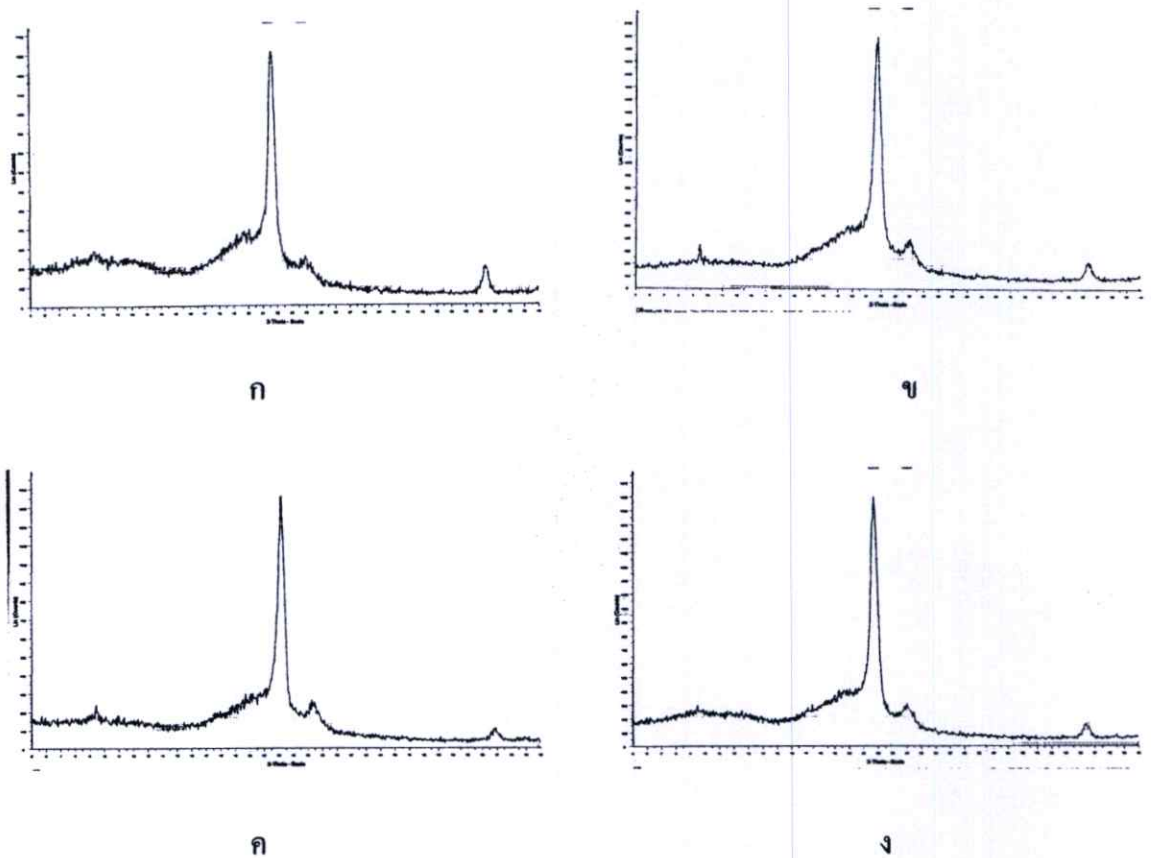
- ก พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ข.17 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนหลังฝังดิน

เป็นเวลา 4 เดือน

- ก พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ ข.18 โคอะแกรม X-ray ของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังและเบนโซฟีโนนหลังฝังดินเป็นเวลา 4 เดือน

- ก พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ข พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ค พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- ง พิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 และเบนโซฟีโนนร้อยละ 2 ของน้ำหนักพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

ประวัติการศึกษา**นายอฉณพ รักรัตน์**

เกิดวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2527

การศึกษา ระดับปริญญาตรี (วิทยาศาสตร์บัณฑิต) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา

2546-2549

ระดับปริญญาโท (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2550-2551