

ผลของสารแป้งปาล์มที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/
เคอร์โมพลาสติกสตาร์ช

EFFECT OF K-CARRAGEENAN ON PROPERTIES OF
LDPE/LLDPE/THERMOPLASTIC STARCH FILM

พัทธนา บัวดี
PHATTANA BUADDEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
สาขาคณะเทคโนโลยีพอลิเมอร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553
KMITL-2010-SC-M-014-043

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของแคปทาการจีแนนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

**EFFECT OF K-CARRAGEENAN ON PROPERTIES OF
LDPE/ LLDPE/THERMOPLASTIC STARCH FILM**



T117080

พัฒนา บัวดี

PHATTANA BUADDEE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....117080
วันเดือนปี...23 ส.ค. 2554

b.....12332744
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-014-043

**EFFECT OF K-CARRAGEENAN ON PROPERTIES OF
LDPE/ LLDPE/THERMOPLASTIC STARCH FILM**

PHATTANA BUADEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2010

KMITL-2010-SC-M-014-043

COPYRIGHT 2010

FACULTY OF SCIENCE

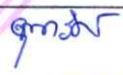



KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของแคปไซซินที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาarch

(Effect of K-carrageenan on properties of LDPE/LLDPE/thermoplastic starch film)

นักศึกษา นางสาวพัฒนา บัวดี
รหัสประจำตัว 51067916
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย


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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.00 – 16.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 502/1 ชั้น 5 อาคารจุฬาภรณ์วลัยลักษณ์ 1



สำนักทะเบียนฯ ระยะเวลาผล สกค.
 วันที่ส่งเอกสารลงทะเบียนกับสมบุนธ์
 วันที่ 21 เดือน ๓.๓. พ.ศ. 53
 ลงชื่อ 

วันที่ 26 เดือน ๓.๓. พ.ศ. 53

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของแคปปาคาราจีแนนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล

นักศึกษา นางสาวพัฒนา บัวดี
รหัสประจำตัว 51067916
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ. 2553
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแคปปาคาราจีแนนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาผลและหาปริมาณแคปปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่ช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลจากการทดลองพบว่าปริมาณแคปปาคาราจีแนนเหมาะสมที่ช่วยทำให้การเป่าขึ้นรูปสมบูรณ์ คือ 7 phr โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด เท่ากับ 7.71 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 238 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรที่เติมแคปปาคาราจีแนน 3,5 และ 9 phr ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และจากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาพบว่าแคปปาคาราจีแนนไม่เข้ากันกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล แต่สามารถกระจายตัวได้ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ส่วนที่ 2 นำสูตรผสมที่ดีที่สุดจากส่วนที่ 1 มาปรับปรุงให้ส่วนที่เป็นแคปปาคาราจีแนนที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติความเป็นความเป็นพลาสติกมากขึ้น โดยผสมกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมในแคปปาคาราจีแนนที่ช่วยทำให้พอลิเมอร์ในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มีความเหนียวมากขึ้นและสามารถตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดอัด โนมัติได้ อยู่ที่ 30 % ของปริมาณแคปปาคาราจีแนน เพราะให้สมบัติเชิงกลที่ดี และส่วนที่ 3 นำสูตรผสมที่ดีที่สุดจากส่วนที่ 2 มาปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70 °C และฉายแสงยูวี จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากสมบัติเชิงกลที่ลดลง ปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) ที่เหมาะสมคือ 3 phr ซึ่ง

ให้ผลที่สอดคล้องกับดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นหลักฐานที่ยืนยันว่าฟิล์มพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาบิล/แคปปาการาจีแนน ที่เติมสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์) สามารถเกิดการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสงได้จริง

Thesis EFFECT OF K-CARRAGEENAN ON PROPERTIES OF LDPE/
LLDPE/THERMOPLASTIC STARCH FILM

Student Miss Phattana Buadee

Student ID. 51067916

Degree Master of Science

Program Polymer Technology

Year 2010

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongkolchai

ABSTRACT

This research was studied the effect of K-Carrageenan on the properties of LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch film. There were three parts. The first part was studied the effect and appropriate amount of K-Carrageenan for enhancing the polymer blend into film perfectly, by mixing the polymer blend with twin-screw extruder and then formed film by blown-film process. The mechanical properties were tested. The results were revealed that appropriate amount of K-Carrageenan added into polymer blend for well-formed blown film was 7 phr which dominate the highest tensile strength and percentage of elongation at break of 7.71 MPa and 238 , respectively when compared with polymer blend formula when added K-Carrageenan 3, 5 and 9 phr. The mechanical properties were corresponded to percentage of crystallinity. When morphology was studied , it was shown that was K-Carrageenan incompatible with LDPE/LLDPE/ Thermoplastic starch but K-Carrageenan could be distributed into LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch. The second part was improved the optimum formula of first part of K-Carrageenan in polymer blend by varied amount of glycerol for enhancing the polymer blend. It was found that the glycerol was supported to processability of K-Carrageenan with twin-screw extruder and could be easily pelletized with cutting machine. The optimal amount of glycerol was 30% of K-Carrageenan because the mechanical properties was dominated. Finally, the third part , the optimum formula for the second part was improved to degradability by using accelerating P-life with operating temperature of 70 °C and UV light. The results was revealed that the mechanical properties were decreased as the amount of P-life was increased.

The optimum amount of P-life was 3 phr. In addition , carbonyl index was increased and supported the degradability evidence of polymer blend between LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch/κ-Carrageenan. This confirmed that the accelerating P-life could be accelerated degradation by thermal and UV light.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ต้องขอขอบคุณหลายฝ่ายที่ได้ให้การสนับสนุน ตลอดจนให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ดังนี้

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

ขอขอบคุณบริษัท มัลติแบกซ์ จำกัด ที่ให้ทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยนี้ รวมทั้งอนุเคราะห์สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือทุกอย่าง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุขภักดิ์สินธุ์ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และ รศ.ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และอาจารย์สุจินต์ ต้นติพิสิฐกุล ที่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณณฤชณะ คุณสุคใจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอนุเคราะห์การทดสอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทุกคนที่มีส่วนในการช่วยเหลือ และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ ครอบครัวบัวดี และเพื่อนทุกคนที่ให้การสนับสนุนและคอยเป็นกำลังใจ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ตลอดมา

พัฒนา บัวดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูปภาพ.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลาย.....	4
2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางแสง.....	7
2.1.2.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเลตของพอลิเมอร์.....	8
2.1.2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง.....	10
2.1.2.3 กระบวนการทางเคมีของแสง.....	12
2.1.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	18
2.1.3.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	18
2.1.3.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	21
2.2 แป้ง.....	23
2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	23
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 แป้งมันสำปะหลัง.....	23
2.2.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	24
2.2.3.2 การย่อยสลายของแป้ง.....	25
2.3 การราจีแนน.....	27
2.4 พอลิเมอร์ผสม.....	31
2.4.1 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ผสม.....	31
2.4.2 ความสามารถในการเข้ากันได้.....	32
2.5 พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรยด์.....	33
2.6 พลาสติกไฮเซออร์.....	34
2.6.1 พลาสติกไฮเซออร์และพลาสติกไฮเซออร์.....	34
2.7 พอลิเอทิลีน.....	35
2.7.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	35
2.7.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	37
2.8 สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก.....	38
2.9 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
2.9.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	39
2.9.2 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม.....	40
2.9.2.1 หลักการของฟิล์มเป่า.....	41
2.9.2.2 สมบัติของฟิล์มเป่า.....	42
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	55

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.1 การศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีน/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	55
3.3.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิ เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปาคาราจีแนน.....	58
3.3.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/แคลปาคาราจีแนน ด้วยการเติมสารเร่งเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)..	62
3.4 วิธีการทดสอบ.....	63
3.4.1 การวัดดัชนีการหลอมไหล.....	63
3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	63
3.4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม.....	63
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	64
3.4.4.1 เทคนิค Differential Scanning Calorimetry.....	64
3.4.4.2 เทคนิค Thermogravimetic Analysis.....	64
3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	64
3.4.5.1 การทดสอบแรงดึง.....	64
3.4.6 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	65
3.4.6.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม.....	65
3.4.6.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ.....	65
3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายได้ของฟิล์ม	66
3.4.7.1 การทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสง.....	66
3.4.7.2 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน.....	66
3.4.8 การทดสอบโดยใช้สารละลายไอโอดีน.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	68
4.1 การศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่าง สมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนา แน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	68
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	69
4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	73
4.1.2.1 Optical Microscope.....	73
4.1.2.2 Scanning electron microscope.....	75
4.1.3 สมบัติเชิงกล.....	79
4.1.4 สมบัติทางความร้อน.....	82
4.1.4.1 Differential scanning calorimetry	82
4.1.4.2 Thermogravimetric analysis	84
4.1.5 การศึกษาการดูดซับน้ำ.....	86
4.1.6 สมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน.....	87
4.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน.....	93
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	94
4.2.2 สมบัติทางความร้อน.....	97
4.2.3. สมบัติทางกล.....	102
4.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปาคารา จีแนนด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์).....	106
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	107
4.3.1.1 หลังเอจิงที่อุณหภูมิ 70 °C	107
4.3.1.2 หลังฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน.....	108

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 สมบัติเชิงกล.....	110
4.3.2.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนที่จะนำไปทดสอบการย่อย สลายทางความร้อนและทางแสง.....	110
4.4.3.2 การย่อยสลายทางความร้อน โดยการเองจริง.....	112
4.3.3 การหาดัชนีการหักเห.....	122
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	131
เอกสารอ้างอิง.....	133
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	139
ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	141
ภาคผนวก ค การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก.....	149
ภาคผนวก จ การศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางความร้อน.....	151
ภาคผนวก ฉ การทดสอบโดยสารละลายไอโอดีน.....	154
ภาคผนวก ช กระบวนการผสมและการเป่าขึ้นรูป.....	156
ภาคผนวก ซ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	158
ประวัติผู้เขียน.....	159

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พลังงานที่เกิดการแผ่รังสีความยาวคลื่นต่างๆและพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์.....	9
2.2 ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของพอลิเมอร์ และความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับการเสียคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์.....	9
2.3 พลังงานในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	19
2.4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	20
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังโดยทั่วไป.....	24
2.6 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง.....	25
2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด.....	30
3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.3 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	50
3.4 สมบัติของแคปปาการาจีแนน.....	51
3.5 สมบัติของสารช่วยผสม.....	51
3.6 สมบัติของกลีเซอรอล.....	51
3.7 สมบัติของสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก.....	52
3.8 สมบัติน้ำมันพาราฟิน.....	52
3.9 อัตราส่วนของสารต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	56
3.10 สภาวะที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	56
3.11 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม.....	57
3.12 อัตราส่วนของสารต่างๆที่มีใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	59
3.13 สภาวะที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	60
3.14 สภาวะที่ใช้การเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม.....	60

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.1 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	69
4.2 ลักษณะของพอลิเมอร์หลอมเหลวและเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีด ชนิดเกลียวหนอนคู่.....	71
4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ	71
4.4 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	72
4.5 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์ม พอลิเมอร์ผสมสูตร จากเทคนิค DSC.....	83
4.6 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร จากเทคนิค TGA.....	84
4.7 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	93
4.8 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมและเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิด เกลียวหนอนคู่.....	94
4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	95
4.10 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ.....	96
4.11 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว และเอนทัลปีของแคปปาคาราจีแนนจากเทคนิค DSC.....	99
4.12 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์ม พอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆจากเทคนิค DSC.....	99
4.13 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	106

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแตกตัวของสารเติมแต่งประเภทคีโตนที่ช่วยทำให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายทางแสง...	4
2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆในการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	6
2.3 แผนภาพแสดงการย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ.....	7
2.4 โครงสร้างของอะไมโลส.....	23
2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน.....	23
2.6 โครงสร้างแคปทาการจีแนน	27
2.7 โครงสร้างไอออตาการจีแนน.....	28
2.8 โครงสร้างแลมดาการจีแนน.....	28
2.9 ลักษณะของผงการจีแนน.....	29
2.10 การเกิดโครงสร้างเกลียว(helix) ในการจีแนน.....	29
2.11 กลไกการเกิดเจลของนมกับแคปทาการจีแนน (a) เคซีนไมเซลและสายโซ่ที่ไม่เป็นระเบียบ (random coil) ของการจีแนนในสารละลาย; (b) การเกิดปฏิกิริยาของเคซีนไมเซลกับการจีแนน ;(c) เกิดการสร้างเจลจากการจีแนน.....	29
2.12 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย.....	33
2.13 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดราย.....	33
2.14 โครงสร้างของกลีเซอรอล.....	35
2.15 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	36
2.16 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	37
2.17 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	37
2.18 ส่วนประกอบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	39
2.19 ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดสกรู.....	39
2.20 แสดงกระบวนการเป่าฟิล์ม.....	42
3.1 แผนภาพโดยรวมของการทดลอง.....	54
3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง.....	58
3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง.....	61
3.4 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง.....	63
3.5 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง.....	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 การเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน.....	66
3.7 การทดสอบชิ้นงานด้วยสารละลายไอโอดีน.....	67
4.1 แสดงการกระจายตัวของแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในสูตรต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 200 เท่า: (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5 (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	74
4.2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช : (ก) แป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) แคลปาคาราจีแนน ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	75
4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (PE/TPS) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	75
4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 3 phr (PE/TPS/K3) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	76
4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 5 phr (PE/TPS/K5) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	76
4.6 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนนปริมาณ 7 phr (PE/TPS/K7) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	77
4.7 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 9 phr (PE/TPS/K9) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคปลาการจีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	81
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's modulus ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคปลาการจีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	81
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคปลาการจีแนนในปริมาณต่างๆทั้งในแนวตามเครื่องจักร(MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	82
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มีปริมาณแคปลาการจีแนนที่แตกต่างกัน.....	87
4.12 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7 : (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	89
4.13 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 600 เท่า : (ก) PE/TPS , (ข) PE/TPS/K3 , (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	90
4.14 ภาพการเกิดการบวมตัวของผงแคปลาการจีแนนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในปริมาณ 30% ของแคปลาการจีแนน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 600 เท่า pH 7 : (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	100
4.15 แบบจำลองกลไกการเกิดเจลของแคปลาการจีแนน.....	101
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/ แคปลาการจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณต่างๆผสมอยู่ในแคปลาการจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าข้มอดุลัสของฟิล์ม/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณ ต่างๆผสมอยู่ในแคลปาคาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	104
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณ ต่างๆผสม อยู่ในแคลปาคาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร(TD).....	104
4.19 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการทำเองจึ่งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3.....	108
4.20 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการฉายรังสีเป็นระยะเวลา 4 เดือน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3.....	109
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเองจึ่งและก่อนฉายแสงยูวี.....	110
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเองจึ่งและก่อนฉายแสงยูวี.....	111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากเอจ จิงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน.....	111
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าข้มอดูลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวตามเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจิงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน.....	113
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจิง ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน.....	115
4.27 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน.....	116
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	118
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าข้มอดูลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	119

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30	
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	120
4.31	
กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน โดยแสง.....	121
4.32	
แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 1800-1400 cm^{-1} ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่ทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะ 7 วัน : (ก) PE/TPS/K7/G30 (ข) PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) PE/TPS/K7/G30/P3.....	123
4.33	
การเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างหลังจากทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 7 วัน.....	124
4.34	
แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น 1800-1400 cm^{-1} ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากที่ทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน: (ก) 0 เดือน (ข) 1 เดือน (ค) 2 เดือน (ง) 3 เดือน และ (จ) 4 เดือน.....	128

และเนื่องจากคาร์โบไฮเดรตที่มีสมบัติที่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังนั้นจึงได้เลือกนำมาใช้เป็นสารตัวเติม ในการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เพื่อให้ลูกโป่งฟิล์มมีความเหนียวและสามารถเป่าขึ้นรูปได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณและผลของแคปไซซินที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังที่อยู่ในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) ปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ผสมลงในพอลิเอทิลีน ส่งผลให้ฟิล์มมีความเปราะ ไม่สามารถขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจึงนำแคปไซซินซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีความยืดหยุ่น และมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายแป้ง เติมนลงในพอลิเมอร์ผสมเพื่อปรับปรุงกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ทำให้ฟิล์มสามารถดึงยืดได้ดี และไม่ขาดในระหว่างกระบวนการเป่า ตอนที่สองศึกษาผลของกลี

เซอรอลซึ่งใช้เป็นพลาสติกไบโอสำหรับแคปไซซินในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และตอนที่สามปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปไซซิน ด้วยสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาบทบาทของแคปไซซินที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- 1.2.2 ปรับปรุงแคปไซซินที่มีอยู่ในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปไซซินให้มีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้นด้วยกลีเซอรอล
- 1.2.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปไซซินด้วยสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (P-life Degradable plastic)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาปริมาณแคปปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซได้อย่างสมบูรณ์
- 1.3.2 ศึกษาผลของแคปปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ
- 1.3.3 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคปปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคปปาคาราจีแนน
- 1.3.4 ศึกษาปริมาณและผลของสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติกที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคปปาคาราจีแนน
- 1.3.5 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการย่อยทางชีวภาพ การย่อยสลายทางความร้อนและการย่อยสลายทางแสงของฟิล์มสูตรผสมต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถผลิตฟิล์มที่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้มากขึ้น
- 1.4.2 สามารถใช้แคปปาคาราจีแนนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในการปรับปรุงกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคปปาคาราจีแนน ที่มีการเติมแป้งในปริมาณมากได้อย่างสมบูรณ์
- 1.4.3 สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคปปาคาราจีแนน ที่มีการปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายด้วยสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติกได้
- 1.4.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ที่มีพอลิเมอร์หลักที่ไม่สามารถเกิดการย่อยสลาย เช่น พอลิเอทิลีน ให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้
- 1.4.5 สามารถนำฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปไปประยุกต์ใช้เป็นถุงหิ้ว ถุงใส่ขยะ ที่สามารถเกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาขยะได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

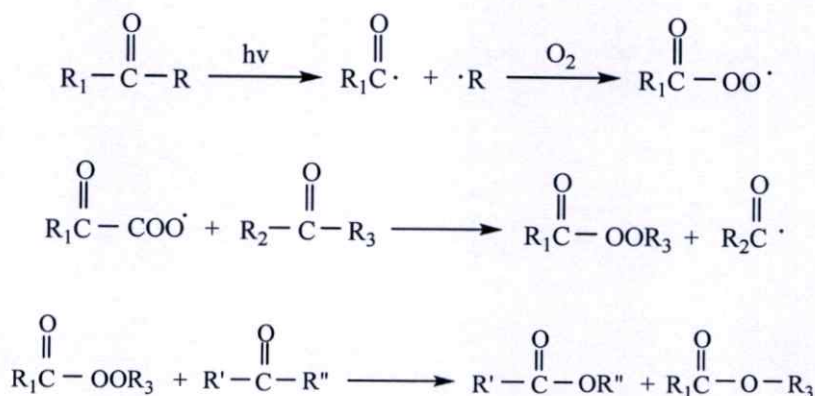
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลาย [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ โดยก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ และโดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภทคือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงใน พลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะ กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดี หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง



รูปที่ 2.1 การแตกตัวของสารเติมแต่งประเภทคีโตนที่ช่วยทำให้พลาสติกเกิดการย่อยสลายโดยแสง[1]

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation)

การย่อยสลายทางกลโดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการใช้โดยทั่วไป ในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ เช่น กระบวนการบดพลาสติกในกระบวนการรีไซเคิล

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation)

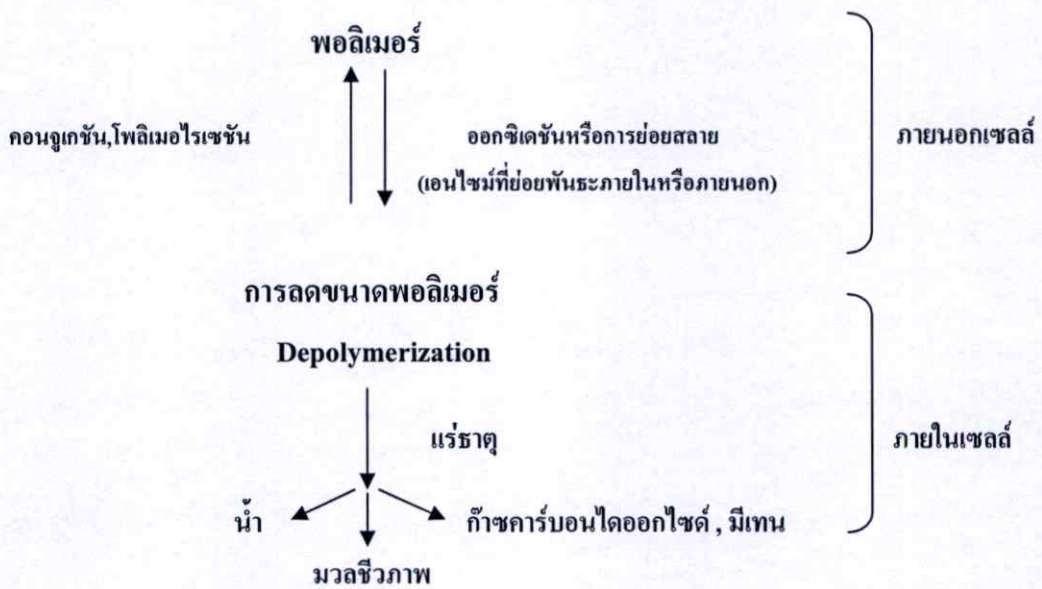
การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน หรือแสงยูวี และแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing Additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ ($RO\cdot$ และ $OH\cdot$) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้น ในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรายด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic Hydrolysis) และไม่ใช่คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal Catalytic Degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase Lipase Esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-Enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลน์ (Alkaline Metal) เบส (Base) และ กรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายนั้นจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-Enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate Biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) น้ำ (H_2O) เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ

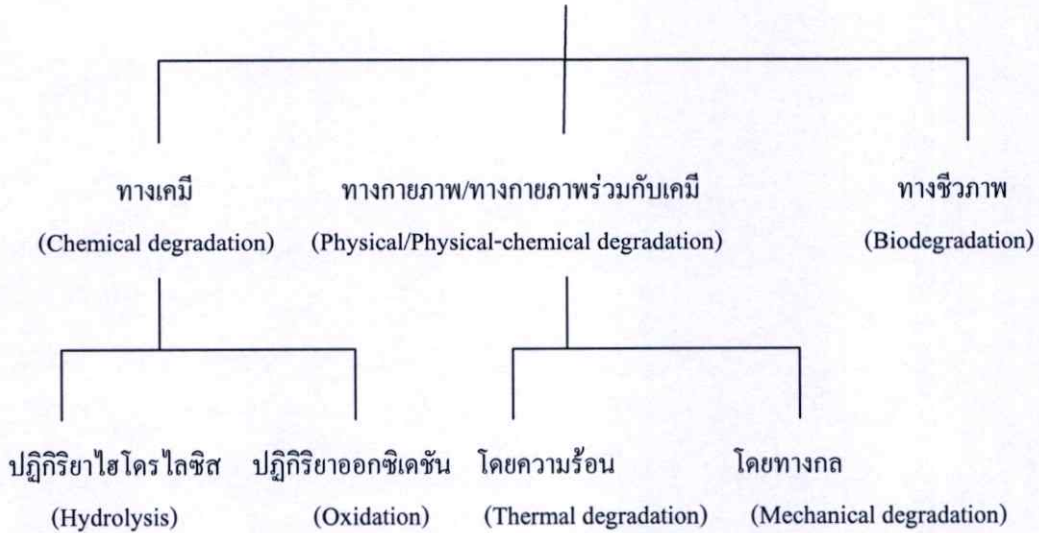


รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนต่างๆในการย่อยสลายทางชีวภาพ [1]

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่าพลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastic, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝน และแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึมและย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

การย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ

(Environmental polymer degradable)



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการย่อยสลายของพลาสติกในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ [1]

2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยแสง [4]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยแสงเป็นพลาสติกที่จะเกิดการแตกหักของสายโซ่หลักเมื่อได้รับพลังงานแสงหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต พลาสติกประเภทนี้ได้จากการสังเคราะห์โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่มีความว่องไวต่อแสงในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น หมู่คาร์บอนิลในรูปไวนิลคีโตน (Vinyl ketone) หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) เป็นต้น เข้าไปในโมเลกุล ดังนั้นเมื่อได้รับแสงแดดโมเลกุลของพลาสติกจะดูดกลืนพลังงานทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Photo-oxidation) ส่งผลให้สมบัติกายภาพและสมบัติเชิงกลลดลง นอกจากนี้ยังเป็นการช่วยให้จุลินทรีย์ย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ง่ายขึ้นด้วย เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงและมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลเกิดขึ้น

ปัจจุบันวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์เสื่อมสภาพด้วยแสงมี 3 วิธี

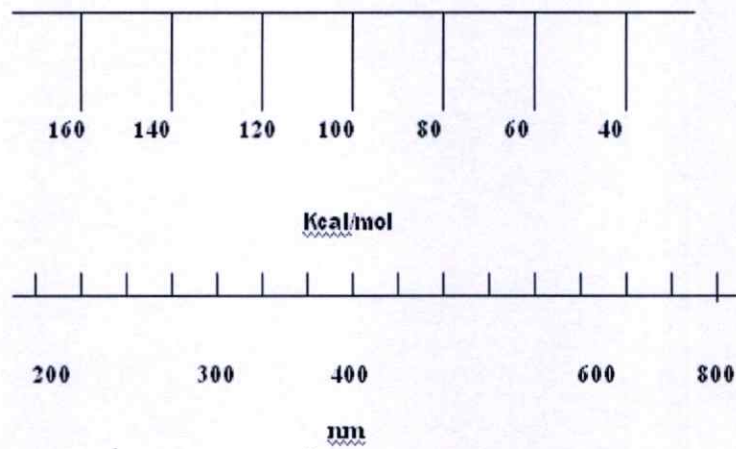
1. เตรียมฟิล์มจาก Poly-1-butene หรือมี Polyisobutylene oxide และ Polybutadiene เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีหมู่ดูดกลืนแสงโดยเพิ่มหมู่คาร์บอนิลเข้าไปในโครงสร้าง แต่เป็นวิธีที่มีต้นทุนสูง เมื่อหมู่คาร์บอนิลดูดกลืนแสงแล้วทำให้เกิด ปฏิกิริยา Norrish type I สลายให้อนุมูลอิสระ และ Norrish type II จะเกิดการจัดโมเลกุลใหม่ส่งผลให้สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ขาด

3. การเติมสารไวแสง (Photo-initiator หรือ UV absorber) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำช่วยเร่งการย่อยสลายโดยแสงลงในพอลิเมอร์ ตัวอย่างสารเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบโลหะทรานซิชัน (Transition metal) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอมีน ฟีนอล และเม็คซี เป็นต้น ปัจจุบันมีการพัฒนาสารไวแสงจาก Dialkyldithiocarbamates ซึ่งเมื่อเติมลงไปในพลาสติกจะทำให้พลาสติกมีอายุการใช้งานระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะสลายตัว พลาสติกระบบนี้มีประโยชน์มากโดยเฉพาะใช้ทำฟิล์มทางการเกษตร เช่น เบนโซฟีโนน (Benzophenone) ไทโอแซมโทน (Thioxamtone) ไอรอน ไดอัลคิลไดไทโอคาร์บาเมท (Iron (III) dialkyldithio carbamate) เป็นต้น

2.1.2.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเล็ตของพอลิเมอร์ (Ultraviolet Stabilization) [4]

โดยทั่วไปสารประกอบอินทรีย์จะมีพันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) ที่มีความเสถียร โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตและพอลิเมอร์ ซึ่งการสังเคราะห์สารอินทรีย์ในห้องปฏิบัติการสามารถทำได้จากการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์ของสารอินทรีย์ที่นำมาสังเคราะห์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมมีความจำเป็นที่จะศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์ เพื่อใช้ปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ปฏิกิริยาของพันธะโคเวเลนต์บางประเภทยังมีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์และการนำไปใช้เป็นเวลานานอีกด้วย

สำหรับพันธะโคเวเลนต์ที่ได้รับพลังงานจลน์เล็กน้อยหลุดจากสถานะเสถียรไปอยู่ใน สถานะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามีผลทำให้พันธะโคเวเลนต์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ในสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปพลังงานกระตุ้นได้จากการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.4 ตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ เมื่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตของดวงอาทิตย์แพร่เข้ามายังบรรยากาศโลก จะถูกกรองผ่านโดยชั้นบรรยากาศโอโซนซึ่งจำกัดความยาวคลื่นแสงที่สั้นกว่า 290 นาโนเมตร (nm) ด้วยเหตุนี้การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตจาก 290 ถึง 400 นาโนเมตร จึงเกิดขึ้นได้แก่ประมาณร้อยละ 5 ของการแผ่รังสีทั้งหมดมายังโลก ดังนั้นความยาวคลื่นแสงที่มากกว่า 400 นาโนเมตร จะเป็นแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและความร้อนอินฟราเรด โดยการเสถียรภาพของพลาสติกในสภาพบรรยากาศภายนอกเริ่มต้นพลังงานอัลตราไวโอเล็ตของดวงอาทิตย์ รวมถึงออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศและในบางครั้งรวมถึงความชื้นในบรรยากาศและฝุ่นที่เกิดจากลมพัด เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความยาวคลื่นของแสงกับระดับพลังงาน [5]

ตารางที่ 2.1 พลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างกันและพลังงานพันธะที่พบในพอลิเมอร์[6]

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

ตารางที่ 2.2 ช่วงการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของพอลิเมอร์และความยาวคลื่นแสงที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการแยกคุณภาพทางแสงของพอลิเมอร์ [6]

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

การเสียดคุณภาพของพลาสติกด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเริ่มต้นเมื่อพลาสติกถูกคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ซึ่งในทางทฤษฎีถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก ตัวอย่างเช่น ไฮโดรคาร์บอนประเภทอะลิฟาติกบริสุทธิ์ถูกคลื่นแสงได้ที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 220 นาโนเมตร พอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนถูกคลื่นแสงได้ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร เป็นต้น แต่ตามความเป็นจริงพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งหมดถูกคลื่นแสงได้ต่ำกว่า 300 นาโนเมตรเท่านั้นซึ่งจะไม่อยู่ในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มาถึงยังโลก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานว่าเกิดการเบี่ยงเบนของโครงสร้างของพอลิเมอร์เองหรือมีสิ่งเจือปนอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์และสิ่งเหล่านี้จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตในตอนเริ่มแรกและเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเสียดสภาพ

โครงสร้างแบบวงแหวนอะโรมาติกอาจจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงถึง 350 นาโนเมตร และจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแสงได้สูงขึ้นเมื่อสร้างพันธะแบบคอนจูเกตกับหมู่ไม่อิ่มตัวอื่นๆ

ในทางทฤษฎีพบว่าการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตในระยะเริ่มแรกของพอลิเมอร์นั้นส่วนใหญ่คล้ายกับการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตของหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดจากการออกซิเดชันซึ่งจะดูดกลืนแสงได้ประมาณ 320 นาโนเมตร และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันจะดูดกลืนแสงมากกว่า 300 นาโนเมตร โดยจะอธิบายได้ว่าการเสียดสภาพขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างในโมเลกุลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตยังขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งและสิ่งเจือปนอื่นๆซึ่งอาจเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างพอลิเมอร์และออกซิเจนได้ ดังนั้นจึงสามารถอธิบายการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตในตอนเริ่มต้นได้อีกทางหนึ่ง

เมื่อระบบของพอลิเมอร์ดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ตจะทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานและออร์บิตอลที่สูงขึ้นทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ ด้วยเหตุนี้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสถานะพื้น (Ground state) จะถูกกระตุ้นไปอยู่ในออร์บิตอลที่มีระดับพลังงานสูงกว่า จึงมีผลทำให้ระดับพลังงานเกิดการสั่นสะเทือนสูงขึ้น และในขณะที่อิเล็กตรอนเกิดการหมุน (Spin electron) จะมีลักษณะเป็นคู่ในสถานะเดี่ยว (Single state) และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นสามารถเปลี่ยนการหมุนได้ทำให้เกิดระบบการแลกเปลี่ยนข้าม (Inter-system crossing) ไปอยู่ในสถานะสาม (Triplet state) สถานะที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ไม่เสถียรอิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่จากระดับพลังงานสูงกลับมายังสถานะพื้นที่มีระดับพลังงานต่ำได้ด้วยเส้นทางการเคลื่อนที่ต่างๆกัน โดยเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการกายภาพทางแสง (Photophysical process) และถ้ากระบวนการที่เกิดไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างถาวรจนเกิดการเสียดคุณภาพของพอลิเมอร์จะเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการเคมีทางแสง (Photochemical process) [6]

2.1.2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง [6]

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

การถ่ายโอนพลังงาน

พลังงานของการกระตุ้นอาจถูกถ่ายโอนไปยังอีกที่หนึ่ง (ก.) ภายใน โมเลกุล (Intramolecular) หรือ (ข.) ระหว่างโมเลกุล (Inter-molecular) ที่อยู่ในพื้นที่เดียวกัน

(ก.) ภายในโมเลกุล

พลังงานแสงอัลตราไวโอเลตอาจถูกดูดกลืนโดยหมู่โครโมฟอร์ (Chromophoric group) ที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเคลื่อนย้ายไปตามโมเลกุลไปยังจุดอื่นๆที่ไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้โดยตรง

(ข.) ระหว่างโมเลกุล

โดยปกติโมเลกุลโครโมฟอร์ที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตในระยะเริ่มต้น และถูกกระตุ้นโดยทันที จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานอย่างรวดเร็วไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง เมื่อได้รับปฏิกิริยาสูงสุด (Ultimate reaction) ในบางกรณีสิ่งเจือปนหรือสารปรับแต่งที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต เริ่มแรก จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานไปยังพอลิเมอร์ซึ่งไม่สามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้เองแต่สามารถกระตุ้นได้ทางอ้อม ดังสมการ 2.1 และ 2.2



สิ่งเจือปนหรือสารเติมแต่งจะเร่งการเสถียรภาพของพอลิเมอร์โดยแสงอัลตราไวโอเลต เช่น เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศอย่างเฉื่อย หรือการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับพอลิเมอร์ เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตมากเกินไปจะทำให้เกิดความไม่เสถียรที่จะใช้กับงานภายนอกได้ จึงอาจทำให้เกิดความเสถียรได้โดยการเติมสารระงับพลังงาน (Quencher) ลงไปเพื่อถ่ายโอนพลังงานที่มากเกินไปดังสมการ 2.3 และ 2.4 เทคนิคนี้มีประโยชน์ทำให้พอลิโอดี ฟีนสามารถนำไปใช้ในงานภายนอกได้โดยมีสารเสถียรภาพช่วยระงับพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเลต

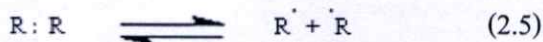


โดยทั่วไปกระบวนการกายภาพทางแสงจะสิ้นสุดลงเมื่อปล่อยพลังงานในสถานะกระตุ้นที่มีความยาวคลื่นสูงกลับไปยังระดับพลังงานที่มีความยาวคลื่นต่ำโดยระดับพลังงานในสถานะเดียวกันที่ถูกกระตุ้น (S_1) จะปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเพียง 10^{-9} ถึง 10^{-6} วินาที เรียกว่าช่วงคลื่นแสงฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ส่วนในสถานะสามที่ถูกกระตุ้น (T_1) อาจจะปล่อยพลังงานกลับมาช้ากว่าซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 10^{-3} ถึง 20 วินาที ซึ่งเรียกว่าการสั่นแบบรามาน (Raman vibrations) ของอิลีคตรอน อะตอม หรือโมเลกุล พลังงานที่ปล่อยออกมาจากสถานะกระตุ้นจะกระจายผ่านชั้นของระดับพลังงานซึ่งทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจนกลายเป็นความร้อน ในบางกรณีพลังงานกระตุ้นที่ปล่อยออกมามีผลทำให้เกิดการจัดเรียงทางโครงสร้างของโมเลกุลใหม่เป็นแบบ

ทาวโทเมอร์ริก(Tautomeric) ที่สามารถผันกลับเป็นโครงสร้างรูปแบบเดิมก่อนการถูกกระตุ้นได้ชั่วคราว แล้วจะกลายเป็นความร้อนเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา ซึ่งการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นในรูปของพลังงานสั้นสะท้อนและความร้อน ใน บางครั้งอาจมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสถานะพื้นร้อน (Hot ground – State reaction) ซึ่งจัดเป็นการเสีย สภาพโดยความร้อนแบบธรรมดาที่เกิดจากการเหนี่ยวนำเริ่มต้นด้วยการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอ เลต ปฏิกิริยาแบบนี้ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกระบวนการทางกายภาพของแสง และกระบวนการทางเคมีของแสงได้อย่างชัดเจน

2.1.2.3 กระบวนการทางเคมีของแสง [5]

กระบวนการเคมีทางแสงเกิดขึ้นเมื่อสารอินทรีย์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงอัลตราไวโอ เลต ทำให้สารอินทรีย์มีระดับพลังงานสูงขึ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นที่ได้รับมีไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดการคายพลังงานเพื่อกลับมาสู่สถานะพื้นได้ จึงทำให้สารอินทรีย์มีพลังงานส่วนเกินที่ส่งผลให้เกิดการแตกแยกของพันธะ โคเวเลนต์ นำไปสู่กระบวนการเคมีทางแสงมีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอย่างถาวรจึงทำให้สารอินทรีย์เกิดการเสียคุณภาพ โดยทั่วไปพันธะ โคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นพันธะที่แข็งแรงที่สามารถต้านพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากพลังงานแสงอัลตราไวโอเลตได้ แต่เมื่อพันธะ โคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจะทำให้ความแข็งแรงของพันธะ โคเวเลนต์มีค่าน้อยลงซึ่งมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมข้างเคียงที่ติดกับพันธะ โคเวเลนต์ได้ ตัวอย่างเช่น พันธะ C-H ที่ถูกกระตุ้นที่ตำแหน่งที่สามในสายโซ่พอลิเมอร์จะมีพลังงานน้อยกว่าถ้าเทียบกับการกระตุ้นจากตำแหน่งอัลฟาของกลุ่มไม่อิ่มตัวในสายโซ่พอลิเมอร์แทน เช่น พันธะ C=C และ C=O เป็นต้น ด้วยเหตุนี้พลังงานคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตที่ถูกดูดกลืนโดยระบบพอลิเมอร์ อาจเพียงพอที่จะทำให้พันธะ โคเวเลนต์ในโมเลกุลของพอลิเมอร์แตกออกจนเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มต้นที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.5 โดยจะส่งผลต่อกระบวนการทางเคมีของแสงที่จะนำไปสู่การเสียสภาพในที่สุด ซึ่งกระบวนการทางเคมีของแสงมีผลทำให้โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายแบบ ได้แก่ การแตกแยก (Cleavage) การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small molecule) ความไม่อิ่มตัว(Unsaturation) การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization) การเชื่อมโยงโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) การออกซิเดชัน (Oxidation) และโฟโตไฮโดรไลซิส (Photohydro- lysis) เป็นต้น



การแตกแยก (Cleavage)

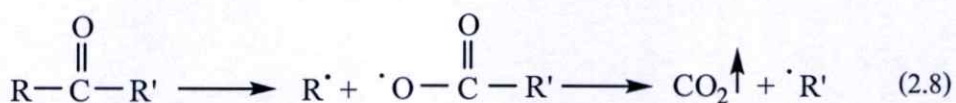
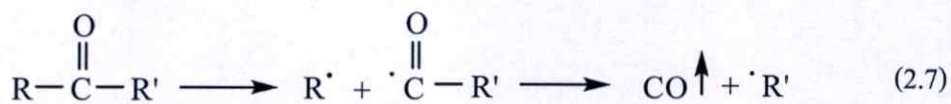
การเกิดปฏิกิริยาโฟโตลิซิสเริ่มจากพันธะโคเวเลนต์ได้รับพลังงานกระตุ้นจากคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดการแตกแยกของโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolytic cleavage) โดยเริ่มจากโมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดใหญ่เปลี่ยนไปเป็น โมเลกุลพอลิเมอร์ขนาดเล็กกว่า 2 โมเลกุลดังสมการ 2.6



การเกิดโมเลกุลชนิดเดียวกัน (Homolytic) ทำให้เกิดผลแบบแยกออกจากกัน(Cage effect) คืออนุโมลทั้งสองจะต้องมีการเคลื่อนที่มากพอที่จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันและกันอย่างถาวร ไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิและการแพร่จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปซึ่งปฏิกิริยาสองชนิดที่มีความสำคัญ ได้แก่ นอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 (Norrish type I + II)

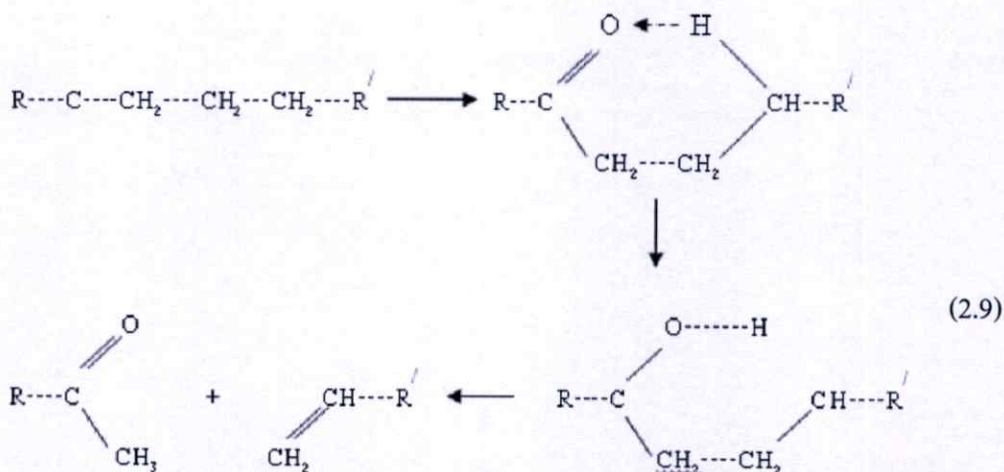
-นอร์ริชแบบที่ 1 (Norrish type I)

สารที่ทำให้เกิดแตกแยกแบบโฟโตไลติกชนิดนี้จะเกิดเมื่ออยู่ใกล้กับหมู่คาร์บอนิลเป็นผลให้เกิดการเสียคุณภาพได้โดยตรงดังสมการ 2.7 และ 2.8 เมื่อได้อนุโมลแยกออกจากกันแล้วอนุโมลนี้สามารถเข้าทำปฏิกิริยาอื่นต่อไปเพื่อเกิดการเสียคุณภาพในที่สุด



-นอร์ริชแบบที่ 2 (Norrish type II)

หมู่คาร์บอนิลซึ่งอยู่ในตำแหน่งแกมมา (Gamma) ของพันธะ C - H สามารถกระตุ้นให้เกิดการแตกแยกโดยผ่านกลไกเชิงซ้อนที่มีวงแหวนหกเหลี่ยมอยู่ชั่วคราวและมีรัศมีที่สมมาตรกันดังสมการ 2.9 ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 เป็นที่นิยมมากกว่านอร์ริชแบบที่ 1 แต่ความแตกต่างที่เกิดขึ้นแต่ละครั้งระหว่างปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลเฉพาะทั้งสองและสภาวะเฉพาะในระหว่างการเสื่อมคุณภาพ



การกำจัดโมเลกุลเล็กๆ (Elimination of Small molecule)

ปฏิกิริยาการเสียดคุณภาพทางแสง (Photodegradation) ของพอลิเมอร์เป็นผลทำให้เกิดการกำจัดโมเลกุลเล็กๆออกในรูปของผลิตภัณฑ์ร่วม (By-Products) ได้แก่

- คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) โดยจะถูกปล่อยออกมาในระหว่างการเสียดคุณภาพโดยปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น
- ปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) หรือปฏิกิริยาการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์หลังการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมีผลทำให้เกิดกระบวนการแตกออก (Unzipping process) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาผันกลับของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของไวเนลิต ดังสมการ 2.10



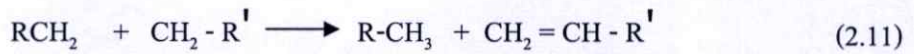
โดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่เสถียรมากต้องการพลังงานสลายพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์มากกว่าพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรน้อยแสดงว่าโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์และพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่พลังงานความร้อนจะมีผลต่อความเสถียรของพอลิเมอร์ เช่นที่อุณหภูมิต่ำจะมีผลทำให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพดีกว่าที่อุณหภูมิสูง จากการศึกษาพบว่า โมเลกุลพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่ขาดอะตอมของเทอซีริไฮโดรเจนจะมีอนุภาคอิสระที่เกิดขึ้นซึ่งจะเสถียรมากกว่าโครงสร้างโมเลกุลแบบอื่น ภายหลังจากเกิดปฏิกิริยาการสลายพันธะของพอลิเมอร์จะทำให้เกิดโมเลกุลเล็กๆ เช่น มีเทน (Methane) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide) สารโมเลกุลเล็กๆเหล่านี้อาจใช้ในการวิเคราะห์หากลไกของการเสียดคุณภาพของพอลิเมอร์ได้

บางปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจไม่มีการสลายพันธะในโมเลกุลพอลิเมอร์ แต่เกิดปฏิกิริยาร่วมทำให้โครงสร้างภายในโมเลกุลเปลี่ยนเป็นโครงร่างตาข่ายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ปฏิกิริยา

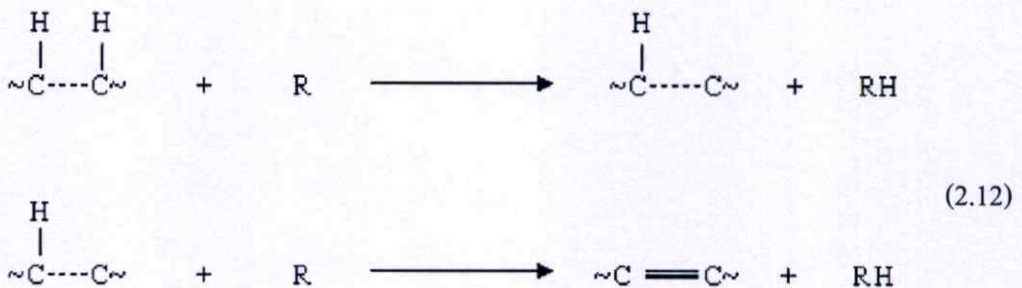
ดังกล่าวได้แก่ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (Dehydrochlorination) ปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรแฮโลเจน (Dehydrohalogenation) และปฏิกิริยาการกำจัดแฮโลเจน (Dehalogenation) ออกจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามการเกิดออกซิเดชันโดยแสงจะเกิดช้ามากและไม่สมบูรณ์ เว้นเสียแต่ว่าจะเกิดการเสียคุณภาพทางชีวภาพคู่กันไป

ความไม่อิ่มตัว (Unsaturation)

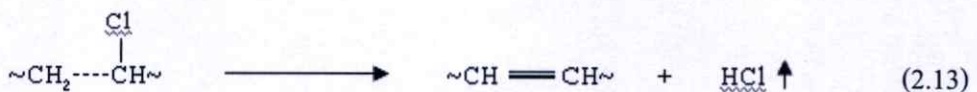
ปฏิกิริยาการเสียคุณภาพทางแสงมากมายเกิดจากการเกิดพันธะคู่ของ C=C ที่ไม่อิ่มตัวปฏิกิริยาที่ควรกล่าวถึงได้แก่ ปฏิกิริยานอร์ริชแบบที่ 2 ทำให้เกิดการแตกแยกโดยดิสพรอพอชันเนชันโดยตรงได้เป็นพันธะคู่ C=C ปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันระหว่างอนุมูลที่สลายตัว 2 ชนิดที่ทำให้เกิดการสิ้นสุดและเกิดความเสถียรผ่านทางปฏิกิริยาดิสพรอพอชันเนชันแบบเดียวกันกับที่พบเห็นกันโดยทั่วไปได้แก่ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์เซชันของไวนิล ดังสมการ 2.11



การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระบนโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้อะตอมในโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการหดตัวส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัวในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดังสมการ 2.12



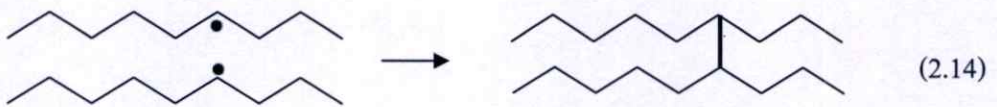
ตัวอย่างการกำจัดโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น ปฏิกิริยาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ออกจากพอลิไวนิลคลอไรด์มีผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว มีผลทำให้เกิดกระบวนการเสียคุณภาพได้มากที่สุด แสดงดังสมการ 2.13



การจัดเรียงตัวและการเกิดเป็นวง (Rearrangement and Cyclization)

จากปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาจะเกี่ยวข้องกับแตกแยกของพันธะและการเสียคุณภาพในโมเลกุลของพอลิเมอร์ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้อาจเกิดเป็น

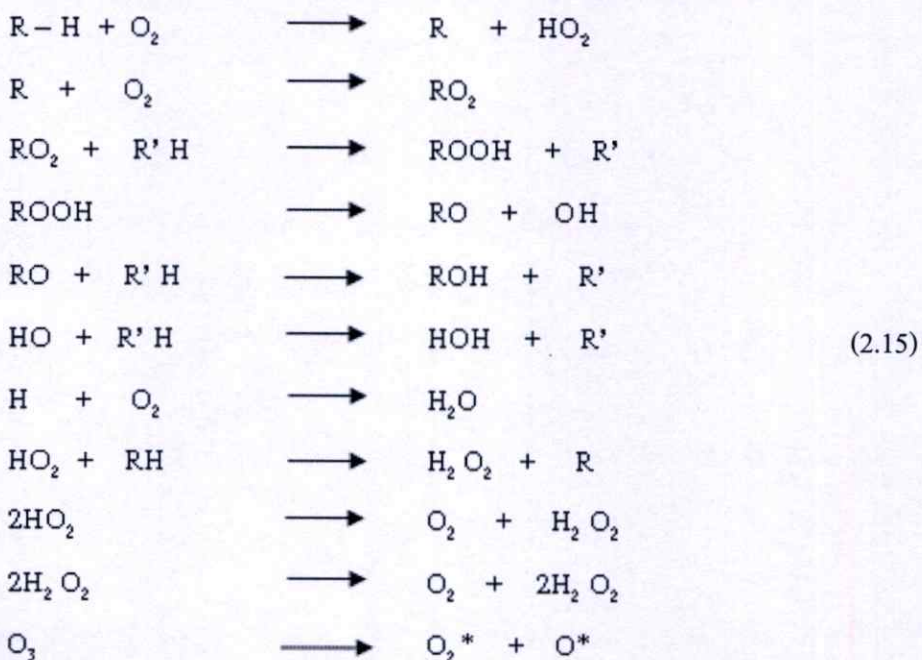
วงหรือเชื่อมโยงโครงร่างตาข่าย เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงเกิดจากการทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สูงขึ้นและเกิดเป็นเจลในลักษณะ 3 มิติ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาการแตกแยกของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลต่างๆ เมื่อไรก็ตามที่อนุมูลอิสระในพอลิเมอร์สองตัวเกิดขึ้นและมีเสถียรภาพเพียงพอ หรือมีช่วงชีวิต (Life time) น้อยที่สุดจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุมูลอิสระภายในสายโซ่ก่อนจะสลายตัวต่อไปซึ่งแนวโน้มที่จะรวมกันเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่จุดนี้ดังสมการ 2.14



ความสัมพันธ์ระหว่างการแตกแยกเป็นโมเลกุลที่เล็กลงกับการเชื่อมโยงของสายโซ่ตาข่ายเป็นร่างแหใหญ่ 3 มิติ จะถูกกำหนดโดยความมีเสถียรภาพสัมพันธ์ระหว่างอนุมูลของพอลิเมอร์ที่ถูกกระตุ้น (Intermediate polymer) ความง่ายในการเคลื่อนที่ (Migration) และการรวมตัวกันใหม่ (Recombination) เป็นต้น

การออกซิเดชัน (Oxidation)

ปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดมีความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีและทางการทดลองโดยไม่ต้องอาศัยออกซิเจน แต่ในการทดลองสภาวะของอากาศปกติและแสงอัลตราไวโอเล็ตในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นในบรรยากาศที่มีออกซิเจนซึ่งกระบวนการเสียคุณภาพโดยแสงอัลตราไวโอเล็ตได้มีการศึกษาแล้วว่ามีการออกซิเดชันรวมอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันเป็นดังสมการ 2.15



สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

โฟโตไฮโดรลิซิส (Photohydrolysis)

พอลิเอสเตอร์ พอลิเอไมด์และโครงสร้างพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น พอลิยูรีเทน (Polyurethane) เกิดการกระตุ้นด้วยแสง (Photoactivation) และความชื้นในบรรยากาศซึ่งเป็นผลมาจากกลไกของการไฮโดรลิซิส ปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดการแตกแยกได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลงจนได้เป็นพวคมอนอเมอร์และพวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

เมื่อศึกษาโดยใช้แถบแสงอัลตราไวโอเลตและการแผ่รังสีทำให้ทราบว่ากลุ่มโครโมฟอร์จะดูดกลืนคลื่นแสงได้สูงสุดที่ความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเลตที่เหมาะสมเฉพาะที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเสียดคุณภาพของพอลิเมอร์เท่านั้น อย่างไรก็ตามกระบวนการเสียดคุณภาพโดยแสงในสภาพอากาศทั่วไป พบว่าในสภาพอากาศปกติจะมีแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่กว้างโดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้หลายแบบและซับซ้อนซึ่งทำให้วิเคราะห์และทำความเข้าใจได้ยากนอกจากการเกิดเสียดสภาพหรือไม่เกิดเสียดสภาพขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

2.1.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) [1]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีคำจำกัดความตามมาตรฐาน (DIN103.2) ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a Plastic material) คือ กระบวนการที่พลาสติกถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์นั้น สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดต้องถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์มากกว่า ร้อยละ 90 โดยที่สภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐานซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (Composting) เป็นต้น

ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการศึกษาทั้งหมด 3 กลุ่มใหญ่ๆตามวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่

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

2.1.3.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถถูกจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียหรือเชื้อราใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงเปลี่ยนสภาพของพลาสติกให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายหลังจากย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พลาสติกจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หน่วย [6] ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) เป็นต้น จากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ เช่น โปรตีน เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น พบว่าการย่อยสลายเริ่มจากจุลินทรีย์ จะใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดอนุมูลอิสระจนทำให้เกิดการย่อยสลายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500 หน่วย [6] ซึ่งสามารถตรวจวัดอัตราการสลายตัวได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยตรวจวัดหาปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน พบว่า ปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันแล้วจึงเกิดการย่อยสลาย [6] โดยการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกมีทั้งหมด 3 ลักษณะ ดังนี้

1. พลาสติกที่ไม่ได้สลายตัวเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลาย สารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด

2. การสลายตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายตัวต่อไปเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต่อไป

3. การสลายตัวเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้น โดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลกโตน (Polycaprolactone) และพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรทการ์เลท (Poly hydroxybutyrate garleate) เป็นต้น

ผลจากการสลายตัวของพลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงบวกที่สำคัญ คือ ในกระบวนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้โดยชีวภาพ พบว่ามีปริมาณการใช้พลังงานในการผลิต และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas, GHG) ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี [7] นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว จะไม่มีการผลิตคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเห็นชัดเจนในกรณีของ

พลาสติกที่ใช้เป็งเป็นวัตถุดิบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของพลาสติกจะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียน และสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ปริมาณการใช้พลังงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดต่างๆ ได้ถูกประมวลไว้ในตารางที่ 2.3 และตารางที่ 2.4 ตามลำดับ การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม เช่น สภาพของน้ำทะเลภายในดิน ในระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงาน การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือการหมักทำปุ๋ย เป็นต้น ซึ่งในแต่ละสภาวะจะมีจุลินทรีย์ ที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายที่แตกต่างกัน [8] โดยมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกมีอยู่หลายองค์กร เช่น ASTM, CEN และ ISO เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 พลังงานในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[8]

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 2.4 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [8]

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

2.1.3.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [9]

การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ spectrophotometer หรือใช้การคำนวณน้ำหนักแห้ง สมมูลมวลคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสถานะแก๊ส

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายพอลิเมอร์(%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (C_d/C_i) \times 100$$

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ(Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปจะทำให้ทราบถึงระดับการย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น

การวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์

-การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

นำพอลิเมอร์ย่อยสลายที่ฝังดินไว้ขึ้นมาแล้วสังเกตจะพบว่ามีส่วนของเชื้อราเจริญเติบโตอยู่บนพอลิเมอร์ จากนั้นนำพอลิเมอร์มาล้างแล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง(Optical microscope) จะพบรูเล็กๆในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบ่งที่อยู่ในพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

-การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก จะพบว่าพอลิเมอร์ย่อยสลายที่ฝังดินไว้มีสีเปลี่ยนไปและมีขนาดเล็กลงเนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนของแบ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดจุดสีดำและเส้นสีขาวบนชิ้นพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบ่งถูกย่อยสลายแล้วเหลือส่วนของพอลิเอทิลีน

การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared Spectroscopy)

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วน infrared ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดสเปกตรัมซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวไม่ขึ้นกับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแบ่งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ในขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแบ่งจะเกิดรูที่พื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งที่รูนี้จะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยสามารถตรวจวัดได้จากอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีด้วย

การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis)

การวิเคราะห์ทางความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ Differential Thermal Analysis (DTA) และ Differential scanning calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melt Temperature; T_m) ส่วน Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไป

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลายส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยสลายได้มากกว่าส่วนที่เป็นผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายของแป้งในพอลิเมอร์โดยวิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

การวิเคราะห์การฝังดิน (Burial Test)

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตร หลายๆ ตัวอย่างฝังในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างขึ้น มาการทดลองใช้เวลาประมาณ 4 เดือน

2.2 แป้ง [9]

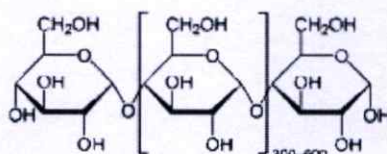
แป้งจัดเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยกลูโคส เป็นสารแขวนลอยที่รวมตัวกับน้ำได้ดี แต่ไม่ละลายในน้ำเย็น สามารถพบแป้งได้ในเซลล์พืชทุกชนิด เช่น ในเมล็ด และรากพืช เป็นต้น โดยมีกระบวนการในการผลิตแป้งหลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ลักษณะของแป้งจะเป็นเม็ดเล็กๆ มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมหรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เนื่องจากประโยชน์ของแป้งเกิดจากสมบัติความข้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดฟิล์มคุณภาพสามารถควบคุมได้ง่าย และยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก

2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

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

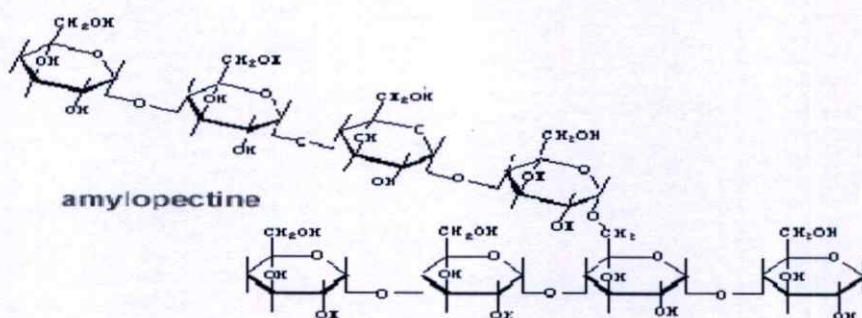
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

- อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ตรง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 200 – 2,000 หน่วย เชื่อมกันด้วยพันธะ α – 1,4 glucosidic linkage โดยแป้งส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบประมาณ 15 – 25% มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส [10]

- อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่กิ่ง ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส เชื่อมกันด้วยพันธะ α – 1,4 glucosidic linkage และ α – 1,6 glucosidic linkage แต่ละโซ่กิ่งในโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 20 – 30 หน่วย โดยโครงสร้างที่เป็นอะไมโลเพกตินจะมีประมาณ 75 – 80% ของแป้ง มีสูตรโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [11]

2.2.3 แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch)

แป้งมันสำปะหลังผลิตได้จากหัวของต้นมันสำปะหลัง มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot utilissima* และในภาษาอังกฤษจะเรียกแป้งมันสำปะหลังว่า *Tapioca starch*, *Cassava starch* และ *Manioc starch* โดยมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง โดยทั่วไป [7]

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

2.2.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ ประกอบด้วย เม็ดแป้งตั้งแต่ 2 – 8 เม็ดมารวมกัน แต่ละเม็ดยาวตั้งแต่ 4 – 35 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกจะมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบน ไม่สม่ำเสมอ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โพลาริซ จะเห็นลักษณะกากบาทสีดำ เรียกว่า Birefringence ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวต่างกัน แบ่งได้เป็น 2 แบบ แบบแรกสายพอลิเมอร์ของอะไมโลสเรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบ มีอะไมโลสบางส่วนเรียงขนานกับส่วนที่เป็นสายตรงส่วนนอกของอะไมโลเพกติน และยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้โมเลกุลบริเวณนี้จับกันอย่างหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง บริเวณนี้ เรียกว่า Crystalline regions หรือ Micelles เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดลักษณะ Birefringence ของเม็ดแป้ง Crystalline regions นี้มีความสามารถในการดูดน้ำและพองตัวต่ำมาก ส่วนแบบที่สอง โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินต่ำกว่าแบบแรก บริเวณที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบนี้ เรียกว่า Amorphous regions เป็นส่วนที่ดูดน้ำได้ดี และพองตัวได้ง่าย

ตารางที่ 2.6 สมบัติของแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง [9]

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

2.2.3.2 การย่อยสลายของแป้ง

แป้งสามารถย่อยสลายได้หลายทาง ได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา และการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2.3.2.1 การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by Fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลาย หรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี ได้แก่ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ

1. การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด การเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวก เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

2. การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเป็นสาเหตุหลัก หรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ เช่น ผลิตภัณฑ์ของ mycotoxin

โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น alfatoin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือร่อยด่างดำที่เกิดขึ้นบนสิ่งทอ

3. การเกิดรอยดำ (Soiling)

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

2.2.3.2.2 การย่อยสลายตามลักษณะของการทำงานของเอนไซม์

1. เอนไซม์ย่อยภายนอก (Exo - enzyme)

1.) เบต้า - อะไมเลส (β - amylase ; 1,4 - α - D - glucan maltohydrolase)

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

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

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

2. เอนไซม์ย่อยภายใน (Endo - enzyme)

แอลฟาอะไมเลส (Alpha-amylase ; endo-1,4- α -D-glucan glucohydrolase)

จัดเป็น extracellular enzyme คือ เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแล้วถูกขับออกมาออกเซลล์ พบได้ในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์หลายชนิด เป็นเอนไซม์ที่ทำงานภายในโมเลกุลแป้ง โดยจะย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ที่ตำแหน่งกิ่งก้านของแป้งได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยแป้ง คือ มอลโตส กลูโคส และลิมิตเดกซ์ทริน การทำงานของเอนไซม์ต้องการแคลเซียมไอออนเข้าร่วมทำงาน มีความเสถียรที่ pH 5.5 - 9.0 และที่อุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 150°C ในทางอุตสาหกรรมจะได้เอนไซม์จากเชื้อรา

และแบคทีเรีย เมื่อใช้แอลฟาอะไมเลสในการย่อยแป้ง จะทำให้ความหนืดและความสามารถในการย่อยติดสีไอโอดีนลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้ reducing power เพิ่มขึ้นด้วย

3. เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (Debranching enzyme)

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

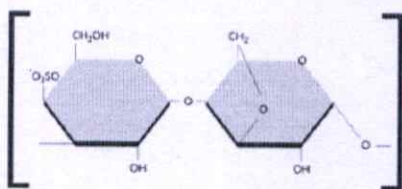
2.) พุลูลานาส (Pullulanase ; Pullulan 6-glucanohydrolase) เป็นเอนไซม์ที่ใช้ตัดพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก ของพุลูลาน และอะไมโลเพคติน แต่การทำกิจกรรมไม่สมบูรณ์เท่ากับการย่อยโดยไอโซอะไมเลส และทำกิจกรรมร่วมกับไกลโคเจนได้ จะสามารถย่อยได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2 – 3 หน่วย แต่ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย เอนไซม์มีความเสถียรที่ pH 4.5 – 5.5 และที่อุณหภูมิ 50°C เอนไซม์ชนิดนี้พบได้ในพืช สัตว์ และแบคทีเรีย

ในงานวิจัยนี้ใช้แป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งที่ผลิตมากที่สุดในประเทศไทย และเป็นแป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น กาวเป็งเปียกใสและมีความเหนียวสูง

2.3 การจีแนน [3,12]

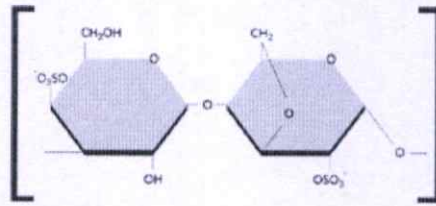
การจีแนน เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตที่มีความยืดหยุ่นสูงเพราะมีรูปแบบการเกิดสายโซ่เกลียว และสกัดจากสาหร่ายทะเลสีแดง แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ แคปปา (kappa, K) ไอโอตา (iota, I) และแลมดา (lambda, λ) การจีแนนทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลกาแลคโตสที่ถูกเอสเตอรีไฟด์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ตำแหน่งและระดับแตกต่างกัน ดังนี้

แคปปากการจีแนน สกัดจาก *Eucheuma cottonii* โครงสร้างประกอบไปด้วย 1,3-linked β -D-galactose-4-sulfate และ 1,4-linked 3,6-anhydro- β -D-galactose (ดังรูปที่ 2.6) ซึ่งในโมเลกุลของ 3,6-anhydro-D-galactose คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 จะถูกเอสเตอรีไฟด์ด้วยหมู่ซัลเฟตประมาณ 20-30% และบางส่วนของ 1,4 linked อาจเป็น galactose-6-sulfate แทน 3,6-anhydro-D-galactose แคปปากการจีแนนมีความไวต่อโปแตสเซียมและสามารถตกตะกอนแยกออกมาจากการจีแนนชนิดอื่นได้โดยใช้โปแตสเซียมคลอไรด์



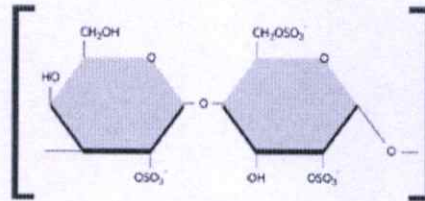
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแคปปากการจีแนน [13]

ไอโอดาคาราจีแนน สกัดจาก *Eucheuma spinosum* โครงสร้างประกอบด้วย 1,3-linked β -D-galactose-4-sulfate และ 1,4-linked 3,6-anhydro- β -D-galactose-2-sulfate (ดังรูปที่ 2.7) ไอโอดาคาราจีแนนมีความไวต่อแคลเซียม



รูปที่ 2.7 โครงสร้างไอโอดาคาราจีแนน [13]

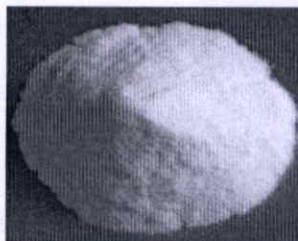
แกลมดาคาราจีแนน โครงสร้างประกอบด้วย 1,3-linked β -D-galactose-2-sulfate และ 1,4-linked β -D-galactose-2,6-disulfate (ดังรูป 2.8)



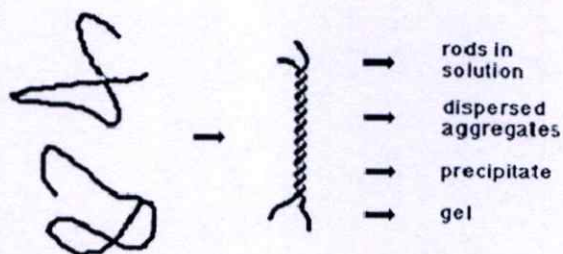
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแกลมดาคาราจีแนน [13]

คาราจีแนนมีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนและมีขนาดอนุภาค 200 mesh มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลว(melting point) 50-70 °C (ดังรูปที่2.9) สมบัติของคาราจีแนนจะขึ้นอยู่กับประจุลบของหมู่ซัลเฟตที่อยู่ใน โมเลกุลเป็นสำคัญและยังแตกต่างกันในคาราจีแนนแต่ละชนิดอีกด้วย คาราจีแนนละลายได้ดีในน้ำร้อนและมีความคงตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 ความคงตัวจะลดลง คาราจีแนนสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนได้ สำหรับแคลป์ตาและไอโอดาคาราจีแนนมีสมบัติในการเกิดเจลเมื่อคาราจีแนนอยู่ในรูปสารละลายในน้ำจะมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่ไม่เป็นระเบียบ (random coil) ขณะเย็นตัวลงจะเกิดโครงสร้างเป็นสายโซ่เกลียวคู่ (double helices) (ดังรูปที่ 2.10) เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะเกิดเป็น โครงสร้าง 3 มิติ โดยพอลิเมอร์แต่ละสายจะรวมตัวเข้ามาใกล้กัน และเกิดเป็นจุดเชื่อมโยง (junction point) ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดการแข็งตัวเป็นเจล และเมื่อศึกษากลไกการเกิดเจลของนมกับแคลป์ตาคาราจีแนน พบว่าจะเกิดเจลขณะลดอุณหภูมิ ขั้นตอนแรกเป็นระยะก่อนเกิดเจล ขั้นตอนต่อมาจะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง

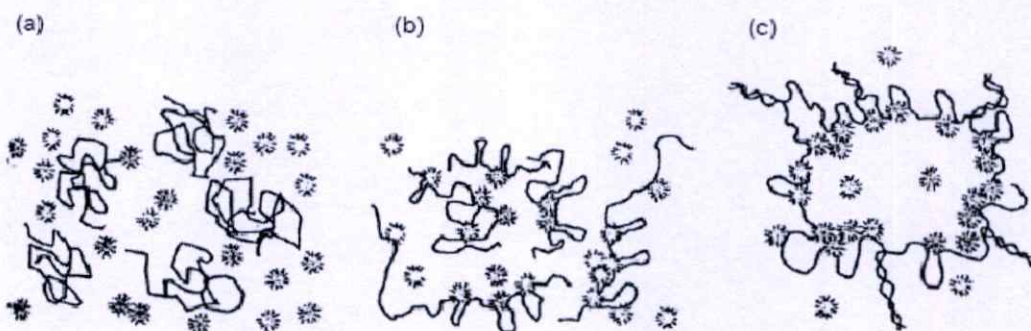
แคลปาคาราจีแนนกับโปรตีน และโปรตีนกับโปรตีน ในขั้นตอนสุดท้ายแคลปาคาราจีแนนจะรวมตัวกันทำให้เกิดโครงสร้าง และความแน่นเนื้อของเจล (ดังรูปที่ 2.11) และการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง casein micelles และไอออตาคาราจีแนนในนมพบว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายนมต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิด coil-helix ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสายของไอออตาคาราจีแนนใน helical form บางส่วนกับ casein micelles ได้



รูปที่ 2.9 ลักษณะของผงคาราจีแนน [13]



รูปที่ 2.10 การเกิด โครงสร้างเกลียว (helix) ในคาราจีแนน [14]



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดเจลของนมกับแคลปาคาราจีแนน (a) เคซีนไมเซลและสายโซ่ที่ไม่เป็นระเบียบ (random coil) ของคาราจีแนนในสารละลาย; (b) การเกิดปฏิกิริยาของเคซีนไมเซลกับคาราจีแนน ;(c) เกิดการสร้างเจลจากคาราจีแนน [14]

เจลที่เตรียมจากการาจีแนนมีคุณสมบัติเปลี่ยนกลับไปมาได้ด้วยความร้อน (thermoreversible gel) และสามารถเกิดปฏิกิริยากับโปรตีนได้ โดยแคลป์การาจีแนนให้เจลที่มีลักษณะเปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (syneresis) การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นผลมาจากร่างแหพอลิเมอร์ในโครงสร้าง 3 มิติ ของเจลหดตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ในร่างแหถูกบีบออกมาด้านนอกของเจล และพบว่าเมื่อผสม โคลค์สปีนกับกับแคลป์การาจีแนนจะช่วยลดการแยกตัวของน้ำของเจลลงได้ และการใช้บูกร่วมกับแคลป์การาจีแนนจะช่วยให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้แคลป์การาจีแนนเพียงอย่างเดียว และสำหรับไอออตาการาจีแนนให้เจลที่มีความยืดหยุ่นและไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ สำหรับแลมดการาจีแนนไม่มีสมบัติในการเกิดเจล การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น แคลป์การาจีแนน เมื่อเติมโปแตสเซียมไอออน (K^+) จะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น แต่ถ้าเติมแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะเกิดเจลที่มีเนื้อแข็งทำให้เกิดรูปทรงได้ง่าย ซึ่งตรงกันข้ามกับไอออตาการาจีแนน เมื่อเติมแคลเซียมไอออนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น เป็นต้น คุณสมบัติที่สำคัญของการาจีแนน แสดงดังตารางที่ 2.7 [14]

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของการาจีแนนแต่ละชนิด [12]

คุณสมบัติ	แคลป์	ไอโอด้า	แลมด้า
<u>การละลาย</u>			
น้ำอุณหภูมิ 80°C	ละลาย	ละลาย	ละลาย
น้ำอุณหภูมิ 20°C	ละลายในสารละลาย	ละลายในสารละลาย	ละลาย
	เกลือโซเดียม	เกลือโซเดียม	
นมอุณหภูมิ 80°C	ละลาย	ละลาย	ละลาย
นมอุณหภูมิ 80°C	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย	ให้ลักษณะขุ่น
สารละลายน้ำตาล 50%	ละลายขณะร้อน	ไม่ละลาย	ละลาย
สารละลายเกลือ 10%	ไม่ละลาย	ละลายขณะร้อน	ละลายขณะร้อน
<u>การเกิดเจล</u>			
เกิดเจล	กับโพแทสเซียมไอออน	กับแคลเซียมไอออน	ไม่เกิดเจล
ลักษณะของเจล	เปราะ แตกง่าย	ยืดหยุ่น	ไม่เกิดเจล
การแยกตัวของน้ำ	เกิดการแยกตัวของน้ำ	ไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ	ไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [15]

ในอดีตมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อตอบสนองการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้เริ่มมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่มาทำการผสมแทนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ *พอลิเมอร์ผสม* ซึ่งหมายถึงการนำพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันทั้งนี้มีประโยชน์หลายประการด้วยกันคือ

- หลีกเลี่ยงปัญหาของความยุ่งยากจากการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่
- ไม่ต้องลงทุนผลิตพอลิเมอร์ใหม่เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะทาง
- สามารถนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเด่นแต่ละชนิดมาผสมกัน เช่น การทำพอลิเมอร์ผสม

ของเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความเปราะและมีความทนทานแรงกระแทกได้สูง กับอีลาสโตเมอร์ซึ่งไม่เปราะแต่มีความแข็งต่ำ (Stiffness) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ใหม่ที่มีสมบัติรวมของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ซึ่งจะแตกต่างจากสมบัติของพอลิเมอร์หลักที่นำมาผสมกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาวะในการผสม สมบัติการไหล สัณฐานวิทยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้และการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ผสมตามต้องการ

2.4.1 การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.1.1 พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว (Miscible blend) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว

2.4.1.2 พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) สามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$$

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระกิบส์

ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว หรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ภูมิภาค คือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสมเรียกว่า *ภูมิภาคหลัก* (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วน

น้อยเรียกว่า *วัฏภาคกระจาย* (Dispersed phase) ซึ่งสามารถตรวจวิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

2.4.2 ความสามารถในการเข้ากันได้

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้

- มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี
- มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านั้น โดยมีการนำสารช่วยผสม (Compatibiliser) มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็ก และทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ

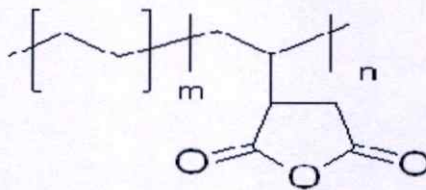
2.4.2.1 *Non-reactive Blending* คือการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสสูตร โครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ร่วม ซึ่งมีหลายชนิดคือพอลิเมอร์ร่วมแบบโคปอลิเมอร์ แบบไตรบลิค แบบกราฟท์ หรือแบบสุ่ม

2.4.2.2 *Reactive Blending* เป็นวิธีการที่เติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะทำการผสม หรือทำให้เกิดการกราฟท์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง

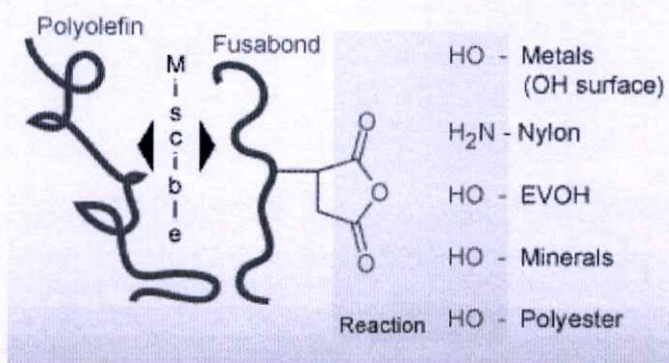
การเติมสารช่วยผสมเป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม แต่ไม่ใช่การทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากสารช่วยผสมมีการจัดเรียงตัวระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมทั้งสองวัฏภาคให้ดีขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการยึดติดระหว่างวัฏภาค ทำให้วัฏภาคกระจายมีการกระจายตัวที่ดี และมีขนาดของวัฏภาคกระจายที่เล็กขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

2.5 พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย (Polyethylene grafted maleic anhydride, PE-g-MA) [16]

พอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วส่งผลให้เมื่อทำการผสมรวมกับวัสดุอื่นที่มีขั้วมักมีสมบัติด้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวไม่ดี แต่สามารถที่จะทำการแก้ไขได้โดยการเติมสารอีกชนิดลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีการเติมสารฟิวซาบอนด์ เอ็มบี 226ดี (Fusabond MB 226D เป็นสารช่วยผสม ซึ่งสารนี้เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำต่อกิ่งกับมาเลอิกแอนไฮไดรย (PE-g-MA : Polyethylene grafted Maleic anhydride) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.12 โดยมาเลอิกแอนไฮไดรยกราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้ว ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์(physicochemical properties)ดีขึ้น โดยการเพิ่มความเป็นขั้วของพอลิเอทิลีน และความสามารถในการยึดติด พบว่าแอนไฮไดรยเป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงจะเกิดอันตรกิริยากับแป้งและคาราจีแนนทำให้ความสามารถในการเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดมีเพิ่มมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [17]



รูปที่ 2.13 การทำงานของพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรย [18]

2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [19,20]

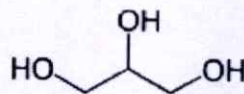
พลาสติไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

2.6.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์ (Plasticization and Plasticizers)

พลาสติไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์ โดยพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า **พลาสติไซเซชันภายนอก (External plasticization)** และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า **พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)** ซึ่งพลาสติไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย ข้อดีของพลาสติไซเซชันภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่ก็มีจุดด้อย คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้ โดยทั่วไปแล้วพลาสติไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ T_g ประมาณหรือใกล้เคียง $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ **พลาสติไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer)** และ **พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer)** โดยพลาสติไซเซอร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้ และไม่แยกออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

เมื่อพลาสติไซเซอร์ถูกเติมลงไปในโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติไซเซอร์ไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ทุติยภูมิ (secondary covalent) ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันอ่อนลง เกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว ส่วนพลาสติไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization) สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน

มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ดีนอกจากนี้ไม่ควรมีสี กลิ่น รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติกไซเซอรท์ที่มีสมบัติเหมาะสมจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำผลิตภัณฑ์ให้แห้ง พลาสติกที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถคงทนความยืดหยุ่นตลอดการใช้งานพลาสติกไซเซอรท์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอไดและโอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออลและลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิดพอลิออล (Polyols) พอลิไฮดริคแอลกอฮอล์เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิออลบางชนิดพบในน้ำผลไม้ โดยเฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่นซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (hydrogenation) พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับน้ำและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล เนื่องจากถูกดูดซับน้ำได้ช้ำมากจึงสามารถใช้กับผู้ที่ เป็นโรคเบาหวาน ได้กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโครงสร้าง $C_3H_8O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาลสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง โครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของกลีเซอรอล [21]

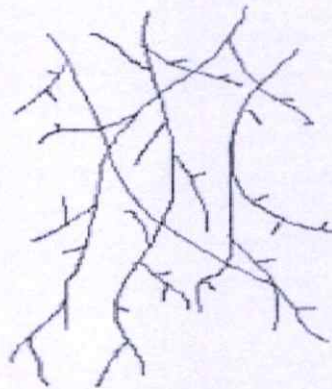
2.7 พอลิเอทิลีน (Polyethylene ,PE) [22,23,24]

2.7.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดแรกที้นำมาใช้ในการค้า เริ่มผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอังกฤษ โดยบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) โดยมีกระบวนการผลิตและลักษณะโดยทั่วไปของ LDPE ดังนี้ คือ

- ความดันที่ใช้ในการผลิตสูงมาก ประมาณ 1,000 – 3,000 บรรยากาศ (15,000 – 45,000 psi)
- เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันผ่านกลไกอนุมูลอิสระ โดยมีออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่ม ทำให้เกิดโซ่กิ่งจำนวนมาก ซึ่งโซ่กิ่งโดยมากเป็นหมู่อัลคิลสายสั้นๆ เช่น เอทิลหรือบิวทิลซึ่งเกิดจากกลไก Intramolecular backbiting

- อุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือ 200 – 400 °C
- มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง และมีกิ่งก้านสาขาภายในโมเลกุลมาก
- โมเลกุลของ LDPE มีสายโซ่หลักเป็นคาร์บอนที่มีหมู่ข้างเคียงของคาร์บอนสี่ถึงหกอะตอมติดกับสายโซ่หลักอย่างสุ่มๆ และ โครงสร้างของสายโซ่ LDPE แสดงดังรูปที่ 2.15

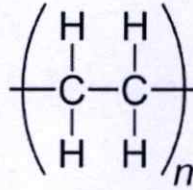


รูปที่ 2.15 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) [24]

สมบัติโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีดังต่อไปนี้

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

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมีการใช้อย่างกว้างขวางเพราะว่าราคาไม่แพง ยืดหยุ่นได้ ทนทานมาก และทนต่อสารเคมีกรดและด่าง อีกทั้งยังแปรรูปได้ง่าย เป็นฉนวนได้ดีและไม่มีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่น LDPE ถูกนำมาขึ้นรูปเป็นขวด หีบห่ออาหาร และของเล่นต่างๆ และสูตรโครงสร้างโมเลกุล LDPE แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [25]

การใช้งานของ LDPE ในปัจจุบัน

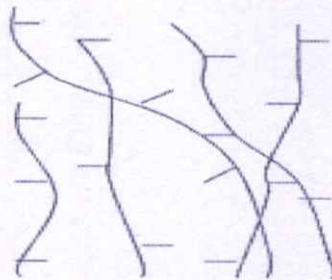
LDPE สามารถนำไปใช้แปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

- ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ฟิล์มและงานเคลือบ (Laminate) หลายๆ ชั้น เช่น ฟิล์มหดหุ้ม (Shrink Wrap) หรือถุงที่ต้องการความใสมากๆ
- งานฉีดแบบ(Injection Moulding)
- อื่นๆ เช่น ฟิล์มอัดรีดร่วม(Coextrusion) งานรีดท่อ (Pipe Extrusion) งานเคลือบสายไฟและเคเบิล(Wire and Cable Coating)

2.7.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene ;

LLDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบซีเกลอร์เนททา(Ziegler-Natta)หรือแบบฟิลลิปป์(Phillips)โดยใช้ความดันต่ำ ในกระบวนการผลิตมีการใส่โคมอนอเมอร์จำพวก 1-alkene เช่น 1-butene (นิยมใช้มากกว่าและราคาถูก) 1-hexene 1-octene หรือ 4-methylpentene ลงไปประมาณร้อยละ 10 ทำให้มีสายโซ่คาร์บอนสั้นๆเกิดขึ้นที่พอลิเมอร์หลัก ดังนั้นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจึงเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่าและลักษณะของกิ่งจะสั้นกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ความสม่ำเสมอของโมเลกุลและความเป็นผลึกลดลง สมบัติโดยทั่วไปคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.915–0.925 g/cm³แต่มีความแข็งแรงมากกว่าจึงนิยมใช้ในการผลิตฟิล์ม และมีโครงสร้างของสายโซ่ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) [24]

2.8 สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกพีไลฟ์ (P-life Degradable Plastic) [26,27]

พีไลฟ์ (P-life) เป็นชื่อทางการค้าของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกของบริษัทพีไลฟ์ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเป็นเทคโนโลยีที่มีการจดสิทธิบัตรตาม US Pat.No.6,482,872 “Process for Manufacturing a Biodegradable Polymeric Composite” และสารเติมแต่งพีไลฟ์(P-life) เป็นสารผสมสูตรเฉพาะที่สามารถเกิดการย่อยสลายได้โดยประกอบด้วยโลหะทรานซิชันที่เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Pro-oxidant catalysts) และนิยมใช้กับพอลิโอลิฟิน เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน เนื่องจากพอลิเมอร์กลุ่มนี้ไม่ย่อยสลายหรือเกิดการย่อยสลายได้ช้ามาก ดังนั้นจึงมีการเติมสารพีไลฟ์ลงไปในพอลิโอลิฟินเพียง 1-3% เพื่อเร่งอัตราการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้นภายหลังการทิ้งจึงทำให้เกิดการย่อยสลายเร็วขึ้น ซึ่งขั้นตอนการเสถียรภาพของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(P-life Degradable Plastic) เป็นดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยพอลิโอลิฟินที่มีการเติมพีไลฟ์เมื่อเจอแสงอาทิตย์ ความร้อนและก๊าซออกซิเจน จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ผลที่ได้คือ น้ำหนักโมเลกุลลดลงและได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น กรดคาร์บอกซิลิก

ขั้นตอนที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ภายในดิน โดยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกย่อยสลายต่อโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ

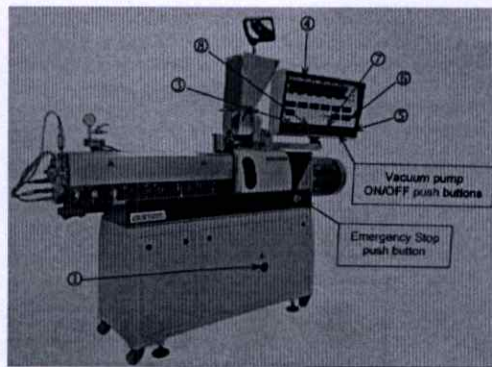
ส่วนประกอบและสมบัติเบื้องต้น

- เกลือโลหะของกรดไขมัน(Metal Salt of Fatty Acid) 50-70%
- โลหะที่หายาก (Rare Earth Compound) 10-20%
- สารหล่อลื่น(Lubricant) 10-20%
- ได้ผ่านการรับรองจาก FDA ซึ่งสามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับอาหารได้
- จุดหลอมเหลว(Melting Point) 80-95 °C

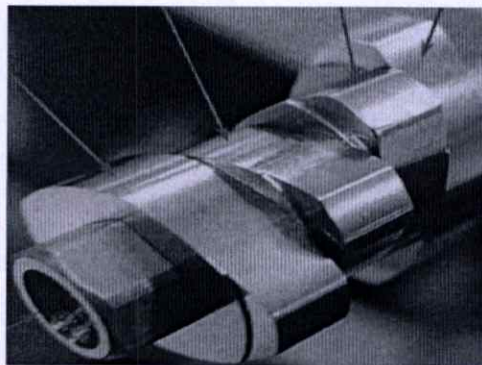
2.9 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย

2.9.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) [28]

เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีจุดประสงค์หลากหลายในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ กล่าวคือ เม็ดพลาสติกที่ป้อนเข้ามาในระหว่างสกรูของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่สกรู (barrel) จะถูกอัดหลอม ผสม เกิดขึ้นในระหว่างที่มีการไหลผ่านไปทางท่อและออกไปทางหัวคาย ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของสกรูและกระบอกใส่สกรูทำให้เกิดพลังงานเฉือน (shearing energy) ช่วยในการผสมและหลอมเหลว ในกรณีของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่อาจทำให้การผสมและการเฉือนเพิ่มขึ้น โดยอาศัยอุปกรณ์เสริมไปติดเพิ่มระหว่างส่วนของเฟืองสกรู (screw flights) (รูปที่ 2.18 และ 2.19) ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ เพื่อเตรียมเม็ดพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ใช้มีลักษณะเป็นแบบมีเฟืองไม่ตรงกันแต่หมุนไปทางเดียวกัน (Co-rotating Intermeshing Twin screw extruder) จึงทำให้เกิดการผสมที่ดี โดยสกรูมีความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) = 40:1 และมีบริเวณให้ความร้อน (Heating Zone) 10 บริเวณ



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ [29]



รูปที่ 2.19 ลักษณะการเรียงตัวของเม็ดสกรู [29]

2.9.2 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม[30]

การเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องเช่นเดียวกับกระบวนการอัดรีดอื่นๆ การผลิตเริ่มต้นจากการอัดรีดท่อเทอร์โมพลาสติกหลอม ดายที่ใช้เป็นแบบวงแหวนสองชั้น (Annular die) โดยการอัดรีดในแนวตั้งฉากกับแนวของเครื่องอัดรีดหลังจากนั้นทำการดึงท่อพลาสติกในแนวแกนของการอัดรีด (axial direction) แล้วใช้ลมเป่าท่อในขณะเดียวกันทำให้พลาสติกหลอมพองตัวออกในแนวรัศมี (radial direction) เกิดเป็นลูกโป่ง ที่มีผนังบาง (thin-walled bubble) เส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดายหลายเท่า ลูกโป่งที่ร้อนจะถูกหล่อเย็นด้วยลมเป่าที่ผิวด้านนอกของลูกโป่ง โดยมีหัวเป่าเป็นลักษณะวงแหวนอยู่ด้านนอกของหัวดาย (เรียกว่า air ring) วงแหวนจะเป็นตัวปรับทิศทางของลมเป่าให้กระทบลูกโป่งในแนวตั้งฉาก และทำให้กระแสลมเป่ามีความสม่ำเสมอไม่พุ่งออกไปตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ทำให้การหล่อเย็นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ลักษณะของเครื่องและกระบวนการเป่าฟิล์มแสดงดังรูปที่ 2.20 ลูกโป่งจะถูกปรับให้มีขนาดที่เหมาะสมและถูกจำกัดอยู่ในส่วนที่ช่วยพยุงฟิล์ม (sizing basket or calibration unit) หลังจากนั้น รวบลูกโป่งโดยป้อนให้ลูกโป่งเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะหุ้มกำมะหยี่ที่ตีบเข้า (collapsing boards) และป้อนเข้าในช่องว่างของลูกกลิ้งสองตัว (nip rolls) ทำให้ลูกโป่งแบนลงเป็นฟิล์มสองชั้น หลังจากนั้นทำการดึงฟิล์ม โดยใช้หน่วยดึง (haul-off unit) และตอนสุดท้ายฟิล์มจะถูกพันเป็นม้วนด้วยตัวม้วนฟิล์ม (winder) แล้วนำไปทำเป็นถุงหรือนำไปทำผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆต่อไป

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเป่าฟิล์ม เช่น ความเร็วของสกรู อัตราราดึง และขนาดของลูกโป่งที่เหมาะสมกับส่วนพยุงฟิล์ม การปิดอากาศที่ใช้เป่าเข้าภายในลูกโป่ง มีการใช้ทอมที่สำคัญในการอธิบายกระบวนการแปรรูปพลาสติกโดยการเป่าฟิล์ม เช่น อัตราราดึงของลูกโป่ง (Blow-up ratio) และอัตราราดึง (Draw-down ratio)

อัตราราดึงของลูกโป่ง (Blow-up ratio) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกโป่งกับเส้นผ่านศูนย์กลางของดาย โดยทั่วไปอัตราราดึงของลูกโป่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2:1 ถึง 6:1 ซึ่งหมายความว่า ดายตัวหนึ่งสามารถทำถุงได้หลายขนาด

อัตราราดึง (Draw-down ratio) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความเร็วของฟิล์มที่ดึงโดยลูกกลิ้ง (หรือ โดยหน่วยดึง) กับความเร็วของการอัดรีดซึ่งความเร็วของการอัดรีดคำนวณได้จากน้ำหนักของพลาสติกที่ผลิตได้ต่อหน่วยเวลา แล้วแปรให้เป็นปริมาตรแล้วค่อยนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของดาย

วัสดุที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกเป็นเทอร์โมพลาสติก เช่น พลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ (LDPE, LLDPE, HDPE และ HMW-HDPE) จะเป็นพลาสติกที่ใช้ในกระบวนการเป่าฟิล์มมากที่สุด ในบรรดาพอลิโอเลฟินส์ มีการใช้ LDPE มากที่สุด นอกจากนี้พลาสติกอื่น ๆ ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม เช่น ไนลอน พอลิคาร์บอเนต พอลิไวนิลคลอไรด์ PET และ PP

เทอร์โมพลาสติกที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม ต้องมีค่าความหนืดสูง และมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่าวัสดุที่ใช้ในการผลิตฟิล์ม โดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดา ตัวอย่างกรณี LDPE ที่ใช้ในการเป่าฟิล์ม มีค่าดัชนีการหลอมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 กรัม/10 นาที (โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่ 190 °C และใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม) ในขณะที่ LDPE ที่ใช้ในการผลิตฟิล์มโดยกระบวนการอัดรีดแบบธรรมดามีค่าดัชนีการหลอม อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 6 กรัม/10 นาที

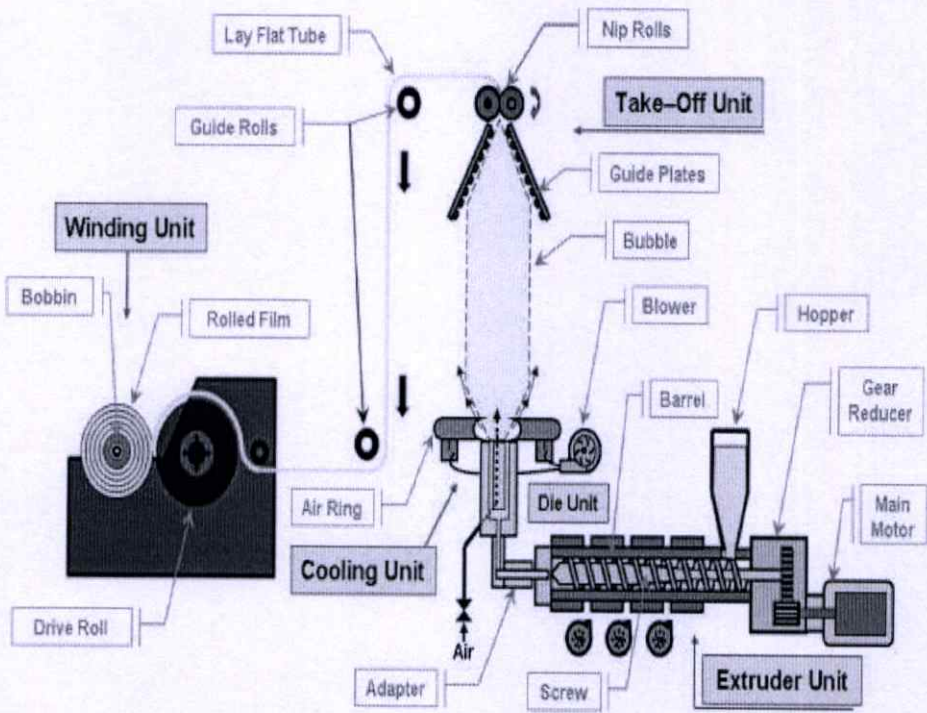
2.9.2.1 หลักการของฟิล์มเป่า [30,31]

ฟิล์มเป่ามีความหนาน้อยกว่า 0.020 นิ้ว (0.05 เซนติเมตร) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ทำฟิล์มประกอบด้วยเครื่องอัดรีดต่ออยู่กับคายนประเทวงแหวน (annular die) ซึ่งโดยปกติจะมีทิศอยู่ในแนวตั้ง การผลิตฟิล์มเป่าแบบท่อ (tubular blown film) จะใช้อากาศและการดึงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยอากาศที่อยู่ภายในจะช่วยทำให้เกิดฟองขนาดใหญ่ และมีส่วนของลูกกลิ้งช่วยรวบฟิล์มอยู่ทางด้านบน ฟิล์มจะขยายออกประมาณ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมตามแนวขนานและขณะเดียวกันจะถูกดึงในทิศทางตั้งฉาก ผลที่ได้ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง (biaxial orientation) เกิดการตกผลึก (crystallization) และแข็งตัว (freeze) อยู่ในทิศทางการจัดเรียงตัวนั้น

ฟิล์มที่เกิดการขยายตัวเนื่องจากการเป่ามีกระบวนการเป็นแบบแรงดึง (Tensile force) มากกว่าที่จะเป็นแรงเฉือน (shear force) เพราะความเค้นเฉือนมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบวิสโคอิลาสติกทำให้ความหนืดเนื่องจากแรงดึงมีค่าสูงถ้าความหนืดเนื่องจากแรงดึงไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเครียด เรียกว่า เทราโตเนียน (Troutonian) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเค้นใน นิวโตเนียน ซึ่งแบ่งออกเป็นกาทำให้แข็งเนื่องจากการดึง (Tension stiffening) และการทำให้บางเนื่องจากการดึง (tension thinning) เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบกึ่งมีการตอบสนองแบบอิลาสติก จะเป็นการทำให้แข็งเนื่องจากการดึง พอลิโอเลฟินส์แบบเส้นตรงและพอลิพรอพิลีน เป็นแบบการทำให้บางเนื่องจากการดึง เป็นต้น

เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากคายนจะค่อย ๆ บางลง ความเค้นจะมากขึ้นและวัสดุที่ยังไม่แข็งพอจะเกิดความเครียดต่อไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดเกิดการแตกของฟิล์ม การทำให้แข็งเนื่องจากการดึงทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นหรือมีการตอบสนองแบบอิลาสติกมากพอที่จะชดเชยการเพิ่มของความเค้น ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น อัตราการตกผลึกเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อเสถียรภาพ กล่าวคือการผลิตฟิล์มโดยวิธีนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่า แนวเส้นการแข็งตัว (Freeze line or frost line) เกิดขึ้นตามทางที่เกิดฟองซึ่งเป็นบริเวณที่พอลิเมอร์ตกผลึกทำให้ความใส (transparent) ลดน้อยลง

อิทธิพลของแนวเส้นแข็งตัวนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงและทำให้เกิดการแข็งขึ้นด้วยเหตุนี้อัตราการตกผลึกจึงไม่ควรสูงเกินไปจนทำให้ไม่เกิดการจัดเรียงตัวในสองทิศทาง



รูปที่ 2.20 แสดงกระบวนการเป่าฟิล์ม [32]

2.9.2.2 สมบัติของฟิล์มเป่า [31]

สมบัติของฟิล์มเป่าได้แก่ ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด [ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวาง โดยใช้วิธีทดสอบของ เอลเมนดอร์ฟ (Elmendorf)] ความทนทานต่อแรงกระแทก ความใส (ความขุ่น) ความเงาของผิว ความแข็งแรงดึง (ทั้งในทิศทางตามเครื่องจักรและทิศทางตามขวาง) เปอร์เซ็นต์การยืดออก ความหนา การจัดเรียงตัว และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก เป็นต้น ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อสมบัติเหล่านี้ได้แก่ อุณหภูมิการหลอมเหลว ความหนาของฟิล์ม ความสม่ำเสมอของความหนาแผ่นฟิล์ม (วัดโดยใช้เครื่องวัดความหนา) อัตราส่วนการดึงลง อัตราส่วนการเป่า ความสูงของแนวเส้นแข็งตัว (frost line height) และความสม่ำเสมอของความดันซึ่งช่วยลดหรือกำจัดกาเกิดเป็นคลื่น (surging)

ความหนาขึ้นอยู่กับช่องว่างของคาน อุณหภูมิของการหลอมเหลว อัตราส่วนการเป่าและอัตราการดึงลง ส่วนความสูงของแนวเส้นแข็งตัวคือระยะทางเหนือคานที่เกิดความขุ่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกาเกิดการตกผลึกในขณะที่ของหลอมเหลวเย็นตัวลง จัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อความหนาของฟิล์ม พบว่าถ้าเพิ่มความสูงของแนวเส้นแข็งตัว เปอร์เซ็นต์ของความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ความเงาของ

ผิวจะเพิ่มขึ้น แต่ความใสจะลดลง ความไม่สมบูรณ์ของผิวลดลง และความแข็งแรงต่อแรงกระแทก ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของแนวเส้นแข็งตัวยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการหลอมเหลวและ อัตราของการอัดรีดอีกด้วย โดยตัวแปรทั้งสองเมื่อเพิ่มขึ้น ความสูงของแนวเส้นแข็งตัวจะเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการเป่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อการดึง โดยจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามขวางและลดลงใน ทิศทางตามเครื่อง แต่จะมีผลตรงข้ามต่อความแข็งแรงต่อการฉีกขาด นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วน การเป่าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตรา ส่วนการดึงลงที่ เพิ่มขึ้นจะให้ผลตรงกันข้าม

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิไลวรรณ โพล้งมี [33] ได้ทำการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้ จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ โดยทำ การผสมอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์ร่วมกับแอนติโมนีออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการหน่วงติดไฟ ให้กับฟิล์มย่อยสลาย โดยใช้พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮดรายเป็นสารช่วยผสม และ กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ นำมาผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องอัดรีดแบบเกลียว หนอนคู่ แล้วทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง โดยทำการศึกษาหาปริมาณ พลาสติกไซเซออร์และปริมาณสารช่วยผสมที่เหมาะสม ที่มีต่อการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ทซ์ จากนั้นทำการศึกษาถึงปริมาณของ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์ ในฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการ ติดไฟได้ที่มีต่อสมบัติการเผาไหม้ตามมาตรฐาน UL 94V-0 Test สมบัติการย่อยสลายในดิน และ สมบัติอื่นๆ ได้แก่ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติ เชิงกล จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณกลีเซอรอล 18% และปริมาณพอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิก แอนไฮดราย 3% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการ เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทซ์ โดยทำ ให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลและค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงที่สุด ผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐาน วิทยา พบว่าแป้งมันสำปะหลังในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ทซ์มีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์ผสมผล การศึกษาสมบัติการเผาไหม้และสมบัติการย่อยสลายในดินของฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการ ติดไฟได้พบว่า ฟิล์มมีอัตราการเผาไหม้ที่ลดลงจนไม่เกิดการลุกติดไฟในขณะทำการทดสอบ และ ฟิล์มมีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในดินได้เร็วขึ้น เมื่อมีปริมาณของ อะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และปริมาณของแอนติโมนีออกไซด์เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาสมบัติทางความ ร้อน พบว่าอะลูมิเนียมไตรไฮดรอกไซด์และแอนติโมนีออกไซด์มีผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์มีความสามารถในการ

ด้านทานความร้อนดีขึ้น ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มมีสมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยซึ่งให้ผลสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา

Huang C.Y และคณะ [34] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารช่วยผสมที่มีต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้ง ศึกษาผ่าน 2 กระบวนการและทำการสังเคราะห์สารช่วยผสม 2 ชนิด คือ มาลิกิกแอนไฮดรยด์ต่อกิ่ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ที่ผ่านการเคลือบด้วย Plasma (Ma-g-PLDPE) และ กรดอะคิลิกต่อกิ่ง กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผ่านการด้วย 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 หมู่แอนไฮดรยด์ทำให้เกิดความเป็นขี้ว และการเชื่อมโยงภายใน โมเลกุลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลของการผสมสารช่วยผสม คือ Ma-g-PLDPE กับ กลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำแป้ง กับ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมตาม ก่อนการผสมในเครื่องผสมเกลียวหนอนเดี่ยว เมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำให้ขนาดอนุภาคของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ลดลง หลังการผสม เนื่องจากหมู่แอนไฮดรยด์ที่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไม่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำได้ โดยอนุมูลแอนไฮดรยด์จะทำให้รูปร่างของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเมื่อทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า น้ำหนักของพอลิเมอร์ ลดลงไป 65 %wt โดยการเติมสารช่วยผสมที่มีหมู่แอนไฮดรยด์จะทำให้ น้ำหนักของพอลิเมอร์ลดลงมากกว่าไม่เติมสารช่วยผสม

Rodriguez-Gonzalez F.J. และคณะ [35] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช (Thermoplastic starch) ด้วยกระบวนการที่แตกต่างจากทั่วไป ซึ่งจะลดกระบวนการผสมให้ได้ผลในขั้นตอนเดียว (one-step process) โดยจะทำการรวมเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw extruder) เข้ากับเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ซึ่งจะทำการผสมด้วยระบบหลอมเหลว โดยจะทำการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นจะฉีดพอลิเอทิลีนที่หลอมเหลวดีแล้วเข้าเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ที่มีเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช หลอมเหลวและผสมเข้ากันดีกับกลีเซอรอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดังกล่าวจะให้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การผสมด้วยกระบวนการอื่น โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลในแนวเครื่องจักร รวมทั้งสามารถทำการผสมเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นถึง 45 %ซึ่งจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจะช่วยให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติได้ง่ายยิ่งขึ้น

Thunwall M. และคณะ [36] ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) โดยทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งมันสำปะหลัง 2 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังทั่วไป และแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ ร่วมกับกลีเซอรอล ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอไรท์กับแป้งมันสำปะหลังดังกล่าว ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw extruder) ที่ต่อเข้ากับเครื่องเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (Blown film) โดยในขั้นตอนการผสมจะผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล ให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะนำไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่าเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ จะมีเสถียรภาพในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่ดีกว่า และฟิล์มที่ขึ้นรูปได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

Tecante A. และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมกาไหลและสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติกของของผสมระหว่างแป้งข้าวโพดที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วกับแคปไซซินในสถานะของเหลวหนืดและสถานะเจล พบว่าเมื่อให้แรงพลวัตน์ (Oscillatory test) ที่อุณหภูมิ 60 °C การกระจายตัวของของผสมส่วนใหญ่มีพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (Solid-like) และพฤติกรรมคล้ายของแข็งนี้จะเกิดน้อยลงเมื่อความเข้มข้นของแป้งต่ำ และเมื่อทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 25 °C มีแนวโน้มของพฤติกรรมคล้ายของแข็งที่คล้ายกันกับที่อุณหภูมิ 60 °C แต่มีค่าอิลาสติกมอดุลัสสูงกว่าเล็กน้อย และมีลักษณะความยืดหยุ่นสูง ที่ความเข้มข้นของแป้งสูง

คอร์มีระ สะหัดอีดำ และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังตัดแปร (ย่อยด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล ที่ระยะเวลา 0, 0.5, 1, 2 และ 3 ชั่วโมง) กับพอลิแซคคาไรด์ 2 ชนิด คือ คาราจีแนน และวุ้น อัตราส่วนของแป้งต่อพอลิแซคคาไรด์ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 10:90 และ 0:100 และศึกษาผลของน้ำตาลซูโครส (0, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์) ต่อสมบัติของเจลผสม ได้แก่ ความหนืด อุณหภูมิการเกิดเจล อุณหภูมิการหลอมเหลว การแยกชั้นการขับน้ำออกจากเจล และลักษณะเนื้อสัมผัส ผลการศึกษาเจลผสมระหว่างแป้งกับคาราจีแนนพบว่า อัตราส่วนของแป้งมีผลต่อสมบัติของเจลผสมอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราส่วนของแป้งต่อคาราจีแนน 60 : 40 และ 40 : 60 ความหนืดของสารผสมลดลง การเซตตัวของเจลช้า อุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่าเจลคาราจีแนน เกิดการแยกชั้น และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลด้อยลง แต่จะให้การขับน้ำที่ลดลง ส่วนที่อัตราส่วน 20 : 80 และ 10 : 90 ความหนืดของสารผสมสูงขึ้น การเซตตัวของเจล และอุณหภูมิการหลอมเหลวใกล้เคียงกับเจลคาราจีแนน ไม่เกิดการแยกชั้น บางชุดการทดลองมีลักษณะเนื้อสัมผัสดีกว่าและให้การขับน้ำต่ำกว่าเจลคาราจีแนน ส่วนระยะเวลาในการย่อยแป้งมีผลต่อสมบัติของเจลผสมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการย่อยแป้งความหนืดของสารผสมจะลดลง อุณหภูมิการหลอมเหลว และการขับน้ำของเจลสูงขึ้น แต่ไม่มีผลในด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของเจล โดยเฉพาะแป้งที่ไม่ผ่านการย่อยและผ่านการย่อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ส่วนเจลผสมระหว่างแป้งกับวุ้น ผลของสัดส่วนและระยะเวลาในการย่อยแป้งจะให้ผลในทำนองเดียวกับเจลผสมของแป้งกับคาราจีแนน โดยให้

อุณหภูมิการเกิดเจลอุณหภูมิการหลอมเหลว และการจับน้ำของเจลให้ผลดีกว่าเจลผสมของแป้งกับคาร์ราจีแนน และไม่เกิดการแยกชั้น ในขณะที่เนื้อสัมผัสของเจลส่วนใหญ่มีลักษณะคล้ายกว่า ซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทเยลลี่ และผลการศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสต่อสมบัติของเจลผสมระหว่างแป้ง (ไม่ผ่านการย่อยและย่อยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง) กับคาร์ราจีแนน ที่อัตราส่วน 20 : 80 และ 10 : 90 พบว่าความหนืดของสารผสม อุณหภูมิการเกิดเจล อุณหภูมิการหลอมเหลว และลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลสูงขึ้นตามปริมาณของน้ำตาลซูโครสที่เพิ่มขึ้น ส่วนการจับน้ำของเจลลดลง โดยส่วนใหญ่ให้ผลที่ดีกว่าเจลผสมที่ไม่เติมน้ำตาลซูโครส

Fabio L. และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของฟิล์มชนิดรับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าผสมแคปไซซิน พบว่าปริมาณความชื้นของฟิล์มกับปริมาณแคปไซซินที่ใส่ลงไป ในฟิล์มมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกัน คือเมื่อปริมาณแคปไซซินเพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์มมีปริมาณความชื้นมากขึ้น (เนื่องจากคาร์ราจีแนนดูดความชื้น) และจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่า ฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ผสมแคปไซซินในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่า Tg ลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องความชื้น (ไอน้ำ) ที่มากขึ้นจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุล ซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น ดังนั้นค่า Tg จึงลดลง

Chaudemanche C. และคณะ [40] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ สมบัติการไหลและสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) ของของผสมระหว่างแคปไซซินกับแป้งข้าวโพดที่ถูกทำให้เกิดเป็นเจลก่อน (Pregelatinised maize starch) เมื่อทำการศึกษาสมบัติการไหลและสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่อุณหภูมิ 60 °C และ 20 °C จากทดลองพบว่าคาร์ราจีแนนและแป้งข้าวโพดที่ถูกทำให้เกิดเป็นเจลก่อน มีลักษณะไม่เข้ากันเล็กน้อย (Incompatible) และต่อมาจะทำการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกในสถานะสารละลายที่อุณหภูมิ 60 °C โดยค่าความหนืดและมอดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ของของผสม จะเป็นฟังก์ชันกับองค์ประกอบของของผสมเมื่อความเข้มข้นทั้งหมดของพอลิเมอร์เท่ากับ 3 % ซึ่งพบว่าค่าความหนืดและมอดูลัสยืดหยุ่นของผสมมีค่าสูงกว่าค่าทางทฤษฎีของคาร์ราจีแนน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปริมาตรกีดกัน (excluded volume effect) ของเม็ดแป้งที่มีอยู่ในสารละลายผสม จากนั้นจะศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกในสถานะเจลที่อุณหภูมิ 20 °C ซึ่งพบว่ามอดูลัสยืดหยุ่นของของผสมไม่เพิ่มขึ้น จึงคาดว่าเกิดเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของของผสมในสถานะเจลมีสูงและเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเม็ดแป้งที่ไม่ละลาย

Ramakrishnan S. และคณะ [41] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลและการหมุนระนาบแสง (Optical rotation) ของแคปไซซินในสารละลายกลีเซอรอลและซอบิทอล โดยทำการทดสอบความสามารถของการละลายในตัวทำละลาย (Solvent solubility parameter) พลังงานศักย์ทางเคมีของน้ำ (water chemical potential) ในวัฏภาคก๊าซ และค่าคงที่การนำไฟฟ้าตัวทำละลาย (Solvent

dielectric constant)จากการทดลองพบว่า กลีเซอรอลและซอพิทอลมีผลต่อกลไกการเกิดเจล และทำให้การจี้เนนเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่อิสระ (coil) กลายเป็นสายโซ่เกลียว (helix)

อับดุล รักรัตน์ [42] ได้ทำการศึกษาผลของสารเร่งการสลายตัวทางแสงที่มีต่อการสลายตัวของฟิล์ม ระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้สารเบนโซฟีโนนเป็นสารเร่งการสลายตัวทางแสง ในงานวิจัยได้ใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ แล้วนำสารมาผสมในเครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องผสมเกลียวหนอนกู่ หลังจากนั้น นำสารผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยศึกษาหาประสิทธิภาพของเบนโซฟีโนนที่มีผลต่อการสลายตัวของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง และศึกษาสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน ปริมาณการออกซิเดชัน สันฐานวิทยา จากนั้นนำฟิล์มไปฉายแสงยูวีและฟ้งดิน แล้ว ติดตามผลการสลายตัวจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง และมอดูลัส) การเกิดหมู่คาร์บอนิล และไฮดรอกซิล อุณหภูมิจุดหลอมเหลวผลึก ความเป็นผลึก และสันฐานวิทยา จากการทดลองพบว่า เบนโซฟีโนนไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อผสมแป้งมันสำปะหลังจะทำให้ความทนแรงดึง และมอดูลัสลดลง แสงยูวีมีผลทำให้ ความทนแรงดึงลดลงแต่ทำให้มอดูลัสเพิ่มขึ้น และพบว่าเบนโซฟีโนนช่วยเร่งการสลายตัวภายใต้แสง ยูวีทำให้สมบัติเชิงกลลดลงอย่างมาก จากการศึกษาปริมาณออกซิเดชัน พบว่า แสงยูวีมีผลทำให้เกิด หมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และหมู่คาร์บอนิลจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ทำการทดลอง โดยฟิล์มที่ผสม เบนโซฟีโนนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจากฟิล์มปกติ แต่ฟิล์มที่ฟ้งดินไม่พบหมู่คาร์บอนิล เนื่องจากไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแต่มีหมู่ไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ทำการย่อยสลาย แป้ง ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าแสงยูวีมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกลดลง เล็กน้อยในทุกสูตร เนื่องจากเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่การฟ้งดินทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึก พบว่าแสงยูวีทำให้ ร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่ทุกสภาวะการทดลองไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึก ผลการศึกษาสันฐานวิทยา พบว่าแสงยูวีทำให้พื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นรูพรุน แฉกร้าว เปราะ แต่การฟ้งดินพบว่า พื้นผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งเกิดรูพรุน แต่ไม่แตกร้าและเปราะเหมือนการฉายแสงยูวี

Abd El-Remhim H.A. และคณะ [43] ได้ศึกษาผลการฟ้งดินและการฉายแสงที่มีต่อ การย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมแป้ง โดยเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ผ่านการทดสอบการย่อยสลายกับไม่ทดสอบ ใช้สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมแป้งที่ ไม่ทดสอบการฟ้งดินและฉายแสงเป็นตัวมาตรฐาน นำฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ผสมแป้งมา ทดลองฟ้งดินจากนั้นนำมาฉายแสงยูวี พบว่า ค่าความทนแรงดึง ลดลง 20-66% การฟ้งดินอย่างเดียว ทำให้ค่าความทนแรงดึงลดลง 10-26% และเกิดการเปลี่ยนแปลง สมบัติทางความร้อน โครงสร้าง ภายในโมเลกุล และสันฐานวิทยา ซึ่งวัดจากเทคนิค DSC , FTIR และSEM ตามลำดับ

พบว่าแสงยูวี เหนียวนำไปเกิดอนุมูลอิสระทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้นทำให้เกิดการย่อยสลายทางแสง ส่งผล ทำให้อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น

Star Color Co.,Ltd [44] ได้เตรียมมาสเตอร์แบรชช่วยในการย่อยสลายพลาสติก โดยศึกษาการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่ง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) ที่ผสมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป แล้วนำโดยนำชิ้นงานทดสอบไปแช่น้ำหนักก่อนทำการเองจิง และจากนั้นนำฟิล์มไปเองจิง (Ageing) ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 12 วัน และนำชิ้นงานออกมาจากตู้อบทุกๆ 2 วัน เพื่อทำการชั่งน้ำหนัก และคำนวณน้ำหนักที่ลดลง จากการทดลองพบว่าฟิล์มที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1% สามารถทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายได้ 40% หลังจากทำการเองจิง 12 วัน และเมื่อเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 2% ฟิล์มทดสอบถูกย่อยได้ถึง 50%

Nazdaneh Y. [45] ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (P-life Degradable Plastic) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีความร้อนเป็นตัวเร่ง (Thermo-oxidation degradation) โดยทำการทดสอบที่สภาวะอุณหภูมิเท่ากับ 65 °C เป็นเวลา 240 ชั่วโมง (10 วัน) จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเองจิงเป็นเวลา 7 วัน ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงจาก 131500 เป็น 23000 และหลังจากเองจิงเป็นเวลา 10 วัน น้ำหนักโมเลกุลลดลงเหลือเพียง 8800 ดังนั้นจึงแสดงว่าเกิดการย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และจากนั้นได้ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยทำการทดลองที่ 2 สภาวะคือ สภาวะคอมโพสและในดิน โดยใช้เวลากการทดลองทั้งหมดเป็น 84 วัน จากการทดลองพบว่าภายใต้สภาวะคอมโพส ที่อุณหภูมิ 58 °C ฟิล์มมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มเป็น 19% และภายในดินที่อุณหภูมิ 23 °C สามารถเกิดการย่อยได้ 4 %

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เกรดอัดรีดสำหรับเป่าฟิล์ม (LD1905F) จากบริษัท SCG Chemical จำกัด (มหาชน) สมบัติเฉพาะของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้ในงานวิจัย [46]

Properties	Test Method	LD1905F	Unit
Resin Properties			
Melt Flow Rate	ASTM D 1238 @ 190°C, 2.16 kg	5.00	g/10 min
Density	ASTM D 1505	0.919	g/cm ³
Melting Point	ASTM D 2117	110	°C
Vicat Softening Point	ASTM D 1525	92	°C
Brittleness Temperature	ASTM D 746	< - 70	°C
Film Properties			
Tensile Strength at Yield	ASTM D 882	MD: -* , TD:100*	kg/cm ²
Tensile Strength at Break	ASTM D 882	MD:200*, TD:150*	kg/cm ²
Tensile Modulus, 2% Secant	ASTM D 882	MD:1700*, TD:1900*	kg/cm ²
Elongation at Break	ASTM D 882	MD:400*, TD:700*	%

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

MD = Machine Direction, TD = Transverse Direction

ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) จากบริษัท ExxonMobil
สมบัติเฉพาะของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ใช้ในงานวิจัย [47]

Properties	Test Method	LLDPE	Unit
Resin Properties			
Melt Flow Rate	ASTM D 1238 @ 190°C, 2.16 kg	1	g/10 min
Density	ASTM D 1505	0.923	g/cm ³
Melting Point	ASTM D 2117	119	°C
Film Properties			
Tensile Strength at Yield	ASTM D 882	MD: 9 , TD:8.5	MPa
Tensile Strength at Break	ASTM D 882	MD:46.1, TD:32.1	MPa
Tensile Modulus, 2% Secant	ASTM D 882	MD:175, TD:181.6	MPa
Elongation at Break	ASTM D 882	MD:470, TD:550	%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3. แป้งสำปะหลังคุณภาพสูง เกรดการค้าจากบริษัท ดวงดีพัฒนา จำกัด
โดยสมบัติของแป้งมันสำปะหลังแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

Properties	Units	Cassava starch
Particle size	µm	20
Moisture Content	%	12 – 15
Purity	%	90

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. แคลปาคาราจีแนนคุณภาพดี เกรดอาหาร(food grade) จากบริษัท เอฟ เอ เฟลเวอร์ จำกัด โดยสมบัติของแคลปาคาราจีแนนแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของแคลปาคาราจีแนน [48]

Properties	Units	Kappa Carrageenan
Particle size	µm	Less than 250
pH (1% solution)	-	7-10
Loss on Drying	-	Not more than 14%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. สารช่วยผสม (Fusabond® E MB 226DY), based on LDPE เกรดการค้าจากบริษัท Dow chemical จำกัด โดยสมบัติของสารช่วยผสมแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของสารช่วยผสม [49]

Properties	Test Method	Units	MB226DY
Melt flow rate	ASTM D1238	g/10 min	1.5
Density	ASTM D1505	g/cm ³	0.93
Melting point	ASTM D3418	°C	122

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. กลีเซอรอล เกรดการค้า จากบริษัท Thai Pure Science Ltd. โดยสมบัติของกลีเซอรอลแสดงดัง ตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สมบัติของกลีเซอรอล [20]

Properties	Units	Glycerol
Specific Gravity	-	1.26
Boiling Point	°C	290
Melting Point	°C	19
Viscosity	mps	1400
Molecular Weight	g/mole	92.09

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

7. สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกเข้มข้น (P-life Degradable Plastic Masterbatch Type: NA207- 66PL-10) จากบริษัท BehnMeyer Chemical จำกัด โดยสมบัติของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกเข้มข้น(พีไลฟ์) แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 สมบัติของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก [50]

<i>P-Life Additive (Catalyst Type)</i>	SMC 2360
Metal Salt of Fatty Acid	50-70%
Rare Earth Compounds	10-20%
Lubricant	10-20%
Melting Point	80-95° C
<i>P-Life Additive (Master Batch Type)</i>	NA207-66PL-10
P-life Dosage SMC 2360 [LDPE(MI=8),Carrie Resin]	10%

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

8. น้ำมันพาราฟิน จากบริษัทเคมีไทยคอปเปอร์เรชั่น จำกัด โดยสมบัติของน้ำมันพาราฟินแสดงดังตารางที่ 3.8

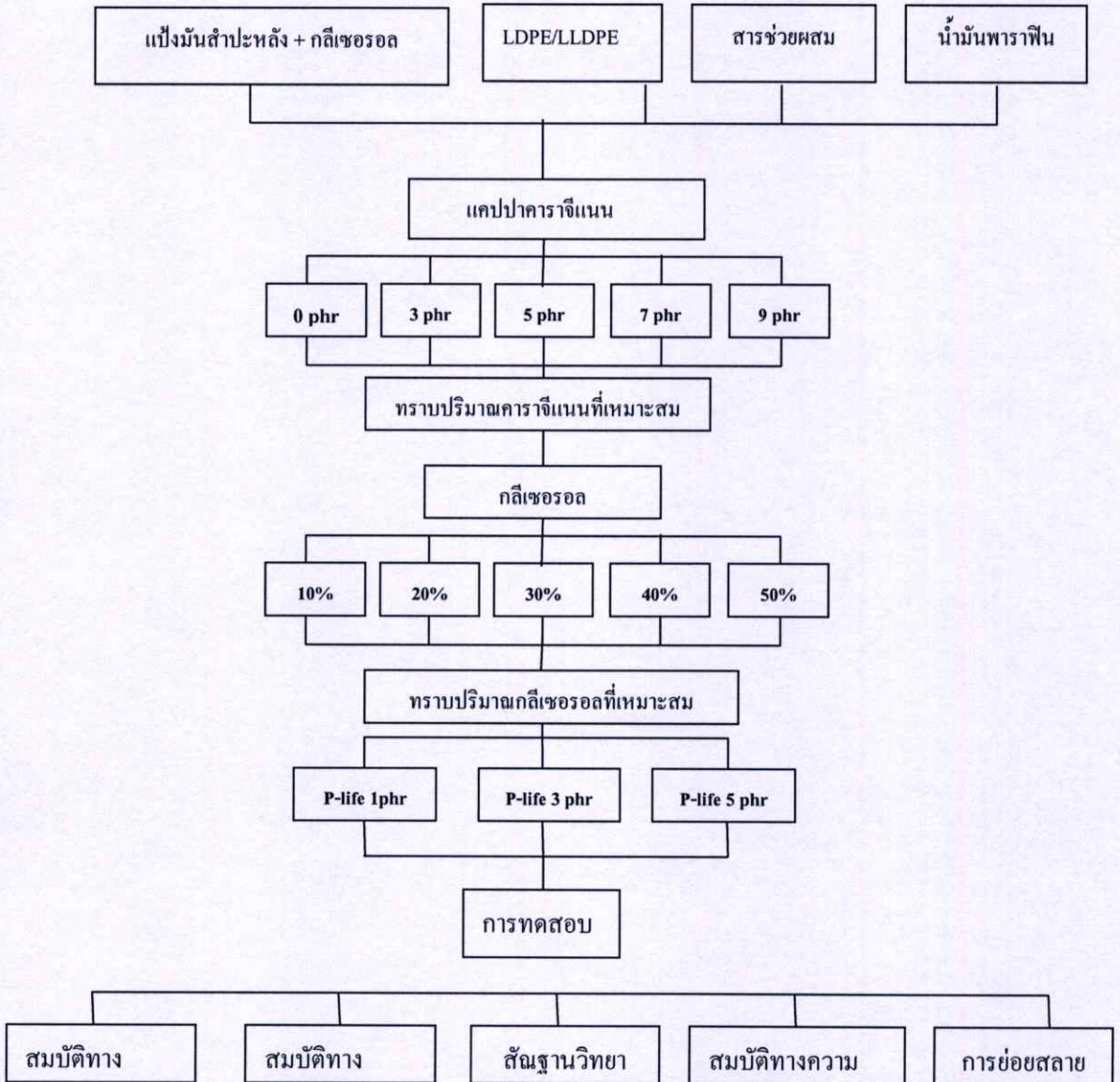
ตารางที่ 3.8 สมบัติของน้ำมันพาราฟิน [51]

Properties	Units	Paraffin Oil
Specific Gravity	-	0.88
Density	g/cm ³	0.86
Melting Point	°C	47-64
Viscosity	Pa.s	110-125

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder): Lab Tech Engineering Co.,Ltd.รุ่น LTE- 26-40
2. เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Mini Pelletier) : Lab Tech Engineering Company Co.,Ltd รุ่น LZ-80
3. ตู้อบ (Oven) : JJScienlab Co.,Ltd.รุ่น Basic:Memmert
4. เครื่องเป่าฟิล์ม (Blow film extruder):Lab Tech Engineering Company Co.,Ltd. รุ่น Type LF 400
5. เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Digimatic micrometer): Mitutoyo รุ่น MDC 25PJ
6. เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer): Lab Tech Engineering Company Co.,Ltd.รุ่น Model 3000
7. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน(Differential Scanning Calorimeter:DSC):Mettler-Toledo Co.,Ltd รุ่น DSC 822
8. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์(Universal Testing Machine) : Lloyd Instrument Co.,Ltd.รุ่น LR5K
9. เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Rate Tester) : CEAST รุ่น 6841
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.
12. เครื่องตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR spectrum GX
13. เครื่องตรวจพิสูจน์เอกภักษณ์ X-ray Diffractometer (XRD) : XRD รุ่น D8 Advance
14. ตู้อบแสงอัลตราไวโอเล็ต บริษัท Labtech Engineering Co.Ltd. (Hg-lamp contain mercury) : Philips TUV PL-S, 9 Watt
15. กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Dino Lite Digital Microscope) รุ่น AM311



รูปที่ 3.1 แผนภาพโดยรวมของการทดลอง

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาปริมาณแคปปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์ และศึกษาผลของแคปปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

จากงานวิจัยเรื่องผลของกลูเตนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ของ วิไลรัตน์ ทวีวงสุนทร ได้ทำการเตรียมพอลิเอทิลีนผสมโดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ(LDPE) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น(LLDPE) จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 70:30 เพราะมีดัชนีการหลอมไหลและสมบัติเชิงกลที่ดีจึงเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้พอลิเอทิลีนที่กล่าวถึงจึงเป็นพอลิเอทิลีนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ซึ่งมีอัตราส่วนผสมเท่ากับ 70:30 สำหรับขั้นตอนในการศึกษาปริมาณแคปปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์ และศึกษาผลของแคปปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ เป็นดังนี้

3.3.1.1 ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์โดยอบแป้งมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาผสมกับกลีเซอรอล ในอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรอล เป็น 100:45 ด้วยมือให้เข้ากันแล้วนำไปผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงอีกครั้ง โดยใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เตรียมได้ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.1.2 นำเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ผ่านการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมงแล้วมาผสมกับแคปปาคาราจีแนน สารช่วยผสม น้ำมันพาราฟิน พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จากนั้นนำส่วนผสมทั้งหมด ผสมลงในเครื่องผสมความเร็วสูง โดยใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งองค์ประกอบของสารต่างๆที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตรแสดงดังตารางที่ 3.9 แล้วนำของผสมที่ได้ไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ โดยสถานะที่ใช้ในการผสมแสดงดังตารางที่ 3.10 จากนั้นจึงพอลิเมอร์ผสมให้เป็นเส้นยาวแล้วนำไปตัดเป็นเม็ด (pellet) ด้วยเครื่องตัดเม็ด

3.3.1.3 นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นแล้วนำมาใส่ในส่วนป้อนสาร(Hopper) ของเครื่องเป่าฟิล์มแล้วทำการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blown-film extrusion) โดยสภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูป แสดงดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.9 อัตราส่วนของสารต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร

ส่วนประกอบ สูตร	ปริมาณ(phr)				
	PE/TPS/K0	PE/TPS/K3	PE/TPS/K5	PE/TPS/K7	PE/TPS/K9
PE*	100	100	100	100	100
แป้งมันสำปะหลัง	70	70	70	70	70
กลีเซอรอล (45%ของแป้งมัน สำปะหลัง)	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
สารช่วยผสม	9	9	9	9	9
น้ำมันพาราฟิน	4	4	4	4	4
แคลปาคาราจีแนน	0	3	5	7	9

หมายเหตุ PE* คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น 70:30

TPS คือ เทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์

K คือ แคลปาคาราจีแนนที่ปริมาณต่างๆ

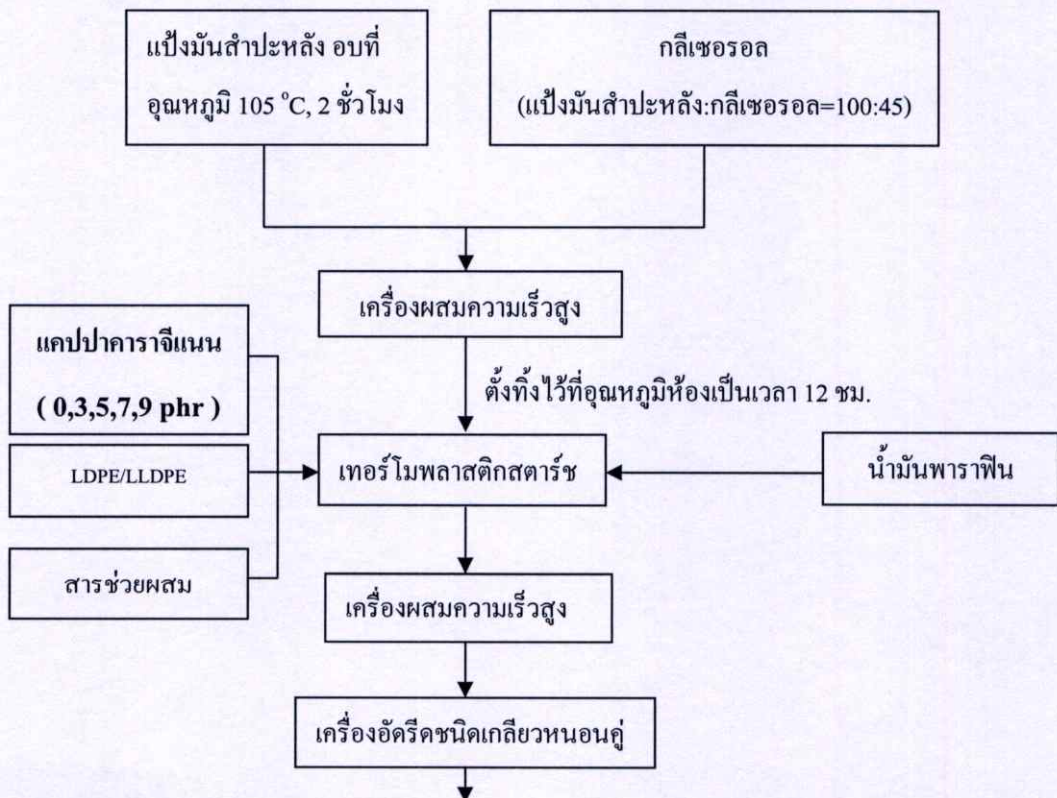
ตารางที่ 3.10 สภาวะที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

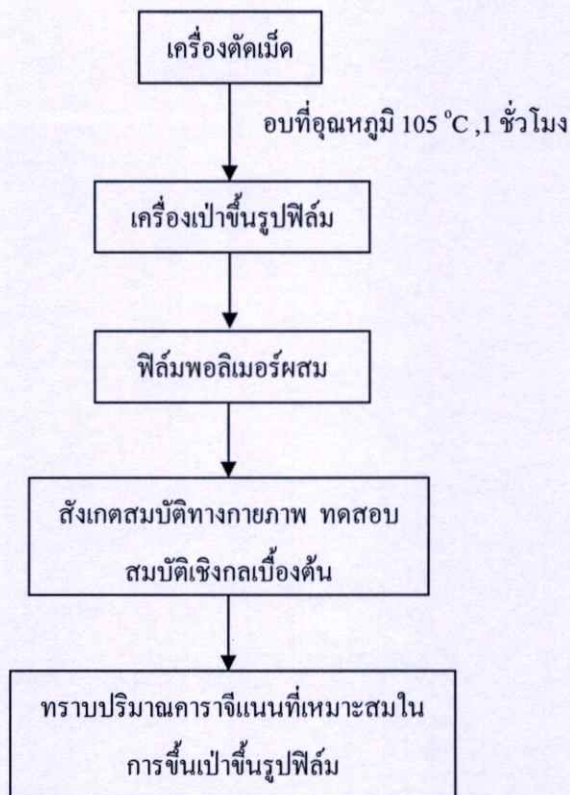
สูตร	อุณหภูมิ(°C)										ความเร็วรอบสกรู (rpm)
	die	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
PE/TPS	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K3	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K5	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K7	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K9	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90

ตารางที่ 3.11 สภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film extruder)

สูตร	อุณหภูมิ (°C)					ความเร็วรอบสกรู (rpm)	ความเร็วรอบในการดึงลูกกลิ้ง (rpm)
	Die	H4	H3	H2	H1		
PE/TPS	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K3	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K5	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K7	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K9	167	170	165	160	155	130	6.2

3.3.1.4 ทำการสังเกตสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของฟิล์ม เช่น สี วัตความหนา สังเกตพื้นผิวของฟิล์ม ความสามารถในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางได้ต่อเนื่องหรือไม่เกิดการขาด และทดสอบสมบัติเชิงกลเบื้องต้น เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดุลัส และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เป็นต้น จากนั้นเลือกพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ให้ค่าสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในเตรียมฟิล์มเพื่อใช้ศึกษาในหัวข้อ 3.3.2 ต่อไป และสามารถสรุปเป็นแผนผังการดำเนินงานวิจัย ได้ดังรูปที่ 3.2





รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง

3.3.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคลปาคาราจีแนน

จากการทดลองในหัวข้อ 3.2.1 พบว่าเกิดปัญหาเล็กน้อยระหว่างขั้นตอนการผสมเพราะพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากหัวดายมีความเหนียวที่ดี แต่ขาดบ้างเล็กน้อย ทำให้ไม่สามารถดึงและถูกตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ต่อเนื่อง ทำให้กระบวนการผลิตไม่สามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงได้นำสูตรที่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ยาวต่อเนื่องและสมบูรณ์มาทำการปรับปรุงให้แคลปาคาราจีแนนมีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้นด้วย เพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้นและสามารถดึงยึดได้ดีขึ้น

3.3.2.1 นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เหมาะสมจาก 3.2.1 (ทราบปริมาณการจี่ที่เหมาะสมคือ 7 phr) มาทำการศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยนำแคลปาคาราจีแนนมาผสมกับกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ ดังนี้คือ กลีเซอรอล 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ แคลปาคาราจีแนน แล้วผสมให้เข้ากันจากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2.2 อบแป้งมันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาผสมกับกลีเซอรอล

ในอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อกลีเซอรอล เป็น 100:45 ด้วยมือให้เข้ากันแล้วนำไปผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงอีกครั้ง โดยใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสไตรช์ที่เตรียมได้ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2.3 นำส่วนผสมที่ได้จากข้อ 3.3.2.1 และ 3.3.2.2 ผสมให้เข้ากัน จากนั้นผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ สารช่วยผสมและน้ำมันพาราฟิน ลงไป แล้วนำส่วนผสมทั้งหมด ผสมลงในเครื่องผสมความเร็วสูง โดยใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำของผสมที่ได้ไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ซึ่งอัตราส่วนผสมต่างๆแสดงดังตารางที่ 3.12 โดยสภาวะที่ใช้ในการผสม แสดงดังตารางที่ 3.13 จากนั้นดึงพอลิเมอร์ผสมให้เป็นเส้นยาวแล้วนำไปตัดเป็นเม็ด (pellet) ด้วยเครื่องตัดเม็ด

ตารางที่ 3.12 อัตราส่วนของสารต่างๆที่มีใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตร

ส่วนประกอบ สูตร	ปริมาณ(phr)				
	PE/TPS/K7/G10	PE/TPS/K7/G20	PE/TPS/K7/G30	PE/TPS/K7/G40	PE/TPS/K7/G50
PE*	100	100	100	100	100
แป้งมันสำปะหลัง	70	70	70	70	70
กลีเซอรอล -สำหรับแป้ง	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5
-สำหรับคาราจีแนน	0.7 ^a	1.4 ^b	2.1 ^c	2.8 ^c	3.5 ^d
สารช่วยผสม	9	9	9	9	9
น้ำมันพาราฟิน	4	4	4	4	4
แคปลาการาจีแนน	7	7	7	7	7

หมายเหตุ PE* คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น 70:30

K7 คือ แคปลาการาจีแนน 7 phr (ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.2.1)

a-d คือ ปริมาณกลีเซอรอลที่เมื่อคิดกลับในส่วนที่เป็นคาราจีแนนจะได้เป็น 10% -50% โดยน้ำหนักของคาราจีแนน ตามลำดับ

3.3.2.4 นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น แล้วนำมาใส่ในส่วนป้อนสาร(Hopper) ของเครื่องเป่าฟิล์มแล้วทำการขึ้นรูปฟิล์มบางด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป(Blown-film extrusion) โดยสภาวะที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 3.14

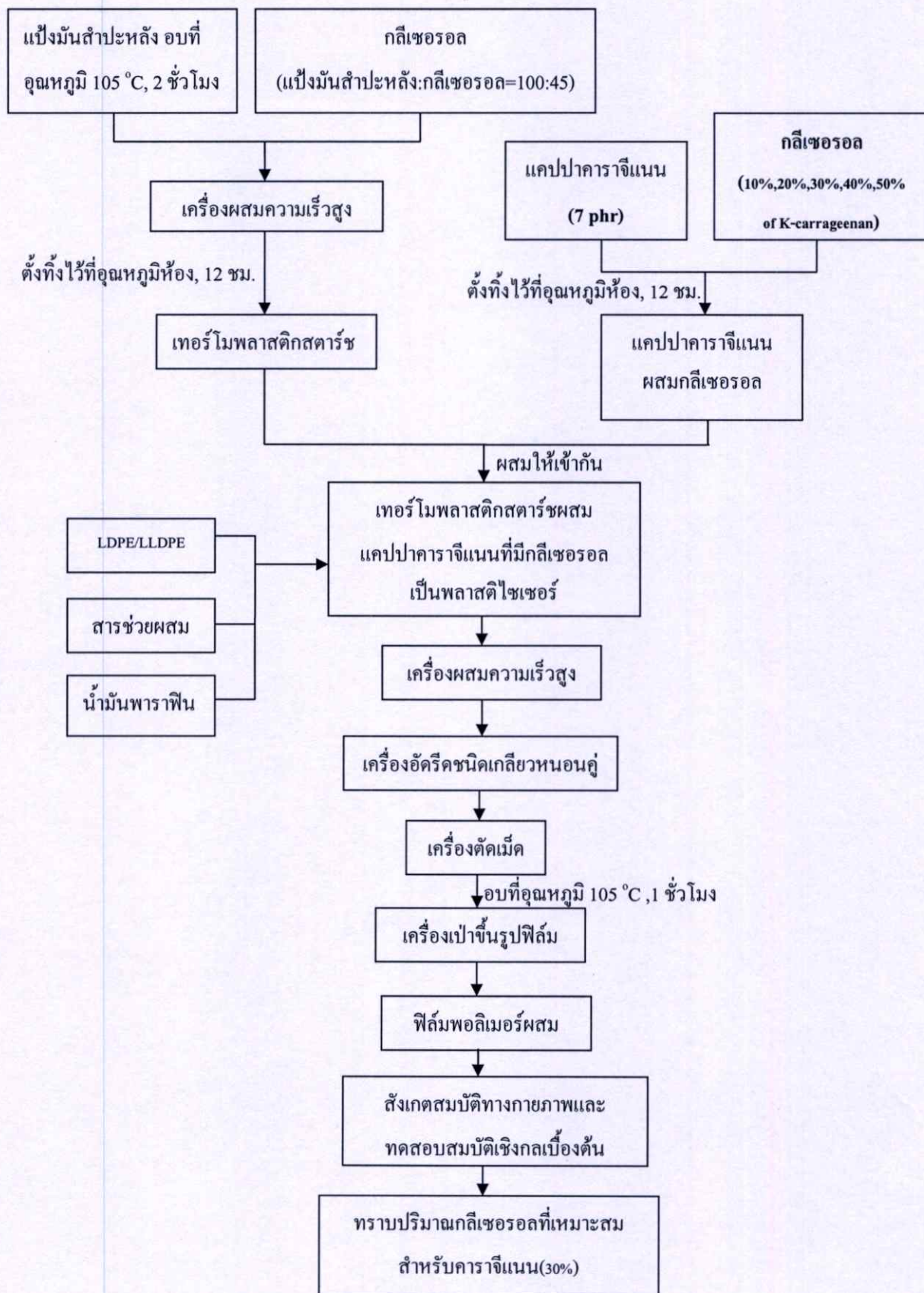
3.3.2.5 เลือกพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีค่าสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมในเตรียมฟิล์มไปใช้ศึกษาในหัวข้อ 3.2.3 ต่อไปโดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของฟิล์ม เช่น สี ทัศนความหนา สัมผัสพื้นผิวของฟิล์ม ความสามารถในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องเกิดการขาด และทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่า Young's Modulus และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด เป็นต้น และสามารถสรุปเป็นแผนผังการดำเนินงานวิจัยได้ ดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.13 สภาวะที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

สูตร	อุณหภูมิ(°C)										ความเร็วรอบสกรู (rpm)
	die	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
PE/TPS/K7/G10	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K7/G20	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K7/G30	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K7/G40	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90
PE/TPS/K7/G50	167	167	167	140	170	170	170	160	155	140	90

ตารางที่ 3.14 สภาวะที่ใช้การเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (Blown film extruder)

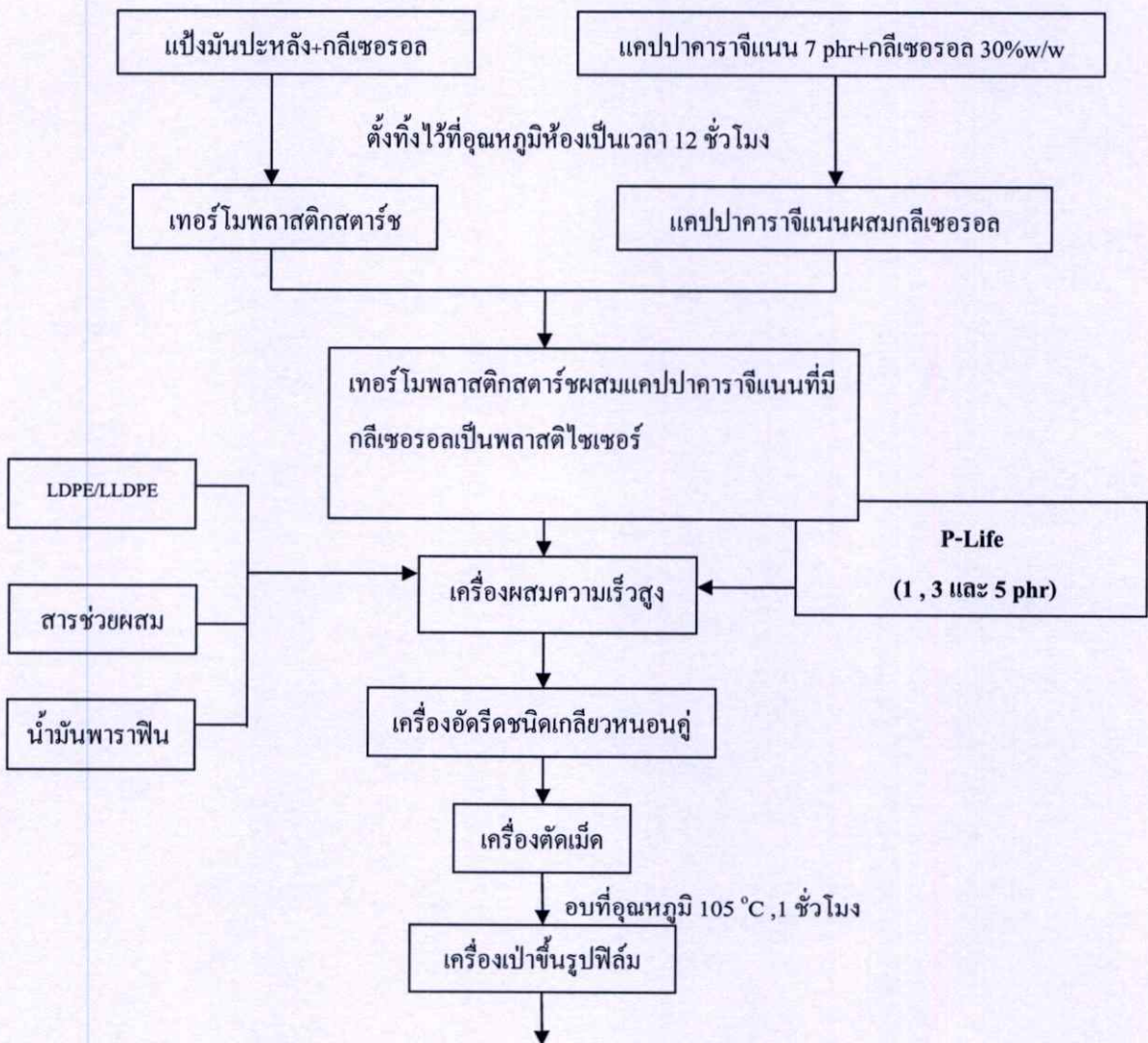
สูตร	อุณหภูมิแต่ละบริเวณ(°C)					ความเร็วรอบสกรู (rpm)	ความเร็วรอบในการดึงลูกกลิ้ง (rpm)
	Die	H4	H3	H2	H1		
PE/TPS/K7/G10	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K7/G20	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K7/G30	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K7/G40	167	170	165	160	155	130	6.2
PE/TPS/K7/G50	167	170	165	160	155	130	6.2



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง

3.3.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนน ด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไลฟ์)

3.3.3.1 ทำการปรับปรุงสมบัติความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาคาราจีแนนที่เตรียมได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.3.2 (สูตรที่เหมาะสมที่สุด) ด้วยสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ซึ่งอัตราส่วนผสมและสถานะที่ใช้ในการผสมและเป่าขึ้นรูปฟิล์มเหมือนกับการทดลองในหัวข้อ 3.3.2 และแผนภาพการทดลองโดยรวม ทั้ง 3 ตอนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4





รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบาง

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การวัดดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index: MFI) [52]

ทำการวัดความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Melt flow indexer โดยใช้อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม รายงานผลในหน่วย กรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D 1238

3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) [53]

การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FTIR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy การเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยตัดฟิล์มให้มีขนาดเล็ก(ละเอียด)และนำผงละเอียดที่ได้ไปบดผสมกับ KBr แล้วนำไปอัดด้วยเครื่องอัดจะได้สารเป็นแผ่นกลมออกมา จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาติดไว้บนหน้าต่างเซลล์ แล้วบรรจุลงในที่บรรจุเซลล์ (Cell holder) เพื่อทำการวัดหาค่าหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง ที่เลขคลื่นช่วง $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

3.4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม (Morphological Analysis) [54]

ศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว การกระจายตัว ของแป้งมันสำปะหลัง แคปซูลการาจีแนน ภายในพื้นผิวของพอลิเอทิลีน โดยจะทำการเคลือบฟิล์มตัวอย่างด้วยเรซิน จากนั้นจะนำฟิล์มที่เคลือบด้วยเรซินไปหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) จากนั้นทำการเคลือบผิวของฟิล์มที่บริเวณรอยหักด้านข้างของฟิล์มด้วยทอง แล้วนำไปส่องดูที่ผิวบริเวณที่เกิดการแตกหัก(Fractured surface) และส่องดูพื้นผิวของฟิล์ม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope:SEM) และศึกษาการกระจายตัวแคปซูลการาจีแนนด้วยเครื่องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscope:OM)

3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

3.4.4.1 เทคนิค Differential Scanning Calorimetry : DSC [55]

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (%Crystallinity) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\text{ onset}}$) ด้วยเครื่อง DSC โดยทำการชั่งน้ำหนักสารประมาณ 5 – 10 mg. นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ $250\text{ }^{\circ}\text{C}$

3.4.4.2 เทคนิค Thermogravimetric Analysis : TGA [56]

ทำการศึกษาอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (Onset temperature) ของฟิล์ม ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 5 – 10 mg. และนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM E 1131 และเมื่อได้เทอร์โมแกรมแล้ว จึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [57]

3.4.5.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [57]

ทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) ของฟิล์มตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยตัดฟิล์มตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งกำหนดให้ชิ้นงานมีความยาว 140 mm. กว้าง 20 mm. ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) และทิศทางตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) ทิศทางละ 10 ชิ้น วัดความหนาของแต่ละชิ้นงาน จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ โดยมีสภาวะที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell) 100 N

ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length) 50 mm.

ความเร็วในการดึง (Cross head speed) 500 mm/min

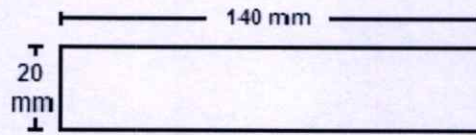
โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) โดยสามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ดังนี้

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

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

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

- เมื่อ F คือ แรงดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง
 L คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm.)
 L₀ คือ ระยะระหว่างจุดสองจุดก่อนทำการดึงยึดชิ้นงาน (mm.)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง

3.4.6 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) [58,59]

3.4.6.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม [58]

สังเกตลักษณะการเป่าขึ้นรูปโดยพิจารณาจากความสามารถในการเป่าเป็นฟิล์มได้อย่างต่อเนื่อง สังเกตสี พื้นผิวของฟิล์มที่ได้ และวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์

3.4.6.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption) [59]

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 2 วัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$W_a(\%) = (W_c - W_0) / W_0 \times 100$$

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

W_c คือ น้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ

W_0 คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายได้ของฟิล์ม

3.4.7.1 การทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสง (ทำเฉพาะการทดลองใน

หัวข้อ 3.3.3)

ตัดฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้มีความกว้าง 20 mm และความยาว 140 mm แล้วนำไปทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนด้วยการเอจจิง (Ageing) โดยนำชิ้นงานไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 70 °C [60] เป็นระยะเวลา 7 วัน และจากนั้นทดสอบการย่อยสลายทางแสงโดยนำชิ้นงานไปใส่ตู้ยูวี โดยใช้หลอดยูวี (Hg-lamp contain mercury, 9 Watt) ฉายแสงวันละ 12 ชั่วโมงและนำชิ้นงานออกทุกๆ 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 4 เดือน และเพื่อเป็นการยืนยันว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสงจริง จึงนำชิ้นงานที่ผ่านการเอจจิงและฉายแสงยูวี มาคำนวณหาปริมาณการออกซิเดชันโดยนำไปวิเคราะห์โดยเครื่อง FTIR Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 4,000 -400 cm^{-1} โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของหมู่คาร์บอนิลที่เลขคลื่น 1,400 -1,800 cm^{-1} เพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในโมเลกุลพอลิเมอร์ที่เกิดจากการสลายตัวโดยความร้อนและแสงยูวี

-การคำนวณดัชนีคาร์บอนิล (COi) จากสมการต่อไปนี้ [61]

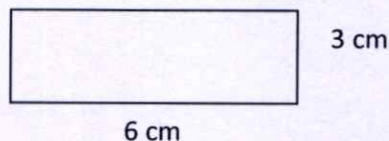
$$\text{Carbonyl Index (COi)} = \frac{\text{Absorption band at } 1640\text{-}1840 \text{ cm}^{-1}}{\text{Absorption band at } 1463 \text{ cm}^{-1}}$$

3.4.7.2 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน (Soil Burial Test) [62]

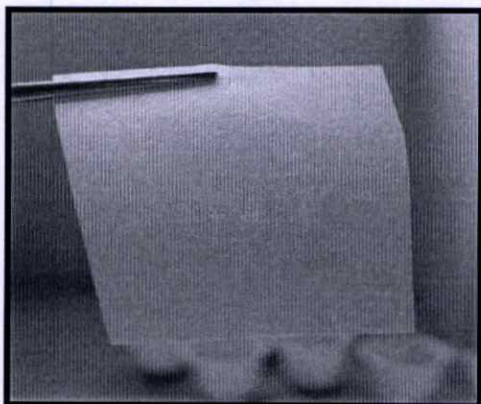
ตัดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 × 120 มิลลิเมตร ฝังลงในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งทำการทดสอบภายใต้สภาวะธรรมชาติที่บริเวณหน้าอาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ โดยทำการควบคุมปริมาณความชื้นและค่า pH ในดินให้คงที่(ปริมาณความชื้นในดิน 30% และค่า pH เท่ากับ 7) จากนั้นเมื่อครบกำหนดทุก 2 สัปดาห์ จะทำการขุดตัวอย่างฟิล์มทดสอบออกมาสังเกตการย่อยสลาย

3.4.8 การทดสอบโดยใช้สารละลายไอโอดีน [63,64]

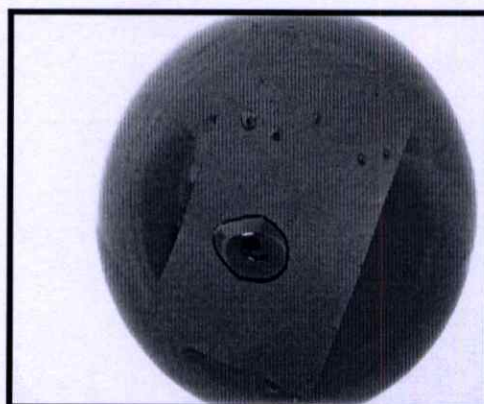
เพื่อศึกษาการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังและแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเบืองตันทำได้โดยตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3x6 เซนติเมตร แล้วนำไปแช่ในสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.025 M เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม



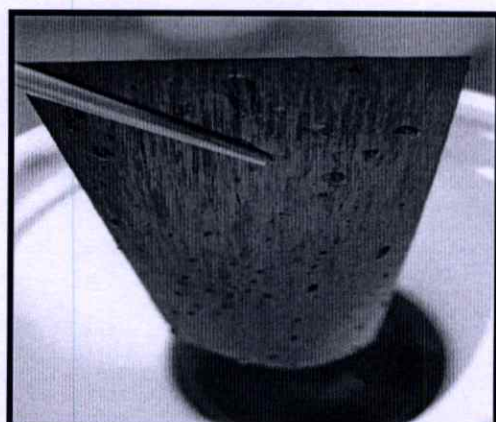
รูปที่ 3.6 การเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน



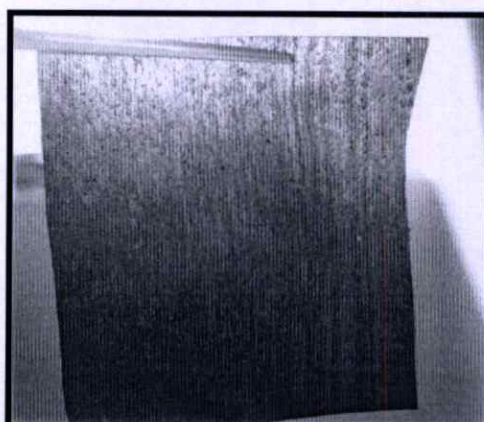
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.7 การทดสอบชิ้นงานด้วยสารละลายไอโอดีน : (ก) ชิ้นงานก่อนแช่สารละลายไอโอดีน

(ข) ขณะแช่ชิ้นงานในสารละลายไอโอดีนเป็นเวลา 10 นาที

(ค) นำชิ้นงานออกจากสารละลายไอโอดีน

(ง) ชิ้นงานหลังจากที่แช่สารละลายไอโอดีน

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ตอน ดังนี้ ตอนที่หนึ่งทำการศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ในตอนที่สองได้ทำการปรับปรุงแคลปาคาราจีแนนให้มีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้น โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์แล้วทำการศึกษาผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และในตอนที่สามเป็นการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคลปาคาราจีแนน ด้วยสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก ทั้งนี้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้นำมาศึกษาสมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และยังมีมอดูลัส) สมบัติทางกายภาพ (ปริมาณการดูดซับน้ำ) สมบัติทางความร้อน (อุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_d)) สัณฐานวิทยา (Morphology) สมบัติการย่อยสลาย โดยสมบัติต่างๆที่นำมาศึกษาจัดเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการนำพอลิเมอร์ผสมไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งรายละเอียดของการทดลองในแต่ละตอนจะได้กล่าวถึงต่อไป

4.1 การศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่าง

สมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

เนื่องจากในการทดลองต้องการเติมแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่มากลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีน คือ 70 phr จึงทำให้เกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูป เช่น ลูกโป่งฟิล์ม (Bubble) มีความเปราะไม่สามารถดึงยึดได้ต่อเนื่องทำให้ฟิล์มขาดเป็นช่วง ดังนั้นจึงแก้ปัญหาด้วยการเติมแคลปาคาราจีแนนลงไปเพื่อช่วยทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดการขาด ในการทดลองตอนที่ 1 เป็นการศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/

เทอร์โมพลาสติกสตาโรล โดยเน้นการศึกษาสมบัติเชิงกล สัมฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ ดัชนีการไหล และสมบัติการย่อยสลาย โดยรายละเอียดของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	PE/TPS	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล
2	PE/TPS/K3	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่มีปริมาณแคปทาการาจีแนน 3 phr
3	PE/TPS/K5	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่มีปริมาณแคปทาการาจีแนน 5 phr
4	PE/TPS/K7	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่มีปริมาณแคปทาการาจีแนน 7 phr
5	PE/TPS/K9	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่มีปริมาณแคปทาการาจีแนน 9 phr

หมายเหตุ PE คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น

70:30

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการสังเกตพอลิเมอร์ผสมขณะทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ออกมาจากหน้าหัวคายของสูตร PE/TPS ขาดง่ายและไม่สามารถดึงเป็นเส้นยาวด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ แต่เมื่อเติมแคปทาการาจีแนนลงไปปริมาณ 3,5,7 และ 9 phr ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากหัวคายมีความเหนียวและสามารถดึงได้เป็นเส้นยาวได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแคปทาการาจีแนนมีสมบัติเหนียวยืดหยุ่น (Viscoelastic) [65] ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีความเหนียวยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สามารถถูกดึงยึดได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ดีขึ้น แต่ยังคงบ้างเป็นบางช่วง และยังคงพบว่าสูตร PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้ยาวต่อเนื่องมากที่สุด ซึ่งลักษณะของเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีผิว

ขรุขระเล็กน้อยและมีสีเหลืองอ่อนตามสีของแคปปาคาราจีแนน โดยลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

จากการศึกษาค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์ เปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์ที่มีการเติมแคปปาคาราจีแนนในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg พบว่า การเติมคาราจีแนนทำให้ค่า MFI ลดลงและเมื่อเติมแคปปาคาราจีแนนในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ความหนืดสูงขึ้น โดยค่า MFI ของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 มีค่าต่ำกว่า MFI ของสูตร PE/TPS ทั้งนี้เนื่องจากแคปปาคาราจีแนนที่เติมลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์ เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ทำให้มีความหนืดสูง [66] โดยแคปปาคาราจีแนนถือได้ว่าเป็นสารตัวเติม ดังนั้นเมื่อเติมลงไปจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเอทิลีน ขณะหลอมเหลวส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ค่า MFI จึงมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.3

จากการสังเกตการเป่าขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์(PE/TPS) ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มยาวต่อเนื่อง โดยจะขาดเป็นช่วงๆ แต่เมื่อเติมแคปปาคาราจีแนนลงในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลซ์ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มในการเป่าฟิล์มได้สมบูรณ์และต่อเนื่องมากขึ้น เพราะแคปปาคาราจีแนนที่เติมลงไปทำให้ลูกโป่งฟิล์ม (Bubble) ที่ออกมาจากหัวดายวงแหวน (annular die) มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น [65] และสามารถดึงด้วยความเร็วลูกกลิ้งที่มาก โดยไม่เกิดการขาด และลักษณะของฟิล์มที่ได้จะมีสีเหลืองอ่อน ตามสีของคาราจีแนน และพบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ที่เติมแคปปาคาราจีแนนลงในปริมาณ 7 และ 9 phr สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์และต่อเนื่องมากที่สุด โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของพอลิเมอร์หลอมเหลวและเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีด ชนิดเกลียวหนอนคู่

สูตร	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมานอกหัวคายน	ลักษณะของเม็ดคอมปาวด์ที่ได้
PE/TPS	มีผิวเรียบ ขนาดง่าย ไม่สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดได้	เป็นเม็ดของแข็งสีขาวขุ่น ทึบแสง ผิวขรุขระ
PE/TPS/K3	มีผิวเรียบ มีความเหนียวมากขึ้น ขนาดยากขึ้นแต่ไม่สามารถ process ได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K5	ผิวเรียบ เหนียวและหนืดมากขึ้น ขนาดยากขึ้น แต่ไม่สามารถ process ได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7	ผิวเรียบ มีความเหนียวและหนืด สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดแต่ยังคงขาดเป็นช่วงๆ	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K9	ผิวเรียบ มีความเหนียวและหนืด สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดแต่ยังคงขาดเป็นช่วงๆ	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบแสง ผิวขรุขระเล็กน้อย

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมานอกหัวคายนของเครื่อง Melt Flow Indexer
PE/TPS	1.30±0.61	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K3	0.98±0.60	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K5	0.87±0.56	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7	0.82±0.58	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K9	0.79±0.54	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง

ตารางที่ 4.4 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะของ Bubble ที่ออกมาจากหัวดายวงแหวนคู่ของเครื่องเป่าฟิล์ม	ลักษณะของฟิล์มที่ได้และความหนาของฟิล์ม (μm)
	ได้	ไม่ได้		
PE/TPS	✓		มีความหนืด ผิวยืดเหนียว มีความเปราะ ดังนั้นไม่สามารถดึงด้วยความเร็วลูกกลิ้งที่สูง จึงขาดเป็นช่วงๆ และได้ฟิล์มที่มีความยาวไม่ต่อเนื่อง ไม่สามารถเป่าขึ้นรูปได้สมบูรณ์	ผิวขรุขระ มีสีขาวขุ่น การกระจายตัวดี แต่เนื่องจากขาดง่ายจึงทำให้มีความหนาไม่สม่ำเสมอ ความหนา: 70-80 μm
PE/TPS/K3	✓		มีความหนืด ผิวยืดเหนียว สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นแต่ยังคงขาดเป็นช่วงๆ และได้ฟิล์มที่มีความยาวไม่ต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75 μm
PE/TPS/K5	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวยืดเหนียว สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง แต่ยังคงขาดเป็นบางช่วง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75 μm
PE/TPS/K7	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวยืดเหนียว สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มาก โดยไม่เกิดการขาด เป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์ และยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75 μm
PE/TPS/K9	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวยืดเหนียว สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มาก โดยไม่เกิดการขาด เป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์ และยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-75 μm

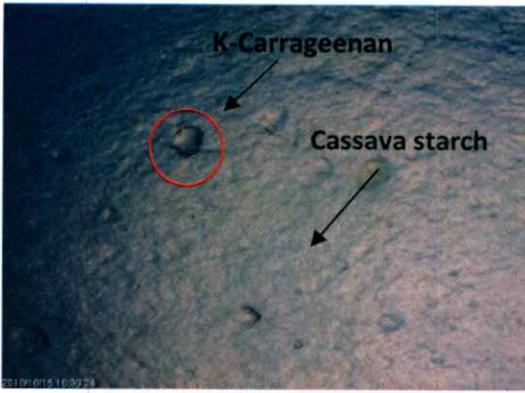
4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา(Morphology)

4.1.2.1 Optical Microscope(OM)

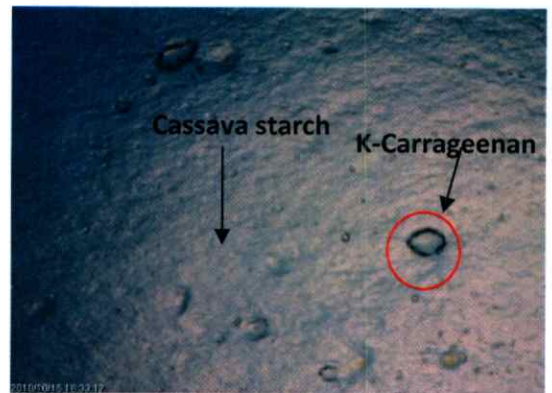
ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อดูการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลัง และแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (OM) จากการทดลองพบว่าพื้นผิวของฟิล์มสูตร PE/TPS ซึ่งไม่เติมคาราจีแนน มีลักษณะขรุขระ ไม่เรียบ และมีเม็ดแป้งมันสำปะหลังกระจายอยู่ทั่วฟิล์ม แต่ไม่พบเม็ดใสกระจายตัวอยู่บนฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.1 ก แต่สำหรับฟิล์มสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ที่มีการเติมแคลปาคาราจีแนนในปริมาณ 3, 5, 7 และ 9 phr ตามลำดับ มีพื้นผิวที่ขรุขระ มีเม็ดแป้งมันสำปะหลังกระจายตัวอยู่ และพบเม็ดใสที่มีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลัง กระจายอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.1 ข-จ ซึ่งเม็ดใสนี้ คือ แคลปาคาราจีแนน ทั้งนี้เนื่องจากแคลปาคาราจีแนนมีสมบัติในการเกิด โซล-เจล[67] ดังนั้นเมื่อมีกลีเซอรอลอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตรทำให้แคลปาคาราจีแนนดูดซับกลีเซอรอลได้บางส่วนจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและจากนั้นเมื่อได้รับความร้อนในกระบวนการผสมหรือจากกระบวนการเป่าขึ้นรูป จึงเกิดการเปลี่ยนรูปจากผงสีเหลืองอ่อนเป็นเจลแข็งใส ส่งผลให้เกิดเม็ดใสขึ้นในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ซึ่งพบว่าพื้นผิวของฟิล์มที่เติมแคลปาคาราจีแนนในปริมาณ 3, 5, 7 และ 9 มีความขรุขระมากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมแคลปาคาราจีแนน(PE/TPS) ดังรูปที่ 4.3-4.7



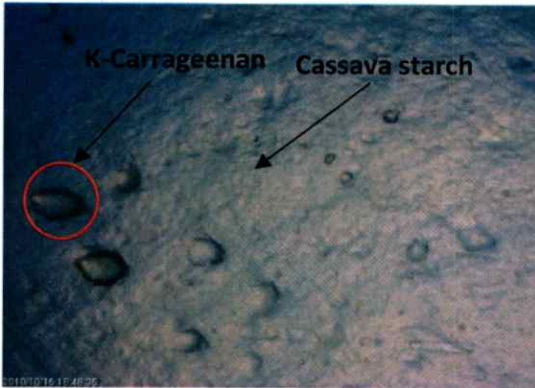
(ก)



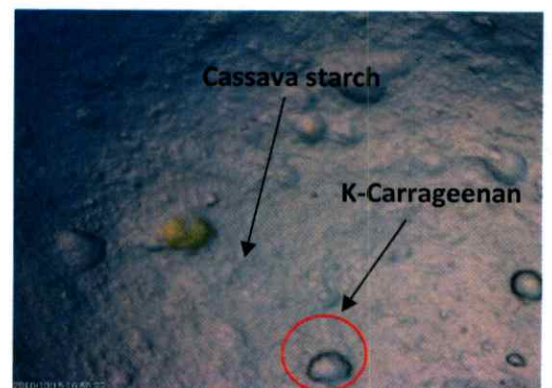
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

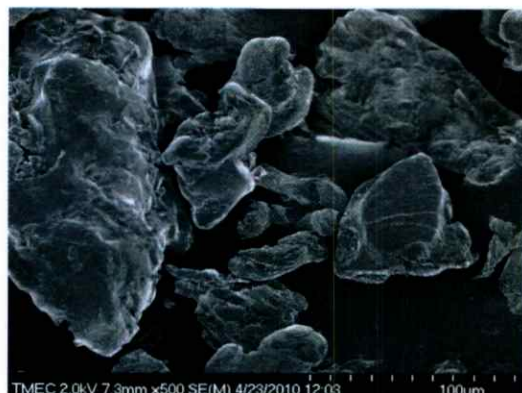
รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของแคลปาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเรช ในสูตรต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 200 เท่า: (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5 (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9

4.1.2.2 Scanning electron microscope

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพื่อดูการกระจายตัวของแป้งมันสำปะหลังและแคปซูลอาราจีแนน และศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปซูลอาราจีแนน โดยใช้เทคนิค SEM ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังรูป 4.2-4.7



(ก)

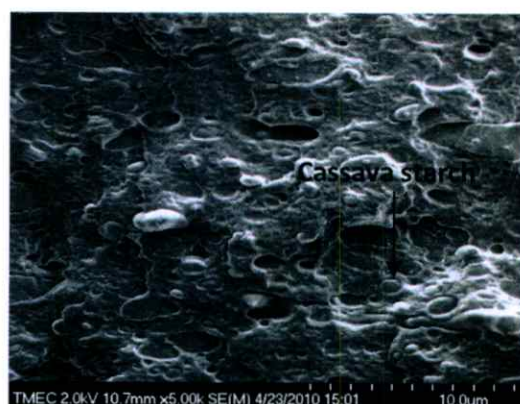


(ข)

รูปที่ 4.2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาร์ช : (ก) แป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) แคปซูลอาราจีแนน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

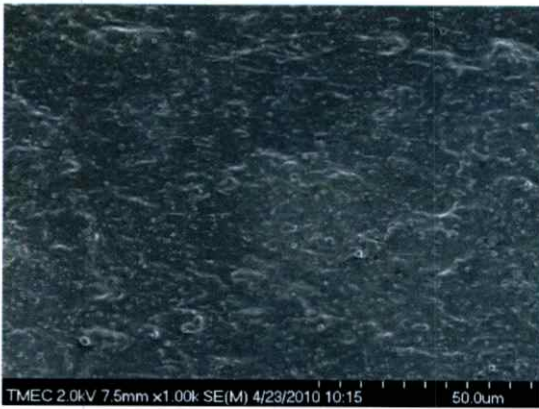


(ก)

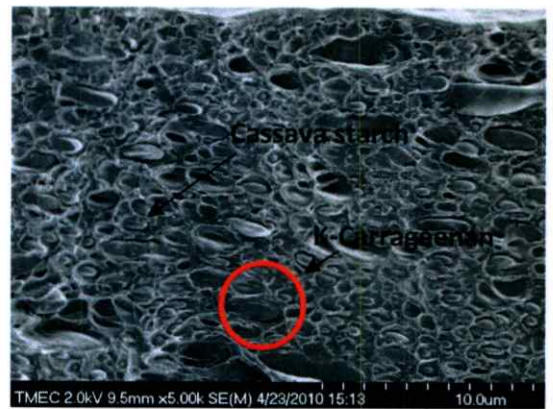


(ข)

รูปที่ 4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (PE/TPS) :
(ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

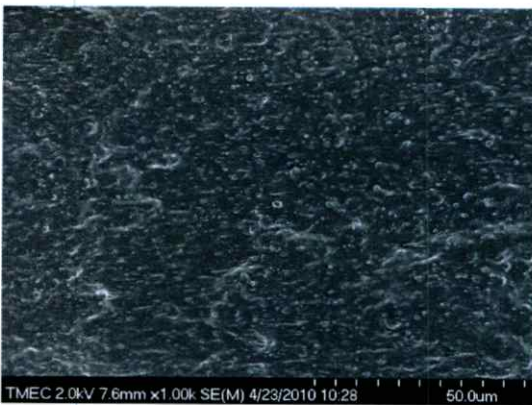


(ก)

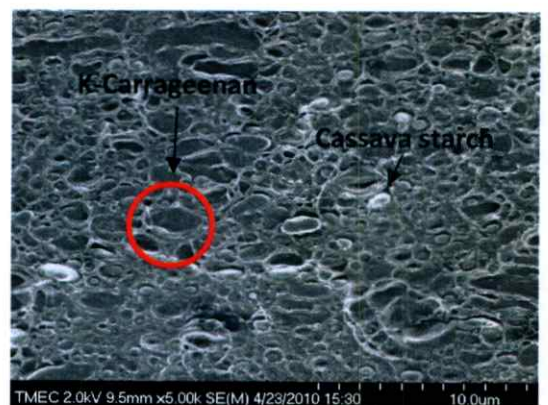


(ข)

รูปที่ 4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 3 phr (PE/TPS/K3) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

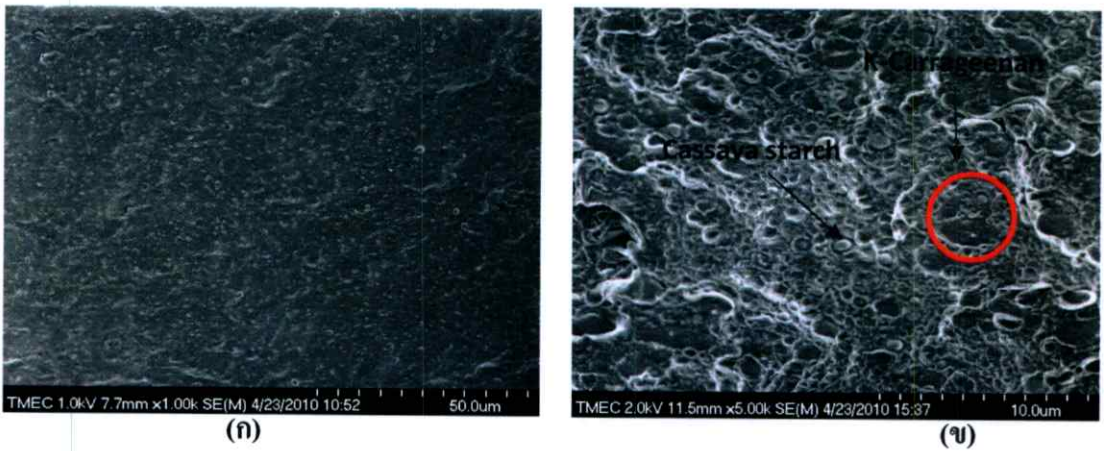


(ก)

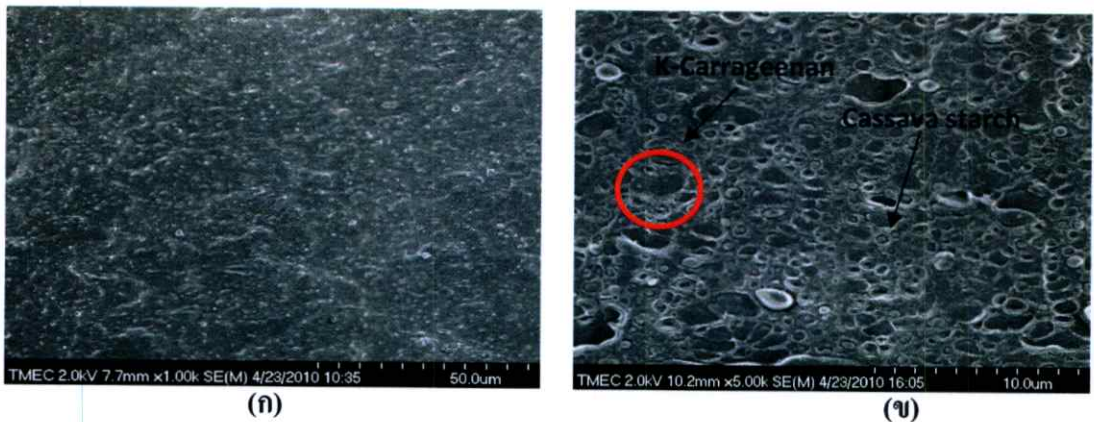


(ข)

รูปที่ 4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 5 phr (PE/TPS/K5) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.6 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 7 phr (PE/TPS/K7) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.7 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 9 phr (PE/TPS/K9) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.2(ก) แสดงสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลังโดยพบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 18 μm และรูปร่างค่อนข้างกลม มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเล็กน้อย ส่วนรูปที่ 4.2 (ข) เป็นสัณฐานวิทยาของแคลปาคาราจีแนน ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 120-200 μm

จากรูปที่ 4.3-4.7 แสดงลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีปริมาณแคปพาคาราจีแนนต่างกัน กัน คือ พื้นผิวของฟิล์ม (รูป ก) และภาคตัดขวางฟิล์ม (รูป ข) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มสูตร PE/TPS/K3 ซึ่งมีแคปพาคาราจีแนนในปริมาณ 3 phr ดังรูปที่ 4.5 (ก) มีความขรุขระมากกว่าสูตร PE/TPS ซึ่งไม่ได้เติมแคปพาคาราจีแนน (รูปที่ 4.4(ก)) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาราจีแนน 3, 5, 7 และ 9 phr ที่เติมลงไป ในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ พบว่าปริมาณแคปพาคาราจีแนนส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ดังรูปที่ 4.3-4.7(ก)

จากรูปที่ 4.3 (ข) แสดงลักษณะของฟิล์ม สสูตร PE/TPS ที่ไม่ได้เติมแคปพาคาราจีแนน จะเห็นว่ามีเม็ดแป้งกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นซึ่งทำหน้าที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง และยังพบว่าแป้งมันสำปะหลังยึดเกาะกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้ดีโดยเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ปริมาณน้อย ทั้งนี้เนื่องจากในพอลิเมอร์ผสมสูตรมีการเติมสารช่วยผสมลงไป โดยสารช่วยผสมจะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมยึดระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเอทิลีน ทำให้เม็ดแป้งมันสำปะหลังเกิดการยึดเกาะและกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องได้ดี แต่เมื่อเติมแคปพาคาราจีแนนลงไป ปริมาณ 3, 5, 7 และ 9 phr ดังรูป 4.4-4.7 (ข) พบว่ามีอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังและแคปพาคาราจีแนนกระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น และเมื่อปริมาณคาราจีแนนมากขึ้น เห็นได้ว่ามีรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารช่วยผสมที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตรเพียงพอที่จะช่วยยึดเกาะแคปพาคาราจีแนนกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้ และยังพบว่าฟิล์มผสมสูตร PE/TPS, PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 ที่ได้จากการทดลองเกิดการผสมที่ดี เพราะจากรูปภาคตัดขวาง จะเห็นว่าแป้งมันสำปะหลังและแคปพาคาราจีแนนมีขนาดอนุภาคเล็กกล และสังเกตได้ว่าแป้งมันสำปะหลังและแคปพาคาราจีแนนมีรูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนไปคือ จากทรงกลมเปลี่ยนเป็นทรงรี ทั้งนี้การที่แป้งมันสำปะหลังและแคปพาคาราจีแนนเกิดการเปลี่ยนรูป (Deformation) เนื่องจากในงานวิจัยได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blown film process) โดยมีการให้แรงแก่ฟิล์มสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บ และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์ม ซึ่งเม็ดแป้งมันสำปะหลังและแคปพาคาราจีแนนค่อนข้างนุ่ม จึงถูกดึงและเปลี่ยนรูปได้ง่าย

จากการศึกษาลักษณะของฟิล์มผสมสูตรต่างๆ ด้วยเทคนิค OM และ SEM จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าแคปพาคาราจีแนนไม่สามารถเข้ากันได้กับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แต่สามารถเกิดการกระจายตัวใน

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติก สตาร์ชได้เท่านั้น

4.1.3 สมบัติเชิงกล

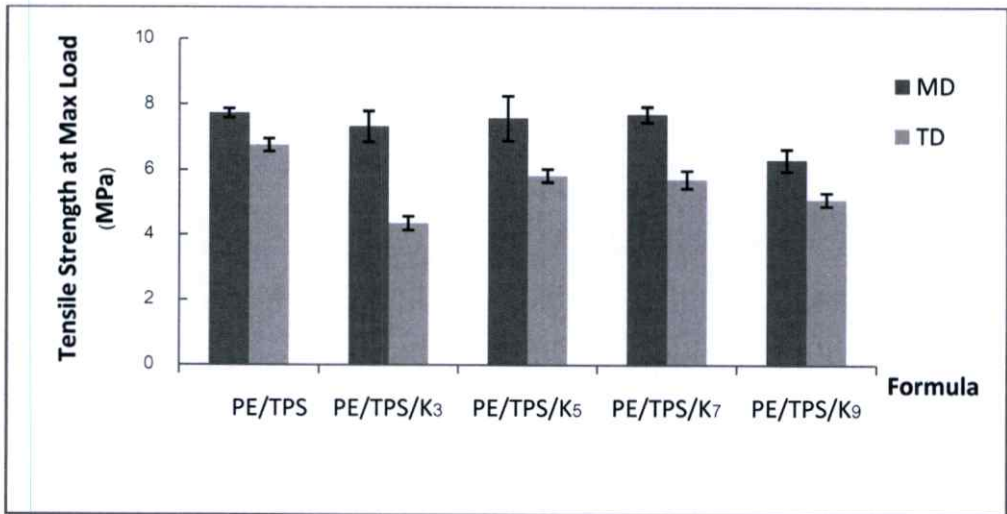
ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยใช้เครื่อง Universal testing machine เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (Tensile strength at Max Load) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) ทั้งในแนวตามเครื่องจักร (Machine direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Transverse direction; TD) ตามมาตรฐาน ASTM D 882

จากรูปที่ 4.8 พบว่าสูตร PE/TPS ซึ่งไม่ได้เติมคาร์โบซีแนนมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดในแนวตามเครื่องจักร เท่ากับ 7.74 MPa และในแนวขวางเครื่องจักรเท่ากับ 6.78 MPa แต่เมื่อเติมคาร์โบซีแนนลงไป 3 phr (PE/TPS/K3) จะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดลดลง ซึ่งค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดในแนวตามเครื่องจักรมีค่าเท่ากับ 7.35 MPa และในแนวขวางเครื่องจักร มีค่าเท่ากับ 4.46 MPa ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแคลปคาร์โบซีแนนจะไปแทรกตัวอยู่ในส่วนที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น) ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากขึ้นซึ่งรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณที่มีแรงยึดเกาะกันไม่แข็งแรงจึงเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน [68] ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัญฐานวิทยาที่พบว่าแคลปคาร์โบซีแนน ที่เติมลงไปไม่มีความเข้ากันกับแป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แต่จะกระจายตัวในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคขึ้น ดังแสดงโดยสัญฐานวิทยาในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ทำให้รับแรงกระทำได้น้อย ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด มีค่าลดลง และพบว่าค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึง ณ จุดขาด (% Elongation at Break) ของสูตร PE/TPS/K3 ที่เติมคาร์โบซีแนน 3 phr มีค่าลดลงเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง ดังรูปที่ 4.9-4.10

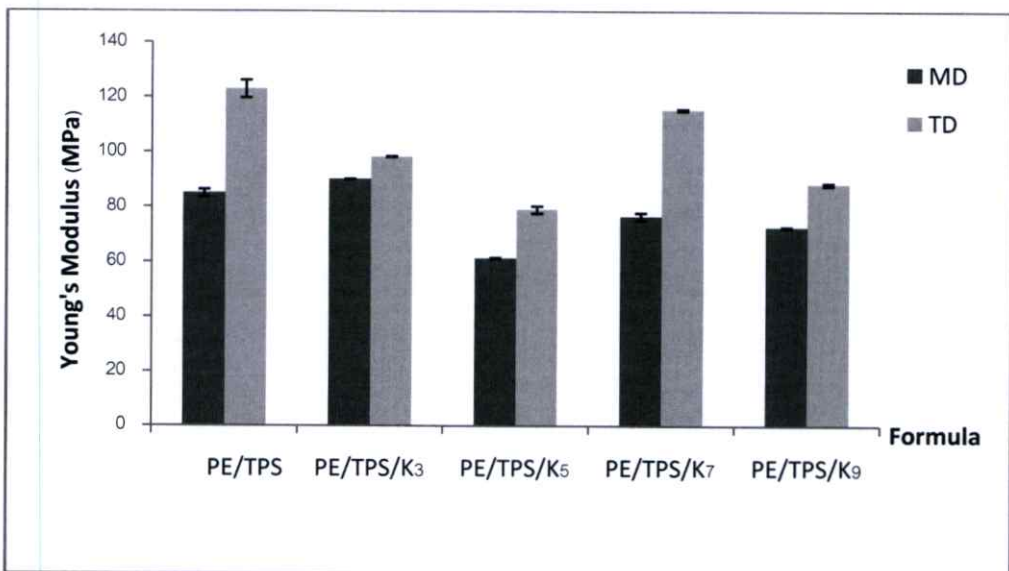
จากรูปที่ 4.8-4.10 เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่เติมแคลปคาร์โบซีแนนในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 3, 5, 7 และ 9 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึงที่ได้ไม่แตกต่างกันตามปริมาณแคลปคาร์โบซีแนนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลปคาร์โบซีแนนกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องได้ดี และจากสัญฐานวิทยาพบว่ารอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามปริมาณคาร์โบซีแนนทำให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานในปริมาณที่ไม่มาก ดังนั้นเมื่อมีแรงมากระทำ จึงสามารถรับแรงกระทำได้ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดไม่แตกต่างกัน และพบว่าค่ายังมอดุลัสของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5 ซึ่งเติมแคลปคาร์โบซีแนน 3 และ 5 phr มีค่าลดลงแต่เมื่อเติมแคลปคาร์โบ

จีแนน 7 phr (PE/TPS/K7) ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นและลดลงอีกครั้งเมื่อเติมแคปปาคาราจีแนน 9 phr (PE/TPS/K9) ซึ่งค่ามอดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ทำให้ไม่สามารถสรุปแนวโน้มได้ แต่พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5 และ PE/TPS/K9 ที่เติมแคปปาคาราจีแนน 3, 5 และ 7 phr ตามลำดับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงเล็กน้อยเมื่อเติมแคปปาคาราจีแนน 9 phr ทั้งนี้เนื่องจากแคปปาคาราจีแนนมีสมบัติวิสโคอิลาสติก ดังนั้นสามารถถูกยืดได้ดี ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาราจีแนนเพิ่มขึ้น และยังพบว่าปริมาณแคปปาคาราจีแนน 7 phr (PE/TPS/K7) ให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัส สูงที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการสังเกตลักษณะทางกายภาพขณะทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และขณะทำการเป่าขึ้นรูปซึ่งพบว่าสูตรที่เติมแคปปาคาราจีแนน 7 phr ทำให้สามารถดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ยาว และสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้ยาวต่อเนื่องและสมบูรณ์

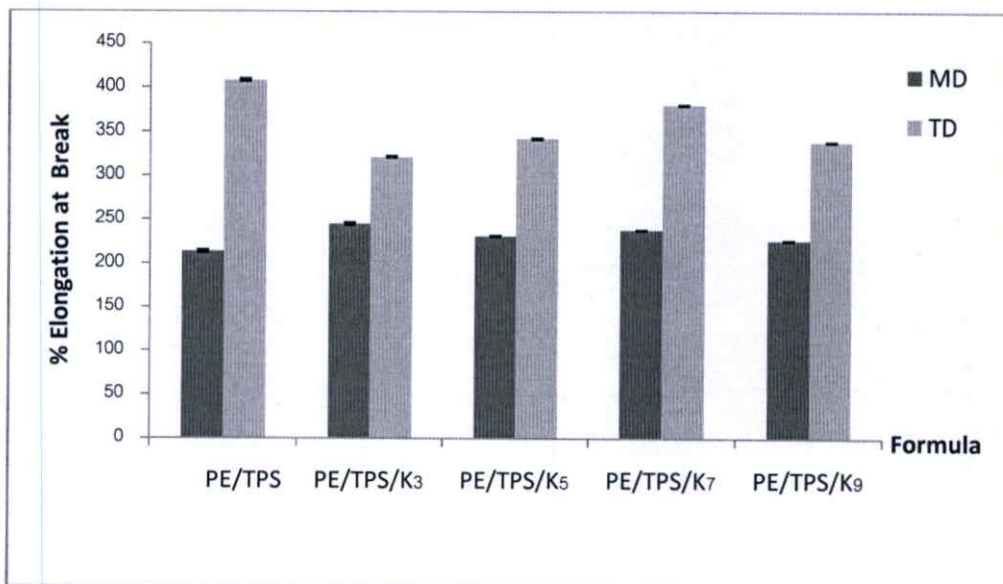
เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ายังมอดูลัส แนวตามเครื่องจักรและตามแนวขวางเครื่องจักรของพอลิเมอร์ผสมในแต่ละสูตร พบว่าค่าความแข็งแรงดึงในแนวตามเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่องจักรเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเป่าฟิล์ม (Blown film process) ในการขึ้นรูป โดยมีการให้แรงแก่ฟิล์มที่ผลิตได้ทั้งสองทิศทาง คือ แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มม้วนเก็บในแนวตามเครื่องจักร และแรงลมที่ใช้ในการเป่าขยายท่อฟิล์มในแนวขวางเครื่องจักรทำให้มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนทั้งสองทิศทาง โดยแรงที่ใช้ในการดึงม้วนในแนวตามเครื่องจักรอาจมีมากกว่าแรงที่ใช้ในการเป่าขยายในแนวขวางเครื่องจักรจึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางตามเครื่องจักรได้มากกว่า นอกจากนี้ค่ายังมอดูลัสและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ในแนวขวางเครื่องจักรมีค่ามากกว่าแนวตามเครื่องจักร คาดว่าขณะทำการเป่าอาจใช้แรงลมในการเป่าน้อยทำให้พอลิเมอร์ยังถูกขยายตัวได้ไม่เต็มที่ ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์จึงทำให้มีความสามารถในการดึงยืดในแนวขวางเครื่องจักรได้มากกว่าแนวตามเครื่องจักร



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคปทาราคีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคปทาราคีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคปทาคาราจีแนนในปริมาณต่างๆทั้งในแนวตามเครื่องจักร(MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

4.1.4 สมบัติทางความร้อน

4.1.4.1 Differential scanning calorimetry (DSC)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC เพื่อหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_{c_onset}) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่เติมแคปทาคาราจีแนน มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_{c_onset}) ที่ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์ที่ไม่เติมแคปทาคาราจีแนน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าแคปทาคาราจีแนนไม่มีผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_{c_onset}) จึงมีค่าใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามแคปทาคาราจีแนนมีผลต่อค่าเอนทาลปี (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ซึ่งพบว่าเมื่อเติมแคปทาคาราจีแนนจะทำให้ค่าเอนทาลปีลดลง ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากแคปทาคาราจีแนนจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์(พอลิเอทิลีน)ในส่วนที่เป็นผลึก ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการการจัดเรียงตัวได้ลดลง ส่งผลให้ปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง

จากตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณแคปปาคาราจีแนน (3, 5, 7 และ 9 phr) ให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก ($T_{c\ onset}$) ไม่แตกต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณ แคปปาคาราจีแนน ไม่มีผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\ onset}$) มีค่าไม่แตกต่างกัน และยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) มีค่าไม่แตกต่างกัน คาดว่าปริมาณแคปปาคาราจีแนน 3 phr เป็นปริมาณที่เพียงพอสามารถที่สามารถเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลส่วนที่เป็นผลึก ของพอลิเอทิลีนแต่เมื่อเติมแคปปาคาราจีแนนมากขึ้น คือ 5, 7 และ 9 phr คาดว่าเกิดความไม่เข้ากันของแคปปาคาราจีแนนและพอลิเอทิลีน จนทำให้แคปปาคาราจีแนนไม่สามารถเข้าแทรกส่วนเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนได้มากนัก เพียงแค่กระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนส่วนที่เป็นอสัณฐานดังนั้นความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่งผลให้ค่าเอนทาลปี (ΔH_f) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณแคปปาคาราจีแนนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร จากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว $T_m(^{\circ}C)$	อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก $T_{c\ onset}(^{\circ}C)$	ΔH_f (J/g)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)
PE/TPS	110	91	174.2	29.61
PE/TPS/K3	108	91	140.4	23.83
PE/TPS/K5	108	91	147.8	24.85
PE/TPS/K7	110	91	162.8	25.45
PE/TPS/K9	108	91	140.1	23.12

4.1.4.2 Thermogravimetric analysis (TGA)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ข

ตารางที่ 4.6 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นสลายตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร จากเทคนิค TGA

Formula	Onset thermal degradation temperature (°C)			
	Glycerol	K-Carrageenan	Cassava starch	LDPE/LLDPE
K-Carrageenan	-	245	-	-
Polyethylene	-	-	-	445
Cassava starch	-	-	303	-
Glycerol	150	-	-	-
PE/TPS	157	-	306	443
PE/TPS/K3	159	247	288	428
PE/TPS/K5	155	248	281	415
PE/TPS/K7	153	246	281	434
PE/TPS/K9	158	247	277	450

จากตารางที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิเริ่มสลายตัวขององค์ประกอบที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตร โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของกลีเซอรอล เท่ากับ 150 °C อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแคลปาคาราจีแนนเท่ากับ 245 °C อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งมันแป้งสำปะหลังเท่ากับ 303 °C และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 445 °C และจากเทอร์โมแกรมการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมสูตร(ภาคผนวก ข) พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องมาจากความร้อนอยู่ 5 ช่วง โดยในช่วงแรกเป็นการสูญเสียน้ำหนัก

ของโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิในช่วง $0-100^{\circ}\text{C}$ ช่วงที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการสลายตัวของกลีเซอรอลในช่วงอุณหภูมิประมาณ $150-159^{\circ}\text{C}$ ช่วงที่สามเป็นการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการของแคปปาคาราจีแนนในช่วงอุณหภูมิ 247°C ช่วงที่สี่เป็นการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังในช่วงอุณหภูมิประมาณ $270-306^{\circ}\text{C}$ และช่วงที่ 5 เป็นการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นในช่วงอุณหภูมิ $415-450^{\circ}\text{C}$

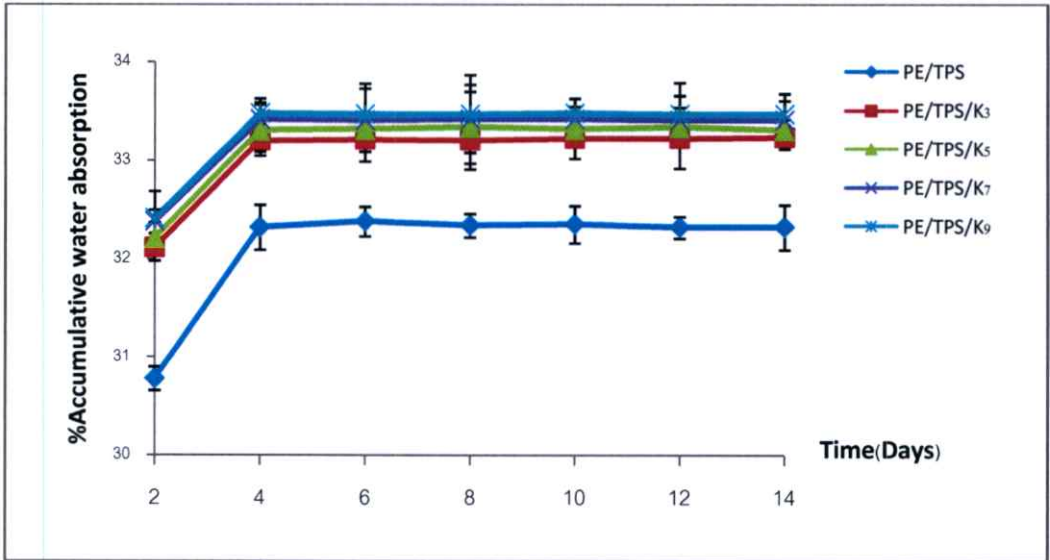
จากเทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible) เนื่องจากเทอร์โมแกรมแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารแต่ละองค์ประกอบที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมสูตร เช่น พอลิเอทิลีน แป้งมันสำปะหลัง และแคปปาคาราจีแนน และจากการที่ทุกสูตรมีโครงสร้างและองค์ประกอบที่เหมือนกันทำให้ลักษณะของเทอร์โมแกรมที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน และยังพบว่า การเติมคาราจีแนนลงไปจะทำให้อุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลง เนื่องจากแคปปาคาราจีแนนที่ใส่ลงไปไม่เข้ากับแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น แต่กระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่องเท่านั้น ซึ่งผลสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังได้กล่าวในข้างต้น และเนื่องจากแคปปาคาราจีแนนมีเสถียรภาพสูง เกิดการสลายได้ยากซึ่งสังเกตได้จากเทอร์โมแกรมในภาพผนวก ข (รูปที่ ข-12) ดังนั้นคาดว่าแคปปาคาราจีแนนดูดความร้อนแล้วสะสมความร้อนไว้ในระยะนานได้โดยไม่เกิดการสลายตัวทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนไปยังแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้ ส่งผลให้แป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นได้รับความร้อนได้มากขึ้นจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิลดลงและคาดว่าแคปปาคาราจีแนนไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของส่วนที่เป็นผลึกของสายโซ่พอลิเอทิลีน ทำให้พอลิเอทิลีนมีความเป็นผลึกลดลง จึงต้านทานความร้อนได้น้อยลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ลดลง (ดังตารางที่ 4.5) ดังนั้นเมื่อพอลิเอทิลีนได้รับความร้อนจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ดังตารางที่ 4.6 พบว่าสูตรที่การเติมแคปปาคาราจีแนน 3, 5 และ 7 (PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7) ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมแคปปาคาราจีแนน (PE/TPS) และยังพบว่าปริมาณแคปปาคาราจีแนน ที่ใส่ลงไป ในพอลิเมอร์ผสมทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่พบว่าสูตร PE/TPS/K5 ซึ่งเติมแคปปาคาราจีแนน 5 phr ทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งคาดว่าแคปปาคาราจีแนนสามารถเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเอทิลีนได้มากจึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง ดังนั้นพอลิ

เอทิลีนจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง และสูตร PE/TPS/K9 จะทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเพิ่มขึ้น คาดว่า แคลปการาจีแนนปริมาณ 9 phr เป็นปริมาณที่มากซึ่งอาจแยกวัฏภาคออกมาจากพอลิเอทิลีนจึงส่งผลให้ค่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้น

4.1.5 การศึกษาการดูดซับน้ำ (Water Absorption)

จากรูปที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ที่มีปริมาณการาจีแนนที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อเติมแคลปการาจีแนนลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากโครงสร้างของแคลปการาจีแนน มีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีขั้ว ดังนั้นหมู่ไฮดรอกซิลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน (H-bond) กับน้ำได้ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

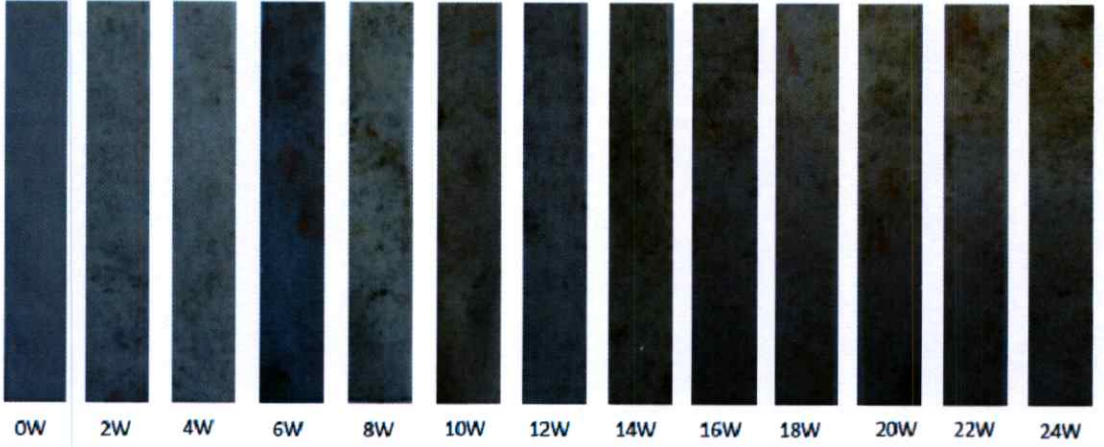
และในช่วง 4 วัน แรกของการแช่ฟิล์มในน้ำ พบว่าฟิล์มในแต่ละสูตรสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว และหลังจากวันที่ 4 พบว่าฟิล์มในแต่ละสูตรสามารถดูดซับน้ำได้น้อยลงจนกระทั่งคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังและแคลปการาจีแนนสามารถดูดซับน้ำได้ และจะเกิดการบวมตัว (Swell) จนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Matrix) กับอนุภาคแป้งมันสำปะหลังและแคลปการาจีแนน เกิดการอิมตัวไปด้วยน้ำ จึงไม่สามารถดูดซับน้ำได้อีก ดังนั้นหลังจากวันที่ 4 ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าคงที่ และยังพบว่าปริมาณแคลปการาจีแนนที่ใส่ลงไปในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ใกล้เคียงกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณแคลปการาจีแนนที่ใส่ลงไปพอลิเมอร์ผสมไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแคลปการาจีแนนที่ใส่ลงในพอลิเมอร์ผสมมีความแตกต่างกันน้อย คือ 3, 5, 7 และ 9 phr ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของสูตร PE/TPS/K3, PE/TPS/K5, PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 จึงไม่แตกต่างกัน



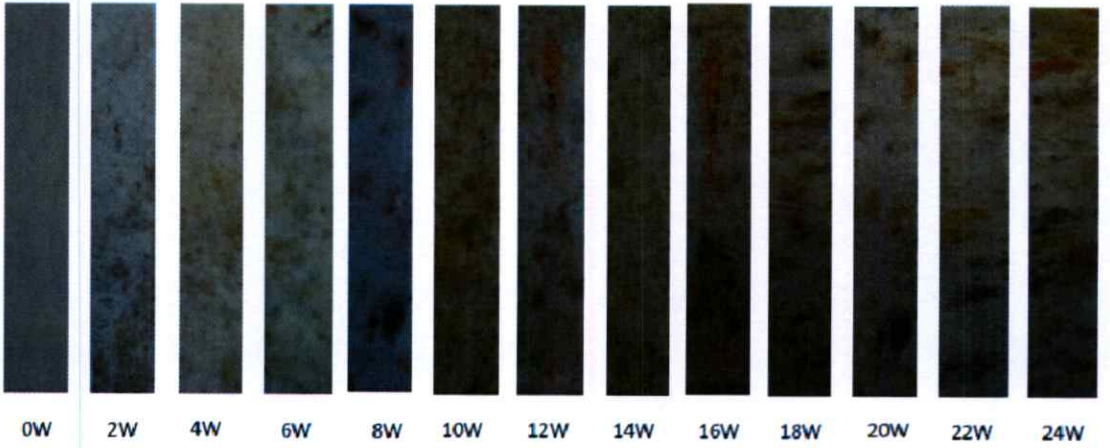
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่มีปริมาณแคปปาการาจีแน่นอนที่แตกต่างกัน

4.1.6 สมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน (Soil Burial test)

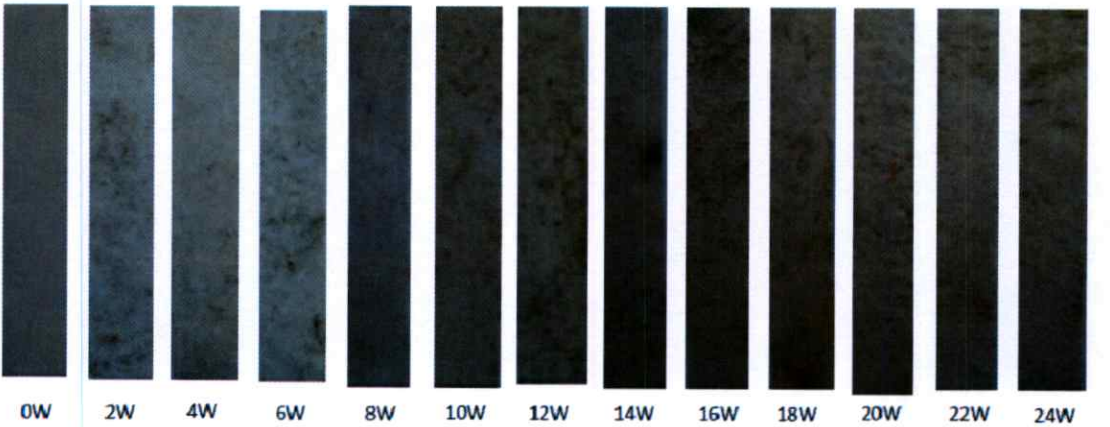
ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในระดับเบื้องต้นด้วยการฝังชิ้นงานในดิน โดยดินที่ใช้ฝังชิ้นงานเป็นแบบสภาวะธรรมชาติคือกลางแจ้ง (out door) โดยจะจุดชิ้นงานขึ้นมาสังเกตการเปลี่ยนแปลงทุก ๆ 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 6 เดือน (แสดงดังรูปที่ 4.12) และเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่างโดยการกักกินของจุลินทรีย์ จึงสูมน้ำชิ้นงานบางสูตรไปทำการส่องดูพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (OM) พบว่ามีรอยสีดำ น้ำตาล เกิดขึ้นที่พื้นผิวของชิ้นงานซึ่ง เกิดจากเชื้อราที่กักกินบริเวณที่เป็นส่วนของแป้งและการาจาแน่นอนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ดังนั้นทำให้ชิ้นงานโดยรวมมีสีน้ำตาลดำและมีผิวที่ขรุขระ และมีรูเล็กๆ เกิดขึ้น ดังแสดงในรูป 4.13



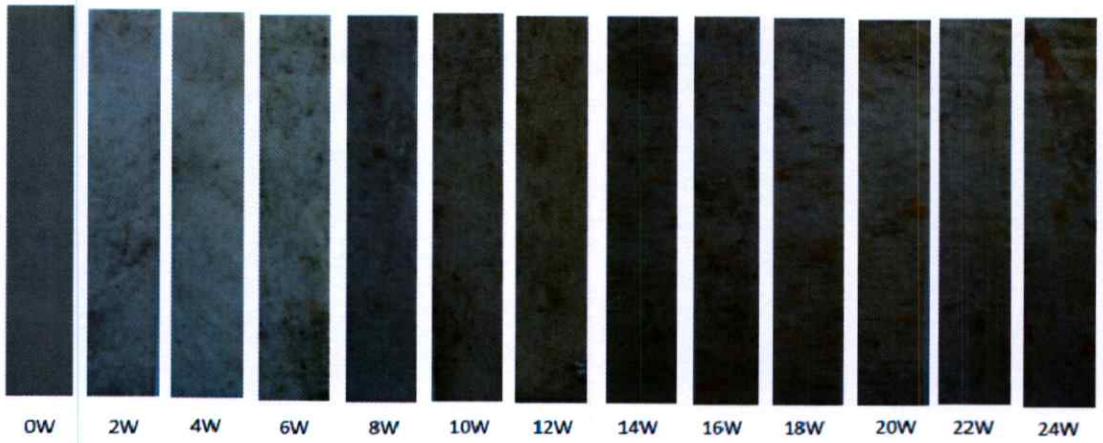
(f)



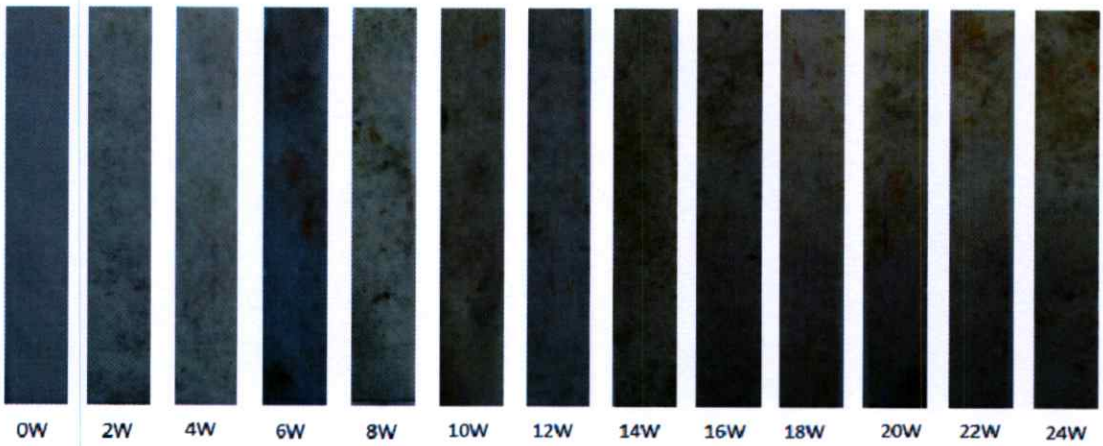
(g)



(h)



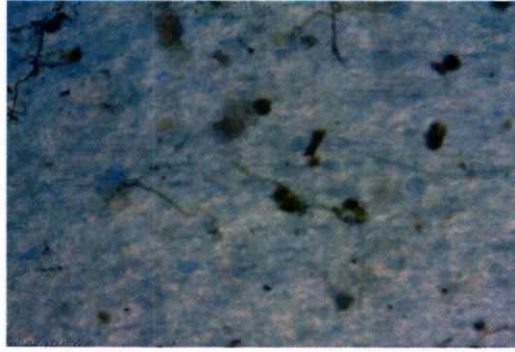
(ง)



(จ)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7 :

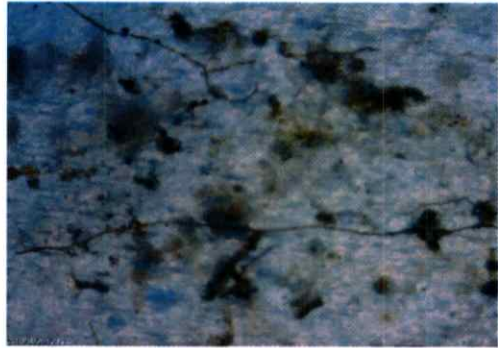
(ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9



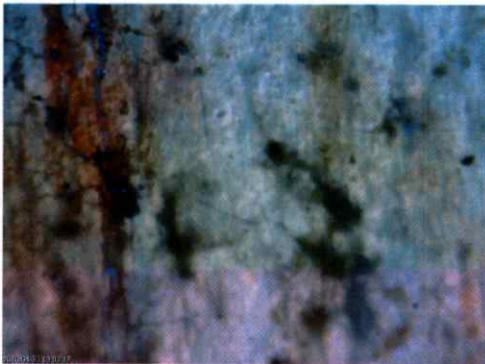
(ก)



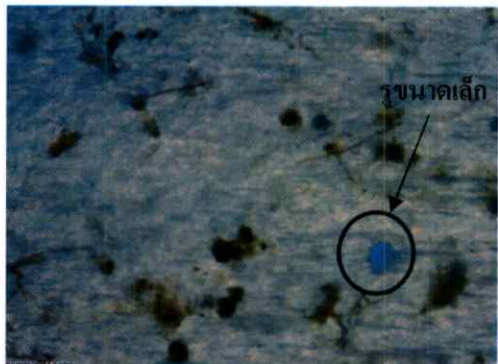
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.13 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 600 เท่า : (ก) PE/TPS , (ข) PE/TPS/K3 , (ค) PE/TPS/K5 , (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9

จากรูปที่ 4.12 (ก-จ) แสดงภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์พบว่าฟิล์มสูตรที่เติมคาร์บอนสามารถเกิดรอยดำน้ำตาลในชิ้นงานได้เช่นเดียวกับฟิล์มสูตรที่ไม่ได้เติมคาร์บอน (PE/TPS) ทั้งนี้เนื่องจากการคาร์บอนสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ [67] และสามารถย่อยสลายโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นจึงยังช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการย่อยสลายได้มากยิ่งขึ้น และเนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups, -OH) จำนวนมาก ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง และแคลปาคาร์บอนมีโครงสร้างที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิลเช่นกัน จึงสามารถยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และมีสมบัติชอบน้ำ ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของจุลินทรีย์ในดินซึ่งต้องอาศัยความชื้น ดังนั้นการเพิ่มปริมาณคาร์บอน จึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น ซึ่งกลไกการย่อยสลายจากการฝังดินของพอลิเมอร์มี 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นที่ 1 น้ำจะแพร่เข้าไป เป็นผลให้ฟิล์มเกิดการบวมและเกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ขึ้นบนฟิล์ม และ ขั้นที่ 2 เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์

จากรูปที่ 4.13 (ก-จ) พบว่า พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร PE/TPS/K3 , PE/TPS/K5 , PE/TPS/K7 และ PE/TPS/K9 หลังจากฝังดินมีรอยจุลินทรีย์ เกิดจุดสีน้ำตาลดำมากกว่า สูตร PE/TPS ที่ไม่ได้เติมคาร์บอนแสดงว่าแคลปาคาร์บอนมีส่วนช่วยทำให้ฟิล์มถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในดินได้มากยิ่งขึ้น โดยจุดสีดำที่เกิดขึ้นคือการเกิดสปอร์ของเชื้อราและการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อราซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่ปริมาณแคลปาคาร์บอนที่เติมลงไปไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณแคลปาคาร์บอนที่เติมลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรมีปริมาณน้อย จึงเห็นการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน ดังรูป 4.13 (ข-จ)

จากการทดลองใน ตอนที่ 1 พบว่าคาราจีแนนช่วยทำให้ลูกโป่งฟิล์มมีความเหนียว (sticky) มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง และจากสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (Tensile Strength at Max Load) ค่าเปอร์เซ็นต์ดัดยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และ ค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus) ลดลง และจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า แคปป์คาราจีแนนจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกลดลง แต่แคปป์คาราจีแนนที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมช่วยทำให้กระบวนการเป่าขึ้นรูปเกิดได้สมบูรณ์ และยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคาราจีแนนที่เติมลงไป ในพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสูตร พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณคาราจีแนนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณแคปป์คาราจีแนนไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนแต่จากการทดลองพบว่าสูตร PE/TPS/K7 ซึ่งเติมแคปป์คาราจีแนน 7 phr เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานวิจัยต่อไป เพราะให้ค่าสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ไม่มากเมื่อเทียบกับสูตร PE/TPS และเป็นปริมาณที่ถูกดัดยืดและสามารถเป่าขึ้นรูปได้ดี

ดังนั้นในตอนที่ 1 ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติได้มากยิ่งขึ้น โดยถ้ารวมปริมาณแคปป์คาราจีแนนที่เติมลงไป 7 phr กับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 70 phr ทำให้มีส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติเพิ่มขึ้นคือ คือ 77 phr ดังนั้นแนวโน้มการย่อยทางชีวภาพจึงดีขึ้น

4.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปการจีแนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน

จากการทดลองตอนที่ 1 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแคลปการจีแนในขั้นตอนการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นั้น มีความหนืด ไหลช้า ทำให้ไม่สามารถดึงเข้าเครื่องตัดเม็ดอัดโนมิตได้ โดยจะเกิดการขาดเป็นช่วงๆ ส่งผลให้กระบวนการผลิตไม่เป็นไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อแก้ไขปัญหานี้จึงได้ทำการผสมกลีเซอรอลลงในแคลปการจีแนเพื่อให้มีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้น มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปการจีแนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน โดยเน้นการศึกษาดัชนีการไหล สมบัติเชิงกล ซึ่งผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้ และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจึงใช้อักษรย่อเพื่อแสดงสูตรดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	PE/TPS/K7	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน
2	PE/TPS/K7/G10	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 10% ของแคลปการจีแน
3	PE/TPS/K7/G20	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 20% ของแคลปการจีแน
4	PE/TPS/K7/G30	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 20% ของแคลปการจีแน
5	PE/TPS/K7/G40	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 40% ของแคลปการจีแน
6	PE/TPS/K7/G50	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ/แคลปการจีแน และกลีเซอรอลปริมาณ 50% ของแคลปการจีแน

หมายเหตุ PE คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น 70:30

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการสังเกตพอลิเมอร์ผสมสูตรในระหว่างกระบวนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียว หนอนคู่พบว่า การเติมกลีเซอรอลลงในแคปปาคาราจีแนนช่วยทำพอลิเมอร์ผสมที่ออกมาหน้าหัว คายไหลได้ต่อเนื่องมากกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอล (PE/TPS/K7) โดยสามารถดึงได้เป็นเส้น ยาวโดยไม่ขาด และเมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่ใส่ลงในแคปปาคาราจีแนนมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ ออกมาจากหน้าหัวคาย มีความเหนียว ไหลได้ดี และสามารถดึงเข้าเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ดีขึ้น โดยไม่เกิดการขาด และผิวของเม็ดคอมปาวด์ที่ได้มีผิวขรุขระเล็กน้อยและมีสีเหลืองอ่อน โดย ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่อยู่ระหว่างขั้นตอนการผสมแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมและเม็ดคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิด เกลียวหนอนคู่

สูตร	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมานอก หัวคาย	ลักษณะของเม็ดคอมปาวด์ที่ได้
PE/TPS/K7	มีผิวเรียบ ขาดง่าย ไม่สามารถดึงด้วย เครื่องตัดเม็ดได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบ แสง ผิวขรุขระ
PE/TPS/K7/G10	มีผิวเรียบ มีความเหนียวมากขึ้น ขาดยาก ขึ้นแต่ไม่สามารถดึงได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบ แสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G20	ผิวเรียบ เหนียวและหนืดมากขึ้น ขาด ยากขึ้น แต่ไม่สามารถดึงได้ต่อเนื่อง	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบ แสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G30	ผิวเรียบ มีความเหนียวและหนืด สามารถ ดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดโดยไม่ขาด	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบ แสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G40	ผิวเรียบ มีความเหนียวและหนืด สามารถ ดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดโดยไม่ขาด	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบ แสง ผิวขรุขระเล็กน้อย
PE/TPS/K7/G50	ผิวเรียบ มีความเหนียวและหนืด สามารถ ดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดโดยไม่ขาด	เป็นเม็ดของแข็งสีเหลืองอ่อน ทึบ แสง ผิวขรุขระเล็กน้อย

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหล (MFI) พบว่าค่าดัชนีการไหล(MFI)ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/แคปปาคาราจีแนน ที่มีการเติมกลีเซอรอลลงในส่วนของแคป ปาคาราจีแนน มีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่เติมกลีเซอรอลลงในแคปปาคาราจีแนน และเมื่อปริมาณ

กลีเซอรอลในคาราจีแนนมากขึ้นจะทำให้ค่า MFI เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลที่ใส่ลงในคาราจีแนนเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของคาราจีแนน ทำให้สายโซ่โมเลกุลขยับเขยื้อนได้มากขึ้น มีความยืดหยุ่น(Flexible) มากขึ้น [41] ดังนั้นเมื่อแคลป์การาจีแนนที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่อยู่ภายในพอลิเมอร์ผสมมีความยืดหยุ่น จึงทำให้เกิดการไหลที่ดีด้วย โดยพิจารณาจากค่า MFI ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ค่า MFI ไม่ได้เพิ่มอย่างเห็นได้ชัดเจนนัก เนื่องจากในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณแคลป์การาจีแนนผสมอยู่น้อย ทำให้กลีเซอรอลที่เติมลงในคาราจีแนนมีผลต่อกระบวนการผสมและกระบวนการเป่าขึ้นรูป ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป โดยผลการทดสอบดัชนีการไหลแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมที่ออกมาจากหัวคายของเครื่อง Melt Flow Indexer
PE/TPS/K7	0.82±0.58	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G10	0.83±0.43	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G20	0.84±0.51	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G30	0.86±0.47	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G40	0.88±0.52	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง
PE/TPS/K7/G50	0.91±0.46	เกิดฟองอากาศอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากการพองตัวของแป้ง

จากการสังเกตการเป่าขึ้นรูปฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม พบว่า สูตรที่เติมกลีเซอรอลลงไปในการาจีแนนในพอลิเมอร์ผสม มีความสามารถในการดึงยึดระหว่างกระบวนการเป่าขึ้นรูปได้มากขึ้น เนื่องจากแคลป์การาจีแนนดูดซับกลีเซอรอลไว้ ส่งผลให้กลีเซอรอลเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของคาราจีแนน ทำให้แรงดึงดูระหว่างโมเลกุลลดลงทำให้สายโซ่แคลป์การาจีแนนมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อีกทั้งในกระบวนการผสมและกระบวนการเป่าขึ้นรูปมีการให้ความร้อนดังนั้น แคลป์การาจีแนนที่มีกลีเซอรอลอยู่สามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงรูปได้คือเมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นสายโซ่อิสระ และเมื่ออุณหภูมิลดลงสายโซ่อิสระจะเปลี่ยนเป็นสายโซ่เกลียวและจากนั้นจะเกิดการรวมตัวของกลุ่มสายโซ่เกลียวเกิดเป็นเจลที่มีโครงสร้างร่างแหได้ (รูปที่ 4.14) ส่งผลให้มีความเหนียวมากขึ้น [41] ดังนั้นจึงสามารถดึงยึดได้ดีระหว่างกระบวนการผลิตและช่วยให้เป่าลมได้มากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มมีความบางลงเล็กน้อย โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะของ Bubble ที่ออกมาจากหัวดายวงแหวนคู่ของเครื่องเป่าฟิล์ม	ลักษณะของฟิล์มที่ได้และความหนาของฟิล์ม (μm)
	ได้	ไม่ได้		
PE/TPS/K7	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระ มีสีขาว เหลืองอ่อน การกระจายตัวดี แต่เนื่องจากขาดความหนา : 60-75 μm
PE/TPS/K7/G10	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-72 μm
PE/TPS/K7/G20	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-72 μm
PE/TPS/K7/G30	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-72 μm
PE/TPS/K7/G40	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อน การกระจายตัวดี ความหนา: 60-72 μm

ตารางที่ 4.10 (ต่อ) ลักษณะการเป่าขึ้นรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ

สูตร	ความสามารถในการเป่าขึ้นรูป		ลักษณะของ Bubble ที่ออกมาจากหัวคายวง แหวนคู่ของเครื่องเป่าฟิล์ม	ลักษณะของฟิล์มที่ได้ และความหนาของฟิล์ม (μm)
	ได้	ไม่ได้		
PE/TPS/K7/G50	✓		มีความหนืด เหนียว ยืดหยุ่น ผิวเรียบเนียน สามารถดึงด้วยความเร็วรอบลูกกลิ้งที่สูงได้มากขึ้นทำให้ได้ฟิล์มที่มีความยาวต่อเนื่อง	ผิวขรุขระ มีสีขาว เหลืองอ่อน การกระจายตัวดี แต่เนื่องจากขาดความหนา: 60-75 μm

4.2.2 สมบัติทางความร้อน

ในการทดลองได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนเบื้องต้นของแคปปาคาราจีแนนบริสุทธิ์และแคปปาคาราจีแนนที่ผสมกลีเซอรอลในอัตราส่วนผสมระหว่างแคปปาคาราจีแนน : กลีเซอรอลเท่ากับ 1:1 โดยใช้เครื่อง DSC จากการทดลองพบว่าแคปปาคาราจีแนนบริสุทธิ์มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) เท่ากับ 105°C และค่าเอนทาลปี เท่ากับ 220.9 J/g แต่เมื่อผสมกลีเซอรอลไปในแคปปาคาราจีแนน ให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและค่าเอนทาลปีที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแคปปาคาราจีแนนบริสุทธิ์ โดยค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และค่าเอนทาลปี ของแคปปาคาราจีแนนที่ผสมกลีเซอรอล เท่ากับ 128°C และ 287 J/g ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลจะไปลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่แคปปาคาราจีแนนทำให้สายโซ่แคปปาคาราจีแนนมีโอกาสการขยับเขยื้อนสายโซ่ได้มากขึ้น และเนื่องจากแคปปาคาราจีแนนมีประจุทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงเกิดแรงดึงดูดกับกลีเซอรอล [41] ส่งผลให้สายโซ่แคปปาคาราจีแนนสามารถเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากสายที่ไม่เป็นระเบียบเป็นสายโซ่เกลียวที่เป็นระเบียบและยืดหยุ่นได้มากยิ่งขึ้น ทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเติมกลีเซอรอลส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและค่าเอนทาลปีจึงมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงเป็นแนวทางเบื้องต้นในการที่เลือกใช้กลีเซอรอลมาปรับปรุงสมบัติความเป็นพลาสติกของแคปปาคาราจีแนน ดังแสดงในตารางที่ 4.11

แต่หลังจากทำการเตรียมฟิล์มและศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/แคปปาคาราจีแนน ที่ผสมกลีเซอรอลลงไปในส่วนที่เป็นคาราจีแนนในปริมาณที่แตกต่างกันคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนน (สูตร PE/TPS/K7/G10 , PE/TPS/K7/G20 , PE/TPS/K7/G30 , PE/TPS/K7/G40 และ PE/TPS/K7/G50 ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/แคปปาคาราจีแนน (PE/TPS/K7) พบว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไป

ในส่วนของแคปปาคาราจีแนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/แคปปาคาราจีแน ให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c onset) แตกต่างกันเล็กน้อย อาจกล่าวได้ว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนไม่มีผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c onset) จึงมีค่าต่างกันเล็กน้อย แต่กลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนมีผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก โดยพบว่ากลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนจะทำให้ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลทำให้แคปปาคาราจีแนที่อยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดแรงकुกลม โดยการเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่อิสระเป็นสายโซ่เกลียวที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15) และแคปปาคาราจีแนอาจเหนี่ยวนำให้สายโซ่ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของพอลิเอทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความเป็นผลึกมากขึ้น ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

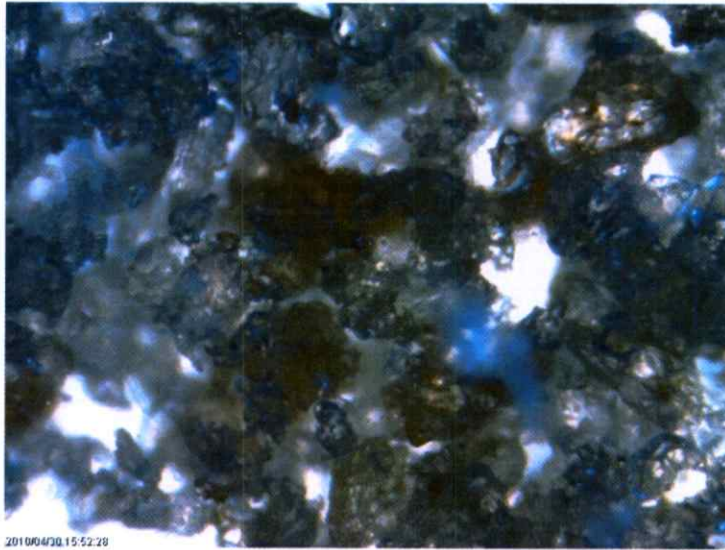
เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่เติมกลีเซอรอลลงในแคปปาคาราจีแนในปริมาณที่แตกต่างกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่าให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c onset) ไม่แตกต่างกัน อาจกล่าวได้ว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนไม่มีผลต่อความสมบูรณ์ของผลึกและการเปลี่ยนแปลงขนาดผลึก ดังนั้นอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_c onset) มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณกลีเซอรอลที่เติมลงในแคปปาคาราจีแนมีผลต่อเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก โดยพบว่า สูตร PE/TPS/K7/G30 , PE/TPS/K7/G40 และ PE/TPS/K7/G50 ซึ่งเติมกลีเซอรอลลงในแคปปาคาราจีแน ปริมาณ 30%, 40% และ 50 % โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแน ให้ค่าเอนทัลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงกว่า สูตร PE/TPS/K7/G10 , PE/TPS/K7/G20 ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแน ปริมาณมาก (30% , 40% , 50 %) ทำให้สายโซ่ของแคปปาคาราจีแนมีโอกาสเปลี่ยนโครงสร้างจากสายโซ่อิสระเป็นสายโซ่เกลียวมากขึ้น ดังนั้นอาจเหนี่ยวนำให้สายโซ่ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของพอลิเอทิลีนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น ดังนั้นความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าเอนทัลปีและค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว และเอนทัลปีของแคปไซคาร์จีแนมจากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว $T_m (^{\circ}\text{C})$	อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก $T_{c\text{ onset}} (^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)
K-carrageenan	104	-	220.9	-
K-carrageenan + Glycerol (ratio of K-carrageenan: Glycerol = 1:1)	128	-	287	-

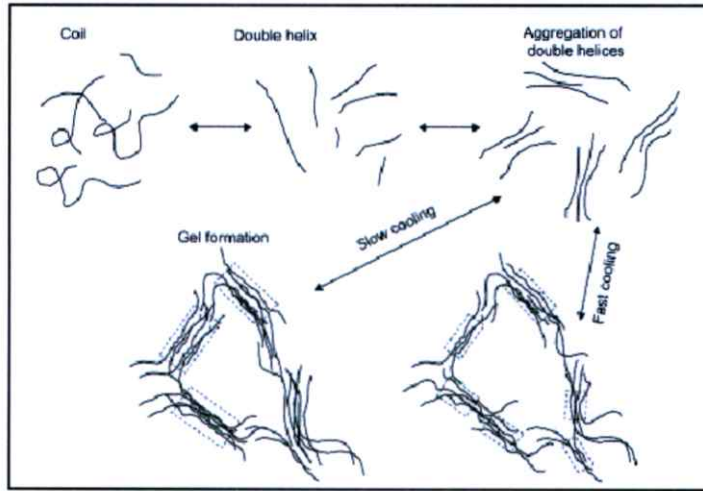
ตารางที่ 4.12 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆจากเทคนิค DSC

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว $T_m (^{\circ}\text{C})$	อุณหภูมิเริ่มการตกผลึก $T_{c\text{ onset}} (^{\circ}\text{C})$	ΔH_f (J/g)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)
PE/TPS/K7	110	91	162.8	25.45
PE/TPS/K7/G10	110	86	157	26.09
PE/TPS/K7/G20	111	85	157.2	26.02
PE/TPS/K7/G30	114	86	192.3	31.23
PE/TPS/K7/G40	114	86	190.8	30.86
PE/TPS/K7/G50	114	85	186.7	30.77



รูปที่ 4.14 ภาพการเกิดการบวมตัวของผงแคปพาคาราจีแนนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในปริมาณ 30% ของแคปพาคาราจีแนน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 600 เท่า

จากรูปที่ 4.14 แสดงภาพการเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของแคปพาคาราจีแนนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในปริมาณ 30% ของแคปพาคาราจีแนน โดยในการทดลองทำการให้ความร้อนแก่แคปพาคาราจีแนนที่ผสมกลีเซอรอล 30% แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (OM) เพื่อดูการเปลี่ยนแปลง จากการทดลองพบว่าผงแคปพาคาราจีแนนสีเหลืองอ่อนเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่มีสีใส ซึ่งโดยทั่วไปแคปพาคาราจีแนนมีสมบัติในการเกิดเจล โดยเมื่อแคปพาคาราจีแนนถูกทำให้อยู่ในรูปของสารละลายจะเกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ (Coil) และขณะเย็นตัวลงจะเกิดโครงสร้างที่เป็นสายโซ่เกลียวคู่ (Double helix) เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงจะเกิดโครงสร้างที่เป็น 3 มิติ โดยสายโซ่พอลิเมอร์แต่ละเส้นจะรวมตัวเข้ามาใกล้กันและเกิดเป็นจุดเชื่อมโยง ซึ่งเมื่อเกาะรวมกันมากขึ้นจะทำให้เกิดความแข็งตัวเป็นเจล ซึ่งกลไกการเกิดเจลของคาราจีแนนแสดง [70] ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบจำลองกลไกการเกิดเจลของแคปซาคาราจีแนน [70]

ในการทดลองแคปซาคาราจีแนนไม่ได้ถูกทำให้ในรูปของสารละลายดังนั้นกลไกการเกิดเจลที่กล่าวข้างต้นอาจไม่เกิดขึ้นกับแคปซาคาราจีแนนได้อย่างสมบูรณ์ แต่การที่เติมกลีเซอรอลลงไปจะทำให้แคปซาคาราจีแนนคู่ซบกลีเซอรอลแล้วเกิดการบวมตัวขึ้นและเมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการผสม เช่น มีอุณหภูมิเกิดขึ้นประมาณ 60°C ในขณะผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ซึ่งแคปซาคาราจีแนนที่มีกลีเซอรอลสามารถเกิดการหลอมละลายได้บางส่วน ทำให้มีโอกาสเกิดกลไกดังที่กล่าวข้างต้น และเมื่อทำให้เย็นลงจึงเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นไฮโดรเจล ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแคปซาคาราจีแนนที่มีการผสมกลีเซอรอลลงไปสามารถเกิดไฮโดรเจลได้ แล้วหลังจากนั้นมีการจัดเรียงตัวของผลึกที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าเอนทาลปีที่สูงขึ้น ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการเติมกลีเซอรอลในส่วนของแคปซาคาราจีแนนจึงทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น

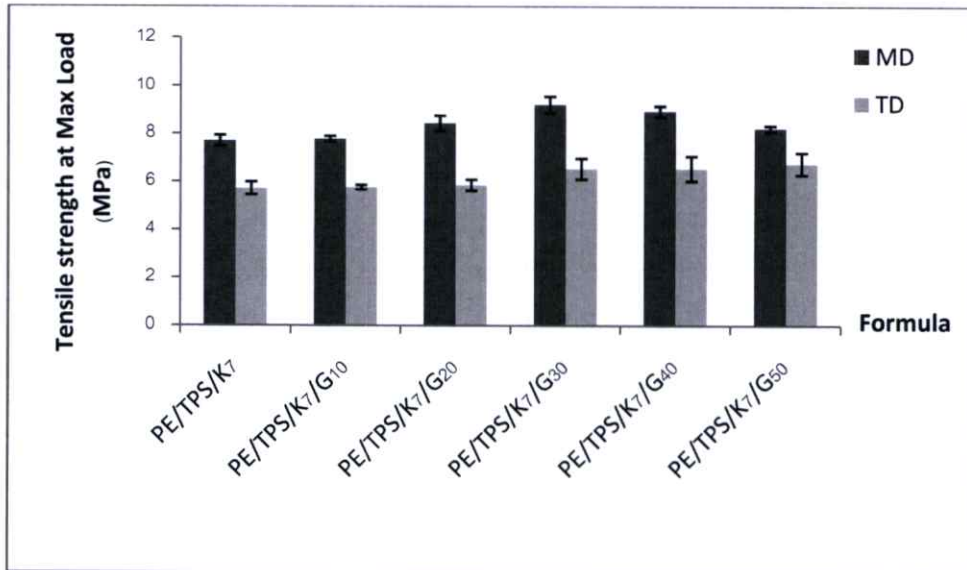
4.2.3. สมบัติทางกล

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ของฟิล์มสูตรที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลลงในแคปลาการาจีแนน (PE/TPS/K7) มีค่าสูงกว่าสูตรที่เติมกลีเซอรอลในคาราจีแนนเล็กน้อย เนื่องจากในสูตรที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในแคปลาการาจีแนนนั้นเมื่อผ่านกระบวนการผสมและการขึ้นรูปจะทำให้แคปลาการาจีแนนเกิดเจล และหลังจากการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม คาราจีแนนมีสมบัติเป็น thermal reversible อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสายเกลียวได้อีกครั้ง [71] ซึ่งคาดว่าเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่เป็นระเบียบมากขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่ไม่เหมือนเดิม ทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จึงรับแรงกระทำได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลในคาราจีแนนมากขึ้นจึงส่งผลให้รับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเติมกลีเซอรอลลงในคาราจีแนนในปริมาณที่มากเกินไป(40 และ 50%) อาจทำให้แรงยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ลดลงเพราะกลีเซอรอลสามารถเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของคาราจีแนนมาก โดยจะลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน จึงทำให้ความเป็นผลึกลดลง ความแข็งแรงลดลง ส่งผลให้ทนแรงกระทำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค DSC พบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูงดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงยึด ณ จุดรับแรงสูงสุดมีค่ามากที่สุด และค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของสูตรPE/PS/K7/G40 และ PE/TPS/K50 ลดลงเล็กน้อย ดังนั้นค่าความแข็งแรงดึงยึด ณ จุดรับแรงสูงสุด จึงมีค่าลดลงเล็กน้อยด้วย

จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่า Young's Modulus มีค่าลดลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากกลีเซอรอลจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของคาราจีแนน โดยจะไปลดแรงดึงดูดระหว่างพันธะ เช่น พันธะไฮโดรเจน ทำให้คาราจีแนนมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ฟิล์มมีความนิ่มมากขึ้นดังนั้นค่า Young's Modulus จึงลดลง และจากรูปที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด มีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลในคาราจีแนนมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของคาราจีแนนสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระมากขึ้นเพราะกลีเซอรอลจะไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของคาราจีแนน โดยจะลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน ดังนั้นสายโซ่มีความยืดหยุ่น(Flexible) มากขึ้นทำให้เมื่อรับแรงกระทำ(แรงดึง) แล้วสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากขึ้น ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาดจึงมีค่ามากขึ้น แต่ สูตรPE/TPS/K7/G40 และ PE/TPS/K7/G50 ที่มีปริมาณกลีเซอรอลมากเกินไปทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด ลดลงเล็กน้อย

และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลในแนวตามเครื่องจักรและแนวขวางเครื่องจักรพบว่าค่าความแข็งแรงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนวตามเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวขวางเครื่องจักร ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มทำให้เกิดการเรียงโมเลกุลในสองทิศทาง คือแรงดึงจากลูกกลิ้งและแรงลมจากการเป่าฟิล์ม และในการทดลองใช้อัตราเร็วในการดึงลูกกลิ้งมากดังนั้นสายโซ่พอลิเมอร์จึงมีการจัดเรียงตัวในแนวตามเครื่องจักรมากกว่าจึงทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ส่งผลให้รับแรงกระทำได้มาก ค่าความแข็งแรงดึงในแนวตามเครื่องจักรจึงมีค่ามาก และยังพบว่าค่า Young's Modulus

และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ในแนวขวางเครื่องจักรมีค่ามากกว่าในแนวตามเครื่อง คาดว่าเกิดจากการใช้ลมในการเป่าขยายฟิล์มน้อย ทำให้ฟิล์มยืดขยายตัวได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล จึงสามารถดึงยืดออกได้มากกว่าแนวตามเครื่องจักร



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โพลาสติกสตาร์ช/แคปพาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณต่างๆผสมอยู่ในแคปพาคาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD)

จากผลการทดลองในตอนที่ 2 พบว่ากัลิเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนนที่อยู่ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกคาร์ซ/แคปปาคาราจีแนน ช่วยปรับปรุงทำให้กระบวนการผสมในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ได้ดีขึ้น คือ สามารถดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่องตัดเม็ดอัดโนมัตได้ต่อเนื่องมากขึ้น โดยไม่เกิดการขาด และปริมาณกัลิเซอรอลที่สามารถดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ด คือ 30 % , 40 % และ 50 % โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนน จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่ากัลิเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนน ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แต่จะมีผลต่อค่าเอนทาลปี และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และพบว่าปริมาณกัลิเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนน ไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แต่จะมีผลต่อค่าเอนทาลปี และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และเมื่อเติม 30% , 40% และ 50 % โดยน้ำหนักของแคปปาคาราจีแนน จะให้ค่าเอนทาลปีและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่สูง

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่ากัลิเซอรอลและปริมาณกัลิเซอรอลที่เพิ่มขึ้นช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ผลของสมบัติเชิงกลที่ได้สอดคล้องกับสมบัติทางความร้อนที่พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมกัลิเซอรอลในแคปปาคาราจีแนนมากขึ้น และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็นได้ในขณะทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ กัลิเซอรอลช่วยทำให้แคปปาคาราจีแนนมีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้น ทำให้มีความยืดหยุ่นดี และสามารถดึงยืดและเป่าได้ดีขึ้น

ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากัลิเซอรอลที่เติมลงไปในแคปปาคาราจีแนนทำให้แคปปาคาราจีแนนมีสมบัติความเป็นพลาสติกเพิ่มขึ้น มีความยืดหยุ่นที่ดี โดยสามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกมาจากหัวดายในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ถูกดึงได้ด้วยเครื่องตัดเม็ดอัดโนมัตได้ ส่งผลให้การผลิตเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง และปริมาณกัลิเซอรอลที่มากขึ้นไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มลดลง ดังนั้นจากการทดลองได้เลือกใช้สูตร PE/TPS/K7/G30 เพื่อนำไปปรับปรุงสมบัติทางการย่อยสลายในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากสูตร PE/TPS/K7/G30 เป็นปริมาณที่เริ่มสามารถทำการดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่องตัดเม็ดอัดโนมัตได้ ให้ค่าความแข็งแรงดึงที่สูงที่สุด และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงที่สุด จึงมีความเหมาะสมที่จะไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

4.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน ด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีโลไฟ)

ในการทดลองได้นำพอลิเมอร์ผสม สูตร PE/TPS/K7/G30 จากตอนที่ 2 มาทำการเตรียมฟิล์ม โดยเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีโลไฟ) ลงไปในปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเน้นศึกษาปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีโลไฟ) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน เพื่อให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น โดยนำชิ้นงานไปทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนโดยทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Thermal oxidation)และทดสอบการย่อยสลายทางแสงโดยนำชิ้นงานไปฉายแสงยูวี จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกล และปริมาณออกซิเดชันด้วยการหาดัชนีคาร์บอนิล เพื่อเป็นการยืนยันเบื้องต้นว่าเกิดการย่อยสลายจริง และสำหรับสูตรที่มีการเติมฟีโลไฟในปริมาณ 5 phr มีปัญหาในขั้นตอนการผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ออกจากหัวดายขาดง่ายและเมื่อนำไปเป่าเป็นฟิล์มพบว่าเกิดการขาด คาดว่าเกิดจากปริมาณฟีโลไฟที่มีมากเกินไปเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เกิดขึ้นทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้ไม่สามารถดึงยึดและเป่าเป็นฟิล์มได้ ดังนั้นการทดลองตอนที่กล่าวต่อไปจึงเป็นการศึกษาปริมาณฟีโลไฟที่ 1 phr และ 3 phr เท่านั้น โดยอักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง

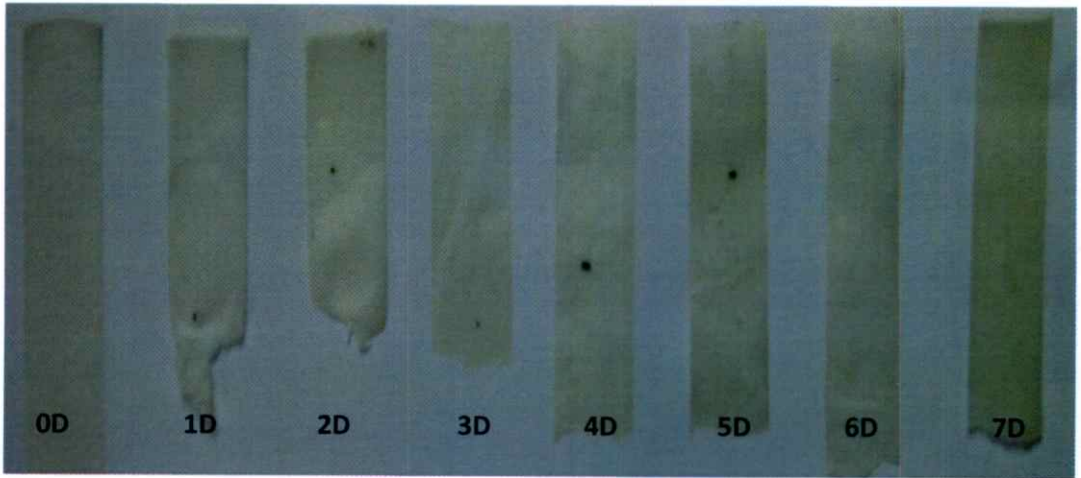
ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	PE/TPS/K7/G30	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน และกลีเซอรอลปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแคปปาการาจีแนน
2	PE/TPS/K7/G30/P1	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน และกลีเซอรอลปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแคปปาการาจีแนน และสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีโลไฟ) 1 phr
3	PE/TPS/K7/G30/P3	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน และกลีเซอรอลปริมาณ 30% โดยน้ำหนักของแคปปาการาจีแนน และสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีโลไฟ) 3 phr

หมายเหตุ PE คือ LDPE ผสมกับ LLDPE โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง LDPE:LLDPE เป็น 70:30

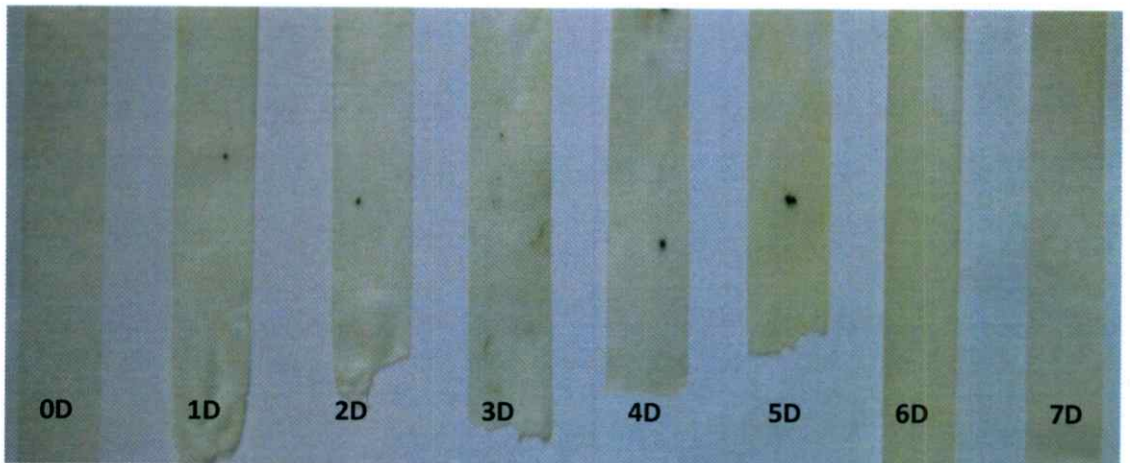
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ

4.3.1.1 หลังเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C

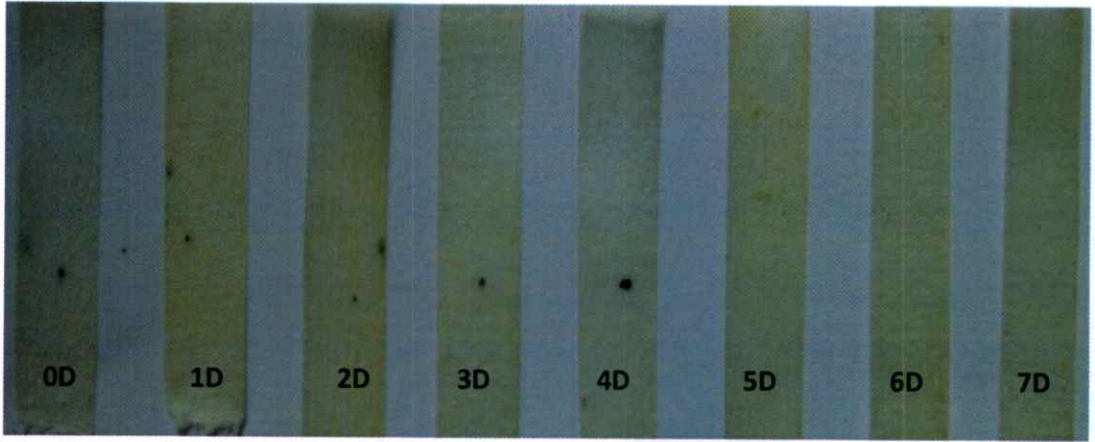
จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 7 วันพบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/K7/G30/P3 ที่มีการเติมสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณ 1 และ 3 phr จะทำให้ฟิล์มมีสีเหลืองมากกว่าสูตร PE/TPS/K7/G30 ซึ่งการที่ฟิล์มที่เปลี่ยนไปแสดงว่า ฟิล์มสูตรที่เติมสารเร่งการเชื่อมสภาพเริ่มย่อยสลายได้เมื่อถูกความร้อน โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 4.19 ก-ค



(ก)



(ข)

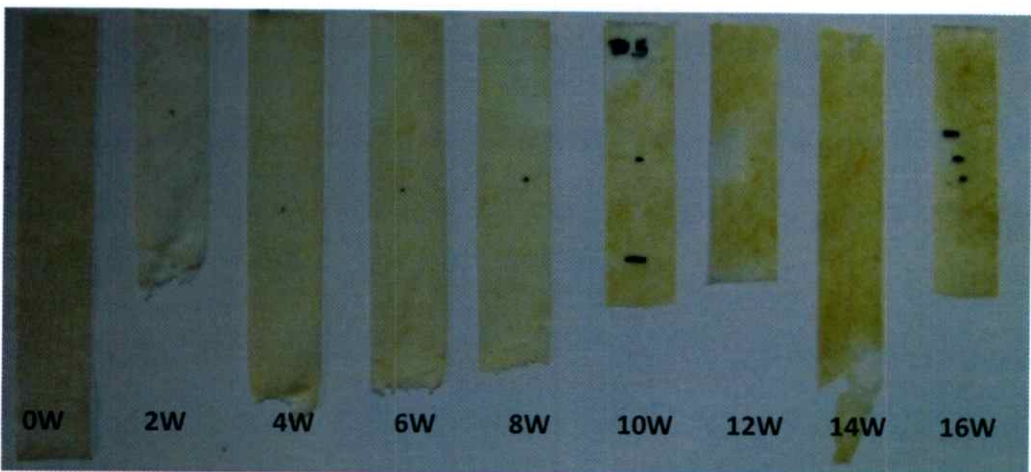


(ค)

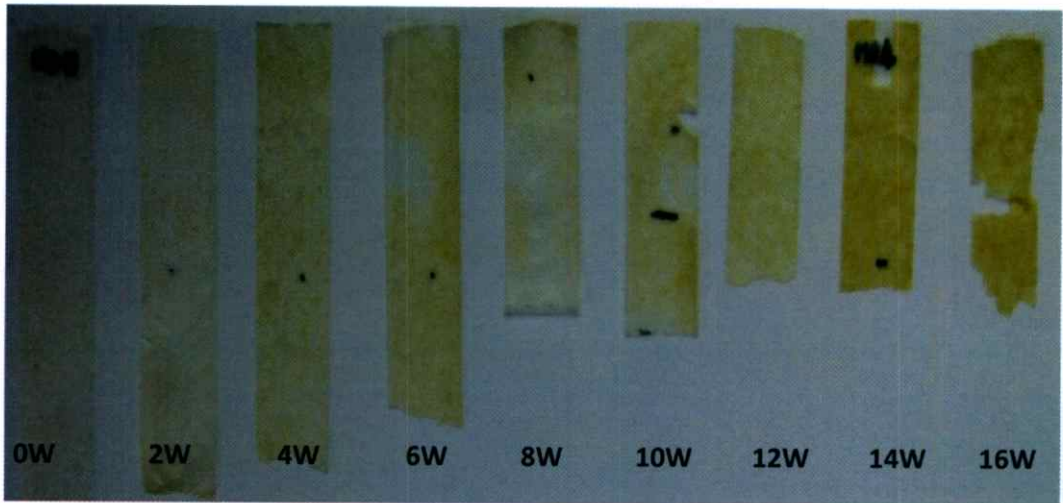
รูปที่ 4.19 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการทำเองจิ้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3

4.3.1.2 หลังฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน

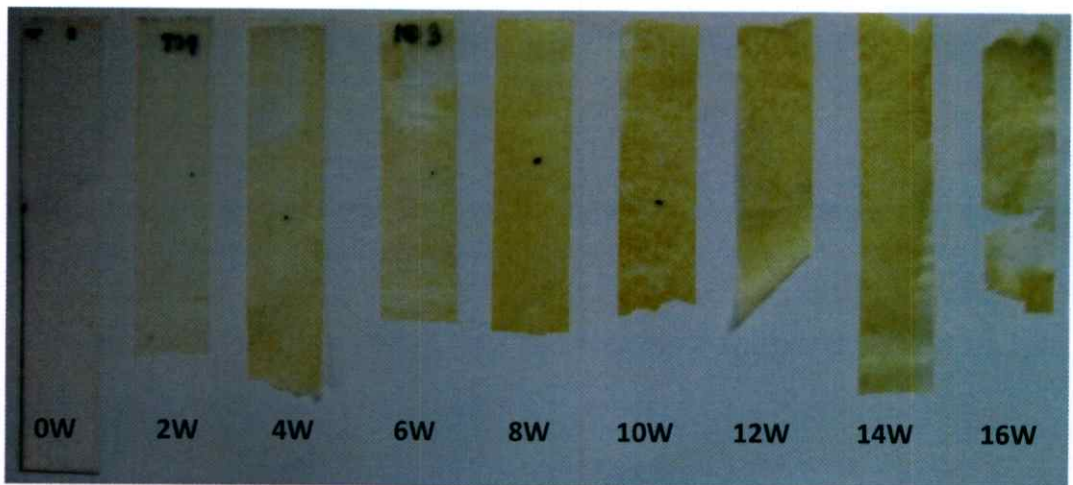
หลังจากการทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน พบว่า ฟิล์มสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/K7/G30/P3 ที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1 และ 3 phr มีความกรอบ เปราะ และสีเหลืองเข้มกว่า สูตร PE/TPS/K7/G30 และยังพบว่าหลังจากฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 2 เดือน ฟิล์มในทุกสูตรมีความเปราะแตกหักได้ง่ายจนไม่สามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชิ้นงานหลังจากฉายแสงยูวีแสดงดังรูปที่ 4.20 ก-ค



(ก)



(จ)



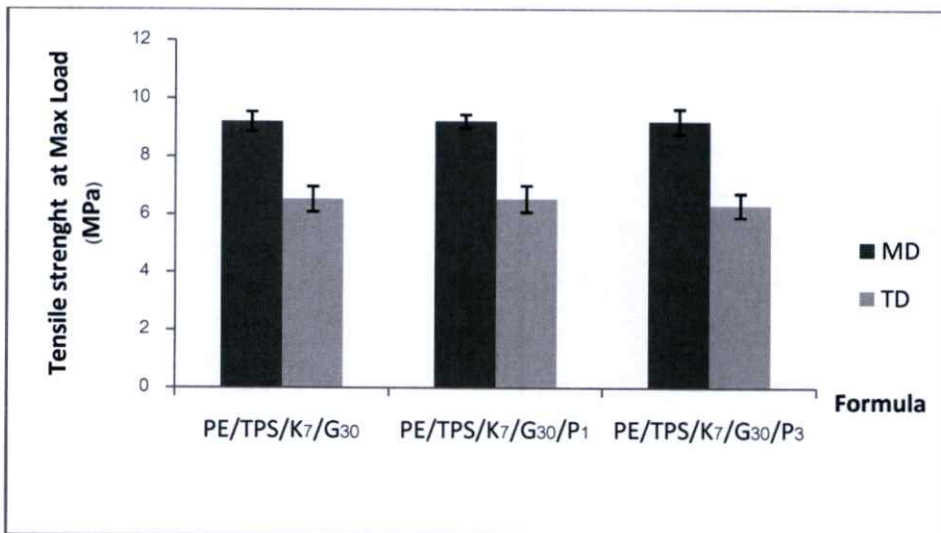
(ค)

รูปที่ 4.20 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการฉายรังสีเป็นระยะเวลา 4 เดือน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (จ) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3

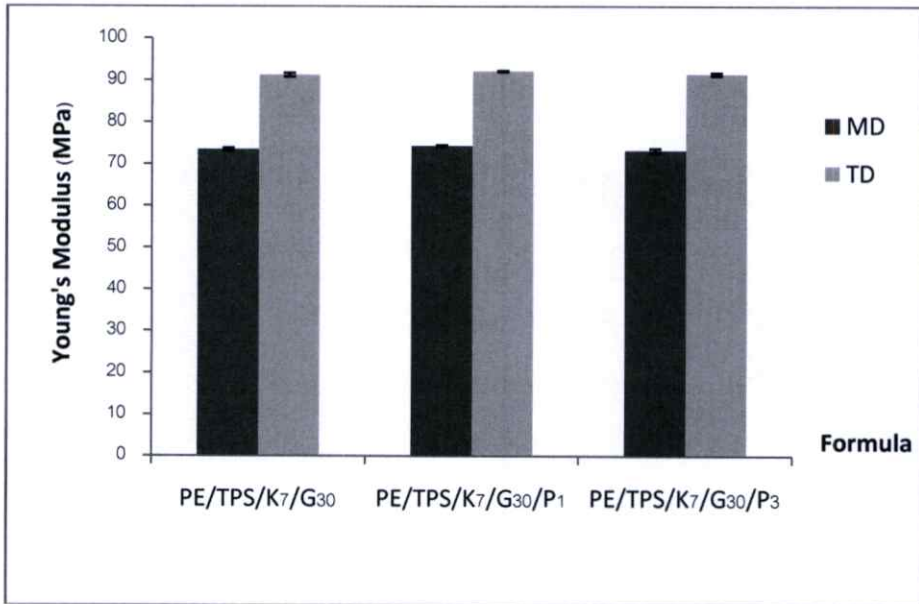
4.3.2 สมบัติเชิงกล

4.3.2.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนที่จะนำไปทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสง

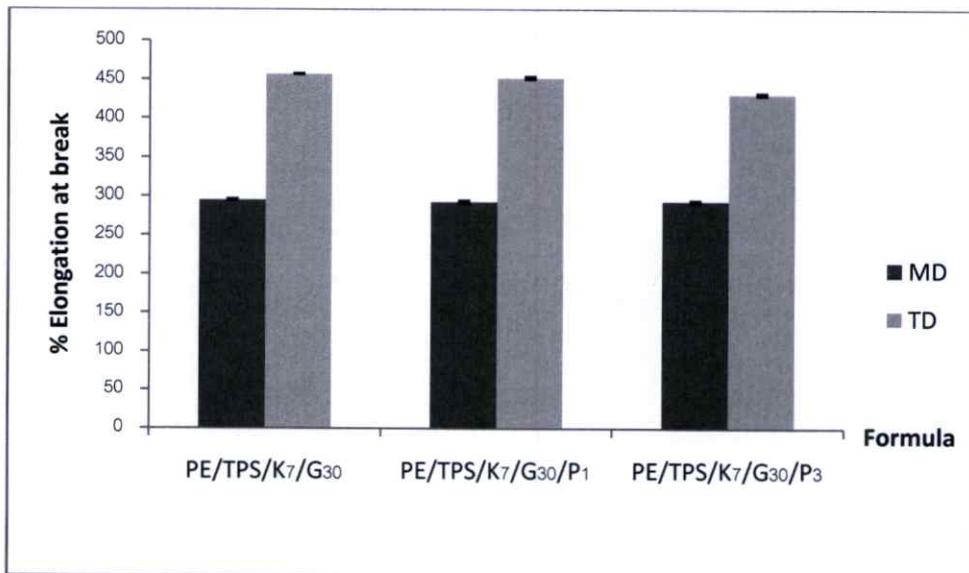
จากรูปที่ 4.21-4.23 พบว่าเมื่อเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าไม่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากปริมาณฟิไลท์ที่ใส่ลงไปมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณสารทั้งหมด และสารฟิไลท์กระจายตัวอยู่ในฟิล์มได้ดีจึงไม่เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคและฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมฟิไลท์อยู่ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ยาก เพราะฟิไลท์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อรับความร้อน แสงยูวี และออกซิเจนเท่านั้น [26] ดังนั้นปริมาณฟิไลท์จึงไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สภาวะก่อนทำการเอจิงและก่อนฉายแสงยูวี



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปไซซินที่ที่มีปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟิไลท์) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจิงและก่อนฉายแสงยูวี



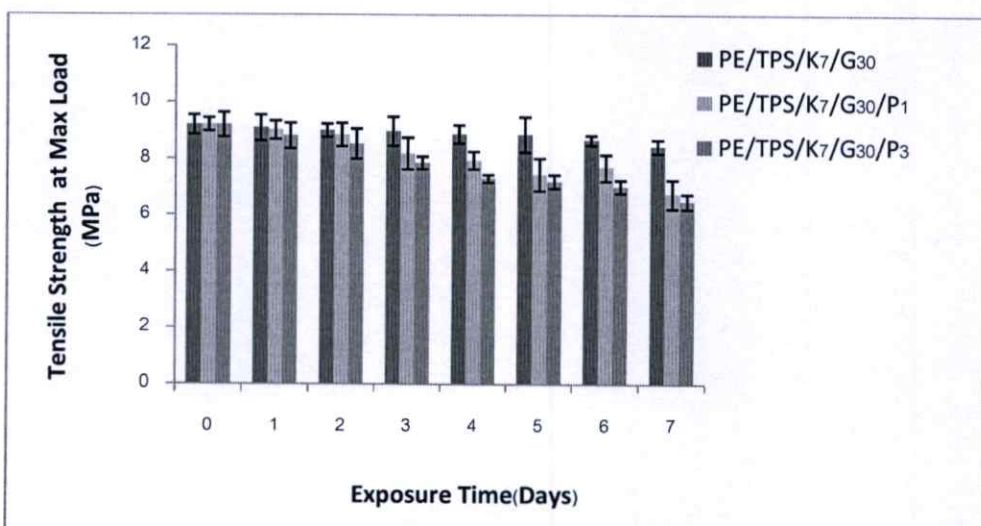
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก (พีไอลพี) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจจิงและก่อนฉายแสงยูวี



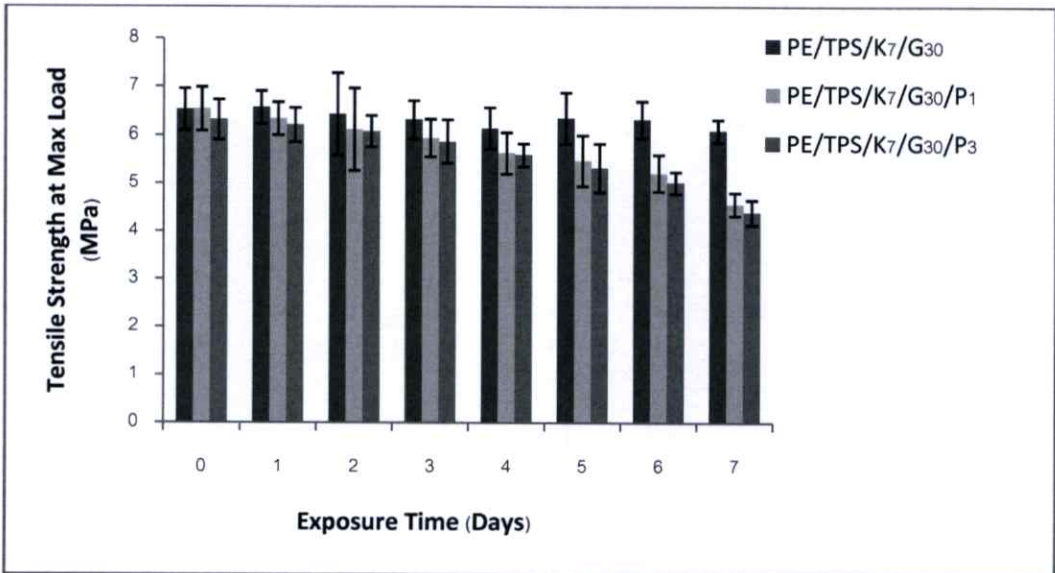
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก (พีไอลพี) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจจิงและก่อนฉายแสงยูวี

4.4.3.2 การย่อยสลายทางความร้อนโดยการเองจิง

จากรูปที่ 4.24- 4.26 (ก-ข) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อเวลาการเองจิงมากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีการสะสมพลังงานความร้อนมากขึ้นและภายในสูตรผสมมีส่วนประกอบที่เป็นแป้งกับคาร์โบไฮเดรตซึ่งสามารถดูดความร้อนได้ จึงช่วยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์รับความร้อนได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้นจึงทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียดสภาพ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงเล็กน้อยและพบว่าการเติมสารเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไพล์) ลงในพอลิเมอร์ผสมสูตร ช่วยส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไพล์)ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (Oxidative Degradation) ทำให้เกิดตัดของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain scission) [50] โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาคือคล้ายกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยแสง แต่ต่างกันตรงที่สารมัธยันต์ (Intermediate) ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะความร้อนจะเกิดการขาดของสายโซ่พอลิเอทิลีน (β -scission) และเกิดปฏิกิริยาไดยกกว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแสง (Photo-oxidation) ดังนั้นการเสียดสภาพของพอลิเมอร์สูตรในช่วงการเองจิงที่ระยะเวลา 1-4 วันจึงไม่เกิดการเปลี่ยนของสมบัติเชิงกลมากนัก แต่ในการทดลองพบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อทำการเองจิงเป็นเวลา 7 วันที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณพีไพล์ที่เพิ่มขึ้นจะไปช่วยกระตุ้นให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเกิดเป็นอนุมูลอิสระมากขึ้น และจากนั้นจึงเกิดออกซิเดชันแล้วการตัดขาดของสายโซ่ได้ผลิตภัณฑ์ได้มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์เสียดสภาพ สมบัติเชิงกลจึงลดลง โดยสามารถแสดงกลไกของปฏิกิริยาได้ดังนี้รูปที่ 4.27 [61]

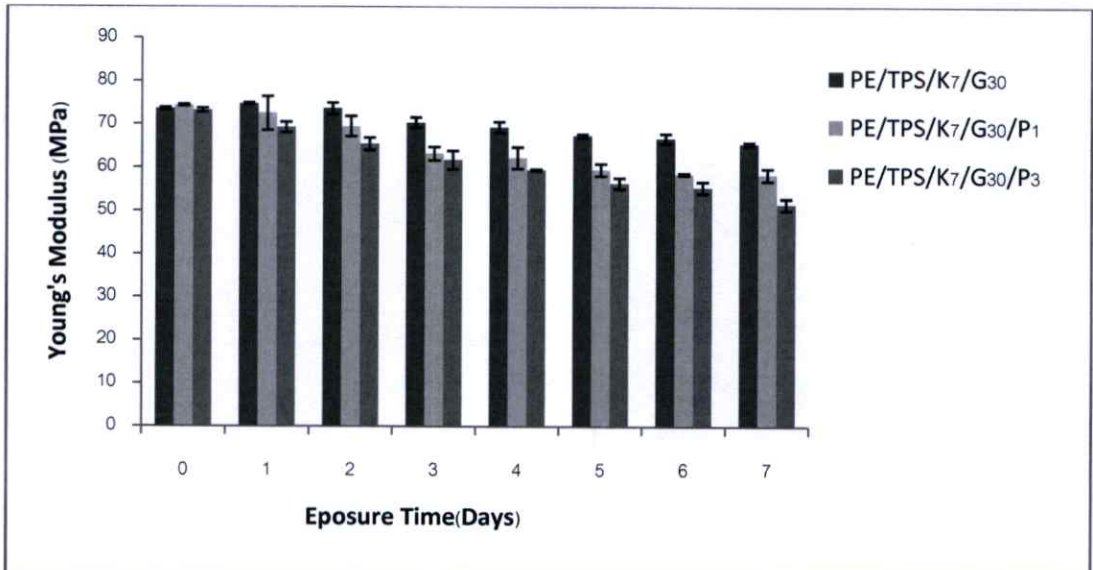


(ก)

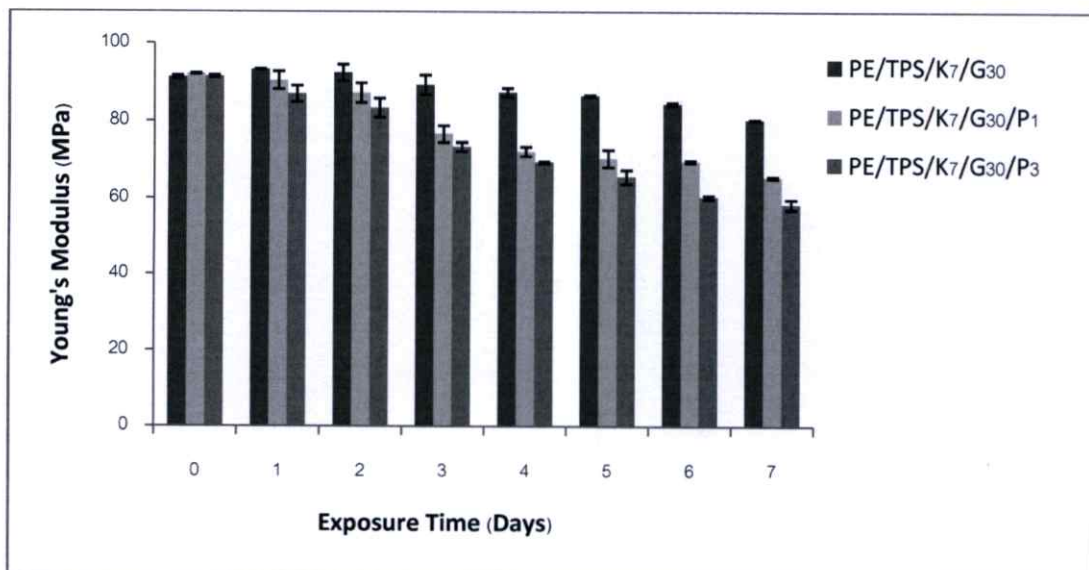


(ข)

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปทาคาริจีนแนน ที่มีปริมาณสารการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากเอจจึงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน

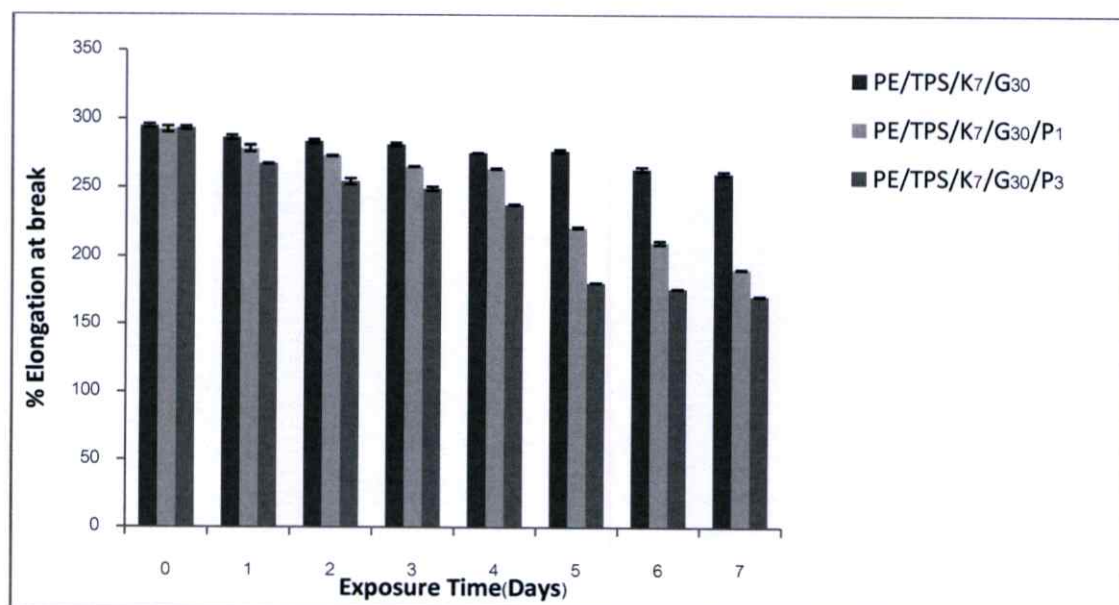


(ก)

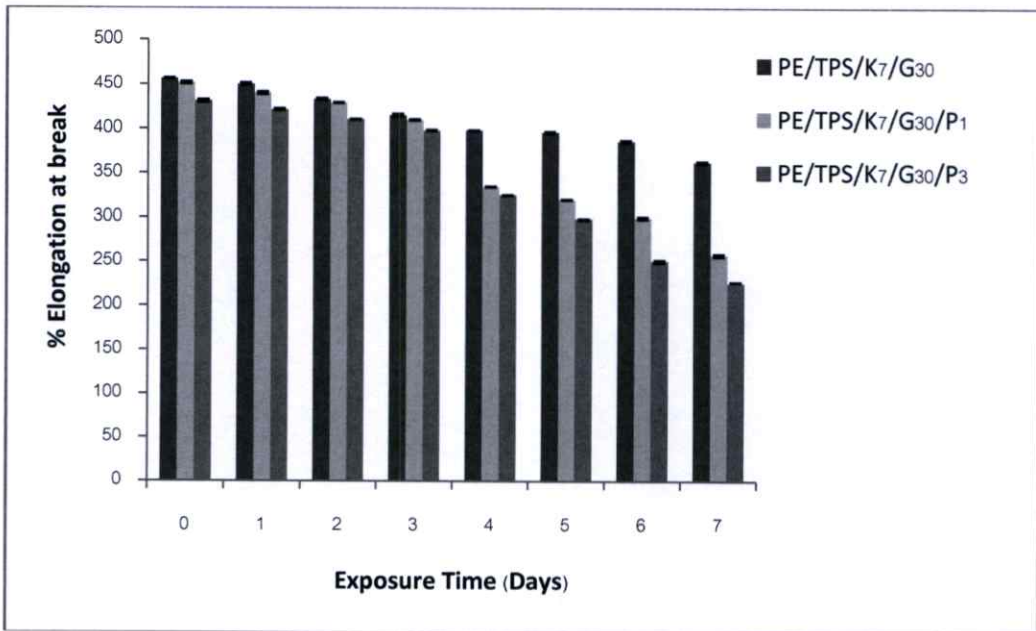


(ข)

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคลปาคารา จีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีไลฟ์) ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวตามเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจิงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน



(ก)

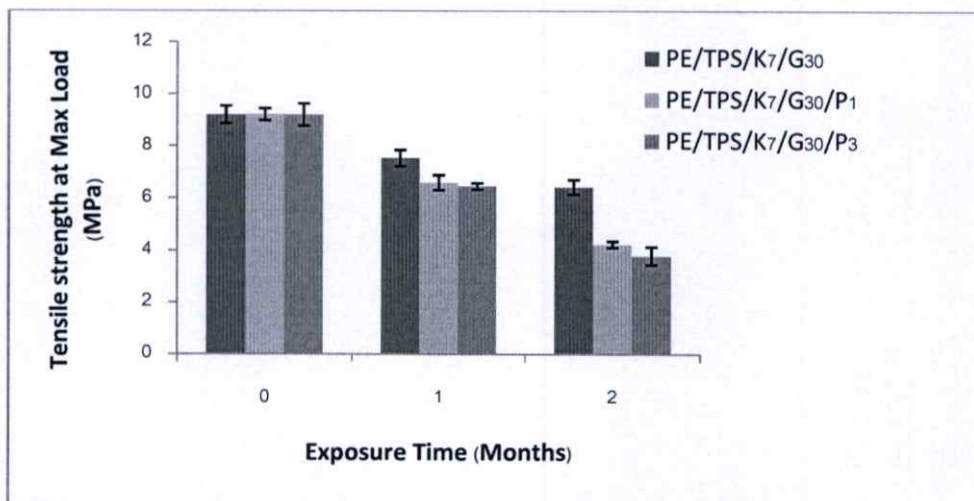


(ข)

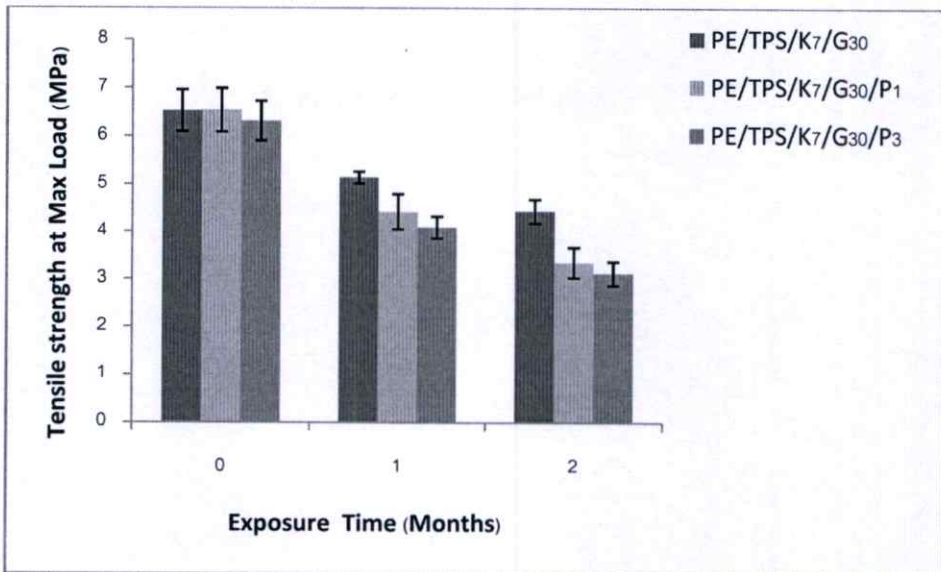
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไลฟ์) ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจิง ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน

4.4.3.3 การย่อยสลายทางแสงโดยการฉายแสงยูวี

จากรูปที่ 4.28-4.30 (ก-ข) พบว่า หลังจากฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 2 เดือน พิล์มทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดุลัส และ ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากแสงยูวีจะเข้าไปกระตุ้นให้สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (ฟีโลฟี) แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ และเข้าไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน จากนั้นพอลิเอทิลีนที่เป็นอนุมูลอิสระก็จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบเปอร์ออกไซด์ แล้วสารประกอบเปอร์ออกไซด์ก็จะดึงโครเจนจากโมเลกุลข้างเคียง ทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ จากนั้นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ก็จะสลายตัวทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลขึ้นภายในโครงสร้างของพอลิเอทิลีน และจากนั้นจะเกิดการสลายตัวผ่านกระบวนการนอร์ชชนิดที่ 1 และ 2 เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเอทิลีนทำให้เกิดสารประกอบประเภทคีโตน คาร์บอกซิลิก และสายโซ่พอลิเอทิลีนที่สั้นลง ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงมีแนวโน้มที่ลดลง และพบว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ค่ายังมอดุลัส และ ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ที่ลดลงมากที่สุด โดยปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกที่มากขึ้นจะช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากขึ้น ดังนั้นสายโซ่พอลิเมอร์ถูกตัดขาด สมบัติเชิงกลจึงลดลง ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 4.31

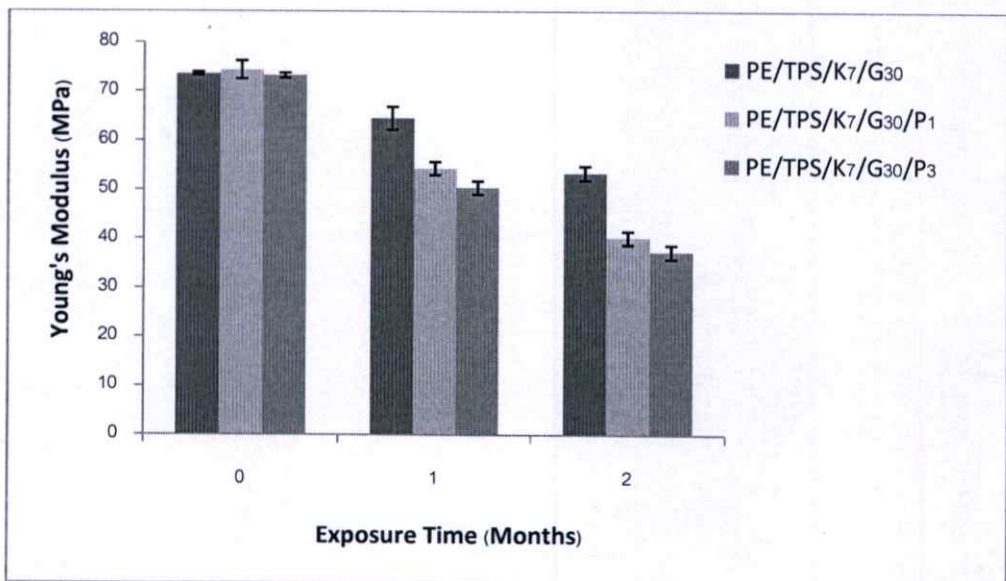


(ก)

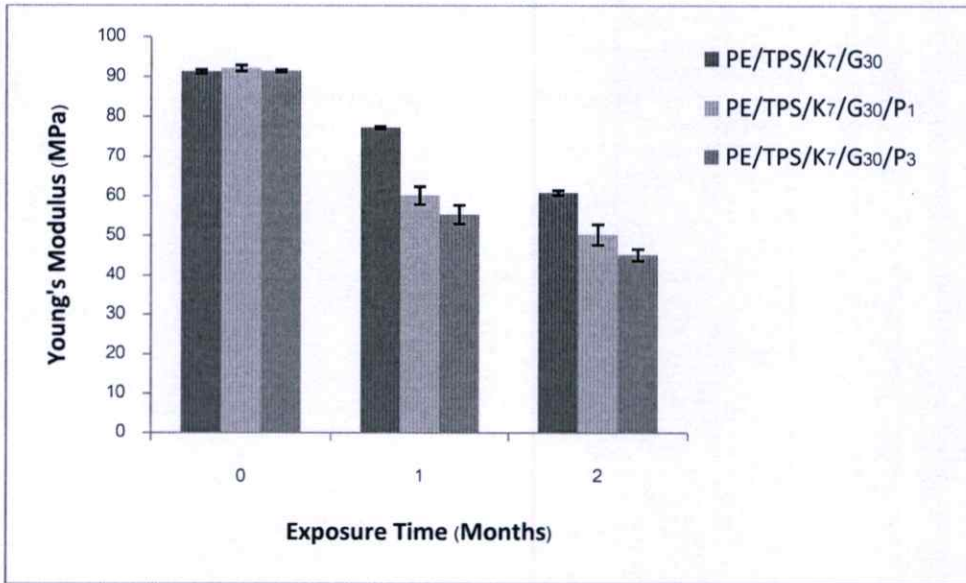


(ข)

รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปลาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไลพี)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

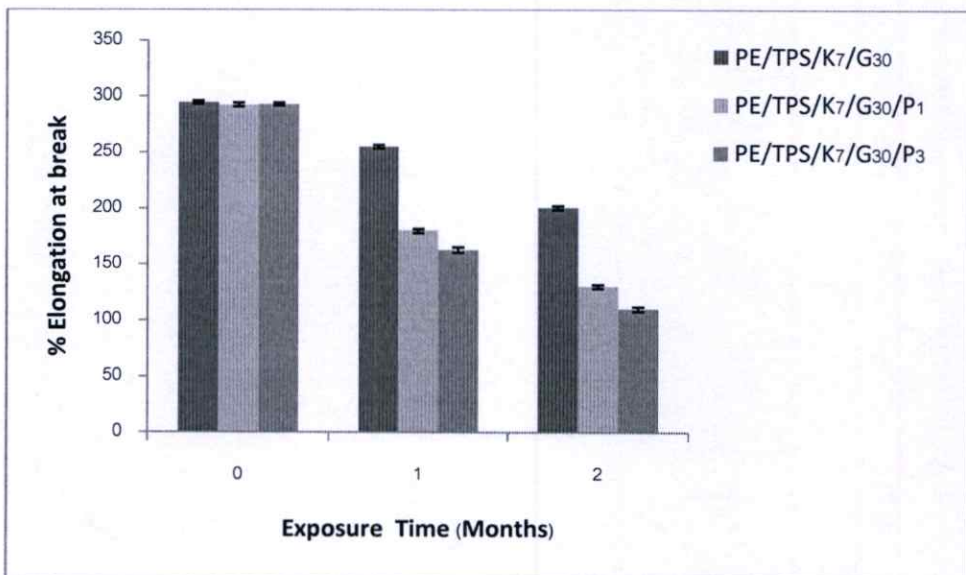


(ก)

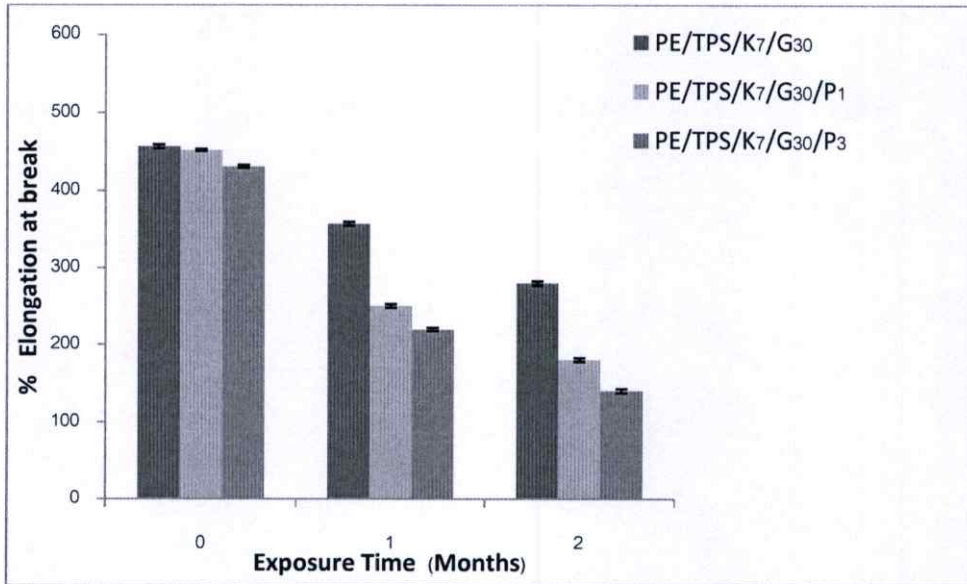


(ข)

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Young's Modulus ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล/แคปทาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก (ฟิไลฟ์) ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน

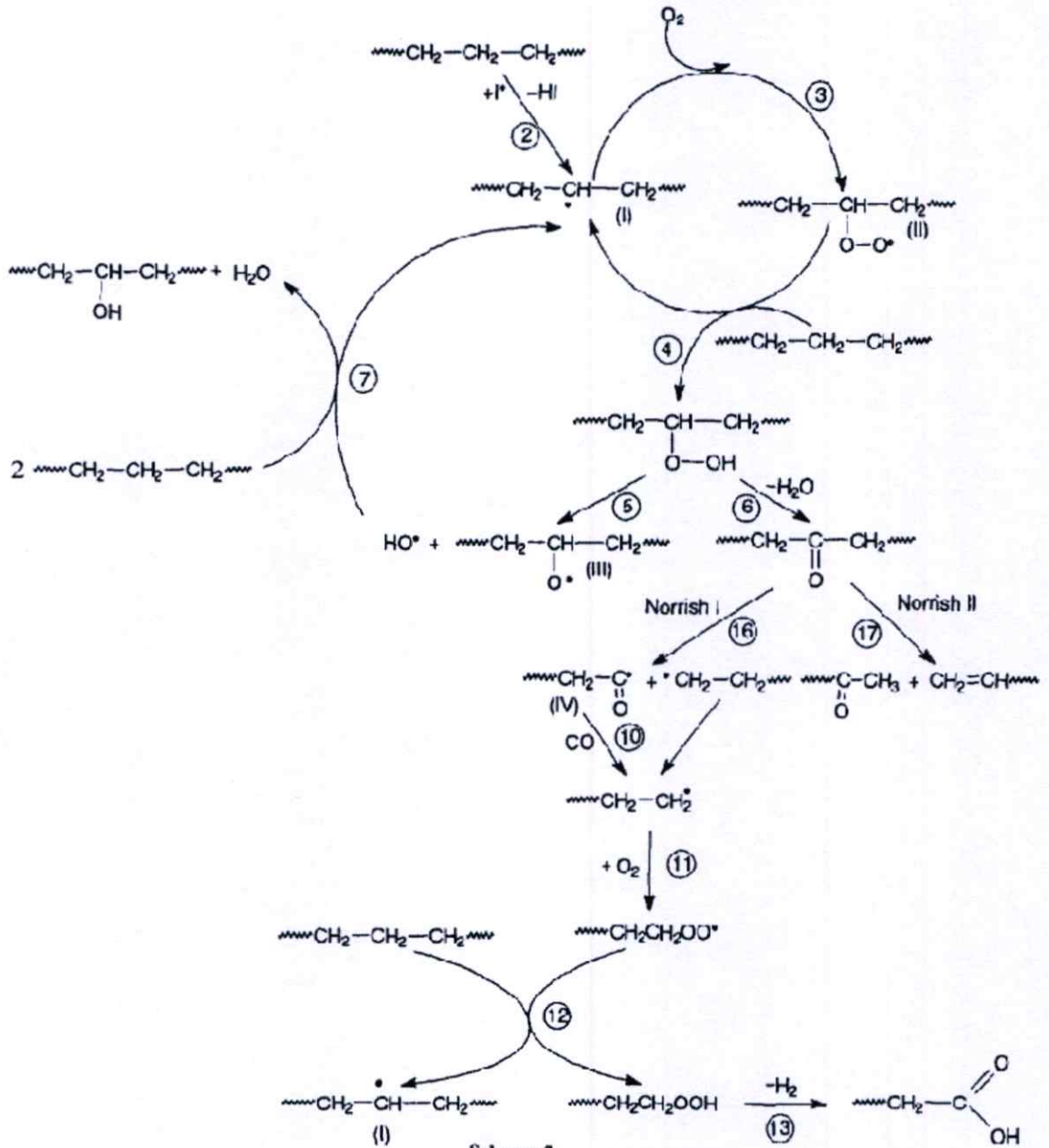
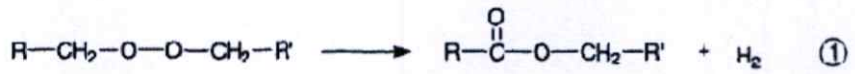


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปซูลคาร์บอน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไอล์ฟ)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน



Scheme 2

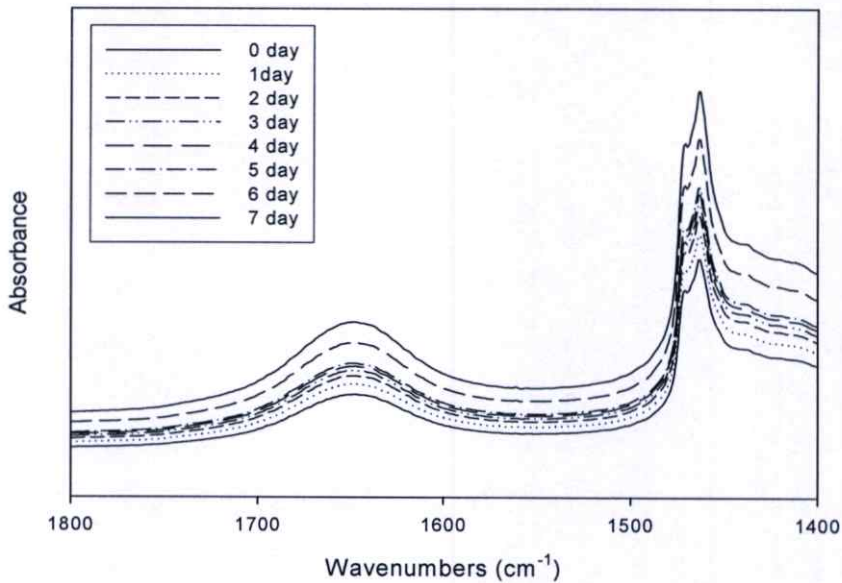
รูปที่ 4.31 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนโดยแสง [72]

4.3.3 การหาดัชนีคาร์บอนิล (Carbonyl Index)

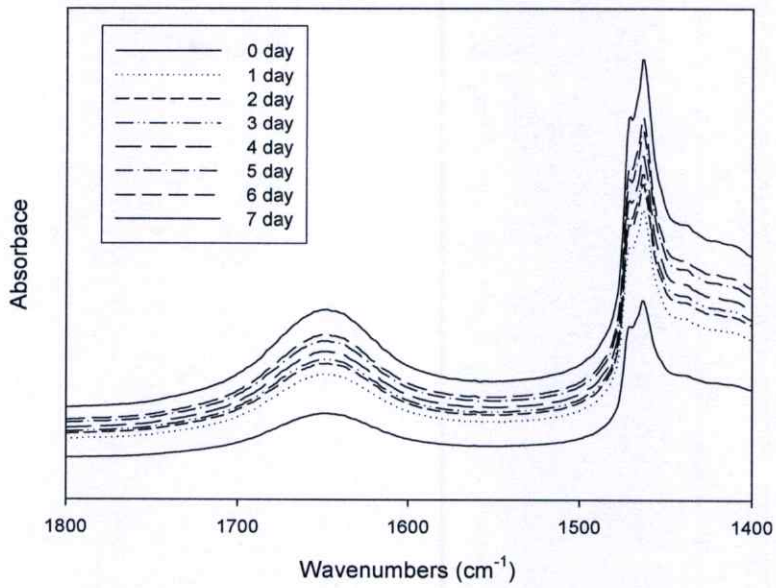
เพื่อเป็นการยืนยันการสลายตัวเนื่องมาจากความร้อนและทางแสงของพอลิเมอร์ผสมสูตรที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก จึงทำการตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค FT-IR โดยสนใจวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเลขคลื่น(wave number) ระหว่าง 1400 cm^{-1} กับ 1800 cm^{-1} ซึ่งสูตรการหาดัชนีคาร์บอนิล แสดงดังนี้

$$\text{Carbonyl Index} = \frac{\text{Absorption band at } 1640\text{-}1840\text{ cm}^{-1}}{\text{Absorption band at } 1463\text{ cm}^{-1}}$$

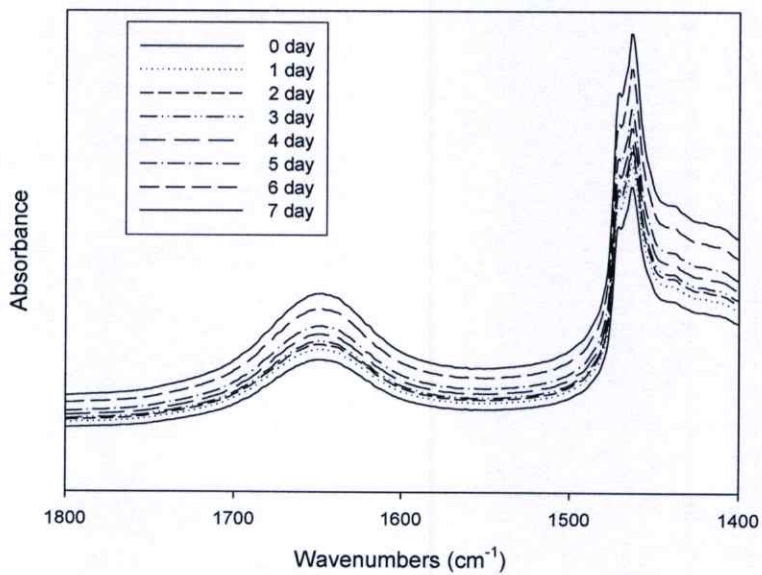
โดยที่เลขคลื่น $1640\text{-}1840\text{ cm}^{-1}$ จะเกิดการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งเป็น by-product เช่น คีโตน คาร์บอซิดิก ของปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน และที่เลขคลื่น 1463 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ CH_2 ซึ่งผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (FT-IR) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเอจจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7 วัน แสดงดังรูปที่ 4.32



(ก)



(จ)



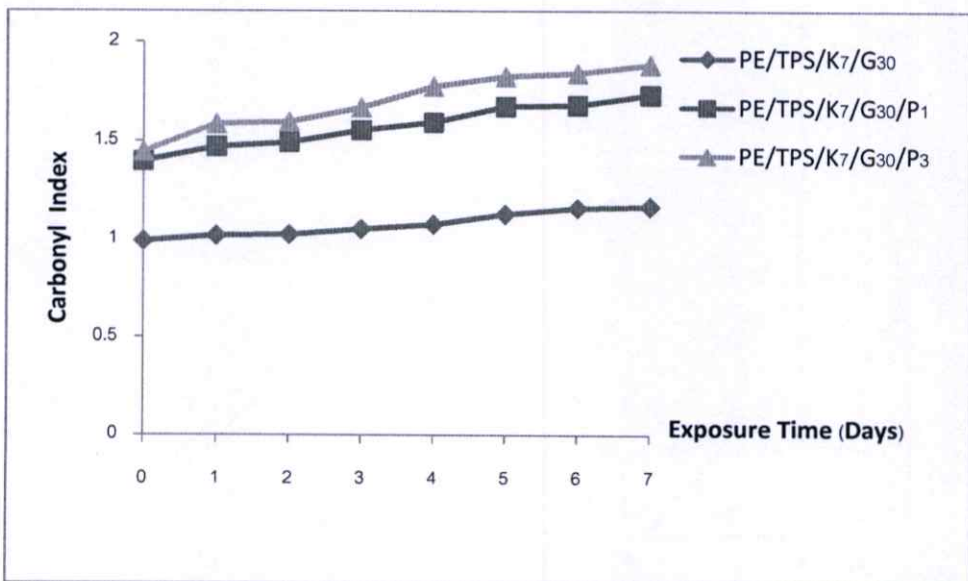
(ค)

รูปที่ 4.32 แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1800-1400\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์

ผสมสูตรต่างๆที่ทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะ 7 วัน : (ก) PE/TPS/K7/G30

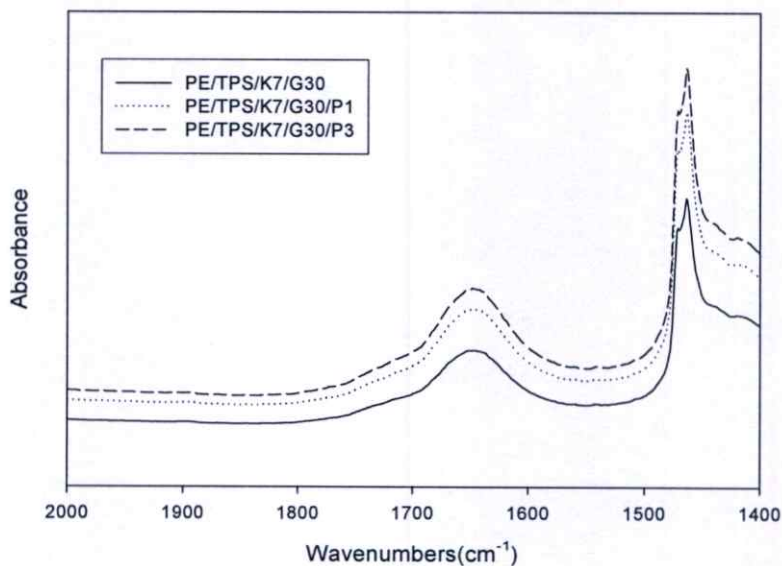
(ข) PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) PE/TPS/K7/G30/P3

จากรูปที่ 4.32 พบว่า หลังจากฟิล์มได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วจะเกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1600\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$ stretching) และค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น $1300\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงการดูดกลืนของ CH_2 bending มากขึ้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดมาคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีคาร์บอนิล (COI) จะได้ค่าดังรูปที่ 4.33 และจากรูปที่ 4.33 เมื่อเปรียบเทียบสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/G30/P3 ที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1 และ 3 phr ตามลำดับ กับสูตร PE/TPS/K7/G30 ที่ไม่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก พบว่าดัชนีคาร์บอนิลของ สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/G30/P3 มีค่าสูงกว่าสูตร PE/TPS/K7/G30 โดยค่าดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากความร้อนเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดโครงสร้างที่เป็นหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น [72] ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าการเติมสารเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไอดี)ช่วยทำให้พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยได้จริง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกที่เติมลงไปในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พบว่า สูตร PE/TPS/K7/G30/P3 ซึ่งเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 3 phr ช่วยทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เกิดการย่อยสลายได้มากกว่าสูตร PE/TPS/K7/G30/P1 ซึ่งเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก 1 phr ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ลดลง

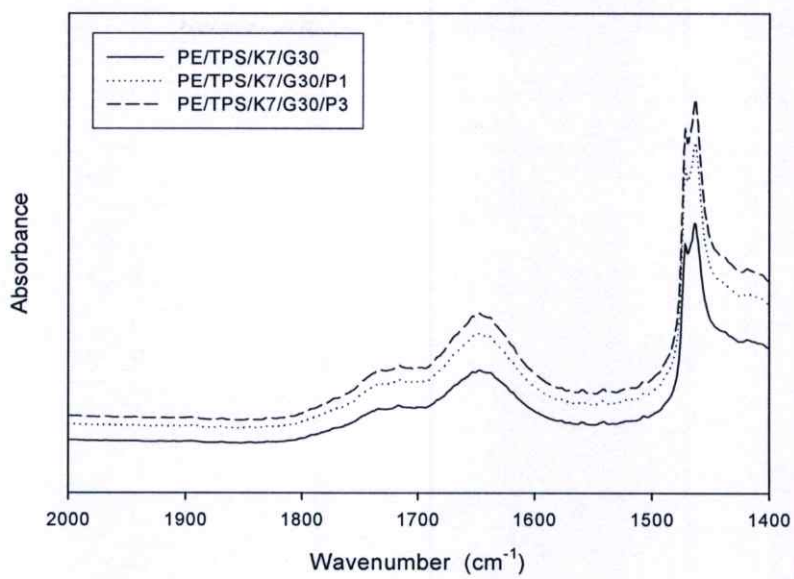


รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างหลังจากทำการเอจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7 วัน

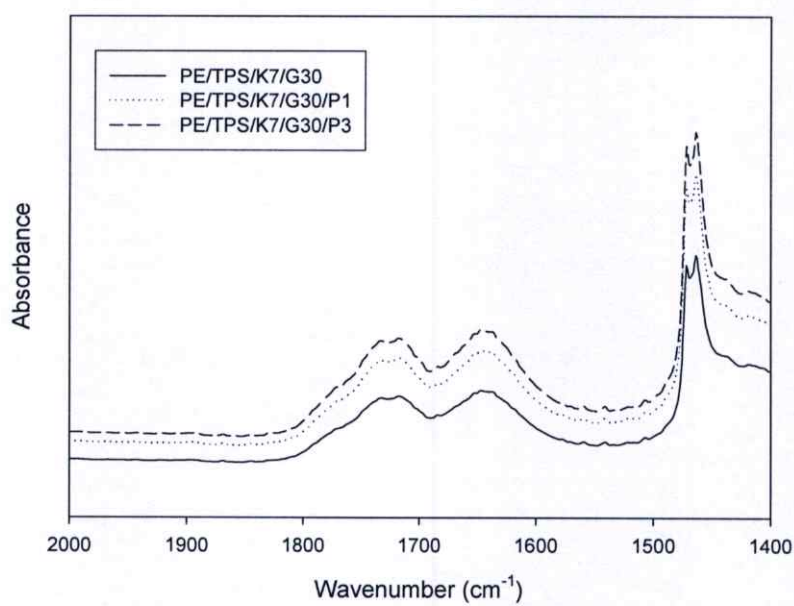
จากรูปที่ 4.34 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรที่ผ่านการฉายแสงยูวีเป็นเวลา 1-4 เดือน เกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1600-1800\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$ stretching) ซึ่งเกิดเป็นคาร์บอนิลของหมู่คีโตนมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากพีคที่ตำแหน่ง 1700 cm^{-1} และค่าการดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่น $1300-1450\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นช่วงการดูดกลืนของ CH_2 bending มากขึ้น และเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงไปคำนวณหาค่าดัชนีคาร์บอนิล แสดงดังรูปที่ 4.35 ซึ่งพบว่าค่าดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มสูตรที่เติมสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (PE/TPS/K7/G30/P1 และ PE/TPS/K7/G30/P3) มีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (PE/TPS/K7/G30) และค่าดัชนีคาร์บอนิลของสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องมาจากการสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติกจะไปเร่งให้เกิด ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดโครงสร้างที่เป็นหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น และเกิดการตัดขาดของสายโซ่พอลิเอทิลีน [72] ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าการเติมสารเชื่อมสภาพ(พีไลฟ์) ช่วยทำให้พอลิเอทิลีนในพอลิเมอร์สลายทางแสงยูวีเพราะมีดัชนีคาร์บอนิลเกิดขึ้นมาก และมีสมบัติเชิงกลที่ลดลง และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณพีไลฟ์ 3 phr ช่วยทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางความร้อนที่ดีที่สุดเพราะมีดัชนีคาร์บอนิลเกิดขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่ลดลง



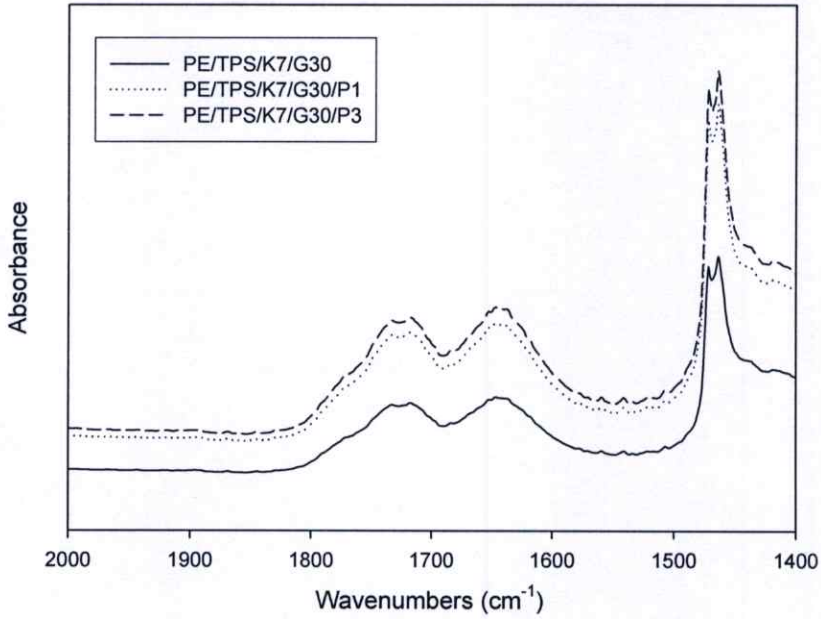
(ก)



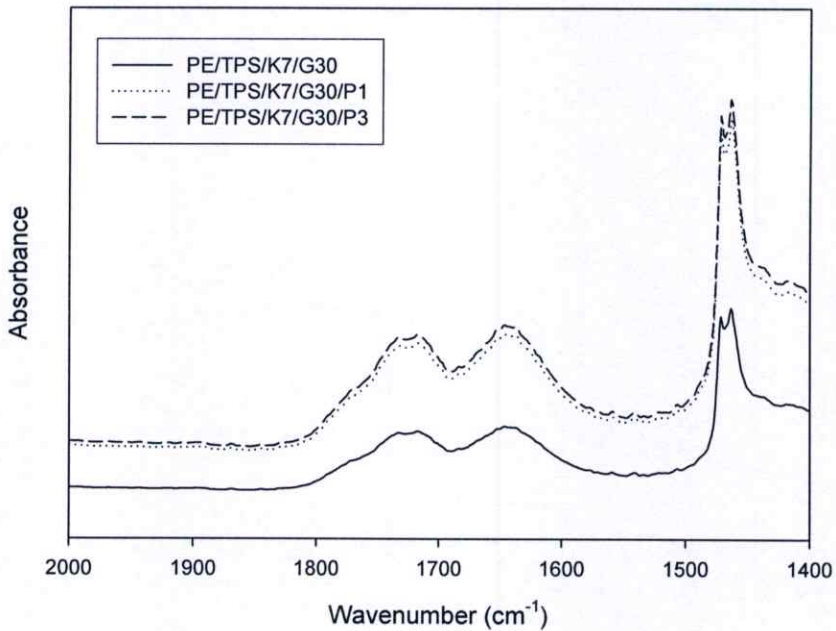
(a)



(b)

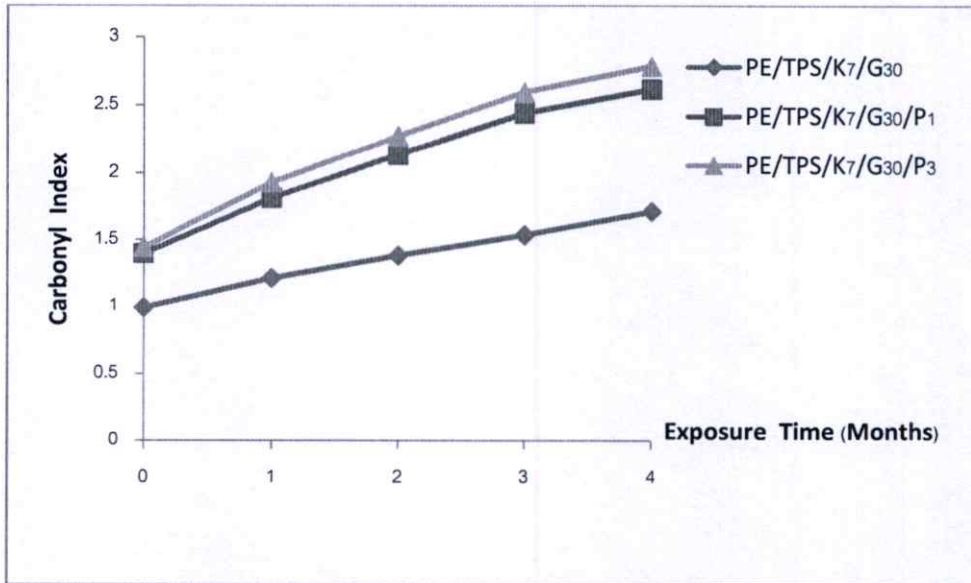


(ง)



(จ)

รูปที่ 4.34 แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1800-1400\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากที่ทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน: (ก) 0 เดือน (ข) 1 เดือน (ค) 2 เดือน (ง) 3 เดือน และ (จ) 4 เดือน



รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงดัชนีคาร์บอนิลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างหลังจากทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน

จากการทดลองในตอนที 3 พบว่าสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไอพี) ช่วยทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เกิดการย่อยสลายได้ดีขึ้น โดยในการทดลองทำการทดสอบที่ 2 สภาวะคือนำไปเอจจิงที่อุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อศึกษาการย่อยสลายทางความร้อนของฟิล์มซึ่งในเบื้องต้นพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายทางความร้อนได้ และยังพบว่าสูตรที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไอพี) มีค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมพีไอพี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกช่วยทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางความร้อนได้ดีขึ้นจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไอพี) 3 phr ช่วยทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายที่ดีที่สุดซึ่งสังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดที่ลดลงและค่าดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น แต่จากการศึกษาการย่อยสลายทางความร้อนด้วยการเอจจิง อาจให้ผลการทดลองที่ไม่ชัดเจนมากเท่ากับการฉายแสงยูวี อาจเนื่องมาจากช่วงระยะเวลาในการทดสอบยังไม่เหมาะสม แต่การเอจจิงสามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถเกิดการย่อยสลายทางความร้อนได้และเพื่อศึกษาการย่อยสลายทางแสง ได้นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกไปฉายแสงยูวี เป็นระยะเวลา 4 เดือน จากการทดลองพบว่า ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกสามารถเกิดการย่อยสลายทางแสงได้ซึ่งเห็นได้จากสีที่เปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงกลที่ลดลง และดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น และสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกปริมาณ 3 phr จะทำให้สมบัติเชิงกลลดลงมากที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งสภาวะภายใต้ความร้อนและ

แสงยูวี ทำให้สายโซ่พอลิเอทิลีนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการตัดขาดของสายโซ่ที่มากขึ้นจึงเกิด
เสถียรภาพที่มากขึ้นส่งผลให้มีแนวโน้มที่จะทำให้ฟิล์มเกิดการย่อยสลายที่ดียิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติคสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาปริมาณแคปทาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชได้อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคปทาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนกับเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช และนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ดัชนีการไหล สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดูดซับน้ำ การย่อยสลาย จากนั้นสรุปการทดลองได้เป็นสูตรที่จะนำไปใช้ในการทดลองในตอนต่อไป ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคปทาคาราจีแนนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติคสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน และจากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเบื้องต้น เช่น ดัชนีการไหล สมบัติเชิงกล และสรุปการทดลองได้เป็นสูตรที่จะนำไปใช้ในการทดลองในตอนต่อไป และ ตอนที่ 3 เป็นการปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติคสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน ด้วยสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก โดยเน้นศึกษาผลและปริมาณของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกที่มีผลต่อการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมภายใต้สภาวะความร้อน (thermal) และทางแสง(Photo)ซึ่งสามารถยืนยันด้วยเทคนิค FT-IR

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลึถึงปัจจัยต่างๆที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติคสตาร์ช/แคปทาคาราจีแนน สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1.ผลของแคปทาคาราจีแนน

- ดัชนีการไหลลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่เติมแคปทาคาราจีแนน และทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำไปเป่าขึ้นรูปสามารถดึงยืดได้โดยไม่เกิดการขาดทำให้กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์มสมบูรณ์

- ทำให้สันฐานวิทยาของฟิล์มดีขึ้นเล็กน้อย

- สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด ยังมอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง

- สมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิเริ่มตกผลึก($T_{c\ onset}$) และอุณหภูมิการสลายตัว เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

- ทำให้การดูดซับน้ำมากขึ้นและสมบัติการย่อยสลายดีขึ้น

2. ผลของปริมาณแคลปการาจีแนน

- ปริมาณการาจีแนนที่เพิ่มขึ้นทำให้ดัชนีการไหลมีค่าลดลง แต่สามารถเป่าฟิล์มได้ยาวต่อเนื่องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น
- ปริมาณการาจีแนนที่เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลไม่เปลี่ยนแปลง(เทียบกับสูตรที่เติมการาจีแนนด้วยกัน) และพบว่าการเติมการาจีแนน 7 phr ทำให้สมบัติเชิงกลดีที่สุดซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางความร้อน
- ปริมาณการาจีแนนที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก(Tm) อุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c\text{ onset}}$) แต่จะมีผลทำให้ร้อยละความเป็นผลึกลดลง และอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของ LDPE ลดลงเล็กน้อย
- ปริมาณแคลปการาจีแนนมากขึ้นช่วยทำให้ฟิล์มดูดซับน้ำได้มากขึ้น

3. ผลและปริมาณของกลีเซอรอลที่เติมลงในแคลปการาจีแนน

- กลีเซอรอลมีผลต่อกระบวนการผลิต(Process) โดยช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ออกมาจากหัวตายในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอกู สามารถดึงด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ และเมื่อปริมาณกลีเซอรอลในแคลปการาจีแนนมากขึ้น จะทำให้ค่าดัชนีการไหล (MFI) มีค่ามากขึ้น และสามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้สมบูรณ์และมีความหนาลดเล็กน้อย
- กลีเซอรอลทำให้ค่าเอนทาลปีของการาจีแนนเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อใส่ลงไปในแคลปการาจีแนนที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมจึงส่งผลให้ค่าเอนทาลปีเพิ่มขึ้น และปริมาณของกลีเซอรอลทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าเอนทาลปีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
- ปริมาณกลีเซอรอลที่มากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมสำหรับแคลปการาจีแนนที่ช่วยทำให้เกิดการผสมที่ดีและยังมีค่าสมบัติเชิงกลที่ยอมรับได้ คือ กลีเซอรอล 30 % ของ แคลปการาจีแนน

4. ผลและปริมาณของสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกที่มีต่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ/แคลปการาจีแนน

- สารเร่งการเสื่อมสภาพทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไม่เปลี่ยนแปลง แต่พบว่าหลังจากทำการเองจึ่งที่อุณหภูมิ 70 °C และฉายแสงยูวีพบว่าสูตรที่มีการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีโลพี) 3 phr ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงมากที่สุดและมีค่าดัชนีคาร์บอนิลสูงที่สุด แสดงว่าพอลิเมอร์เกิดการเสถียรภาพมากขึ้น
- ระยะเวลาการเองจึ่งและระยะเวลาการฉายแสงมีผลต่อการเสถียรภาพของพอลิเมอร์ ซึ่งพบว่าเมื่อระยะเวลาในการเองจึ่งและฉายแสงมากขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลลดลงและมีผลทำให้ดัชนีคาร์บอนิลเพิ่มขึ้น

จากการดำเนินงานวิจัยนี้พบว่าฟิล์มสูตร PE/TPS/K7/G30/P3 เป็นสูตรที่ดีที่สุดเพราะช่วยทำให้ฟิล์มสามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์และต่อเนื่อง มีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถเกิดการสลายตัวทางความร้อน ทางแสงและสลายตัวทางชีวภาพได้

ข้อเสนอแนะ

- 1.ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มให้ดีขึ้น เช่น การเติมสารช่วยผสมลงไปในส่วน of แคลปาคาราจีแนนที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม
- 2.ควรมีเครื่องวัดปริมาณ CO_2 เพื่อเป็นการวัดในเชิงปริมาณและเป็นหลักฐานที่ยืนยันว่าฟิล์มเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาวดี ลีจากภักย์.2549. **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม**. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไทยเอเฟคท์สตูดิโอ.
- [2] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ.2551.**แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ**.
ครั้งที่ 1.กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- [3] Imeson, A.P., and FMC Corporation(UK) Ltd.2000.Carrageenan .[Electronic version].
Handbook of hydrocolloids: 87-102.
- [4] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. “**พลาสติกกรีไซเคิล**”. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาเคมี คณะ
วิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท บุ๊คเน็ต
จำกัด.
- [6] Gachter, R. and H. Mülle . 1993. **Plastic Additive Handbook**. Hanser Publishers. Munich
Vienna.
- [7] 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
- [8] Raghavan, D. 1995. “Characterization of Biodegradable Plastic” .**Polymer-Plastic
Technology Engineering**, Vol.34, p41-63.
- [9] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2 ,
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [10] Wikipedia. 2010.**Amylose**. [Online]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Amylose>
- [11] Wikipedia. 2010.**Amylopectin**. [Online]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Amylopectin>
- [12] Colwell,R.,Pariser,E.,R and Anthony.1997.**Biotechnology of Marine Polysaccharides**.
Mc Graw Hill USA.
- [13] Agargel.“Carrageenan.” [Online].Available: <http://www.agargel.com.br/carrageenan-tec.html>
- [14] [Online].Available.http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Saysamorn_Phoonphun/Chapter2.pdf

- [15] สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย, อธิธิพล แจ่มชัด, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ. 2546. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์**. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] [Online]. Available: <http://www.dupont.com/industrialpolymers/plastics/polymers/fusabond.html>.
- [17] [Online]. Available: <http://www.sigmaldrich.com/catalog/Lookup.do?D7=0&N17=2&NNAR>
- [18] [Online]. Available: <http://www.newgenspecialty.com/grafted-polymers.html#compatibiliser>
- [19] อรุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [20] เอกสารบริษัท Thai Pure Science จำกัด.
- [21] [Online]. Available: http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Glycerin_Skelett.svg
- [22] Billmeyer F.W. 1984. Textbook of Polymer Science. New York: John Wiley & Sons.
- [23] [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>
- [24] [Online]. Available: http://polymer.w99of.com/31/polyethylene/&usg=__u7soyLygixm-J4cdNRiB3Uz49Qo=&h=287&w=500&sz=66&hl=th&um=1&itbs=1&tbnid=ILB0iGNQY
- [25] [Online]. Available: <http://fr.wikipedia.org/wiki/LDPE>
- [26] [Online]. Available: <http://www.p-life.com.hk/Main.html>
- [27] [Online]. Available: <http://www.madbullairsoft.com/doc/BB%20Report-final.pdf>
- [28] Extrudertechnologies. **“ET - TWIN SCREW EXTRUDER.”** [Online]. Available : http://www_extrudertechnologies_com/diagram2_gif ของ Google.mht
- [29] [Online]. Available: http://www.labtechengineering.com/product.php?groups_id=4
- [30] เจริญ นาคะสรรค์. 2544. **กระบวนการแปรรูปพลาสติก**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. โพรเพซ
- [31] สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย. 2548. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1**. กรุงเทพฯ : บุกเน็ท.
- [32] [Online]. Available: www.hipf.edu.sa/Details/HIPF%2520Courses/Blown%2520Film%2520Extrusion/Process%2520Diagram%1.html

- [33] วิไลวรรณ โพลิ่งมี.2552. “การเตรียมฟิล์มย่อยสลายที่สามารถหน่วงการติดไฟได้จากพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ/เทอร์โมพลาสติกสตา์ช.”วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [34] Huang C.Y., Roan M.L., Kuo M.c. and Lu W.L. 2005. “Effect of compatibiliser on the biodegradation and mechanical properties of high – content starch/low density polyethylene blend.” **Polymer Degradation and Stability**. Vol. 90 : 95 – 105.
- [35] Rodriguez-Gonzalez F.J., Ramsay B.A. and Favis B.D. 2003. High performance LDPE/thermoplastic starch blends: a sustainable alternative to pure polyethylene . **Polymer**. 44 :1517-1526.
- [36] Thunwall M., Kuthanova V., Boldizar A and Rigdahl M.2008. “Film blowing of thermoplastic starch”. **Carbohydrate Polymers**. 71 : 583-590.
- [37] Tecante A. and Doublier J.L. 1999. “Steady flow viscoelastic behavior of crosslinked waxy corn starch-K-carrageenan pastes and gels”. **Carbohydrate Polymers**.40:221-231.
- [38] กอริมี๊ะ สะหัดอีดำ.,สุคาร์ตัน ขวัญเมือง.สมบัติของเจลผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับโพลีแซคคาไรด์. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [39] [Online]. Available : http://azul.bnct.ipn.mx/Libros/vision_alimentos /TomolI/II-54.pdf
- [40] Chaudemanche C. and Budtova T. 2008. “Mixtures of pregelatinised maize starch and K - carrageenan:Compatibility , rheology and gelation”. **Carbohydrate Polymers**. 72:579-587.
- [41] Ramakrishnan S. and Prud’homme R.K. 2000 . “Behavior of K-carrageenan in glycerol and sorbitol solutions”.**Carbohydrate Polymers**.43:327-332
- [42] อัมณพ รักรัตน์. 2552.ผลของสารเบนโซฟีโนนที่มีต่อการสลายตัวทางแสงของฟิล์มระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำและแป้งมันสำปะหลัง.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [43] Abd EI-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” **Photochemistry and Photobiology**. 163 : 547-556
- [44] [Online]. Available: <http://www.starcolor.co.th/coloradd.html>

- [45] Nazdaneh Y. 2008. "Abiotic degradability of LDPE film containing P-Life additive".
Chemistry and Materials Technology. Japan
- [46] SCG. Plastic. "Data sheet LDPE EL – LENE LD 1905F."
- [47] เอกสารจากบริษัท ExxonMobil จำกัด
- [48] เอกสารจากบริษัท เอฟ เอ เฟลเวอร์ จำกัด
- [49] Dow Chemical Ltd., "Data sheet Fusabond® E MB 226DY"
- [50] Behnmeyer Ltd., "Data sheet P-life Degradable Plastics"
- [51] Thai chemical corporation., "Data sheet Paraffin Oil "
- [52] American Standard for Testing and Materials. 1999. "Standard Test Method for Melt
Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer". ASTM D 624 .Annual
Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [53] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.
กรุงเทพฯ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [54] Flegler S.L., Heckmen J.W. and Klomprens K.L. 1993. **Scanning and Transmission
Electron Microscopy and Introduction**. Michigan State University : Oxford
University Press, Inc.
- [55] Biliaderis C.G., Lazaridou A. and Arvanitoyannis I. 1999. Glass transition and physical
properties of polyol-plasticised pullulan–starch blends at low moisture. **Carbohydrate
Polymers** .40 : 29–47
- [56] American Standard for Testing and Materials. 2008. **Standard Test Method for
Compositional Analysis by Thermogravimetry**. ASTM E1131. Annual Book of
ASTM Standard 14.02., Philadelphia.
- [57] American Standard for Testing and Materials. 1998. "Standard Test Method for Tensile
Properties of Thin Plastic Sheet." ASTM D882. Annual Book of ASTM standard
08.01., Philadelphia
- [58] ภัทรพงษ์ สงวนศักดิ์. 2550. "การผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีกลิ่น
หอมจากวานิลลา." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [59] American Standard for Testing and Materials. 1998. "Standard Test Method for Water
Absorption of Plastics." ASTM D 624. ASTM D570. Annual Book of ASTM
Standard 08.01., Philadelphia.

- [60] American Standard for Testing and Materials. 2004. **“Standard Guide for Exposing and Testing Plastic that Degrade in the Environment by a Combination of Oxidation and Biodegradation.”** ASTM D6954-04. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [61] Chiellini E., Cori A., Antone S.D. and Baciú R. 2006. “Oxo-biodegradable carbon backbone polymers- Oxidative degradation of polyethylene under accelerated test conditions”. **Polymer Degradation and Stability**. 91:2739-2747
- [62] American Society for Microbiology. 1994. **Method for Assessment of Biodegradability of Plastic Films in Soil**. 60., Environmental Microbiology
- [63] [Online]. Available :<http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/548starchiodine.html>
- [64] Watson S.A. and Whistler R.L. 1946 . “Estimate of Iodine Color starch and starch Fractions”. *Ind. Eng. Chem Anal Ed.* 18:75-16
- [65] Chronakis S.I., Doublier J. and Piculell L. 2000. “Viscoelastic properties for kappa- and iota-carrageenan in aqueous NaI from the liquid – like to solid- like behavior ”. **Biological Macromolecules**. 28 :1-14
- [66] [Online]. Available: <http://fao.org/docrep/field/003/AB730E/AB730E03.htm>
- [67] Santiago M., Tecant A. 2007. Rheological and calorimetric study of the sol-gel transition of K-carrageenan. **Carbohydrate Polymer** .69:763-773
- [68] Utracki, L.A. 2002. Interphase and Compatibilization by Addition of a Compatibilizer. *Polymer Blends Handbook*. 2:295-336.
- [69] King G., Guist G. and Lauterbatch G.E. 1985. “Anaerobic Degradation of Carrageenan from the Red Macroalga *Eucheuma cottonii*” . **Applied Environmental Microbiology**. 49:588-592
- [70] Iijima M., Hatakeyama T., Takahashi M. and Hatakeyama. 2007. “Effect of thermal history on kappa-Carrageenan hydrogelation by differential scanning calorimetry”. **Thermochimica Acta**. 452:53-58
- [71] Mangione M.R. , Giacomazza D., Bulone D. Martorana V. and Biagio P.L. 2002. “Thermoreversible gelation of k-Carrageenan :relation between conformation transition and aggregation”. **Biophysical Chemistry**. 104:95-105

- [72] Costa L., Luda M.P. and Trossarelli L. 1997. "Ultra high molecular weight polyethylene-II Thermal-and photo-oxidation". **Polymer degradation and Stability**.58:41-54

ภาคผนวก ก

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ก-1 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (Tensile strength) ค่ายังมอดูลัส (Modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (MPa)	ยังมอดูลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)
PE/TPS	MD	7.74±0.14 ^a	85.18±1.34	213.55±1.14
	TD	6.78±0.21	123±1.21	408.41±1.23
PE/TPS/K3	MD	7.35±0.46	90.21±0.12	245.00±1.12
	TD	4.36±0.21	98.32±0.15	321.11±0.46
PE/TPS/K5	MD	7.60±0.67	61.39±0.21	231.00±0.31
	TD	5.84±0.21	79.09±1.31	343.34±0.77
PE/TPS/K7	MD	7.71±0.23	76.55±1.41	238.00±0.15
	TD	5.72±0.27	115.47±0.34	380.12±0.23
PE/TPS/K9	MD	6.31±0.34	72.68±0.21	226.11±0.21
	TD	5.10±0.21	88.44±0.51	339.44±0.32

หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ก-2 (ต่อ)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด (MPa)	ยังมอดูลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)
PE/TPS/K7/G10	MD	7.78±0.12	70.43±1.23	260.79±0.35
	TD	5.56±0.09	105.34±1.12	421.32±0.18
PE/TPS/K7/G20	MD	8.43±0.32	72.45±1.41	270.23±0.12
	TD	5.58±0.23	93.41±0.63	433.11±0.22
PE/TPS/K7/G30	MD	9.21±0.34	73.56±0.32	294.81±1.31
	TD	6.53±0.44	91.34±0.45	457.21±0.45
PE/TPS/K7/G40	MD	8.93±0.23	70.34±0.21	310.43±1.43
	TD	6.54±0.52	83.21±0.56	460.51±0.24
PE/TPS/K7/G50	MD	8.21±0.12	74.23±0.22	320.41±0.51
	TD	6.74±0.46	78.39±0.11	450.42±0.28
PE/TPS/K7/G30/P1	MD	9.22±0.23	74.36±0.21	292.34±2.18
	TD	6.54±0.45	92.21±0.14	452.32±1.39
PE/TPS/K7/G30/P3	MD	9.21±0.43	73.23±0.49	293.23±1.27
	TD	6.32±0.41	91.51±0.34	431.30±1.63

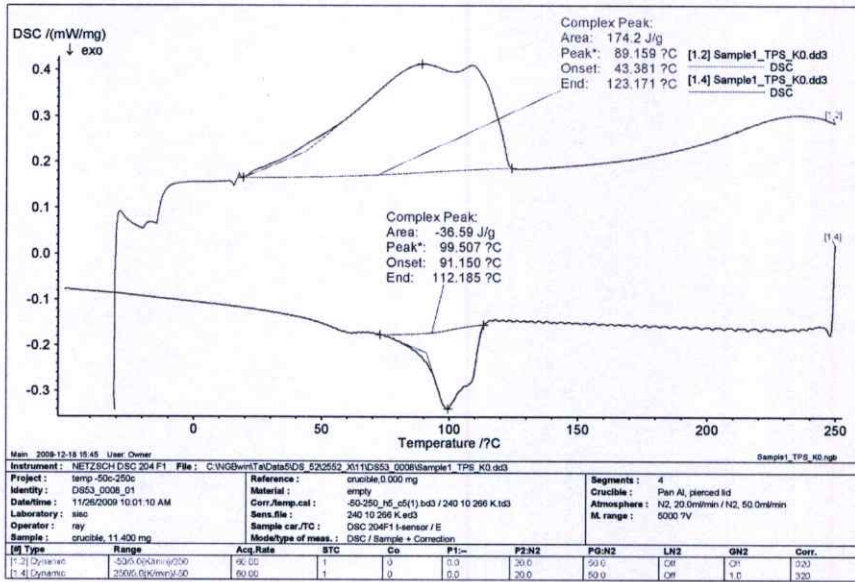
หมายเหตุ : MD คือ ทิศทางตามแนวเครื่องจักร

TD คือ ทิศทางตามขวางเครื่องจักร

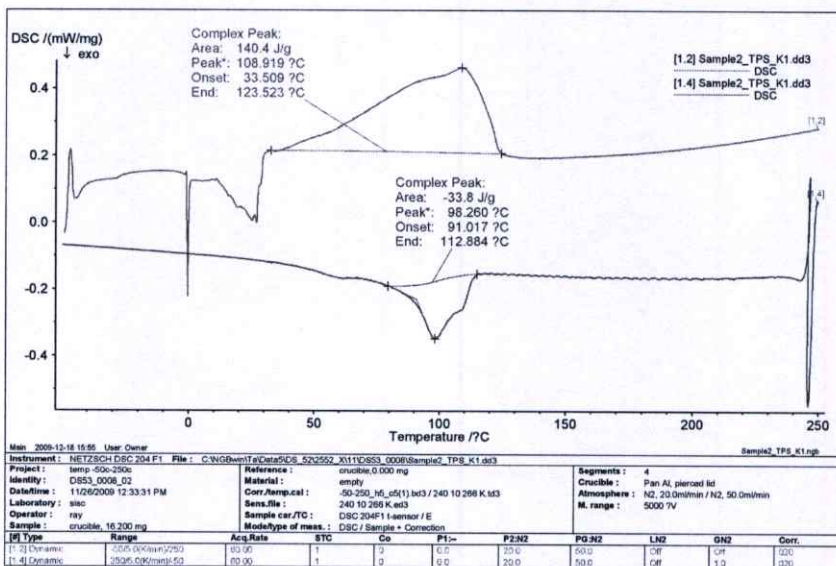
a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ข

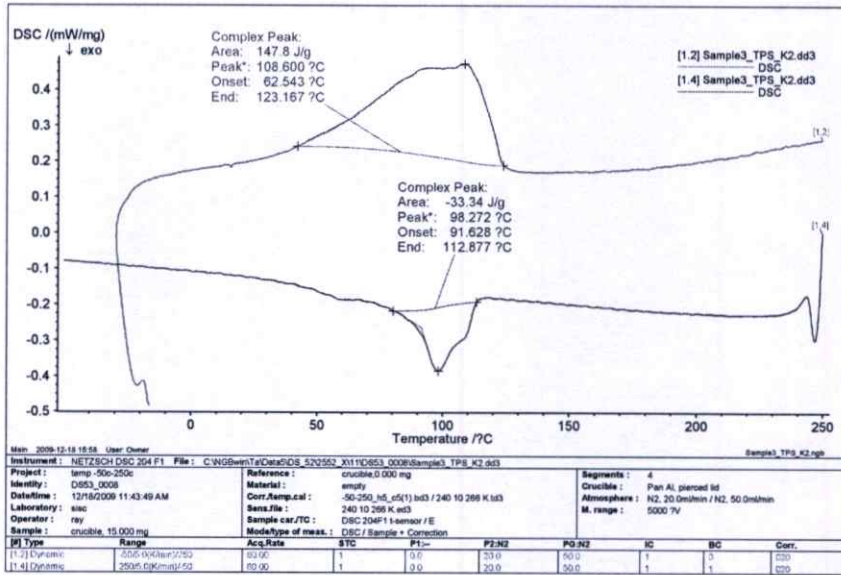
การทดสอบสมบัติทางความร้อน



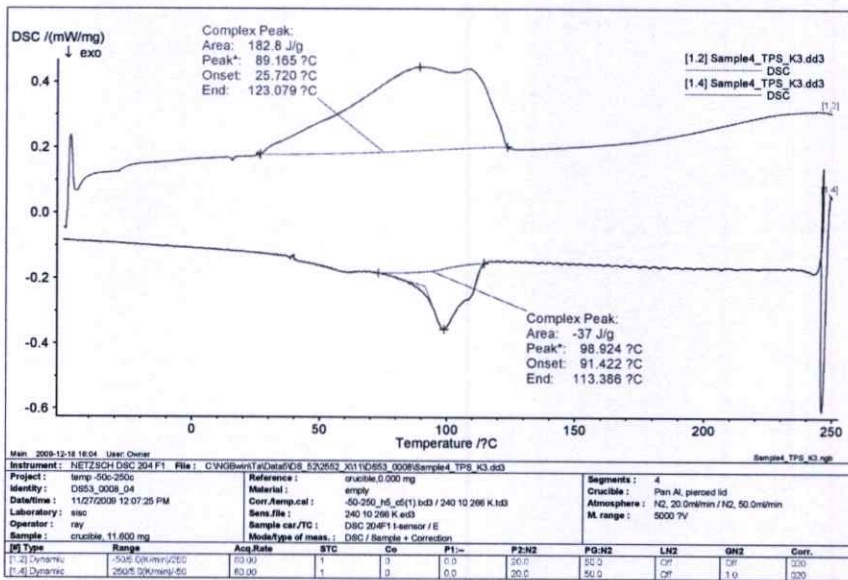
รูปที่ ข – 1 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สูตร PE/TPS



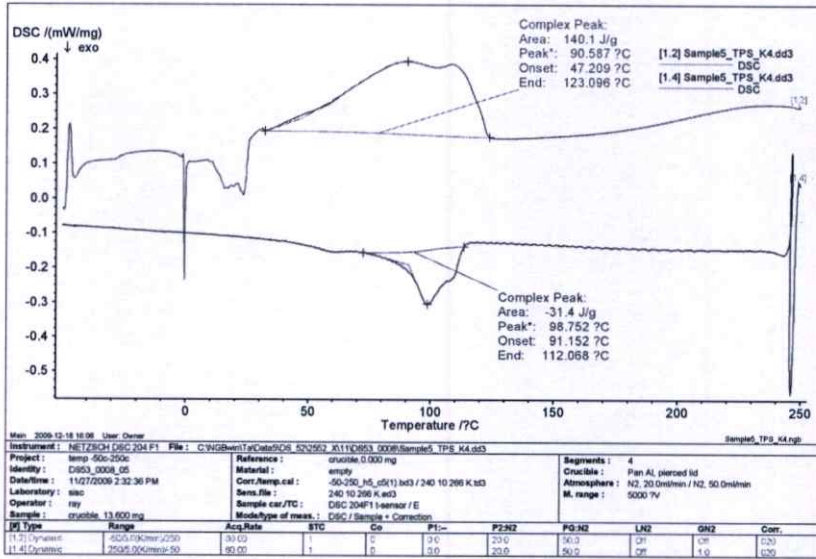
รูปที่ ข – 2 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคปไซซิน สูตร PE/TPS/K3



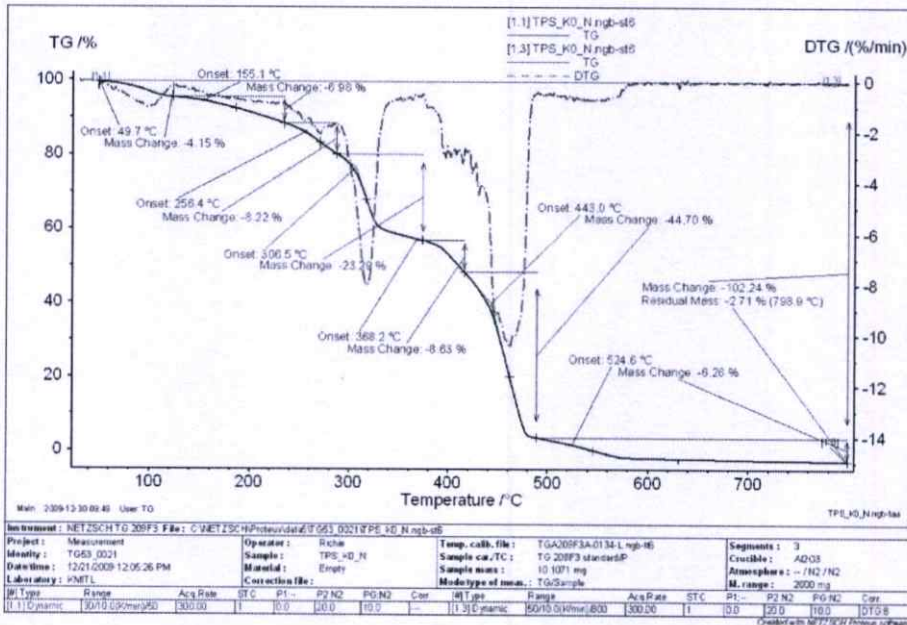
รูปที่ ข – 3 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน สูตร PE/TPS/K5



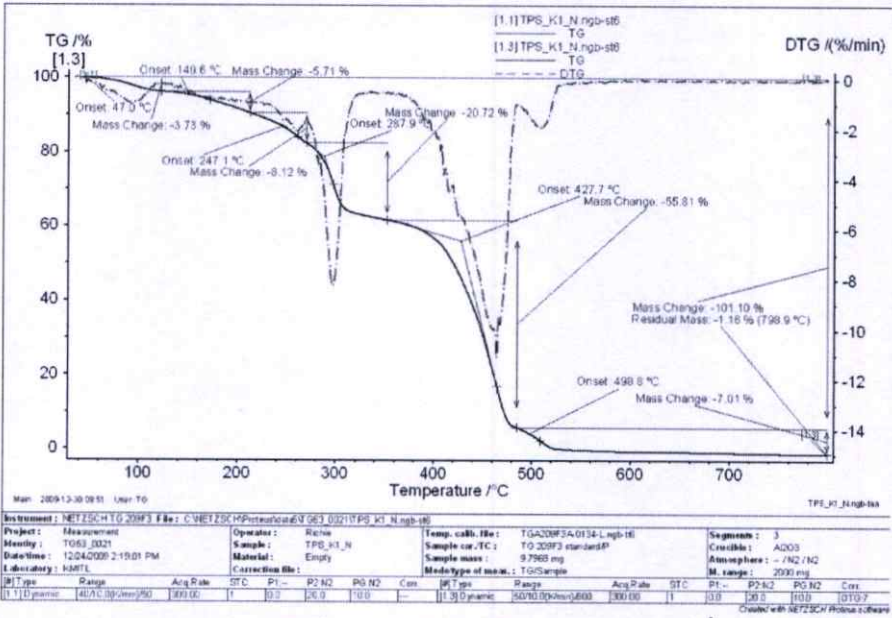
รูปที่ ข – 4 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปาการาจีแนน สูตร PE/TPS/K7



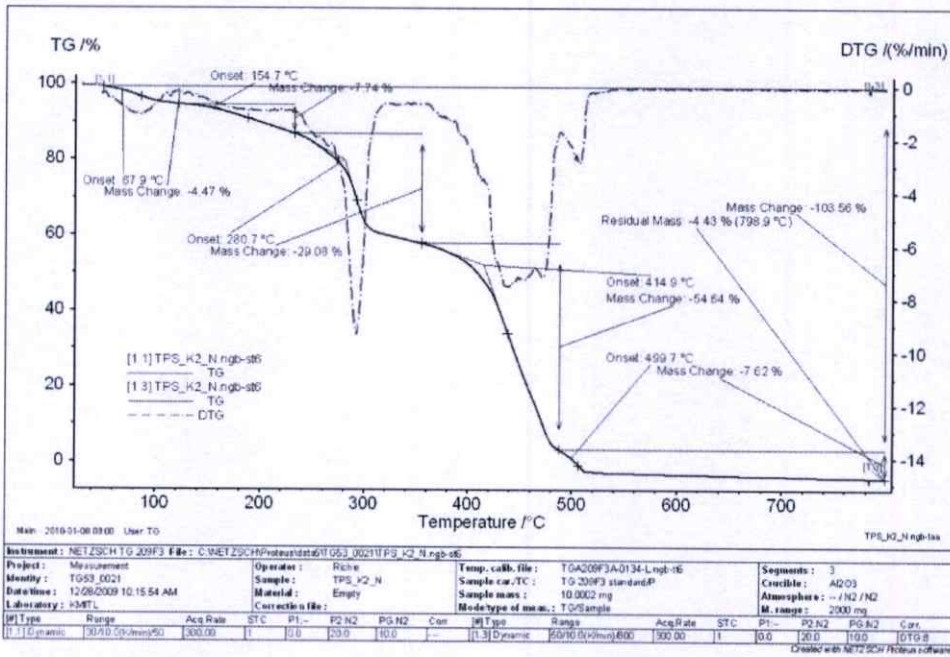
รูปที่ ข - 5 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปทาคาร์บอน สูตร PE/TPS/K9



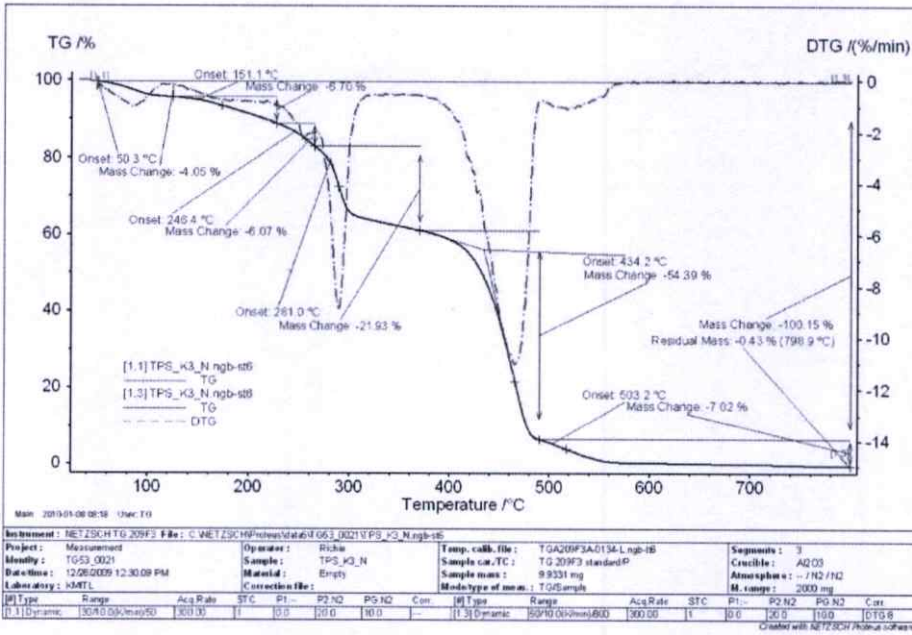
รูปที่ ข - 6 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ สูตร PE/TPS



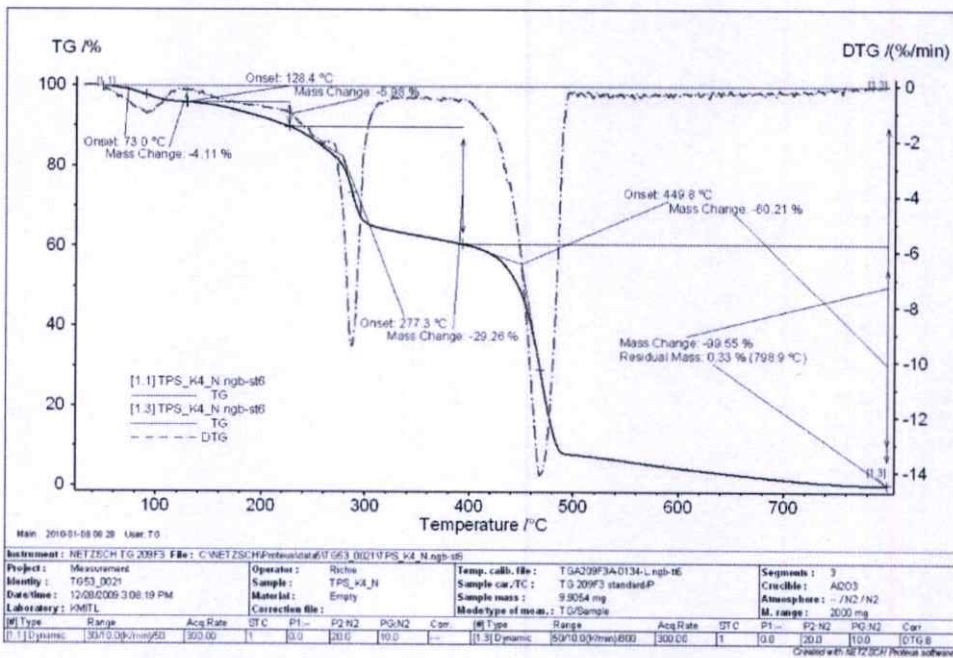
รูปที่ ข – 7 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปากาไรจีแนน สูตร PE/TPS/K3



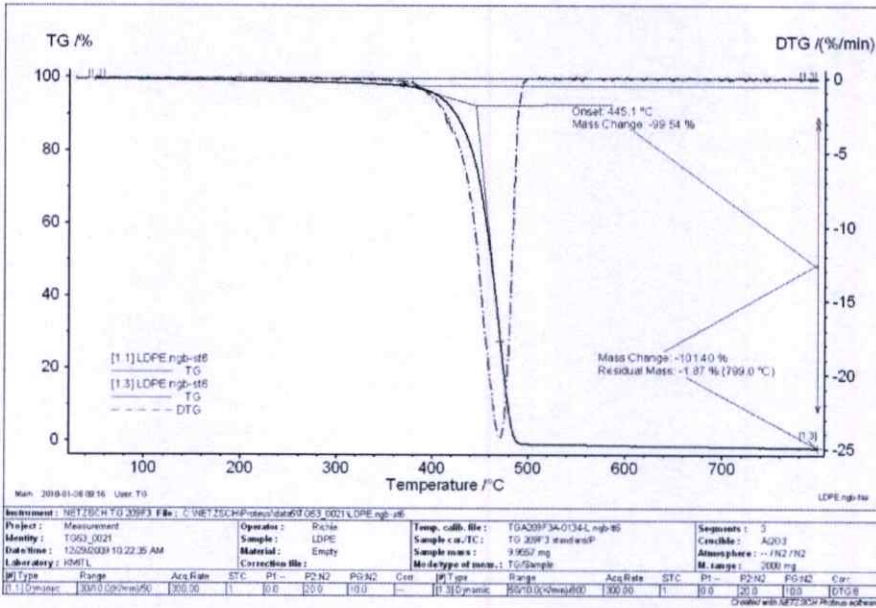
รูปที่ ข – 8 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปากาไรจีแนน สูตร PE/TPS/K5



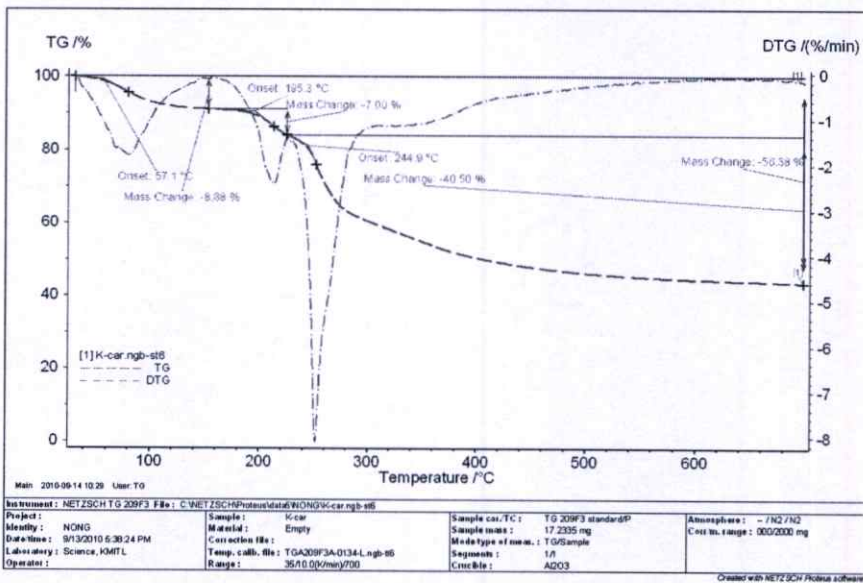
รูปที่ ข - 9 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปากาจารย์แนน สูตร PE/TPS/K7



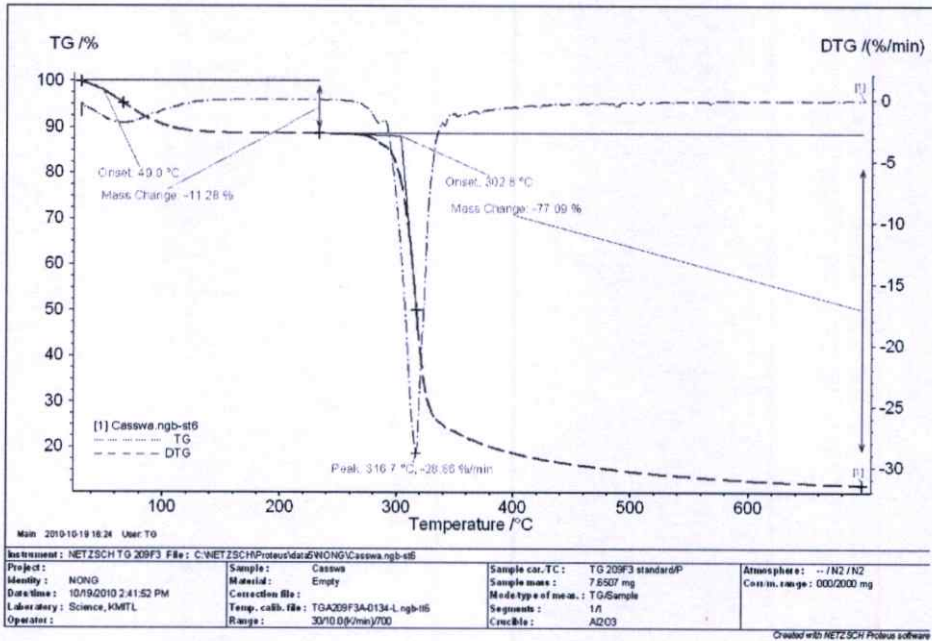
รูปที่ ข - 10 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์/แคปปากาจารย์แนน สูตร PE/TPS/K9



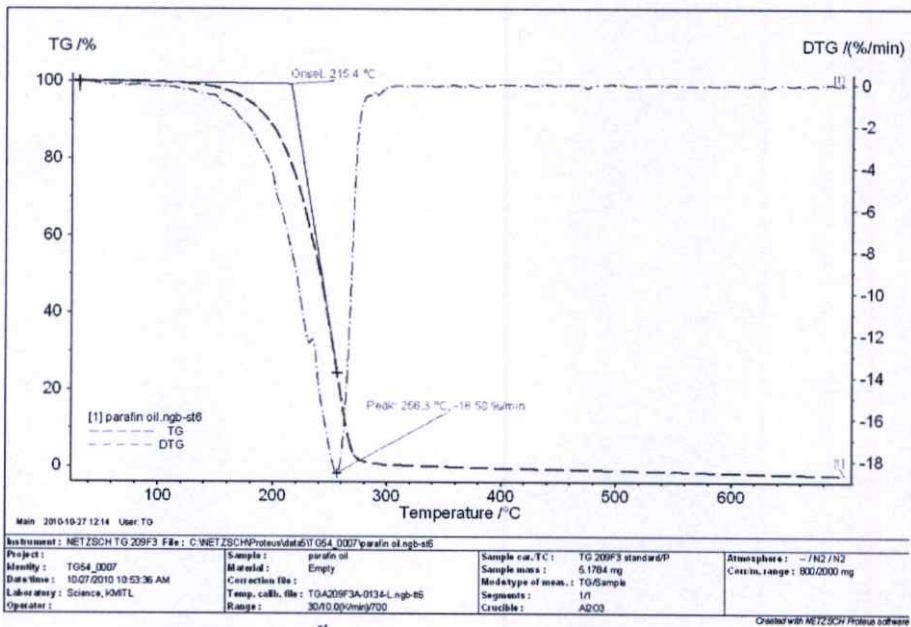
รูปที่ ข – 11 TGA thermogram ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น



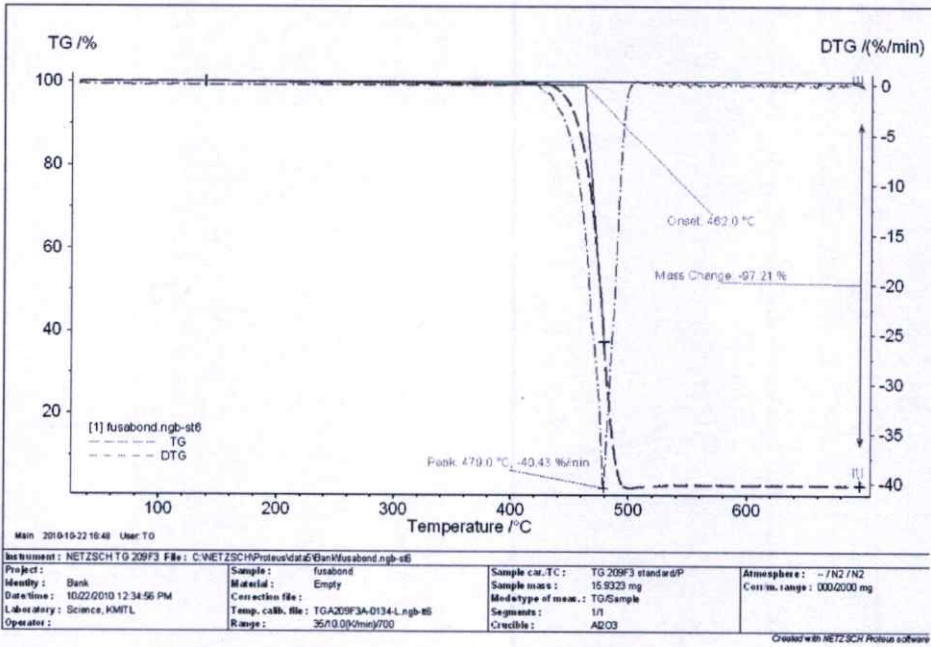
รูปที่ ข – 12 TGA thermogram ของแคปปากคาราจีแนน



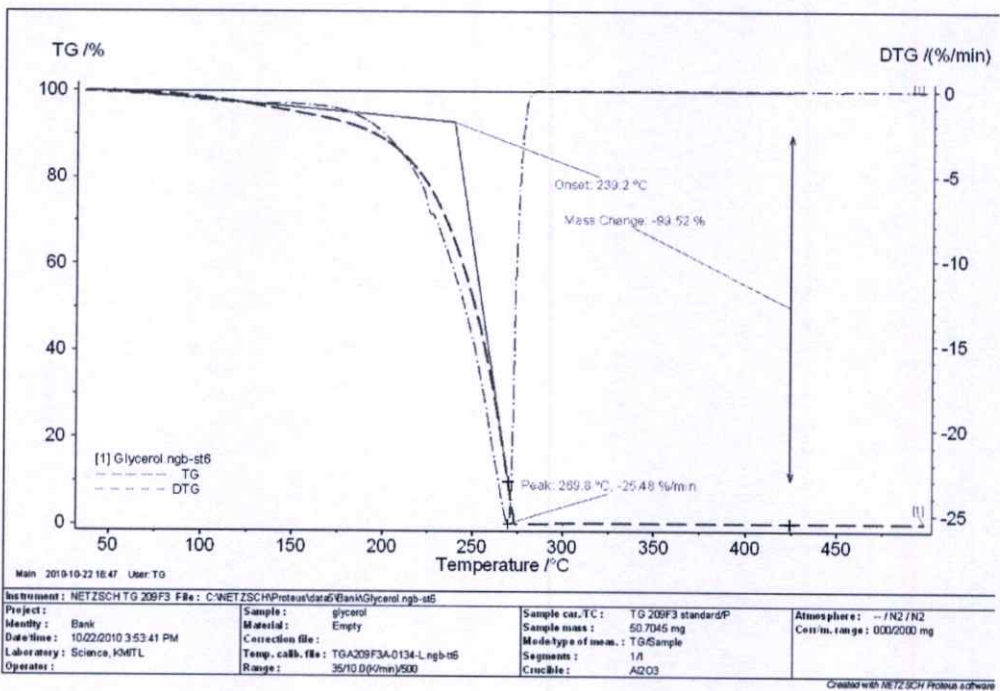
รูปที่ ข - 13 TGA thermogram ของแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ ข - 14 TGA thermogram ของน้ำมันพาราฟิน



รูปที่ ข - 15 TGA thermogram ของฟิวซาบอน



รูปที่ ข - 15 TGA thermogram ของกลีเซอรอล

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity)

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \times \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์(พอลิเอทิลีน)ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม(g)}}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด(g)}}$$

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

ตัวอย่างการคำนวณ

- สูตร PE/TPS
 - น้ำหนักพอลิเมอร์(พอลิเอทิลีน)ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม = 100 g
 - น้ำหนักรวมทั้งหมด = 210 g
 - ΔH_f ที่ได้พื้นที่ใต้กราฟ = 174.2 J/g

$$\begin{aligned} \% \text{ Crystallinity} &= \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \times \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์(พอลิเอทิลีน)ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม(g)}}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด(g)}} \\ &= \frac{174.2}{276} \times 100 \times \frac{100}{210} \\ &= 0.6311 \times 100 \times 0.47 \\ &= 29.61 \end{aligned}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตร PE/TPS เท่ากับ 29.61%

ภาคผนวก ง
การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ ง-1 เปอร์เซ็นต์ปริมาณการดูดซับน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

สูตร วันที่	2	4	6	8	10	12	14
PE/TPS	30.78±0.12 ^a	32.32±0.14	32.38±0.15	32.34±0.12	32.35±0.19	32.32±0.11	32.32±0.23
PE/TPS/K3	32.12±0.14	33.21±0.12	33.22±0.23	33.21±0.13	33.23±0.21	33.23±0.31	33.24±0.12
PE/TPS/K5	32.21±0.16	33.31±0.26	33.32±0.12	33.34±0.43	33.32±0.12	33.34±0.12	33.31±0.11
PE/TPS/K7	32.38±0.12	33.42±0.21	33.41±0.32	33.42±0.45	33.42±0.13	33.41±0.25	33.41±0.27
PE/TPS/K9	32.41±0.28	33.48±0.11	33.47±0.31	33.47±0.23	33.48±0.15	33.47±0.32	33.47±0.14

หมายเหตุ : a คือ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก จ

การศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางความร้อน

ตารางที่ จ-1 ค่า Absorbance บริเวณเลขคลื่น 1400-1900 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ หลังจากทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ 70 $^{\circ}\text{C}$ ที่ระยะเวลาทั้งหมด 7 วัน

Formula	Absorption band	Absorption band	CO i
PE/TPS/K7/G30	1640-1840 cm^{-1}	1463 cm^{-1}	
0 Day	37.56	37.88	0.99155227
1 Day	38.67	37.96	1.02
2 Day	39.14	38.21	1.02
3 Day	40.25	38.24	1.05
4 Day	41.28	38.35	1.08
5 Day	43.37	38.45	1.13
6 Day	44.58	38.45	1.16
7 Day	45.76	39.2	1.17
PE/TPS/K7/G30/P1			
0 Day	56.21	40.23	1.40
1 Day	59.45	40.43	1.47
2 Day	60.53	40.57	1.49
3 Day	64.23	41.32	1.55
4 Day	65.92	41.35	1.59
5 Day	69.32	41.37	1.68
6 Day	71.57	42.54	1.68
7 Day	74.78	43.12	1.73

ตารางที่ จ-2 (ต่อ)

Formula	Absorption band	Absorption band	CO i
PE/TPS/K7/G30/P3	1640-1840 cm^{-1}	1463 cm^{-1}	
0 Day	62.42	43.15	1.45
1 Day	68.54	43.18	1.59
2 Day	69.11	43.28	1.60
3 Day	72.34	43.34	1.67
4 Day	76.87	43.23	1.78
5 Day	81.32	44.48	1.83
6 Day	82.12	44.51	1.84
7 Day	83.45	44.23	1.89

ตารางที่ จ-3 ค่า Absorbance บริเวณเลขคลื่น 1400-1900 cm^{-1} ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆ ที่ผ่านการฉายรังสียูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน


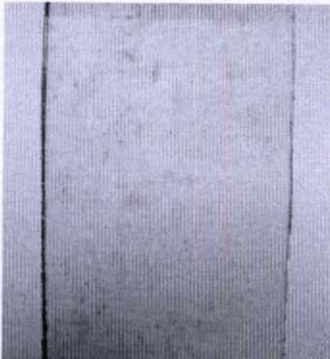

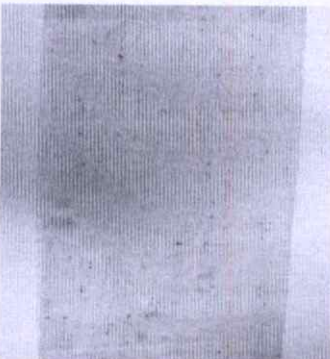

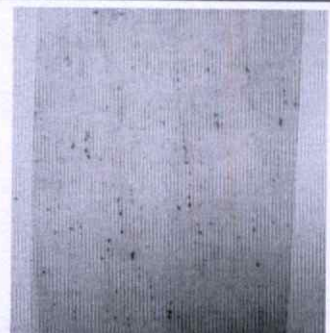
Formula	Absorption band	Absorption band	CO i
PE/TPS/K7/G30	1640-1840 cm^{-1}	1463 cm^{-1}	
0 Month	37.56	37.88	0.99
1 Month	50.23	41.45	1.21
2 Month	60.19	43.57	1.38
3 Month	69.41	45.21	1.53
4 Month	80.82	47.23	1.71
PE/TPS/K7/G30/P1			
0 Month	56.21	40.23	1.39
1 Month	93.16	51.42	1.81
2 Month	109.45	51.26	2.11
3 Month	130.12	53.32	2.44
4 Month	133.47	51.02	2.61
PE/TPS/K7/G30/P3			
0 Month	62.42	43.15	1.44
1 Month	101.24	52.45	1.93
2 Month	119.32	52.49	2.27
3 Month	140.58	54.19	2.59
4 Month	145.43	52.23	2.78


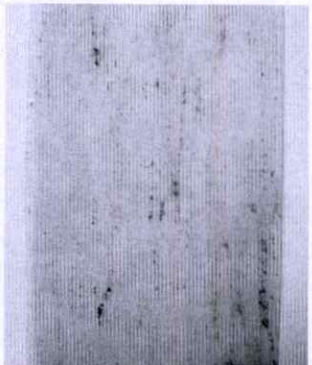

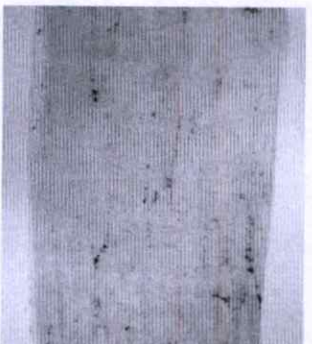
ภาคผนวก ฉ

การทดสอบโดยสารละลายไอโอดีน

ในการทดลองได้ทำสังเกตการกระจายของแป้งมันสำปะหลังและแคปซูลการจีแนในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแป้งมัน โดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปแช่ในสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 0.025 M เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากสารละลายไอโอดีน แล้วตั้งทิ้งไว้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นทำการสังเกตพื้นผิวของฟิล์ม

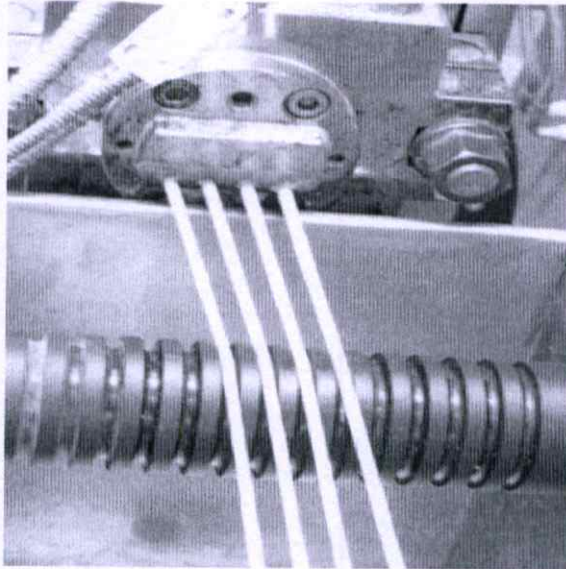
ตารางที่ ฉ-1 ลักษณะชิ้นงานก่อนและหลังทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน

สูตร	ชิ้นงานก่อนแช่สารละลายไอโอดีน	ชิ้นงานหลังแช่สารละลายไอโอดีน
PE/TPS		
PE/TPS/K3		
PE/TPS/K5		

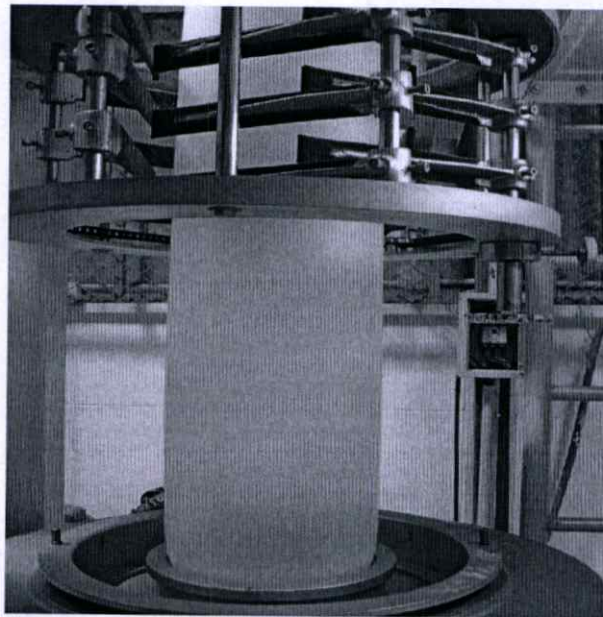
สูตร	ชิ้นงานก่อนแช่สารละลายไอโอดีน	ชิ้นงานหลังแช่สารละลายไอโอดีน
PE/TPS/K7		
PE/TPS/K9		

ภาคผนวก ข

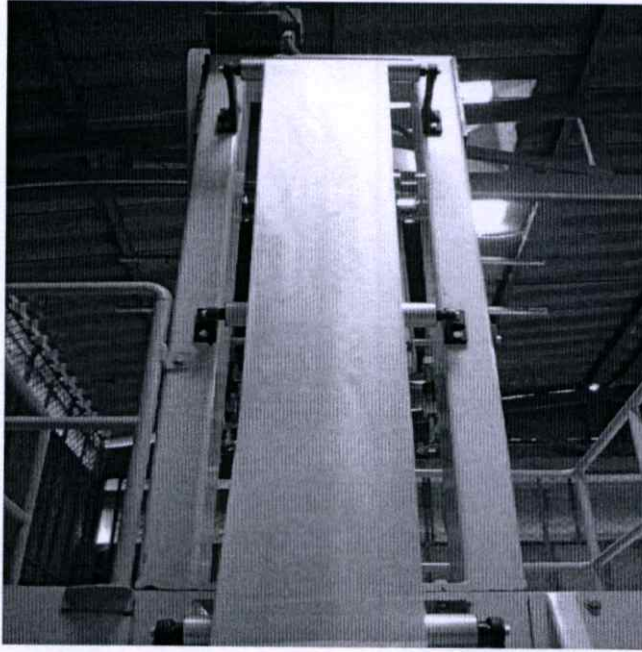
กระบวนการผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม



รูปที่ ข-1 พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกมาจากหัวคายนของเครื่องผสมอัดรีดชนิด
เกลียวหนอนคู่



รูปที่ ข-2 ลูกโป่งฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมขณะทำการเป่าขึ้นรูป



รูปที่ ข-3 फिल्मที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

ในการทดลองได้นำสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(พีไอพี)ไปวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ผลที่ได้แสดงดังตาราง ข-1

ตารางที่ ข-1 แสดงธาตุองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไอพี)

สารประกอบ	ปริมาณ (KCps)	%
SiO ₂	2.9	1.54
CaO	478.6	77.9
MnO	52.5	13.2
Fe ₂ O ₃	1.7	0.248
CuO	2.1	0.227
CeO ₂	3.5	5.4
Dy ₂ O ₃	10.1	0.159
Compton	-	0.13
Rayleigh	-	0.79
Norm	-	100

จากการวิเคราะห์พบว่าในสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก มีโลหะทรานซิชัน เช่น Mn , Ca อยู่ในปริมาณที่มาก

