

ผลของสารก่อเจลที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ระหว่าง
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความ
หนาแน่นต่ำโดยมีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก

EFFECT OF GELLING AGENTS ON PROPERTIES OF
BIODEGRADABLE POLYMER BLENDS FROM THERMOPLASTIC
CASSAVA STARCH AND LOW-DENSITY POLYETHYLENE
BLENDS USING THERMOPLASTIC STARCH
AS THE MAIN COMPONENT



T132518

ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์

CHAYAPA WEERAPOPASIT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 132518
วัน,เดือน,ปี 18 ก.ค. 2557



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-SC-M-014-004

**EFFECT OF GELLING AGENTS ON PROPERTIES OF
BIODEGRADABLE POLYMER BLENDS FROM THERMOPLASTIC
CASSAVA STARCH AND LOW-DENSITY POLYETHYLENE
BLENDS USING THERMOPLASTIC STARCH
AS THE MAIN COMPONENT**

CHAYAPA WEERAPRASIT

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

2014

KMITL-2014-SC-M-014-004

COPYRIGHT 2014

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของสารก่อเจลที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีน
ชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีเทอร์โมพลาสติกสตาarchเป็นองค์ประกอบ
หลัก

Effect of Gelling Agents on Properties of Biodegradable
Polymer Blends from Thermoplastic Cassava Starch and
Low-Density Polyethylene Blends Using Thermoplastic Starch
as the Main Component

นักศึกษา

นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์

รหัสประจำตัว

54651101

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรากร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์	วรมงคลชัย	
รศ.ดร.มาลินี	ชัยศุภกิจสินธุ์	
รศ.ดร.วิมลวรรณ	พิมพ์พันธุ์	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรีชญาวรากร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 12 มีนาคม พ.ศ. 2557 เวลา 09.00 - 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 ชั้น 5 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. ดุชนัน ธีระบริพัทธ์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 1 เดือน 11 พ.ศ. 57

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารก่อเจลที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาARCHจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีเทอร์โมพลาสติกสตาARCHเป็นองค์ประกอบหลัก
นักศึกษา	นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์
รหัสประจำตัว	54651101
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของสารก่อเจลที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาARCHที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง (Thermo plastic cassava starch, TPCS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ การเตรียมเทอร์โมพลาสติกเตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ นำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene, LDPE) โดยมีสารช่วยผสมชนิดมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) พอลิเมอร์ผสมเตรียมจากการคอมพาวด์และขึ้นรูปโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดและเครื่องฉีดขึ้นรูป ตามลำดับ มีการศึกษาถึงปริมาณที่มากที่สุดของเทอร์โมพลาสติกสตาARCH ในพอลิเมอร์ผสมที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ เพื่อช่วยในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการเติมสารก่อเจลชนิดต่างๆ ได้แก่ อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ที่ปริมาณ 10 20 และ 30% โดยน้ำหนักลงในเมทริกซ์ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม TPCS/LDPE โดยผลจาก FT-IR พบว่าพีคของการสั่นที่ตำแหน่งของ OH-stretching ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตมีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีแนวโน้มการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมสารก่อเจลลงไป เมื่อศึกษาถึงสถานะวิทยาพบว่าสารก่อเจลสามารถเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของ TPCS นอกจากนี้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต มีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติ สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่าการใช้สารก่อเจลในพอลิเมอร์ผสมทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้งลดลง ส่วนการเติมสารก่อเจลลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ โดยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงด้วยโซเดียมอัลจิเนต 30% โดยน้ำหนักมีสมบัติเชิงกลสูงที่สุดและสมบัติการดูดซึมน้ำ

น้อยที่สุด แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงด้วยอะการี 10% มีความสามารถในการย่อยสลายมากที่สุด

คำสำคัญ : เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์, พอลิเมอร์ผสม, เครื่องฉีดขึ้นรูป, สารก่อเจล

Title	Effect of gelling agents on properties of biodegradable polymer blends from thermoplastic cassava starch and low-density polyethylene blends using thermoplastic starch as the main component
Student	Chayapa Weerapoprasit
Student ID	54651101
Degree	Master of Science
Program	Polymer technology
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This research aimed to study the influence of gelling agents on properties of polymer blends prepared from thermoplastic cassava starch (TPCS) and low-density polyethylene (LDPE). The TPCS was prepared using glycerol as plasticizer and then mixed with LDPE using maleic anhydride-grafted-polyethylene (MAPE) as a compatibilizer. The polymer blends were compounded and shaped using an internal mixer and injection molding machine, respectively. The maximum content of TPCS for injecting the polymer blend was examined in order to assist for the degradation of the polymer blends. In addition, the effect of adding different types of gelling agents, i.e. agar, carrageenan and sodium alginate at 10 20 and 30 wt% into the matrix on properties of the TPCS/LDPE blends was investigated. It was found from FTIR spectra that the peak in the region of OH stretching shifted to lower wavenumber for the TPCS/LDPE blends modified by agar, carrageenan or sodium alginate. Moreover, water absorption of the TPCS/LDPE blends slightly increased by the addition of all gelling agents. For morphology, all of the gelling agents were well compatible with the TPCS matrix. Moreover, the mechanical properties of the TPCS/LDPE blends modified by agar, carrageenan or sodium alginate were greater than those of the blend without the modification. The incorporation of agar, carrageenan or sodium alginate also caused the reduction of the thermal degradation temperatures of the starch. Finally, the gelling agent modified TPCS/LDPE blends degraded a quicker than the non-modified blend. The highest overall mechanical properties and lowest water absorption were obtained from the TPCS/LDPE blends modified by 30 wt% of sodium alginate. However, the quickest degradation was found from the TPCS/LDPE blends modified by 10 wt% of agar.

Keywords : Thermoplastic starch, Polymer blend, Injection molding, Gelling agent

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์นี้ทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย และ รศ.ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตลอดจนให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมี รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือบริการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่ให้ทุกอย่างอย่างต่อคณะผู้จัดทำตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ จนประสบความสำเร็จในการศึกษา

นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XI
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.1.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	6
2.1.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.1.3 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.1.4 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	8
2.1.5 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	8
2.1.5.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน.....	8
2.1.5.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป.....	9
2.1.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์.....	9
2.1.5.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	10
2.1.5.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	10
2.1.5.6 การทดสอบโดยการฝังดิน.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 แป้ง.....	11
2.2.1 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง	11
2.2.2 องค์ประกอบของแป้ง.....	12
2.2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	16
2.2.4 สมบัติของแป้ง.....	16
2.2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....	16
2.2.4.2 การเกิดเจลลาคีในเซชัน.....	17
2.2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	18
2.2.4.4 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาซ์.....	19
2.3 มันสำปะหลัง.....	20
2.3.1 สมบัติของแป้ง.....	21
2.3.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	22
2.3.3 ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง.....	22
2.3.4 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรมอื่น.....	23
2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	23
2.5 พลาสติกไซเซออร์.....	24
2.6 พอลิเมออร์ผสม.....	25
2.6.1 การแบ่งชนิดของพอลิเมออร์ผสม.....	26
2.6.2 สารช่วยผสม.....	27
2.7 อะการ์.....	28
2.8 คาร์ราจีแนน.....	30
2.9 อัลจิเนต.....	34
2.10 การขึ้นรูปแบบฉีด.....	37
2.10.1 ส่วนประกอบเครื่อง Injection Molding.....	37
2.10.2 ส่วนชุดฉีด (Injection Unit).....	37
2.10.3 ส่วนชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์.....	37
2.10.4 ส่วนฐานของเครื่องฉีด.....	38
2.10.5 ขั้นตอนการฉีดพลาสติก.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
	46
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 สารเคมี.....	49
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.3 วิธีการทดลอง.....	
3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้ง มันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	51
3.3.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ด้วยอะคาร์.....	51
3.3.3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ด้วยคาร์ราจีแนน.....	52
3.3.4 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาโรลจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ด้วยโซเดียมอัลจิเนต.....	52
3.4 วิธีการทดสอบ.....	51
3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน.....	56
3.4.2 การเกี่ยวเบนรังสีเอกซ์.....	56
3.4.3 สมบัติทางกายภาพ.....	56
3.4.3.1 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี.....	56
3.4.3.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ.....	57
3.4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา.....	57
3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	57
3.4.5.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง โมดูลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์ การดึงยืด ณ จุดขาด.....	58
3.4.5.2 ความแข็งกด.....	58

สารบัญ (ต่อ)

3.4.5.3 สมบัติความแข็งแรงกระแทก.....	59
3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	59
3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	59
3.4.8 การหาค่าความหนืด.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	61
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง TPCS/ LDPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกล.....	62
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	64
4.3 XRD.....	72
4.4 การหาค่าความหนืด.....	78
4.5 สันฐานวิทยา.....	79
4.6 ดัชนีการไหล.....	85
4.7 การวัดสี.....	87
4.8 สมบัติเชิงกล.....	90
4.9 การดูดซับน้ำ.....	96
4.10 การศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	102
4.11 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	108
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	118
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	118
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	119
เอกสารอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน.....	13
2.2	ปริมาณองค์ประกอบในหัวมัน.....	20
2.3	ปริมาณองค์ประกอบในเนื้อมัน.....	21
2.4	ลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง.....	22
2.5	สมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด.....	32
3.1	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกรดชนิด (DNDV-0405 R).....	46
3.2	องค์ประกอบทางเคมีของผงวุ้นตรานางเงือก.....	46
3.3	สมบัติของแคปปา-คาร์ราจีแนน เกรดอาหาร (Carrageenan KL-805).....	47
3.4	สมบัติของโซเดียมอัลจิเนต เกรดอาหาร (H050912406).....	48
3.5	สมบัติของมาลิกแอนไฮดรยด์-กราฟท์-พอลิเอทิลีน เกรด การค้า MB 100D.....	48
3.6	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์ พอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม.....	53
3.7	สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป.....	54
3.8	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์, คาร์ราจีแนน, และโซเดียมอัลจิเนต โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม.....	55
3.9	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้.....	57
4.1	อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลอง.....	61
4.2	ลักษณะทางกายภาพหลังการฉีด.....	62
4.3	หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏเหมือนกันของพอลิเมอร์ผสม.....	64
4.4	ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่าง ๆ.....	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลในปริมาณต่างๆ.....	85
4.6 ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจล.....	87
4.7 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลในปริมาณต่างๆ.....	105
4.8 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของ LDPE และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจินेटที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก	107

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.2	โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ชนิด A และ B ของอะไมโลส.....	11
2.3	X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน.....	12
2.4	โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	13
2.5	โครงสร้างของอะมิโลส.....	14
2.6	ลักษณะเกลียวของอะไมโลส.....	14
2.7	โครงสร้างของอะมิโลเพกติน.....	15
2.8	การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม.....	18
2.9	การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	18
2.10	ลักษณะโครงสร้างของ LDPE.....	24
2.11	โครงสร้างของกึ่งผลึก.....	25
2.12	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	28
2.13	โครงสร้างอะการ์.....	29
2.14	แบบจำลองแสดงการเกิดโครงข่ายเจลของอะกาโรส.....	30
2.15	โครงสร้างของแคปไซซิน.....	31
2.16	โครงสร้างของไอโอดีน-คาร์ราจีแนน.....	31
2.17	โครงสร้างของแลมด้า-คาร์ราจีแนน.....	32
2.18	กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน.....	33
2.19	โครงสร้างของอัลจินต.....	35
2.20	กลไกการเกิดเจลของ Calcium alginate ⁺²	36
2.21	เครื่อง Injection Molding.....	37
3.1	แผนการดำเนินงานในงานวิจัย.....	50
3.2	ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ.....	58

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS/LDPE ในอัตราส่วน 70:30 และ 60:40.....	62
4.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ที่ปริมาณต่างๆ.....	65
4.3	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS LDPE สารก่อเจล และ MAPE.....	66
4.4	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และอะการ์.....	66
4.5	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่างๆ.....	67
4.6	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และคาร์ราจีแนน.....	68
4.7	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณต่างๆ	69
4.8	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และโซเดียมอัลจิเนต.....	70
4.9	อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPCS70/LDPE30 TPCS70/LDPE30/A30 TPCS70/LDPE30/C30 และ TPCS70/LDPE30/SA30.....	71
4.10	ดิฟแฟรกโตแกรมของ LDPE.....	72
4.11	ดิฟแฟรกโตแกรมของ TPCS อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต.....	72
4.12	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์.....	73
4.13	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน.....	74
4.14	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต.....	75
4.15	ดิฟแฟรกโตแกรมของ TPCS70/LDPE30 TPCS70/LDPE30/A30 TPCS70/LDPE30/C30 และ TPCS70/LDPE30/SA30.....	76
4.16	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ ที่กำลังขยาย 100 เท่า 300 เท่า.....	80
4.17	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน ที่กำลังขยาย 100 เท่า 300 เท่า.....	81

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

4.18	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจินेट ที่กำลังขยาย 100 เท่า 300 เท่า.....	82
4.19	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า ของ TPCS70/LDPE30 และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจินेटต่างๆ ที่ 30 % โดยน้ำหนัก.....	83
4.20	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจินेटในปริมาณต่างๆ.....	91
4.21	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินेटที่ 30 % โดยน้ำหนัก.....	94
4.22	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30.....	96
4.23	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/A10.....	96
4.24	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/A20.....	96
4.25	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/A30.....	96
4.26	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/C10.....	97
4.27	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/C20.....	97
4.28	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/C30.....	97
4.29	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/SA10.....	98
4.30	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/SA20.....	98
4.31	ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/SA30.....	98
4.32	เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์.....	99
4.33	เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน.....	99
4.34	เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจินेट.....	100
4.35	เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยของ อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินेटที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.36	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์บอนในปริมาณต่างๆ.....	102
4.37	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณต่างๆ.....	103
4.38	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจินเตในปริมาณต่างๆ.....	104
4.39	เทอร์โมแกรมของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจินเตที่ปริมาณ 30 %โดยน้ำหนัก.....	106
4.40	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน.....	108
4.41	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน เป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน.....	109
4.42	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจินเตที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน.....	110
4.43	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน.....	109
4.44	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน.....	112
4.45	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจินเตที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 %โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน.....	114
4.46	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจินเตที่ปริมาณ 30 %โดยน้ำหนัก.....	116

สัญลักษณ์และคำย่อ

- ASTM วิธีการทดสอบตามมาตรฐานประเทศสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials)
- FTIR Fourier transform infrared spectrophotometer
- LDPE Low-density Polyethylene
- MAPE Maleic anhydride-graft-polyethylene
- SEM Scanning electron microscope
- TGA Thermogravimetric analyzer
- TPCS Thermoplastic Cassava Starch
- XRD X-ray Diffractometer

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่เนื่องจากพลาสติกมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้เป็นระยะเวลานานนับร้อยๆ ปี ซึ่งยากต่อการย่อยสลาย ซึ่งกลายเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่ง พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลก โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำและสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ภายหลังจากการใช้งานโดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้น มีสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity Plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้

พอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุที่ง่ายต่อการย่อยสลาย เพื่อใช้แทนที่พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีกึ่งหนัก เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ เซลลูโลสและอนุพันธ์ แป้ง อัลจินเนต คาร์ราจีแนน เพกติน โปรตีน และโคโคซาน เป็นต้น จึงนิยมนำแป้งมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ (Biodegradable plastics) หรือผลิตเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยบทบาทที่สำคัญของแป้ง คือ เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติก

ประเทศไทยมีการผลิตแป้งจากธัญชาติและพืชหัวต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร อีกทั้งเป็นผู้ส่งออกแป้งมันสำปะหลังเพื่อขายในตลาดต่างประเทศมากที่สุด สำหรับตลาดส่งออกแป้งมันสำปะหลังของประเทศไทยมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในครึ่งปีแรกเดือนมกราคม - มิถุนายนของปี 2555 ปริมาณการส่งออกเป็น 704,280 ตัน คิดเป็นมูลค่า 2,517 ล้านบาท เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2554 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 และร้อยละ 7 ตามลำดับ [1] แป้งมันสำปะหลังเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติและสามารถทดแทนได้ ย่อยสลายได้ง่าย มีความบริสุทธิ์สูง ราคาถูก ให้ลักษณะปรากฏที่ใส นำใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารมากมาย เช่น เป็นตัวให้ความข้นหนืด สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมอาหารหลักและอาหารรองในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ข้าวเกรียบ ขนมไทย ซอสปรุงรส เป็นต้น และมี

สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ที่เหมาะสมเฉพาะตัว [2] จึงเป็นทางเลือกใหม่ในการนำมาใช้ในการผลิตพลาสติกทดแทนการใช้ผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียม

พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรม เช่น ท่อน้ำ ถัง ขวด แท่นรองรับสินค้า ภาชนะต่าง ๆ เครื่องเล่นของเด็ก ถุงเย็น ถาดทำน้ำแข็ง ชิ้นส่วนแบตเตอรี่ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ฉนวนไฟฟ้าและเก้าอี้ เป็นต้น มีความยืดหยุ่นดี เหนียวมากที่อุณหภูมิห้อง ผสมสีได้ง่าย ทำให้ผลิตเป็นฟิล์มใส ฟิล์มสี ฟิล์มโปร่งแสงหรือทึบแสงได้ แต่เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่สามารถย่อยสลายได้ เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงทนทานต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีลักษณะไม่เป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวน้อยส่งผลให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปสัมผัสผิวของพลาสติกได้น้อยลง จึงทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ยาก [3] ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้พอลิเอทิลีนสามารถเกิดการย่อยสลายได้ง่ายขึ้นอาจทำได้โดยการผสมส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติลงไปในพอลิเอทิลีน เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด เป็นต้น อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100% โดยแป้งที่ผสมลงในพอลิเอทิลีน จะกระจายตัวอยู่บริเวณพื้นผิวพลาสติก จุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเอทิลีนจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมีต่อไป

อะการ์ (Agar) คาร์ราจีแนน (Carrageenan) และโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งสกัดได้จากสาหร่ายทะเล มีสมบัติเป็นเป็นสารก่อเจล (Gelling agents) มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ [4] ดังนั้นจึงเลือกมาเป็นสารตัวเติม ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพื่อให้พอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวและแข็งแรงมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีการศึกษาถึงการเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ [5-7] แต่พบว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่ยังใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ในปริมาณที่สูงเพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป และยังใช้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซในปริมาณที่ต่ำ จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ย่อยสลายได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ด้วยโซเดียมอัลจิเนต เพกติน และเจลาติน [8] ขึ้นรูปได้โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) โดยใช้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ในอัตราส่วน 50:50 %wt พบว่าการเติมสารก่อเจลลงในพอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมมี

สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น แต่การใช้เทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งถั่วเขียวและ LDPE ในอัตราส่วน 50:50 %wt ส่งผลให้ชิ้นงานมีการย่อยสลายได้ช้า

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch : TPCS) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ นำมาผสมกับ LDPE โดยมีสารช่วยผสมชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้และขึ้นรูปได้โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ซึ่งจะทำการศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง TPCS และ LDPE โดยใช้สัดส่วนปริมาณ TPCS มากกว่าปริมาณ LDPE เพื่อช่วยในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสม และศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารก่อเจล 3 ชนิด ได้แก่ อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต เนื่องจากอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมีโครงสร้างคล้ายแป้งและสามารถย่อยสลายได้ ซึ่งคาดว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์แต่สามารถทำการย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และคาดว่าสามารถนำมาพัฒนาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น กระถางปลูกเพาะกล้า ภาชนะ ต่างๆ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE โดยเน้นใช้ปริมาณ TPCS มากกว่า LDPE และใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยการใช้สารก่อเจลชนิดอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE โดยเน้นใช้ปริมาณ TPCS มากกว่า LDPE โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป
- 1.3.2 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ โดยการใช้สารก่อเจลชนิดอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่างๆ
- 1.3.3 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สันฐานวิทยา การวัดสี สมบัติทางความร้อน การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมได้ที่เตรียมได้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จาก TPCS ผสม LDPE ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ที่ใช้กันทั่วไปได้ในปัจจุบัน โดยการลดปริมาณพลาสติกพอลิเอทิลีนลง เพื่อพอลิเมอร์ผสมที่ได้สามารถย่อยสลายได้ง่ายขึ้น
- 1.4.2 ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกที่มีมากในปัจจุบัน
- 1.4.3 เพื่อแปรรูปแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีราคาถูก ให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastics) [9]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้ โดยใช้วิธีการทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับพลาสติกและการใช้งานในช่วงเวลาหนึ่ง ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการระบุชนิดและประเภทของวัสดุย่อยสลายได้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกได้เป็น 5 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แดกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดี หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. พลาสติกย่อยสลายทางกล (Mechanical degradable plastics) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรีไซเคิล

3. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

4. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรอกไซด์

พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกออก เรียกว่าขั้น Depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบ ATP ก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) น้ำ เกลือต่างๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้นและอุณหภูมิ

2.1.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [10]

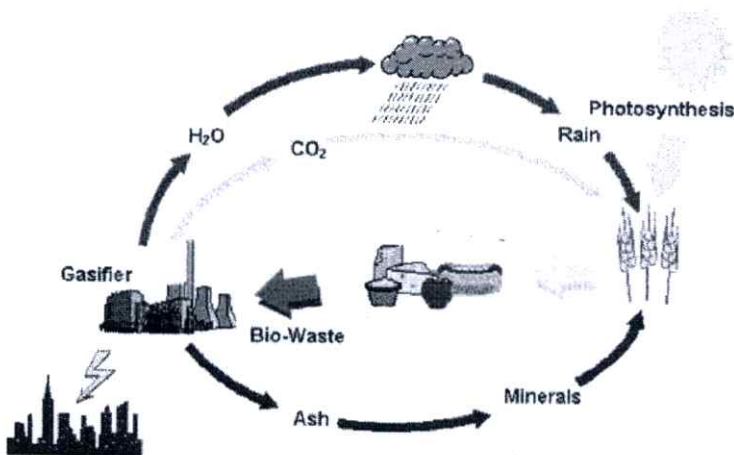
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN 103.2 ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a plastic material) คือ กระบวนการที่พลาสติกถูกเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์นั้น สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดต้องถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์มากกว่า

ร้อยละ 90 โดยที่สภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (Composting) เป็นต้น

สำหรับคำว่า Biodegradation (หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) ย่อมาจาก Biotic degradation ในมาตรฐานต่างๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของ จุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือ ก๊าซมีเทนและน้ำ

2.1.2 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [10]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีสมบัติต่างๆ ในการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติก โดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะซึ่งจะ อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม คือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็จะเกิดการย่อยสลายได้หรือถูกหมักเป็นปุ๋ยในสภาวะที่เหมาะสม การพัฒนาของระบบในธรรมชาตินั้นเริ่ม จากมวลชีวภาพหลายพันล้านตันถูกผลิตขึ้น โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งมวลชีวภาพนี้จะถูกย่อยสลายได้กลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งชีวภาพ และแร่ธาตุ การเกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ซึ่งวัฏจักร ของธรรมชาตินี้มีเกิดขึ้นและย่อยสลายได้ครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษและไม่เสียค่าใช้จ่ายสูง หลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ถูกนำไปกำจัดโดยตรงย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้น จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็น วงจรชีวิตผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [10]

2.1.3 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [10]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถถูกจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียหรือเชื้อราใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงเปลี่ยนสภาพของพลาสติกให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายหลังการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พลาสติกจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หน่วย ซึ่งโครงสร้าง ส่วนใหญ่ที่จุลินทรีย์ใช้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ เป็นต้น จากการศึกษากการย่อยสลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ เช่น โปรตีน เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น พบว่าการย่อยสลายเริ่มจากจุลินทรีย์จะเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดอนุมูลอิสระจนทำให้เกิดการย่อยสลายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500 หน่วย ซึ่งสามารถวัดอัตราการสลายตัวได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยตรวจวัดปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจึงเกิดการย่อยสลาย โดยการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกมีทั้งหมด 3 ลักษณะ ดังนี้

1. พลาสติกไม่ได้สลายตัวเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะสลายกลายเป็นผงละเอียด
2. การสลายตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายตัวต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต่อไป
3. การสลายตัวเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นโดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน (Polycaprolactone) และพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรทเททราเรอ (Poly hydroxybutyrate garleate) เป็นต้น

2.1.4 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ [10]

พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1. พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. พอลิเอสเตอร์
3. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น

2.1.5 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [10]

2.1.5.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณน้ำหนักแห้ง สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = \frac{C_d}{C_i} \times 100$$

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.1.5.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่า พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

2.1.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

(ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้างนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้างและ

สังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจาก พอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

(ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังไว้ในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลาย เหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคโลนีบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

2.1.5.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในช่วงการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

2.1.5.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก โดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) การวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA)

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

2.1.5.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 50 มิลลิเมตรหลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา

การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ

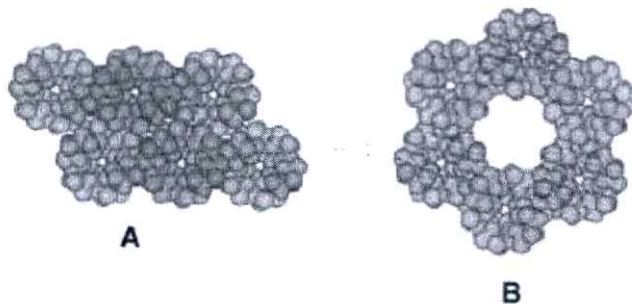
2.2 แป้ง [11]

แป้งเป็น Homopolysaccharide ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช และเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (Starch granule) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่างและบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมี โมเลกุลแตกต่างกันและเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

“แป้ง” ในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาว (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จะจัดอยู่ในรูปประเภทฟลาว เรียกว่า Corn flour, Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้า ที่มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 7 % ถึง 8% เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ อื่นถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่า สตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch, Wheat starch เป็นต้น ซึ่งแป้งที่พบในธรรมชาตินั้นจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน

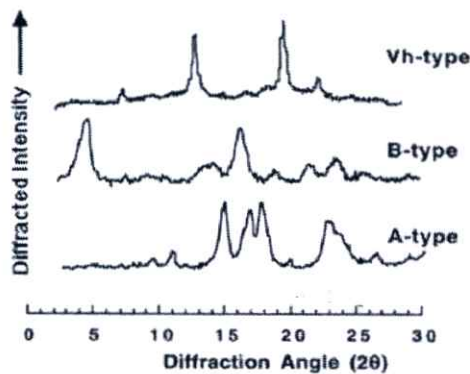
2.2.1 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง [11]

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.4 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ชนิด A และ B ของอะไมโลส [11]

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wide angle x-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ X-ray diffraction ต่างกันดังรูปที่ แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 2θ เท่ากับ 17 และ 18 และพีคเดี่ยวที่ 20 เท่ากับ 23 แต่ไม่มีพีคที่ 20 เท่ากับ 5.6 แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 20 เท่ากับ 5.6 และ 17 แต่ไม่มีพีคที่ 20 เท่ากับ 18 และมีพีคคู่ (Doublet) ที่ 20 เท่ากับ 22 และ 24 ซึ่งได้แก่ แป้งจากพืชหัวและแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 20 เท่ากับ 5.6 และ 17.9 ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้นและแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการปฏิบัติ (Treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งชั้นที่ถูกบ่มไว้นานที่อุณหภูมิสูง (110 °C, 30 นาที :Heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นชนิด B ไปเป็นชนิด A



รูปที่ 2.3 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [11]

2.2.2 องค์ประกอบภายในแป้ง [11]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของ

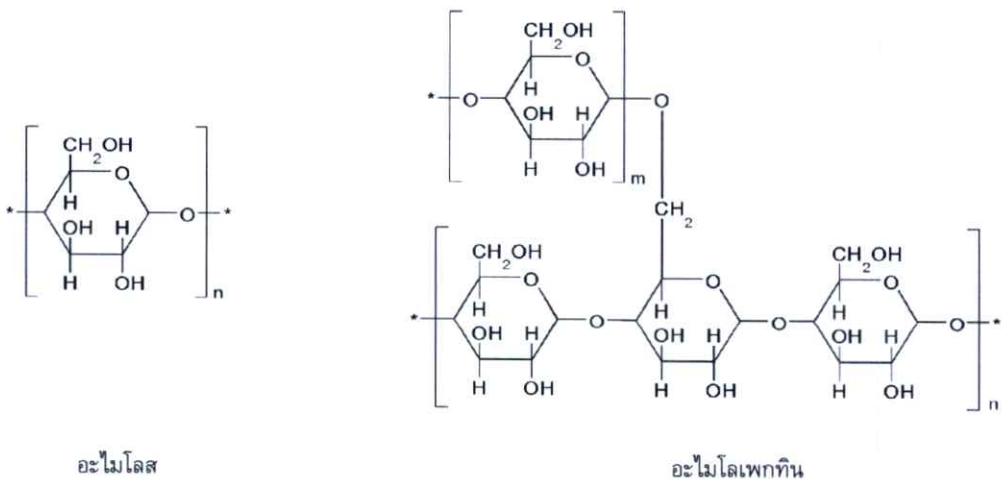
อะไมโลสและอะไมโลเพกทินแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.1) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน [11]

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพกทิน
1. ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะเป็นกิ่งก้าน
2. พันธะที่จับ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
3. ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
4. การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
5. การทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
6. การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัว เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.1 ได้แก่

1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพกทิน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate materia



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [11]

1. อะไมโลส

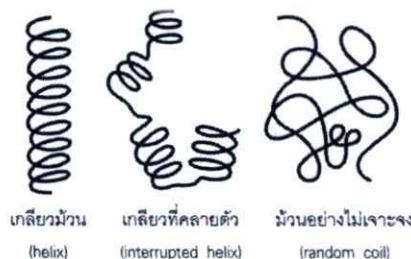
อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage และส่วนน้อยเป็น α -1,6- glycosidic bonds อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลส [11]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

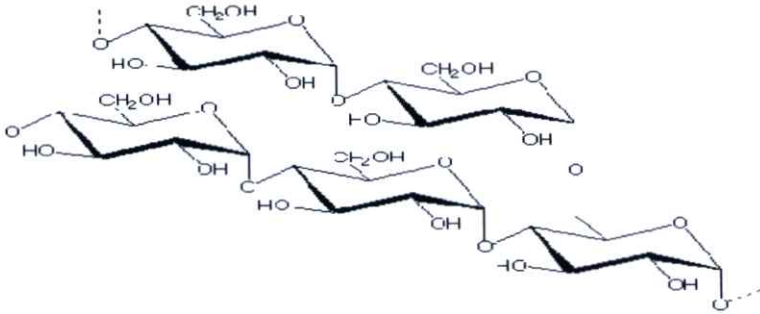
ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลาตินในซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะไมโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพกทินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะไมโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ด โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังรูปที่ 2.6 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะไมโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะไมโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



รูปที่ 2.6 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [11]

2. อะไมโลเพกทิน

อะไมโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก α -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [11]

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด α -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสในอะไมโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

โดยปกติอะไมโลเพกทินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลสมาก อะไมโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน อะไมโลเพกทินมีพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่าอะไมโลสและมีความคงตัวมากกว่า ยังคงสภาพเหลว มีความหนืดยืดหยุ่นสำหรับอะไมโลเพกทินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลังและมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90 % ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20 % จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้งในการจับกันเป็นกลุ่มของอะไมโลเพกทินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (Double helix) การเกิดเกลียวคู่ของอะไมโลเพกทินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งอะไมโลเพกทินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกันหรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

3. สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกทินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลส อะไมโลเพกทินและสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง
4. ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

2.2.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง [11]

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะไมโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกทิน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

2.2.4 สมบัติของแป้ง [11]

2.2.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bond water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำ

กับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้งจะได้ สตาร์ชโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5) \cdot H_2O]$

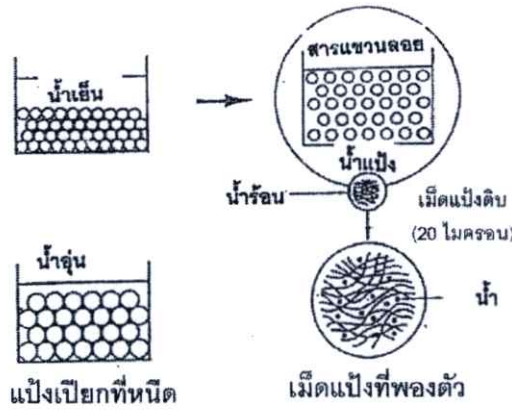
น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซล (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ด เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟตลงไป พบว่าสีจะหายไปอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งทำหน้าที่เป็น Molecular sieve รูพรุนเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้งหรืออาจมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติ แต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเจลลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะเกิดการละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ

2.2.4.2 การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization)

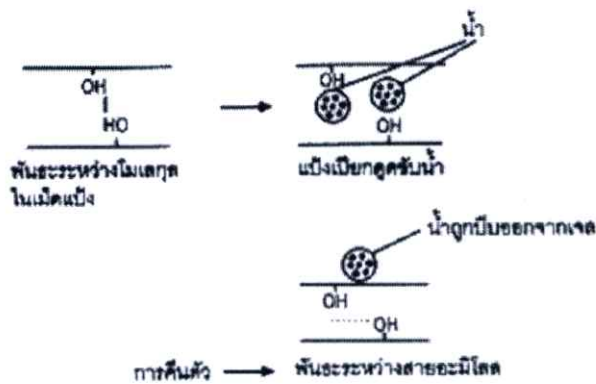
โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะคูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลลาทีไนซ์ มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [11]

2.2.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการควบแน่นน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.9 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.9 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [11]

2.2.4.4 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) [12]

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาทดแทนได้ง่ายมีอยู่มากในธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารตัวเติม ใน Polyolefins ต่อมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีดกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ Low density polyethylene

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้น จะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกทินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้

ในธรรมชาติโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินมีการจัดเรียงตัวกัน โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิการหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิการหลอมตัวของเม็ดแป้งสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือ ถ้าได้รับความร้อนสูง (มากกว่า 265°C) แป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัว โดยทั่วไปเราไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูป Thermoplastic ทั่วๆ ไป เพราะแป้งจะไม่เกิดการไหลขึ้นเมื่อเราให้ความร้อน ในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็น Thermoplastic starch จำเป็นที่จะต้องเติม Plasticizer เช่น Glycerol, Ethanolamine, พอร์มาไมด์, ยูเรีย และซอร์บิทอลลงไป ซึ่งภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอจะทำให้แป้งสามารถหลอมและไหลได้สามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้ เช่น Single screw extrusion , Twin screw extrusion , Compression molding

ในการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปในการเตรียม Thermoplastic starch นั้น พลาสติกไซเซอร์จะไปช่วยให้ Glass transition temperature (T_g) ลดต่ำลง ช่วยไม่ให้แป้งเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนและแรงเฉือน นอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์ยังช่วยปรับคุณสมบัติของ Thermoplastic starch ที่เตรียมได้อีกด้วย คือ ช่วยลดการเกิด Re-crystallization ลง และช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้สามารถใช้งานได้จริงอีกด้วย โดยพลาสติกไซเซอร์จะเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งโดยจะไปเกิดกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลของแป้ง ซึ่งจะช่วยให้แป้งสามารถทำเป็นพลาสติกได้ ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้กันมาก คือ พวก Polyol plasticizer เช่น กลีเซอรอล เป็นต้น ปัญหาที่

พบโดยทั่วไปของ Thermoplastic ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ คือ มันมีโอกาสดำเนินการเกิด Re-crystallization หลังจากการเก็บรักษาไว้ หรือขณะใช้งาน เป็นผลทำให้ Thermoplastic starch แข็งและเปราะ ดังนั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาให้ได้ พลาสติกไซเซอร์ที่มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุด เพื่อให้ Thermoplastic starch มีความยืดหยุ่นที่ดี (Flexibility) และลดการเกิด Re-crystallization หรือ Retrogradation ขณะเก็บรักษาได้

2.3 มันสำปะหลัง [13]

มันสำปะหลัง (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Manihot esculenta* Crantz) มีชื่อสามัญเรียกได้หลายชื่อ แตกต่างตามท้องถิ่นและภาษาที่ใช้ ในภาษาอังกฤษ เรียกว่า Cassava หรือ Tapioca แต่โดยทั่วไปคำว่า Tapioca มักจะใช้แทนผลิตภัณฑ์ที่ทำจากมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจาก ใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้งไว้ในราก ความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งในรากมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องมาจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว และปัจจัยอื่น ๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจจะแตกต่างกันไป จะเห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้น นอกจากน้ำแล้ว คือ แป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูง ปริมาณน้ำจะน้อยและความหนาแน่นของหัวจะมีสูง ฉะนั้นในการตรวจสอบหรือวัดปริมาณแป้งอย่างรวดเร็วที่นิยมทำกัน คือ การตรวจสอบความหนาแน่น โดยการชั่งน้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำน้อย แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำมาก และมีแป้งน้อย ในกรณีกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมากก็แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำน้อย และมีแป้งมาก จะมีส่วนประกอบแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ปริมาณองค์ประกอบในหัวมัน [13]

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัม น้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21-75.32
เปลือก	4.08-14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87-41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85-39.27

ตารางที่ 2.3 ปริมาณองค์ประกอบในเนื้อมัน [13]

องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เส้นใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

2.3.1 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง [13]

ลักษณะของแป้งมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน ลักษณะเด่นของแป้งมันสำปะหลัง คือ มีความบริสุทธิ์สูง (มีแป้งมากกว่า 95%) มีปริมาณโปรตีนและไขมันค่อนข้างต่ำ (น้อยกว่า 1%) มีฟอสฟอรัสน้อยกว่า 0.04% เมื่อทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำไฟอ่อนปานกลาง แป้งจะละลายง่าย สุกง่าย แป้งเหนียวติดภาชนะ หนืดข้นขึ้นเรื่อยๆ ไม่มีการรวมตัวเป็นก้อน เหนียวเป็นใย ติดกันหมด ติดภาชนะ กล่าวได้ว่าแป้งไทย ขาวใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสี เหมาะสมมากเมื่อนำมาใช้ประโยชน์ แป้งที่ได้จากหัวมันสำปะหลัง ประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2-8 เม็ดมารวมตัวกัน แต่ละเม็ดจะมีความยาวตั้งแต่ 5-35 ไมครอน เม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านแบนไม่สม่ำเสมอกัน เม็ดแป้งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจน และในบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งด้วย ตลาดได้เลือกแป้งมันสำปะหลังประเภทสตาร์ชชั้นพิเศษ เป็นสินค้ามาตรฐานในการซื้อขาย เนื่องจาก เป็นประเภทที่ผลิตกันอยู่ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรม โดยมีคุณภาพตามมาตรฐาน

2.3.2 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง [13]

แต่เดิมหัวมันสำปะหลังถูกใช้เพื่อการบริโภคตรง เช่น นำไปต้มหรือทอด ต่อมาเมื่ออุตสาหกรรมเจริญก้าวหน้าขึ้น จึงได้มีการนำหัวมันสำปะหลังมาแปรรูปโดยสร้างโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังขึ้น วัตถุประสงค์สำคัญคือหัวมันสำปะหลังอายุเก็บเกี่ยว 8-13 เดือน ซึ่งมีส่วนประกอบของน้ำ 59-70% แป้ง 20-40% โปรตีน 0.9-2.3% หัวมันสำปะหลังสดเมื่อขูดจากดินแล้ว จะเก็บไว้ไม่ได้ นานเหมือนพืชชนิดอื่น ๆ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในหัวมัน ดังนั้นหัวมันจากลานมันต้องทำการแปรรูปโดยเร็วที่สุดเพราะถ้าทิ้งไว้นานเกินกว่า 72 ชั่วโมง จะทำให้เปอร์เซ็นต์ของแป้งลดต่ำลง หรือ เกิดการเน่าเสียได้

ระยะแรกการผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน ใช้แรงงานคนเป็นส่วนใหญ่กำลังการผลิตต่ำ (ไม่เกิน 10 ตันต่อวัน) แป้งที่ได้สีไม่ค่อนขาว ค่าพีเอชและความหนืดต่ำ มีพวกเส้นใยและเถ้าค่อนข้างสูง กรรมวิธีการผลิตเป็นแบบง่าย ๆ โดยนำหัวมันสำปะหลังที่ใช้แรงคนสร้างเข้าสู่เครื่องบดกรองผ่านตะแกรง ปล่อยให้ให้น้ำแป้งตกตะกอนแยกแป้งขึ้นมาตากแห้งบนพื้นคอนกรีตร้อน (ความร้อนได้จากแสงแดดหรือเตาฟืน) แล้วจึงบดแป้งให้เป็นผงเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องคุณภาพและกำลังการผลิต กรรมวิธีการผลิตแบบนี้จึงลดจำนวนลงหันมาใช้กรรมวิธีการผลิตแบบใหม่ที่อาศัยเครื่องจักรแทน ในประเทศไทยกำลังการผลิตของโรงงานที่ใช้กรรมวิธีการผลิตแบบใหม่คิดเป็นร้อยละ 90 ของกำลังการผลิตทั่วประเทศ

สินค้าแป้งมันสำปะหลังในประกาศของกระทรวงพาณิชย์ ฉบับที่ 4 โดยมีลักษณะแสดงตามตารางที่ 2.4 ดังนี้

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง (มอก. 274-2521)

ข้อกำหนด	สมบัติขั้นต่ำ
ปริมาณแป้ง	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก
เถ้า	ไม่เกินร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก
เยื่อ	ไม่เกิน 0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อน้ำหนักแป้ง 50 กรัม
ความเป็นกรด-ด่าง	ตั้งแต่ 4.5 - 7.0
ส่วนของแป้งที่สามารถผ่านตะแกรง ขนาด 15 ไมโครเมตร	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ : คำนวณจากน้ำหนักแห้งเป็นร้อยละ

2.3.3 ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง

- แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native starch) คือ แป้งที่เกิดจากการแปรรูปหัวมันสำปะหลังขั้นต้น โดย ไม่มีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงร่วมในการผลิต เช่น การนำหัวมันมาบดให้เป็นแป้ง แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว และมีความบริสุทธิ์สูง มีสิ่งปนเปื้อนต่ำ โดยจะมีปริมาณแป้ง (Starch) อยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมัน รวมถึงฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ และเมื่อได้รับความร้อนจะมีความหนืดสูง ทำให้ได้แป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสง และมีอัตราการคืนตัวต่ำ (Retrogradation)

- แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified starch) คือ แป้งที่ได้จากการนำแป้งดิบไปผ่านกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโมเลกุลเพื่อให้มีสมบัติเฉพาะ เช่น สมบัติทางด้านความ

เหนียว สำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แป้งแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้แป้งมันสำปะหลังดิบเพราะมีราคาสูงกว่าแป้งดิบกว่าเท่าตัว

2.3.4 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรมอื่น

- อุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมทอผ้านั้นจะต้องใช้แป้งมันสำปะหลัง โดยด้ายที่จะใช้ทอผ้านั้นจะต้องผ่านการชุบแป้งเสียก่อน ด้ายจึงจะเรียบไม่มีขน นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้าแป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ

- อุตสาหกรรมกระดาษ การทำกระดาษต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่างๆ เช่น ไม้ไผ่ ไม้สน ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็กๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยกาวจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึกเวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี

- อุตสาหกรรมไม้อัด แป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติเป็นกาวจึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากในการผลิตไม้อัด ต้องประกอบไม้ให้ติดกันโดยใช้กาว

2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) [14]

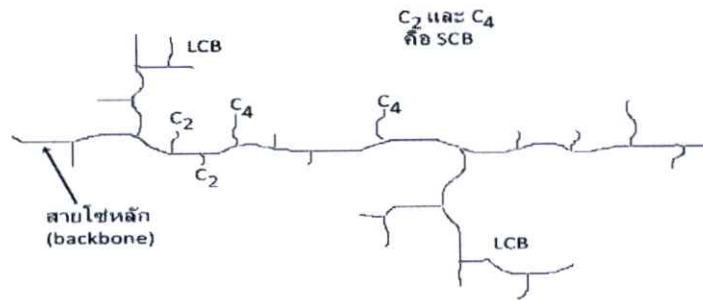
เป็นพอลิโอเลฟินด์ ที่มีการขายในเชิงพาณิชย์เป็นชนิดแรก ในปี ค.ศ. 1939 โดย Reginald Gibson and Eric Fawcett แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษ มีระดับการเป็นผลึกต่ำ ผลิตโดยใช้เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบอนุโมลติสระ (Free-radical bulk polymerization) โดยใช้ออกซิเจนหรือเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง กล่าวคือ ความดันในช่วง 1000-3000 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 250-300 °C การเตรียม LDPE สามารถทำแบบต่อเนื่องในปฏิกรณ์ที่เป็นระบบท่อ (Tubular reactor) หรือเตรียมแบบแบทช์ในปฏิกรณ์ที่เป็นถัง (Batch reactor)

ภายใต้สภาวะการผลิตที่มีอุณหภูมิและความดันสูงจะทำให้เกิดสาขาโซ่ (Side chains branching) จำนวนมากบนโมเลกุล LDPE ซึ่งสาขาโซ่เป็นแบบสาขาโซ่สั้น (Short-chains branching, SCB) และสาขาโซ่ยาว (Long-chains branching, LCB) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งโมเลกุลประกอบด้วยสาขาโซ่สั้น ที่มีอะตอมคาร์บอน 2 อะตอม (C_2 หรือ Ethyl side group) และสาขาโซ่สั้นที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 4 อะตอม (C_4 หรือ Butyl side group) ประมาณ 15 หมู่ต่อจำนวนอะตอมคาร์บอนบนสายโซ่หลัก 1,000 อะตอม ซึ่งในจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เท่ากันนี้จะมีสาขาโซ่ยาวประมาณ 3 ถึง 4 สาขาโซ่เท่านั้น มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.91 ถึง 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนโมเลกุลของ LDPE จะไม่มีส่วนที่ไม่เป็นสาขาโซ่ ซึ่งสามารถจะจัดเรียงตัวกันแน่น

เกิดเป็นส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline region) แต่ผลของการมีหมู่สาขาโซ่จำนวนมาก ทำให้โมเลกุล LDPE ไม่สามารถจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบได้มากนัก

ลักษณะเฉพาะของ LDPE คือ ชิ้นงานที่ผลิตได้ค่อนข้างนิ่ม ค่อนข้างทึบแสง มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ สามารถผสมให้สีต่าง ๆ ได้ ถ้าค่อย ๆ เติบโตจะไม่มีความหนาแน่นสูงเกินไป จึงกล่าวได้ว่า LDPE มีการทนทานต่อการแตกหัก มีสมบัติการเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม โดยเฉพาะสภาวะที่เป็นโพลีเมอร์

การประยุกต์ใช้งาน LDPE ประมาณ 3 ใน 4 ของ LDPE ที่ผลิตทั้งหมด ใช้ในการผลิตฟิล์มและแผ่นพลาสติก ซึ่งใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตถุงหิ้ว และถุงชนิดอื่น ๆ ส่วนที่เหลือจะใช้เป็นฉนวนหุ้มสายไฟ ใช้ในการเคลือบผิว และผลิตชิ้นงานจากการฉีดเข้าบ่า ท่อจากการอัดรีด เป็นต้น



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของ LDPE [14]

การใช้งาน :

LDPE มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่น เหมาะสำหรับการผลิตแผ่นฟิล์มต่าง ๆ เช่น วัสดุสำหรับบรรจุหีบห่ออาหาร ซองอาหาร ถุงใส่ของ และเคลือบด้านในของถังกระดาด

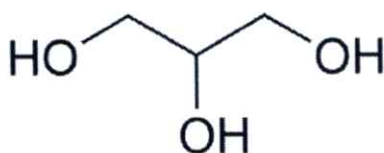
2.5 พลาสติกไซเซชัน [15]

พลาสติกไซเซชัน (Plasticization) หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติกไซเซชัน (Plasticizer) โดยพลาสติกไซเซชันจะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติกไซเซชันเข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซชันและพอลิเมอร์เรียกว่า “พลาสติกไซเซชันภายนอก” (External plasticization) และเรียกพลาสติกไซเซชันที่ผสมลงไปว่า

“พลาสติกไซเซอร์ภายใน” (Internal plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย

ข้อดีของพลาสติกไซเซอร์ภายใน คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่มีจุดด้อย คือ พลาสติกไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้วพลาสติกไซเซอร์ภายในเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ T_g ประมาณหรือใกล้เคียง $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ พลาสติกไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer) และพลาสติกไซเซอร์เสริมหรือพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) โดยพลาสติกไซเซอร์แท้จริง สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้และไม่แยกออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติกไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติกไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์ด้วย



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของกลีเซอรอล [15]

2.6 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) [16]

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์ บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถ

เข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (Energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิด เข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสาน โมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

2.6.1 การแบ่งชนิดของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

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

2.6.1.2 พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว (Immiscible blend) มีโครงสร้างแบบแยกเฟสสามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

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

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระกิบส์

ΔH คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม

ΔS คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นสาเหตุทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าเป็นบวก ดังนั้นทำให้ค่าพลังงานอิสระกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าศูนย์เป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียว หรือกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ต่างกันมาก เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ภูมิภาค คือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ผสมเรียกว่า ภูมิภาคหลัก (Matrix phase) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยเรียกว่า ภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

พอลิเมอร์ผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. Compatible blend คือ พอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะเหนียวแน่นระหว่างเฟสที่ดี จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี

2. Incompatible blend คือ พอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะเหนียวแน่นระหว่างเฟสที่ไม่ดี จะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ แต่การยึดเกาะและสมบัติเชิงกลสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ โดยการเติมสารช่วยผสม

ลงไป (Compatibilizers) ลงไป ซึ่งมักเป็นสารพวกล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ ที่เข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเฟส (โดยอาจมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกันหรือไม่คล้ายคลึงกันก็ได้) และต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงพอที่จะทำให้เกิดการพันกันกับสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสองเฟสด้วย เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาใช้ในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้

2.6.2 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [17]

จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียว จึงเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมมีข้อบกพร่องดังนี้

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

จากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นนั้นทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจในการแก้ไขข้อบกพร่องเหล่านั้น โดยมีการนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นที่ระหว่างสองวัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็ก และทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้นมี 2 วิธี คือ

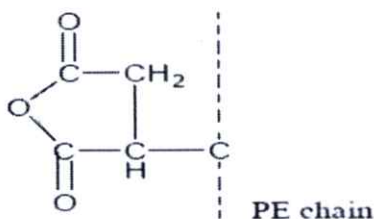
2.6.2.1 Non-reactive blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้ สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตร โครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้คือ พอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ซึ่งมีหลายชนิด คือ พอลิเมอร์ร่วมแบบโคบล็อก แบบไตรบล็อก แบบกราฟท์ หรือแบบส้อม ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับ พอลิบิวทาไดอีน แบบโคบล็อก เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับพอลิโอทิลีน

2.6.2.2 Reactive blending เป็นวิธีการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจาก พอลิเมอร์ผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดการกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับ พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟต์พอลิโอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือ อะคริลิกแอซิด (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์

การเติมสารช่วยผสมเป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมแต่ไม่ใช้การทำให้ พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากสารช่วยผสมมีการจัดเรียงตัวระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมทั้งสองวัฏภาคให้ดีขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการยึดติดระหว่างวัฏภาค ทำให้วัฏภาคกระจายมีการกระจายตัวที่ดี และมีขนาดของวัฏภาคกระจายที่เล็กขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

งานวิจัยนี้ใช้มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride grafted Polyethylene, MAPE) โครงสร้างดังรูปที่ 2.12 เป็นสารช่วยผสม

มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้วซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physical chemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเอทิลีนโดยทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้นพบว่าแอนไฮดรายด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อนและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่น รวมทั้งสารตัวเติม (Additive) ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ [17]

2.7 อะการ์ (Agar) [18]

อะการ์ (หรือที่มักจะเรียกว่า วุ้น) เป็นกาแลกแทนหรือพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง วงศ์ Rhodophyceae ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างของเซลล์ สาหร่ายที่ใช้สกัดอะการ์ที่สำคัญได้แก่ สกุล Gelidium และ Gracilaria อะการ์ละลายได้ในน้ำร้อน (มากกว่า 90°C) มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันไปตั้งแต่ 50,000 ถึง 80,000 ดาลตัน

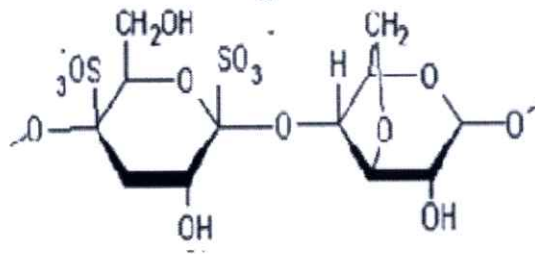
อะการ์ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. อะกาแรน (Agaran) หรือ อะกาโรส (Agarose) เป็นส่วนที่เป็นเจลได้

2. อะกาโรเพกทิน (Agaropectin) ส่วนนี้ไม่สามารถเป็นเจลได้

การผลิตอะการ์จะมีส่วนที่ช่วยแยกอะกาโรเพกทินออกจากอะกาแรนได้บ้าง อะกาแรนมีโครงสร้างคล้ายแคลป์ป้า (Kappa, K) และ ไอโอต้า (Iota, I) คาร์ราจีแนน ข้อแตกต่างคือน้ำตาลหน่วยที่สองของอะกาโรไบโอส (Agarobiose) เป็นโครงแบบ L และมีหมู่ซัลเฟตน้อยมาก (รูปที่ 2.13)

หน่วยซ้ำในอะกาแรนเป็นอะกาโรไบโอสหรือ β -D-กาแลกโทไพแรโนซิด และ 3, 6-แอนไฮโดร- α -L-กาแลกโทไพแรโนซิด จับสลับกันด้วยพันธะ 1 \rightarrow 3 และ 1 \rightarrow 4 ตามลำดับ



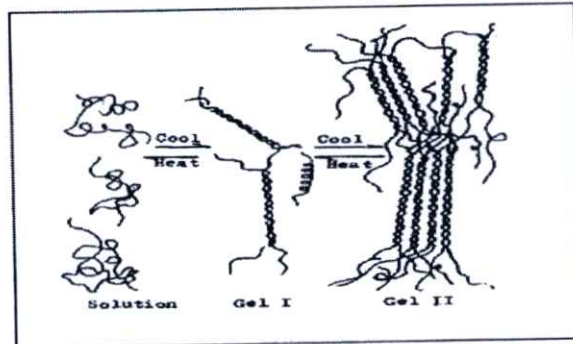
รูปที่ 2.13 โครงสร้างอะการ์ (Agarobiose) [18]

การเกิดเจล

อะการ์เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง คือ เป็นเจลได้ที่แม้ความเข้มข้น 1% (ปกติใช้ในช่วง 0.5 – 2.0%) เมื่อได้รับความร้อนสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเจล (มากกว่าหรือเท่ากับ 85°C) อะการ์จะละลาย และเมื่อเย็นตัวลง (มากกว่า 45°C) จะเกิดเจลที่ทึบแสง มีลักษณะแข็งเกร็งและเกิดซินเนอริซิสได้

การเกิดเจลของอะการ์ไม่จำเป็นต้องมีไอออนประจุบวกเหมือนแคลป์ป้า (Kappa, K) และ ไอโอด้า (Iota, K) คาร์ราจีแนน อาศัยเพียงการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่

กลไกการเกิดเจลพบว่าจะคล้ายคาร์ราจีแนน เมื่อร้อนโมเลกุลจะอยู่ในรูปขดอย่างไม่เจาะจง และเมื่ออุณหภูมิตกลงอะกาโรส จะเป็นเกลียวชนิดวนซ้าย และมีการรวมตัวสร้างเป็นเกลียวคู่ระหว่างอะกาโรสสองสาย แล้วจึงมีการรวมกลุ่มระหว่างเกลียวคู่หลายๆคู่เป็นขอบเขตรอยต่อต่างๆ จนเกิดเป็นโครงข่ายที่อยู่ตัวมีน้ำแทรกตัวอยู่ภายใน (รูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.14 แบบจำลองแสดงการเกิดโครงข่ายเจลของอะกาโรส [18]

เจลจากอะการ์เป็นชนิดผันกลับได้ด้วยความร้อนจึงสามารถหลอมละลายด้วยความร้อน (85 – 90 °C) และกลับเป็นเจลอีกเมื่ออุณหภูมิลดลง (น้อยกว่า 45 °C)

เจลที่เกิดจากอะการ์มีลักษณะเนื้อแข็ง ใส เปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากการเก็บรักษาจะเกิดการรวมตัวกันของเกลียวคู่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการหดตัวของร่างแหพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลในการลดช่องว่างที่ใช้สำหรับกักเก็บน้ำ การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา อะการ์ที่มีเอสเทอร์ซัลเฟตในโครงสร้างสูงจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำน้อย และเมื่อให้แรงกดดันกับเจลจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำมาก ถ้าความเข้มข้นของอะการ์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เจลที่เกิดการแยกตัวของน้ำน้อยลง การเติมน้ำตาลไรโบส และพอลิออล จะมีผลทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวและการเกิดเจลต่ำลง ในขณะที่น้ำตาลชนิดอื่นจะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวและการเกิดเจลสูงขึ้น เนื่องจากการเกิด Cross-linkage เพิ่มขึ้นโดยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ในน้ำตาลและอะการ์ และการเติมน้ำตาลเดกซ์ตริน หรือผสมกับโกลด์สตีนกัมมีผลทำให้เจลมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดการแยกตัวของน้ำลงได้ แต่ถ้าเติมสตาร์หรือโซเดียมอัลจินตจะเพิ่มความแข็งแรงของเจลลดลง โดยส่วนมากนิยมใช้อะการ์เป็นสารที่ทำให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนม ขนมเยลลี่ ขนมพุดดิ้ง ไส้พาย ขนมหวาน ขนมขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ เป็นต้น และพบว่าอะการ์สามารถช่วยในการปรับปรุงเนื้อสัมผัส และความคงตัวในผลิตภัณฑ์ประเภทชีส และนมหมัก รวมทั้งยังนำไปใช้ในกระบวนการทำให้ใสของไวน์ น้ำผลไม้ และน้ำส้มสายชู

2.8 คาร์ราจีแนน (Carrageenan) [19]

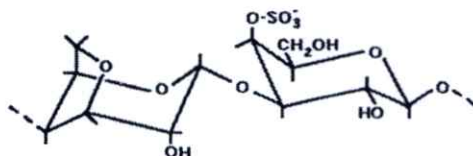
คาร์ราจีแนน เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ซัลเฟตที่สกัดจากสาหร่ายทะเลสีแดง ที่เรียกว่า ไอริช มอส (Irish moses) ตามแถบทะเลทั่วโลก ตั้งแต่ประเทศฟิลิปปินส์ อังกฤษ สกอตแลนด์ ญี่ปุ่น เกาหลี สเปน ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา บราซิล และชิลี โดยคาร์ราจีแนน แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ แคลป์ป้า (Kappa, K) ไอโอด้า (Iota, I) และแลมด้า (Lambda, λ) มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกันไปตั้งแต่ 100,000 ถึง 120,000 ดาลตัน และชนิดที่จำหน่ายในเชิงการค้า มีชนิดแคลป์ป้าร้อยละ 60 และชนิดแลมด้าร้อยละ 40 ส่วนไอโอด้าพบน้อยมาก พอลิเมอร์มีเสถียรภาพที่พีเอชมากกว่า 7 แต่ที่พีเอชต่ำกว่า 5 จะเสื่อมคุณภาพอย่างรวดเร็ว

คาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลกาแลคโตสที่ถูกเอสเตอรีไฟด์ด้วยกรดซัลฟูริกที่ตำแหน่งและระดับแตกต่างกัน ดังนี้

แคลป์ป้า-คาร์ราจีแนน สกัดจาก *Eucheuma cottonii* โครงสร้างประกอบไปด้วย 1,3-linked α -D-galactose-4-sulfate และ 1,4-linked 3,6-anhydro- β -D-galactose (รูปที่ 2.15) ซึ่งในโมเลกุลของ 3,6-anhydro-D-galactose คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 จะถูกเอสเตอรีไฟด์ด้วยหมู่ซัลเฟตประมาณ 20-30% และณ คาร์บอน ตำแหน่งที่ 6 อาจพบในรูปเอสเทอร์ของซัลเฟตเล็กน้อย ซึ่งหากหมู่ของซัลเฟต ณ คาร์บอน ตำแหน่งที่ 6 ดังกล่าวแล้ว ถูกกำจัดโดยความร้อนร่วมกับเบส เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต จนได้โครงสร้างแบบ 3,6-แอนไฮโดร ทำให้สมบัติของเจลที่ได้เหนียวขึ้นอีกมาก แคลป์ป้า-คาร์ราจีแนนมีความไวต่อโปรแตสเซียม แต่จะได้เจลที่แตกง่าย สูญเสียน้ำได้ง่าย แต่ถ้าเติม locust bean gum จะลดความเปราะของเจลได้ แคลป์ป้า-คาร์ราจีแนนสามารถตกตะกอนแยกออกมาจากคาร์ราจีแนนชนิดอื่นได้โดยใช้โปรแตสเซียมคลอไรด์

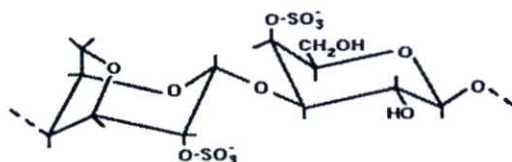
แคลป์ป้า-คาร์ราจีแนน ใช้เป็นสารช่วยเสถียรภาพในนม เนื่องจากแรงระหว่างประจุ ทำให้เคซีนไมเซล (Casein micelle) คงตัวอยู่ได้โดยไม่แยกชั้นออกจากเวย์ (whey) คาร์ราจีแนน ทำให้เจลจะแข็งแรงขึ้น

สามารถละลายได้ดี ในน้ำร้อน นมร้อน และละลายได้ในน้ำเชื่อม หรือน้ำเกลือที่ร้อน (ความเข้มข้น ของน้ำตาลหรือเกลือ ต่ำกว่า 50%) เมื่อเย็นตัวลง จะเกิดเจล (Gel) ประเภท thermoreversible gel ลักษณะใส เนื้อสัมผัส แข็ง แน่น แต่ เปราะ ซึ่งเกิดเจลได้ทั้ง กับ น้ำ น้ำผลไม้ และนม



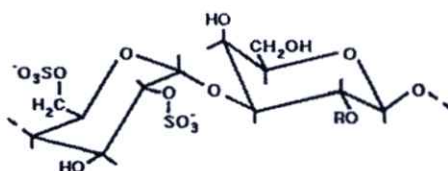
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแคลป์ป้า-คาร์ราจีแนน [19]

ไอโอด้า-คาร์ราจีแนน สกัดจาก *Eucheuma spinosum* โครงสร้างประกอบด้วย 1,3-linked α -D-galactose-4-sulfate และ 1,4-linked 3,6-anhydro- β -D-galactose-2-sulfate (รูปที่ 2.16) ไอโอด้า-คาร์ราจีแนนมีความไวต่อแคลเซียม มีจำนวนกลุ่ม ซัลเฟต มากกว่า kappa ประมาณ 25-50% ทำให้ความไวต่อโปแตสเซียมลดลง มีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่ม และยืดหยุ่น กว่า kappa carrageenan และทนต่อการแช่แข็งและการละลายน้ำแข็งได้ดีกว่า



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของไอโอด้า-คาร์ราจีแนน [19]

แลมด้า-คาร์ราจีแนน ประกอบด้วย 1,3-linked α -D-galactose-2-sulfate และ 1,4-linked β -D-galactose-2,6-disulfate มีกลุ่ม ซัลเฟต ทั้งที่ตำแหน่งที่ 2 และ ที่ตำแหน่งที่ 6 และไม่เกิดการปิดวง ที่คาร์บอนตำแหน่ง 3 และ 6 จึงมีผลทำให้ไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล (Gel) (รูปที่ 2.17) ส่วนแลมด้า-คาร์ราจีแนนเมื่อให้ความร้อนร่วมกับเบสจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตจะไม่พบการเพิ่มขึ้นของความเหนียว



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแลมด้า-คาร์ราจีแนน [19]

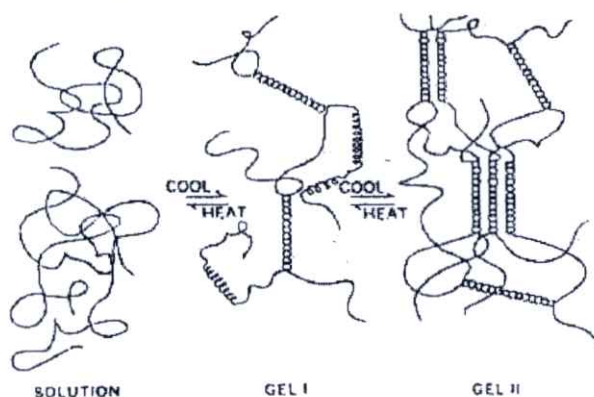
ตารางที่ 2.5 สมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด [19]

สมบัติ	ชนิดของคาร์ราจีแนน		
	แคปปา	แลมบ์ดา	ไอโอดา
ปริมาณซัลเฟต(ร้อยละ)	25	35	32
ปริมาณของหมู่ 3-6-แอนไฮโดร	ร้อยละ 28	0	30
ผลของไอออนของโลหะ	เกิดเจลกับไอออนของโพแทสเซียม	ไม่เกิดเจล	เกิดเจลกับไอออนของแคลเซียม
สมบัติของเจล	เปราะและเกิดซิน-เนอเรซิสง่าย / ใส	-	ยืดหยุ่นและไม่เกิดซินเนอเรซิส / ใส
การละลายน้ำ	ไม่ละลายในน้ำเย็น	ไม่ละลายในน้ำเย็น	ไม่ละลายในน้ำเย็น

	ละลายในน้ำร้อน	ละลายในน้ำร้อน	ละลายในน้ำร้อน
--	----------------	----------------	----------------

การเกิดเจล

สมบัติของคาร์ราจีแนนจะขึ้นอยู่กับประจุลบของหมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลเป็นสำคัญและยังแตกต่างกันในคาร์ราจีแนนแต่ละชนิดอีกด้วย คาร์ราจีแนนละลายได้ดีและมีความคงตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 ความคงตัวจะลดลง คาร์ราจีแนนสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนได้ คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายในน้ำร้อน สำหรับ แคลปป์า และไอโอด้า-คาร์ราจีแนน เมื่ออยู่ในสารละลายขณะร้อน สายโซ่จะอยู่ในรูปเกลียวม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) แต่เมื่อเย็นตัวลงความหนืดจะเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นเจลได้ที่ $40 - 60^{\circ}\text{C}$ เพราะบางช่วงของสายโซ่กาแลกแทน สามารถไถลกันและสร้างเป็นเกลียวคู่ (รูปที่ 2.18) แต่บางช่วงในโครงสร้างสามารถขวางการเป็นเกลียวคู่ เพราะมีกาแลกโทส- 6-ซัลเฟต แทนที่หน่วยน้ำตาล 3,6-แอนไฮโดร เกลียวคู่ที่เกิดขึ้นสามารถรวมกลุ่มสามารถสร้างเป็นเขตรอยต่อ (Junction zones) (เจล 2) ช่วยยึดรวมโครงสร้างไว้ ทำให้เกิดก้อนเจลในที่สุด



รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดเจลของ Carrageenan [19]

เจลที่เตรียมจากคาร์ราจีแนนมีคุณสมบัติเปลี่ยนกลับไปมาได้ด้วยความร้อน (Thermoreversible gel) และสามารถเกิดปฏิกิริยากับโปรตีนได้ โดยแคลปป์า-คาร์ราจีแนนให้เจลที่มีลักษณะเปราะ แดงง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นผลมาจากร่างแหพอลิเมอร์ในโครงสร้าง 3 มิติ ของเจลหดตัวเข้าไถลกันมากขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ในร่างแหถูกบีบออกมาด้านนอกของเจล พบว่าเมื่อผสม โลคัสต์บีนกัมกับ แคลปป์า-คาร์ราจีแนนจะช่วยลดการแยกตัวของน้ำของเจลลงได้ และการใช้บุกร่วมกับแคลปป์า-คาร์ราจีแนนจะช่วยให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้แคลปป์า-คาร์ราจีแนนเพียงอย่างเดียว และไอโอด้า-คาร์ราจีแนนให้เจลที่มีความยืดหยุ่นและไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ สำหรับแลมด้า-คาร์ราจีแนนไม่มีสมบัติในการเกิดเจล

การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น แคปป์-คาร์ราจีแนน เมื่อเติมโปแตสเซียมไอออนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น แต่ถ้าเติมแคลเซียมไอออนจะเกิดเจลที่มีเนื้อแข็งทำให้เกิดรูปทรงได้ง่าย ซึ่งตรงกันข้ามกับไอโอดีน-คาร์ราจีแนน เมื่อเติมแคลเซียมไอออนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น เป็นต้น

การผสมคาร์ราจีแนนชนิดแคปป์และไอโอดีนเข้าด้วยกันทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลดีขึ้น เจลที่ได้จะมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และเกิดการแยกตัวของน้ำน้อยลง ในทางการค้าได้มีการผสมคาร์ราจีแนนทั้งสองชนิดเข้าด้วยกัน ทำให้สมบัติในการทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจลดีขึ้นและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด

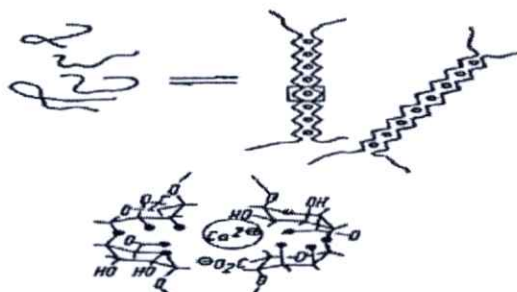
หน้าที่ของคาร์ราจีแนนในอาหาร

- เป็น Thickening agent ทำให้เกิดความหนืด (Viscosity)
- เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ช่วยให้ น้ำมัน และ ไขมันกับน้ำผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี
- ทำให้เกิดเจล (Gelling agent) ทำให้เกิดเจล (Gel) เจลจากคาร์ราจีแนน
- เป็นเจลชนิด Thermoreversible gel คือ เจลที่สามารถเปลี่ยนเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน

ใช้ในผลิตภัณฑ์ของหวาน (Dessert gel) , อาหารสัตว์บรรจุกระป๋อง ผลิตภัณฑ์นม (Dairy product) นมถั่วเหลือง (Soy milk) ผลิตภัณฑ์แฮม ไส้กรอก หมูยอ กุ้ง นกเกด และผลิตภัณฑ์แปรรูปชนิดอื่น ๆ

2.9 อัลจิเนต (Alginate) [20]

อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบโครงสร้างในผนังเซลล์สาหร่ายทะเลขนาดใหญ่สีน้ำตาล (Brownalgaec) เนื่องจากมีปริมาณอัลจิเนตสูงกว่าสาหร่ายสีน้ำตาลทั่วไป โดยอยู่ในรูปสารประกอบเกลือผสมของ แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม ของกรดอัลจินิก (Alginic acid) ซึ่งไม่ละลายน้ำ พบเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1800 ในประเทศสหราชอาณาจักร และเริ่มมีการผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1929 ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนประเทศที่ผลิตอัลจินตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่นการผลิตอัลจินตในเชิงอุตสาหกรรมนั้นมีโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 150,000-200,000 คาลตัน แต่ละลายในสารละลายเบส ทำให้ได้สารเหนียวและตกตะกอนโดยไอออนโลหะที่มีประจุตั้งแต่ 2 ขึ้นไป และได้เป็นเจล ตั้งแต่เจลเหลวถึงเจลแข็ง สมบัติที่ดีของอัลจินต คือ เมื่อมีแคลเซียมไอออนรวมอยู่ด้วยทำให้เกิดเจลในน้ำเย็น หรือในที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดเจลของ Calcium alginate (Egg-box model) [20]

ถ้าไม่มีไอออนของ Ca^{+2} ในสารละลายจะไม่มี การเกิดเจล ตัวอัลจินจะทำหน้าที่เป็นเพียงสารช่วยเพิ่มความหนืดให้สารละลายเท่านั้น ไอออนชนิดประจุบวก (แคตไอออน) ที่มักใช้สำหรับเตรียมเจลจากอัลจินคือ Ca^{+2} วิธีผสม Ca^{+2} ลงไปในสารละลายอัลจิน จะมีผลต่อลักษณะเจลที่ได้ ถ้าผสมเร็วเกินไปเจลที่ได้จะไม่ต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน แต่จะเกิดเจลเป็นจุด (Spot gelation) ขึ้นและเจลที่เกิดจากอัลจินเป็นเจลที่ผันกลับไม่ได้เมื่อให้ความร้อน (Thermoirreversible) นั่นคือทนต่อความร้อน (ไม่ละลาย) อัลจินสามารถใช้ได้ในอาหารหลายชนิดเช่น เจลและไส้พายผลไม้

มีการทดลองใช้ Seaweed rayons ซึ่งเป็นสารละลายของ Alkalisalt ที่มีความหนืดสูงสามารถนำไปปั่นให้เป็นเส้นไหมเทียม ส่วนพวกเส้นด้ายที่ได้ในลำดับหลังสุด ได้มาจาก Sodium alginate ส่วนการสลายเส้นใย สามารถทำได้โดยอาศัยคุณสมบัติของเส้นด้ายที่ละลายในสบู่และโซดา ส่วนการทำให้ด้ายมีลักษณะเป็นขนละเอียดนั้นก็ทำได้โดยการเติม Soluble alginate ที่เส้นด้ายแล้วล้างออกภายหลัง ผลิตภัณฑ์เส้นด้ายมีความคงทนมาก ทำได้โดยการเติม แคลเซียมหรือ โซเดียม กับ โครเมียม หรือ เบลเลียม ลงไป ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงนี้จะเป็นเส้นด้ายที่หิวง่าย

อัลจินจะถูกนำไปใช้ในการผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด โดยเติมลงในอาหารกระป๋องบางชนิด และใช้ประโยชน์ในการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้อิมัลชันคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการเกิดชินเนอเรซิส เช่น โพรพิลีนไกลคอล อัลจินเตใช้ในการทำน้ำสลัด จะทำหน้าที่ช่วยทำให้อิมัลชันคงตัว โซเดียมอัลจินเต ใช้เป็นส่วนผสมในไส้มะนาวที่แช่เย็น เพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่างการละลาย (Freeze - thawing) นอกจากนี้ อัลจินเตยังใช้เคลือบผิวเนื้อปลา ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง เพื่อป้องกันไม่ให้ปลาเกิดการไหม้ (Freezer burn) นอกจากนี้ อัลจินเตยังใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม น้ำสลัด และใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับโฟม เป็นต้น และเติมในส่วนผสมของไส้พาย โดยเฉพาะพวกพายที่มีการแช่แข็ง ในอุตสาหกรรมยา อัลจินเตจะถูกใช้เป็นตัว Pharmaceutical emulsion และใช้ในการเคลือบยาเม็ดเพื่อทำหน้าที่ "Disintegrant" สาร

พวกอัลจินเตนนี้จะขยายตัวเมื่อถูกกับน้ำ ดังนั้นในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางจึงใช้สารตัวนี้ผสมกับครีมเพื่อทำเป็นครีมข้น

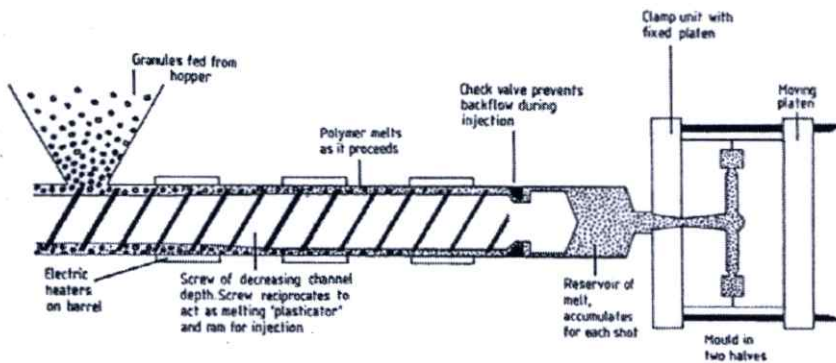
2.10 การขึ้นรูปแบบฉีด (Injection Molding) [21]

เป็นวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยการฉีดพลาสติกที่กำลังหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยความดันสูง เครื่องจักรที่ใช้ในการนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่และเป็นที่ยอมรับหลาย

2.10.1 ส่วนประกอบเครื่อง Injection Molding

โดยทั่วไปแล้วเครื่องฉีดพลาสติก จะมีโครงสร้างส่วนประกอบสำคัญซึ่งสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ส่วน

- ส่วนชุดฉีด (Injection Unit)
- ส่วนชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)
- ส่วนฐานของเครื่องฉีด (Base)



รูปที่ 2.21 เครื่อง Injection Molding [21]

2.10.2 ส่วนชุดฉีด (Injection Unit)

จะทำหน้าที่ดึงพลาสติกเข้าสู่กระบอฉีดหลอมเหลวแล้วส่งพลาสติกเหลวไปที่หัวฉีด และทำหน้าที่ในการฉีด และรักษาความดันย่ำ ซึ่งจะมีส่วนประกอบพื้นฐานดังต่อไปนี้ คือ

- หัวฉีด (Nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอฉีดพลาสติกเข้ากับช่องทางไหลของพลาสติก ในแม่พิมพ์หัวฉีดมีรูขนาดเล็กเพื่อให้พลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

2.10.3 ส่วนชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์ (Clamping Unit)

- ทำหน้าที่ในการยึดแม่พิมพ์ทั้งสองส่วน เคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ให้แรงในการปิดแม่พิมพ์
- หล่อเย็นชิ้นงานฉีดพลาสติก และปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

● ประกอบไปด้วยแผ่นซีดแม่พิมพ์ ซึ่งมีส่วนที่เคลื่อนที่และอยู่กับที่เพลาาเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนปิด-เปิดแม่พิมพ์ และแผ่นซีดระบบขับเคลื่อน

2.10.4 ส่วนฐานของเครื่องฉีด (Base)

- ทำหน้าที่คอยรับน้ำหนักของชุดฉีด และชุดปิด-เปิดแม่พิมพ์
- นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ยึดติดอุปกรณ์ไฮดรอลิกทั้งหมดในเครื่อง และยังทำหน้าที่เป็นถังน้ำมันไฮดรอลิก โดยส่วนใหญ่แล้วตัวฐานเครื่อง จะทำด้วยเหล็กเหนียว ที่เชื่อมประกอบเข้าเป็นฐานเครื่อง เพื่อความแข็งแรง และสามารถรับน้ำหนักมาก ๆ ได้ดี

2.10.5 ขั้นตอนการฉีดพลาสติก

การฉีดพลาสติกแบบ Injection Molding นี้เครื่องฉีดจะประกอบด้วยสกรู และเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานขนาดใหญ่ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานได้หลายลักษณะงาน จึงทำให้มีความนิยมในการฉีดพลาสติกแบบนี้มาก ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนของการฉีดพลาสติกได้ 9 จังหวะ

1. แม่พิมพ์เคลื่อนที่เข้าปิด และล็อกแน่น เพื่อป้องกันการเฉยด้วยแรงดันภายในแม่พิมพ์
2. ชุดฉีดเลื่อนเข้าหาแม่พิมพ์จนกระทั่งชนกับแม่พิมพ์ และค้างไว้ด้วยแรงที่พอเหมาะ เพื่อป้องกันชุดฉีดถอยหลังกลับ ในขณะที่ทำการฉีด
3. ฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยสกรูจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน
4. ย้ำรักษาความดันให้กับพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ชิ้นงานเนื้อแน่น และไม่เกิดรอยยุบตัวที่ผิวของชิ้นงาน
5. หล่อเย็นชิ้นงานฉีดในแม่พิมพ์ โดยที่จังหวะนี้จะมีอิทธิพลมาก ต่อเวลาการทำงานที่แท้จริง
6. การหลอม และป้อนพลาสติกไปหน้าปลายสกรู เมื่อได้ปริมาณพลาสติกเหลวตามที่ต้องการแล้วเกลียวหนอนจะหยุดหมุน
7. ชุดฉีดจะถอยหลังกลับเพื่อป้องกันอุณหภูมิของหัวฉีดลดต่ำลงเกินไป เพราะจะทำให้พลาสติกหนืดเกินไปและไหลไม่ได้
8. แม่พิมพ์จะเปิดออกหลังจากสิ้นสุดเวลาในการหล่อเย็น
9. ทำการปลดชิ้นงาน เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกสุดแล้ว

อุตสาหกรรมการผลิตด้วย Injection molding ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันที่สามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างหลากหลายในหลายๆ อุตสาหกรรมการผลิตเช่น การผลิตรถยนต์

(Automotive), การแพทย์ (Medical), เครื่องบิน (Aerospace), สินค้าอุปโภคบริโภค (Consumer products), ของเล่น (Toys), ประปา (Plumbing), บรรจุภัณฑ์ (Packaging) รวมไปถึงงานด้านโยธา (Construction)

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะ หอมมณี [8] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ นำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene, LDPE) ในอัตราส่วน 50:50 %wt และสารช่วยผสมชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) 5 %wt LDPE ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) ขึ้นรูปได้โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาทีและปรับปรุงสมบัติของ TPS ผสม LDPE โดยการเติม โซเดียมอัลจินเนต (Sodium alginate) และเจลาติน (Gelatin) และเพกติน (Pectin) แล้วนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าการเติมสารก่อเจลลงในพอลิเมอร์ผสมทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และการใช้คาร์ราจีแนนให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด แต่การใช้ TPS และ LDPE ในอัตราส่วน 50:50 ส่งผลให้ชิ้นงานมีการย่อยสลายได้ช้า

เกศณี ตรีภูทิวากร และคณะ [22] เตรียมผลิตภัณฑ์ฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ในการทดลองใช้วัตถุดิบ คือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรอลหรือกลีเซอรอลโมโนสเตียเรต (Glycerol monostearate) ร้อยละ 0.2 5 และ 10 ทำการผลิตวัสดุใช้ทำฟิล์มโดยใช้เครื่องทำแท่งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวหรือเครื่องเอ็กทูดเดอร์แบบสกรูคู่ เครื่องเอ็กทูดเดอร์แบบสกรูคู่สามารถผลิตวัสดุใช้ทำฟิล์มได้ดี ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการละลายน้ำสูง ปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้ผิวแผ่นฟิล์มเรียบขึ้น แต่ทำให้คุณภาพด้านการทนต่อการแตกเมื่อพับดลง การผสมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ไม่ทำให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะดีขึ้น ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรอล คือ ใส ยืดหยุ่นดี ส่วนฟิล์มที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า ผสมกลีเซอรอล มีสีขาวขุ่น ยืดหยุ่นพอใช้ เปรียบบางกว่าฟิล์มที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง

สุทธิ รอดทั้ง [23] ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง/แป้ง/แป้งคัดแปร โดยแป้งคัดแปรสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งและมาลิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและน้ำเป็นตัวทำละลาย โดยการคัดแปรแป้งข้าวเหนียวใช้มาลิกแอนไฮไดรด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นเวลา 30 นาที

ส่วนการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 เปอร์เซ็นต์โดยโมล เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง แป้งไม่ดัดแปร และแป้งดัดแปรมาผสมกันแล้วขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแบบ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแป้งเป็น 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณแป้งดัดแปรเป็น 5 10 15 และ 20 phr จากการทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ซึ่งได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง ด้านแรงคดโค้ง และด้านแรงกระแทก พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมแป้งดัดแปร สามารถดูดซึมความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมโดยไม่เติมแป้งดัดแปร แม้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียว แต่พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวสามารถดูดซึมความชื้นและย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ผลการทดลองทั้งหมดบ่งชี้ว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางกับแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 80:20 และแป้งข้าวเหนียวดัดแปร 5 phr กับที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางกับแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเป็น 90:10 และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร 5 phr มีสมบัติโดยรวมดีกว่าพอลิเมอร์ที่เตรียมจากสูตรอื่น

พัฒนา บัวดี [24] ศึกษาผลของแคลปาคาร์ราจีแนนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ (LDPE/LLDPE/TPS) แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาผลและหาปริมาณแคลปาคาร์ราจีแนนที่เหมาะสมที่ช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่าปริมาณ แคลปาคาร์ราจีแนนเหมาะสมที่ช่วยทำให้การเป่าขึ้นรูปสมบูรณ์ คือ 7 phr โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด เท่ากับ 7.71 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 238 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด สันฐานวิทยาพบว่าแคลปาคาร์ราจีแนนไม่เข้ากันกับ LDPE/LLDPE/TPS แต่สามารถกระจายตัวได้ใน LDPE/LLDPE/TPS ส่วนที่ 2 นำสูตรผสมที่ดีที่สุดจากส่วนที่ 1 มาปรับปรุงให้ส่วนที่เป็น แคลปาคาร์ราจีแนนที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติความเป็นพลาสติกมากขึ้น โดยผสมกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมในแคลปาคาร์ราจีแนนที่ช่วยทำให้พอลิเมอร์ในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่มีความเหนียวมากขึ้นและสามารถตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ อยู่ที่ 30% ของปริมาณแคลปาคาร์ราจีแนน และส่วนที่ 3 นำสูตรผสมที่ดีที่สุดจากส่วนที่ 2 มาปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายตัวด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไลฟ์) โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และฉายแสงยูวี จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติกเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้มากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากสมบัติ

เชิงกลที่ลดลง ปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (ฟิไลท์) ที่เหมาะสม คือ 3 phr ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับดัชนีคาร์บอนิลที่เพิ่มขึ้น

กฤษา ทศวิธ และคณะ [25] ได้ ศึกษาอิทธิพลของ K-คาร์ราจีแนนต่อคุณสมบัติทางเชิงกล และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง โดยใช้ K-คาร์ราจีแนน 4 ความเข้มข้น (0, 1, 2, และ 3% ของปริมาณน้ำกลั่น) ผสมแป้ง (มันสำปะหลัง และข้าวเจ้า) ในอัตราส่วน 1:1 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้น K-คาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดที่เติมคาร์ราจีแนนมีการต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มสูงขึ้น การยึดตัว และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มลดลง โดย K-คาร์ราจีแนนส่งผลต่อฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามากกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง เป็นผลทำให้ค่าการต้านแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้นประมาณ 3.6-7.2 เท่าของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า ส่วนค่าการยึดตัวของฟิล์มแป้งลดลง เมื่อเติมคาร์ราจีแนนความเข้มข้นสูงขึ้น ในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังลดลงจาก 25.20% เป็น 24.77% และในฟิล์มแป้งข้าวเจ้า ลดลงจาก 45.40% เป็น 24.87% ในขณะที่การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดนี้ลดลงเมื่อเติม K-คาร์ราจีแนน โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวเจ้าผสมคาร์ราจีแนนความเข้มข้น 1% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 8.53 และ $8.40 \times 10^{-13} \text{ g.m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}$ ตามลำดับ

D. Phan และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาฟิล์มรับประทานได้จากของผสมระหว่าง Agar (AG), แป้งมันสำปะหลัง (CAS) และ Arabinoxylan (AX) มีกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยการเตรียมฟิล์ม กินได้ด้วยวิธีการเทหล่อ (Casting) สูตรที่ทดลอง ได้แก่ AG-AX, CAS-AX และ AG-CAS แล้วนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปทดสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สมบัติการต้านทานความชื้นและสมบัติเชิงกล ผลการทดลองพบว่าภาพจากทางกายภาพปรากฏเป็นลักษณะเนื้อเดียวกัน แต่การส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ามีลักษณะแยกภูมิภาคกันในฟิล์มผสม AG-CAS และ AG-AX ในขณะที่โครงสร้างของฟิล์ม CAS-AX มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ในกรณีที่มีตรวจวัดที่ความชื้นสูง (84% และ 99% RH) ส่วนการทดสอบการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) พบว่ามีการลดลงเมื่อมีการเติมสาร AX ลงไป และพบว่าการเติมผงวุ้นลงในแป้งมันสำปะหลังสามารถช่วยปรับปรุงการยึดตัวและความแข็งแรงดึงของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังได้

A. Cordoba และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) จากแป้งข้าวโพด (Corn starch) โดยใช้กลีเซอริน (Glycerin) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก และมีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยอัลจินต (Alginate) ที่ 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Brabender) ที่อุณหภูมิ 140°C และความเร็วรอบ 32 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 นาที แล้วทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 10 นาที

เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณของอัลจินตเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้มอดุลัสของยังและความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลดลง แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมอัลจินตทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของอัลจินตเพิ่มขึ้น ส่วนพื้นฐานวิทยาพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรมีความเข้ากันได้มากขึ้น เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อปริมาณของอัลจินตเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัลจินตไปลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง

W. Shujun และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาโร (TPS) จากแป้งข้าวโพด (Corn starch) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่เตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 20 : 80 และ 30 : 70 ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวนอนเดี่ยว และศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetry (TG) พื้นฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM) และสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ซึ่งการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวนอนเดี่ยวเพื่อทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยใช้ความร้อน (Plasticisation) จากงานวิจัยพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ TPS เพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษาพื้นฐานวิทยาพบว่า TPS และ LLDPE มีการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน และงานวิจัยนี้ยังได้ทำการผสมพอลิเมอร์ผสมกับมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MAH) พบว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการที่ไม่เติม ซึ่งสามารถบอกได้โดยใช้เทคนิค TG ที่พบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้นและเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมมาผสมกับ MAH ทำให้ TPS กับ LLDPE ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น เทคนิค FTIR แสดงให้เห็นถึง MAH สามารถต่อกิ่งบนสายโซ่ของ LLDPE ได้โดยใช้กระบวนการเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS และ LLDPE

Y. Wu และคณะ [29] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มเชิงประกอบจากแป้งมันฝรั่ง (Potato starch) และวุ้นที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30% โดยน้ำหนัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใช้เทคนิคการหล่อแบบ (Casting) ในการขึ้นรูป ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุอาหาร โดยศึกษาสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าแป้งและวุ้นเข้ากันได้และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลด้วย ด้านพื้นฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าฟิล์มที่มีวุ้น 15% แป้งและวุ้นมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ด้านสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction : XRD) ซึ่งให้เห็นว่าฟิล์มมีความเป็น ออสถุณที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% การผสมวุ้นลงไปช่วยให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงดีขึ้นจาก 5.33 เป็น 11.76 MPa ที่สภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง (75% RH) การผสมวุ้นลงไปช่วยให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 0.84 เป็น 3.36 MPa และการผสมวุ้นลงไป 5% สามารถทำให้มีค่าการดึงยืดเพิ่มขึ้นจาก 32.5% เป็น 58.33% ส่วนการซึมผ่านไอน้ำนั้นลดลงจาก 6.29 เป็น $4.60 \times 10^{-10} \text{ g Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ จากผลการทดลองทั้งหมดนี้

สรุปได้ว่าการผสมวันลงไปสามารถปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของฟิล์มจากแป้งนี้ ได้ รวมถึงยังช่วยปรับปรุงด้านสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำให้ดีขึ้นอีกด้วย ด้วยเหตุนี้เองจึงสามารถนำฟิล์มที่เตรียมจากแป้งมันฝรั่งนี้ไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุอาหารตามที่คาดไว้ได้เป็นอย่างดี

A.G. Pedroso และคณะ [30] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE ที่รีไซเคิลกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด (TPS) ใช้ปริมาณ TPS 30 40 และ 50% โดย LDPE มี MFI 0.25 g/10 min ทำการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง Co-rotating twin screw extruder ใช้ความเร็วสกรู 200 rpm ขึ้นรูปด้วยเทคนิค Compression molding โดยให้ความร้อน 3 นาที ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ทำการเปรียบเทียบสมบัติสูตร 1. LDPE ที่รีไซเคิล /TPS 2. LDPE บริสุทธิ์ /TPS 3. LDPE บริสุทธิ์ ผลการศึกษาพบว่า LDPE บริสุทธิ์/TPS ให้ค่ามอดูลัสที่สูงกว่าและค่าความแข็งแรงดึง ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร LDPE บริสุทธิ์ และพบว่าการเติมแป้งลงใน LDPE ทำให้ค่า MFI ค่าความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าพอลิเมอร์ผสม ทั้ง 3 สูตร มีการผสมที่ไม่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน

S. Garg และคณะ [31] ศึกษาการเตรียมและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวโพดกับ LDPE โดยแป้งข้าวโพดถูกเชื่อมโยงด้วย Epichlorohydrin และมีสารพลาสติกไซเซอร์คือ กลีเซอรอล แล้วทำการผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder แล้วขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป โดยแป้งข้าวโพดที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวโพดบริสุทธิ์ แป้งข้าวโพดที่ผ่านการเชื่อมโยงด้วย Epichlorohydrin และแป้งตัดแปรด้วยกลีเซอรอล นำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติระหว่างฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมกับฟิล์มจาก LDPE และมีการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมกลีเซอรอลและไม่มีการเติมกลีเซอรอล ผลการศึกษาพบว่าการเติมแป้งข้าวโพดบริสุทธิ์ลงในเมทริกซ์ของ LDPE ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าการดึงยืด และอัตราการไหลมีค่าลดลง ส่วนแป้งข้าวโพดที่ผ่านการเชื่อมโยง พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่าการดึงยืด และอัตราการไหลมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพดบริสุทธิ์ ส่วนผลของการเติมกลีเซอรอลทำให้ค่าการดึงยืด และอัตราการไหลมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมกลีเซอรอล

E.M. Teixeira และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของประเภทและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติในการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด (Thermoplastic corn starch) สำหรับการตรวจสอบนั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้ คือ กลุ่มแรกเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ และกลุ่มที่สองนั้นเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ โดยพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย โมโนไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์ (Monohydroxy alcohol) และไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weight glycol) ที่ปริมาณ 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณและประเภทของพลาสติกไซเซอร์ไม่มีผลต่อความเป็นผลึก

(Crystallinity) ของตัวอย่าง แต่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical property) ของเทอร์โมพลาสติกใน 2 แนวทางที่ต่างกัน คือ มีผลทำให้มันเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซออร์และมีผลทำให้แข็งเมื่อไม่มีการเติมพลาสติกไซเซออร์ สำหรับโพลีเอทิลีนไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์ให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวม และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าโกลดคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่การดูดซึมน้ำมากกว่า

R.C.R. Souza และคณะ [33] ได้ทำการศึกษากระบวนการและสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวโพด (Corn starch ; CS) และโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate ; SA) ซึ่งใช้เป็นสารแขวนลอยที่ 1 ถึง 10% โดยน้ำหนัก ทำการอัดรีด CS แป้งข้าวโพดและโซเดียมอัลจิเนต (CS-SA) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ตามด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) 15% และน้ำที่ปริมาณต่างๆ เป็นพลาสติกไซเซออร์ สำหรับกระบวนการพลาสติกไซเซชันของ CS-SA นั้นจำเป็นต้องทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าการพลาสติกไซเซชัน CS อย่างเดียว ผลจากการทดลองพบว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีความเป็นเนื้อเดียวกัน โปร่งใสและยืดหยุ่นจากการอัดรีดโดยผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ การผสมโซเดียมอัลจิเนตเป็นสาเหตุทำให้เม็ดแป้งข้าวโพดเกิดการเจลาทิไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำลง มีการเกิดอันตรกิริยาบางอย่างระหว่าง CS และ SA ด้านสมบัติเชิงกลพบว่าค่าขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำและ SA มอดูลัสของยังที่มี SA 1% เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ CS ผลจาก Dynamic Mechanical Analysis (DMA) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลง 2 ช่วง ของทั้ง CS และ CS-SA คือช่วง -80 ถึง 150 °C ด้านสัณฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเม็ดแป้งข้าวโพดในฟิล์มตัวอย่างทั้งหมดถูกทำลายภายใต้สภาวะที่ใช้ในกระบวนการ

M. Sabetzadeh และคณะ [34] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวโพด (TPS) โดยใช้ปริมาณ TPS 0 10 20 25 30 และ 40 %wt ใช้ปริมาณกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซออร์ 35 % wt of TPS และใช้สารช่วยผสมชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) 3 %wt of LDPE ทำการผสมแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 8 นาที แล้วนำแป้งที่ผสมกลีเซอรอลแล้วมาผสมกับ LDPE และ MAPE ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูแบบเดี่ยว ที่ความเร็วรอบ 60 rpm และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกล เพื่อศึกษาถึงผลของปริมาณ TPS ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวโพด ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณ TPS ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก ค่าการดึงยืด อัตราการไหลและอัตราเย็นลงลดลง แต่ทำให้ค่ามอดูลัสและการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน

ปริมาณ TPS ที่เหมาะสมที่สุดคือ 25% wt ซึ่งให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด ส่วนผลของการเติม MAPE ช่วยทำให้การยึดติดระหว่าง 2 วัสดุดีขึ้น มีความเข้ากันได้มากขึ้น เมื่อศึกษาจากเทคนิค SEM

M.A. Huneault และคณะ [35] ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งสาลี (TPS) กับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ HDPE PP PS PLA และ PCL ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยการผสมและขึ้นรูปด้วย Co-rotating twin-screw extruder ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในปริมาณแตกต่างกัน คือ 30 33 36% wt ใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ 36 %wt of TPS และใช้สารช่วยผสมชนิดมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) 2 % wt เพื่อศึกษาถึงผลของการเพิ่มปริมาณ TPS และเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าผลของการเติม TPS ในปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าลดลง แต่ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นและพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS/PLA ให้ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS/PCL ให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ

F.J.R. Gonzalez และคณะ [6] ศึกษาถึงการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งสาลี (TPS) ที่มีปริมาณอะไมโลส 25 % และอะไมโลเพกทิน 75 % โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้ปริมาณกลีเซอรอลที่แตกต่างกัน คือ 29 36 40 %โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนของ TPS :LDPE เท่ากับ 45:55 และ 29:71 เตรียมพอลิเมอร์ผสมโดยการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูแบบคู่ โดยใช้ความเร็วสกรู 150 rpm แล้วนำพอลิเมอร์ผสมไปทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่ใช้อัตราส่วนของ TPS :LDPE เท่ากับ 29:71 ให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดและค่ามอดุลัสสูงกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของ TPS :LDPE เท่ากับ 45:55 และปริมาณกลีเซอรอลที่ให้สมบัติโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมที่ดีที่สุด คือ 36 %โดยน้ำหนัก

C.M.O. Müller และคณะ [36] ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) ที่เสริมแรงด้วยโซเดียมอัลจิเนตและศึกษาผลของโซเดียมอัลจิเนตและปริมาณกลีเซอรอลที่ส่งผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ โดยใช้ปริมาณกลีเซอรอลที่ 25 และ 30 % wt และปริมาณโซเดียมอัลจิเนตที่ 5 และ 10 %wt ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูแบบเดี่ยวที่อัตราเร็ว 35 rpm และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที นำ TPCS ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ปริมาณ 5 และ 10 %wt ไม่มีผลแตกต่างในด้านความเป็นผลึก และผลของการเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้ค่าการดึงยืดมีค่าเพิ่มขึ้นและการใช้กลีเซอรอล 30 % wt ให้ค่าการดึงยืดและความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของ TPCS ที่มากกว่าการใช้ที่ปริมาณ 25 % wt สรุปว่า การใช้ปริมาณกลีเซอรอลที่ 30 %wt และโซเดียมอัลจิเนตที่ 10 % wt ให้สมบัติโดยรวมของ TPCS ที่ดีที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แป้งมันสำปะหลังตราดาวแดง จากบริษัท เจ้าพระยาพืชไร่ 2999 (กำแพงเพชร) จำกัด
2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดอาหาร จากบริษัท Lab System
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น

ต่ำแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกรดฉีด (DNDV-0405 R) จากบริษัท ความเคมิกอลจำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้		วิธีการทดสอบ
		ต่ำสุด	สูงสุด	
ความหนาแน่น (Density)	g / cm ³	0.913	0.916	JIS K 7112
อัตราการไหล (Melt mass flow rate)	dg / min	27	37	JIS K 7210

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. ผงวุ้น (Agar) อย่างแข็ง A 2 สี ทรานางเงือก จากห้างหุ้นส่วนจำกัด พัฒนาสินเอ็นเตอร์ไพรส์ องค์ประกอบของผงวุ้น แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงวุ้นทรานางเงือก

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้
Protein (N x 6,25)	%	0.3
Fat (lipids)	%	< 0.1
Raw Fiber	%	0.6
N.N.E.	%	80.4
Dietary Fiber	%	65.5
Sodium	%	< 0.4
Potassium	%	< 0.09
Calcium	%	< 0.4
Gel Strength Water Gel (1.5% Gel 20 °C)	g/cm ²	405
Gel Strength Salt Gel 1.5% Gel in 0.2% KCl 20 °C	g/cm ²	456

N.N.E. Non Nitrogenous Extractive, corresponds to the carbohydrates and others related components.

การวิเคราะห์ตามวิธีอย่างเป็นทางการของการวิเคราะห์ของ Association of Official Analytical Chemist, AOAC, 16a. Edition, 1999 ปรับปรุง : มิถุนายน, 2003

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. แคลป้า-คาร์ราจีแนน (Kappa-Carrageenan) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด สมบัติของคาร์ราจีแนน แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของแคลป้า-คาร์ราจีแนน เกรดอาหาร (Carrageenan KL-805) จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

ข้อมูลผลิตภัณฑ์ทั่วไป	ผลการทดสอบ
Appearance	ผงสีขาว
Gel Strength Water Gel (1.5% Gel 20 °C)	455 g/cm ²
Gel Strength Salt Gel 1.5% Gel in 0.2% KCl 20 °C	496 g/cm ²
pH (1.5% solution at 60°C)	7.5
Moisture Content	12% Max.

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด สมบัติของโซเดียมอัลจิเนต แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของโซเดียมอัลจิเนต เกรดอาหาร (H050912406) จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้
Particle size	-	Granular
Viscosity	cP 1%	500
Loss on drying (105 °C, 4Hours)	%	13.4
pH	-	6.66
Sulphated ash	%	33.72
Insoluble matter in water	%	0.55
Total heavy metal	ppm	<20
Total plate count	CFU/g	<1000
E.Coli	-	Negative
Yeast & Mould	CFU/g	<200
Gel Strength Water Gel (1.5% Gel 20 °C)	g/cm ²	602
Gel Strength Salt Gel 1.5% Gel in 0.2% KCl 20 °C	g/cm ²	647

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

7. มาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟต์-พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟต์-พอลิเอทิลีน แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟต์-พอลิเอทิลีน เกรด การค้า MB 100D จากบริษัท Dupont Packaging & Industrial Polymer จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g / 10 min	2	ASTM D1238 - ISO1133
ความหนาแน่น (Density)	g / cm ³	0.96	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	134	ASTM D3418 - ISO3146

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

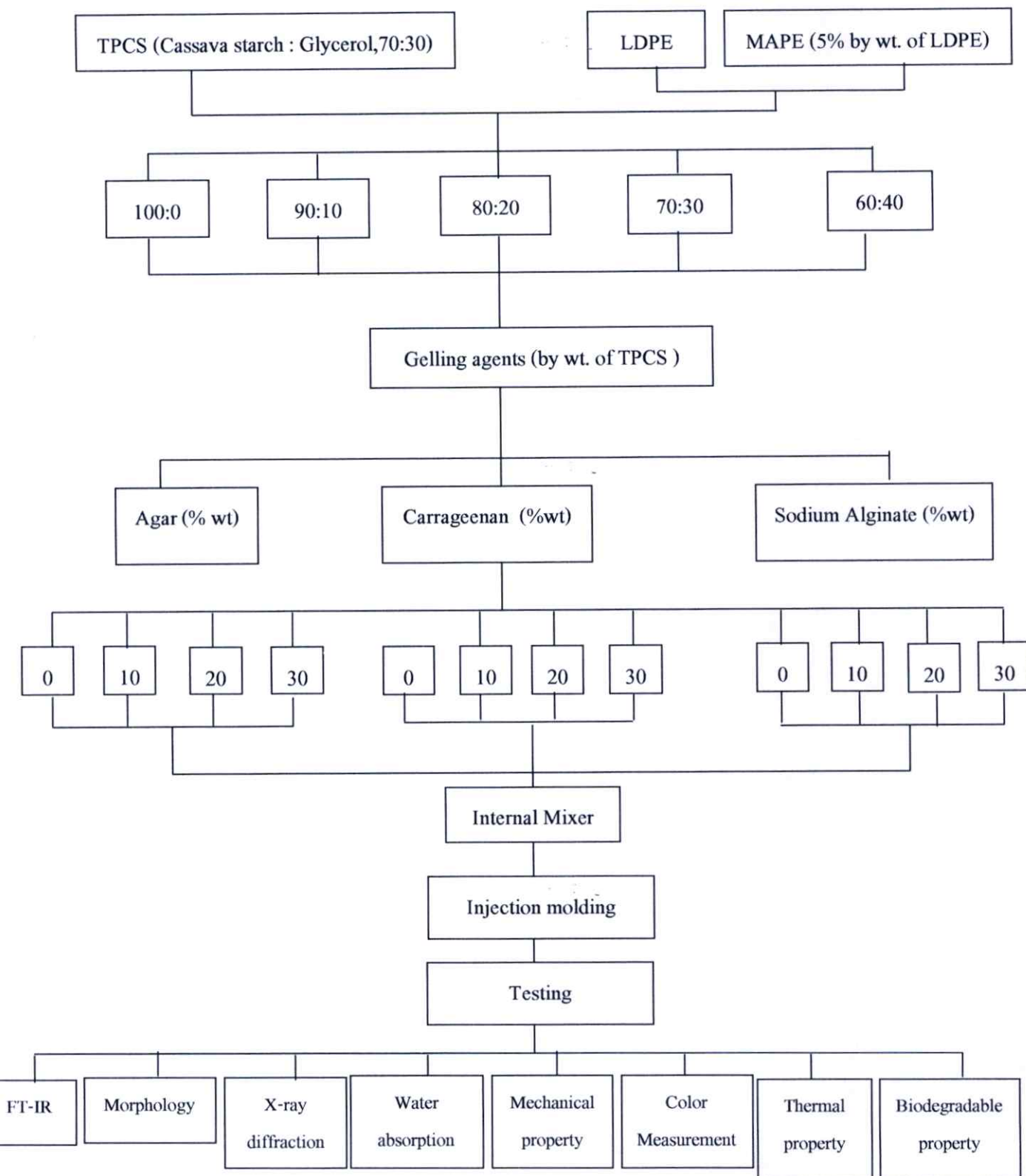
อุปกรณ์

1. ถุงมือกันความร้อน
2. เกรียง
3. เวอร์เนียร์
4. ไมโครมิเตอร์
5. ถาด
6. กรรไกร
7. แผ่นอลูมิเนียม (Aluminium Foil)

เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง) : Precisa Instrument
2. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : Brabender รุ่น PL 2000/PL 2001
3. เครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) : LABTECH ENGINEERING
4. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Plastic Injection moulding machine) : model TTIodel TTI-220/80
HITECH
5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT
LTD. รุ่น LR 5K
6. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer Hardness แบบ Shore A) : Intro enterprise CO., Ltd
7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact tester) : Yazuda 199311
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : รุ่น
JSM-6400
9. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analyzer, TGA) : Perkin Elmer Instrument
Co., Ltd รุ่น Pyris I TGA HT
10. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrophotometer,
FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR Spectrum GX
11. เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) : Hunter lab รุ่น Miniscan XE plus
12. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) : รุ่น D 8 Advance
13. ตู้อบ

แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

- 1) ทำการชั่งน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลใส่ลงภาชนะ ในอัตราส่วน 70:30 ทำการผสมให้เข้ากัน [37]
- 2) เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง
- 3) นำ LDPE มาผสมกับ MAPE 5%wt ของ LDPE ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที
- 4) นำ TPCS ที่เตรียมได้มาผสมกับ LDPE ที่ผสมกับ MAPE ไว้แล้ว ในอัตราส่วน 100:0 90:10 80:20 70:30 และ 60:40 % wt ดังตารางที่ 3.6 มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที
- 5) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากขั้นที่แล้วมาทำการบด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) นำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ตามสภาวะดังตารางที่ 3.7
- 7) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป เพื่อเลือกอัตราส่วนของ TPCS และ LDPE ที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้และสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด

3.3.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ด้วยอะการ

- 1) ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เตรียมได้ในตอนที่ 3.3.1 ที่เลือกไว้แล้ว โดยใช้อะการในปริมาณ 10 20 และ 30 % wt เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ TPCS ดังแสดงในตารางที่ 3.8
- 2) นำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที
- 3) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากขั้นที่แล้วมาทำการบด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) นำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ตามสภาวะดังตารางที่ 3.7

5) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.3.3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ด้วยคาร์ราจีแนน

- 1) ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เตรียมได้ในตอนที่ 3.3.1 ที่เลือกไว้แล้ว โดยใช้คาร์ราจีแนนในปริมาณ 10 20 และ 30 % wt เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ TPCS ดังแสดงในตารางที่ 3.8
- 2) นำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที
- 3) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากขั้นที่นำมาทำการบด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) นำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ตามสภาวะดังตารางที่ 3.7
- 5) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.3.4 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ด้วยโซเดียมอัลจิเนต

- 1) ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เตรียมได้ในตอนที่ 3.3.1 โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตในปริมาณ 10 20 และ 30 % wt เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ TPCS ดังแสดงในตารางที่ 3.8
- 2) นำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 นาที
- 3) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากขั้นที่แล้วมาทำการบด จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 4) นำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ตามสภาวะดังตารางที่ 3.7
- 5) นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม

TPCS (g)	LDPE (g)	MAPE (5%wt LDPE) (g)
100	0	0
90	10	0.5
80	20	1.0
70	30	1.5
60	40	2.0

ตารางที่ 3.7 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

Description	Unit	Value
PRESSURE		
1 st stage pressure	Bar.	30
2 nd stage pressure	Bar.	30
3 rd stage pressure	Bar.	30
FLOW SPEED		
1 st stage injection speed	Rpm	50
2 nd stage injection speed	Rpm	50
3 rd stage injection speed	Rpm	50
TIME		
1 st stage injection time	Sec.	30
2 nd stage injection time	Sec.	30
3 rd stage injection time	Sec.	30
Melting time	Sec.	500
Cooling time	Sec.	100
TEMPERATURE		
Zone 1	°C	150
Zone 2	°C	160
Zone 3	°C	170

ตารางที่ 3.8 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจินเนต โดยมีมาลิกแอนไฮไดรเรต กราฟต์พอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม

TPCS (g)	LDPE (g)	MAPE (5%wt LDPE) (g)	Agar (g)	Carrageenan (g)	Sodium alginate (g)
*	*	*	-	-	-
**	*	*	***	-	-
**	*	*	***	-	-
**	*	*	***	-	-
**	*	*	-	***	-
**	*	*	-	***	-
**	*	*	-	***	-
**	*	*	-	-	***
**	*	*	-	-	***
**	*	*	-	-	***

หมายเหตุ * เลือกจากข้อที่ 3.3.1

** ลดปริมาณ TPCS

*** เพิ่มปริมาณ Gelling agent

} เพื่อให้น้ำหนักรวมของ TPCS (**) และ Gelling agent (***)
มีค่าเท่ากับ TPCS
โดยใช้ Gelling agent ในปริมาณ 10 % 20% และ 30 %
เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ TPCS

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Infrared spectroscopy)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำพอลิเมอร์ผสมไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ไล่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^{-4} kg/cm² นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม

3.4.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่ความหนา 200 μm และขนาดของมุม ตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง $3-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว $1^\circ/\text{นาที}$ แล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าชิ้นตัวอย่าง โดยใช้ Step time 5 นาที

3.4.3 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

3.4.3.1 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี

ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์รุ่น Miniscan XE Plus โดยใช้ระบบของ CLE L*a*b* ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D 65/10° เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงาน

โดย	L*	:	ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)
			L = 0 perfect black sample
			L = 100 perfect white sample
	a*	:	ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว (red – green)
			a เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีแดง
			a เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางของสีเขียว
	b*	:	ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (yellow – blue)
			b เป็น + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง
			b เป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน
	c* (Chroma)	:	ความสดใสของสี
	จากสูตร		$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$
	h° (Hue angle)	:	เป็นตัวเลขที่ระบุว่าสีนั้นมีตำแหน่งอยู่ที่ใดมีหน่วยเป็นองศา

จากสูตร $h^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$

3.4.3.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption) [37]

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 นำพอลิเมอร์ผสมตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกวัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำ

W_c คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมหลังการดูดซับน้ำ

W_0 คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมก่อนการดูดซับน้ำ

3.4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป

3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ [44-46]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความเค้นที่จุดแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Elongation at maximum load)	ASTM D 638	mm
ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 2240	Shore D

3.4.5.1 แรงดึง ความเค้นที่จุดแรงดึงสูงสุด มอดุลัส การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุดและความเครียดที่จุดแรงดึงสูงสุด [38]

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซินงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปคัมเบลล์ จำนวน 10 ซินงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสถานะของซินงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed	:	100 mm/min
Gauge length	:	50 mm
Load cell	:	5 kN



รูปที่ 3.2 ลักษณะซินงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [38]

ค่าความเค้น มอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความเค้น (Stress)} = F/A$$

$$\text{มอดุลัส (Young's modulus, E)} = (F/A) / [(L-L_0)/L_0]$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความเครียด (% Strain)} = [(L-L_0)/L_0] * 100$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดซินงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของซินงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดซินงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ซินงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.4.5.2 ความแข็งกด (Hardness) [39]

วัดความแข็งของพอลิเมอร์ผสม ตามมาตรฐาน ASTM D 2440 ด้วย Durometer Hardness ชนิด Shore D โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาอย่างน้อย $\frac{1}{4}$ นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกด อยู่ในช่วง 0-100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งกดของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือ ความแข็งของวัสดุที่แข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก

3.4.5.3 สมบัติความแข็งแรงกระแทก [40]

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปที่เตรียมเป็นแท่งที่มีรอยบากอยู่ตรงกลางชิ้นงานมาทดสอบความแข็งแรงกระแทกด้วยเครื่องวัดแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) ที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งค่าความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอดที่ได้มีหน่วยเป็น kJ/m^2

3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal property)

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (Maximum degradation temperature) ของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่ภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้วจึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Soil burial test) [41]

นำชิ้นงานรูปคัมเบลล์มาฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 30-40% ทำการฝังดินทั้งสิ้นเป็นระยะเวลา 90 วัน จากนั้นนำชิ้นงานที่ฝังดินไปทดสอบสมบัติเชิงกล โดยแบ่งชิ้นงานที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 30 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการย่อยสลายของชิ้นงาน

3.4.8 การหาค่าความหนืด (Viscosity) [42]

การหาค่าความหนืดเป็นสมบัติหนึ่งของของไหล เกิดเมื่อโมเลกุลของของไหลเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกัน จะมีแรงต้านทานต่อการไหลระหว่างชั้น (layer) ภายในของเหลวเกิดขึ้น ความหนืดจึงเป็นค่าที่ได้จากการวัดแรงเสียดทานภายในของเหลวนั้น ค่าความต้านทานต่อการไหลของชั้นหนึ่งของของไหลบนอีกชั้นหนึ่ง อุปกรณ์ที่ใช้วัดความหนืดของของไหลเรียกว่า มาตรฐานความหนืด (viscometer) ใช้มาตรฐานแบบออสท์วาลด์ (Oswald viscometer) ซึ่งเป็นมาตรฐานแบบหลอดแก้วรูปตัวยู ในการวัดความหนืดของเหลวที่มีปริมาตรที่แน่นอนและคงที่จะถูกใส่ลงในหลอด ของเหลวจะถูกดันขึ้นไปในหลอดจนเหนือขีดที่ใช้วัดตรงข้อของกระเปาะดังแสดงไว้ในรูป เมื่อปล่อยให้ของเหลวไหลลง จะวัดเวลาการไหล (flow time) ของของเหลว โดยจับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านขีดวัดด้านบนจนถึงขีดวัดด้านล่าง นำเวลาการไหลที่ได้ไปคำนวณหาความหนืดต่อไป ดังนั้นโดยทั่วไปในทางปฏิบัติแล้ว จะนิยมใช้ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity, η_r) ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกับความหนืดของของเหลวมาตรฐาน เช่น น้ำ หรือตัวทำละลายบริสุทธิ์)

จากค่าความหนืดสัมพัทธ์ เราสามารถหาน้ำหนักโมเลกุลของสารละลายพอลิเมอร์ได้ดังนี้
 ในสารละลาย เจือจางมาก (ความเข้มข้นสูงสุดไม่เกิน 1% w/v) ความหนาแน่นของสารละลาย
 พอลิเมอร์ จะมีค่าประมาณเท่ากับ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย นั่นคือจะได้ว่า

$$\eta_r = \eta_1 / \eta_0 = (t)_1 / (t)_0$$

เมื่อ ตัวเลข 1 และ 0 หมายถึง สารละลายแต่ละชนิด เมื่อ t_1 และ t_0 เป็นเวลาของการไหลของ
 สารละลายและตัวทำละลายบริสุทธิ์ (น้ำกลั่น) มีหน่วยเป็นวินาที (s) ตามลำดับ และ
 η_r คือ ความหนืดสัมพัทธ์ มีหน่วยเป็น centipoises โดยกำหนดให้ $1P = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} =$
 $0.1 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและศึกษาการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ที่เตรียมได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และมาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม ซึ่งจะทำการศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง TPCS และ LDPE พอลิเมอร์ผสมเตรียมได้ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยการใช้สารก่อเจล ได้แก่ อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินต แล้วนำพอลิเมอร์ผสมมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัมฐานวิทยาศาสตร์ทางความร้อน การดูดซับน้ำ และการย่อยสลาย โดยอักษรย่อของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ลำดับ	อักษรย่อที่ใช้	ความหมาย
1	TPCS*/LDPE**	เทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง * % โดยน้ำหนัก / พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ** % โดยน้ำหนัก
2	TPCS*/LDPE**/A***	เทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง *% โดยน้ำหนัก / พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ** % โดยน้ำหนัก / อะการ์ *** % โดยน้ำหนัก
3	TPCS*/LDPE**/C***	เทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง *% โดยน้ำหนัก / พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ** % โดยน้ำหนัก / คาร์ราจีแนน *** % โดยน้ำหนัก
4	TPCS*/LDPE**/SA***	เทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลัง * % โดยน้ำหนัก / พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ** % โดยน้ำหนัก / โซเดียมอัลจินต *** % โดยน้ำหนัก

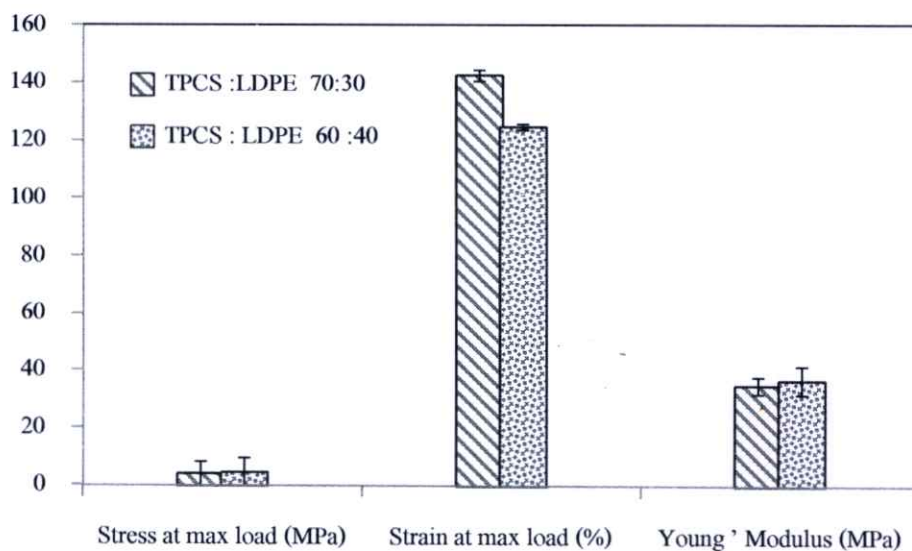
จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เตรียมได้ ให้ผลการทดลองดังนี้

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง TPCS/ LDPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

ศึกษาสมบัติทางกายภาพหลังการฉีดของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนของ TPCS : LDPE ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพหลังการฉีด

อัตราส่วน TPCS : LDPE (โดยน้ำหนัก)	ลักษณะทางกายภาพ
100:0	ไม่สามารถฉีดออกได้ ชิ้นงานติดอยู่ที่ทาง Runner ไม่สามารถแกะชิ้นงานได้
90:10	ฉีดออกได้ค่อนข้างยาก มีชิ้นงานบางส่วนสมบูรณ์ตามแม่พิมพ์
80:20	ฉีดออกได้ค่อนข้างยากเล็กน้อย ชิ้นงานสมบูรณ์ตามแม่พิมพ์ ไม่ติดแม่พิมพ์
70:30	ฉีดออกได้ง่าย ชิ้นงานสมบูรณ์ตามแม่พิมพ์ ไม่ติดแม่พิมพ์
60:40	ฉีดออกได้ง่าย ชิ้นงานสมบูรณ์ตามแม่พิมพ์ ไม่ติดแม่พิมพ์



รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS/LDPE ในอัตราส่วน 70:30 และ 60:40

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนของ TPCS: LDPE เท่ากับ 70:30 และ 60:40 สามารถฉีดขึ้นงานออกมาจากเครื่องฉีดขึ้นรูปได้ง่าย ได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ตามแม่พิมพ์ ไม่ติดแม่พิมพ์

จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนของ TPCS: LDPE เท่ากับ 60:40 ให้ค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมากกว่าอัตราส่วน 70:30 เล็กน้อย แต่เนื่องจากมีปริมาณของ TPCS น้อยกว่า ทำให้มีการย่อยสลายได้ช้าลง และที่อัตราส่วนของ TPCS: LDPE เท่ากับ 70:30 ให้ค่าความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุดมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีส่วนของแป้งมันสำปะหลังมากกว่า จากปริมาณแป้งที่มากกว่าทำให้ชิ้นงานมีการย่อยสลายได้เร็วกว่า ซึ่งเป็นการลดการใช้พลาสติกพอลิเอทิลีนลง ดังนั้นเมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.1 จึงเลือกอัตราส่วนของ TPCS: LDPE เท่ากับ 70:30 เพื่อทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ต่อไป

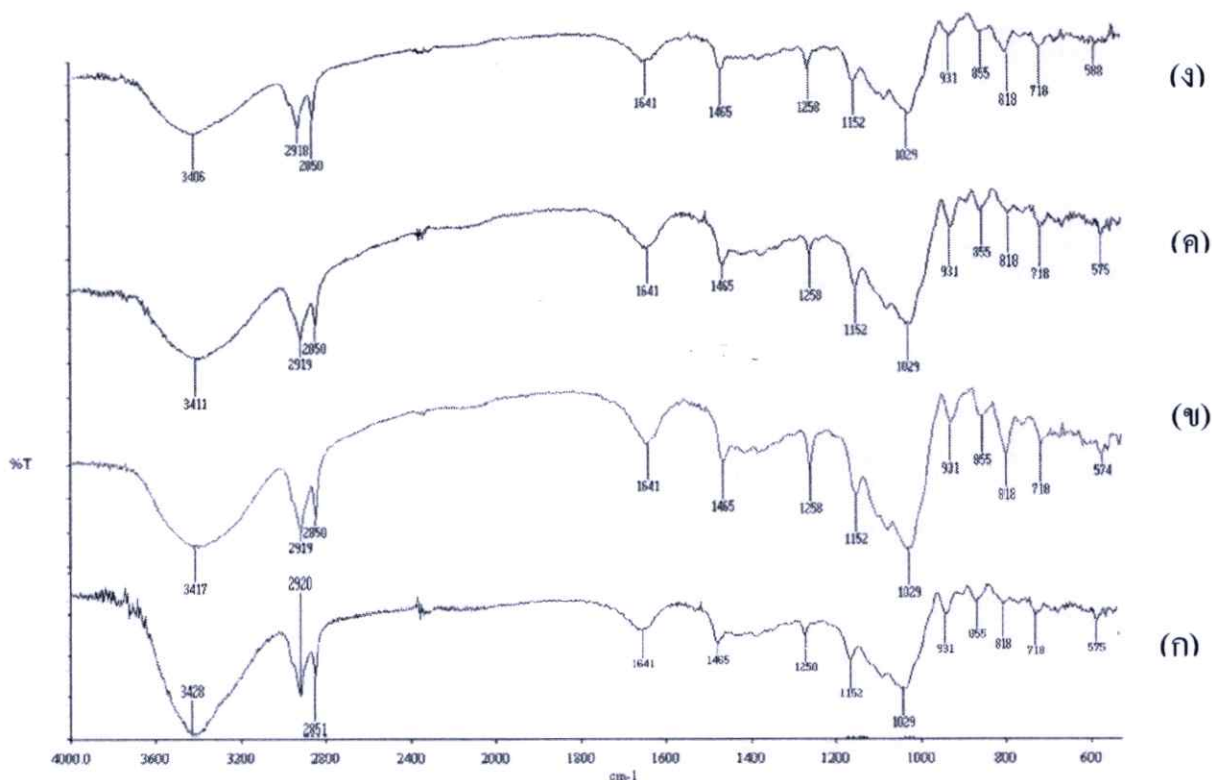
4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ในอัตราส่วน 70:30 โดยศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนตในอัตราส่วน 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

4.2.1 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ด้วยอะคาร์ คาร์ราจี 4.3 หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏเหมือนกันของพอลิเมอร์ผสม [43]

เลขคลื่น (cm^{-1})	ลักษณะการสั่น
3200-3600 (v)	O-H stretching
2800-3000 (m→ s)	Alkanes C-H stretching
1640	Bounded water
1445-1485 (m)	OH-bending
1410 (s)	CH wagging (in-plane bending)
1300-1000 (s)	C-O-C stretching
1200-1000 (s)	C-O-H bending
900-940 (s)	C-H out-of-plane bending
800-860 (s)	C-H out-of-plane bending
735-770 (s)	C-H out-of-plane bending
723 (s)	CH_2 - rocking

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย อะคาร์ในปริมาณต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.2

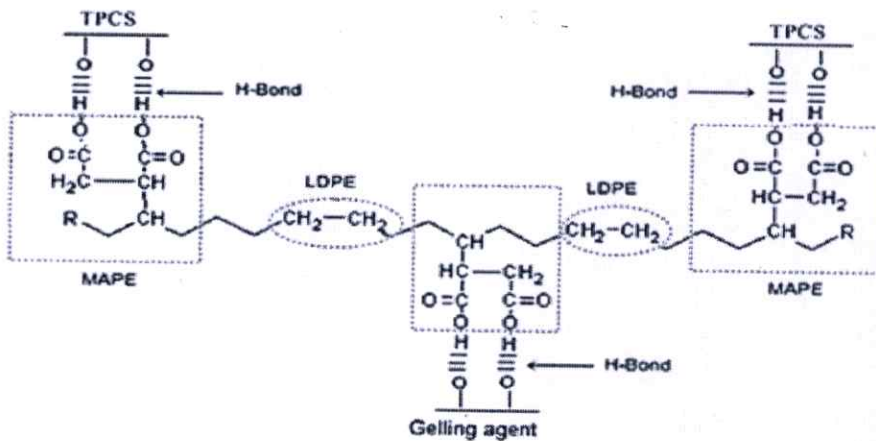


รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย อะคาร์ที่ปริมาณต่างๆ (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/A10 (ค) TPCS70/LDPE30/A20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/A30

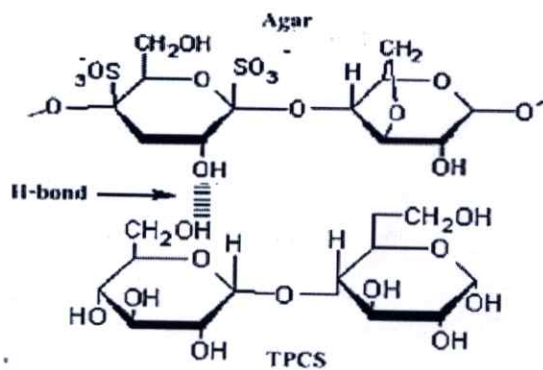
จากรูปที่ 4.2 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากทุกสูตรมีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสตามลักษณะดังนี้ สเปกตรัมในช่วง $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้งและกลีเซอรอล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ TPCS พีกในช่วง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของ TPCS, LDPE และ MAPE สำหรับพีกที่ 1641 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ แบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแป้ง พีกที่ 1465 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ แบบ C-H bending ของ CH_2 ของ LDPE และ MAPE แถบพีกช่วง $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง และพีกในช่วง $1200-1000\text{ cm}^{-1}$ แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง และพีกช่วง $931-800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H bending และพีกช่วง 718 เป็นลักษณะการสั่นแบบ CH_2 -rocking [44-45]

สำหรับการเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยอะคาร์ รูปที่ 4.2 (ก) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงด้วยอะคาร์ รูปที่ 4.2 (ข)-(ง) นั้น พบว่าพีกอินฟราเรดสเปกตรัมของทั้งสองสเปกตรัมมีลักษณะที่คล้ายกันเนื่องจากพีกที่มีลักษณะเด่นที่พบในอะคาร์ คือ พีกที่ 855 และ 931 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ 3,6-anhydro- β -galactose ของอะคาร์ [29] เป็นตำแหน่งเดียวกับการสั่นแบบ C-H bending ของ TPCS

โครงสร้างโมเลกุลของแป้งนั้นประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ $-CH_2$ $C-OH$ และ $C-O-C$ เป็นหลัก ซึ่งอะการ์นั้นมีหมู่ฟังก์ชัน $-OH$ $-CH_2$ $C-OH$ และ $C-O-C$ เป็นโครงสร้างหลักของโมเลกุลเช่นเดียวกัน ทำให้สเปกตรัมที่แสดงว่ามีส่วนของอะการ์ในพอลิเมอร์ผสมถูกซ้อนทับด้วยสเปกตรัมที่แสดงว่าเป็นส่วนของ TPCS นอกจากนี้การเติมอะการ์ลงไปในพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 (รูปที่ 4.2 (ข) – (ง)) ทำให้พีคที่ตำแหน่ง $3500-3300\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ TPCS และหมู่ไฮดรอกซิลของอะการ์เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Pawlak และคณะ [46] โดยรายงานวิจัยทั้งสองได้กล่าวว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกันสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FTIR โดยที่เมื่อสององค์ประกอบมีความเข้ากันได้จะทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น (พันธะไฮโดรเจน) ระหว่างองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 ได้ โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยว ๆ ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

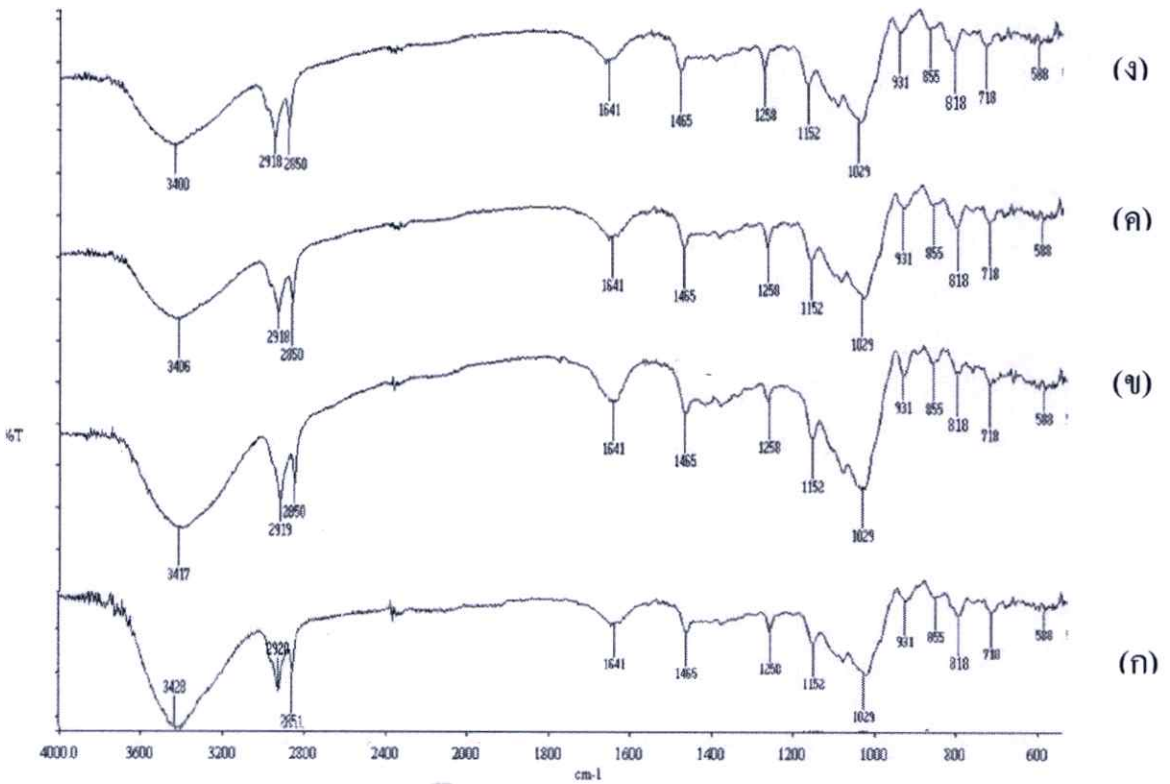


รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS, LDPE, สารก่อเจล และ MAPE [47]



รูปที่ 4.4 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และอะการ์ [47]

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย คาร์ราจีแนนในปริมาณต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.5



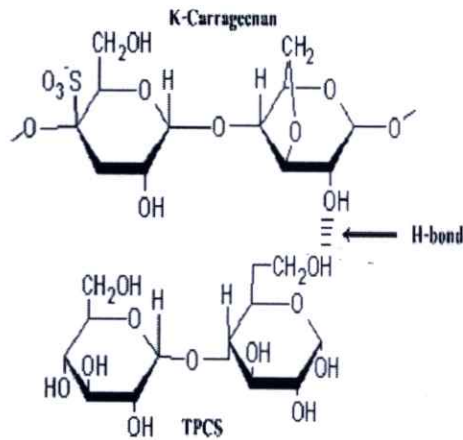
รูปที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย คาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่างๆ (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/C10 (ค) TPCS70/LDPE30/C20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/C30

จากรูปที่ 4.5 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากทุกสูตรมีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส

สำหรับการเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยคาร์ราจีแนน รูปที่ 4.5 (ก) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงด้วยคาร์ราจีแนน รูปที่ 4.5 (ข)-(ง) นั้น พบว่า พีคอินฟราเรดสเปกตรัมของทั้งสองสเปกตรัมมีลักษณะที่คล้ายกัน เนื่องจากพีคที่มีลักษณะเด่นที่พบในคาร์ราจีแนน คือ พีคที่ 1258 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-S=O stretching ของหมู่ $-\text{OSO}_3^-$ ของคาร์ราจีแนน เป็นตำแหน่งเดียวกับการสั่นแบบ C-O-C stretching ของ TPCS พีคที่ 931 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ 3,6-anhydro-galactose (Anhydro-galactose-C-O) พีคที่ 855 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ Galactose 4-sulfate ของหมู่ $-\text{OSO}_3^-$ ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกาแลกโทสของคาร์ราจีแนน และพีคที่ 855 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ 3,6-anhydro-galactose 2-sulfate ของหมู่ $-\text{OSO}_3^-$ ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของวง 3,6-anhydro-galactose

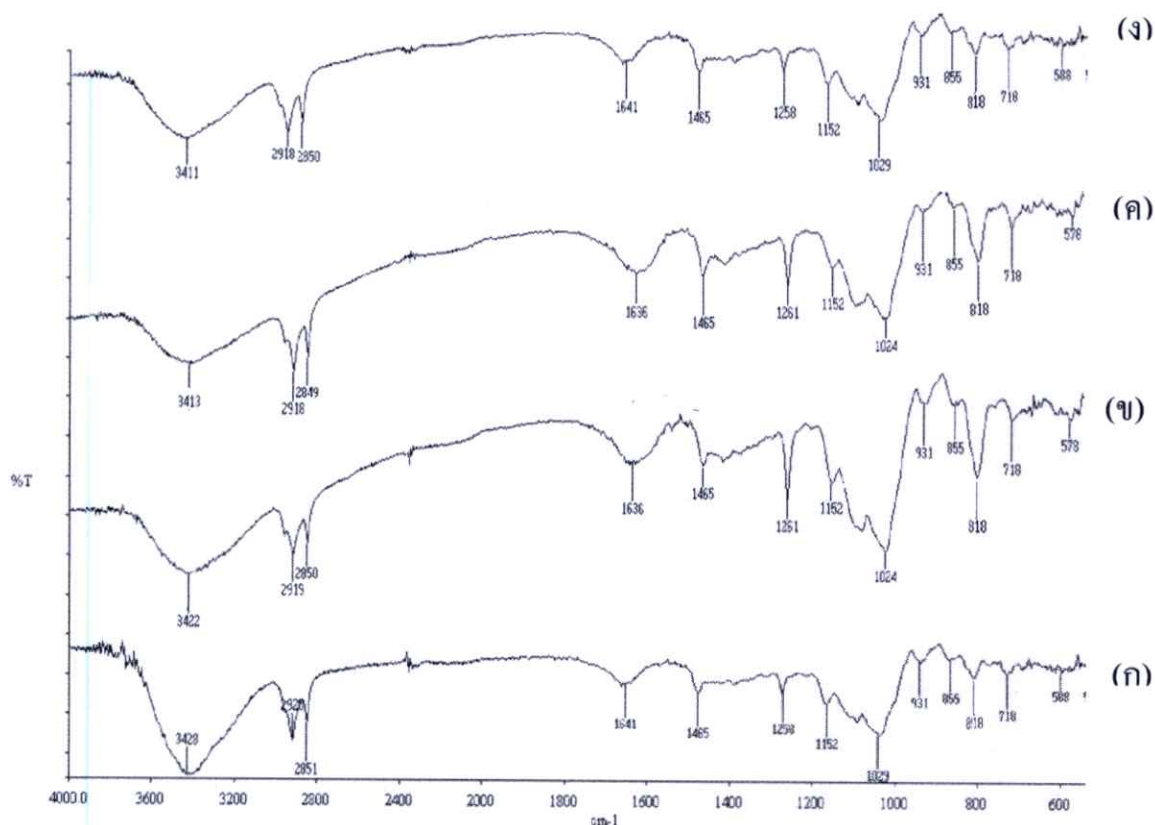
anhydro-galactose 2-sulfate ของหมู่ $-\text{OSO}_3^-$ ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของวง 3,6-anhydro-galactose ของคาร์ราจีแนน ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับการสั่นแบบ C-H bending ของ TPCS [47=8] เนื่องจาก TPCS และคาร์ราจีแนนมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน ทำให้พบหมู่ฟังก์ชัน $-\text{OH}$ $-\text{CH}_2$ C-OH และ C-O-C เป็นโครงสร้างหลักของโมเลกุลเช่นเดียวกัน ทำให้สเปกตรัมที่แสดงว่ามีส่วนของคาร์ราจีแนนในพอลิเมอร์ผสมถูกซ่อนทับด้วย สเปกตรัมที่แสดงว่าเป็น TPCS ทั้งหมด

นอกจากนี้ผลของการเติมคาร์ราจีแนนลงไปในพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 (รูปที่ 4.5 (ข) – (ง)) ทำให้พีกที่ตำแหน่ง $3500\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลงเช่นเดียวกับการเติมอะการ์ ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และคาร์ราจีแนน แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และคาร์ราจีแนน[47]

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย
โซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.7



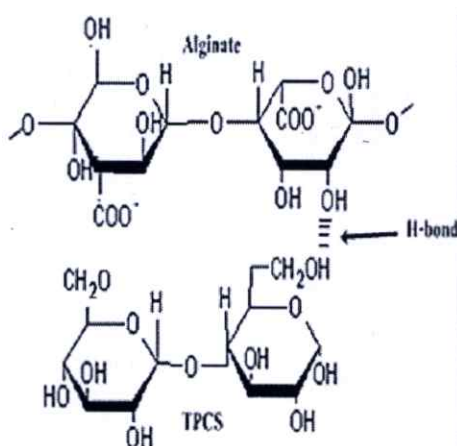
รูปที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย
โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณต่าง ๆ (ก) TPCS70/ LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30 /SA10
(ค) TPCS70/LDPE30/SA20 และ (ง) TPCS70/ LDPE30 /SA30

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมมีความคล้ายคลึงกัน เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมในทุก
สูตรมีโครงสร้างหลักเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสเช่นเดียวกัน

สำหรับการเปรียบเทียบสเปกตรัมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ไม่ได้
ปรับปรุงด้วยโซเดียมอัลจิเนต รูปที่ 4.7 (ก) กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุง
ด้วยโซเดียมอัลจิเนต รูปที่ 4.7 (ข)-(ง) นั้น พบว่าพีคอินฟราเรดสเปกตรัมของทั้งสองสเปกตรัมมี
ลักษณะที่คล้ายกัน เนื่องจากพีคที่มีลักษณะเด่นที่พบในโซเดียมอัลจิเนต คือ พีคที่ $1636-1641\text{ cm}^{-1}$
เป็นการสั่นแบบ Asymmetric stretching ของ COO^- ของโซเดียมอัลจิเนต [49] ซึ่งเป็นตำแหน่ง
เดียวกับการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ใน TPCS ส่วนพีคที่ 1465 cm^{-1} เป็นการ
สั่นแบบ Symmetric stretching ของ COO^- ของโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับการสั่นแบบ
C-H bending ของ CH_2 ของ LDPE และ MAPE พีคที่ 1152 cm^{-1} เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C

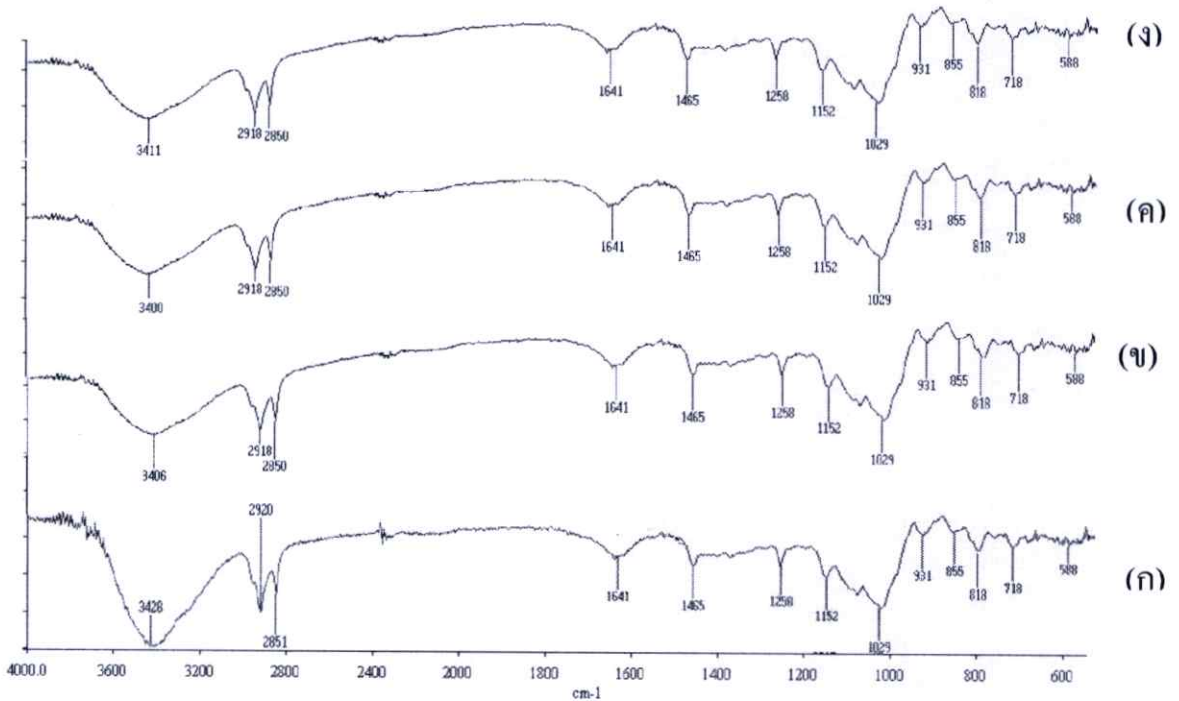
stretching ของโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับแบบ C-O-C stretching ของ TPCS เนื่องจาก TPCS และโซเดียมอัลจิเนตมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน ทำให้พบหมู่ฟังก์ชัน -OH -CH₂ C-OH และ C-O-C เป็นโครงสร้างหลักของโมเลกุลเช่นเดียวกัน ทำให้สเปกตรัมที่แสดงว่ามีส่วนของโซเดียมอัลจิเนตในพอลิเมอร์ผสมถูกซ้อนทับด้วยสเปกตรัมส่วนของ TPCS

สำหรับผลของการเติมโซเดียมอัลจิเนตลงไปในพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 (รูปที่ 4.9 (ข) - (ง)) ทำให้พีคที่ตำแหน่ง 3500-3300 cm⁻¹ ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลงเช่นเดียวกับอะคาร์และคาร์ราจีแนน ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และโซเดียมอัลจิเนต แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง TPCS และโซเดียมอัลจิเนต [47]

เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนตในปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.9



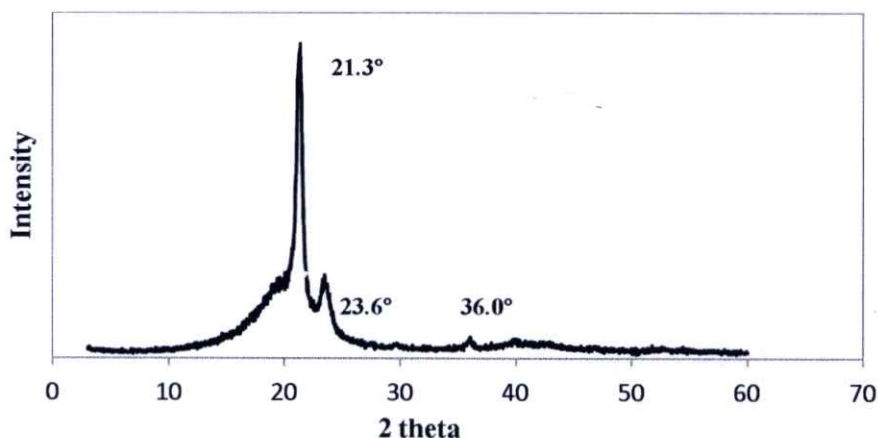
รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (ก) TPCS70/LDPE30 (ข)TPCS70/LDPE30/A30 (ค) TPCS70/LDPE30/C30 และ (ง) TPCS70/LDPE30/SA30

จากรูปที่ 4.9 พบว่าพีคอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยของอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต เนื่องจาก TPCS มีแป้งและกลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลัก โดยแป้ง อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกัน เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน -OH -CH₂ และ C-OH เป็นหลัก ทำให้สเปกตรัมที่แสดงว่ามีส่วนของอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตในพอลิเมอร์ผสมถูกซ้อนทับด้วยสเปกตรัมที่แสดงว่าเป็น TPCS ทั้งหมด

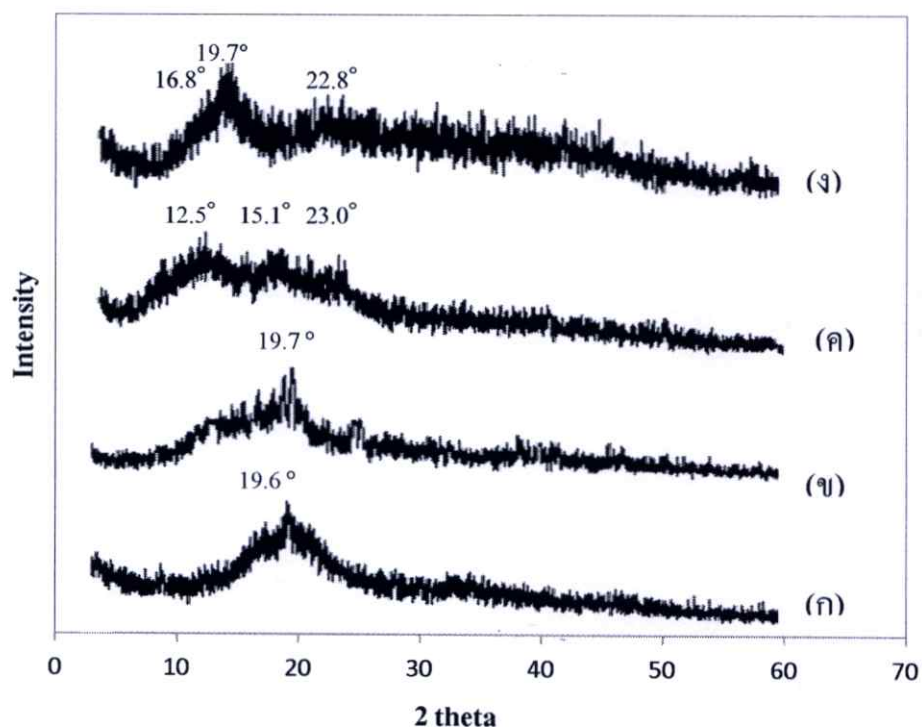
สำหรับความแตกต่างระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต พบว่าพีคที่ตำแหน่ง 3500-3300 cm⁻¹ ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม TPCS และ LDPE ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ ซึ่งแสดงถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของ TPCS กับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต

4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกและปริมาณความเป็นผลึกของ LDPE TPCS อะการ์ คาร์ราจีแนน โซเดียมอัลจิเนต และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต โดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง $3-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว 1° / นาที



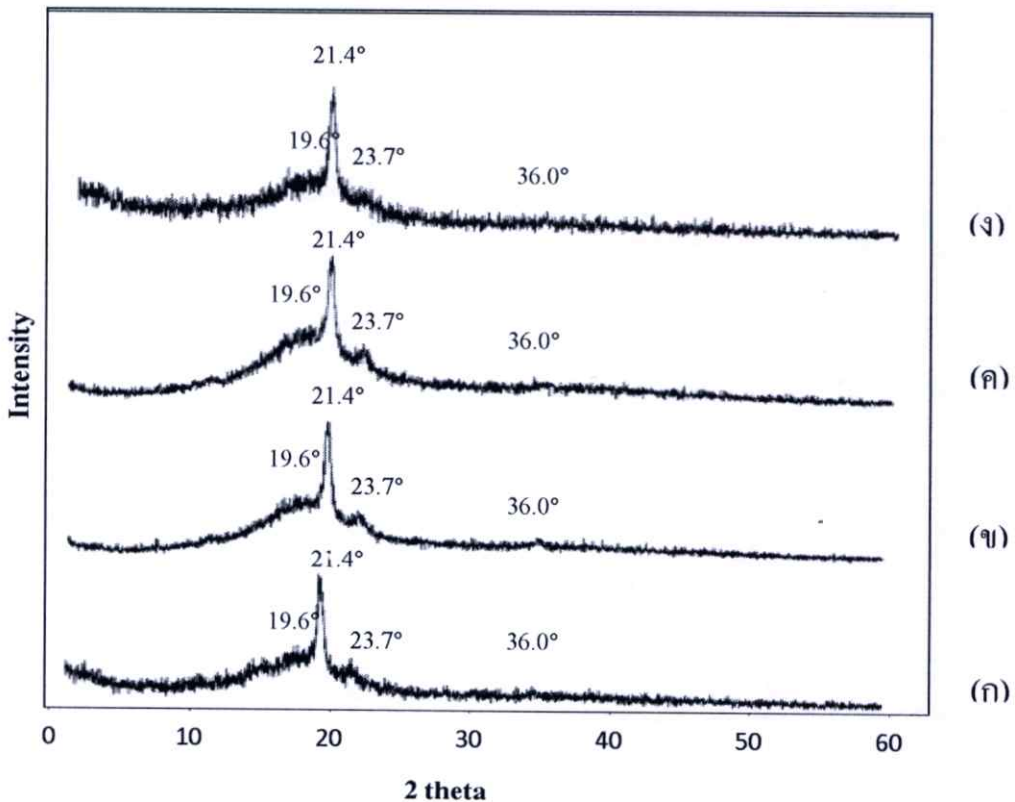
รูปที่ 4.10 ดิฟแฟรกโตแกรมของ LDPE



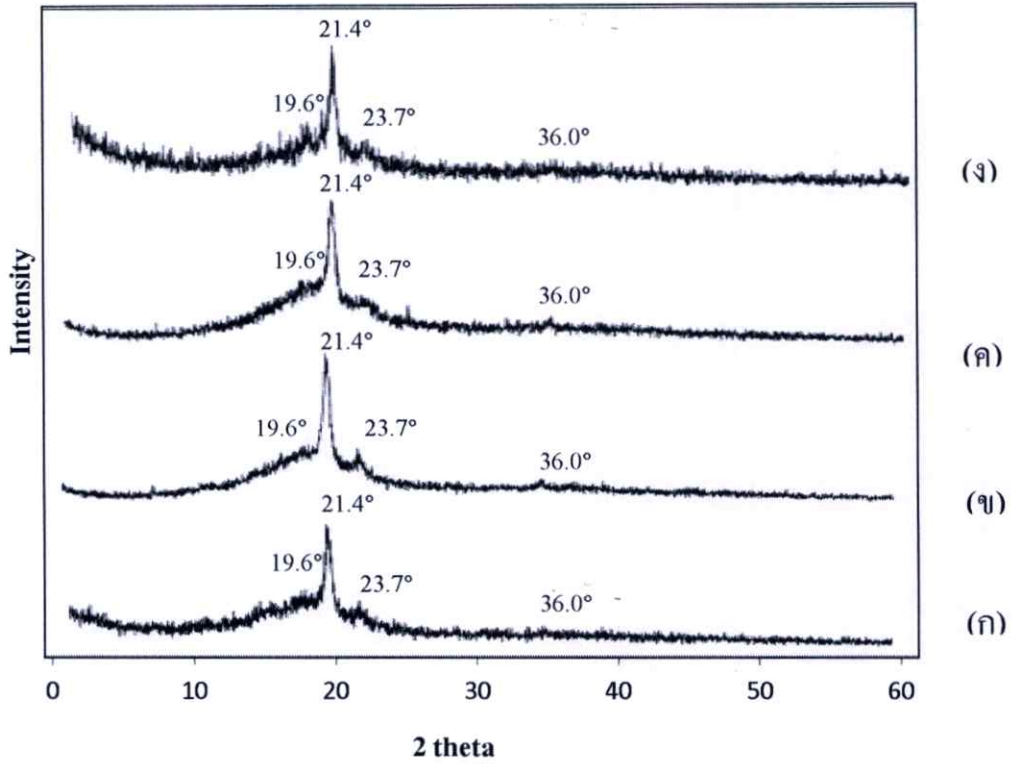
รูปที่ 4.11 ดิฟแฟรกโตแกรมของ (ก) TPCS (ข) อะการ์ (ค) คาร์ราจีแนน และ (ง) โซเดียมอัลจิเนต

จากรูปที่ 4.10 แสดงโครงสร้างผลึกของ LDPE พบว่า X-ray diffraction pattern ของ LDPE พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 21.4° 23.6° และ 36.0° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic ของพอลิเอทิลีน [50]

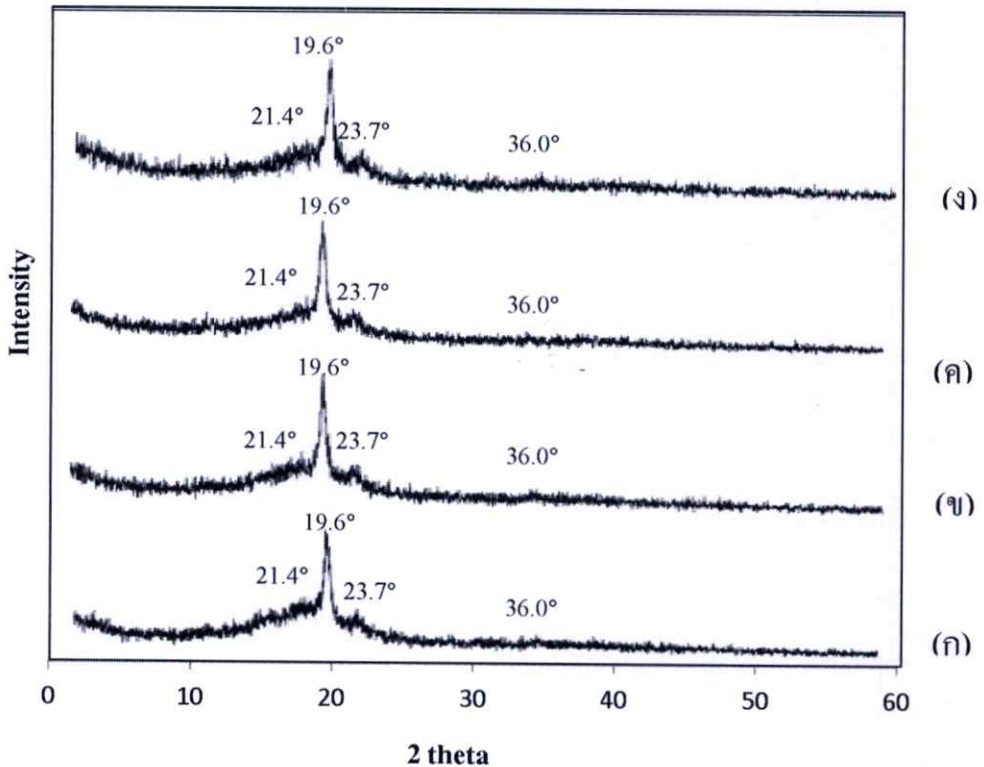
สำหรับรูป 4.11 (ก) แสดง X-ray diffraction pattern ของ TPCS พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 19.6° ซึ่ง TPCS นั้นเกิดจากการนำแป้งมาเติมพลาสติกไซเซออร์และผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยให้ความร้อนและแรงเฉือน ทำให้ผลึกของแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากพืชหัว มีโครงสร้างผลึกแบบ B-type ซึ่งเป็นผลึกแบบ Hexagonal ($a=b=1.85$ nm, $c=1.04$ nm) ที่พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 15.3° 17.0° และ 22.9° ถูกทำลายเกิดโครงสร้างใหม่ที่มีความเป็นผลึกลดลง (V_H -type) [44] ส่วนรูปที่ 4.11 (ข) แสดง X-ray diffraction patterns ของอะการ์ พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 19.7° โครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal double helix [29] ส่วนรูปที่ 4.11 (ค) แสดง X-ray diffraction patterns ของคาร์ราจีแนน พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 12.5° 15.1° และ 23.0° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal double helix [49] และรูปที่ 4.11 (ง) แสดง X-ray diffraction patterns ของโซเดียมอัลจิเนต พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 16.6° และ 22.8° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal α -helix [51]



รูปที่ 4.12 ดิฟแฟร็กโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/A10 (ค) TPCS70/LDPE30/A20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/A30

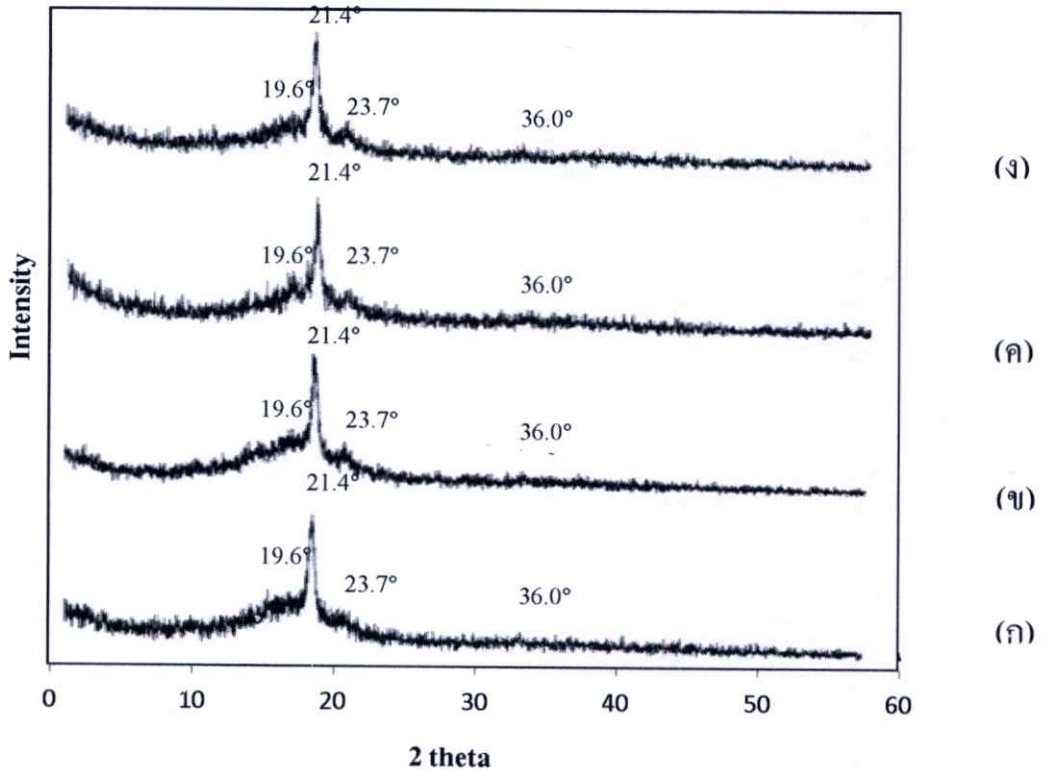


รูปที่ 4.13 ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์บอนแบล็ก (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/C10 (ค) TPCS70/LDPE30/C20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/C30



รูปที่ 4.14 ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/SA10 (ค) TPCS70/LDPE30/SA20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/SA30

จากรูปที่ 4.12-4.14 แสดงโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต พบว่าดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้มีรูปแบบของดิฟแฟรกโตแกรมเหมือนกันทั้งหมด โดยพบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 19.6° 21.4° 23.7° และ 36.0° เช่นเดียวกัน และพบว่า การเติมสารก่อเจลทั้งสามชนิดลงไป ในพอลิเมอร์ผสมทำให้ปริมาณผลึกมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารก่อเจล ทั้งนี้เนื่องจากสารก่อเจลที่เติมลงไปเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ LDPE จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจลมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากสารก่อเจลที่เติมลงไป ในปริมาณมากขึ้น มีการจับตัวรวมกลุ่มกันเอง จึงเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ LDPE น้อยลง ส่งผลให้ LDPE สามารถเกิดผลึกได้มากขึ้น ปริมาณผลึกจึงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.15 ดิฟแฟรคโตแกรมของ (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/A30 (ค) TPCS70/LDPE30/C30 และ (ง) TPCS70/LDPE30/SA30

จากรูปที่ 4.15 แสดงดิฟแฟรคโตแกรมของ LDPE เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนต พบว่าดิฟแฟรคโตแกรมที่ได้มีรูปแบบคล้ายกันโดยพบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 19.6° 21.4° 23.7° และ 36.0° เช่นเดียวกันทั้งหมด เนื่องมาจากพีคที่พบเกิดการซ้อนทับกันของ TPCS และ LDPE

เมื่อพิจารณาถึงการเติมสารก่อเจลแต่ละชนิดเปรียบเทียบกับที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมโซเดียมอัลจิเนตทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และการเติมอะการ์ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.4 ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย อะคาร์ คาร์ราจีแนนและ โซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่าง ๆ

ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
TPCS70/LDPE30	39.0
TPCS70/LDPE30/A10	36.6
TPCS70/LDPE30/A20	36.7
TPCS70/LDPE30/A30	38.8
TPCS70/LDPE30/C10	37.2
TPCS70/LDPE30/C20	38.1
TPCS70/LDPE30/C30	39.1
TPCS70/LDPE30/SA10	37.3
TPCS70/LDPE30/SA20	38.3
TPCS70/LDPE30/SA30	40.2

จากตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนตในปริมาณ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมสารก่อเจลทำให้ปริมาณผลึกมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารก่อเจล ทั้งนี้คาดว่าเนื่องจากสารก่อเจลที่เติมลงไปเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ LDPE จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจลมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกมีค่าสูงขึ้น คาดว่าสารก่อเจลที่เติมลงไปปริมาณมากขึ้น มีการจับตัวรวมกลุ่มกันเอง จึงเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ LDPE น้อยลง ส่งผลให้ LDPE สามารถเกิดผลึกได้มากขึ้น ปริมาณผลึกจึงมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงการเติมสารก่อเจลแต่ละชนิดเปรียบเทียบกัน พบว่าการเติมโซเดียมอัลจิเนตทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และการเติมอะคาร์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกน้อยที่สุด

4.4 การหาค่าความหนืด (Viscosity)

การหาค่าความหนืดใช้มาตรแบบออสท์วาลด์ (Oswald viscometer) ซึ่งเป็นมาตรฐานแบบหลอดแก้วรูปตัวยู ในการวัดความหนืดของเหลวที่มีปริมาตรที่แน่นอนและคงที่จะถูกใส่ลงในหลอด ดังนั้นโดยทั่วไปในทางปฏิบัติแล้ว จะนิยมใช้ความหนืดสัมพัทธ์ (Relative viscosity, η_r) ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกับความหนืดของของเหลวมาตรฐาน (เช่น น้ำ หรือตัวทำละลายบริสุทธิ์) โดยหาค่าความหนืดของอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต ใช้ความเข้มข้นสารละลายที่ 1% (w/v) อุณหภูมิที่วัดที่อุณหภูมิห้อง สูตรคำนวณความหนืดสัมพัทธ์ (Relative viscosity, η_r) มีหน่วยเป็นพออยส์ หาได้จากสมการ

$$\eta_r = \eta_1 / \eta_0 = (t)_1 / (t)_0$$

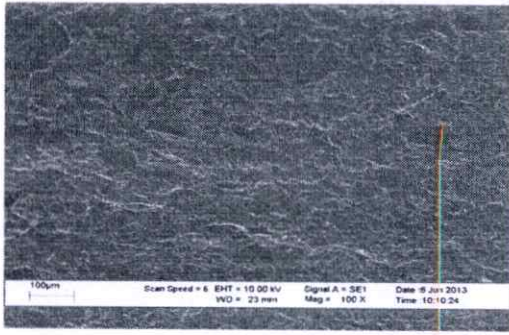
เมื่อ ตัวเลข 1 และ 0 หมายถึง สารละลายแต่ละชนิด เมื่อ t_1 และ t_0 เป็นเวลาของการไหลของสารละลายและตัวทำละลายบริสุทธิ์ (น้ำกลั่น) มีหน่วยเป็นวินาที ตามลำดับ

จากการทดลองหาค่าความหนืดพบว่าเวลาของการไหลของตัวทำละลายบริสุทธิ์หรือน้ำกลั่น $(t)_0$ เท่ากับ 45 วินาที พบว่าเวลาของการไหลของสารละลายอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต $(t)_1$ เท่ากับ 96, 140 และ 230 วินาที ดังนั้นจึงคำนวณหาค่าความหนืดของสารละลายอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนต ได้เท่ากับ 213, 311 และ 510 cP ตามลำดับ

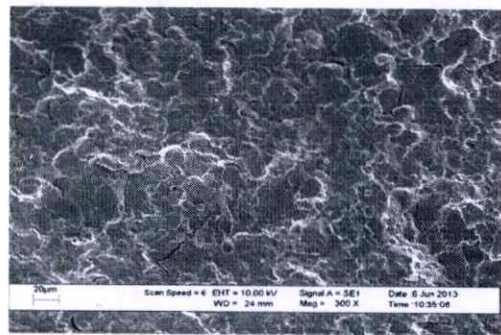
4.5 สัณฐานวิทยา

เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Morphology) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารช่วยผสม MAPE และศึกษาลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงด้วยอะการ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.14-4.16 ตามลำดับ

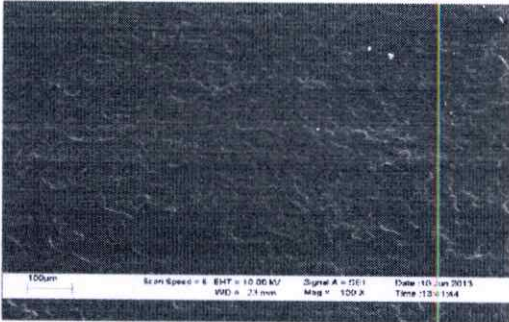
จากรูปที่ 4.16-4.18 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของ TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก จากรูปที่แสดงลักษณะภาคตัดขวางของ TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจล พบว่าที่ กำลังขยาย 100 เท่า พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ แต่เมื่อใช้กำลังขยายภาพ 300 เท่า สามารถมองเห็นการ วิกฤตของ TPCS และ LDPE โดยส่วนที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ คือ ส่วนของ LDPE และส่วนที่มี ลักษณะขรุขระ คือ ส่วนของ TPCS เนื่องจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันของ LDPE ซึ่งเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว แต่ TPCS มีขั้ว จึงทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวิกฤตและจาก ลักษณะภาคตัดขวางของ TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลทั้งสามชนิด ให้ผลสัณฐานวิทยาที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณของสารก่อเจลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของ ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเรียบมากขึ้น และวิกฤตของ TPCS และสารก่อเจลมีการรวมตัวกัน เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ไม่พบการแยกวิกฤต มีรอยต่อระหว่างวิกฤตลดน้อยลง เนื่องจาก โครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ของ TPCS และสารก่อเจล มีโครงสร้างหลักเป็นสาร พอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งมีความเป็นขั้วเหมือนกัน และมีหมู่ไฮดรอกซิลเหมือนกัน จึงทำให้วิกฤตของ TPCS และสารก่อเจลจึงมีความเข้ากันได้มากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจล



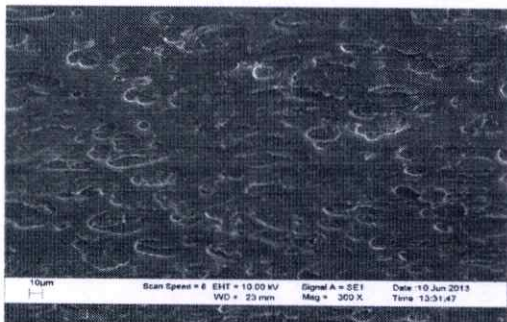
(ก) TPCS70/LDPE30, 100X



(ข) TPCS70/LDPE30, 300X



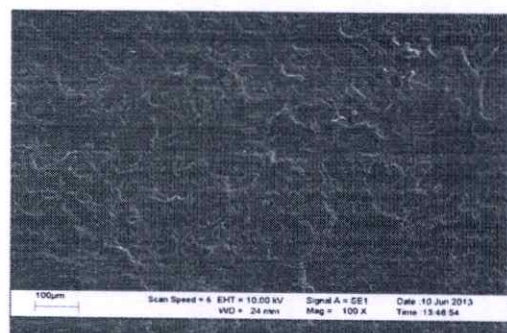
(ค) TPCS70/LDPE30/A10, 100X



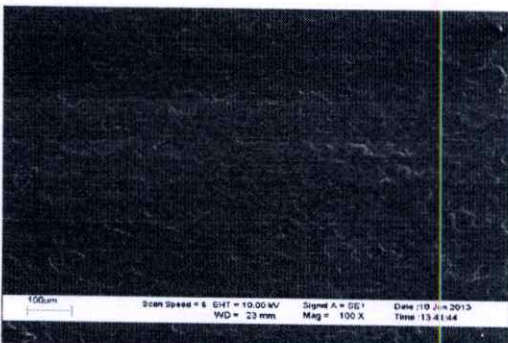
(ง) TPCS70/LDPE30/A10, 300X



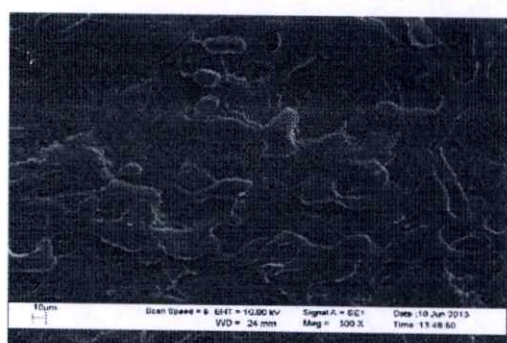
(จ) TPCS70/LDPE30/A20, 100X



(ฉ) TPCS70/LDPE30/A20, 300X

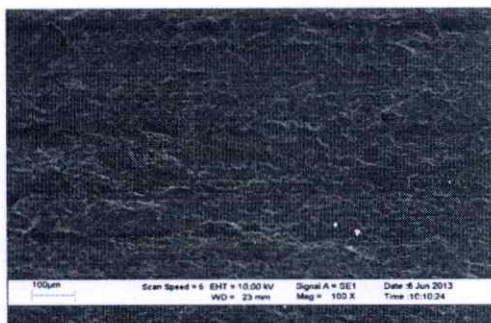


(ช) TPCS70/LDPE30/A30, 100X

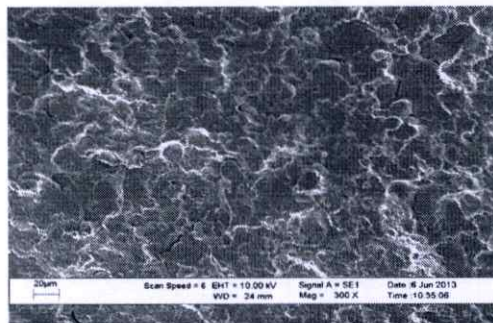


(ซ) TPCS70/LDPE30/A30, 300X

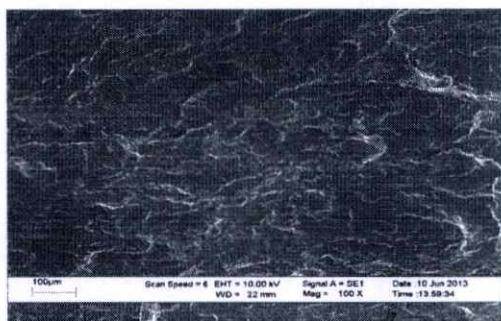
รูปที่ 4.16 สันฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยปริมาณอะคาร์ต่างๆ (ก) – (ข) 0% (ค) – (ง) 10% (จ) – (ฉ) 20% และ (ช) – (ซ) 30%



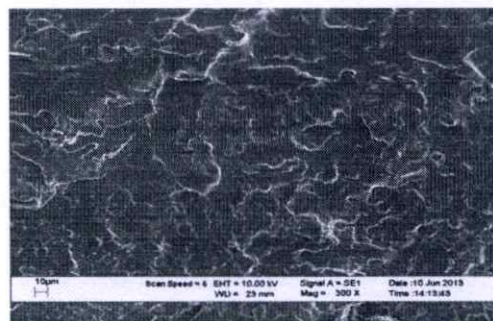
(ก) TPCS70/LDPE30, 100X



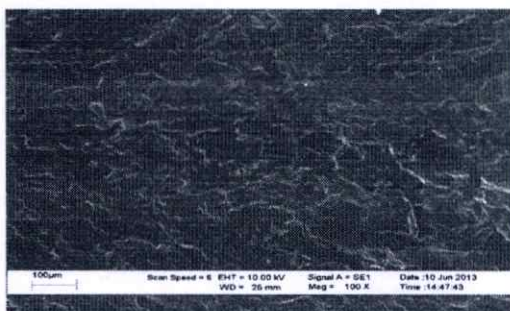
(ข) TPCS70/LDPE30, 300X



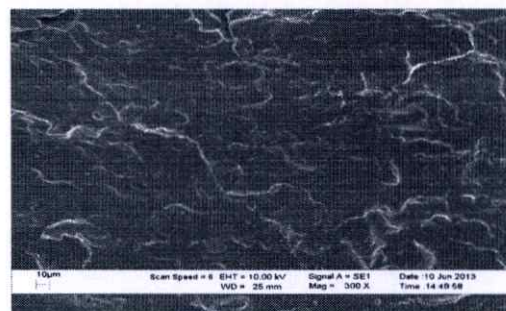
(ค) TPCS70/LDPE30/C10, 100X



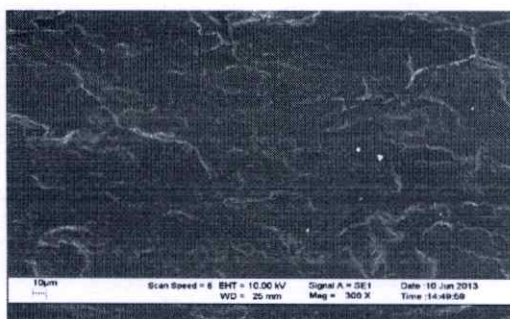
(ง) TPCS70/LDPE30/C10, 300X



(จ) TPCS70/LDPE30/C20, 100X



(ฉ) TPCS70/LDPE30/C20, 300X



(ช) TPCS70/LDPE30/C30, 100X

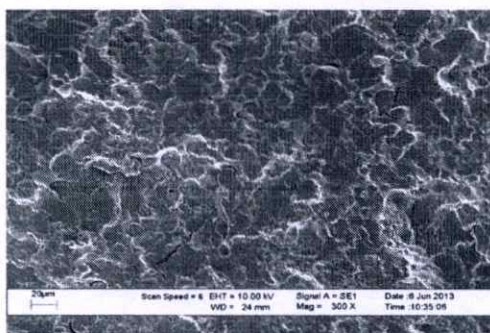


(ซ) TPCS70/LDPE30/C30, 300X

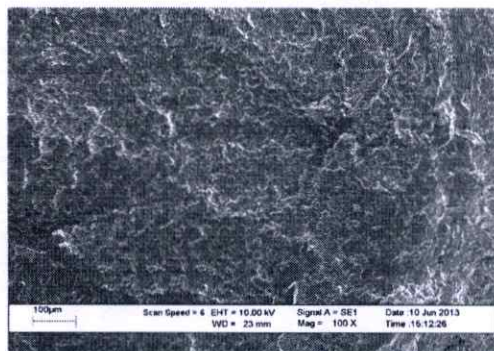
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยปริมาณคาร์ราจีแนนต่างๆ (ก) – (ข) 0% (ค) – (ง) 10% (จ) – (ฉ) 20% และ (ช) – (ซ) 30%



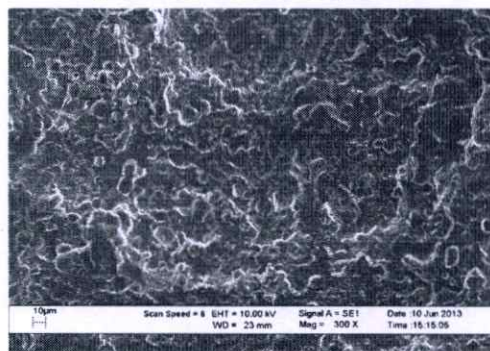
(ก) TPCS70/LDPE30, 100X



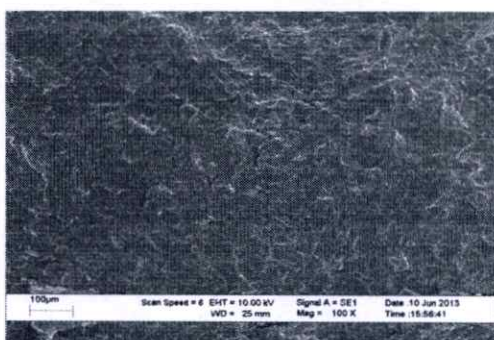
(ข) TPCS70/LDPE30, 300X



(ค) TPCS70/LDPE30/SA10, 100X



(ง) TPCS70/LDPE30/SA10, 300X



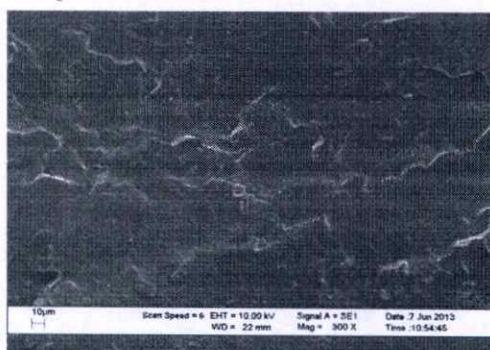
(จ) TPCS70/LDPE30/SA20, 100X



(ฉ) TPCS70/LDPE30/SA20, 300X

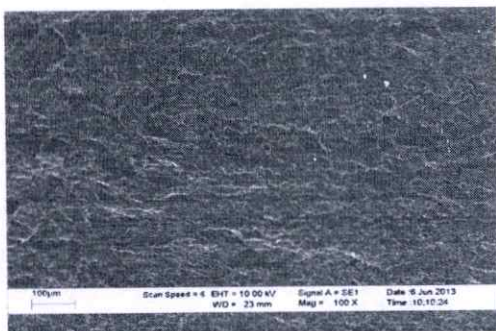


(ช) TPCS70/LDPE30/SA30, 100X

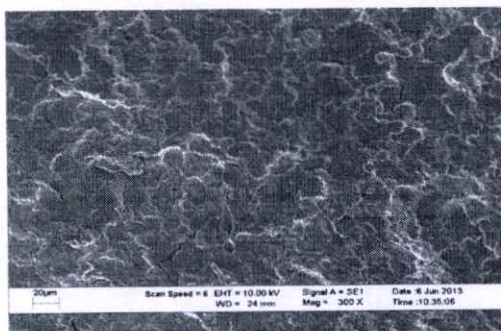


(ซ) TPCS70/LDPE30/SA30, 300X

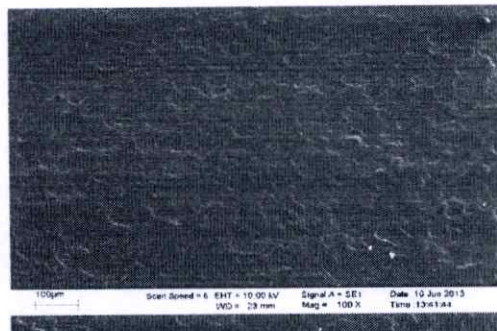
รูปที่ 4.18 ตัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยปริมาณ โซเดียมอัลจิเนตต่างๆ (ก) – (ข) 0% (ค) – (ง) 10% (จ) – (ฉ) 20% และ (ช) – (ซ) 30%.



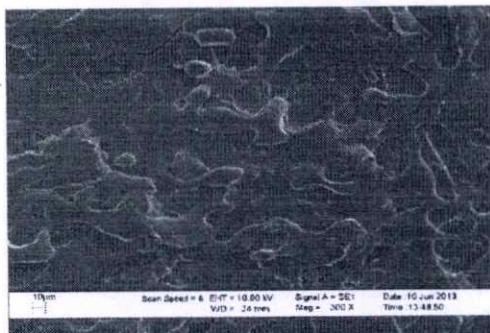
(ก) TPCS70/LDPE30, 100X



(ข) TPCS70/LDPE30, 300X



(ค) TPCS70/LDPE30/A30, 100X



(ง) TPCS70/LDPE30/A30, 300X



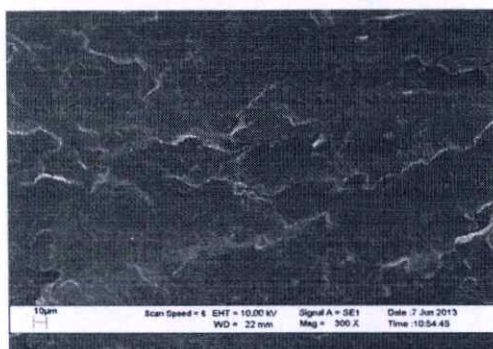
(จ) TPCS70/LDPE30/C30, 100X



(ฉ) TPCS70/LDPE30/C30, 300X



(ช) TPCS70/LDPE30/SA30, 100X



(ซ) TPCS70/LDPE30/SA30, 300X

รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 300 เท่า ของ TPCS70/LDPE30 และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจินตต่างๆ ที่ 30 % โดยน้ำหนัก (ก) – (ข) TPCS70/LDPE30 (ค) – (ง) TPCS70/LDPE30/A30 (จ) – (ฉ) TPCS70/LDPE30/C30 และ (ช) – (ซ) TPCS70/LDPE30/SA30

จากรูปที่ 4.16- 4.19 แสดงลักษณะภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า เปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ในปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าลักษณะภาคตัดขวางของ TPCS70/LDPE30 มีลักษณะขรุขระ เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ TPCS และ LDPE โดยส่วนของ TPCS และอะการ์ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจิเนต มีการรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียว รอยต่อระหว่างวัฏภาคลดลง และพบว่าพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่มีการเติมโซเดียมอัลจิเนตมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคน้อยที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันน้อยที่สุด มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากที่สุด ทั้งนี้อะการ์มีความเข้ากันได้กับวัฏภาคของ TPCS น้อยกว่าคาร์ราจีแนน เนื่องจากอะการ์มีหมู่ซัลเฟตที่มากกว่าคาร์ราจีแนน หมู่ซัลเฟตนี้จะไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ TPCS และสารก่อเจล จึงทำให้พอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่เติมอะการ์ มีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกับ TPCS ได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคาร์ราจีแนน แต่ในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต ไม่มีหมู่ซัลเฟตในโมเลกุล การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ TPCS และโซเดียมอัลจิเนต จึงเกิดได้มากกว่าอะการ์และคาร์ราจีแนน จึงทำให้โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ดีที่สุด

นอกจากนี้ยังเป็นผลจากปริมาณผลึกที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.4) ที่พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนตมีปริมาณผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด จึงทำให้ผลสัณฐานวิทยาสอดคล้องกับปริมาณผลึกที่ได้ กล่าวคือ พอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่มีการเติมโซเดียมอัลจิเนตมีปริมาณผลึกมากที่สุด จึงส่งผลให้สัณฐานวิทยามีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคน้อยที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันน้อยที่สุด มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากที่สุดคือ อะการ์

4.6 ดัชนีการไหล

การศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลในปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPCS ที่ ออกมาจากหัวตายของเครื่อง Melt Flow Indexer
TPCS70/LDPE30	6.3±0.3	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/A10	5.9±0.2	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/A20	5.5±0.3	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/A30	5.2±0.2	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/C10	5.5±0.2	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/C20	5.2±0.2	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/C30	4.9±0.3	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/SA10	5.2±0.2	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/SA20	4.9±0.2	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS
TPCS70/LDPE30/SA30	4.0±0.3	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของ TPCS

จากตารางที่ 4.5 แสดงถึงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ในปริมาณต่างๆ พบว่าพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ มีค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ไหลมากที่สุด ผลของการเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินเตลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง พอลิเมอร์ไหลได้ยากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินเตในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เนื่องจากสารก่อเจลทั้งสามชนิดที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นเหมือนสารตัวเติม จึงเข้าไปขวางการเคลื่อนที่ของสายพอลิเมอร์ขณะไหลอมเหลวทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และสารก่อเจลที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดีกับอนุภาคของ TPCS ดังแสดงในผลของสัณฐานวิทยา ที่พบว่า TPCS และสารก่อเจล มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 4.16-4.18) ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ได้รับความร้อนเกิดการไหลได้ยากขึ้น ส่งผลให้มีความหนืดสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินเต พบว่าการเติมโซเดียมอัลจินเตมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 มีค่าดัชนีการไหลลดลงมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ไหลอมเหลวสามารถไหลได้ยากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และการเติมอะการ์มีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีค่าดัชนีการไหลลดลงน้อยที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความหนืดของสารก่อเจลแต่ละชนิด (หัวข้อ 4.4) จากผลการทดสอบ พบว่าโซเดียมอัลจินเตมีค่าความหนืดเท่ากับ 510 cP ซึ่งทำให้เมื่อเข้าไปผสมรวมตัวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE แล้วจึงมีผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความหนืดมากที่สุด ค่าดัชนีการไหลจึงมีค่าลดลงมากที่สุด ส่วนคาร์ราจีแนนมีค่าความหนืดรองลงมา มีค่าเท่ากับ 311 cP และอะการ์ มีค่าความหนืดน้อยที่สุดเท่ากับ 213 cP จึงพบว่าค่าดัชนีการไหลจึงมีค่าลดลงน้อยที่สุด

4.7 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินต ด้วยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ h°

ตารางที่ 4.6 ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจล

ตัวอย่าง	ค่าการวัดสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	H°
TPCS70/LDPE30	44.60	1.06	6.08	6.16	80.11
TPCS70/LDPE30/A10	31.37	4.99	6.62	8.29	52.99
TPCS70/LDPE30/A20	26.68	5.34	7.23	8.98	53.55
TPCS70/LDPE30/A30	21.89	5.78	7.89	9.78	53.77
TPCS70/LDPE30/C10	32.63	4.08	7.54	8.57	61.58
TPCS70/LDPE30/C20	29.80	4.32	7.83	8.94	61.11
TPCS70/LDPE30/C30	19.43	4.75	8.12	9.40	59.67
TPCS70/LDPE30/SA10	22.71	2.81	8.16	8.63	70.99
TPCS70/LDPE30/SA20	21.57	3.08	8.37	8.92	69.79
TPCS70/LDPE30/SA30	17.24	3.27	8.61	9.21	69.20

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง ค่า a^* กำหนดสีเหลืองหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน ค่า C^* แสดงค่าความสดใของสี และค่า H° ระบุตำแหน่งของสีเปรียบเทียบกับมาตรฐาน

จากตารางที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินตที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่า L^* a^* b^* C^* และ H° มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ดังนี้

- ค่าความสว่าง (L^*)

พบว่าค่าการเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินต ลงในพอลิเมอร์ผสมปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินตลงไป มีสีเข้มขึ้น

- ค่า a^*

พบว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ มีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางสีแดง ส่วนผลของการเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินต ลงในพอลิเมอร์ผสมปริมาณมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมแสดงสีออกไปทางสีแดงมากขึ้น

- ค่า b^*

พบว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ มีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางสีเหลือง และการเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินต ลงในพอลิเมอร์ผสมปริมาณมากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่า b^* มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงสีออกไปทางสีเหลืองมากขึ้น

- ค่า C^*

พบว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ มีความสดใสน้อยที่สุด เมื่อปริมาณของอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินตเพิ่มขึ้น พบว่าค่า C^* มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีความสดใสน้อยลง

- ค่า H°

ตำแหน่งของสีเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งสีมาตรฐานของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม TPCS/LDPE มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินตเพิ่มขึ้น แต่โดยภาพรวมแล้วพอลิเมอร์ผสมตัวอย่างมีสีออกไปทางสีเหลืองทั้งหมด

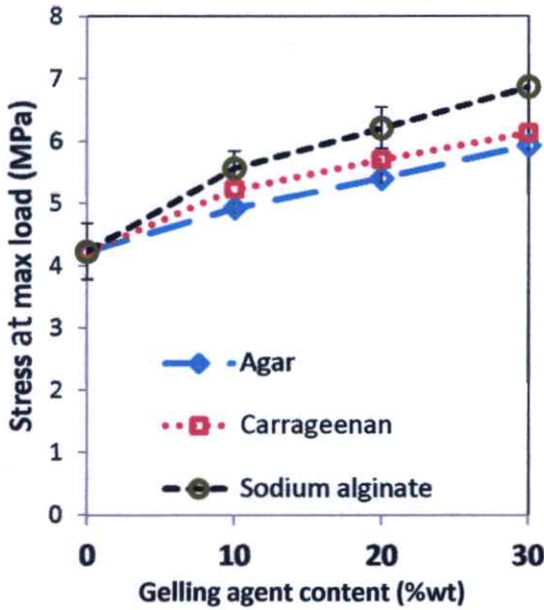
จากผลทดสอบการวัดสี สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจินต พบว่าเมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจินต พบว่าค่าความสว่างของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงทั้งหมด แต่ค่าความสดใ (C^*) ของสีมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับค่า a^* มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางแดงมากขึ้น

และเมื่อพิจารณาค่า b^* พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงว่าชั้นงานพอลิเมอร์ผสมมีสีไปทางสีเหลืองมากขึ้น ส่วนตำแหน่งของสี (H°) ของพอลิเมอร์ผสมทุกสูตร โดยภาพรวมแล้วชั้นงานตัวอย่างของพอลิเมอร์ TPCS70/LDPE30 แสดงสีออกไปทางสีเหลืองทั้งหมด

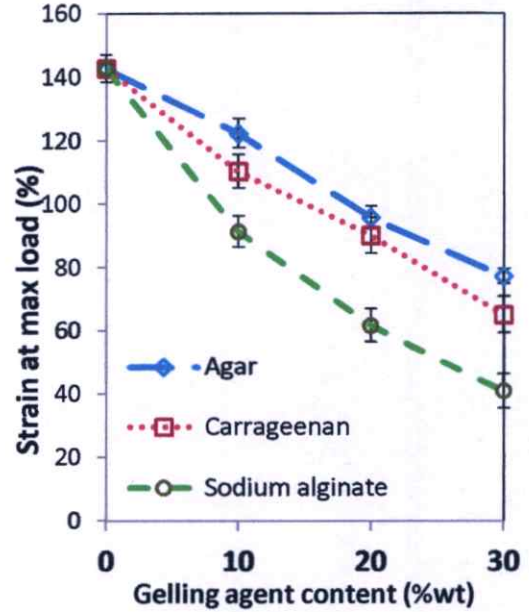
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงด้วยสารก่อเจลที่ต่างชนิดกัน พบว่าการเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้ชั้นงานพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสีที่มากที่สุด กล่าวคือ เมื่อเติมโซเดียมอัลจิเนตในปริมาณมากขึ้น ทำให้โดยภาพรวมชั้นงานมีสีเข้มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ผลทดสอบค่าดัชนีการไหล พบว่าค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวมีความหนืดมากที่สุด เกิดการไหลได้ยากที่สุด จึงอยู่ในเครื่องฉีดขึ้นรูปนานที่สุด ทำให้ชั้นงานพอลิเมอร์ผสมมีสีเข้มขึ้นมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์ทำให้โดยภาพรวมชั้นงานพอลิเมอร์ผสมมีสีที่อ่อนที่สุด

4.8 สมบัติเชิงกล

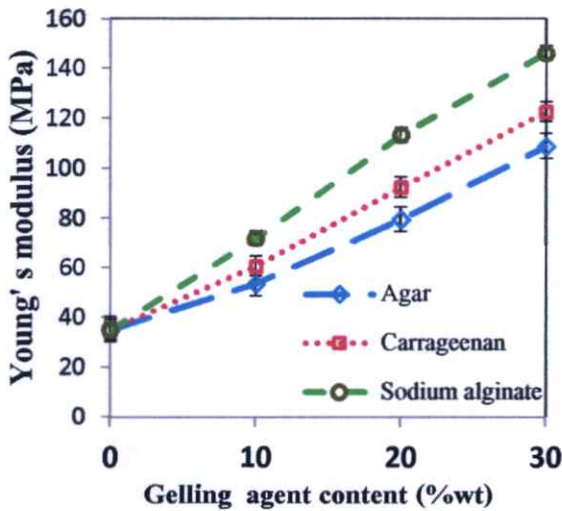
สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง โมดูลัส การยืดออก เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความแข็งกด โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจินเนต ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้



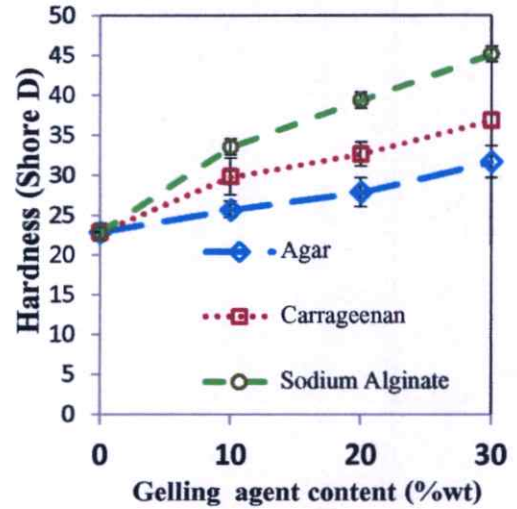
(ก)



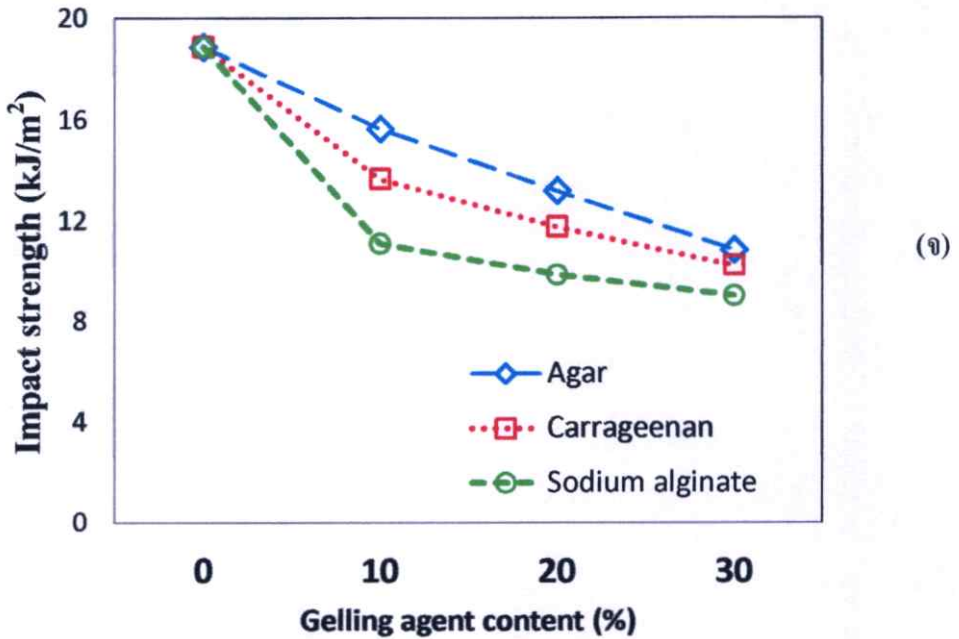
(ข)



(ค)



(ง)



รูปที่ 4.20 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย อะการ์ คาร์ราจีแนนและ โซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่างๆ (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การ ดึงยืด (ค) มอดุลัส (ง) ความแข็งกด และ (จ) ความแข็งแรงกระแทก

จากรูปที่ 4.20 (ก)-(จ) แสดงค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด มอดุลัส ความแข็งกดและความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่มีการ ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดย น้ำหนัก พบว่าสารก่อเจลทั้งสามชนิดให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณ สารก่อเจลเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.20 (ก)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.20 (ค)) ของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารก่อเจลทั้งสามชนิดเป็นสาร เพิ่มความข้นหนืด[18-20] โดยที่อะการ์ คาร์ราจีแนน โซเดียมอัลจิเนตและแป้งมีโครงสร้างทางเคมี คล้ายกัน เป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงสามารถเกิดอันตรกิริยา ระหว่างโมเลกุลของ TPCS และสารก่อเจลเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้นได้ ซึ่งยืนยันได้จากผลพีคที่ แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง (FT-IR รูปที่ 4.2, 4.5 และ 4.6) และเมื่อพิจารณาด้วยสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.16-4.18) พบว่าเมื่อปริมาณสารก่อเจล เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และจากผลของการทดสอบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าปริมาณผลึกมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารก่อเจล โครงสร้างแบบผลึก สายโซ่โมเลกุลจะอยู่กันอย่างอัดแน่นและเป็นระเบียบมากขึ้น จึงสามารถรับและส่งผ่านแรงที่มา กระทำได้ดีขึ้น

นอกจากนี้พบว่าปริมาณของสารก่อเจลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของเจล (Gel strength) เพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งแรงของเจลมีผลต่อค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นถ้าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงสูงแสดงว่ามีความแข็งแรงของเจลมากจึงต้องใช้แรงในการทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการเสียรูปมากด้วย [19,51]

รูปที่ 4.20 (ข) แสดงเปอร์เซ็นต์การดึงยืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจินेट ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อปริมาณของสารก่อเจลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความเครียดมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นผลเนื่องจากการใช้ปริมาณสารก่อเจลที่มากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงเจลสูง ส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งและเปราะมากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการยึดตัวออกได้ยากขึ้น มีความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมลดลง

รูปที่ 4.20 (ง) เมื่อพิจารณาค่าความแข็งกด พบว่าการที่ปริมาณของสารก่อเจลเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากพบว่าเมื่อปริมาณของสารก่อเจลเพิ่มขึ้น อนุภาคของสารก่อเจลมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งมีการกระจายตัวอยู่ที่พื้นผิวของชิ้นงานมากขึ้น จึงสามารถรับแรงกดได้มากขึ้นด้วย

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจินेटในปริมาณต่างๆ (รูปที่ 4.20 (จ)) ผลการทดสอบพบว่าผลของเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินेटในปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากสารที่ก่อให้เกิดเจลทั้งสามตัวนี้มีโครงสร้างในลักษณะเป็นโครงตาข่าย ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะแข็งมากขึ้น มีความความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมลดลง [19] นอกจากนี้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของ TPCS และสารก่อเจลเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น [18] ซึ่งมีผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR (รูปที่ 4.2, 4.5 และ 4.6) ที่พบว่าพีคของ O-H stretching intermolecular hydrogen Shift ไปในตำแหน่งที่ลดลง จึงทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์มีความสามารถในการเคลื่อนไหว (Chain flexibility) ต่ำลง จึงขยับได้ยากขึ้นและมีช่องว่างระหว่างสายโซ่น้อยลง ทำให้ความสามารถในการสั่นเพื่อให้แรงที่ได้รับกระจายไปได้น้อยจึงทำให้มีความสามารถในการรับแรงแล้วส่งผ่านแรงได้ไม่ดี ความแข็งแรงกระแทกจึงมีค่าลดลง

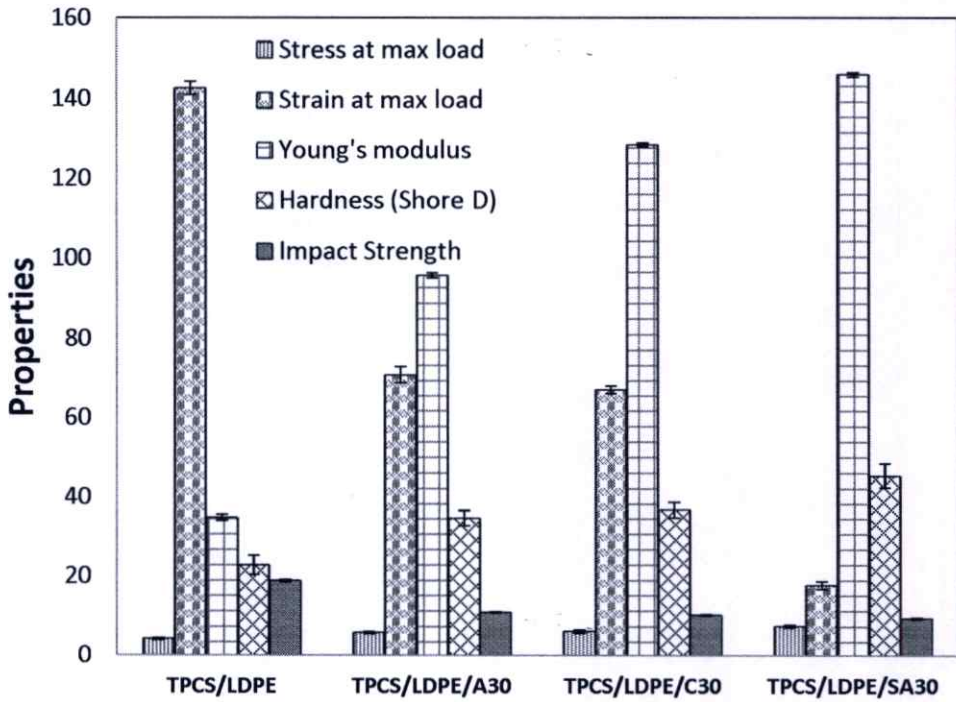
ผลของสมบัติเชิงกลที่ได้จากการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของนิสานาด หลิมศิริวงษ์ และคณะ [54] ที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ผงวุ้นและเส้นใยฝ้าย ซึ่งพบว่าค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณอะการ์มากขึ้น ส่วนค่าการดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด พบว่ามีแนวโน้มลดลง

เมื่ออะคาร์มีปริมาณมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณอะคาร์ที่มากทำให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะแข็งเปราะ ดึงยืดและยืดหยุ่นได้น้อย และยังคงคล้องกับงานวิจัยของ Y. Wu และคณะ [29] ที่ศึกษาการเตรียมฟิล์มเชิงประกอบจากแป้งมันฝรั่ง (Potato starch) และวุ้นที่ปริมาณ 0 - 30% โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใช้เทคนิคการหล่อแบบ (Casting) ในการขึ้นรูป ซึ่งพบว่าจากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าแป้งและวุ้นเข้ากันได้และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลด้วย การผสมวุ้นลงไปช่วยให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 5.33 เป็น 11.76 MPa

จากผลสมบัติเชิงกลที่ได้ของคาร์ราจีแนน สอดคล้องกับงานวิจัยของ D. Lafargue และคณะ [55] ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งดัดแปลงผสมแคปไซซินที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการหล่อ พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคปไซซินเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืดตัวของฟิล์มแป้งลดลง เนื่องมาจากการรวมตัวกันเป็นผลึกของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้ง เช่น อะมิโลสและอะมิโลเพกตินกับแคปไซซิน- คาร์ราจีแนน เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลงเช่นเดียวกับงานวิจัยของ กุริสา ทศวิล และคณะ [25] ที่ทำการศึกษาอิทธิพลของแคปไซซิน- คาร์ราจีแนนต่อคุณสมบัติทางเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้น K-คาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ค่าการต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มสูงขึ้น การยืดตัว และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มลดลง เนื่องจากอิทธิพลของพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล ทำให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดลงของการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม

ส่วนผลทดสอบสมบัติเชิงกลของโซเดียมอัลจิเนต สอดคล้องกับงานวิจัยของ R.C.R. Souza และคณะ [33] ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งข้าวโพด (CS) และโซเดียมอัลจิเนต(SA) ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ตามด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ผลจากการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำและ SA มอดุลัสที่มี SA 1% เพิ่มขึ้นเป็น 3 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ CS และด้านสัญญาณวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าเม็ดแป้งข้าวโพดในฟิล์มตัวอย่างทั้งหมดถูกทำลายภายใต้สภาวะที่ใช้ในกระบวนการ

จากการพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการเติมอะคาร์คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่างๆ กันนั้น พบว่าปริมาณของสารก่อเจลที่เหมาะสมที่สุด คือ 30 % โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ดังแสดงได้จากการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกคของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติมีค่าสูงที่สุด



รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนตที่ 30 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.21 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน หรือ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัสและความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน หรือ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก มีค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมปรับปรุงสมบัติ

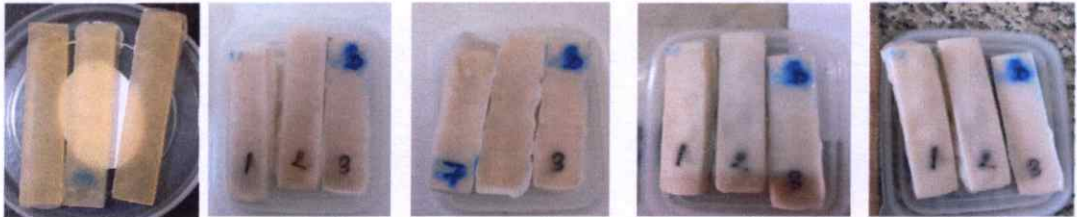
เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนต พบว่าการเติมโซเดียมอัลจิเนตลงในพอลิเมอร์ผสมให้สมบัติเชิงกลโดยรวมในด้านความแข็งแรงดึง โมดูลัสและความแข็งกดที่สูงที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และน้อยที่สุด คือ อะคาร์ ผลเนื่องมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ของสารก่อเจลแต่ละชนิดกับ TPCS ซึ่งแสดงได้จากผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.19) โดยพบว่าโซเดียมอัลจิเนตสามารถเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกับ วัฏภาคของ TPCS มากที่สุด จะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีความเรียบมากที่สุด และมีรอยต่อวัฏภาคระหว่าง ชิ้นงานน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอะคาร์และคาร์ราจีแนน และผลจากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.4) พบว่าการเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอะคาร์และคาร์ราจีแนน จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะคาร์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกน้อยที่สุด

นอกจากนี้สมบัติเชิงกลเกิดจากการเกิดเจลของสารก่อเจลแต่ละชนิด กล่าวคือ โพลีเอทิลีนออกไซด์ เมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวกลายเป็นเจลแล้ว เจลที่ได้จะมีลักษณะแข็งคงรูปไม่อ่อนนุ่ม มีความแข็งแรงของเจล (1.5% Gel 20 °C) ที่สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 602 g/cm² (ข้อมูลจากบริษัทรวมเคมี 1986 จำกัด) ซึ่งความแข็งแรงของเจลนี้มีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน ถ้าชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงของเจลสูงแสดงว่ามีค่าความแข็งแรงเจลมาก จึงต้องใช้แรงในการกระทำทำให้ชิ้นงานเสียหายมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโพลีเอทิลีนออกไซด์คงทนต่อการเสียหายมากกว่าคาร์ราจีแนนและอะการ์ ส่วนที่อะการ์ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่น้อยที่สุด เนื่องจากอะการ์เป็นสารที่ก่อให้เกิดเจล เมื่อได้รับความร้อนโมเลกุลจะอยู่ในรูปขดอย่างไม่เจาะจง (Random coil) เมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิเกิดเจลจะเกิดการจับกันของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งจะกลับมาเป็นเจลอีกครั้ง ได้เจลลักษณะแข็งตัวอ่อนนุ่มเล็กน้อย โส เปราะ และให้ค่าความแข็งแรงเจลที่ต่ำที่สุด (1.5% Gel 20 °C) มีค่าเท่ากับ 405 g/cm² (ข้อมูลจากบริษัทรวมเคมี 1986 จำกัด ส่วนคาร์ราจีแนนสามารถเกิดลักษณะที่เป็นเจลได้ โดยคาร์ราจีแนนชนิดแคปป่า (Kappa, K) สามารถที่จะละลายเมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง ได้เจลลักษณะแข็งตัวไม่อ่อนนุ่ม ให้เจลที่มีลักษณะเปราะ และมีค่าความแข็งแรงเจลปานกลาง (1.5% Gel 20 °C) มีค่าเท่ากับ 455 g/cm² (ข้อมูลจากบริษัทจากห้างหุ้นส่วนจำกัด พัฒนาสินเอ็นเตอร์ไพรส์)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของหมู่ซัลเฟตที่มีในโครงสร้างของอะการ์และคาร์ราจีแนนนั้น พบว่าอะการ์มีหมู่ซัลเฟตที่มากกว่าคาร์ราจีแนน ส่วนโครงสร้างของโพลีเอทิลีนออกไซด์ไม่มีหมู่ซัลเฟต หมู่ซัลเฟตนี้จะไปขัดขวางการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของ TPCS และสารก่อเจล จึงทำให้พอลิเมอร์ผสม TPCS/LDPE ที่เติมโพลีเอทิลีนออกไซด์มีสมบัติเชิงกลด้านความแข็งแรงดึง โมดูลัส และความแข็งกมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์ให้ค่าที่ต่ำที่สุด

4.9 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำโดยนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณแตกต่างกัน มาทำการทดสอบโดยการแช่น้ำ เป็นเวลา 4 สัปดาห์ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.22 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.23 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/A10



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.24 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/A20



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.25 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/A30



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.26 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/C10



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.27 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/C20



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.28 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/C30



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.29 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/SA10



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

รูปที่ 4.30 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/SA20



สัปดาห์ที่ 0

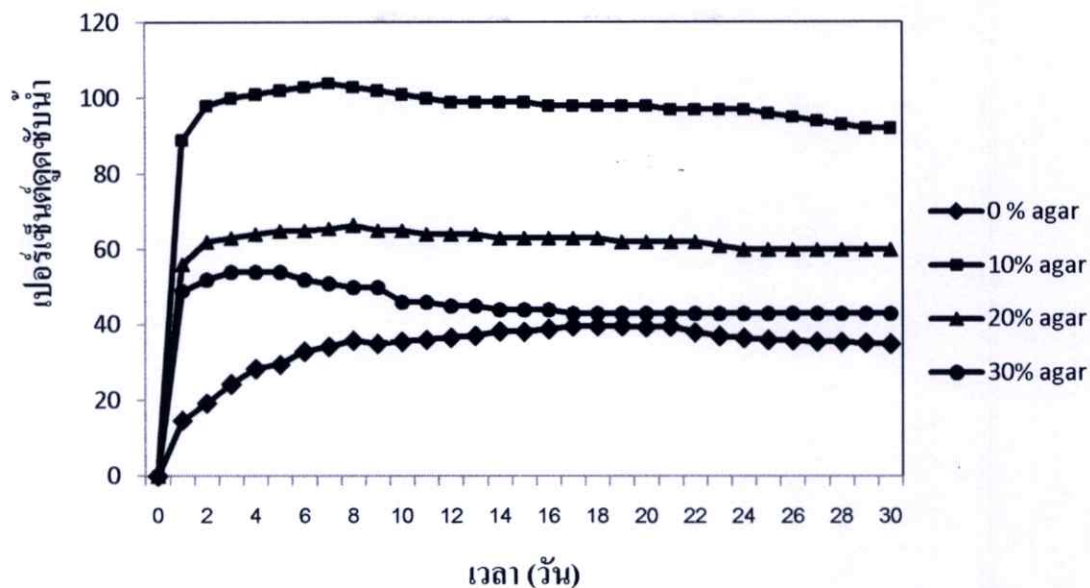
สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

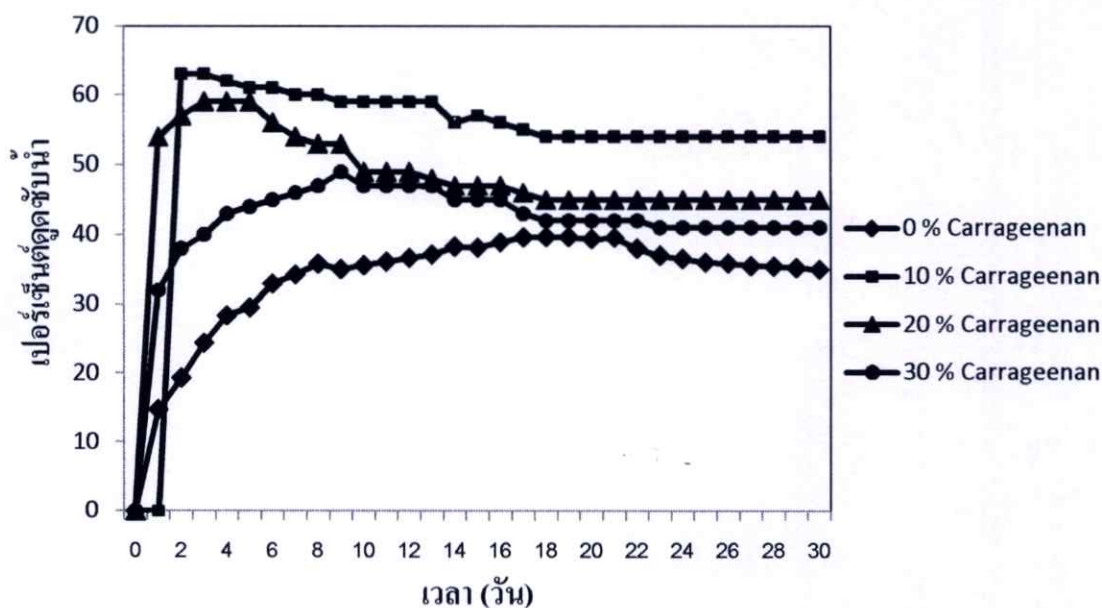
สัปดาห์ที่ 3

สัปดาห์ที่ 4

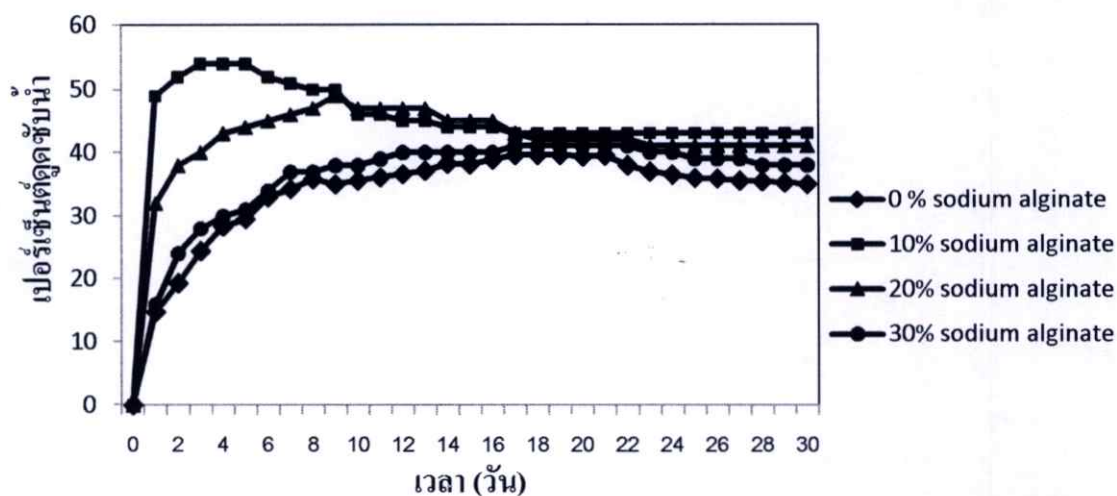
รูปที่ 4.31 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30/SA30



รูปที่ 4.32 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/A10 (ค) TPCS70/LDPE30/A20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/A30



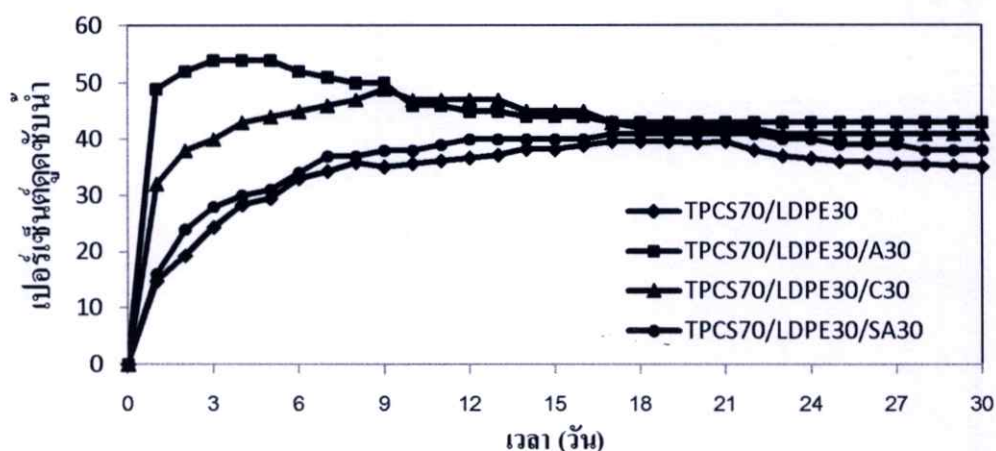
รูปที่ 4.33 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/C10 (ค) TPCS70/LDPE30/C20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/C30



รูปที่ 4.34 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต (ก) TPCS70/LDPE30 (ข) TPCS70/LDPE30/SA10 (ค) TPCS70/LDPE30/SA20 และ (ง) TPCS70/LDPE30/SA30

จากรูปที่ 4.32-4.34 แสดงผลการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 5 วันแรก หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับน้ำมีแนวโน้มคงที่ ชื้นงานมีความอึดตัว ไม่สามารถดูดซับน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีก เนื่องจากโครงสร้างของ TPCS และสารก่อเจลมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่มีความเป็นขั้ว ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี และสารก่อเจลสามารถเกิดเจลได้ จึงกักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้ดี [19]

เมื่อพิจารณาถึงการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม TPCS70/LDPE30 ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจล พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลมีการดูดซับน้ำมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากสารก่อเจลเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากเช่นเดียวกัน จึงทำให้มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ แต่พบว่าเมื่อปริมาณของสารก่อเจลเพิ่มขึ้น ทำให้เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากชิ้นงานมีความแข็งคงรูปเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเจลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างวัฏภาคของสารก่อเจลกับวัฏภาคของ TPCS [52] ดังแสดงในหัวข้อ 4.5 นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคของชิ้นงานดังแสดงรูปสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.19) และผลของปริมาณผลึกจากผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลในปริมาณเพิ่มขึ้น มีปริมาณผลึกมากขึ้น โดยโครงสร้างแบบผลึกของสายโซ่โพลีเมอร์จะอยู่กันอย่างอัดแน่นและเป็นระเบียบมากขึ้น จึงทำให้รอยต่อวัฏภาคชิ้นงานลดลง ทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในชิ้นงานได้น้อยลง



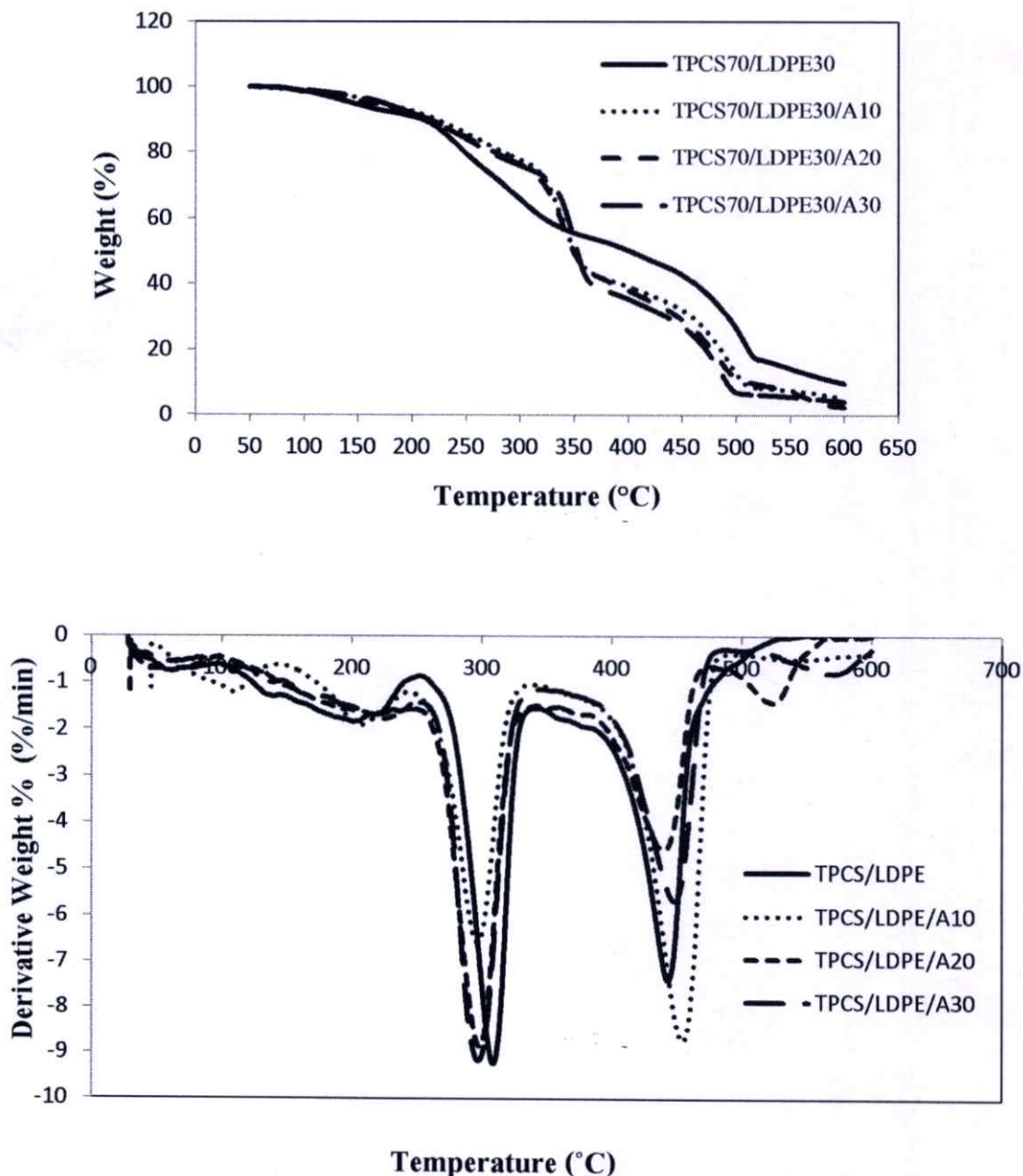
รูปที่ 4.35 เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยของ อะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.35 แสดงผลทดลองเปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยของอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนต พบว่าเมื่อเติมสารก่อเจลลงไปในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ค่าเปอร์เซนต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ โดยภาพรวมเห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยอะการ์มีค่าการดูดซับน้ำที่สูงที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมอัลจิเนตมีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด อาจเป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับน้ำของสารก่อเจลแต่ละชนิด [4] ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของอะการ์มีหมู่ซัลเฟตในโครงสร้าง 2 หมู่ ซึ่งหมู่ซัลเฟตนี้มีสมบัติชอบน้ำ จึงทำให้อะการ์สามารถดูดซับน้ำไว้ในชิ้นงานได้มากที่สุด ส่วนโครงสร้างของคาร์ราจีแนนมีหมู่ซัลเฟตในโครงสร้างเพียง 1 หมู่ จึงทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ในชิ้นงานได้มากที่สุด ส่วนโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตไม่มีหมู่ซัลเฟตในโครงสร้าง แต่มีหมู่ฟังก์ชัน COO⁻ ในโครงสร้าง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนี้มีสมบัติชอบน้ำน้อยกว่าหมู่ซัลเฟต หมู่ฟังก์ชัน COO⁻ นี้จะไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของ TPCS และหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของ TPCS ลดลง จึงทำให้มีสมบัติในการชอบน้ำลดลงด้วย

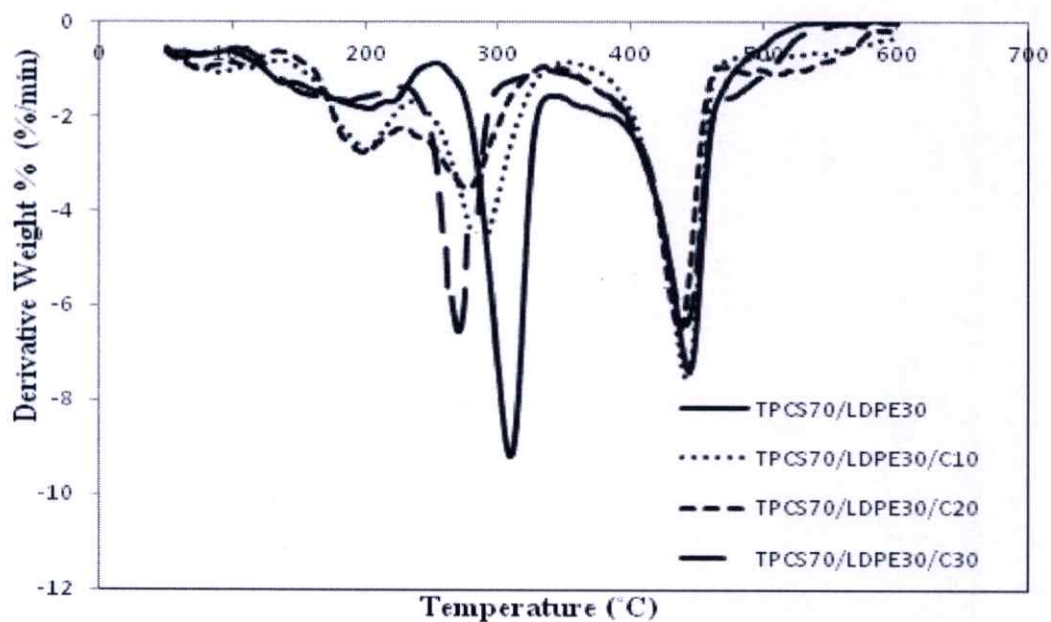
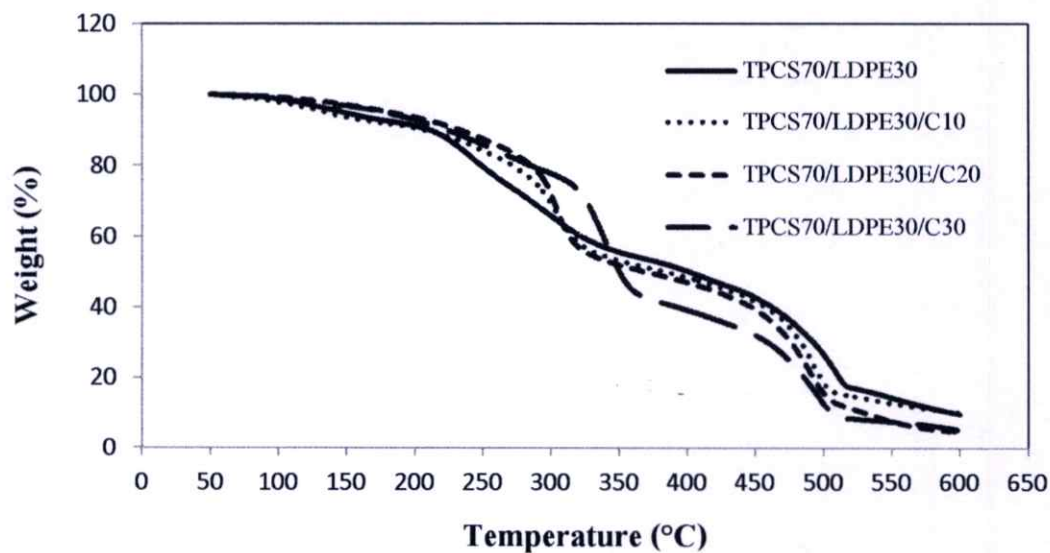
นอกจากนี้ยังเป็นผลจากปริมาณผลึกที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ตารางที่ 4.4) ที่พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนตมีปริมาณผลึกมากที่สุด จึงทำให้ผลสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.19) ที่แสดงถึงรอยต่อระหว่างภูมิภาคของชิ้นงาน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต มีความเป็นผลึกมากที่สุด จึงทำให้รอยต่อระหว่างภูมิภาคของชิ้นงานน้อยที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนนและอะการ์ จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมโซเดียมอัลจิเนตสามารถดูดซับน้ำไว้ในชิ้นงานได้น้อยที่สุด ส่วนคาร์ราจีแนนรองลงมา ส่วนพอลิเมอร์ผสมที่เติมอะการ์มีความเป็นผลึกมากที่สุดทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมมีรอยต่อระหว่างภูมิภาคของชิ้นงานมากที่สุด จึงมีการดูดซับน้ำมากที่สุด

4.10 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

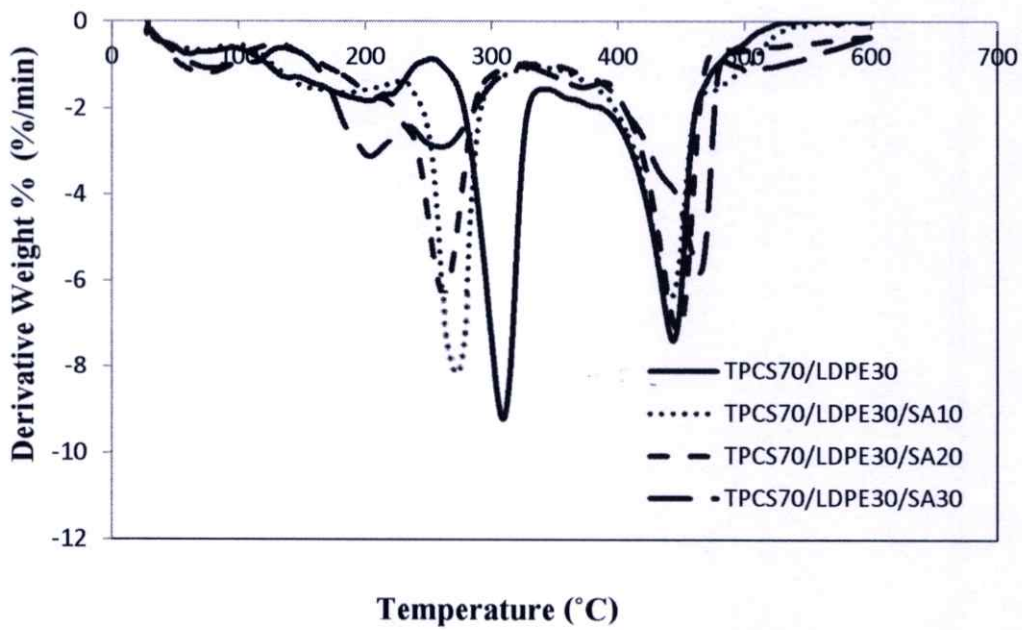
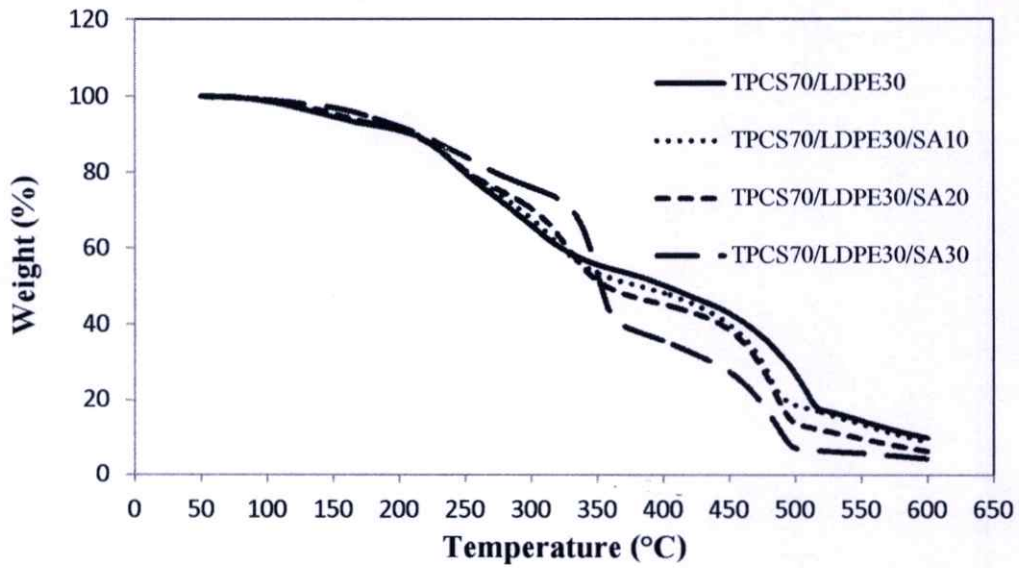
สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจินตที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (Maximum degradation temperature) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน (N_2) และใช้สภาวะในการทดสอบคือ อุณหภูมิที่ใช้อู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที



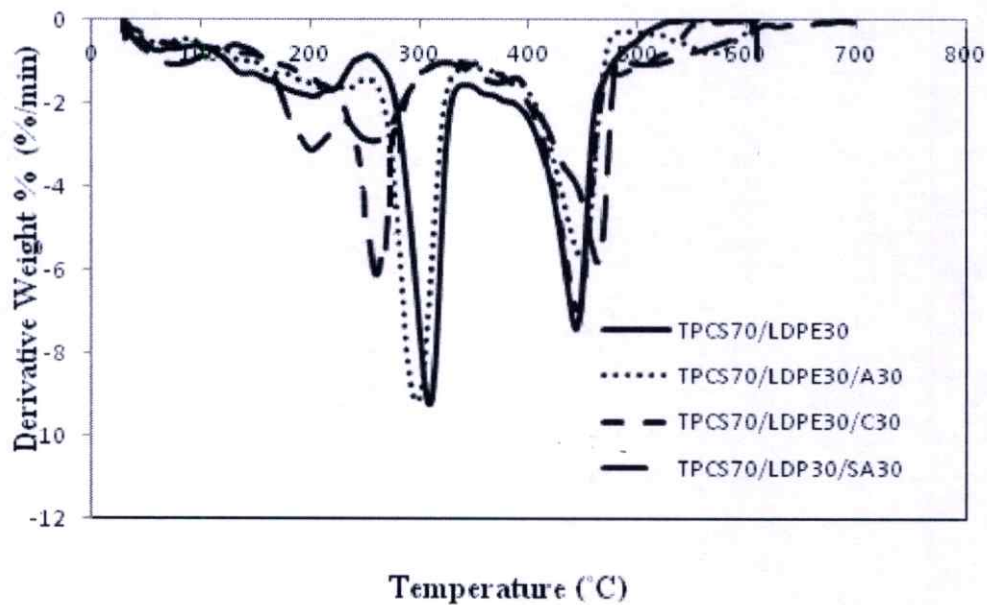
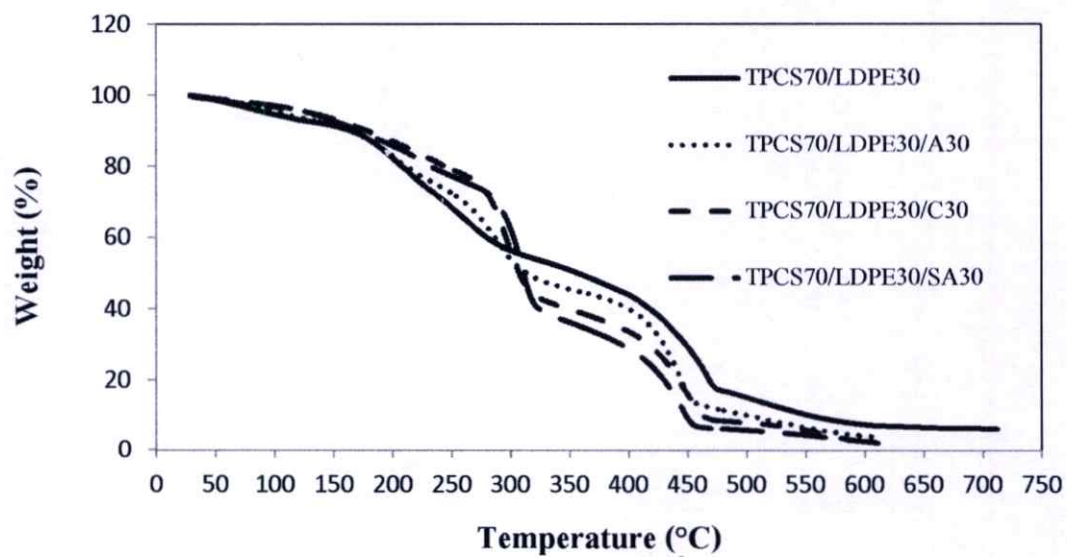
รูปที่ 4.36 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ ในปริมาณต่างๆ (ก) TGA และ (ข) DTG



รูปที่ 4.37 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย คาร์บอนในปริมาณต่างๆ (ก) TGA และ (ข) DTG



รูปที่ 4.38 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย โซเดียมอัลจิเนตในปริมาณต่างๆ (ก) TGA และ (ข) DTG



รูปที่ 4.39 เทอร์โมแกรมของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก (ก) TGA และ (ข) DTG

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลในปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (TPCS และ สารก่อเจล)	ช่วงที่ 3 (LDPE)
TPCS70/LDPE30	203.2	308.8	443.5
TPCS70/LDPE30/A10	224.4	298.2	440.1
TPCS70/LDPE30/A20	215.5	297.6	448.5
TPCS70/LDPE30/A30	205.8	296.8	454.5
TPCS70/LDPE30/C10	200.5	285.9	441.5
TPCS70/LDPE30/C20	198.7	276.4	439.6
TPCS70/LDPE30/C30	204.6	270.2	439.6
TPCS70/LDPE30/SA10	212.4	269.3	440.4
TPCS70/LDPE30/SA20	206.1	262.0	447.5
TPCS70/LDPE30/SA30	201.1	259.4	463.9

จากรูปที่ 4.36-4.38 และตารางที่ 4.7 แสดงถึงเทอร์โมแกรมและอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS70/LDPE30 ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ในปริมาณต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ มี 3 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของกลีเซอรอล [53] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของ TPCS และสารก่อเจล [53-55] และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิเป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของ LDPE [56]

ส่วนผลของการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE พบว่าทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของ TPCS มีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารก่อเจลทั้งสามชนิด เนื่องจากสารก่อเจลสามารถดูดความร้อนแล้วสะสมความร้อนไว้ในระยะยาวได้โดยไม่เกิดการสลายตัวทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนไปยัง TPCS ได้ ส่งผลให้ TPCS ได้รับความร้อนมากขึ้นจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิตกลง นอกจากนี้พบว่าอะคาร์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดประมาณ 280.1°C [47] คาร์ราจีแนนมีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดประมาณ 266.0°C [47] ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของโซเดียมอัลจินेटประมาณ 221.3°C [47] โดยอะคาร์มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของ TPCS ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดประมาณ 280.1°C [47]

จึงทำให้การลดลงของอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม TPCS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์มีแนวโน้มน้อยกว่าคาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต

นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของ TPCS และสารก่อเจล เกิดที่ช่วงตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัฏภาคของ TPCS และสารก่อเจล ตารางที่ 4.8 อุณหภูมิการสลายตัว ($^{\circ}\text{C}$) ของ LDPE และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (TPCS, อะการ์, คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต)	ช่วงที่ 3 (LDPE)
LDPE	-	-	449.8
TPCS70/LDPE30	203.2	308.8	443.5
TPCS70/LDPE30/A30	205.8	296.8	454.5
TPCS70/LDPE30/C30	204.6	270.2	439.6
TPCS70/LDPE30/SA30	201.1	259.4	463.9

จากรูปที่ 4.39 และตารางที่ 4.8 พบว่าผลของการปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีค่าลดลง เนื่องจากสารก่อเจลสามารถดูดความร้อนแล้วสะสมความร้อนไว้ในระยะยาวได้โดยไม่เกิดการสลายตัวทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนไปยัง TPCS ได้ ส่งผลให้ TPCS ได้รับความร้อนมากขึ้น จึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิลดลง เมื่อเปรียบเทียบกันการใช้สารก่อเจลต่างชนิดกัน พบว่าการเติมอะการ์ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงที่สุด มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของสารก่อเจลแต่ละชนิด ซึ่งพบว่าอะการ์มีอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 280.1°C ซึ่งมีค่าสูงที่สุด [47] คาร์ราจีแนนมีอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดประมาณ 266.0°C ซึ่งมีค่าสูงรองลงมาจากอะการ์ [47] ส่วนอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของโซเดียมอัลจิเนตประมาณ 221.3°C [47] พบว่ามีค่าต่ำที่สุด โดยอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดช่วงที่ 2 เกิดจากอุณหภูมิของการผสมระหว่าง TPCS และสารก่อเจล ดังนั้นเมื่อผสมโซเดียมอัลจิเนตลงไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่สูงที่สุดช่วงที่ 2 มีอุณหภูมิต่ำที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของโซเดียมอัลจิเนตมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์ราจีแนนและอะการ์

4.11 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยการนำพอลิเมอร์ผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนต ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยการทดสอบนำพอลิเมอร์ผสมมาฝังดินเป็นระยะเวลา 0 3 6 และ 12 สัปดาห์ ที่มีการควบคุมความชื้นของดินคงที่ในช่วง 30-40% ทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส เปรอร์เซ็นต์การดึงยืด ให้ผลการทดลองดังนี้



0 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/A10

TPCS70/LDPE30/A20

TPCS70/LDPE30/A30



1 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/A10

TPCS70/LDPE30/A20

TPCS70/LDPE30/A30



2 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/A10

TPCS70/LDPE30/A20

TPCS70/LDPE30/A30



3 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/A10

TPCS70/LDPE30/A20

TPCS70/LDPE30/A30

รูปที่ 4.40 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน



TPCS70/LDPE30



TPCS70/LDPE30/C10



TPCS70/LDPE30/C20



TPCS70/LDPE30/C30

0 เดือน



TPCS70/LDPE30



TPCS70/LDPE30/C10



TPCS70/LDPE30/C20



TPCS70/LDPE30/C30

1 เดือน



TPCS70/LDPE30



TPCS70/LDPE30/C10



TPCS70/LDPE30/C20



TPCS70/LDPE30/C30

2 เดือน



TPCS70/LDPE30



TPCS70/LDPE30/C10



TPCS70/LDPE30/C20



TPCS70/LDPE30/C30

3 เดือน

รูปที่ 4.41 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน ที่ ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน



0 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/SA10

TPCS70/LDPE30/SA20

TPCS70/LDPE30/SA30



1 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/SA10

TPCS70/LDPE30/SA20

TPCS70/LDPE30/SA30



2 เดือน

TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/SA10

TPCS70/LDPE30/SA20

TPCS70/LDPE30/SA30



3 เดือน

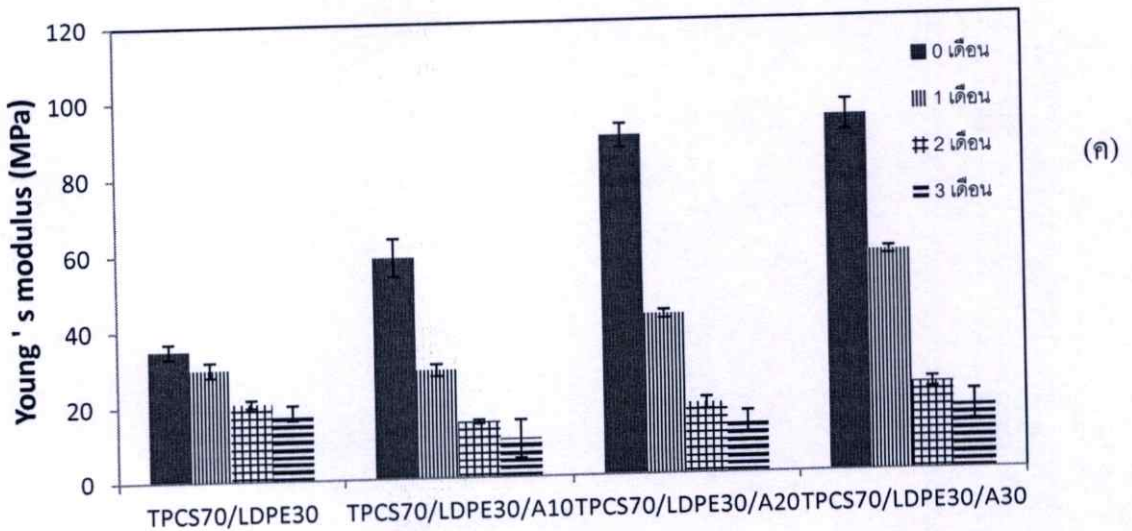
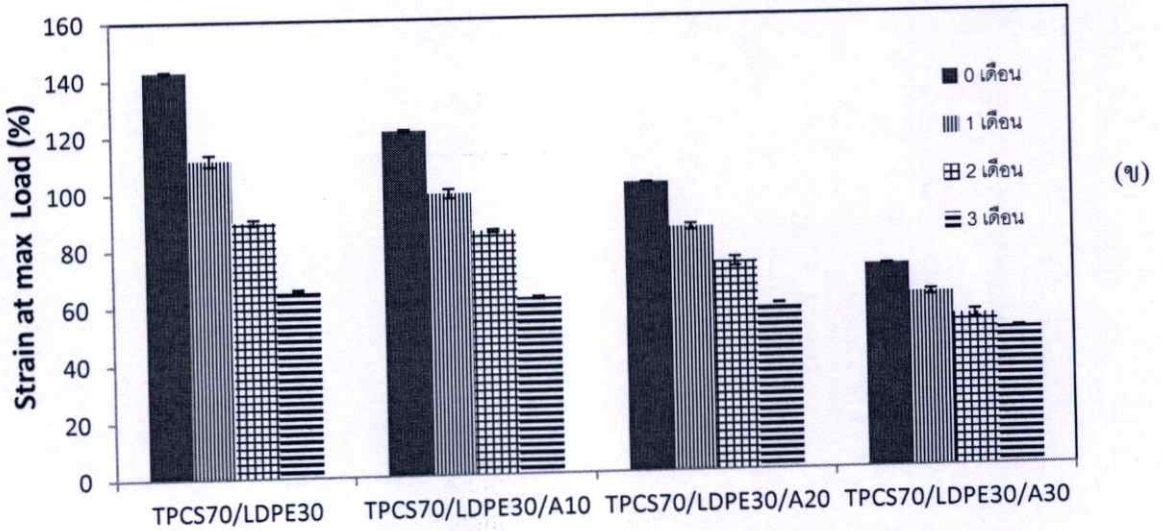
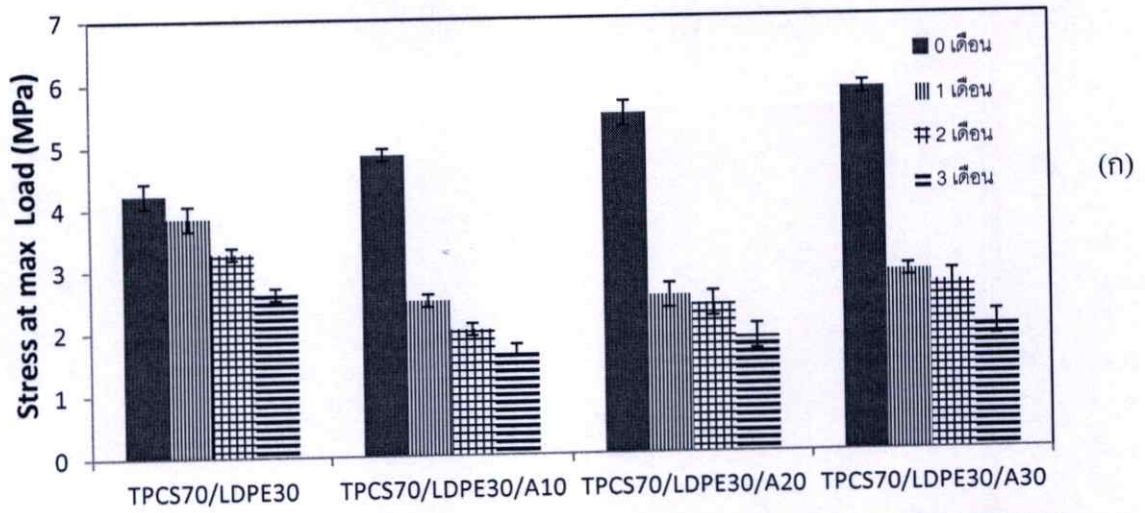
TPCS70/LDPE30

TPCS70/LDPE30/SA10

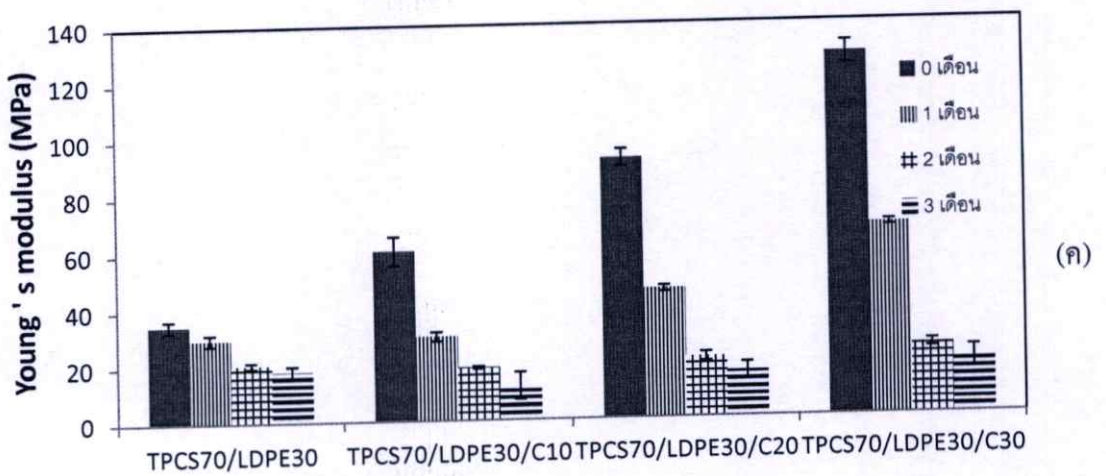
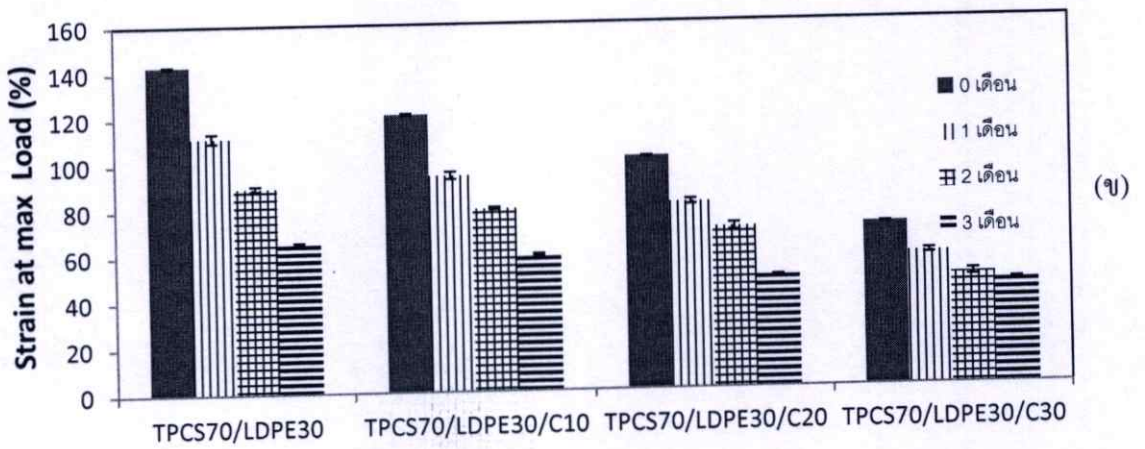
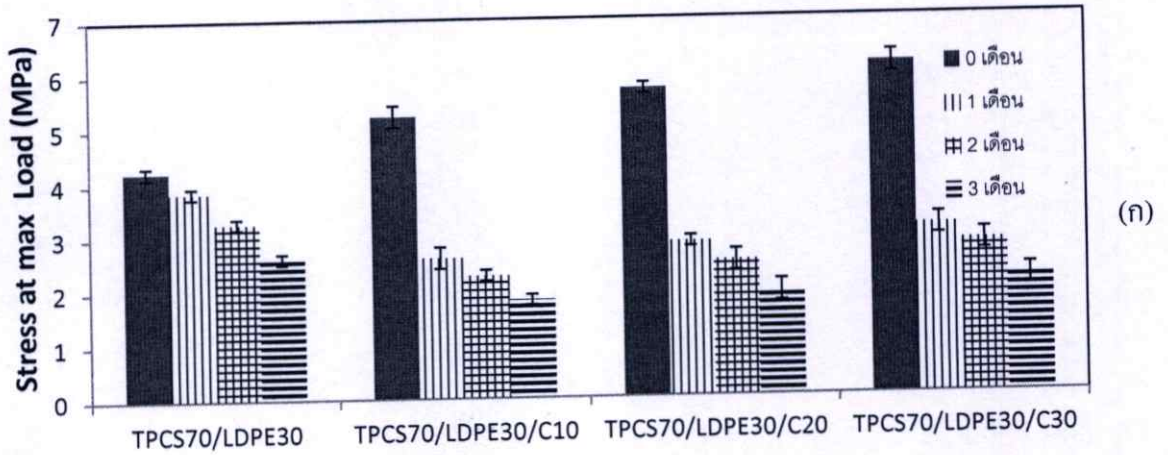
TPCS70/LDPE30/SA20

TPCS70/LDPE30/SA30

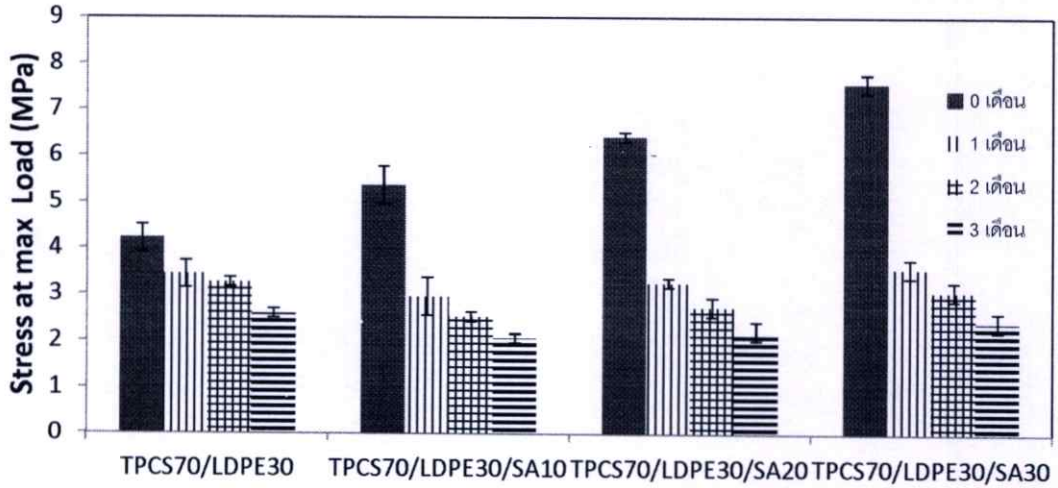
รูปที่ 4.42 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจิเนต ที่ ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน



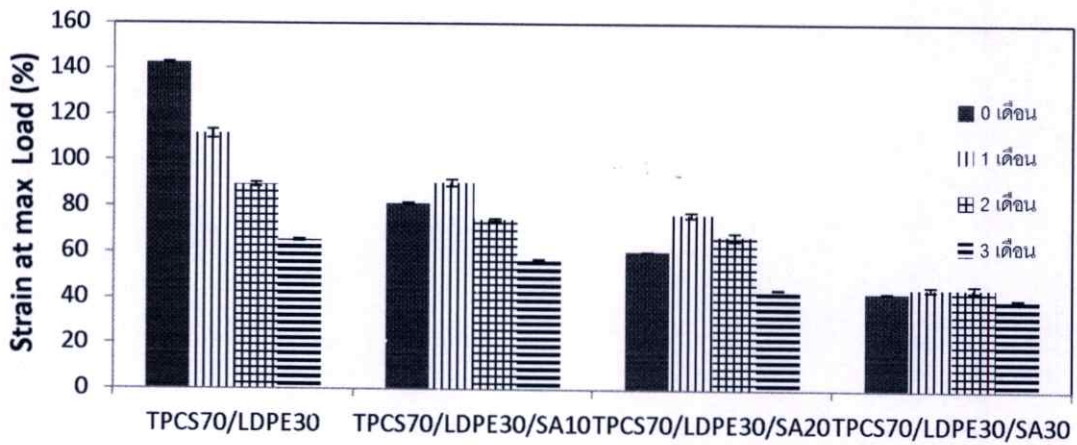
รูปที่ 4.43 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และ (ค) โมดูลัส



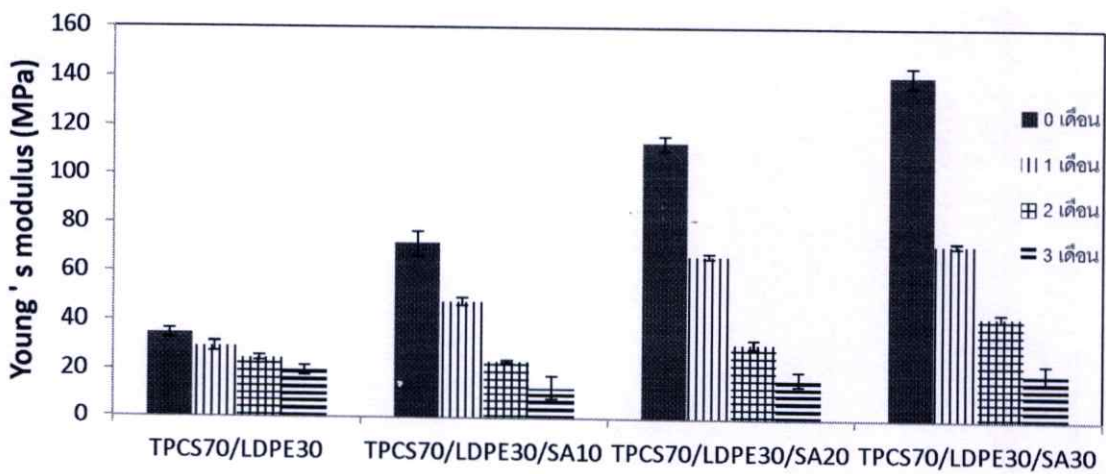
รูปที่ 4.44 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการรัจไนในปริมาณต่างๆ ที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และ (ค) โมดูลัส



(ก)



(ข)



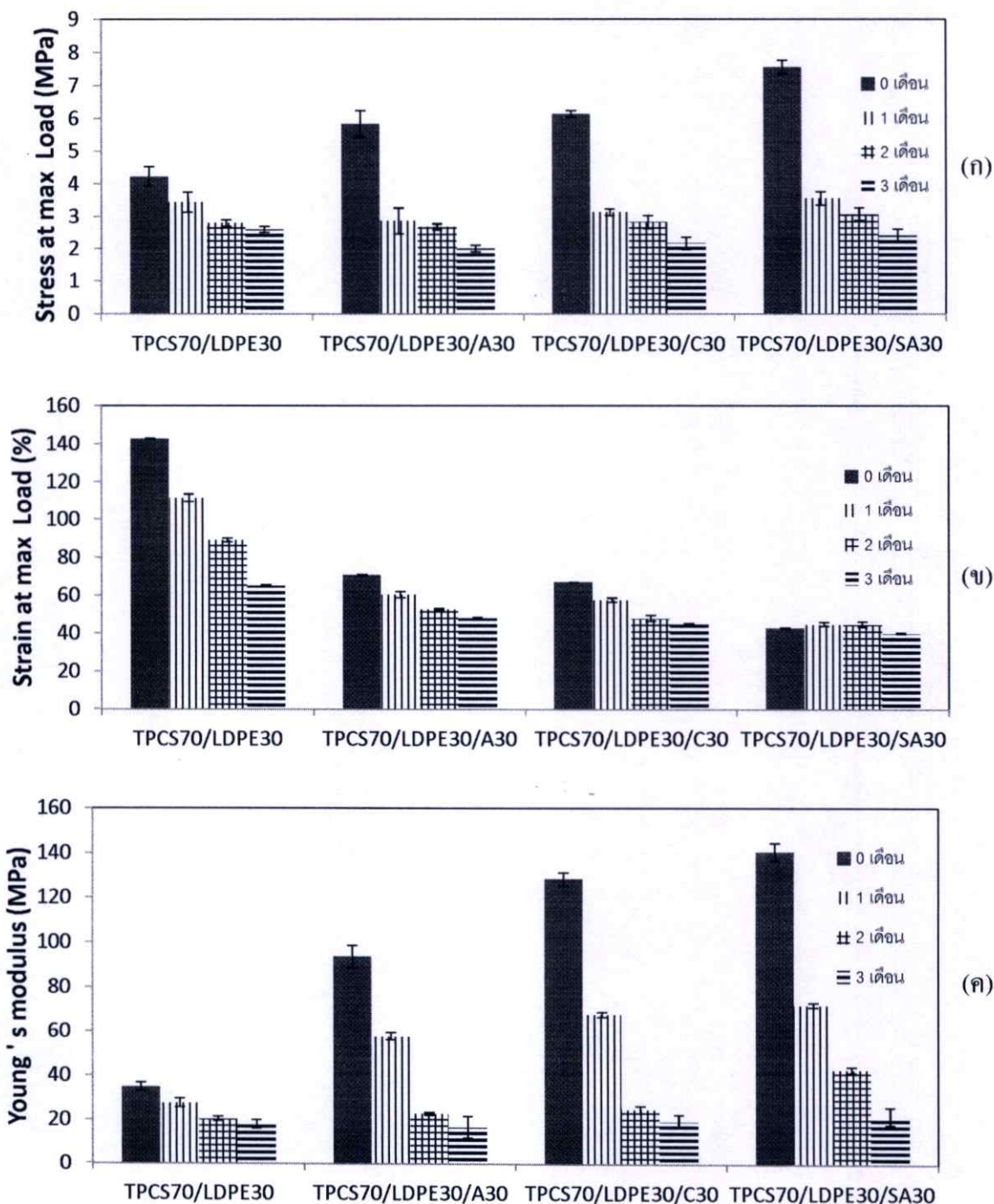
(ค)

รูปที่ 4.45 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมออกซิเจนในปริมาณต่างๆ ที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน
(ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และ (ค) โมดูลัส

จากรูปที่ 4.43-4.45 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยอะคาร์ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 1 2 และ 3 เดือน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจล มีค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัส ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดหลังการฝังดินมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์ผสม มีส่วนประกอบเป็นสารจำพวกแป้ง กลิเซอรอล ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ พอลิเมอร์ผสมจึงดูดซับน้ำในดินที่นำมาทดสอบซึ่งมีความชื้นอยู่และเกิดจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม มีเชื้อราเกิดขึ้นตามบริเวณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.40-4.42 ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสายโซ่อยู่ห่างกันมากขึ้น มีความแข็งแรงลดลง ทำให้เมื่อออกแรงดึงพอลิเมอร์ผสมเกิดการขาดได้ง่ายขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารก่อเจลทั้งสามชนิดลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่าค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัสและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดหลังการฝังดิน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมสารก่อเจล เนื่องจากการเติมสารก่อเจลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากผลการดูดซับน้ำการเติมสารก่อเจลทำให้น้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่อยู่ห่างกันมากขึ้น ทำให้เมื่อออกแรงดึงพอลิเมอร์ผสม จึงเกิดการขาดได้ง่ายขึ้น ซึ่งงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลจึงมีแนวโน้มการย่อยสลายได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

นอกจากนี้พบว่าหลังการฝังดินเมื่อปริมาณของสารก่อเจลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงดึง และโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากการเติมสารก่อเจลในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้น้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ผสมอยู่ห่างกันมากขึ้น จึงเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าลดลง ทำให้เมื่อออกแรงดึงพอลิเมอร์ผสม จึงเกิดการขาดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นงานพอลิเมอร์ผสมจึงมีแนวโน้มการย่อยสลายได้มากขึ้น ซึ่งผลทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินนี้สอดคล้องกับ ผลการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยสารก่อเจลในรูปที่ 4.32-4.34 กล่าวคือ เมื่อปริมาณสารก่อเจลเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.46 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก โดยฝังดินเป็นระยะเวลา 0 1 2 และ 3 เดือน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) เปรอร์เซ็นต์การดึงยืด และ (ค) มอดุลัส

จากรูปที่ 4.46 เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การดึงยืด และ มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และ โซเดียมอัลจิเนตที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการฝังดิน 0 1 2 และ 3 เดือน

พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไป พอลิเมอร์ผสมถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่มีในดิน ซึ่งเกิดเชื้อราตามพื้นผิวชั้นงาน มีค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่มีการเติมและเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจิเนต พบว่าเมื่อใช้เวลาในการทดสอบการฝังดินมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมที่เติมอะการ์ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจิเนตมีค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมต่ำกว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม เนื่องจากสารที่เติมเป็นสารก่อเจลจึงเกิดการดูดซับน้ำจากดินเข้าไปในชั้นงานได้มากขึ้น แสดงว่าการเติมสารก่อเจลทั้งสามชนิดลงไปมีส่วนช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS/LDPE เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้

และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมอะการ์ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจิเนต พบว่าการเติมอะการ์ให้ค่าสมบัติเชิงกลรวมลดลงมากที่สุด แสดงว่าอะการ์มีส่วนช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS/LDPE เกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้มากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตมีส่วนช่วยในการย่อยสลายได้น้อยที่สุด เนื่องจากสารอะการ์มีสมบัติในการดูดซับน้ำมากที่สุด จึงดูดซับน้ำจากดินเข้าไปในชั้นงานได้มากที่สุด ชั้นงานพอลิเมอร์ผสมจึงมีการย่อยสลายได้มากที่สุด ซึ่งผลสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสม ในหัวข้อ 4.9

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาติคที่เตรียมได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาติคจากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยมีสารช่วยผสมชนิดมาลิกอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยการใช้สารก่อเจล ได้แก่ อะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่าพีคของการสั่นที่ตำแหน่งของ OH-stretching ของ TPCS มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลงจากการเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต

2. จากการศึกษาการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน โซเดียมอัลจิเนต มีความเป็นผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ ส่วนการเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเป็นผลึกน้อยที่สุด

3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น การเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์ มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยที่สุด

4. จากการศึกษาสมบัติการไหล พบว่าการเติมด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ การเติมอะการ์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีค่าดัชนีการไหลกันมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต มีค่าดัชนีการไหลน้อยที่สุด

5. จากการศึกษาการวัดสี พบว่าการเติมอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตทำให้ค่าความสว่างของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง ความสดใสของสีเพิ่มขึ้น โดยภาพรวมพบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรแสดงสีไปทางสีเหลืองทั้งหมด

6. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยอะการ์ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต ให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ไม่ได้ปรับปรุง การเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ์ มีสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด

7. จากการศึกษาการดูดซับน้ำ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยของอะการคาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตมีการดูดซับน้ำสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ การเติมอะการ ทำให้การดูดซับน้ำสูงสุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนนและโซเดียมอัลจิเนต มีการดูดซับน้ำต่ำที่สุด

8. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการเติมอะการ คาร์ราจีแนน หรือโซเดียมอัลจิเนต ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้งลดลง การเติมโซเดียมอัลจิเนต ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้งลดลงมากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และอะการ ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้งลดลงน้อยที่สุด

9. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมอะการ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนตสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ปรับปรุง และพอลิเมอร์ผสมที่เติมอะการ มีการย่อยสลายเร็วที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต มีการย่อยสลายช้าที่สุด

10. สำหรับสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด พบได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงด้วยโซเดียมอัลจิเนต 30% โดยน้ำหนัก โดยพิจารณาจากค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสความแข็งแรงกดและการดูดซับน้ำน้อยที่สุด ส่วนสมบัติการย่อยสลาย สมบัติการไหลและสมบัติทางความร้อนที่ดีที่สุด พบได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงด้วยอะการ 10% โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้สารก่อเจลมากกว่าสองชนิดร่วมกัน ซึ่งอาจช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติโดยรวมดียิ่งขึ้น

2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ในการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน เช่น ชนิดของดิน อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรดและด่างของดิน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] การส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังครั้งปี 2555. [Online]. Available : <http://www.tapiocaonline.com/index.php>; 30 มิถุนายน 2555
- [2] จูติมา วีระศิลป์. 2554. มันสำปะหลัง. สำนักพิมพ์ส่งเสริมพืชไร่และพืชสวนไทย.
- [3] นายไพศาล นาคพิพัฒน์. 2547. พลาสติกในชีวิตประจำวัน. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 28
- [4] G.O. Phillips, and P.A. Williams, 2000. **Handbook of hydrocolloids**. New York, CRC press. pp. 87-21.
- [5] วรวิทย์ โพนนิกร.2546. ผลของแป้งชนิดต่างๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝักกลบ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] F.J.R. Gonzalez, B.A. Ramsay and B.D. Favis. **High performance LDPE/thermoplastic starch blends: a sustainable alternative to pure polyethylene**, Polymer, 44 (2003) 1517–1526.
- [7] R. Nawang, I.D. Danjaji, U.S. Ishiaku, H.Ismail and Z.A.M. Ishak. **Mechanical properties of sago starch filled linear low density polyethylene (LLDPE) composites**, Polymer Testing, 20 (2001) 167–172.
- [8] ถักยณา หอมมณี. 2555. การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวเจ้าและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยโซเดียมอัลจิเนตและเจลาติน. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] ธนาวิดี ถีจากภักย์. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์
- [10] พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [Online]. Available : <http://www.nia.or.th/download/document/chapter2.pdf> ; 18 มิถุนายน 2554
- [11] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ.2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] พลาสติกชีวฐานจากพืชเศรษฐกิจไทย [Online].Available:http://www.rdi.ku.ac.th/kasetresearch52/03-foods/rungrong/food_00.html; 23 มิถุนายน 2555.
- [13] การใช้และการแปรรูปแป้งมันสำปะหลัง. [Online]. Available : <http://www.thailandtapiocastarch.net/download/download-th-17.pdf> ; 23 มิถุนายน 2555.

- [14] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์.2541. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [15] R. Gachter, and H. Muller. 1993. **Plastic Additive Handbook**. Hanser Publishers. Munich
- [16] M.J. Folkes and P.S. Hope. 1993. **Polymer Blends and Alloys**. New York
- [17] สมศักดิ์ วรมงคลชัย, อธิธิพล แจ่มชัด, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี. 2546. **ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ ฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] M.Lahaye and C.Rochas .1991. **Chemical structure and physico-chemical properties of agar**. **Hydrobiologia**. 126. pp. 137-148.
- [19] W.R.Thomus. 1992. **Carrageenan in Thickening and gelling agents for foods**. Edited by Imeson. A. London. Blackie Academic & Professional. pp. 25-39.
- [20] วรณา ดุลยชัย. 2551. เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่2. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย . กรุงเทพฯ
- [21] เจริญ นาคะสรรค์. 2546.เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก.กรุงเทพฯ
- [22] เกศณี ตรีภูทิวากร, วิชา สุโรจนะเมธากุล, ประชา บุญญศิริกุล และสมยศ จรรยาวิลาส. การทำฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง. วารสารอาหาร, 26 (2529) 249-262.
- [23] สุทธิ รอดทั้ง. 2548. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง/แป้ง/แป้งคัดแปร วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [24] พัฒนา บัวดี. 2553. ผลของแคลปคาร์ราจีแนนที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] กุริสา ทศวิไล, อรพิน เกิดชูชื่น และ ณัฏฐา เล่าหกุลจิตต์. 2553. อิทธิพลของ K-คาร์ราจีแนน ต่อคุณสมบัติทางเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง. โครงการพิเศษ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [26] D. Phan , F. Debeaufor, A. Voilley and D. Luu. **Biopolymer interactions affect the functional properties of edible films based on agar, cassava starch and arabinoxylan blends**, Journal of Food Engineering, 90 (2009) 548–558.

- [27] A. Cordoba, N. Cuellar, M. Gonzalez and J. Medina. **The plasticizing effect of alginate on thermoplastic starch/glycerin blends**, Carbohydrate Polymers, 73 (2008) 409-416.
- [28] W. Shujun, Y. Jingao and Y. Jinglin. **Preparation and charecterizaion of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends**, Polymer Degradation and Stability, 87 (2005) 395-401.
- [29] Y. Wu, F. Geng, P. R. Chang, J. Yu and X. Ma. **Effect of agar on the microstructure and performance of potato starch film**, Carbohydrate Polymers, 76 (2009) 299–304.
- [30] A.G. Pedroso and D.S. Rosa, **Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends**, Carbohydrate Polymers, 59 (2005) 1-9.
- [31] S. Garg and A. K. Jana. **Studies on the properties and characteristics of starch–LDPE blend films using cross-linked, glycerol modified, cross-linked and glycerol modified starch**, European Polymer Journal, 43 (2007) 3976–3987.
- [32] E.M. Teixeiraa, A.L.D. Rózb, A.J. F. Carvalhoc and A.A.S. Curvelo. **The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch**, Carbohydrate Polymers, 69 (2007) 619–624.
- [33] R.C.R. Souza and C.T. Andrade. **Processing and properties of thermoplastic starch and its blends with sodium alginate**, Journal of Applied Polymer Science, 81(2) (2001) 412-420.
- [34] M. Sabetzadeh, R.Bagheri and M. Masoomi. **Effect of Corn Starch Content in Thermoplastic Starch/Low-Density Polyethylene Blends on Their Mechanical and Flow Properties**, Journal of Applied Polymer Science, 126 (2012) 63-69.
- [35] M.A. Huneault and H. Li. **Preparation and Properties of Extruded Thermoplastic Starch/Polymer blends**, Journal of Applied Polymer Science, 126 (2012) 96–108.
- [36] C.M.O. Müller, J.M. Müller and F. Yamashita. 2006. **The effect of sodium alginate and glycerol on properties of laminated thermoplastic starch**. Project of departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos – Universidade Estadual de Londrina, Campus University, Londrina, Brazil.
- [37] American Standard for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastic**. ASTM D 624. ASTM D 570. **Annual Book of ASTM Standard 08.01.**, Philadelphia.
- [38] ASTM D 638. 1992. **Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic**. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.

- [39] ASTM D 2240. 2000. **Standard Test Method for Rubber Property-Duroter Hardness**. West Conshohocken : American Society for Testing and Materials.
- [40] ASTM D 256. 1993. **Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic and Electrical Insulating Material**. Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [41] R. Chandra and R. Rustgi. **Biodegradable polymers**, Progress in Polymer Science, 23 (1998) 1273 – 1335.
- [42] Massey, B. S. 1983. **Mechanics of Fluids (Fifth ed.)**. Van Nostrand Reinhold (UK). ISBN 0-442-30552-4.
- [43] เข็นททัย แน่นหนา. 2549. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [44] C.Y. Huang, Roan., M.C.Kuo and W.L.Lu. **Effect of compatibiliser on the biodegradation and mechanical properties of high-content starch/low-density polyethylene blend**. Polymer Degradation and Stability, 90 (2005) 95-105.
- [45] J.M. Fang, P.A. Fowler, J. Tomkinson and C.A.S. Hill. **The preparation and characterization of a series of chemically modified potato starches**. Carbohydrate Polymers, 47 (2002) 245-252.
- [46] A.Pawlak, M.Mucha and K.Aoi. **Preparation of a Novel Thermoplastic Starch (TPS) Material using Ethylenebisformamide as the Plasticizer**. Starch, 58 (2006) 330-337
- [47] วนิตา ป้อมเค็ง. 2556. การเตรียมและปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยสารก่อเจล เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] C.T. Aranilla, N.Nagasawa, A.Bayquen and A.D. Rosa. **Synthesis and characterization of carboxymethyl derivatives of Kappa-carrageenan**. Carbohydrate Polymer, 87 (2012) 1810-1816.
- [49] J. Zhang, S. Xu, S. Zhang, and Z. Du. **Preparation and Characterization of Tamarind Gum/Sodium Alginate Composite Gel Beads**. Iranian Polymer Journal, 17(2008) 899-906.
- [50] S. Janaswamy and R. Chandrasekaran. **Three-dimensional structure of the sodium salt of iota-carrageenan**. Carbohydrate Research, 335 (2001)181-194.

- [50] P. Kanti, K. Srigowri, J. Madhuri, B. Smitha and S. Sridhar. **Dehydration of ethanol through blend membranes of chitosan and sodium alginate by pervaporation.** Separation and Purification Technology, 40 (2004) 259–266.
- [51] U. Funke, W. Bergtraller and M.G. Lindhauer. **Processing and characterization of biodegradable products based on starch.** Polymer Degradable and Stability, 58 (1998) 293-296.
- [52] A. Cordoba, N. Cuellar and M.J. Gonzalez. **The plasticizing effect of alginate on the thermoplastic starch/glycerin blends.** Carbohydrate Polymers, 73 (2008) 409-416.
- [53] X. Ma, J. Yua and J. F. Kennedy. **Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites.** Carbohydrate Polymers, 62 (2005) 19–24.
- [54] นิสานาถ หลิมศิริวงษ์ สุภาวรัตน์ รัตนกิจ และรัชชญา คงจินตมานุณี. 2553. การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเหนียวโดยใช้ผงวุ้นและเส้นใยฝ้าย. โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [55] D. Lafargue, D. Lourdin and J. Doublier. **Film-forming properties of a modified starch /carrageenan mixture in relation to its rheological behavior.** Carbohydrate Polymers, 70 (2007) 101-107.
- [56] คารินทร์ โพธิ์ศรี ถักษณา หอมมณี และปาริชาติ จิรภักเสถียร. 2551. การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเหนียวด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ. โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาคผนวก ก

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเอทิลีนระหว่าง TPCS และ LDPE

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)															
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TPCS70/LDPE30	0.00	14.75	19.33	24.38	28.36	29.52	32.97	34.26	35.85	35.05	35.63	36.14	36.65	37.16	38.29	14.75
TPCS70/LDPE30/A10	0.00	89.45	98.42	100.23	101.34	102.12	103.89	104.45	103.34	102.21	101.89	100.23	99.88	99.12	99.23	99.34
TPCS70/LDPE30/A20	0.00	56.23	62.24	63.48	64.52	64.87	64.99	65.47	66.47	65.84	65.65	64.87	64.64	64.31	63.87	63.78
TPCS70/LDPE30/A30	0.00	49.45	52.48	54.57	54.68	54.98	52.57	51.14	50.87	50.36	46.47	46.25	45.89	45.97	44.25	44.47
TPCS70/LDPE30/C10	0.00	59.88	63.54	63.57	62.62	61.13	61.18	60.52	60.57	59.95	59.58	59.69	59.48	59.12	56.65	56.36
TPCS70/LDPE30/C20	0.00	54.89	57.47	59.26	59.87	59.62	56.14	54.42	53.23	53.74	49.48	49.51	49.32	48.87	47.74	47.45
TPCS70/LDPE30/C30	0.00	32.14	38.78	40.15	43.26	44.23	45.48	46.48	47.23	49.71	47.98	47.68	47.41	47.23	45.47	45.25
TPCS70/LDPE30/SA10	0.00	25.54	35.25	37.63	39.87	41.14	42.58	42.47	43.36	44.14	44.85	44.78	44.74	44.65	44.58	44.54
TPCS70/LDPE30/SA20	0.00	18.26	28.58	30.74	32.23	33.45	35.65	38.41	38.63	39.25	40.12	41.36	42.47	42.58	42.69	42.58
TPCS70/LDPE30/SA30	0.00	16.84	24.87	28.63	30.25	31.15	34.48	37.36	37.47	38.36	38.84	39.95	40.23	40.85	40.63	40.98

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
TPCS70/LDPE30	38.17	38.9	39.61	39.65	39.65	39.38	39.56	38.01	37.07	36.54	36.01	35.89	35.54	35.46	35.24
TPCS70/LDPE30/A10	99.12	98.95	98.87	98.65	98.41	98.87	97.95	97.87	97.65	97.32	96.54	95.74	94.65	93.25	92.36
TPCS70/LDPE30/A20	63.65	63.54	63.43	63.12	62.87	62.64	62.42	62.21	61.36	60.41	60.56	60.84	60.41	60.23	60.14
TPCS70/LDPE30/A30	44.41	44.31	43.85	43.74	43.65	43.54	43.41	43.32	43.25	43.21	43.20	43.18	43.16	43.15	43.14
TPCS70/LDPE30/C10	56.14	55.54	54.89	54.87	54.85	54.74	54.75	54.71	54.65	54.64	54.63	54.61	54.65	54.54	54.32
TPCS70/LDPE30/C20	47.24	46.87	45.47	45.65	45.85	45.63	45.74	45.63	45.45	45.25	45.63	45.41	45.25	45.20	45.18
TPCS70/LDPE30/C30	45.10	43.92	42.82	42.61	42.54	42.47	42.35	41.54	41.43	41.34	41.32	41.21	41.14	41.10	41.05
TPCS70/LDPE30/SA10	44.49	44.41	44.32	44.30	44.28	44.26	44.25	44.24	44.18	44.16	44.10	43.68	43.45	43.31	42.25
TPCS70/LDPE30/SA20	42.54	42.48	42.35	42.24	42.21	42.18	42.15	42.14	42.12	42.10	41.08	41.06	40.84	40.64	40.41
TPCS70/LDPE30/SA30	40.87	40.82	41.45	41.89	41.56	41.54	41.15	41.36	40.48	40.24	39.98	39.74	39.62	38.84	38.63

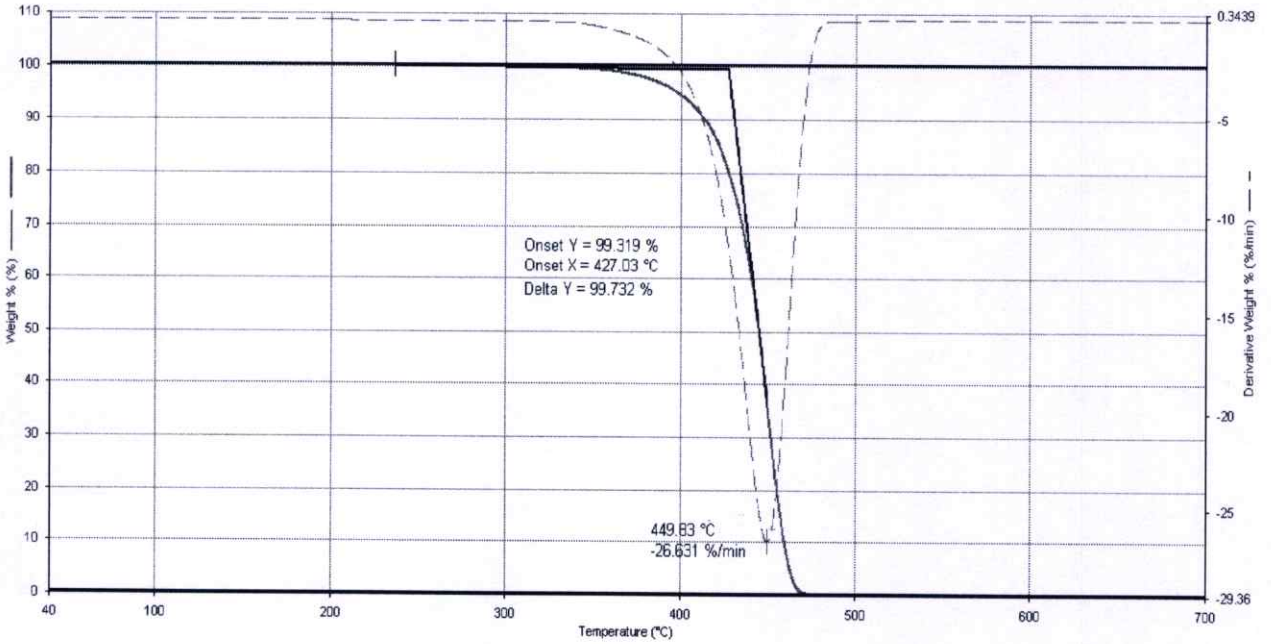
ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE

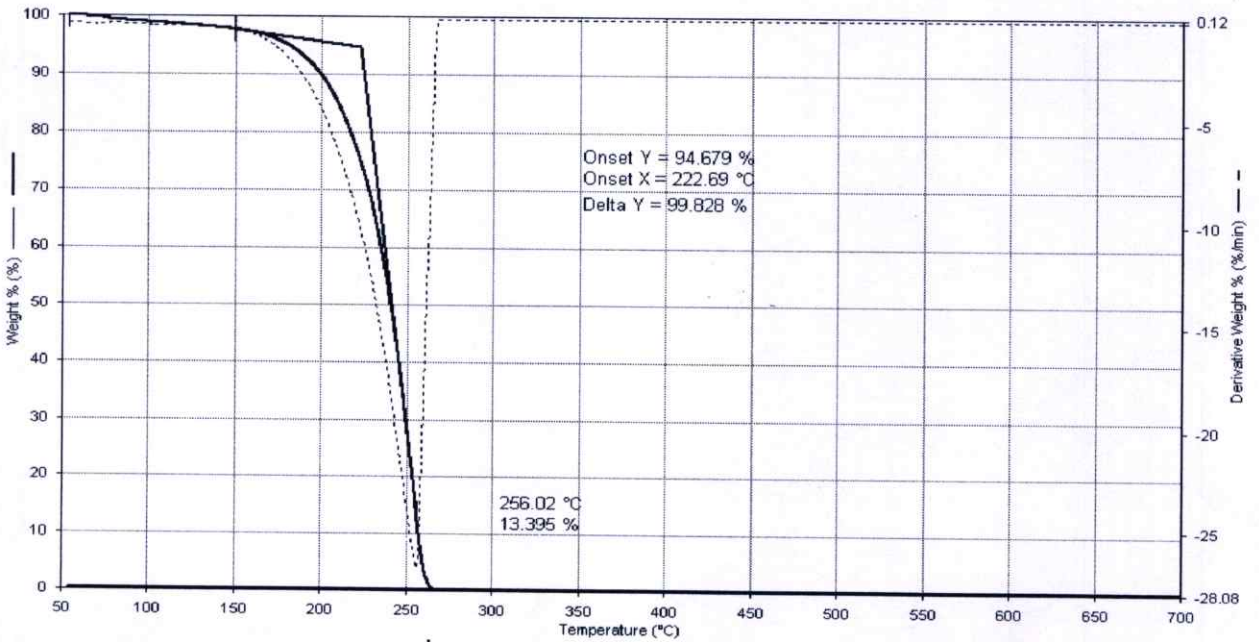
ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล				
	ความเค้น (MPa)	เปอร์เซ็นต์ความเครียด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งกด (Shore D)	ความแข็งแรงกระแทก (kJ/mm ²)
LDPE	9.31±0.20	246.05±1.67	70.84±5.87	29.60±2.01	30.43±2.00
TPCS/LDPE	4.23±0.13	142.66±1.37	34.89±0.78	22.90±2.12	18.90±2.45
TPCS /LDPE /A10	4.93±0.24	122.34±5.18	53.54±2.56	25.72±0.98	15.67±1.12
TPCS/LDPE/A20	5.41±0.21	95.67±7.29	79.45±2.53	29.63±0.14	13.21±1.96
TPCS /LDPE /A30	5.94±0.67	77.18±2.24	108.78±2.10	31.68±2.21	10.87±2.93
TPCS/LDPE /C10	5.23±0.37	110.34±1.87	60.57±2.35	29.80±1.45	13.67±2.90
TPCS/LDPE /C20	5.71±0.14	90.67±1.45	92.31±5.81	32.63±0.84	11.78±0.31
TPCS /LDPE /C30	6.14±0.67	65.67±1.67	122.47±2.12	36.86±0.54	10.24±2.12
TPCS/LDPE/SA10	5.57±0.67	91.23±3.45	71.82±2.56	33.40±0.12	11.13±1.56
TPCS /LDPE /SA20	6.21±0.14	61.62±1.76	113.21±2.53	39.34±0.34	9.87±2.71
TPCS /LDPE /SA 30	6.87±2.10	40.84±0.78	146.87±1.94	45.58±0.54	9.04±2.12

ภาคผนวก ค

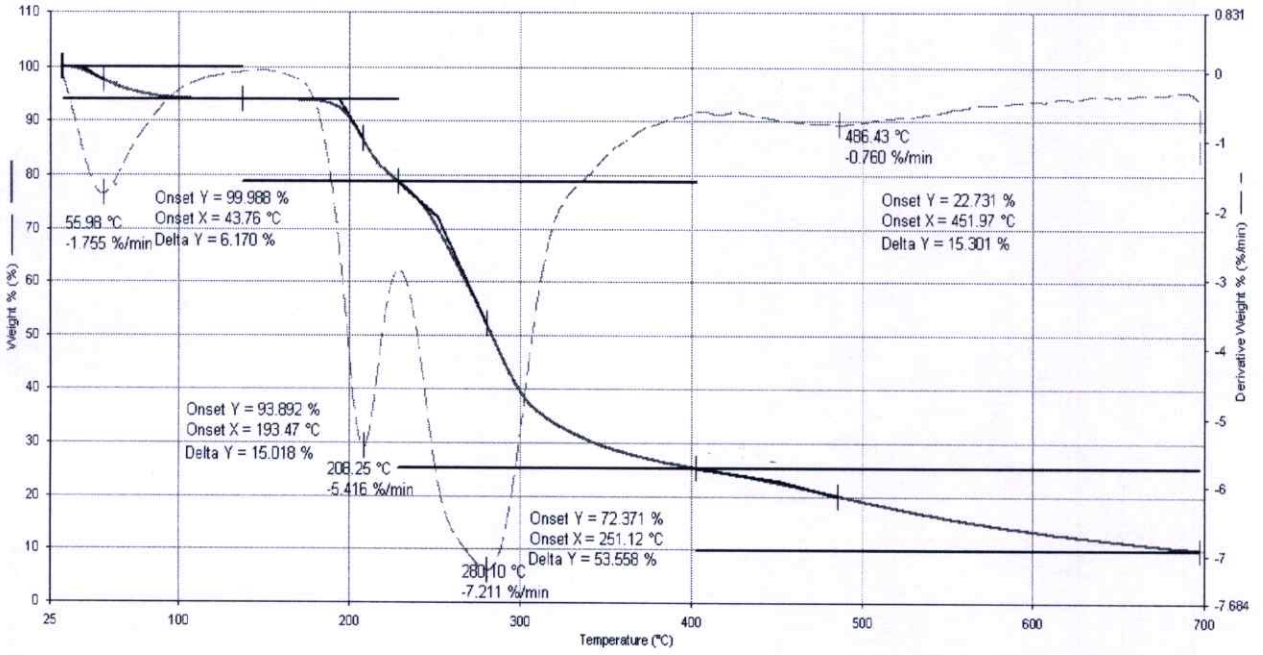
TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ระหว่าง TPCS และ LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยอะการคาร์ราจีแนน และโซเดียมอัลจิเนต



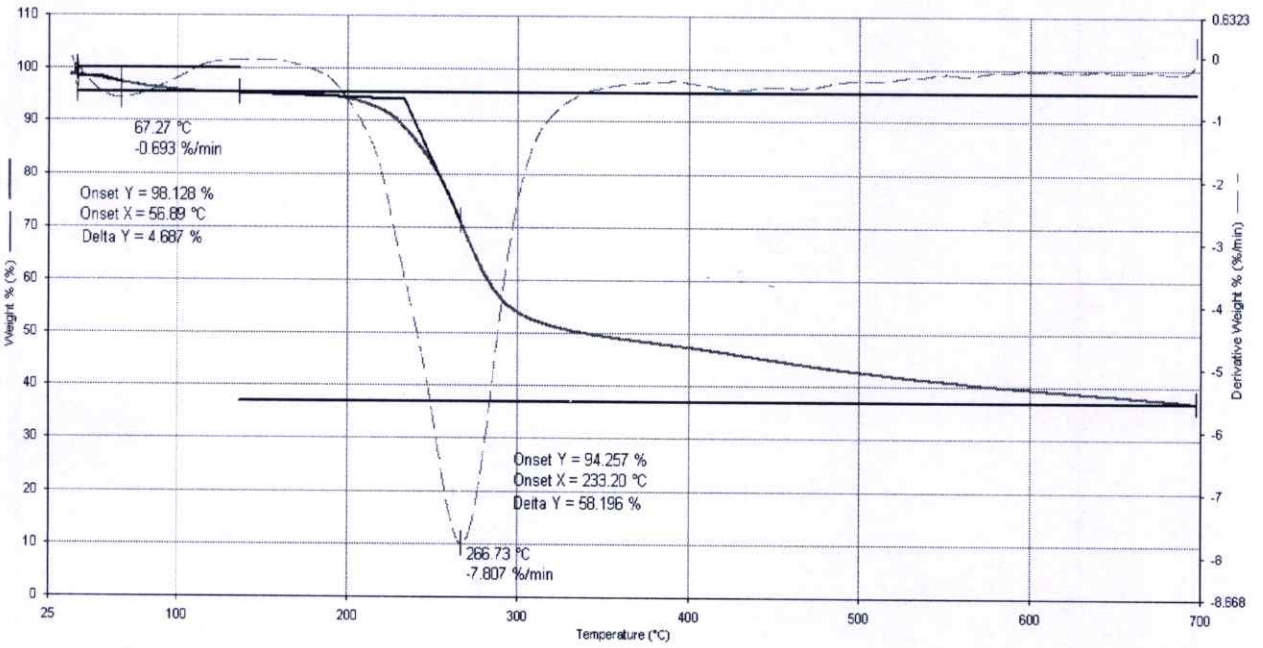
รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)



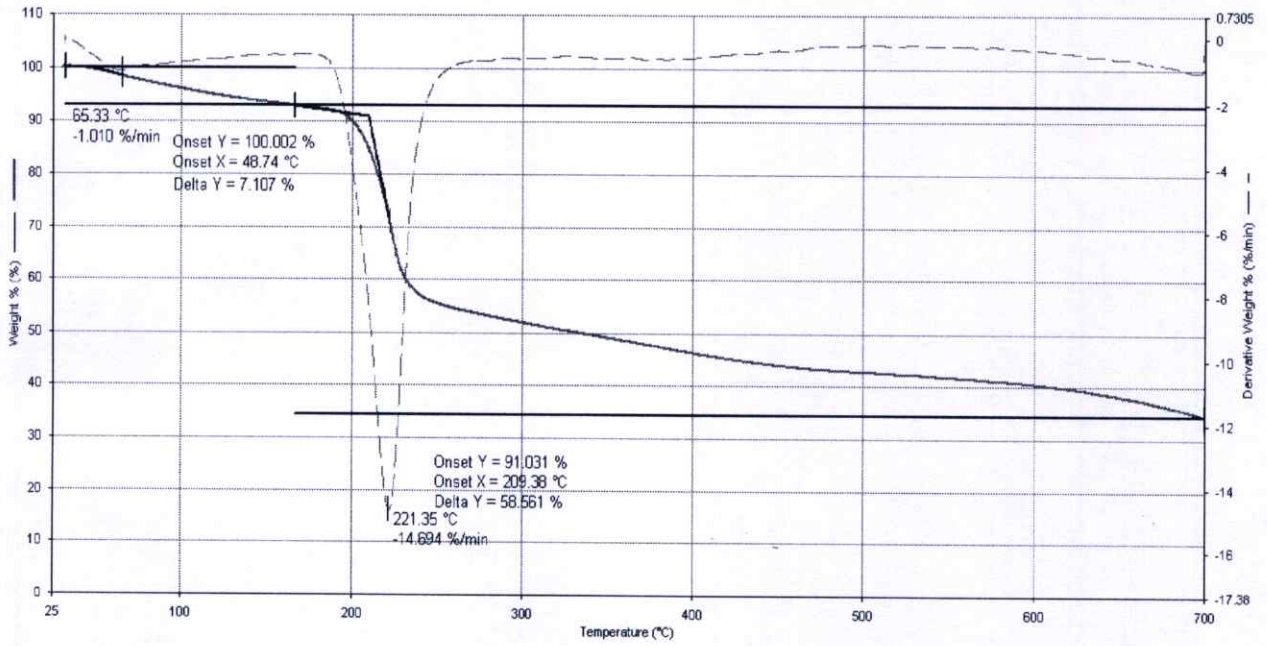
รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรมของกลีเซอรอล



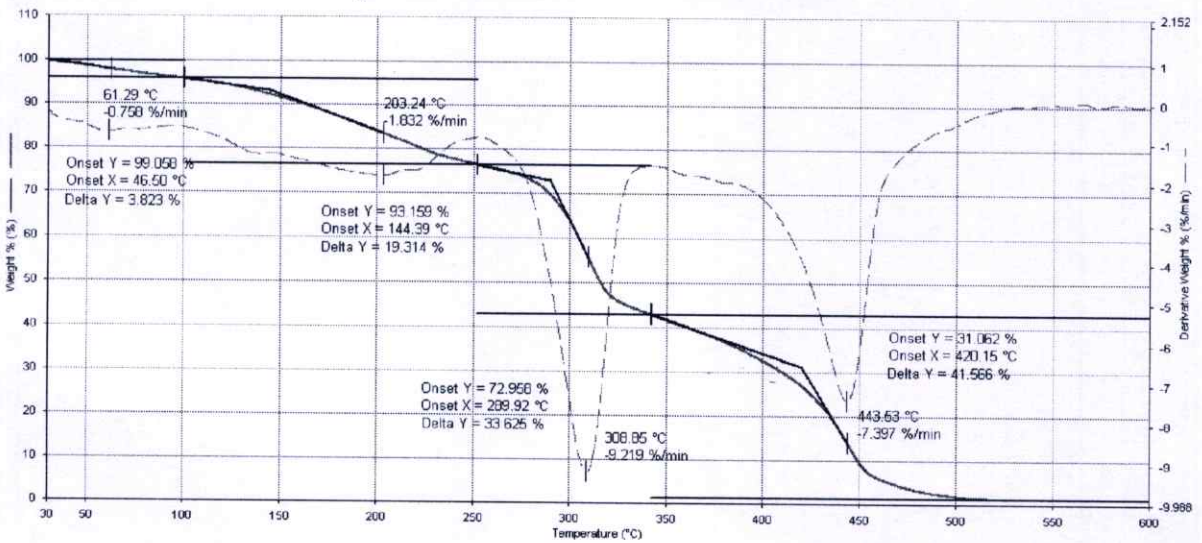
รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรมของอะซิการ์



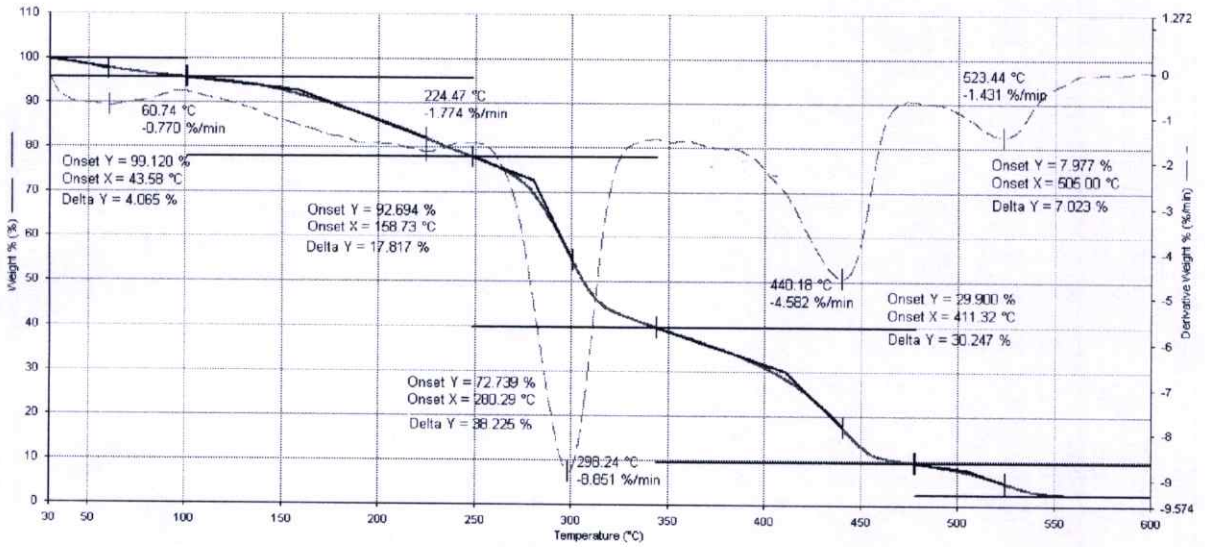
รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรมของคาร์ราจีแนน



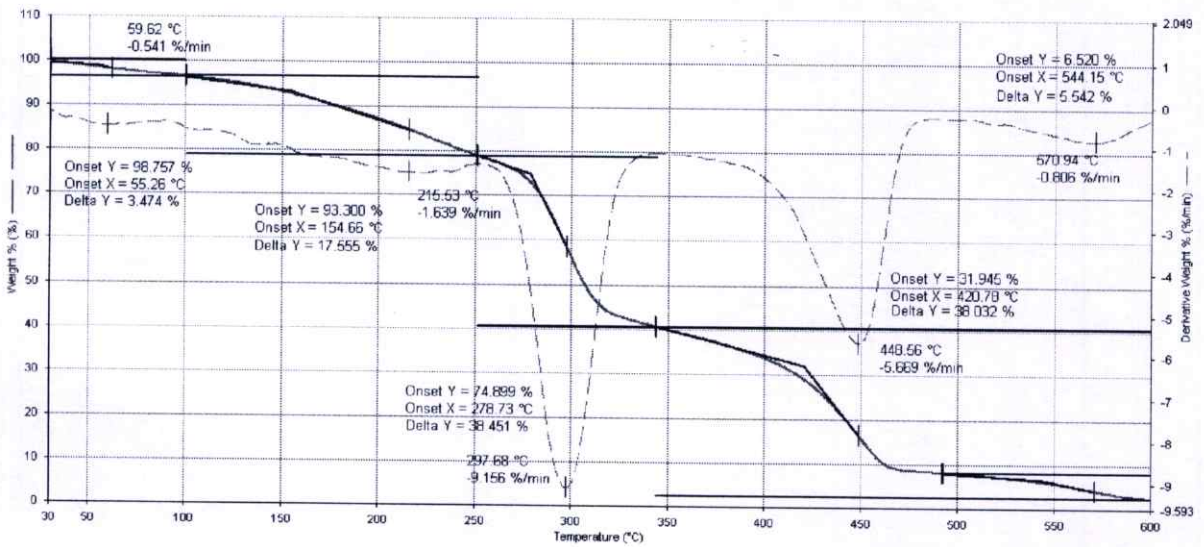
รูปที่ ค.6 เทอร์โมแกรมของโพลีเอทิลีน



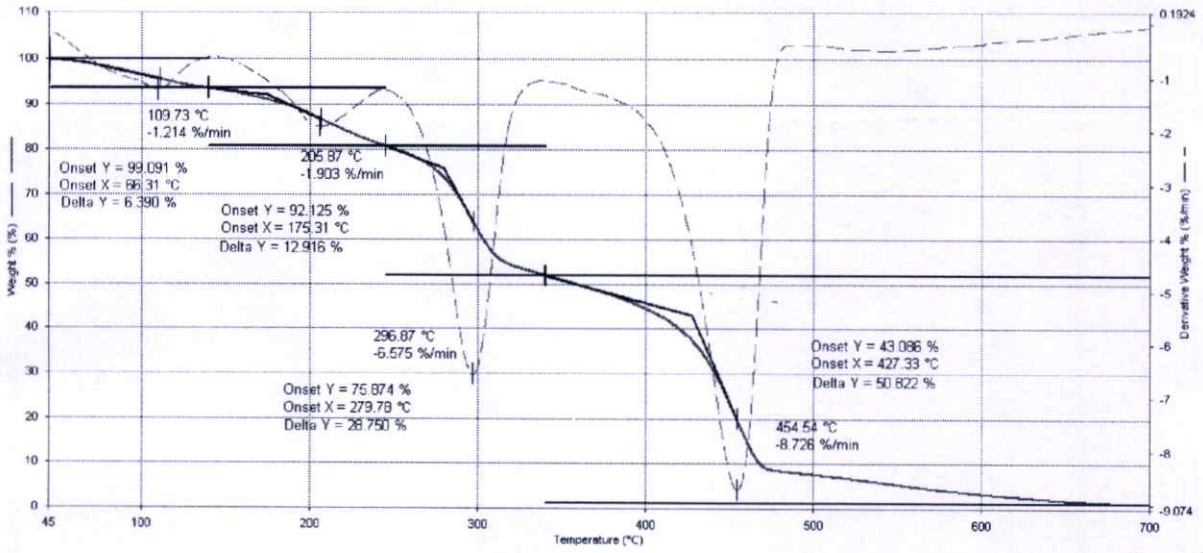
รูปที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE



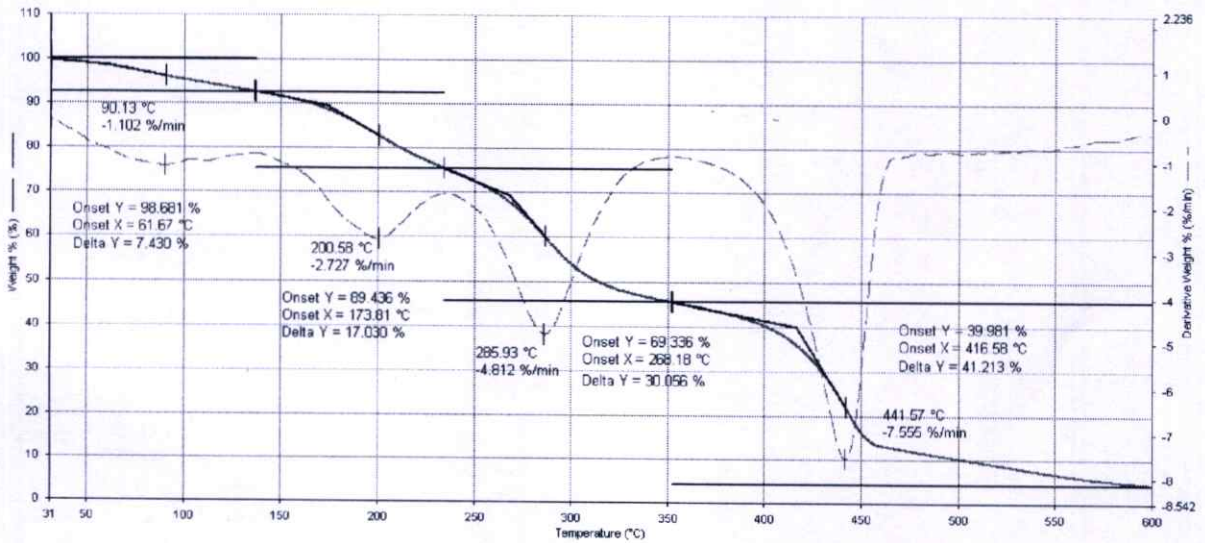
รูปที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมอะการ์ 10%



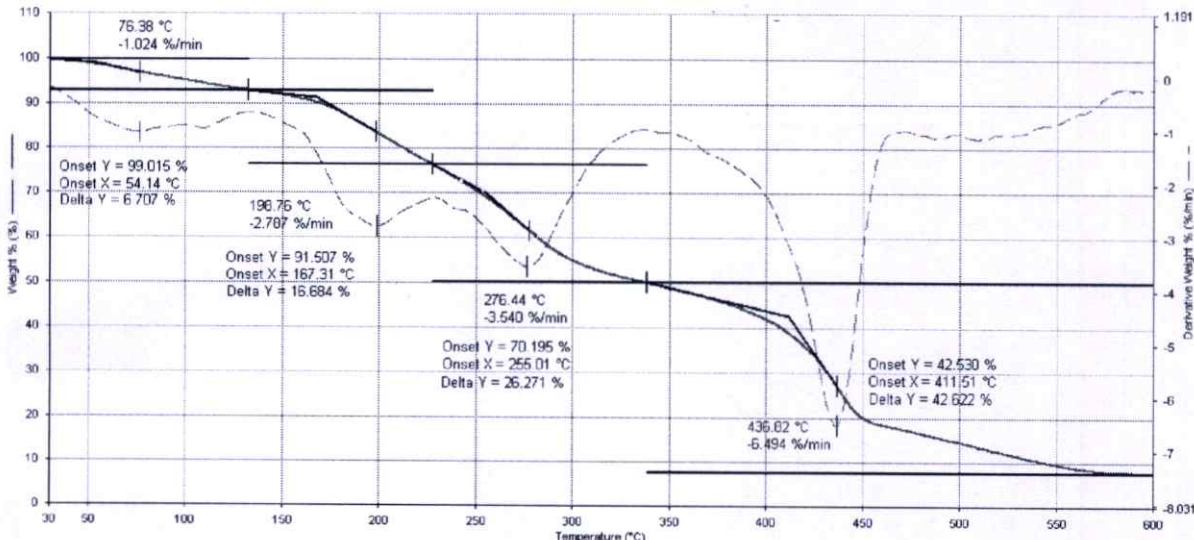
รูปที่ ค.9 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมอะการ์ 20%



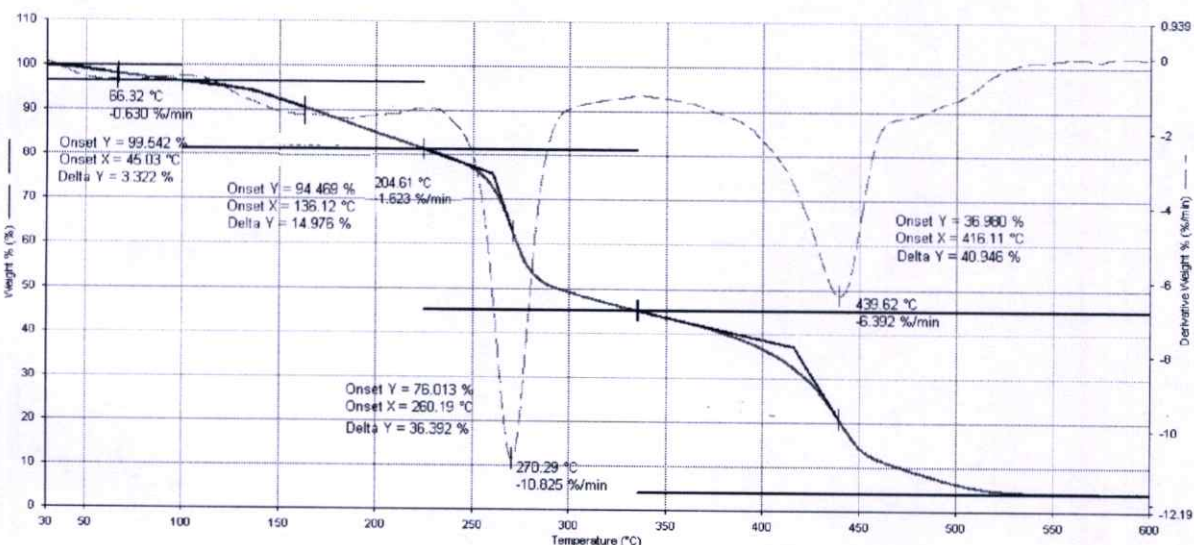
รูปที่ ค.10 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมอะคาร์ 30 %



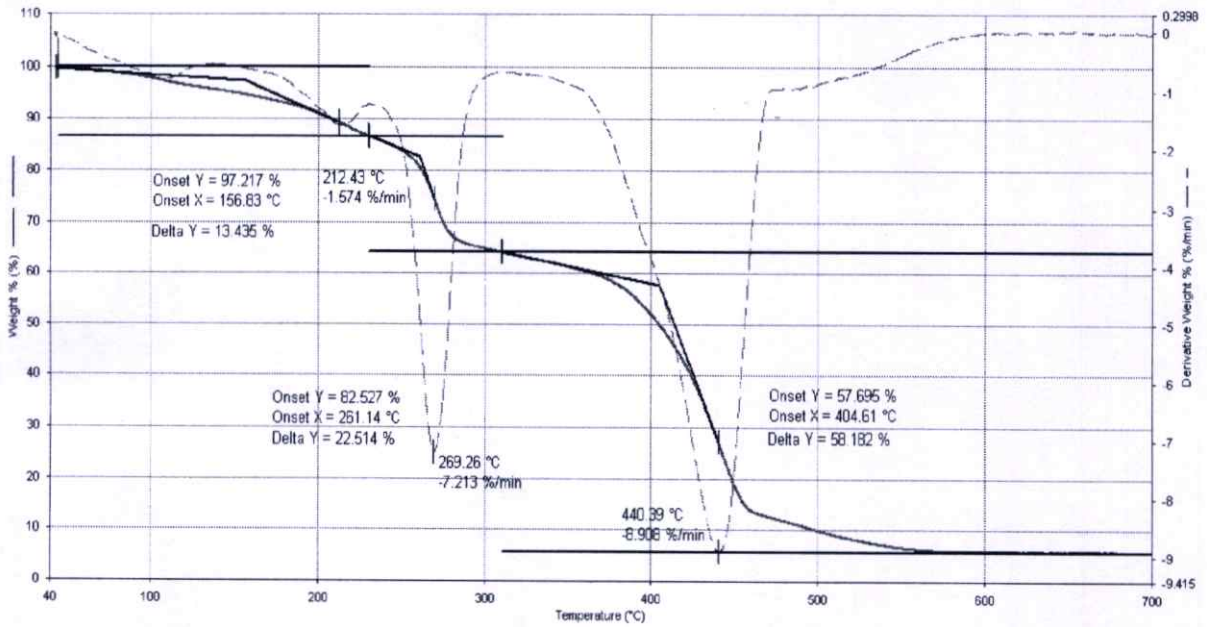
รูปที่ ค.11 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมคาร์ราจีแนน 10%



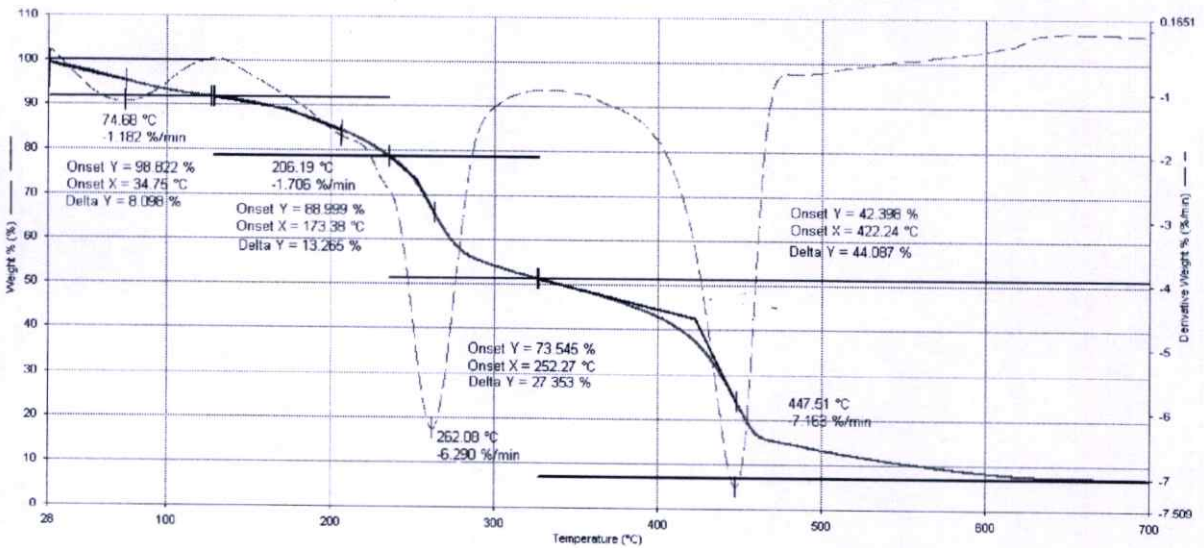
รูปที่ ค.12 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมคาร์ราจีแนน 20%



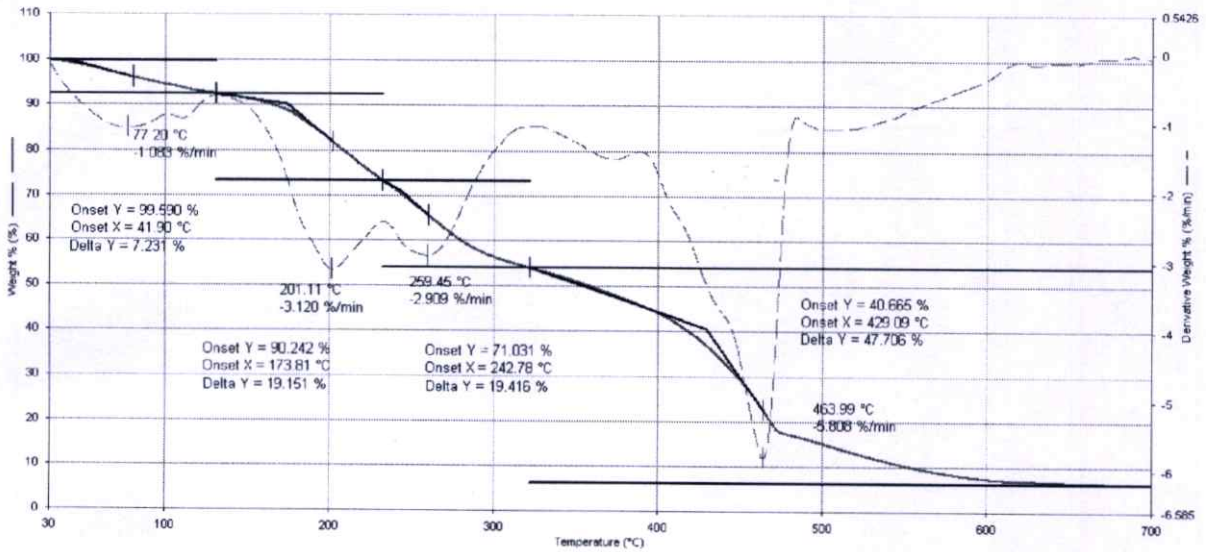
รูปที่ ค.13 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมคาร์ราจีแนน 30%



รูปที่ ค.14 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมโซเดียมอัลจินเนต 10%



รูปที่ ค.15 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่เติมโซเดียมอัลจินเนต 20%



รูปที่ ค.16 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE โขติผสมอัลจินต 30%

ภาคผนวก ง

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย
อะการ์ที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทำการฝังดิน 0 1 2 และ 3 เดือน

เดือน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความเค้น (MPa)	ความเครียด (%)	มอดุลัส (MPa)
0	TPCS/LDPE	4.23±0.45	142.66±1.23	34.89±0.56
	TPCS/LDPE/A10	4.85±0.23	120.98±1.32	58.54±0.67
	TPCS/LDPE/A20	5.47±0.14	101.34±1.34	89.45±1.58
	TPCS/LDPE/A30	5.84±0.24	70.94±0.87	93.78±2.60
1	TPCS/LDPE	3.45±0.13	111.54±0.98	27.81±1.12
	TPCS/LDPE/A10	5.23±0.04	98.64±0.90	28.74±1.34
	TPCS/LDPE/A20	5.71±0.67	85.23±0.63	42.23±0.99
	TPCS/LDPE/A30	6.14±0.14	60.71±0.87	57.94±2.09
2	TPCS/LDPE	2.81±0.12	89.45±0.47	20.65±1.23
	TPCS/LDPE/A10	2.01±0.14	85.17±2.98	14.94±0.98
	TPCS/LDPE/A20	2.37±0.34	72.76±0.61	18.64±2.34
	TPCS/LDPE/A30	2.68±0.23	52.81±1.31	22.97±0.95
3	TPCS/LDPE	2.61±0.21	65.45±1.43	18.17±1.45
	TPCS/LDPE/A10	1.67±0.45	61.46±2.42	10.26±2.34
	TPCS/LDPE/A20	1.84±0.34	57.94±2.45	13.41±2.45
	TPCS/LDPE/A30	2.01±0.23	48.21±0.89	16.14±0.78

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทำการฝังดิน 0 1 2 และ 3 เดือน

เดือน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความเค้น (MPa)	ความเครียด (%)	มอดุลัส (MPa)
0	TPCS/LDPE	4.23±0.45	142.66±1.23	34.89±0.56
	TPCS/LDPE/C10	5.23±0.67	120.98±1.12	60.57±0.98
	TPCS/LDPE/C20	5.71±0.67	101.34±1.09	92.34±0.85
	TPCS/LDPE/C30	6.14±0.67	70.94±0.90	128.47±0.24
1	TPCS/LDPE	3.45±0.13	111.54±0.98	27.81±1.12
	TPCS/LDPE/C10	2.61±0.5	94.23±0.45	30.17±0.59
	TPCS/LDPE/C20	2.87±0.56	81.16±1.43	45.87±0.87
	TPCS/LDPE/C30	3.14±2.23	57.81±1.76	67.94±0.67
2	TPCS/LDPE	2.81±0.12	89.45±1.65	20.65±1.23
	TPCS/LDPE/C10	2.28±0.87	79.65±2.32	18.92±0.90
	TPCS/LDPE/C20	2.51±0.65	70.14±1.65	21.45±1.43
	TPCS/LDPE/C30	2.84±0.34	48.12±0.98	24.96±0.56
3	TPCS/LDPE	2.61±0.21	65.45±1.43	18.17±1.45
	TPCS/LDPE/C10	1.82±0.98	59.17±1.45	12.14±1.34
	TPCS/LDPE/C20	1.94±0.45	48.57±2.21	16.23±0.90
	TPCS/LDPE/C30	2.17±0.79	45.23±1.23	19.87±0.34

สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPCS และ LDPE ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยโซเดียมอัลจินेटที่ปริมาณ 0 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก ที่ทำการฝังดิน 0 1 2 และ 3 เดือน

เดือน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความเค้น (MPa)	ความเครียด (%)	มอดุลัส (MPa)
1	TPCS/LDPE	4.23±0.45	142.66±1.23	34.89±0.56
	TPCS/LDPE/SA10	5.37±0.56	81.23±2.10	71.82±1.89
	TPCS/LDPE/SA20	6.41±0.24	60.56±1.45	113.21±1.12
	TPCS/LDPE/SA30	7.57±0.56	42.78±0.34	140.66±0.09
1	TPCS/LDPE	3.45±0.13	111.54±0.98	27.81±1.12
	TPCS/LDPE/SA10	2.97±0.34	90.17±0.67	48.17±0.97
	TPCS/LDPE/SA20	3.26±0.23	76.42±0.13	67.12±1.34
	TPCS/LDPE/SA30	3.57±0.56	44.91±0.54	72.17±1.56
2	TPCS/LDPE	2.81±0.12	89.45±0.23	20.65±0.23
	TPCS/LDPE/SA10	2.53±0.43	74.23±0.89	24.18±0.87
	TPCS/LDPE/SA20	2.74±0.66	66.98±0.78	31.53±1.45
	TPCS/LDPE/SA30	3.08±0.32	44.89±0.65	42.97±1.23
3	TPCS/LDPE	2.61±0.21	65.45±1.43	18.17±1.45
	TPCS/LDPE/SA10	2.07±0.87	56.71±1.33	13.32±0.64
	TPCS/LDPE/SA20	2.23±0.69	44.21±1.87	17.58±0.32
	TPCS/LDPE/SA30	2.42±0.46	40.18±0.61	19.23±0.89

ประวัติผู้ทำงานวิจัย

ชื่อ	ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์
วันเกิด	22 ธันวาคม 2531
ภูมิลำเนา	ชลบุรี
ที่อยู่	443/19 ม.5 ต.หนองไผ่แก้ว อ.บ้านบึง จ.ชลบุรี 20220
การศึกษา	<ul style="list-style-type: none"> - ระดับมัธยมต้น โรงเรียนชลกันยานุกูล - ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนชลกันยานุกูล - ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง