

การเตรียมและปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น
ต่ำและเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวด้วยสารก่อเจล

PREPARATION AND MODIFICATION OF POLYMER BLEND
BETWEEN LOW-DENSITY POLYETHYLENE AND
THERMOPLASTIC MUNG BEAN STARCH USING GELLING
AGENTS

ลักษณา หอมหนะจี

LUXSANA HOMMANEE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-TM-014-018

การเตรียมและปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น
ต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเหนียวด้วยสารก่อเจล

PREPARATION AND MODIFICATION OF POLYMER BLEND
BETWEEN LOW-DENSITY POLYETHYLENE AND
THERMOPLASTIC MUNG BEAN STARCH USING GELLING
AGENTS

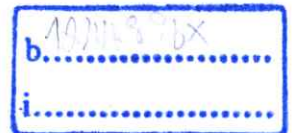


T123722

ลักษณา หอมมณี

LUXSANA HOMMANEE

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...123722
รับ, เดือน, ปี 27 ม.ค. 2555



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-014-018

**PREPARATION AND MODIFICATION OF POLYMER BLEND
BETWEEN LOW-DENSITY POLYETHYLENE AND
THERMOPLASTIC MUNG BEAN STARCH USING GELLING
AGENTS**

LUXSANA HOMMANEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN TECHNOLOGY POLYMER
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-SC-M-014-018**

COPYRIGHT 2012

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมและปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งถั่วเขียว
ด้วยสารก่อเจล

Preparation and Modification of Polymer Blend Between
Low-Density Polyethylene and Thermoplastic Mung Bean
Starch Using Gelling Agents

นักศึกษา

นางสาวลักขณา ทอมมณี

รหัสประจำตัว

52651206

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2555 เวลา 9.00 - 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 ชั้น 5 อาคารจุฬาภรณ์วิทยาลัย

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิน ชนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 19 เดือน 4 ปี พ.ศ. 55

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียวด้วยสารก่อเจล
นักศึกษา	นางสาวลัทธนา หอมมณี
รหัสนักศึกษา	52651206
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2554
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ประชญาวารการ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการเตรียมและสมบัติต่างๆของพลาสติกย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene, LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียว (Thermoplastic Mung Bean starch, TPMBS) โดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) เป็นสารช่วยผสม จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ด้วยสารก่อเจล ได้แก่ เจลาติน (Gelatin) เพกติน (Pectin) หรือคาร์ราจีแนน (Carrageenan) ที่ปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้จากการขึ้นรูปมาศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลาย พบว่า สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนน มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เนื่องจากมีค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงที่สุด และเมื่อศึกษาสันฐานวิทยา พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินหรือคาร์ราจีแนนมีความเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของ TPMBS จากการทดสอบการดูดซึมน้ำ พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงมีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่า การเติมเจลาตินหรือเพกตินส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น และจากการศึกษาการย่อยสลาย พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีการย่อยสลายได้ดีขึ้นเมื่อมีการเติมเจลาติน เพกตินหรือคาร์ราจีแนน

Thesis Title	Preparation and modification of polymer blend between low-density polyethylene and thermoplastic mung bean starch using gelling agents
Student	Miss. Luxsana Hommanee
Student ID	52651206
Degree	Master of Science
Program	Technology Polymer
Year	2011
Thesis Advisor	Asso.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This research aimed to focus on the preparation and properties of degradable plastic from thermoplastic mung bean starch (TPMBS) blended with Low-density Polyethylene (LDPE), compatibilized by Maleic anhydride-grafted-polyethylene (MAPE). The LDPE/TPMBS blend compounded by internal mixer and molded by injection molding. Then, the LDPE /TPMBS blend was modified by different gelling agents, i.e. gelatin pectin or carrageenan at 0 2 4 6 8 and 10% wt. Different LDPE/TPMBS blends were then analysed for physical, mechanical, morphological, thermal and biodegradable properties. It was found that the mechanical properties of the LDPE/TPMBS blend modified by carrageenan presented the highest maximum load, tensile strength and Young's modulus. For morphology, obtained from Scanning Electron Microscope (SEM), the results illustrated that the pectin or carrageenan were well compatible with the TPMBS phase of the LDPE /TPMBS blend. Besides, the lowest water absorption was found in the LDPE/TPMBS blend modified by the gelatin. Thermal stability of the LDPE/TPMBS blend was improved by the addition of the gelatin or pectin. In addition, biodegradability were improved by using the gelatin, pectin or carrageenan.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ เกี่ยวกับโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธ์ และ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการวิจัยโดยช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการวิจัยฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุคติ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ตลอดจนการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ ที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ลัทธนา หอมมณี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย	I
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูปภาพ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 พลาสติก	4
2.2 พลาสติที่ย่อยสลายได้	5
2.3 พลาสติที่ย่อยสลายได้ด้วยทางชีวภาพ	6
2.3.1 ประเภทของพลาสติที่ย่อยสลายได้ด้วยทางชีวภาพ	7
2.3.2 เทคโนโลยีพลาสติจากแป้ง	8
2.3.2.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก	8
2.3.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	8
2.3.2.3 แป้งกราฟต์โคพอลิเมอร์	11
2.3.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	12
2.3.3.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน	12
2.3.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป	12
2.3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์	13
2.3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด	13
2.3.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 แป้ง	14
2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง	14
2.4.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	19
2.4.3 สมบัติของแป้ง	22
2.4.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย	22
2.4.3.2 การเกิดเจลลาคีโนเซชัน	22
2.4.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	23
2.4.4 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	25
2.5 พลาสติกไซเซออร์	26
2.5.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซออร์	26
2.6 ถั่วเขียว	27
2.6.1 แป้งถั่วเขียว	27
2.7 เจลาติน	28
2.8 เพกติน	29
2.9 คาร์ราจีแนน	31
2.10 สารช่วยผสม	33
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	42
3.1 สารเคมี	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	44
3.3 วิธีการทดลอง	46
3.4 วิธีการทดสอบ	50
3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	50
3.4.1.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง โมดูลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด	50
ณ จุดขาด	
3.4.1.2 ความแข็งกด	51
3.4.1.3 สมบัติความแข็งแรงกระแทก	51
3.4.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	52
3.4.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน	52
3.4.5 ปริมาณการดูดซับน้ำ	52
3.4.6 การวิเคราะห์ห่าหุ้ฟุ้งก่ซัน	52
3.4.7 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	53
3.4.8 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี	53
3.4.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	55
4.1 การศึกษาการเตรียมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ที่มีมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม	55
4.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยเจลาติน	57
4.2.1 การวิเคราะห์ห่าหุ้ฟุ้งก่ซันด้วย FTIR	57
4.2.2 XRD	60
4.2.3 การวัดสี	63
4.2.4 การดูดซับน้ำ	65
4.2.5 สันฐานวิทยา	66
4.2.6 ดัชนีการไหล	68
4.2.7 สมบัติเชิงกล	69
4.2.8 ความแข็งแรงกระแทก	72
4.2.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	73
4.2.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	76
4.3 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตา์ซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยเพกติน	78
4.3.1 การวิเคราะห์ห่าหุ้ฟุ้งก่ซันด้วย FTIR	78

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 XRD	80
4.3.3 การวัดสี	82
4.3.4 การดูดซับน้ำ	84
4.3.5 สันฐานวิทยา	85
4.3.6 ดัชนีการไหล	87
4.3.7 สมบัติเชิงกล	88
4.3.8 ความแข็งแรงกระแทก	90
4.3.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	91
4.3.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	93
4.4 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยการรีเจเนน	95
4.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR	95
4.4.2 XRD	97
4.4.3 การวัดสี	99
4.4.4 การดูดซับน้ำ	101
4.4.5 สันฐานวิทยา	102
4.4.6 ดัชนีการไหล	104
4.4.7 สมบัติเชิงกล	105
4.4.8 ความแข็งแรงกระแทก	107
4.4.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	108
4.4.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	110
4.5 ผลของเจลาติน เพกติน และคาร์ราจีแนนที่มีสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS)	112
4.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR	112
4.5.2 XRD	113
4.5.3 การวัดสี	115
4.5.4 การดูดซับน้ำ	116

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.5 สัณฐานวิทยา	117
4.5.6 คัชนีการไหล	119
4.5.7 สมบัติเชิงกล	120
4.5.8 ความแข็งแรงกระแทก	122
4.5.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	123
4.5.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	125
4.5.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	126
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	128
5.1 สรุปผลการวิจัย	128
5.2 ข้อเสนอแนะ	129
เอกสารอ้างอิง	130
ภาคผนวก	136

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	15
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	16
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	18
ตารางที่ 2.4	อัตราการกินตัวของแป้งแต่ละชนิด	25
ตารางที่ 3.1	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	42
ตารางที่ 3.2	สมบัติของเจลาติน (Gelatin)	42
ตารางที่ 3.3	สมบัติของเพกทิน (Pectin)	43
ตารางที่ 3.4	สมบัติของแคปปา-คาร์ราจีแนน (Kappa-Carrageenan)	43
ตารางที่ 3.5	สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟต์-พอลิเอทิลีน	44
ตารางที่ 3.6	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาอริชจากแป้งข้าวเจ้า (TPMBS) ที่ปรับปรุงสมบัติเจลาติน (Gelatin) เพกทิน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan) โดยมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม (ในหน่วยกรัม)	47
ตารางที่ 3.7	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาอริชจากแป้งข้าวเจ้า (TPMBS) ที่ปรับปรุงสมบัติเจลาติน (Gelatin) เพกทิน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan) โดยมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม (ในหน่วยเปอร์เซ็นต์)	48
ตารางที่ 3.8	สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป	49
ตารางที่ 3.9	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล	50
ตารางที่ 4.1	ลักษณะของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มี MAPE เป็นสารช่วยผสมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป	56
ตารางที่ 4.2	ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน	63
ตารางที่ 4.3	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 4.4	อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	74
ตารางที่ 4.5	ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน	81
ตารางที่ 4.6	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน	86
ตารางที่ 4.7	อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	91
ตารางที่ 4.8	ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน	98
ตารางที่ 4.9	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน	103
ตารางที่ 4.10	อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	108
ตารางที่ 4.11	ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน	114
ตารางที่ 4.12	ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน	118
ตารางที่ 4.13	อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน	123
ตารางที่ 4.14	ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน	124

สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า	
รูปที่ 2.1	วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	7
รูปที่ 2.2	การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	9
รูปที่ 2.3	การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง	10
รูปที่ 2.4	การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลาทีน	10
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของสตาร์ชกราฟต์โคพอลิเมอร์	11
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	15
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของอะมิโลส	16
รูปที่ 2.8	โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	17
รูปที่ 2.9	ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ ธรรมดา	20
รูปที่ 2.10	ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ อิเล็กตรอน	21
รูปที่ 2.11	การเกิดรีโทรเกรเดชัน	24
รูปที่ 2.12	กลไกการคืนตัวของแป้ง	24
รูปที่ 2.13	โครงสร้างของเจลาติน	28
รูปที่ 2.14	โครงสร้างของเพกทิน	30
รูปที่ 2.15	โครงสร้างของแคปปา-คาร์ราจีแนน	31
รูปที่ 2.16	โครงสร้างของไอโอต้า-คาร์ราจีแนน	31
รูปที่ 2.17	โครงสร้างของแลมด้า-คาร์ราจีแนน	32
รูปที่ 2.18	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรไรด์	34
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย	45
รูปที่ 3.2	ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ	50
รูปที่ 4.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก	57
รูปที่ 4.2	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งถั่วเขียว เจลาติน และ MAPE	59
รูปที่ 4.3	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งถั่วเขียวและเจลาติน	59

สารบัญรูปลภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4	ดิฟแฟรกโตแกรมของ LDPE 60
รูปที่ 4.5	ดิฟแฟรกโตแกรมของ (ก) แป้งถั่วเขียว และ (ข) เจลาติน 60
รูปที่ 4.6	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก 61
รูปที่ 4.7	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก 65
รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินในปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)] 67
รูปที่ 4.9	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ง) โมดูลัส ความแข็งกด 71
รูปที่ 4.10	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน 72
รูปที่ 4.11	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (สีดำ) 0 % (สีน้ำเงิน) 2 % (สีเขียว) 6 % และ (สีแดง) 10 % โดยน้ำหนัก 73
รูปที่ 4.12	การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก 75
รูปที่ 4.13	ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน 76
รูปที่ 4.14	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก 77
รูปที่ 4.15	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งถั่วเขียว เพกติน และ MAPE 78

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.16	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งถั่วเขียวและเพกติน	78
รูปที่ 4.17	ดิฟแฟรกโตแกรมของเพกติน	79
รูปที่ 4.18	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก	80
รูปที่ 4.19	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	83
รูปที่ 4.20	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินในปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]	85
รูปที่ 4.21	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส ความแข็งกด	88
รูปที่ 4.22	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน	89
รูปที่ 4.23	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ (สีดำ) 0 % (สีน้ำเงิน) 2 % (สีเขียว) 6 % และ (สีแดง) 10 % โดยน้ำหนัก	90
รูปที่ 4.24	การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	92
รูปที่ 4.25	ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน	93
รูปที่ 4.26	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก	94
รูปที่ 4.27	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งถั่วเขียว คาร์ราจีแนน และ MAPE	95

สารบัญรูปลภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.28	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งถั่วเขียวและคาร์ราจีแนน	95
รูปที่ 4.29	ดิฟแฟรกโตแกรมของคาร์ราจีแนน	96
รูปที่ 4.30	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก	97
รูปที่ 4.31	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	100
รูปที่ 4.32	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]	102
รูปที่ 4.33	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส ความแข็งกด	105
รูปที่ 4.34	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน	106
รูปที่ 4.35	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (สีดำ) 0 % (สีน้ำเงิน) 2 % (สีเขียว) 6 % และ (สีแดง) 10 %	107
รูปที่ 4.36	การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก	109
รูปที่ 4.37	ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน	110
รูปที่ 4.38	อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (ข) เจลาติน 10 % (ค) เพกติน 10 % และ (ง) คาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก	111

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.39	ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (ข) เจลาติน 10 % (ค) เพกติน 10 % (ง) คาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก	113
รูปที่ 4.40	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (ข) เจลาติน 10 % (ค) เพกติน 10 % (ง) คาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก	115
รูปที่ 4.41	สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]	117
รูปที่ 4.42	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส ความแข็งกด	120
รูปที่ 4.43	ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน	121
รูปที่ 4.44	เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (สีดำ) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (สีน้ำเงิน) เจลาติน 10 % (สีเขียว) เพกติน 10% (สีแดง) คาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก	122
รูปที่ 4.45	การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน	125
รูปที่ 4.46	ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (ข) เจลาติน 10 % (ค) เพกติน 10 % (ง) คาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน	126

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลาสติกนับเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในรูปของผลิตภัณฑ์ของใช้และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากมีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถกันน้ำได้ดีและไม่เป็นสนิม ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น โลหะ หรือแก้ว แนวโน้มความต้องการใช้พลาสติกมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกจึงสูงขึ้นเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ไม่เกิดการย่อยสลายหรือย่อยสลายได้ยาก ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานหลายร้อยปี รวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น และหากนำมาเผาทำลายจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกจนนำไปสู่ภาวะโลกร้อน (Global warming) แนวทางหนึ่งที่จะลดปัญหานี้ คือ การหาวัสดุอื่นมาทดแทนพลาสติก เช่น การใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ (Degradable polymer)

การสังเคราะห์พลาสติกที่มาจากวัสดุธรรมชาติถือเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหามลภาวะที่เกิดจากพลาสติก ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยแสงหรือกระบวนการทางชีวภาพในระยะเวลาอันสั้น วิธีการหนึ่งในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ คือ การเติมสารที่สามารถเป็นอาหารของจุลินทรีย์ได้ เช่น แป้ง (Starch) เนื่องจากแป้งมีส่วนสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ซึ่งเป็นกลไกการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย เมื่อนำมาผสมลงในพลาสติกในปริมาณที่เหมาะสมจะยังคงทำให้พลาสติกมีความเหนียวและแข็งแรงต่อการใช้งานได้ในระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นแล้วถ้าผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) โดยใช้แสงและจุลินทรีย์จะทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำพลาสติกนั้นไปฝังลงดิน จะทำให้เกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากในดินมีแร่ธาตุ ความชื้นและจุลินทรีย์นานาชนิดที่เป็นภาวะสำคัญของการย่อยสลายทางชีวภาพ

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติจึงสามารถย่อยสลายได้ ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกันอย่างกว้างขวาง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการศึกษากันได้มาจากสตาร์ชชนิดต่างๆ เช่น แป้งข้าวโพด (Corn starch) [1] แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) [2] แป้งสาลี (Wheat starch) [3] แป้งข้าวเจ้า (Rich starch) [4] เป็นต้น จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นรายงานที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch) [5] ยังมีน้อยและลักษณะทางกายภาพของแป้งถั่วเขียวเมื่อทำให้สุกนั้นจะมีความใสและมีความเหนียวดี ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ได้

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผู้ผลิตและส่งออกถั่วเขียวและผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียวเป็นรายใหญ่ของโลก สำหรับตลาดส่งออกแป้งถั่วเขียวของประเทศไทยมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2552 ปริมาณการส่งออกเท่ากับ 599 ตัน คิดเป็นมูลค่า 46.428 ล้านบาท เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2551 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกแป้งถั่วเขียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.09 และร้อยละ 1.39 ตามลำดับ [6] ทำให้ศักยภาพของถั่วเขียวและผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งตลาดในประเทศและตลาดส่งออก ถั่วเขียวและผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียวส่วนใหญ่ใช้ภายในประเทศเพื่อการบริโภคโดยตรง และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเพาะถั่วงอก อุตสาหกรรมขนมหวาน การผลิตแป้งถั่วเขียวและวุ้นเส้น แป้งถั่วเขียวที่ผลิตจำหน่ายมีอยู่ 2 ลักษณะตามประโยชน์ใช้สอยที่แตกต่างกัน คือ แป้งถั่วเขียวดัดแปลง สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำขนมไทยและขนมต่างชาติ และแป้งถั่วเขียวธรรมชาติเป็นแป้งที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต วุ้นเส้นหรือก๋วยเตี๋ยวเชียงใหม่ [7]

งานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาการเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ [5] โดยใช้เทคนิคการอัดขึ้นรูป (Compression molding) พบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีขึ้น แต่เมื่อปริมาณของเส้นใยฝ้ายมากเกินไปส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง นอกจากนี้การปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยไม่มีการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizer) พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ นำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene, LDPE) และสารช่วยผสมชนิดมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้และขึ้นรูปได้โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวโดยการเติมเจลาติน (Gelatin) เพกติน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan) เนื่องจากเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเช่นเดียวกับแป้งถั่วเขียว โดยคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียว (Thermoplastic mung bean starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยการใช้เจลาติน (Gelatin) เพกติน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียว โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.3.4 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยการใช้เจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน
- 1.3.5 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ที่เตรียมได้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากแป้งถั่วเขียวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ที่ใช้งานกันทั่วไปได้
- 1.4.2 ช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในยุคปัจจุบันและอนาคตที่เกิดจากการย่อยสลายได้ยากของพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในปัจจุบันได้
- 1.4.3 เพื่อแปรรูปแป้งถั่วเขียวซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีราคาถูก ให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พลาสติก [8]

พลาสติก คือ สารสังเคราะห์ (Synthetic Materials) ที่มนุษย์คิดขึ้นมาประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและคลอรีน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลักษณะอ่อนตัวขณะทำการผลิต ซึ่งโดยมากใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยความร้อนหรือแรงหรือทั้งสองอย่าง

พลาสติกมีคุณสมบัติทางโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า High Molecular Weight คือ ในหนึ่งโมเลกุลมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่น จึงทำให้มีสมบัติดังนี้ คือ

1. สมบัติทางกายภาพ มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ฯลฯ
2. สมบัติทางไฟฟ้า เป็นฉนวนไฟฟ้า
3. สมบัติทางเคมี ทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่นๆ

พลาสติกแบ่งเป็น 2 ประเภท โดยอาศัยลักษณะของพลาสติกเมื่อถูกความร้อน

1. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting หรือ TS) คือ พลาสติกที่มีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านการผลิตโดยการใช้ความร้อนและแรง จะนำไปหลอมละลายอีกไม่ได้

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics หรือ TP) คือพลาสติกที่เมื่อได้รับความร้อนแล้วสามารถเปลี่ยนรูปได้และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์

ในปัจจุบันพลาสติกมากกว่าร้อยละ 99 ผลิตหรือมาจากแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ ได้แก่ แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพทา และถ่านหินซึ่งถูกใช้เป็นที่แหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิต แหล่งวัตถุดิบดังกล่าว นอกจากจะใช้แล้วหมดไปแล้วกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย แหล่งวัตถุดิบที่สามารถทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้เป็นแหล่งให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในการผลิตวัสดุ โดยเฉพาะจำพวกพลาสติกเพื่อลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมและทดแทนต่อไปในที่สุด ทั้งนี้นอกจากสามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัตถุดิบแล้ว ยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย แหล่งวัตถุดิบที่สามารถทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลี ข้าวไรย์ ปาล์ม เป็นต้น ในประเทศสหรัฐอเมริกา พืชผลทางการเกษตรหลักที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่น้ำตาลจากหัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโค ได้แก่ หางนม (Whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพ และราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและ

น้ำตาล ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก (Lignocellulosics) ที่มีอยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้

2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ [9]

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

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งขึ้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในกระบวนการรีไซเคิล

3. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ $RO\cdot$ และ $\cdot OH$ ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

3. พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastics) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไซครายด์ พอลิลาร์บอเนต และพอลิยูริเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic

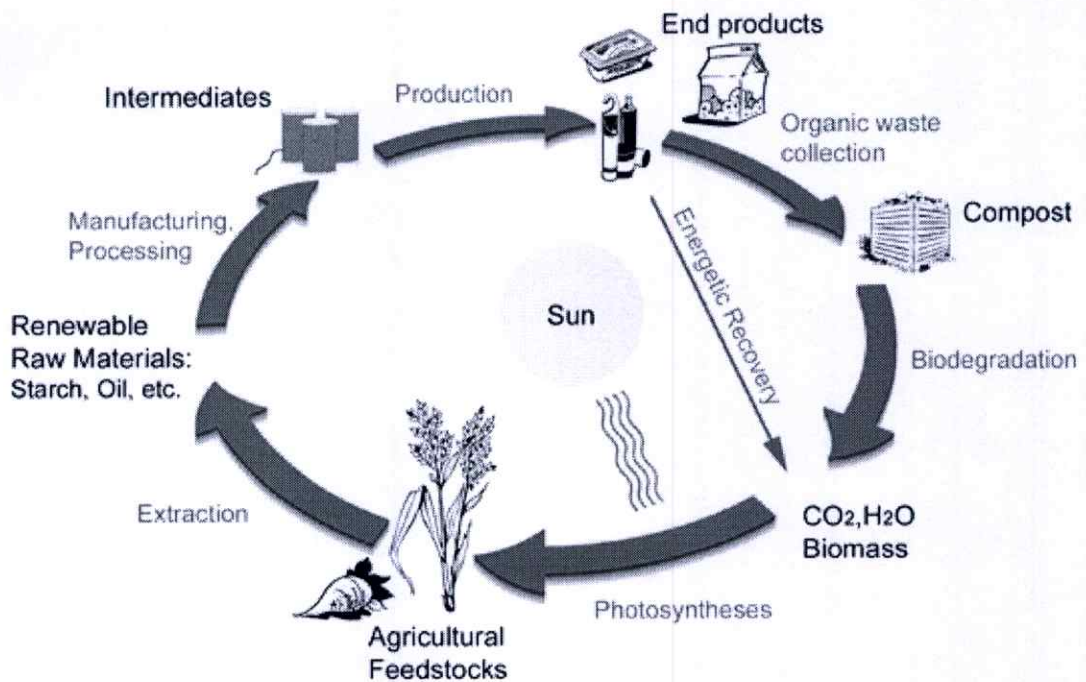
hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

4. 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 ก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) น้ำเกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลายแต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้นและอุณหภูมิ

2.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ [10]

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้ โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิตทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ สารประกอบคาร์บอนที่ได้จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม การพัฒนาการของระบบในธรรมชาตินั้นเริ่มจากมวลชีวภาพหลายพันล้านตันถูกผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชตามธรรมชาติ ซึ่งมวลชีวภาพจำนวนที่เท่ากันนี้ถูกย่อยสลายกลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำรวมทั้งมวลชีวภาพและแร่ธาตุ การเกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

โดยจุลินทรีย์ ซึ่งวัฏจักรของธรรมชาตินี้มีเกิดขึ้นและย่อยสลายไปอย่างครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้อง ไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและไม่มีค่าใช้จ่ายสูง วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีจุดประสงค์ที่จะเลียนแบบวงจรของธรรมชาติที่กล่าวข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานโดยผู้บริโภคและถูกนำไปกำจัดโดยการย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและมวลชีวภาพ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งวัฏจักรนี้ทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากรที่ปลูกทดแทนได้



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [10]

2.3.1 ประเภทพลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้โดยทางชีวภาพสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1. พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน
2. พอลิเอสเทอร์
3. พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น

2.3.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง [11]

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มีการพัฒนาเป็นเวลานานแล้ว เริ่มตั้งแต่การที่เริ่มใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติราคาถูกลง คือ แป้งผสมในการฉีดพลาสติก และได้รับการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์อย่างต่อเนื่อง ขณะนี้สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

2.3.2.1 การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90% ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่รูปที่เรียกว่า Gelatinized starch puff หรือ Plate expanded by extrusion หรือ Baking with water หมายความว่า การให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำภายในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดแทนโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน เรียกกันว่า โฟมแป้ง ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง โฟมแป้งแบ่งออกได้เป็น

(1) โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (Extruder) แป้งจะพองออกจากหัวฉีดเนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟมสำหรับอุ้มอากาศ สมบัติของโฟมแป้งนี้ (ความหนาแน่น ความเหนียว) เกิดจากสมบัติของแป้ง ปริมาณน้ำ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง (Additive)

(2) โฟมจากแป้ง

เป็นการใช้ลักษณะการขยาย (Expansion) ของส่วนผสมจากแป้งและเส้นใย เช่น เยื่อ (Pulp) เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

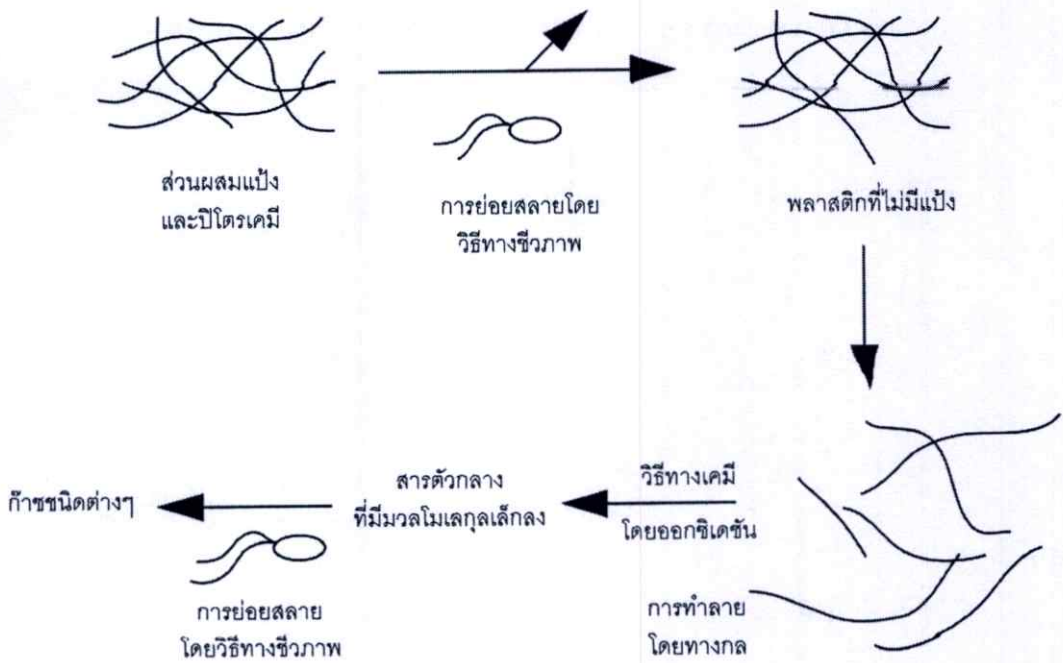
2.3.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

พลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้แสดงดังรูปที่ 2.2 แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูปเม็ดแป้งและแป้งที่ผ่านการเจลาทิไนซ์ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี

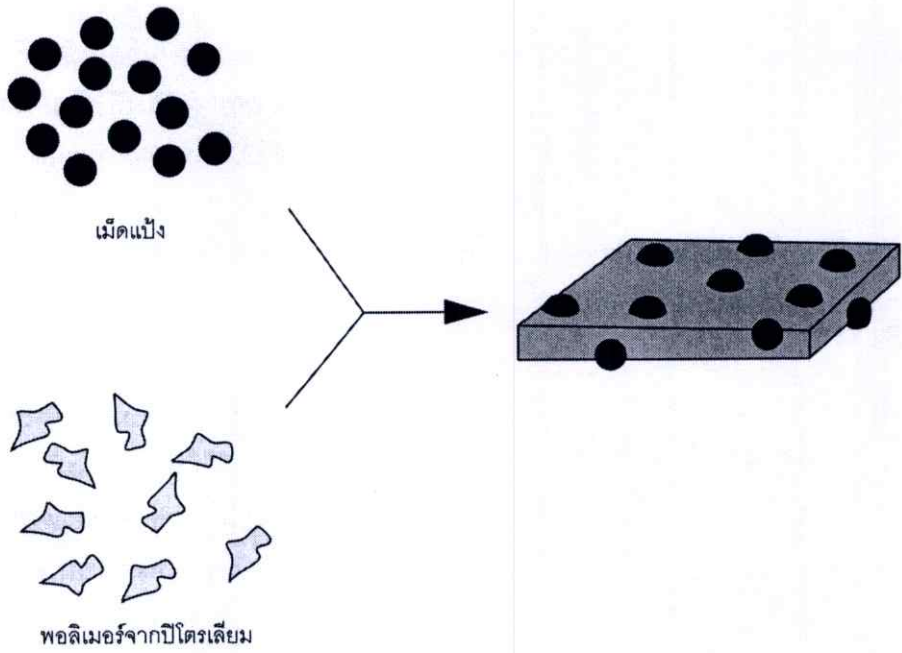
(1) ในรูปเม็ดแป้ง

แป้งจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี นำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตกออก ปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิน 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการ

การเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีด อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่นๆ ได้ เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพด ซึ่งเป็น auto-oxidant เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อม เกิดอนุมูลอิสระชนิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไปย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปีโตรเคมีให้ได้ โอลิโกเมอร์ที่เล็กลง เพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้งแสดงดังรูปที่ 2.3



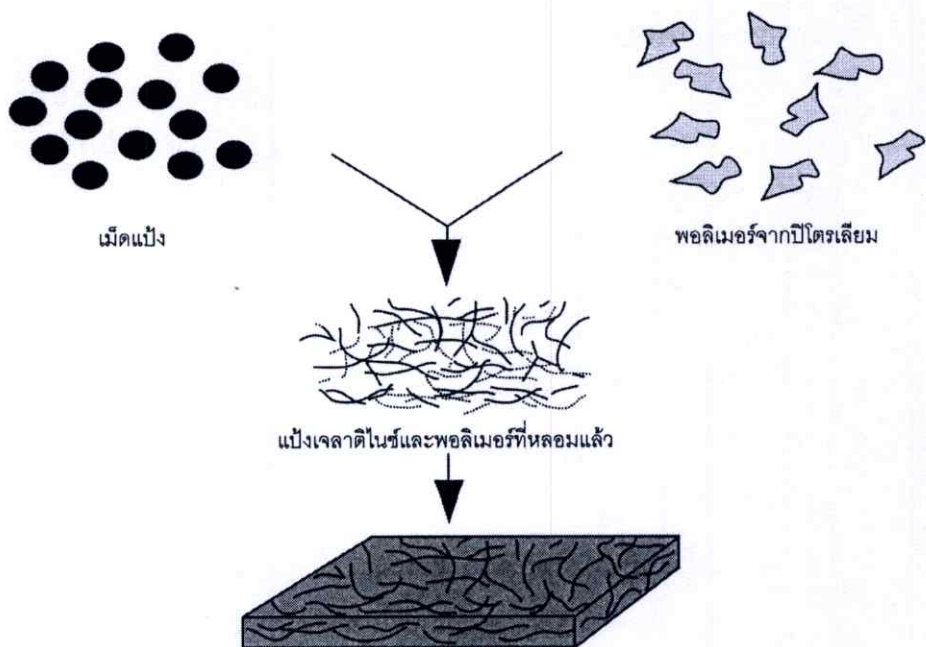
รูปที่ 2.2 การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ [11]



รูปที่ 2.3 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง [11]

(2) ในรูปแป้งเจลาตินไนซ์

วิธีนี้เม็ดแป้งจะแตกตัวทั้งหมดผสมรวมกับอนุพันธ์ของปิโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.4

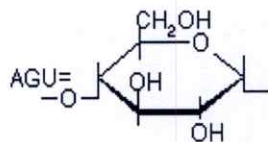
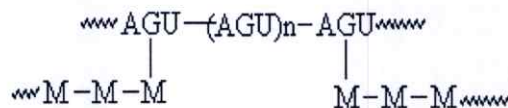


รูปที่ 2.4 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลาตินไนซ์ [11]

ในประเทศไทยได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง และพอลิคาโพรแลกแทม โดยแป้งมันที่ใช้อยู่ในรูปแบบเม็ดแป้งเจลาทีนซ์ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งที่ใช้ เมื่อปริมาณแป้งในรูปแบบเม็ดแป้งและแป้งเจลาทีนซ์ในส่วนผสมต่ำกว่า 40% พบว่าความแข็งแรงดึงของส่วนผสมทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน เปอร์เซ็นต์การดึงยึดขึ้นอยู่กับรูปแบบที่ใช้อำปริมาณแป้งมากกว่า 30% ในการทดลองพบว่าในรูปแบบเม็ดแป้งมีเปอร์เซ็นต์การดึงยึดสูงกว่าแป้งรูปเจลาทีนซ์ถึง 125 เท่าที่ปริมาณแป้ง 50% เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon Analyzer) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าในรูปแบบแป้งเจลาทีนซ์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างลำดับที่น้อยกว่าในรูปแบบเม็ดแป้ง เมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าส่วนผสมที่มีแป้งเจลาทีนซ์ 30% และพอลิคาโพรแลกแทม 70% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกที่มีสมบัติทางกายภาพดีและมีความสามารถในการย่อยสลายสูง

2.3.2.3 แป้งกราฟต์โคพอลิเมอร์

โครงสร้างของแป้งกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Starch graft copolymer) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคส และ M เป็นมอนอเมอร์ที่จะมาทำปฏิกิริยากับแป้ง แป้งที่ใช้อาจใช้ในรูปแบบของเม็ดแป้งหรือแป้งเจลาทีนซ์ การทำปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft copolymerization) ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีไหนขึ้นกับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีริก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟต์โคพอลิเมอร์ [11]

เมื่อเกิดอนุภาคลิสารบน โมเลกุลแข็ง ไอออนของมอนอเมอร์ปีโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อๆ ไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย

2.3.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [11]

2.3.3.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาพื้นที่แห่ง สมดุลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในภาวะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.3.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในภาวะที่มีออกซิเจน

2.3.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

(ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังกินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้าง และสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

(ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังไว้ในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลาย เหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนิของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังกินไว้ 6 เดือนมาตรวจปริมาณไนโตรเจน พบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคโลนิบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

2.3.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในช่วงการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

2.3.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึกโดย 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

2.3.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 50 มิลลิเมตรหลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ

2.4 แป้ง [11]

“แป้ง” ในการผลิตนั้นหมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาว์ (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จะจัดอยู่ในประเภทฟลาว์ เรียกว่า Corn flour , Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8 % เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นสตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch , Wheat starch เป็นต้น

2.4.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

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 (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของ

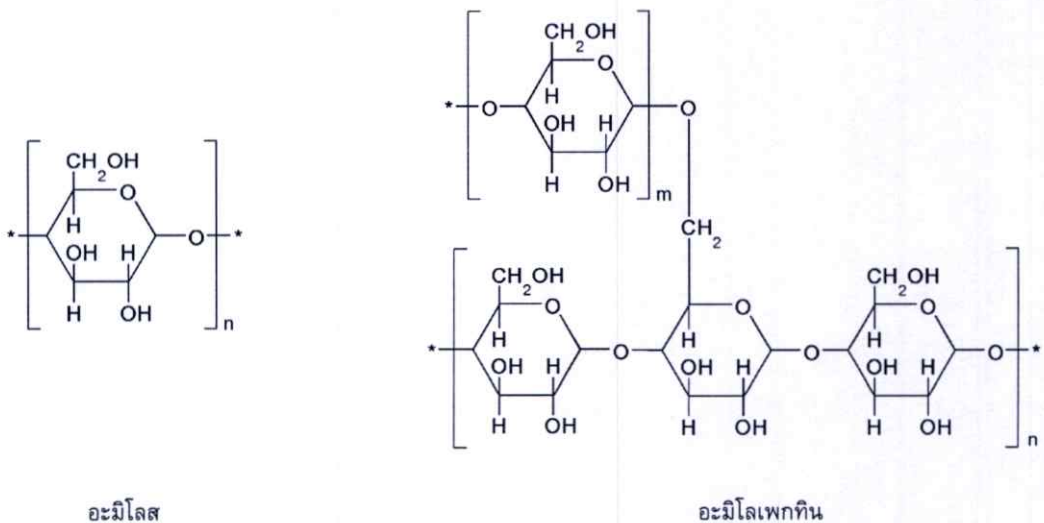
อะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.1) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [11]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะ โครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัว เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.6 ได้แก่

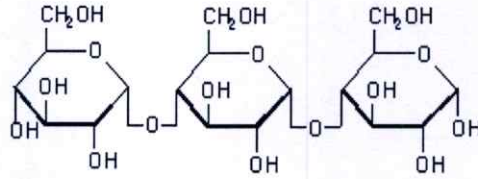
1. อะมิโลส (Amylose)
2. อะมิโลเพกทิน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate material)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [11]

1. อะมิโลส

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 (α -1,4) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะมิโลส [11]

แป้งจากธัญพืชมีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวมีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 คาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับชั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลส มีกึ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลาย ๆ ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

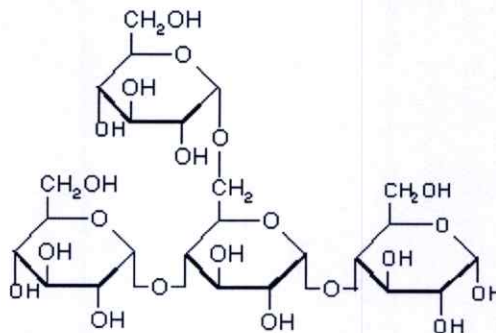
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [11]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลส (%)	β -Amylolysis Limit (%)	ขนาดโมเลกุล (DP)เฉลี่ย	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกึ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17					
- อินดิกา		73	1,000	4.0	250	49
- จาโปนิก		81	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	

ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลาทีไนซัซของแป้งมันฝรั่ง พบอะมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ด โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะมิโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คล้ายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้

2. อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก $\alpha -1, 4$ และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด $\alpha -1, 6$ ดังรูปที่ 2.8 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทินจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [11]

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด $\alpha -1, 6$ มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะ โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (Chain) 3 ชนิด คือ

- 1) **สาย A (A-chain)** เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
- 2) **สาย B (B-chain)** มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9 :1
- 3) **สาย C (C-chain)** เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกทิน แต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [11]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลเพกทิน (%)	ขนาด โมเลกุลเฉลี่ย (DP)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	จำนวน สาย เฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย ภายนอกเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
- อินดิกา		4,700	21	220	14	6
- จาโปนิก		12,800	19	670	13	5
- ข้าวเหนียว		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันสำปะหลัง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันฝรั่ง	83					

3. สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทินแต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลางในเมล็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

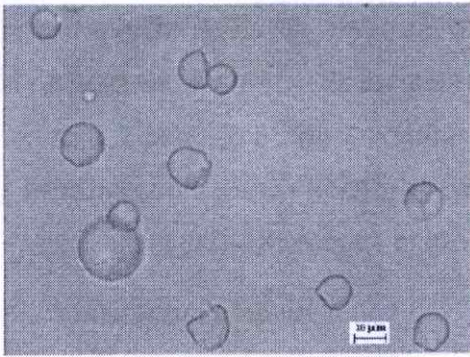
ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

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

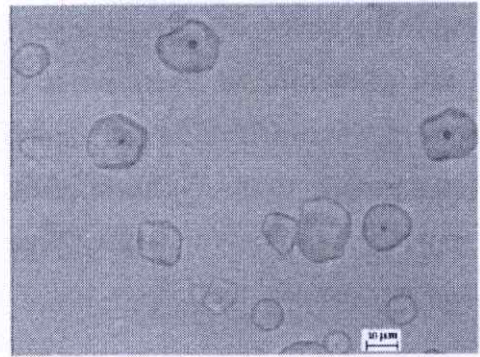
2.4.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (รูปที่ 2.9) และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) (รูปที่ 2.10) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ

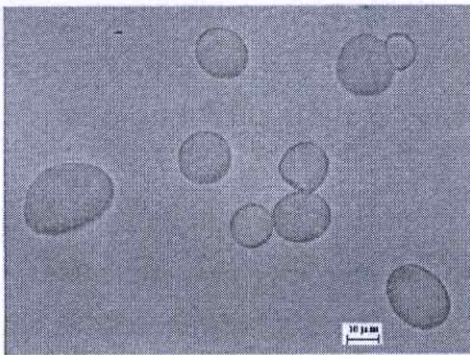
เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่



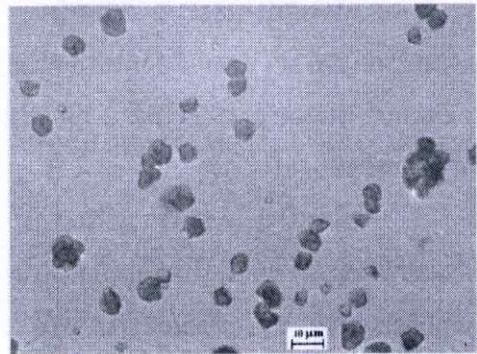
(ก) แป้งมันสำปะหลัง



(ข) แป้งข้าวโพด

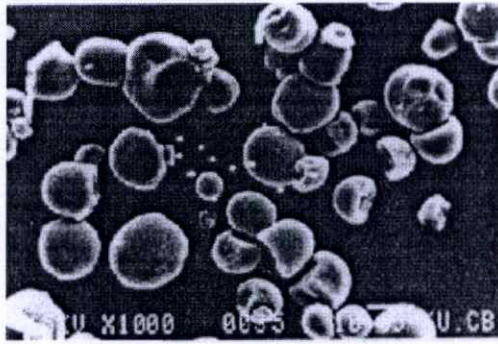


(ค) แป้งมันฝรั่ง

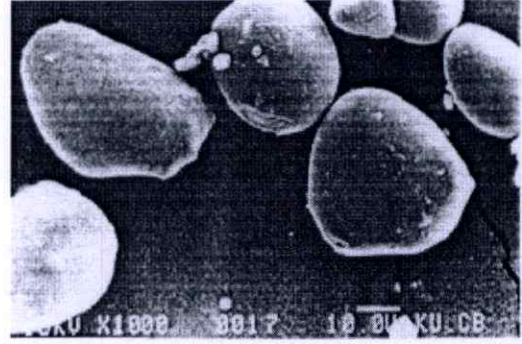


(ง) แป้งข้าวเจ้า

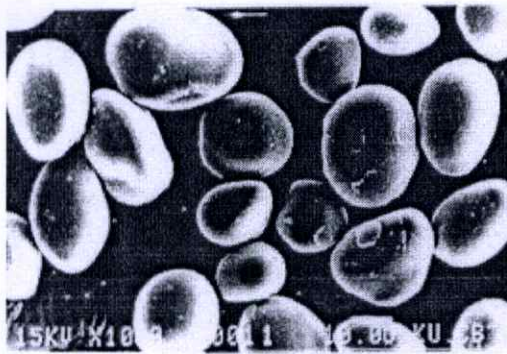
รูปที่ 2.9 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (กำลังขยาย 40 เท่า) [11]



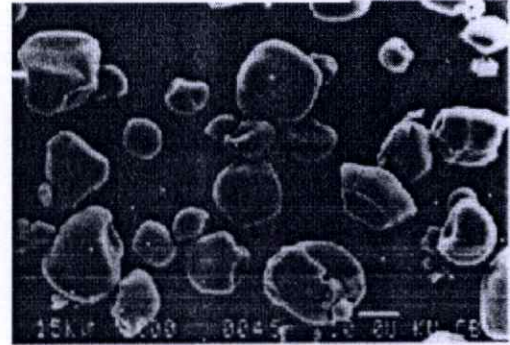
(ก) แป้งมันสำปะหลัง



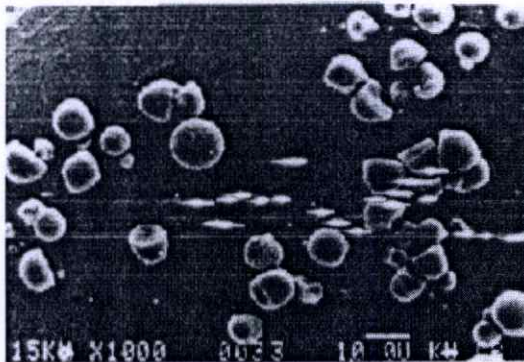
(ข) แป้งสตาร์



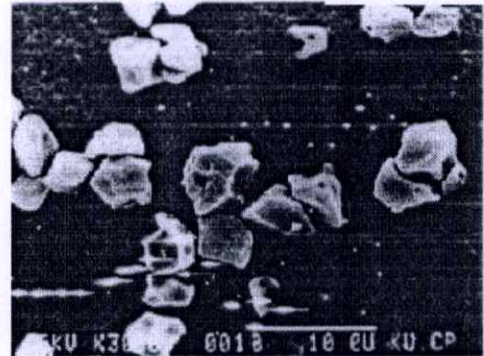
(ค) แป้ง arrowroot



(ง) แป้งมันเทศ



(จ) แป้งเม็ดขนุน (jackfruit)



(ฉ) แป้งข้าวเจ้า

รูปที่ 2.10 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน
ที่กำลังขยาย(ก)-(จ)1,000 เท่า และ (ฉ) 3,000 เท่า [11]

2.4.3 สมบัติของแป้ง [11]

2.4.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bond water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้งจะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5) \cdot H_2O]$

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

2.4.3.2 การเกิดเจลลิตไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลิตไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลลิตไนซ์มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เรียกว่าการเกิดเจลลิตีในเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินเข้ม เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

2.4.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

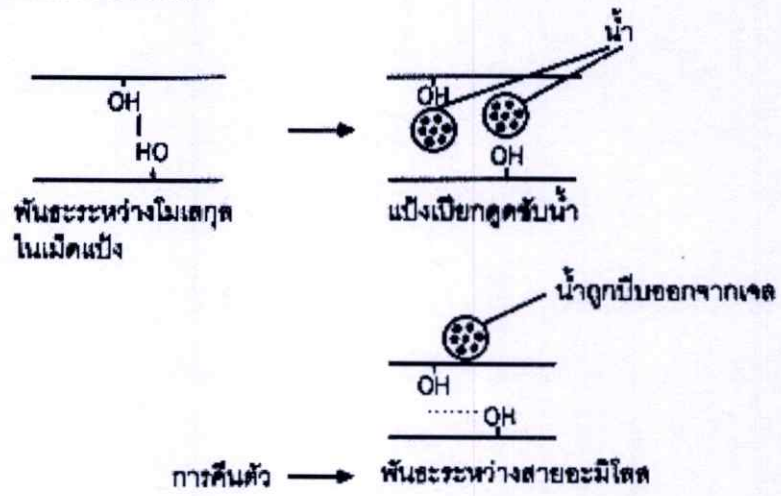
เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลิตีในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.11 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาออกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมาออกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

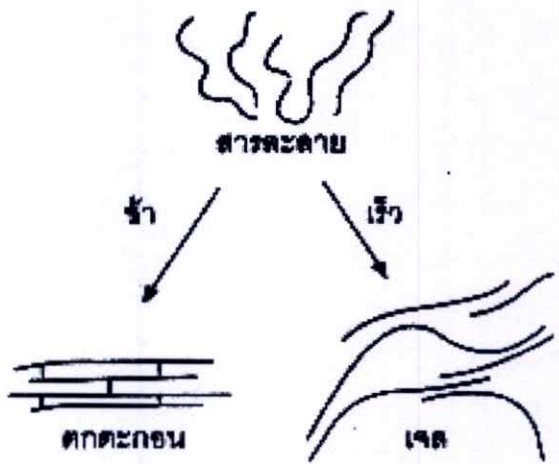
การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้ง

สามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก เช่น แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย กลไกการคืนตัวของแป้งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสเพกทินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลสเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [11]



รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง [11]

ตารางที่ 2.4 อัตราการคืนตัวของแป้งแต่ละชนิด [11]

ชนิดของแป้ง	%การตกตะกอนของส่วนที่ไม่ละลาย		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
แป้งมันฝรั่ง	10	15	20
แป้งข้าวโพด	37	48	62
แป้งสาลี	45	48	52
แป้งมันสำปะหลัง	11	12	13
แป้งข้าวโพดเหนียว	0.2	0.5	1

2.4.4 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) [11]

ในธรรมชาติโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินมีการจัดเรียงตัวกัน โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิการหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิการหลอมตัวของเม็ดแป้งสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือ ถ้าได้รับความร้อนสูง (มากกว่า 265 องศาเซลเซียส) แป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัว

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่าง ๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างได้ พลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า **เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch ,TPS)**

2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) [12]

พลาสติไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

2.5.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์ (Plasticization and Plasticizers)

พลาสติไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์ โดยพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า **พลาสติไซเซชันภายนอก (External plasticization)** และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า **พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)** ซึ่งพลาสติไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย

ข้อดีของพลาสติไซเซชันภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่ก็มีจุดด้อย คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้วพลาสติไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ T_g ประมาณหรือใกล้เคียง -50°C ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ **พลาสติไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer)** และ **พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer)** โดย พลาสติไซเซอร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้ และไม่แยกออกมาจากพอลิเมอร์ในขณะที่พลาสติไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติไซเซอร์ เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

2.6 ถั่วเขียว [13]

- ชื่ออื่นๆ : ถั่วมม (ภาคเหนือ) ถั่วจิม (เชียงใหม่) ถั่วดำ ถั่วเขียว ถั่วทอง (ไทย-ภาคกลาง)
- ชื่อสามัญ : Mung Bean, Mung, Mongo Bean, Green Bean
- ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Phaseolus Aureus Roxb.*
- วงศ์ : PAPILIONACEAE
- ลักษณะทั่วไป
- ต้น : เป็นพรรณ ไม้ล้มลุกเนื้ออ่อนและจะมีอายุสั้นเพียงไม่เกิน 1 ปี ลำต้นจะมีขนเป็นสีน้ำตาลและจะแตกกิ่งก้านสาขา
- ใบ : เป็นใบรวมประกอบด้วยใบย่อยประมาณ 3 ใบ ฐานใบนั้นจะกว้างตรงปลายใบจะแหลม
- ดอก : ดอกนั้นจะเป็นสีเหลือง
- เมล็ด (ผล) : ผลนั้นจะออกเป็นฝักและมีขนเป็นสีน้ำตาลอยู่ทั่วฝัก ฝักจะมีความยาวประมาณ 6-10 ซม. ส่วนเมล็ดถั่วเขียวจะมีสีแตกต่างกัน จะเป็นสีเขียวหรือสีเหลืองก็ได้ สีเหลืองก็คือถั่วทองที่เราเรียกกันนั่นเอง
- ถิ่นที่อยู่ : พรรณ ไม้นี้มักจะปลูกกันทั่วไปในเขตร้อน โดยเฉพาะประเทศจีน อินเดีย และมาเลเซีย ในประเทศบางท้องถิ่นก็นิยมปลูกกันในนาหลังจากที่เกี่ยวข้าวเสร็จแล้ว

2.6.1 แป้งถั่วเขียว [7]

แป้งถั่วเขียว (Mung Bean Starch) สกัดมาจากถั่วเขียว มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เมื่อจับผิวสัมผัสแล้วจะรู้สึกสากมือ ก่อนใช้จึงควรนำมาบดให้เป็นผงก่อน เมื่อทำให้สุกจะมีลักษณะ ข้นค่อนข้างใส ถ้าพักให้เย็นจะจับตัวเป็นก้อนแข็งอยู่ตัว แป้งชนิดนี้มักใช้เป็นส่วนผสมใน ขนมไทยเหมาะสำหรับทำอาหารที่ต้องการความใสอยู่ตัว เช่น ซ่าหริ่ม ขนมลิ่มกลืน ตัวตะโก้

แป้งถั่วเขียว ซึ่งประชาชนทั่วไปมักรู้จักในนามของ “แป้งสลิ้ม” เนื่องจากผู้บริโภครหรือร้านค้าานิยมนำแป้งชนิดนี้มาทำเป็นขนม “ซ่าหริ่ม” หรือ “สลิ้ม” แต่ในความเป็นจริงแล้วแป้งชนิดนี้สามารถนำมาประกอบอาหารชนิดอื่นได้อีกหลายประเภท โดยเฉพาะขนม เช่น ขนมเทียน ขนมชั้น คุกกี้ ทาร์ต เป็นต้น แป้งถั่วเขียวที่มีขายอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ลักษณะดังนี้

- แป้งถั่วเขียวคัดแปร เป็นแป้งถั่วเขียวที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำขนมไทยและขนมต่างชาติได้ทันที

- แป้งถั่วเขียวธรรมชาติ เป็นแป้งที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวุ้นเส้นหรือก๋วยเตี๋ยวเชียงใหม่

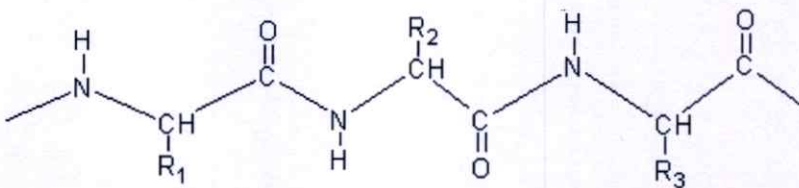
2.7 เจลาติน (Gelatin) [14,15]

เจลาติน (Gelatin) คือ โปรตีนชนิดหนึ่งที่เกิดจากการสลายคอลลาเจนด้วยกรดหรือด่าง มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน สามารถสกัดได้จากกระดูกและหนังสัตว์ (เช่น วัว ควาย หมู) เมื่อนำผงเจลาตินมาอุ่นด้วยน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 32°C จะหลอมกลายเป็นของเหลวหนืด ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นของเหลวจะแข็งตัวกลายเป็นเจล (ลักษณะคล้ายเยลลี่)

เจลาติน มาจากภาษาฝรั่งเศสว่า gélatine เป็นของแข็ง โปร่งแสง ไม่มีสี เปราะ และแทบไม่มีรสชาติ เจลาตินจัดอยู่ในกลุ่มอาหาร มี E number คือ E441

เจลาตินเป็น โปรตีนที่ได้จากการไฮโดรไลซ์คอลลาเจน (Collagen) ที่มีอยู่ในผิวหนัง กระดูก รวมทั้งเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาทำการผลิต โดยการใช้ความร้อนหรือใช้สารอื่นช่วย เช่น กรดหรือด่าง ทำให้โครงสร้างคอลลาเจนถูกทำลายและเปลี่ยนแปลงเป็นสารเจลาตินในการสลายพันธะในคอลลาเจน ส่วนประกอบหลักที่พบในเจลาตินเป็นสายเกลียวของ $\alpha\beta$ และ γ วัตถุดิบในการสกัดเจลาตินคือกระดูก เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และลำไส้บางส่วนของสัตว์ เช่น โค กระบือ สุกร และม้า เป็นต้น พันธะระหว่างโมเลกุลของคอลลาเจนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่จัดเรียงตัวได้ง่ายขึ้น เจลาตินหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวกลับเมื่อได้รับความเย็น เจลาตินสามารถก่อเจลแบบกึ่งของแข็งร่วมกับน้ำ เมื่อละลายเจลาตินในน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงและก่อเจลเมื่อทำให้เย็น องค์ประกอบทางเคมีของเจลาตินแทบจะเหมือนคอลลาเจนเริ่มต้น ซึ่งโครงสร้างของเจลาตินแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

เจลาตินอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับมุสลิม คือ เจลาตินปลา ซึ่งเริ่มใช้ในทางการค้าเมื่อปี 1993 มีราคาแพงกว่าเจลาตินจากหมูและวัว ให้กลิ่นที่ไม่ดี แต่ก็ยังมีใช้ในผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น น้ำผลไม้ของพีแอนด์จีตัวหนึ่งใช้เจลาตินจากปลา ใช้ในเนยแข็ง ไขมันต่ำ



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเจลาติน [15]

มีการนำเจลาตินมาใช้ในการเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น เครื่องสำอาง ยา อาหาร และฟิล์มถ่ายรูป ทางเภสัชกรรมจะใช้เจลาตินในการเคลือบเม็ดยา ผลิตเป็นแคปซูลทั้งชนิดแคปซูลแข็งและแคปซูลนิ่มเพื่อใช้บรรจุยา ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในตำรับยาต่าง ๆ ใช้เป็น

ส่วนผสมของยาคานิคครีม ทางเกษตรใช้เป็นตัวกลางสำหรับแร่ธาตุที่จำเป็นในการปลูกพืช เป็นต้น ส่วนในผลิตภัณฑ์อาหารนั้นนำไปใช้ได้มากมายได้แก่

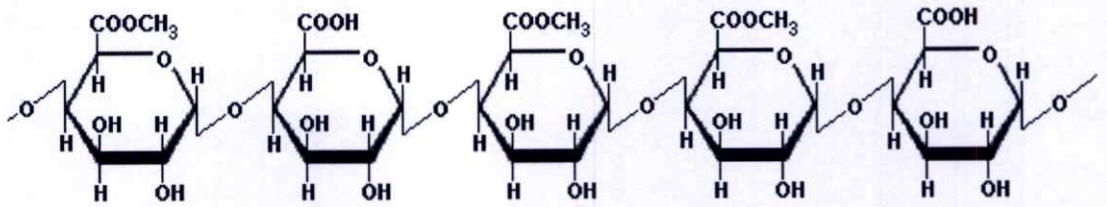
- ผลิตภัณฑ์นม - นม นมเปรี้ยว เนยนุ่ม (soft cheese) เช่น ชวาร์ครีม ครีสชีส เค้กแช่แข็ง พุดดิ้ง เต้าหูนมสด คัสตาร์ด มูส ไอศกรีม เนยไขมันต่ำ มากาριν
- ขนมหวาน - เยลลี่ มาชเมลโล อาหารเคลือบน้ำตาล เคลือบผิวขนม เค้กแช่แข็ง เคลือบทอฟฟี่(ชี้อกโกแลตหรือหมากฝรั่ง) กัมมีแบร์ หมากฝรั่ง แยม ชีสเค้ก
- ผลิตภัณฑ์เนื้อ - เนื้อบรรจุกระป๋อง ไส้กรอก เคลือบผิวแฮม อาหารทะเลกระป๋อง
- อาหารอื่นๆ - ซุป ซอส มายองเนส ไขมันต่ำ น้ำสลัด น้ำผลไม้

2.8 เพกติน [15,16,17]

เพกตินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง จัดเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต เช่นเดียวกับแป้งและเซลลูโลส แม้ว่าเพกตินปกติจะเกิดขึ้นมากในเนื้อเยื่อของพืชที่ยึดติดอยู่กับองค์ประกอบของมิดเดิลลามেলাและส่วนที่เป็นความหนาของผนังเซลล์ แต่แหล่งของเพกตินที่ใช้ในทางการค้ามีค่อนข้างจำกัด เพราะความสามารถในการเกิดโครงสร้างของเจลของเพกติน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาด โมเลกุลและระดับการแทนที่ด้วยเมทิล (Degree of methylation : DM) แหล่งของเพกตินที่แตกต่างกัน เพกตินที่ได้จะมีความสามารถในการเกิดเจลได้ในสภาวะแตกต่างกัน

เพกตินจำนวนมากพบอยู่ที่ผนังเซลล์ของผลไม้เป็นสารอาหารที่สำคัญและมีความสำคัญเกี่ยวกับสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ เพราะมีสมบัติในการเกิดเจลได้ เพกตินได้จากของเหลือในกระบวนการผลิตน้ำผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล ส้ม มะนาว เนื้อของหัวบีทที่ใช้ทำน้ำตาล หรือของเหลือจากการสกัดน้ำตาลเป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นแหล่งที่ดีของเพกตินที่มีคุณภาพดีได้จากเปลือกมะม่วงสุก

เพกตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่ประกอบด้วยกรดกาแลกทูโรนิก (galacturonic acid) 150 -500 หน่วย (น้ำหนักโมเลกุล 30000-100000) และส่วนที่ถูกเอสเทอร์ฟายด์ (esterified) กับกลุ่มเมทอกซี (methoxy group) ส่วนที่เป็นสายโซ่ตรง (backbone chain) จะประกอบด้วยแอล-รามโนส (L- rhamnose) และส่วนที่เป็นกิ่งกับสายโซ่หลักที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ประกอบด้วยบีต้า-ดี-กาแลคโทไพราโนส (β -D-galactopyranose) และแอลฟา-แอล-อราบินโนฟูรานอส (α -L-arabinofuranose)



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเพกติน [16]

สมบัติของเพกติน

1. การละลาย เพกตินละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำร้อนให้สารละลายที่มีความข้นหนืด แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2. ความหนืดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการเอสเทอร์ฟิเคชันของเพกติน ความเข้มข้น อุณหภูมิ พีเอช และเกลือชนิดต่างๆ

3. การเกิดเจล จัดเป็นสมบัติที่สำคัญที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบโดยใช้ระดับการเอสเทอร์ฟายด์

3.1 เพกตินที่มีระดับการแทนที่ด้วยหมู่เมทิลสูง (High methoxy pectin : HM) จะมี DE มากกว่า 50% สามารถเกิดเจลได้เมื่อมีของแข็ง ที่ละลายได้เป็นตัวกลาง ปกติจะใช้ซูโครส มากกว่า 55% ที่มีความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ย 2.0-3.5

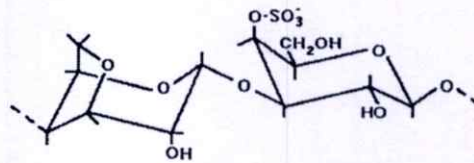
3.2 เพกตินที่มีระดับการแทนที่ด้วยหมู่เมทิลต่ำ (Low methoxy pectin : LM) จะมี DE ต่ำกว่า 50% สามารถเกิดเจลได้เมื่อใช้แคลเซียมไอออนเป็นตัวเหนียวน้ำ และสามารถเกิดได้เมื่อมีของแข็ง ที่ละลายได้เป็นตัวกลางในปริมาณ 10-20% มีความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ย 2.5-6.5 ภาวะนี้สามารถทำให้เกิดเจลของเพกตินมีความคงตัวได้ 0.5-1.5%

มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางมานาน โดยใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารก่อเจลในผลิตภัณฑ์แยม เจลลี่ และสารเพิ่มความคงตัวของระบบคอลลอยด์ ในเครื่องดื่มน้ำผลไม้และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา มีการนำเพกตินมาใช้ในทางเภสัชกรรมและอุตสาหกรรมยาเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเพกตินมีสมบัติเฉพาะที่ทำให้สามารถนำมาใช้เก็บกักหรือนำส่งยา โปรตีน และเปปไทด์ เป็นต้น และจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทไฟเบอร์ หรือเส้นใยอาหารที่ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบการย่อยในร่างกายมนุษย์ ซึ่งได้รับความสนใจจากนักโภชนาการมากขึ้น เพราะจากการวิจัยให้ผลออกมาว่าอาหารที่มีไฟเบอร์สูงจะช่วยป้องกันการเกิดโรคต่าง ๆ หรือในทางกลับกันคนที่กินอาหารที่มีไฟเบอร์น้อยก็มีความเสี่ยงที่จะเกิดโรคต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้น

2.9 คาร์ราจีแนน (Carrageenan) [15,17,18]

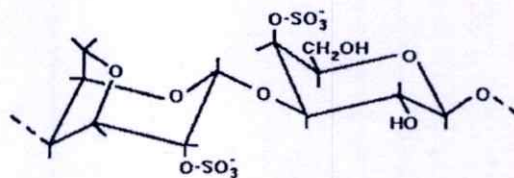
คาร์ราจีแนนเป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตที่สกัดจากสาหร่ายทะเลสีแดง แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ แคปปา (Kappa, K) ไอโอด้า (Iota, I) และแลมด้า (Lambda, λ) คาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลกาแลคโตสที่ถูกเอสเตอรีฟายด์ด้วยกรดซัลฟูริกที่ตำแหน่งและระดับแตกต่างกัน ดังนี้

แคปปา-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 จะถูกเอสเตอรีฟายด์ด้วยหมู่ซัลเฟตประมาณ 20-30% และบางส่วนของ 1,4 linked อาจเป็น Galactose-6-sulfate แทน 3,6-anhydro-D-galactose แคปปา-คาร์ราจีแนนมีความไวต่อโพแตสเซียมและสามารถตกตะกอนแยกออกมาจากคาร์ราจีแนนชนิดอื่นได้โดยใช้โพแตสเซียมคลอไรด์



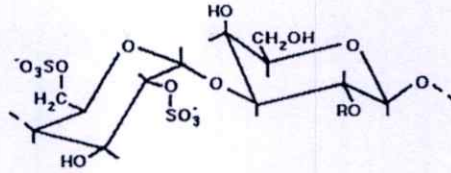
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของแคปปา-คาร์ราจีแนน [17]

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



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของไอโอด้า-คาร์ราจีแนน [17]

แลมด้า-คาร์ราจีแนน ประกอบด้วย 1,3-linked α -D-galactose-2-sulfate และ 1,4-linked β -D-galactose-2,6-disulfate (รูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแลมด้า-คาร์ราจีแนน [17]

สมบัติของคาร์ราจีแนนจะขึ้นอยู่กับประจุลบของหมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโมเลกุลเป็นสำคัญและยังแตกต่างกันในคาร์ราจีแนนแต่ละชนิดอีกด้วย คาร์ราจีแนนละลายได้ดีและมีความคงตัวที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7 ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 7 ความคงตัวจะลดลง คาร์ราจีแนนสามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนได้ คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายในน้ำร้อน สำหรับแคลป์ลาและไอโอด้า-คาร์ราจีแนน เมื่ออยู่ในสารละลายขณะร้อน สายโซ่จะอยู่ในรูปเกลียววุ่นอย่างไม่เจาะจง (Random coil) แต่เมื่อเย็นตัวลงความหนืดจะเพิ่มขึ้นและเกิดเป็นเจลได้ที่ $40-60^{\circ}\text{C}$ เพราะบางช่วงของสายโซ่กาแลกแทนสามารถใกล้ชิดกันและสร้างเป็นเกลียวคู่ แต่บางช่วงในโครงสร้างสามารถขวางการเป็นเกลียวคู่ เพราะมีกาแลกโทส-6-ซัลเฟตแทนที่หน่วยน้ำตาล 3,6-แอนไฮโดร เกลียวคู่ที่เกิดขึ้นสามารถรวมกลุ่มสามารถสร้างเป็นเขตรอยต่อ (Junction zones) ช่วยยึดรวมโครงสร้างไว้ ทำให้เกิดก้อนเจลในที่สุด

เจลที่เตรียมจากคาร์ราจีแนนมีสมบัติเปลี่ยนกลับไปมาได้ด้วยความร้อน (Thermoreversible gel) และสามารถเกิดปฏิกิริยากับโปรตีนได้ โดยแคลป์ลา-คาร์ราจีแนนให้เจลที่มีลักษณะเปราะ แตกง่าย และเกิดการแยกตัวของน้ำ (Syneresis) การแยกตัวของน้ำจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา เป็นผลมาจากร่างแหพอลิเมอร์ในโครงสร้าง 3 มิติของเจลหดตัวเข้าใกล้กันมากขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ในร่างแหถูกบีบออกมาด้านนอกของเจล พบว่าเมื่อผสมโกลด์สตาร์กับแคลป์ลา-คาร์ราจีแนนจะช่วยลดการแยกตัวของน้ำของเจลลงได้ และการใช้คู่ร่วมกับแคลป์ลา-คาร์ราจีแนนจะช่วยให้เจลที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากกว่าการใช้แคลป์ลา-คาร์ราจีแนนเพียงอย่างเดียว และไอโอด้า-คาร์ราจีแนนให้เจลที่มีความยืดหยุ่นและไม่เกิดการแยกตัวของน้ำ สำหรับแลมด้า-คาร์ราจีแนนไม่มีสมบัติในการเกิดเจล

การผสมคาร์ราจีแนนชนิดแคลป์ลาและไอโอด้าเข้าด้วยกันทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลดีขึ้น เจลที่ได้จะมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและเกิดการแยกตัวของน้ำน้อยลง ในทางการค้าได้มีการผสมคาร์ราจีแนนทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันทำให้สมบัติในการทำน้ำที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจลดีขึ้น และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด

2.10 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [19]

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้พอลิเมอร์มีข้อบกพร่อง คือ

- มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคไม่ดี
- มีค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาค (Interfacial tension) สูง
- มีสัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป

ซึ่งจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทำให้มีการนำสารช่วยผสม (Compatibilizer) มาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) และให้ผลในการช่วยลดความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาค ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป มีวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ที่มีขนาดเล็กและทำให้มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. Non-reactive Blending คือ การเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้ สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสถูกร โครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นสารช่วยผสมที่นิยมใช้ คือ พอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ซึ่งมีหลายชนิด คือ พอลิเมอร์ร่วมแบบโคปอลิเมอร์แบบบล็อก แบบกราฟท์หรือแบบส้อม ตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์ร่วมของพอลิสไตรีนกับพอลิบิวทาไดโอิน แบบโคปอลิเมอร์ เป็นสารช่วยผสมในพอลิเมอร์ผสมของพอลิสไตรีนกับพอลิเอทิลีน

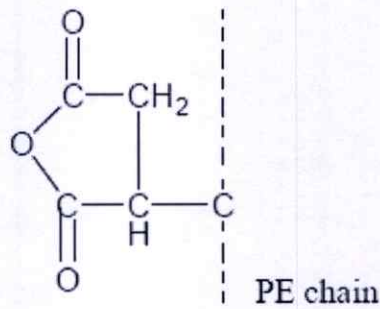
2. Reactive Blending เป็นวิธีการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจาก พอลิเมอร์ผสมนั้นมีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสมหรือทำให้เกิดการกราฟต์พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟต์พอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรือ อะคริลิกแอซิด (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีหมู่ที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมี เช่น พอลิเอไมด์

การเติมสารช่วยผสมเป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมแต่ไม่ใช่การทำให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากสารช่วยผสมมีการจัดเรียงตัวระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อม (เทียบกับการเย็บผ้า) ทั้งสองวัฏภาคให้ดีขึ้น ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีการยึดติดระหว่างวัฏภาค ทำให้วัฏภาคกระจายมีการกระจายตัวที่ดี และมีขนาดของวัฏภาคกระจายที่เล็กขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

ในการเลือกพอลิเมอร์ร่วมเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลในแต่ละส่วนของพอลิเมอร์ร่วม คือ ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความยาวของสายโซ่สั้น ทำให้การแทรกซึมผ่านไปพอลิเมอร์ผสมได้น้อย ส่งผลให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสต่ำ แต่ถ้าน้ำหนักโมเลกุล

สูงมากเกินไปทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยาก การแทรกซึมผ่านไปนพอลิเมอร์ผสมก็ต่ำเช่นเดียวกัน ในงานวิจัยนี้ใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน(Maleic anhydride grafted Polyethylene:MAPE) โครงสร้างดังรูปที่ 2.19

มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียรแล้วซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physical chemical properties) ดีขึ้น โดยการเพิ่มความแข็งแรงของพอลิเอทิลีนโดยทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้นพบว่าแอนไฮไดรด์เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อนและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่น รวมทั้งสารตัวเติม (Additive) ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ [20]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดารินทร์ โพธิ์ศรี และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติต่างๆของพลาสติกย่อยสลายที่เตรียมได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch, TPS) จากแป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวในสูตรที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที มีลักษณะทางกายภาพดีที่สุด จากนั้นเป็นขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วน 2:1 ส่วนสัญญาณวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ สำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูงขึ้น และยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงมีแนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40 % โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด

พิมพ์ชนก แสงนิดิเดช และเพียงฤทัย บุญประสิทธิ์ [4] ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เริ่มจากการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเส้นใยฝ้าย หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำการเตรียมแป้งข้าวเจ้ากับกลีเซอรอลผสมเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบ 170 องศาเซลเซียสและ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) พบว่าเส้นใยฝ้ายมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของแป้งมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จากนั้นปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยการใส่สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซีกราฟท์พอลิเอทิลีนหรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนลงไป พบว่าเมื่อใส่สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซีกราฟท์พอลิเอทิลีนทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นชัดเจนกว่าการใช้สารคู่ควบไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่า ในส่วนสัญญาณวิทยาเมื่อศึกษาค้นคว้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซีกราฟท์พอลิเอทิลีนและสารคู่ควบไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน ทำให้เมทริกซ์ของแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความ

หนาแน่นต่ำเข้ากันได้ดีขึ้น นอกจากนี้การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮโดรยด์กราฟท์พอลิเอทิลีนหรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน

อุยารัตน์ รัตนคำนวน และดวงดาว อางองค์ [21] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพลาสติกเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และแป้งที่สกัดจากกล้วยน้ำว้าที่ปริมาณ 5-20% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยมีการเติมสารช่วยผสม คือ พอลิเอทิลีน-กราฟต์-มาเลอิกแอนไฮโดรด์ (PE-g-MA) และสารเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสง คือ เบนโซฟีโนน ในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนักของแป้ง และ 0.25, 0.5, 1% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาผลของปริมาณแป้งกล้วยและสารเติมแต่งต่างๆ ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม สำหรับอุณหภูมิการหลอมเหลว และปริมาณความเป็นผลึกไม่ขึ้นกับปริมาณแป้งที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่อสมบัติทั้งสอง ในขณะที่การเติมสารช่วยผสมแม้จะไม่มีผลต่ออุณหภูมิการหลอมเหลวของฟิล์มแต่ทำให้ความเป็นผลึกของวัสดุภาค LDPE ลดลง สำหรับเบนโซฟีโนนนั้นจากการศึกษาพบว่าผลทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันทำให้ปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุภาค LDPE ลดลงเช่นเดียวกัน สำหรับสมบัติเชิงกลของฟิล์มนั้นพบว่าการเติมแป้งนั้นทำให้สมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มลดลงตามปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการเติมสารช่วยผสมลงไปสามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงให้เพิ่มขึ้นได้

วรวิทย์ โพนนิกร [22] ศึกษาถึงการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) จากขูดน้ำคั้นมาทำการผสมกับสารตัวเติมอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาทิ และแป้งท้าวยายม่อมโดยใช้ปริมาณแป้ง 10% 20% และ 30% โดยการหลอมและนำไปขึ้นรูปเพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของแป้งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าชนิดและปริมาณของแป้งมีผลต่อการทดสอบความแข็งแรงดึง กล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมากขึ้นทำให้ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และเมื่อทำการศึกษาด้วยเทคนิค SEM พบว่า หลังการฝังกลบพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และการเติมแป้งสาทิทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อมตามลำดับ

L. Wang และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตจาก Protein isolate (WPI) เจลาติน (Gelatin : G) และ โซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate : SA) โดยใช้เทคนิคการหล่อแบบ (Casting) เพื่อศึกษาสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength : TS) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break : %E) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength : TT) สัณฐานวิทยา (Morphological) การซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability : WVP) และการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen Permeability : OP) พบว่าฟิล์มในสูตร WPI (g) : G (g) : SA (g) = 10.0 : 17.5 : 22.5 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนฟิล์มในสูตร WPI (g) : G (g) : SA (g) = 10.0 : 16.0 : 14.0 มีการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนน้อยที่สุด และฟิล์มในสูตร WPI (g) : G (g) : SA (g) = 8.0 : 12.0 : 5.0 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาดีที่สุดในที่สุด

R. Zullo และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาผลของแป้งและพลาสติกไซเซอร์จากหลายแหล่งผลิตเพื่อใช้ในการเป่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาρχ โดยใช้แป้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณอะไมโลสในเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกันและจากหลายแหล่งผลิตมาผสมกับพลาสติกไซเซอร์ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและยูเรีย/ฟอร์มามิเด (2:1) หลังจากนั้นนำส่วนผสมระหว่างแป้งและพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 70:30 สำหรับตัวอย่างทั้งหมด ยกเว้นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลังใช้อัตราส่วน 80:20 จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) แล้วนำเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่ได้ไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม นำฟิล์มที่เตรียมได้นั้นไปศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหล จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาρχสูตรที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (>50%) ผสมกับยูเรีย/ฟอร์มามิเด (30%) นั้นมีสมบัติดีที่สุด โดยสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่มีความหนา 50 ไมโครเมตร และการใช้กระบวนการเป่าฟิล์มที่มีประสิทธิภาพ ทำให้มีสมบัติการดึงยืดที่ดี มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างสูงขณะทำการหลอมเหลว

A. Cordoba และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาρχ (Thermoplastic Starch) จากแป้งข้าวโพด (Corn starch) โดยใช้กลีเซอริน (Glycerin) เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนัก และมีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาρχด้วยอัลจิเนต (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 เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณของอัลจิเนตเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้มอดุลัส

ของแข็งและความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชลดลง แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมอัลจินตทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของอัลจินตเพิ่มขึ้น ส่วนสัญญาณวิทยาพบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชมีความเข้ากันได้มากขึ้น เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อปริมาณของอัลจินตเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัลจินตไปลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง

P. Veiga-Santos และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาผลของซูโครส (Sucrose) และ Inverted sugar ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการชอบน้ำและความว่องไวต่อน้ำของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง และทำการศึกษาผลของสารเติมแต่งอื่นๆ (เจลาติน น้ำมันถั่วเหลือง โซเดียมฟอสเฟต และ โพรพิลีนไกลคอล) และค่า pH ที่มีผลต่อฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลัง พบว่าการเติม Inverted sugar มีผลอย่างมากต่อค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น แต่การเติมซูโครสมีผลต่อสมบัตินี้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณของ Inverted sugar และซูโครสเท่ากัน พบว่าฟิล์มที่เติม Inverted sugar มีค่าการดึงยืด ณ จุดขาด 39.68-56.21% ในขณะที่ฟิล์มที่มีการเติมซูโครสมีค่า 65.24-115.60% และจากการศึกษาฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมเจลาติน พบว่าค่าการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น สำหรับการเติมพลาสติกไซเซออร์และกรดทำให้สมบัติการดูดซับน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังให้ผลตรงข้าม

W. Ning และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดซิตริก (Citric acid) ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวโพด (Corn starch) โดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซออร์ ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low-Density Polyethylene) ในอัตราส่วน TPS : LLDPE : CA = 100 : 100 : 1 100 : 100 : 2 และ 100 : 100 : 3 พบว่าการใช้กรดซิตริกช่วยปรับปรุงการแพร่กระจายและการพลาสติกไซเซชันของแป้งซึ่งแสดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ในขณะที่เดียวกันการเพิ่ม CA เป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลโดยรวมด้วย แต่ที่ปริมาณของ CA ที่ 3% โดยน้ำหนักของ LLDPE ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง สำหรับการศึกษาศมบัติการไหลได้นั้น พบว่ากรดซิตริกมีผลทำให้ค่าความหนืดลดลง และยังช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนอีกด้วย เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่ากรดซิตริกสามารถทำให้โมเลกุลของแป้งที่มีปฏิกิริยาต่อกันนั้นอ่อนลง และยังช่วยปรับปรุงการพลาสติกไซเซชันของแป้งอีกด้วย นอกจากนี้กรดซิตริกยังสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำได้อีกด้วย

A.L. Da RÓz และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของประเภทและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติในการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวโพด (Thermoplastic corn starch) สำหรับการตรวจสอบนั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้ คือ กลุ่มแรกเป็นเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ และกลุ่มที่สองนั้นเป็นเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ โดยพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย โมโนไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์ (Monohydroxy alcohol) และไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weight glycol) ที่ปริมาณ 15 และ 20% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณและประเภทของพลาสติกไซเซอร์ไม่มีผลต่อความเป็นผลึก (Crystallinity) ของตัวอย่าง แต่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical property) ของเทอร์โมพลาสติกใน 2 แนวทางที่ต่างกัน คือ มีผลทำให้มันเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซอร์และมีผลทำให้แข็งเมื่อไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ สำหรับโมโนไฮดรอกซิลแอลกอฮอล์ให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวม และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่การดูดซับน้ำมากกว่า

X.F. Ma และคณะ [3] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวสาลี (Thermoplastic wheat flour, TPF) โดยใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างยูเรีย (Urea) และฟอร์มามาไมด์ (Formamide) ในอัตราส่วน 1:2 ที่ปริมาณ 20 30 40 และ 50% โดยน้ำหนักของแป้ง ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ความต่อเนื่องของวัฏภาคของเม็ดแป้งข้าวสาลีถูกตรวจสอบด้วย SEM พบว่าเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น TPF มีความเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) มากขึ้น การวิเคราะห์สมบัติการไหลพบว่าอุณหภูมิของกระบวนการอัดรีดมีผลต่อการปรับตัวของพฤติกรรมไหลของ TPF โดยความหนืดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น สำหรับ TPF ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ผสม 30% ให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดี ค่าความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาด พลังงาน ณ จุดขาด และโมดูลัสของยัง มีค่า 2.07 MPa 44% 0.35 N และ 20.1 MPa ตามลำดับ สำหรับการทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) นั้น TPF ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่ำๆ ให้ความต้านทานการดูดซับน้ำที่ดีกว่า และเมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของ TPF มีค่าลดลง เมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น

W. Shujun และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (TPS) จากแป้งข้าวโพด (Corn starch) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่เตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนเดี่ยวและศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetry (TG) สันฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscopy (SEM) และสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared

spectroscopy (FTIR) ซึ่งการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยใช้ความร้อน (Plasticisation) จากงานวิจัยพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยึด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ TPS เพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษาชั้นฐานวิทยาพบว่า TPS และ LLDPE มีการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน และงานวิจัยนี้ยังได้ทำการผสมพอลิเมอร์ผสมกับมาลิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MAH) พบว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการที่ไม่เติม ซึ่งสามารถบอกได้โดยใช้เทคนิค TG ที่พบว่าเมื่อเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้นและเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมมาผสมกับ MAH ทำให้ TPS กับ LLDPE ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น เทคนิค FTIR แสดงให้เห็นถึง MAH สามารถต่อกิ่งบนสายโซ่ของ LLDPE ได้โดยใช้กระบวนการเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS และ LLDPE

ดวงดาว อัจจงค์ และกาญจนา เจริญคงธรรม [28] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพลาสติกเชิงประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และแป้งที่สกัดจากกล้วยน้ำว้าที่ปริมาณ 5-20% โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีการเติมสารช่วยผสม คือ เอทิลีนไวนิลเอซีเตต (EVA) ที่ปริมาณ 0 5 10 และ 20 % โดยน้ำหนักของแป้งกล้วย ซึ่งแป้งกล้วยเตรียมได้จากแป้งดิบโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 N โดยแป้งกล้วยที่ได้มีขนาดอนุภาค 21-24 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่น 1.74 g/cm³ จากนั้นทำการศึกษาผลของปริมาณแป้งกล้วยและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติทางความร้อนและการดูดความชื้นของฟิล์ม พบว่าปริมาณของแป้งกล้วยที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของฟิล์ม ในขณะที่การเติม EVA แม้จะไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของฟิล์มแต่ทำให้ความเป็นผลึกของวัฏภาค LDPE ลดลง นอกจากนี้การเติม EVA ที่ปริมาณ 20 % โดยน้ำหนัก ให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มสูงที่สุด สำหรับการดูดความชื้นของฟิล์มพบว่า การเพิ่มปริมาณของแป้งกล้วยส่งผลให้การดูดความชื้นของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่มีปริมาณแป้งกล้วย 20 % โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดความชื้นถึง 4.5 % ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มปริมาณของ EVA ส่งผลให้การดูดความชื้นของฟิล์มลดลง

M. L. Fishman และ คณะ [29] ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่รับประทานได้และย่อยสลายได้จากแป้งผสมเพกตินโดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในการทดลองผสมเพกตินและเม็ดแป้งที่มีอะไมโลสสูง และกลีเซอรอลในปริมาณต่าง ๆ ทำการขึ้นรูปเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ นำฟิล์มที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลทางความร้อน ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) และศึกษาชั้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าภาพจาก SEM บอกถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำในระหว่างการอัดรีดซึ่งใช้ในการควบคุมการเกิดเจลทีโนซของแป้งได้ และข้อมูลจากเทคนิค DMTA พบว่าปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอัดรีด

ส่งผลถึงการเกิดเจลวทิไนซ์ของแป้งซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งผสมเพคติน มีกลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์ และพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่า -50 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิห้องฟิล์มสามารถดึงยืดได้

ภริสา ทศวิธ และคณะ [30] ได้ศึกษาอิทธิพลของ K-คาร์ราจีแนนต่อคุณสมบัติทางเชิงกล และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง โดยใช้ K-คาร์ราจีแนน 4 ความเข้มข้น (0, 1, 2, และ 3% ของ ปริมาตรน้ำกลั่น) ผสมแป้ง (มันสำปะหลัง และข้าวเจ้า) ในอัตราส่วน 1:1 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อ ความเข้มข้น K-คาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดที่เติมคาร์ราจีแนนมีการต้านทานแรงดึง ขาดเพิ่มสูงขึ้น การยืดตัว และการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มลดลง โดย K-คาร์ราจีแนนส่งผลต่อฟิล์ม แป้งข้าวเจ้ามากกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง เป็นผลทำให้ค่าการต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า ผสมคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้นประมาณ 3.6-7.2 เท่าของฟิล์มแป้งข้าวเจ้า ส่วนค่าการยืดตัวของฟิล์มแป้ง ลดลง เมื่อเติมคาร์ราจีแนนความเข้มข้นสูงขึ้น ในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังลดลงจาก 25.20% เป็น 24.77% และในฟิล์มแป้งข้าวเจ้า ลดลงจาก 45.40% เป็น 24.87% ในขณะที่การซึมผ่านไอน้ำของ ฟิล์มแป้งทั้งสองชนิดนี้ลดลงเมื่อเติม K-คาร์ราจีแนน โดยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง และข้าวเจ้าผสม คาร์ราจีแนนความเข้มข้น 1% มีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 8.53 และ 8.40×10^{-13} $\text{g.m}^2.\text{s}^{-1}.\text{Pa}$ ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แป้งถั่วเขียวตราต้นสน ชนิดคัดแปร จากบริษัท สิทธีนนท์ จำกัด
2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกรดฉีด (LD1630J) จากบริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
Melt flow rate	g / 10 min	28	ASTM D1238
Density	g / cm ³	0.915	ASTM D 1505
Melting point	°C	110	ASTM D 2117

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

4. เจลาติน (Gelatin) จาก Edible Beef Gelatin เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด สมบัติเจลาตินแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของเจลาตินจาก Edible Beef Gelatin เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
Viscosity	mPs	26	FQ02/01
Moisture	%	<12	FQ10/02
Ash	%	<2	FQ09/02
Heavy Metals	Ppm	<40	FQ32/01
Partical Size	Mesh	20	FQ13/01

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

5. เพกติน (Pectin) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด สมบัติของเพกติน แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สมบัติของเพกติน เกรดอาหาร จากบริษัทรวมเคมี 1986 จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
Stability Index units	-	141	-
Degree of Esterfication %	%	72	-
Loss on drying %	%	8	-
pH in a 1% solution units	-	3.6	-
Particle size	Mech	60	-

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. แคลปโป-คาร์ราจีแนน (Kappa-Carrageenan) เกรดอาหาร จากบริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด สมบัติของคาร์ราจีแนน แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของแคลปโป-คาร์ราจีแนน เกรดอาหาร (Carrageenan KL-805) จากบริษัทรวมเคมี 1986 จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
Gel Strength Water Gel (1.5% Gel 20 °C)	g	455	-
Gel Strength Salt Gel 1.5% Gel in 0.2% KCl 20 °C	g	496	-
pH (1.5% solution at 60°C)	-	7.5	-
Moisture Content	%	12	-

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

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

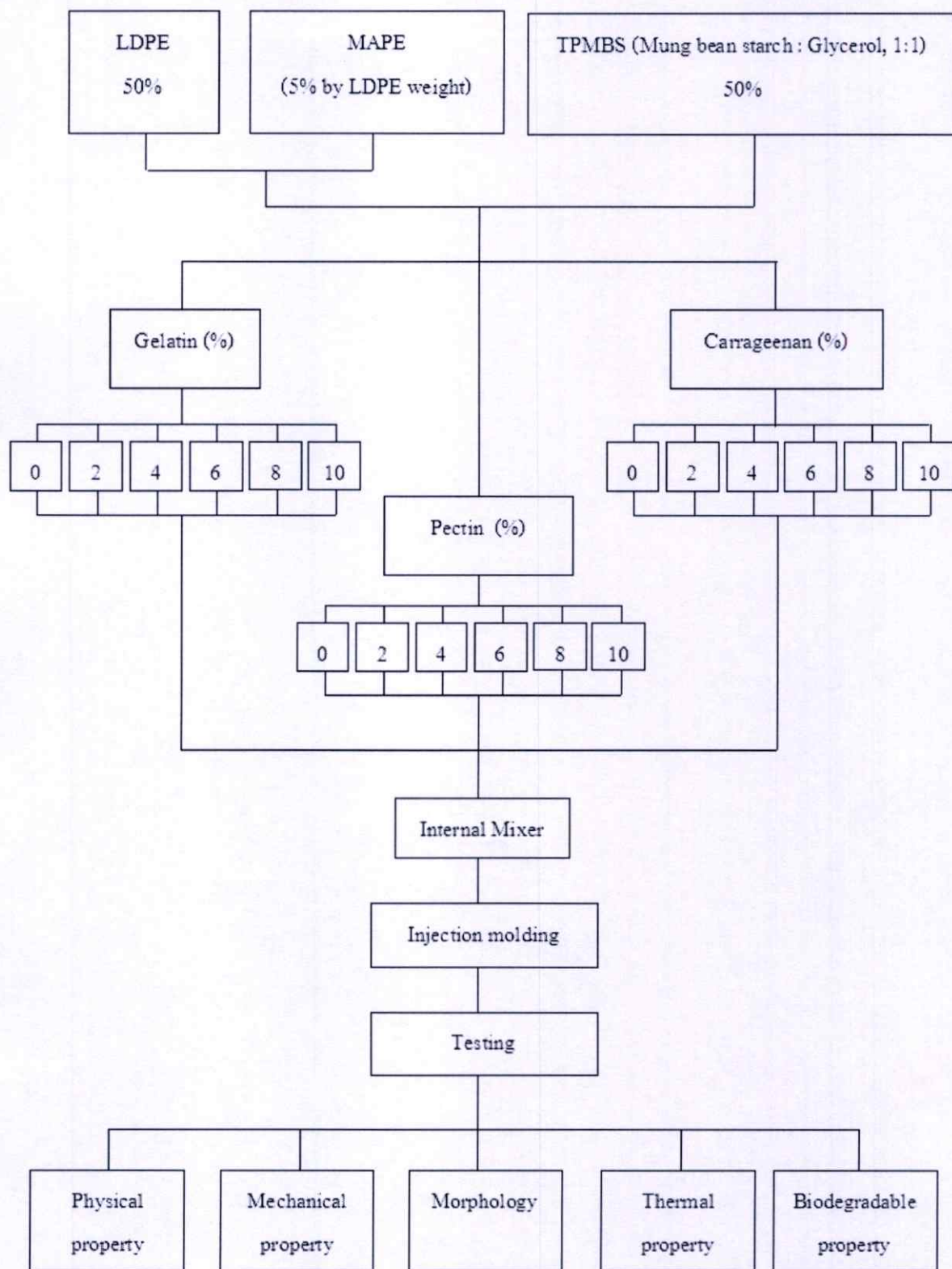
ตารางที่ 3.5 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟต์-พอลิเอทิลีน เกรด การค้า MB 100D จาก บริษัท Dupont Packaging & Industrial Polymer

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

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
2. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)
3. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
4. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer Hardness แบบ Shore A)
5. เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
7. เครื่องทดสอบทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analyzer, TGA)
8. แผ่นเปลวอลูมิเนียม (Aluminium Foil)
9. ถูมือกันความร้อน
10. เกรียง
11. เวอร์เนียร์
12. ไมโครมิเตอร์



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานในงานวิจัย

3.3วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS)

- 3.3.1.1 ทำการชั่งน้ำหนักแป้งถั่วเขียวและกลีเซอรอลใส่ลงภาชนะ ในอัตราส่วน 1:1 [5] ทำการผสมให้เข้ากัน
- 3.3.1.2 เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้งถั่วเขียว
- 3.3.1.3 นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่เตรียมได้มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วน 50 : 50 %wt และมาลิกแอนไฮดรยด์กราฟท์พอลิเอทิลีน 5 %wt LDPE ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

ตอนที่ 2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS)

- 3.3.2.1 นำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้จากตอนที่ 1 มาทำการบด
- 3.3.2.2 นำของผสมที่ได้จากการบดไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3.3.2.3 นำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) ตามภาวะดังตารางที่ 3.7

ตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยเจลาติน

- 3.3.3.1 ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมไว้ในตอนที่ 2 โดยใช้เจลาตินในปริมาณ 0% 2% 4% 6% 8% และ 10% โดยน้ำหนัก

ตอนที่ 4 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยเพกติน

- 3.3.4.1 ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมไว้ในตอนที่ 2 โดยใช้เพกตินในปริมาณ 0% 2% 4% 6% 8% และ 10% โดยน้ำหนัก

ตอนที่ 5 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยคาร์ราจีแนน

3.3.5.1 ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมไว้ในตอนที่ 2 โดยใช้คาร์ราจีแนนในปริมาณ 0% 2% 4% 6% 8% และ 10% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.6 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ที่ปรับปรุงสมบัติเจลาติน (Gelatin) เพกติน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan) โดยมีมาลิคแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม (ในหน่วยกรัม)

LDPE (g)	TPMBS (g)	MAPE (5%wt LDPE) (g)	Gelatin (g)	Pectin (g)	Carrageenan (g)
50	50	2.5	-	-	-
50	48	2.5	2	-	-
50	46	2.5	4	-	-
50	44	2.5	6	-	-
50	42	2.5	8	-	-
50	40	2.5	10	-	-
50	48	2.5	-	2	-
50	46	2.5	-	4	-
50	44	2.5	-	6	-
50	42	2.5	-	8	-
50	40	2.5	-	10	-
50	48	2.5	-	-	2
50	46	2.5	-	-	4
50	44	2.5	-	-	6
50	42	2.5	-	-	8
50	40	2.5	-	-	10

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ที่ปรับปรุงสมบัติเจลาติน (Gelatin) เพกติน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan) โดยมีมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม (ในหน่วยเปอร์เซ็นต์)

LDPE (%)	TPMBS (%)	MAPE (%)	Gelatin (%)	Pectin (%)	Carrageenan (%)
48.78	48.78	2.44	-	-	-
48.78	46.83	2.44	1.95	-	-
48.78	44.88	2.44	3.90	-	-
48.78	42.93	2.44	5.85	-	-
48.78	40.98	2.44	7.80	-	-
48.78	39.02	2.44	9.76	-	-
48.78	46.83	2.44	-	1.95	-
48.78	44.88	2.44	-	3.90	-
48.78	42.93	2.44	-	5.85	-
48.78	40.98	2.44	-	7.80	-
48.78	39.02	2.44	-	9.76	-
48.78	46.83	2.44	-	-	1.95
48.78	44.88	2.44	-	-	3.90
48.78	42.93	2.44	-	-	5.85
48.78	40.98	2.44	-	-	7.80
48.78	39.02	2.44	-	-	9.76

ตารางที่ 3.8 ภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

Description	Unit	Value
PRESSURE		
1 st stage pressure	Bar.	20
2 nd stage pressure	Bar.	20
3 rd stage pressure	Bar.	20
FLOW SPEED		
1 st stage injection speed	Rpm	40
2 nd stage injection speed	Rpm	40
3 rd stage injection speed	Rpm	40
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	160
Zone 2	°C	150
Zone 3	°C	140

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมได้ [31,32]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด (Elongation)	ASTM D 638	mm
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Strain at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 2240	Shore A

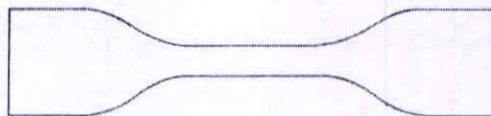
3.4.1.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซึ่ในงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60%ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 100 mm/min

Gauge length : 40 mm

Load cell : 5 kN



รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) = F/A

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

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) = $[(L-L_0)/L_0] * 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแถบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.4.1.2 ความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D 2440 ด้วย Durometer Hardness ชนิด Shore A 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

3.4.1.3 สมบัติความแข็งแรงกระแทก [33]

นำตัวอย่างที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปที่เตรียมเป็นแท่งที่มีรอยบากอยู่ตรงกลางชิ้นงานมาทดสอบความแข็งแรงกระแทกด้วยเครื่องวัดแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) Method A (Izod Type) ที่อุณหภูมิห้อง ตามมาตรฐาน ASTM D256 ซึ่งค่าความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอดที่ได้มีหน่วยเป็น KJ/m^2

3.4.2. การทดสอบสัณฐานวิทยา

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

3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% weight loss at onset degradation temperature) ของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน (N₂) ที่ภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-700 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้วจึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

3.4.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน [34]

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10 x 50 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 30-35% การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างที่ลดลงในแต่ละวัน เป็นระยะเวลา 150 วัน

3.4.5 ปริมาณการดูดซับน้ำ (Water absorption) [35]

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุก ๆ 1 วัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ W_a คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
 W_c คือ น้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ
 W_0 คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

3.4.6 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน

0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^4 kg/cm^2 นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้กราฟสเปกตรัมของสารตัวอย่าง

3.4.7 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก ขนาดของอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่างโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer โดยขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง $3-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว 1° /นาทีแล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าชิ้นตัวอย่าง

3.4.8 การวัดการเปลี่ยนแปลงสี

ทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์รุ่น Miniscan XE Plus โดยใช้ระบบของ CIE $L^*a^*b^*$ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65/10° 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)	:	ความสดใของสี จากสูตร $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$
h° (Hue angle)	:	เป็นตัวเลขที่ระบุว่าสีนั้นมีตำแหน่งอยู่ที่ใดมีหน่วยเป็นองศา จากสูตร $H^\circ = \tan^{-1}(b^*/a^*)$

3.4.9 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

โดยใช้สภาวะการทดลองดังนี้

ซั่งตัวอย่างประมาณ 2-5 มิลลิกรัม

อัตราการให้ความร้อน 10°C/min

ช่วงอุณหภูมิ 50 - 150°C

หาค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ ΔH_f = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนตัวอย่าง (J/g)

ΔH_f^0 = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และใช้มาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม โดยใช้สารก่อเจล ได้แก่ เจลาติน เพกติน และคาร์ราจีแนนในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS โดยเลือกศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของเจลาติน เพกติน และคาร์ราจีแนนที่ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ดีขึ้น ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สันฐาน วิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลาย โดยสมบัติต่างๆที่นำมาศึกษา จัดเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมได้ ให้ผลการทดลองดังนี้

4.1 การศึกษาการเตรียมและการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ที่มีมาเลอิกแอนไฮดรายด์กราฟต์พอลิเอทิลีน (MAPE) เป็นสารช่วยผสม

เนื่องจากในการทดลองต้องการขึ้นรูปชิ้นงาน TPMBS ด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) แต่เกิดปัญหาในระหว่างกระบวนการฉีดขึ้นรูป คือ TPMBS ที่ได้รับความร้อนมีความหนืดสูงทำให้ไม่สามารถไหลเข้าไปในแม่แบบ (Mold) ได้ ส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงาน TPMBS ได้ ดังนั้นจึงทำการแก้ปัญหาโดยการนำ TPMBS มาผสมกับ LDPE เพื่อเพิ่มความสามารถในการฉีดขึ้นรูป แต่เนื่องจาก TPMBS และ LDPE มีความเป็นขั้วต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกตัวกันซึ่งกันและกัน ทำให้มีการเติม MAPE เป็นสารช่วยผสม ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 1 จึงเป็นการศึกษาปริมาณระหว่าง TPMBS และ LDPE ที่เหมาะสมในการเตรียมและการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มี MAPE เป็นสารช่วยผสมที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป

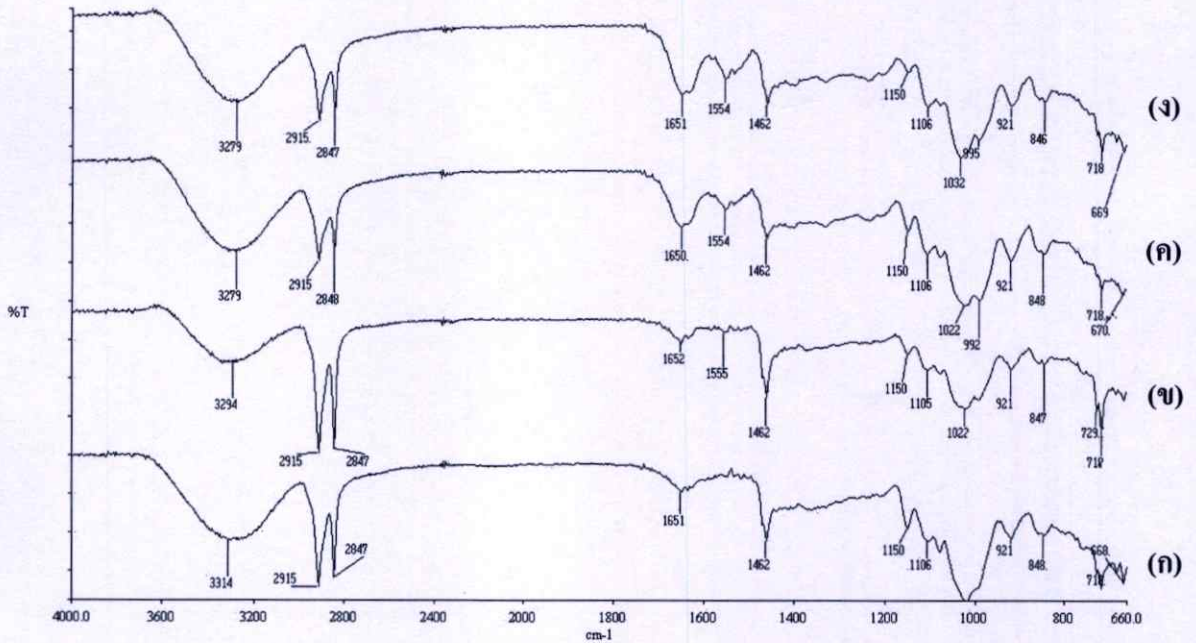
อัตราส่วนระหว่าง TPMBs : LDPE	ลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป
70 : 30	ชิ้นงานไม่เต็มแม่แบบ พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดการอุดตันบริเวณทางเข้า
60 : 40	ชิ้นงานไม่เต็มแม่แบบ
50 : 50	ชิ้นงานเต็มแม่แบบ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง
40 : 60	ชิ้นงานเต็มแม่แบบ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง

จากตารางที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนของ TPMBs ต่อ LDPE ที่เหมาะสมในการเติมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs คือ 50:50 เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปมีลักษณะเต็มแม่แบบ พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์และต่อเนื่อง

4.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยเจลาติน

4.2.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงและไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน ทำได้โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1

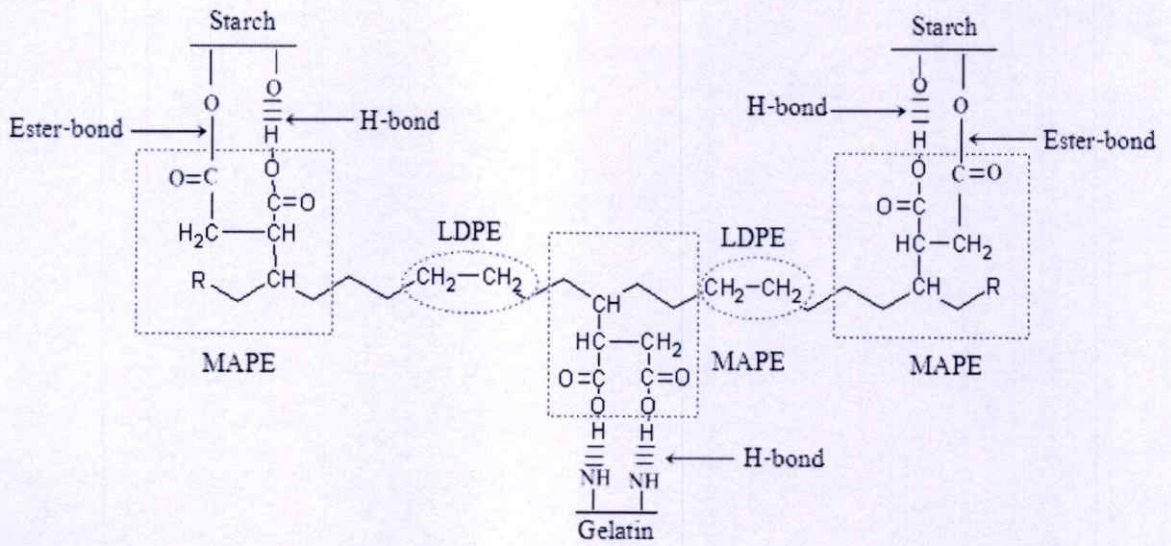


รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก

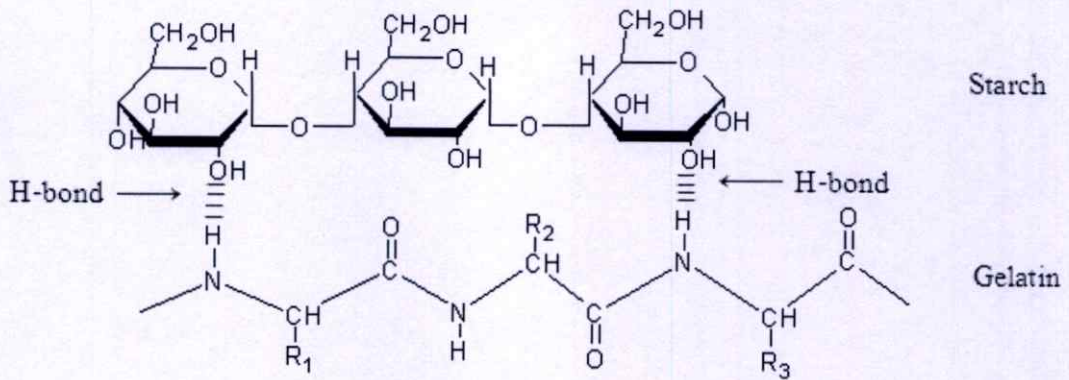
จากรูปที่ 4.1 (ก) แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS โดยพิกัดในช่วง $3500-3250\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้งและกลีเซอรอลซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ TPMBS พิกัดในช่วง $3000-2800\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ CH_2 และ/หรือ CH_3 ของแป้ง LDPE และ MAPE สำหรับพิกัดที่ 1650 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแป้ง พิกัดที่ 1460 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C-H bending ของ CH_2 ของ LDPE และ MAPE แถบพิกัดช่วง $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง และพิกัดในช่วง $1200-1000\text{ cm}^{-1}$ แสดงลักษณะการสั่นแบบ C-O-H bending ของแป้ง [36-38]

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS รูปที่ 4.1 (ก) และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน รูปที่ 4.1 (ข-ง)

พบว่าเมื่อมีการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ทำให้เกิดพีคใหม่ขึ้นที่ตำแหน่ง 1555 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ N-H bending ของ NH_2 ของเจลาติน และเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น (จาก 2% เป็น 10%) ส่งผลให้ความเข้มของพีคเพิ่มขึ้น เนื่องจากเจลาตินจัดเป็นโปรตีนซึ่งโครงสร้างหลักประกอบด้วยกรดอะมิโน เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้หมู่ NH_2 เพิ่มขึ้น ความเข้มของสเปกตรัมจึงเพิ่มขึ้น [39] นอกจากนี้ที่ 1650 cm^{-1} ปรากฏพีคของ C=O stretching ของเจลาตินซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับการสั่นแบบ O-H bending ของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแป้ง และมีความเข้มของสเปกตรัมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น (จาก 2% เป็น 10%) เนื่องจากปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นเช่นกัน สำหรับพีคที่ $3500\text{-}3250\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจาก O-H stretching ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่เอมีนของเจลาตินเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่มาลิคิกแอนไฮไดรด์ของ MAPE เกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ขึ้น สำหรับอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งถั่วเขียว เจลาติน และ MAPE แสดงดังรูปที่ 4.2



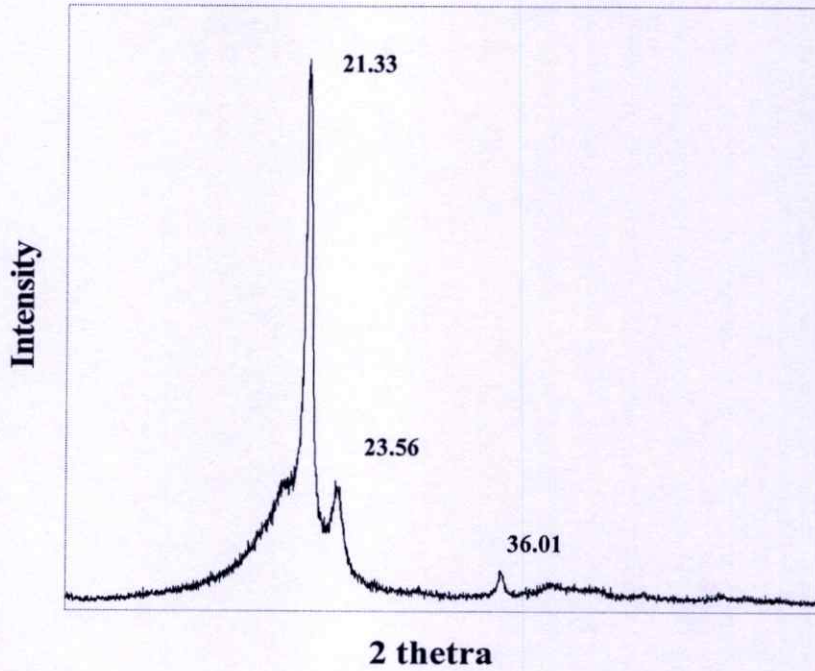
รูปที่ 4.2 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งถั่วเขียว เจลาติน และ MAPE



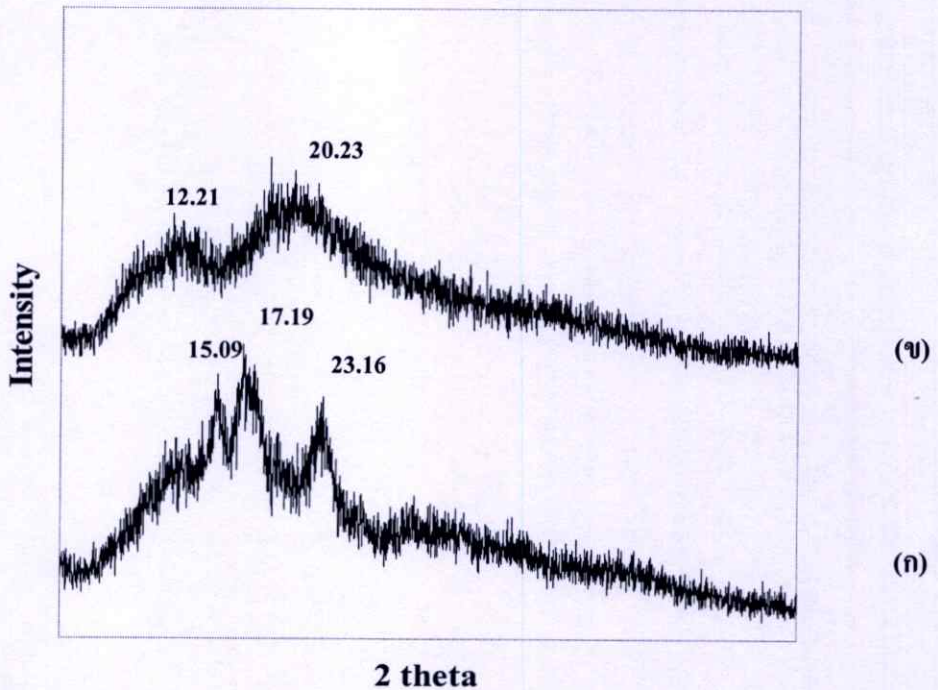
รูปที่ 4.3 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งถั่วเขียวและเจลาติน

4.2.2 XRD

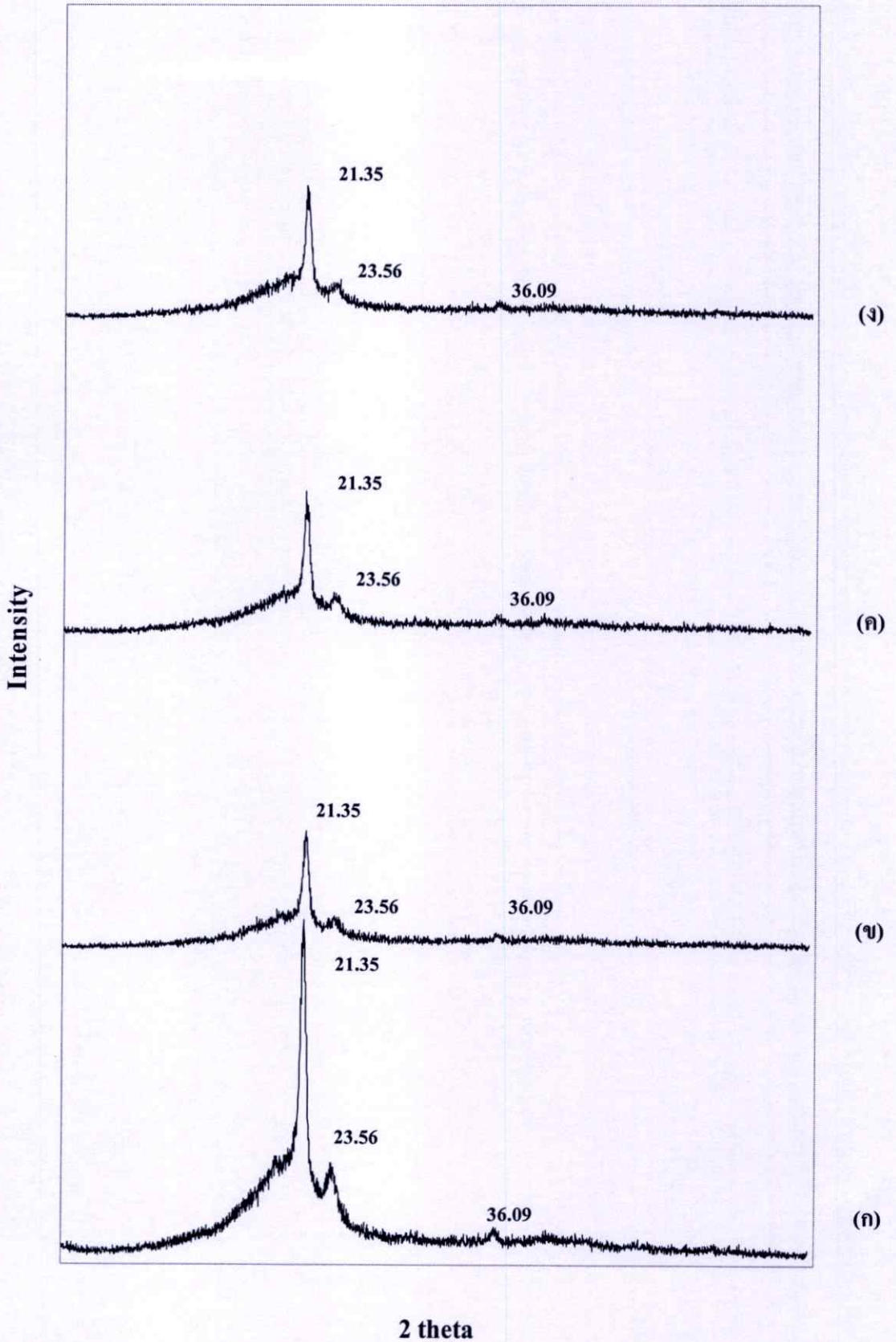
การศึกษาโครงสร้างผลึกของ LDPE แบ่งถั่วเขียว เจลาติน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4-4.6



รูปที่ 4.4 ดิฟแฟรคโตแกรมของ LDPE



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟรคโตแกรมของ (ก) แบ่งถั่วเขียว และ (ข) เจลาติน



รูปที่ 4.6 ดิฟแฟรคโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงโครงสร้างผลึกของ LDPE แป้งถั่วเขียว และเจลาติน พบว่า LDPE (รูปที่ 4.4) พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic [40, 41] สำหรับ X-ray diffraction pattern ของแป้งถั่วเขียว (รูปที่ 4.5) แสดงโครงสร้างผลึกแบบ C-type (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 15.09° 17.19° และ 23.16° [11] และเจลาติน (รูปที่ 4.5) พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 12.21° และ 20.23° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ α -Helix [39, 42]

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเจลาติน (รูปที่ 4.6) พบพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของ LDPE เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการใช้ปริมาณของ LDPE ที่ 50 % โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารช่วยผสม MAPE ทำให้วัฏภาคของ LDPE และ TPMBS มีความเข้ากัน แต่เมื่อมีการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ส่งผลให้ความเข้ม (Intensity) ของพีคที่มุม 2θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลของเจลาตินมีขนาดใหญ่อาจไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ทำให้ความเป็นผลึกของ LDPE มีค่าลดลง นอกจากนี้ อาจเกิดจากการที่อนุภาคของแป้งถั่วเขียวรวมตัวกับเจลาตินเกิดเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ LDPE ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของ LDPE เกิดการจัดเรียงตัวได้ยากขึ้นซึ่งแสดงดังผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.8)

4.2.3 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ H° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	H°
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 0%	60.82	-0.53	4.79	4.83	82.72
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 2%	54.29	0.38	8.79	8.80	83.43
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 6%	47.60	1.26	19.53	19.57	86.32
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	44.27	2.06	22.42	22.51	87.54

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^* แสดงค่าความสดใสของสี และค่า H° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

ค่าความสว่าง (L^*)

จากตารางที่ 4.2 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติมีค่าความสว่างเท่ากับ 60.82 ซึ่งเป็นชิ้นงานตัวอย่างที่มีความสว่างมากที่สุด สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน พบว่าเมื่อมีการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ทำให้ค่าความสว่างของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างที่มีการเติมเจลาตินมีสีเข้มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเจลาตินที่ใช้ต่างกัน (2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก) พบว่าสีของชิ้นงานตัวอย่างมีแนวโน้มเข้มขึ้น โดยความสว่างมีค่าลดลงเป็น 54.29 47.60 และ 44.27 ตามลำดับ

ค่า a*

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มแสดงสีออกไปทางสีเขียว โดยมีค่า a* เท่ากับ -0.53 และเมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ใช้ปริมาณต่างกัน (2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก) พบว่าชิ้นงานตัวอย่างแสดงสีออกไปทางสีแดง โดยมีค่า a* เท่ากับ 0.38 1.26 และ 2.06 ตามลำดับ

ค่า b*

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติมีค่า b* เท่ากับ 4.79 แสดงสีออกไปทางสีเหลือง แต่ค่า b* ที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน และเมื่อพิจารณาปริมาณของเจลาตินที่ใช้ต่างกัน (2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก) พบว่าชิ้นงานมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น โดยค่า b* มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8.79 19.53 และ 22.42 ตามลำดับ

ค่า C*

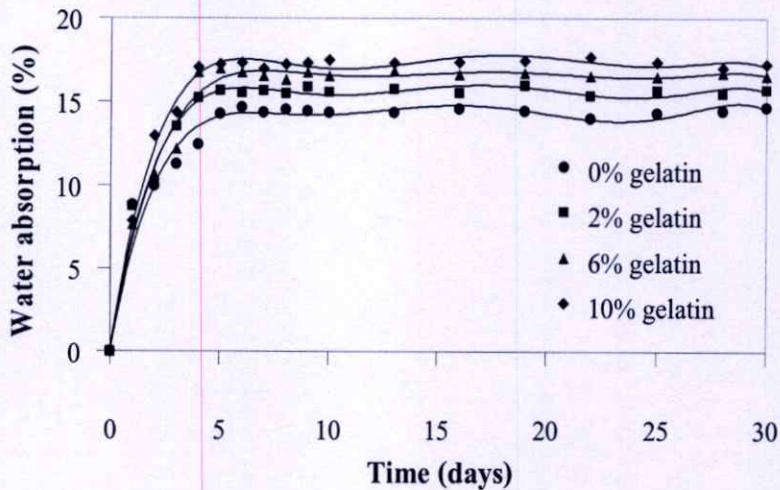
พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติมีความสดใสของสีน้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน โดยมีค่า C* เท่ากับ 4.83 และเมื่อพิจารณาปริมาณของเจลาตินที่ใช้ต่างกัน (2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก) พบว่าชิ้นงานตัวอย่างมีความสดใสของสีเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น โดยมีค่า C* เท่ากับ 8.80 19.57 และ 22.51 ตามลำดับ

ค่า H°

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน มีตำแหน่งของสีใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งสีของสีมาตรฐาน และเมื่อพิจารณาปริมาณของเจลาตินที่ใช้ต่างกัน (2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก) พบว่าที่ปริมาณเจลาติน 10 % โดยน้ำหนัก ให้ค่า H° สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสีมาตรฐาน โดยภาพรวมแล้วชิ้นงานตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน มีสีออกไปทางสีเหลือง

4.2.4 การดูดซับน้ำ

ศึกษาการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

จากการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าการดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ในช่วง 4 วันแรกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแป้งถั่วเขียวมีองค์ประกอบเป็นอะไมโลสและอะมิโลเพกตินที่มีสมบัติชอบน้ำจึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี [43] และเจลาตินมีโครงสร้างของหมู่อะมิโนซึ่งมีความเป็นขั้วและมีสมบัติชอบน้ำ [44] เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs มีการดูดซับน้ำได้น้อยลง จนถึงวันที่ 6 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs มีความอิมตัวไม่สามารถดูดซับน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีก ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาปริมาณของเจลาตินที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ต่างกัน พบว่าชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการเติมเจลาติน 10 % โดยน้ำหนัก มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs มีความต้านทานต่อการดูดซับน้ำลดลง เนื่องจากเจลาตินเป็นสารก่อเจลทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้มาก [15] ส่งผลให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs สามารถดูดซับ

น้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้จากผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.8) พบช่องว่างภายในชิ้นงานซึ่งเกิดจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคของส่วนที่มีขี้ (แป้งถั่วเขียวและเจลาติน) และไม่มีขี้ (LDPE) ทำให้น้ำสามารถเข้าไปในชิ้นงานได้มากส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีความสามารถในการดูดน้ำได้สูง ซึ่งเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 14.67% 15.98% 16.72% และ 17.45% ตามลำดับ

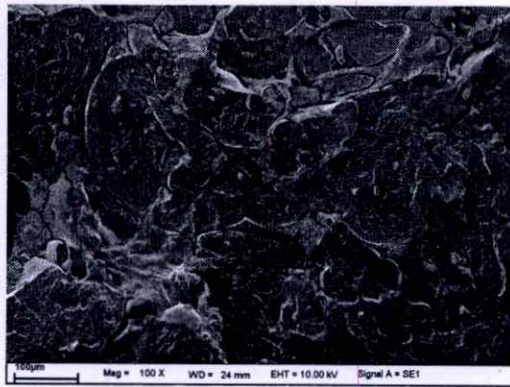
4.2.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารช่วยผสม MAPE และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินในปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ทำได้โดยการใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของเมทริกซ์ของ LDPE แป้งถั่วเขียว และเจลาติน ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8

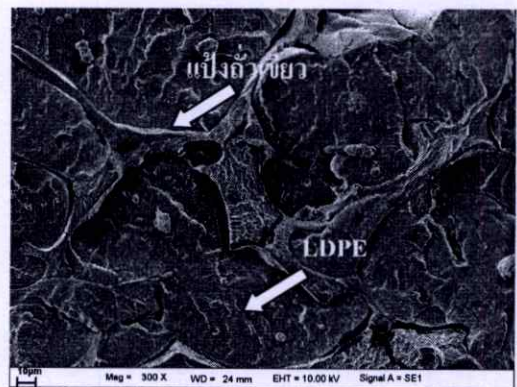
จากรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการเติมเจลาติน 0 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.8 (ก)-(ข)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าวัฏภาคของแป้งถั่วเขียวและ LDPE มีการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการเติมเจลาติน 2 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.8 (ค)-(ง)) เจลาติน 6 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.8 (จ)-(ฉ)) และเจลาติน 10 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.8 (ช)-(ซ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ทำให้ความเข้ากันได้ของวัฏภาคของ LDPE และ TPMBs มีค่าลดลง ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยส่วนของ TPMBs เกิดการรวมตัวกับเจลาตินทำให้มีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของ LDPE เกิดเป็นรอยต่อระหว่างวัฏภาคเป็นจำนวนมาก เนื่องจาก TPMBs และเจลาตินมีความเป็นขี้เหมือนกัน

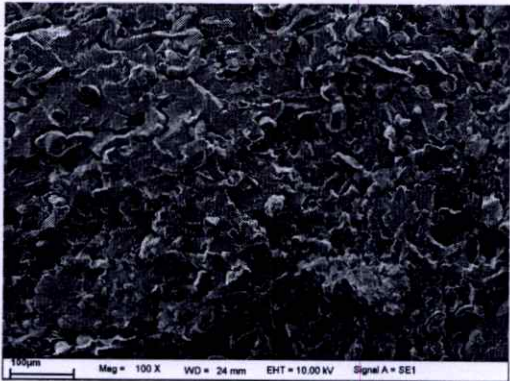
นอกจากนี้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีรูพรุนหรือช่องว่างกระจายตัวอยู่ในชิ้นงาน เนื่องมาจากการที่วัฏภาคของ TPMBs และอนุภาคของเจลาตินมีการดูดซับความชื้นไว้ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นเกิดเป็นช่องว่างภายในชิ้นงาน



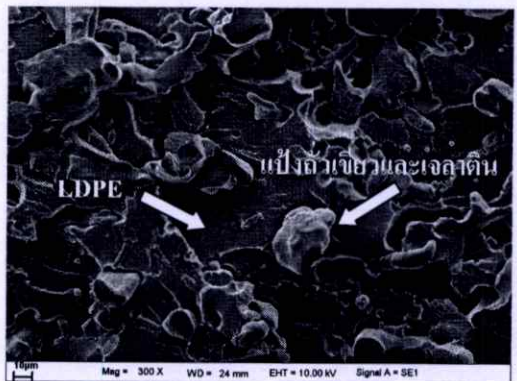
(ก)



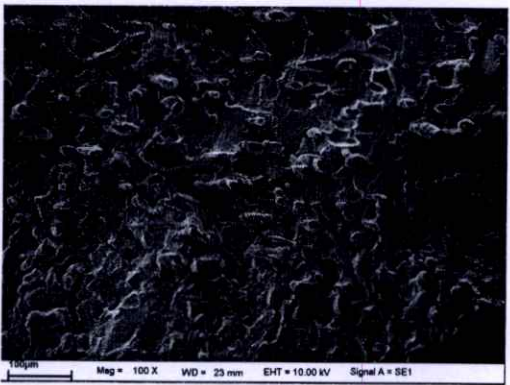
(ข)



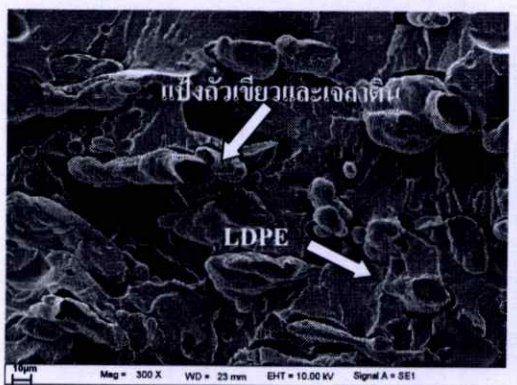
(ค)



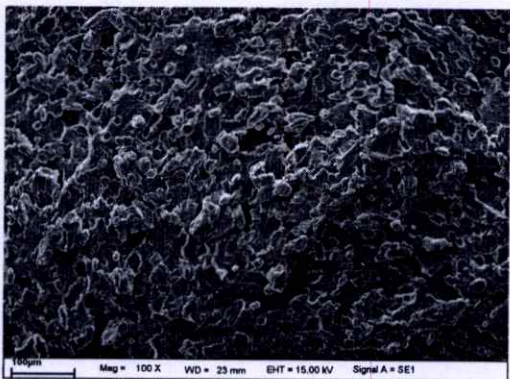
(ง)



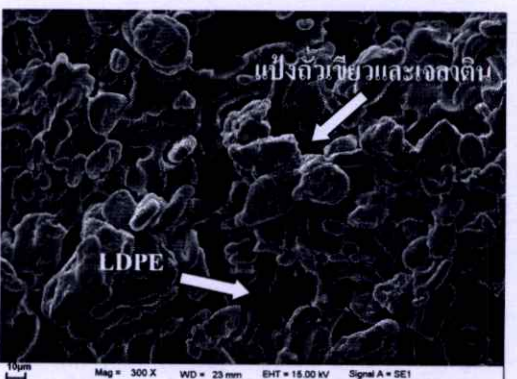
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลลาตินในปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]

4.2.6 ดัชนีการไหล

การศึกษาค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาตินในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน

ตัวอย่าง	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ออกมาจากหัวคายของเครื่อง Melt Flow Indexer
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 0%	15.73±1.38	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 2%	17.23±0.99	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 6%	23.17±1.52	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	27.54±1.51	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง

จากการศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาตินในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.3 พบว่าการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ทำให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมเจลาตินในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนืดของระบบน้อยลงและค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเจลาตินที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS เกิดการรวมตัวกับอนุภาคของแป้งถั่วเขียวเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนกระจายตัวแทรกอยู่ในวัฏภาคของ LDPE เกิดการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจนส่งผลให้ภายในชิ้นงานมีช่องว่างเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.8) ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้รับความร้อนสามารถไหลได้ง่าย เป็นผลให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น และการเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ส่งผลให้ความเป็นผลึกของส่วนที่เป็น LDPE ลดลง นอกจากนี้การเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ช่วยให้กระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทำได้ง่ายขึ้น

4.2.7 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง การยืดออก เปอร์เซ็นต์ความเครียด โมดูลัสและความแข็งกด โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินในปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

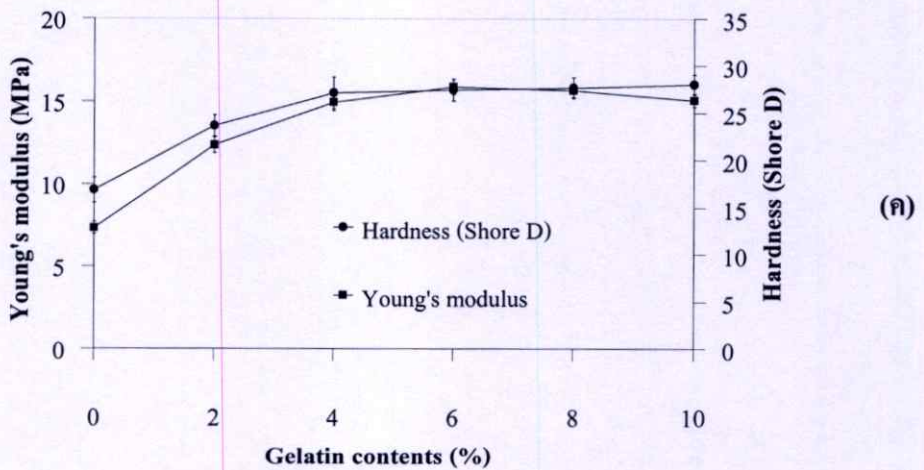
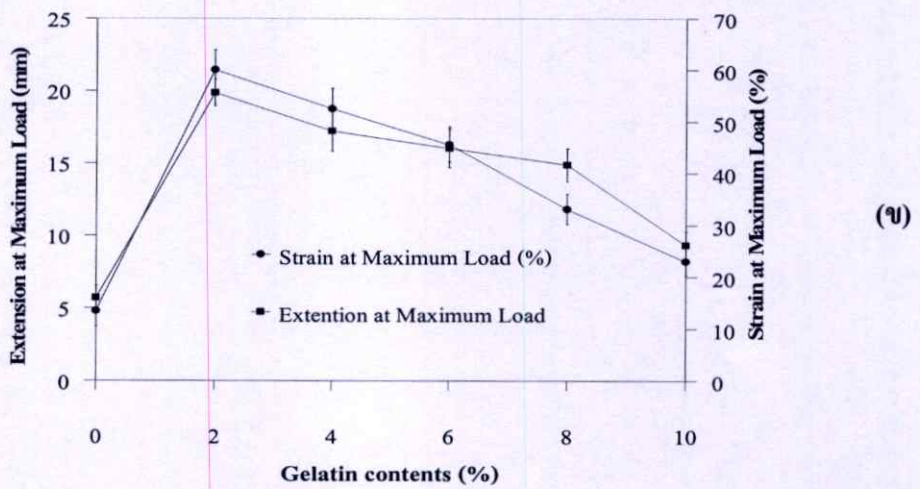
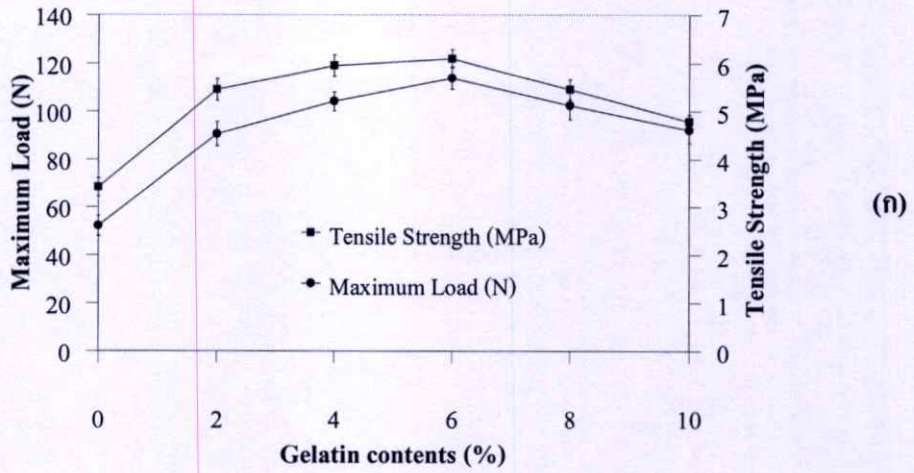
รูปที่ 4.9 (ก) – (ค) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเจลาตินในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.9 (ก)) และโมดูลัส (รูปที่ 4.9 (ค)) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเจลาตินสามารถเข้ากักับแป้งได้ดี เพราะในโครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นขั้วเหมือนกัน กล่าวคือแป้งถั่วเขียวมีหมู่ไฮดรอกซิลและเจลาตินมีหมู่เอมีนเป็นหมู่ฟังก์ชัน นอกจากนี้มีการเติมสารช่วยผสม MAPE ซึ่งมีโครงสร้างส่วนหนึ่งเป็นพอลิเอทิลีนที่สามารถเกิดการเกี่ยวพันสายโซ่ (Chain Entanglement) กับ LDPE และ โครงสร้างอีกส่วนหนึ่งมีมาลิกแอนไฮไดรด์ที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่เอมีนของเจลาตินเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนและพันธะเอสเทอร์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งฟังก์ชันที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ที่พบว่าตำแหน่งของการสั่นแบบ O-H stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุง (รูปที่ 4.1) นอกจากนี้ได้มีการเติม LDPE ที่ปริมาณ 50 % โดยน้ำหนักในทุกๆสูตร จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าสูง เนื่องจาก LDPE มีความสามารถในการต้านทานแรงดึง เหนียว และยืดหยุ่นได้ดี [40] ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความสามารถในการรับแรงได้ดี ทำให้สมบัติต่างๆที่เกี่ยวกับการรับแรงมีค่ามากขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณของเจลาติน 6 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณของเจลาตินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งความแข็งแรงของเจลมีผลต่อค่าความแข็งแรงของชิ้นงาน ดังนั้นถ้าชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงสูงแสดงว่ามีความแข็งแรงของเจลมากจึงต้องใช้แรงในการทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปมากด้วย [15, 44] เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นเป็น 8 % โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสมีค่าลดลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากความแข็งแรงของเจลมีค่าสูงส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งและเปราะมากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของเจลาตินเกิดการรวมตัวกับอนุภาคของเม็ดแป้งถั่วเขียว และไม่สามารถเข้ากันได้ดีกับ LDPE ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคมากขึ้น ซึ่งรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่เกิดขึ้นเป็นบริเวณที่มีแรงยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงจึงเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.8) ที่พบว่าอนุภาคของเจลาตินเกิดการรวมตัวกับอนุภาคของเม็ดแป้งถั่วเขียวกระจายตัวแทรกอยู่ในวัฏภาคของ LDPE

ส่วนการยืดออกของตัวอย่าง และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.9 (ข)) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าสูงสุดที่ปริมาณของเจลาติน 2 % โดยน้ำหนัก จากนั้นมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากเมื่อชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ความ

ยืดหยุ่นลดลงซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Veiga-Santos และคณะ [2] ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังผสมเจลาติน พบว่าเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดึงยึดของชิ้นงานมีค่าลดลง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแป้งลดลง โดยโมเลกุลของเจลาตินจะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งทำให้จัดขบวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของแป้ง

สำหรับความแข็งแรง (รูปที่ 4.9 (ค)) พบว่าเมื่อเติมเจลาตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เจลาตินทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS แข็งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเจลาติน และเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของเจลาตินกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มากขึ้น

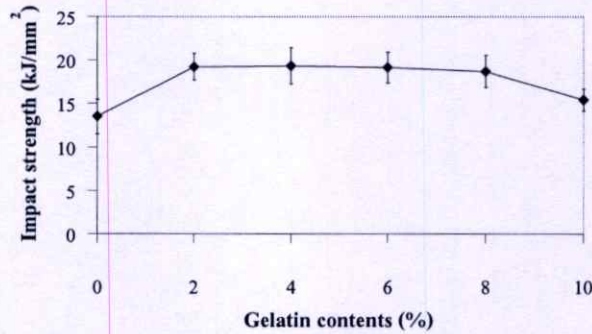
จากการพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาตินในปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณของเจลาตินที่เหมาะสมที่สุดคือ 6 % โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ดังแสดงได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงดึง ความแข็งแรงดึง การยืดออก เบรคเซ้นต์ ความเครียด โมดูลัส และความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีค่าเพิ่มขึ้น 118.1% 78.4% 181.7% 238.3% 116.5% และ 62.9% ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ง) มอดุลัส ความแข็งกด

4.2.8 ความแข็งแรงกระแทก

การศึกษาความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบจากค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.10

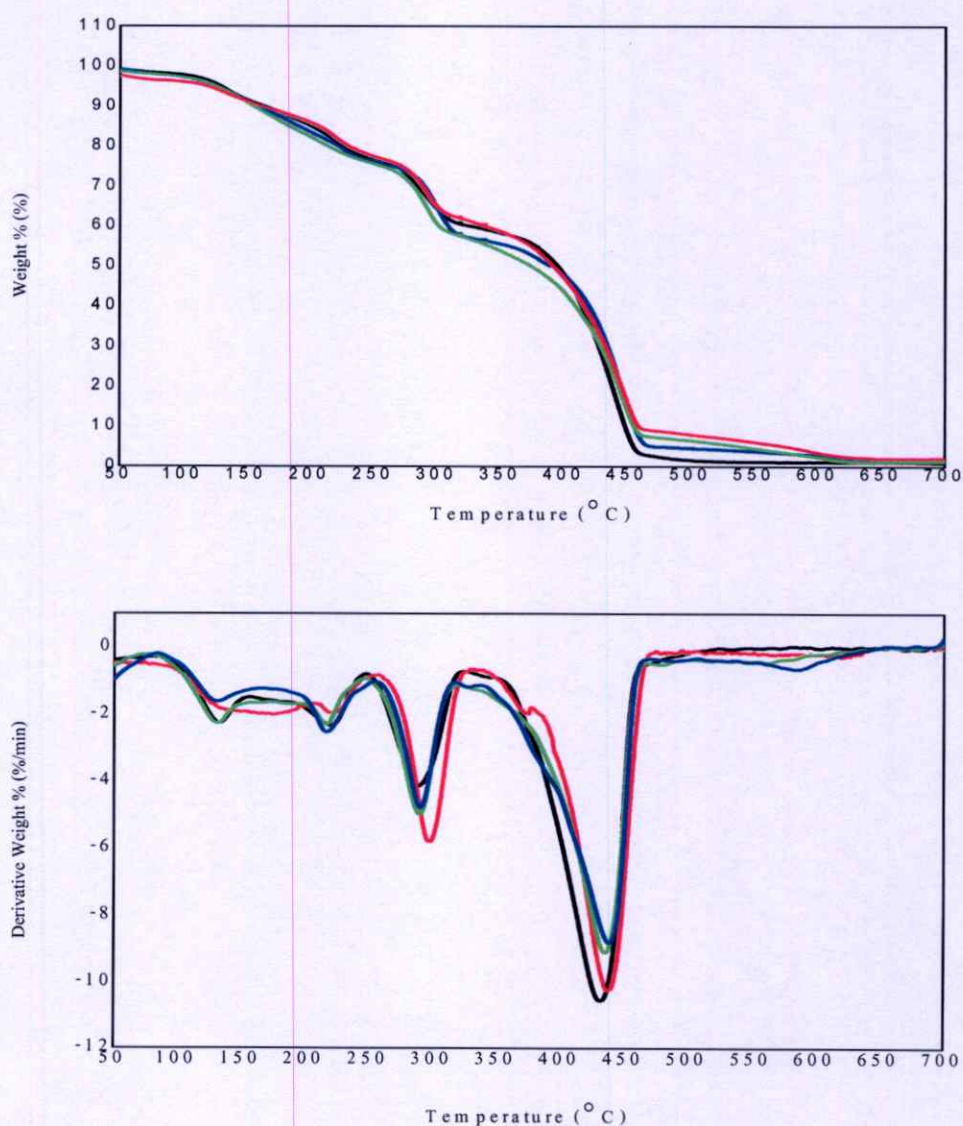


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน

รูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเจลาติน เนื่องจากโครงสร้างของเจลาตินมีความเป็นขี้ทำให้อาจเข้ากันกับอนุภาคของแป้งถั่วเขียวได้ เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคของแป้งถั่วเขียวและเจลาติน และการสร้างพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแป้งถั่วเขียวและ MAPE ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR (รูปที่ 4.1) ทำให้มีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจาก LDPE เนื่องจาก LDPE มีความสามารถในการต้านทานแรงดึง เหนียว และยืดหยุ่นได้ดี ทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความสามารถในการรับแรงได้ดี ทำให้สมบัติต่างๆที่เกี่ยวกับการรับแรงมีค่ามากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณของเจลาตินที่ใช้ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้มีความแข็งมากขึ้น ความยืดหยุ่นของชิ้นงานลดลงทำให้รับแรงกระแทกได้น้อยลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากโมเลกุลของเจลาตินไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งและ LDPE ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของแป้งและ LDPE เมื่อมีแรงมากระทำส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงได้น้อย ชิ้นงานจึงเกิดการแตกหักได้ง่าย

4.2.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก โดยสมบัติทางความร้อนที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation temperature) ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน (N_2) และใช้สภาวะในการทดสอบคือ อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิในช่วง 50-700 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ (สีดำ) 0 % (สีน้ำเงิน) 2 % (สีเขียว) 6 % และ (สีแดง) 10 % โดยน้ำหนัก

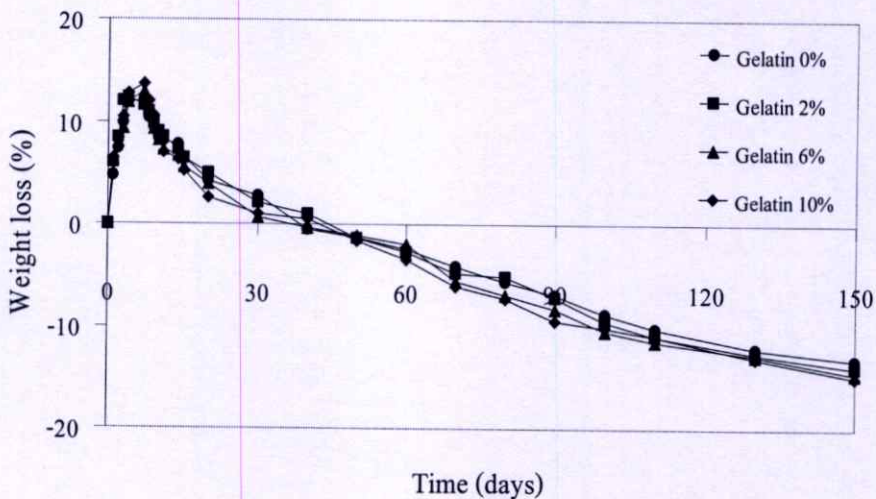
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0.26 และ 10 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งข้าวเจ้าและเจลาติน)	ช่วงที่ 3 (LDPE)
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 0 %	202.8	275.5	415.1
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 2 %	200.1	279.0	413.6
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 6 %	199.3	280.7	413.3
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 10 %	201.5	280.2	414.2

จากรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.4 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 % โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 3 ช่วงกล่าวคือ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิประมาณ 202.8 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอล [45-46] ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 275.5 °C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งข้าวเจ้า [5, 47] และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิ 415.1 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ LDPE [5, 48] จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าเจลาตินแสดงช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 270 °C [44] โดยอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเจลาตินมีค่าใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมเจลาตินปริมาณ 2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งและเจลาตินอยู่ที่ 279.0 °C 280.7 °C และ 280.2 °C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของแป้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแป้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเจลาตินที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวมีค่าไม่แตกต่างกัน

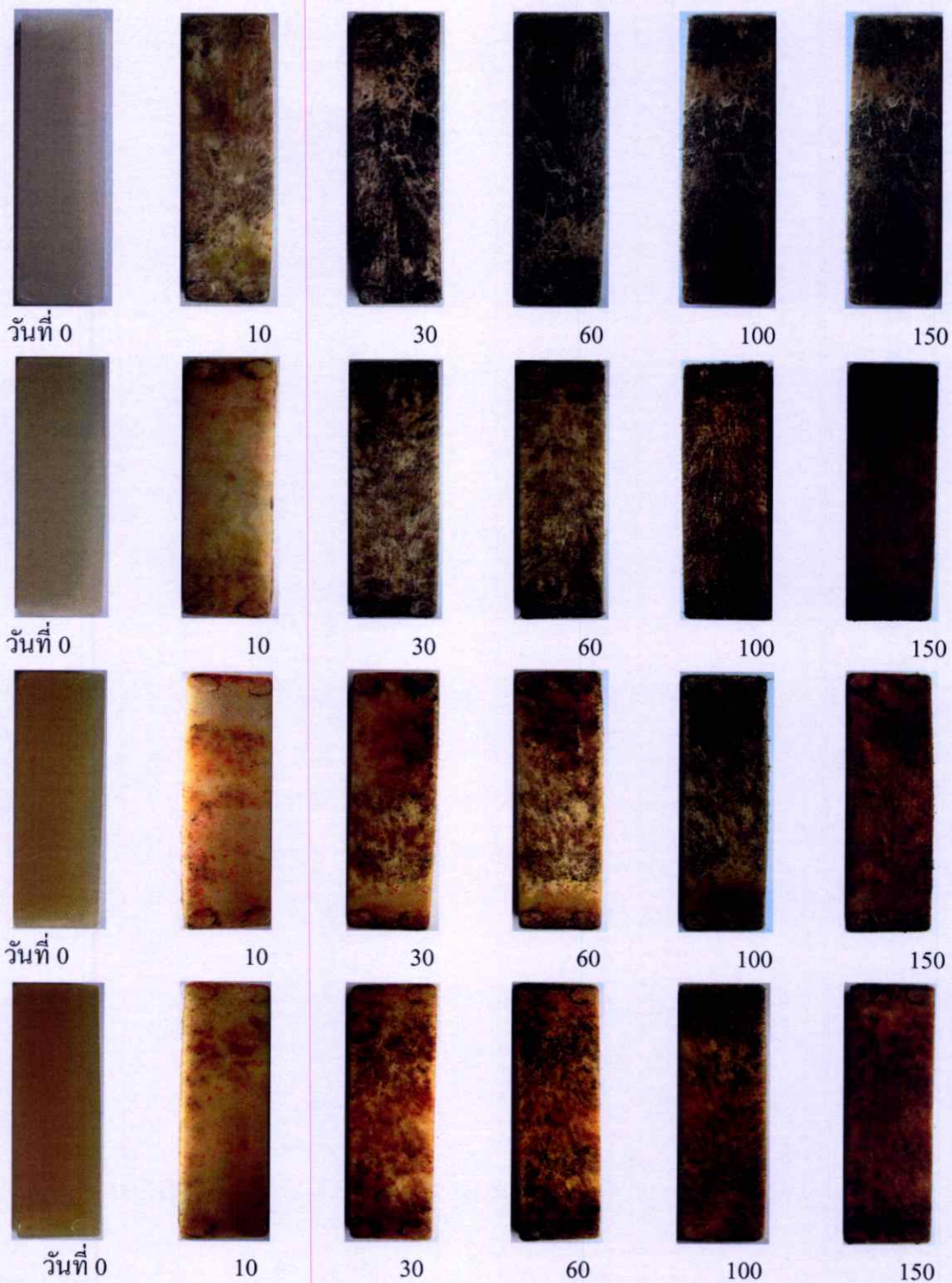
4.2.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินโดยการนำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินดังรูปที่ 4.12 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน โดยในช่วงแรกน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับน้ำจากดินเข้าไปในชิ้นงาน โดยน้ำหนักของชิ้นงานมีค่ามากที่สุดในช่วง 4 วันแรกของการฝังดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินในหัวข้อที่ 4.2.4 กล่าวคือ เมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดน้ำของชิ้นงานเพิ่มขึ้น จากนั้นน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงโดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อพิจารณาปริมาณของเจลาตินที่ใช้แตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของเจลาตินที่เติมลงในชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีปริมาณเพิ่มขึ้น แนวโน้มการย่อยสลายด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโปรตีนที่เป็นโครงสร้างหลักของเจลาตินเกิดการย่อยด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้ง่ายกว่าแป้ง [44] ทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีพื้นผิวที่ขรุขระซึ่งเกิดจากส่วนที่เป็นแป้งถั่วเขียวและเจลาตินถูกกัดกินดังแสดงในรูปที่ 4.13

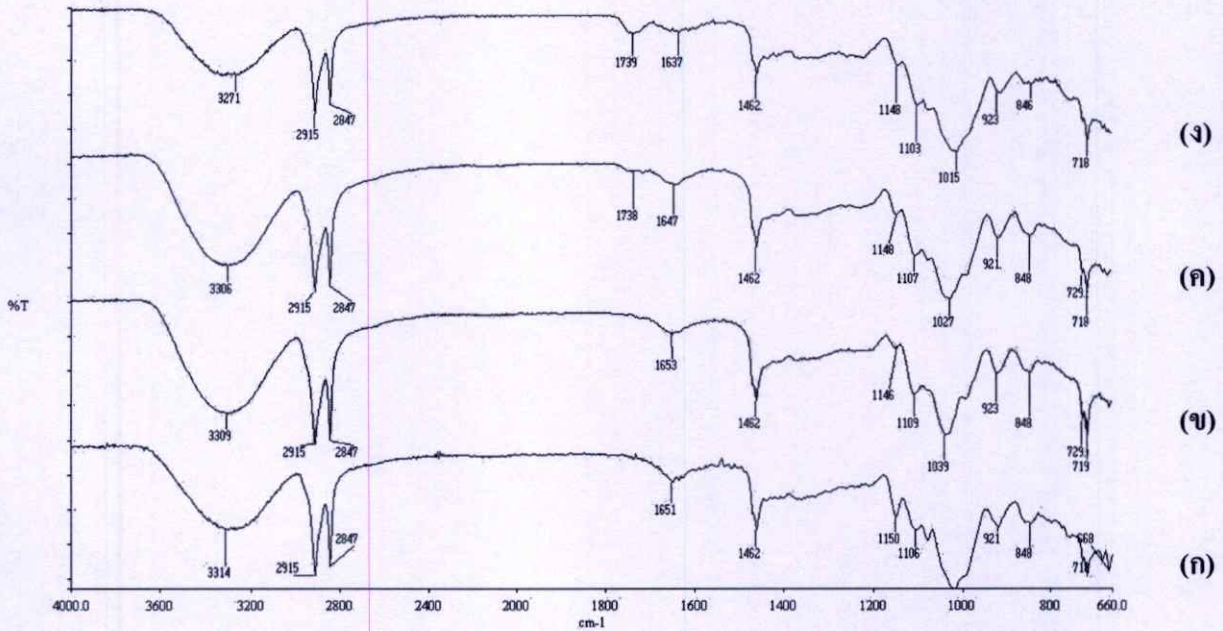


รูปที่ 4.13 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินที่ ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

4.3 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์จากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยเพกติน

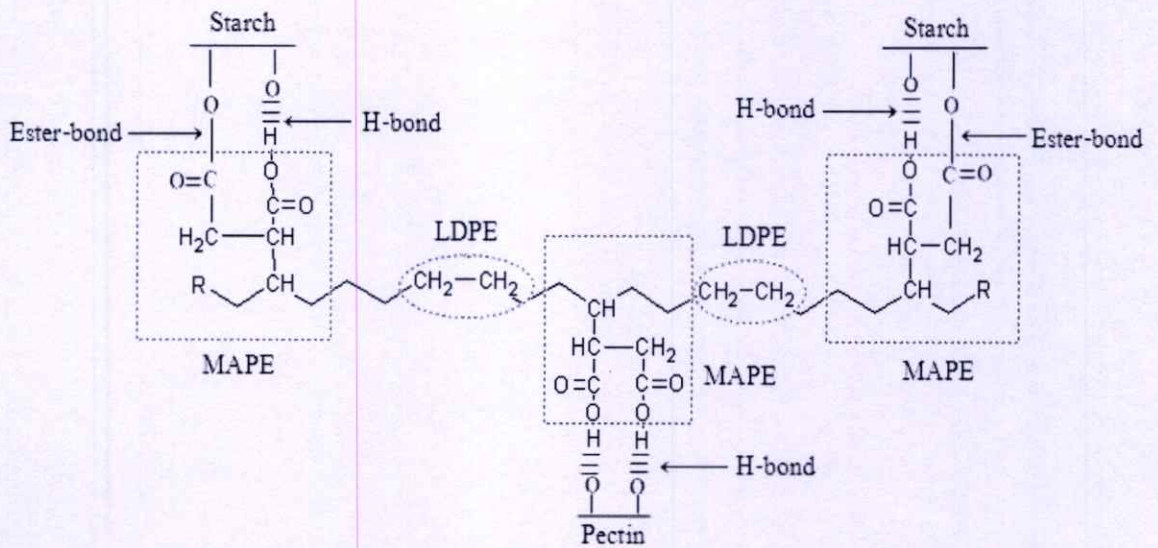
4.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงและไม่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14

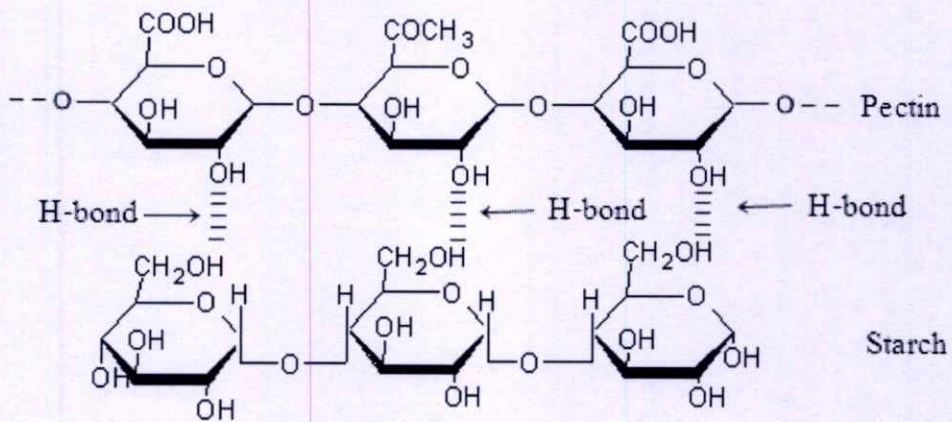


รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ (ก) 0% (ข) 2% (ค) 6% และ (ง) 10% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณต่างๆ กันพบพีกอินฟราเรดสเปกตรัมเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน โดยพีกในช่วงการสั่นแบบ O-H stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่ไฮดรอกซิลของเพกตินเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น และการสร้างพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่มาลิอิกแอนไฮไดรด์ของ MAPE ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.16 นอกจากนี้การเติมเพกตินลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ทำให้เกิดพีกใหม่ขึ้นที่ตำแหน่ง 1740 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่ -COOH ของเพกติน [49] โดยความเข้มของพีกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เพกตินที่เพิ่มขึ้น



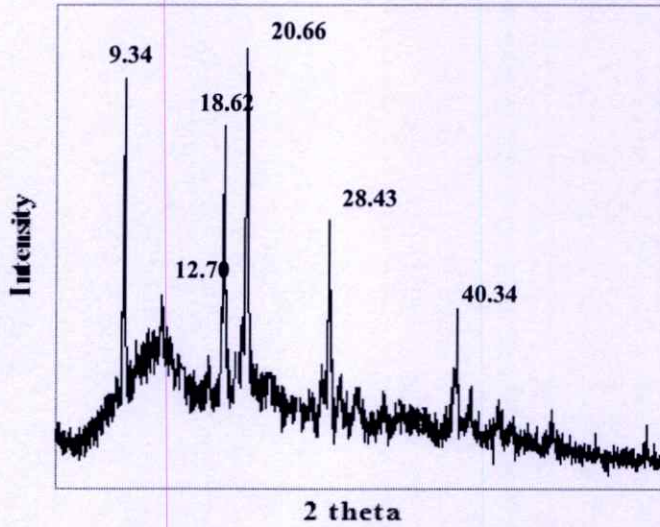
รูปที่ 4.15 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งข้าวเหนียว เพกติน และ MAPE



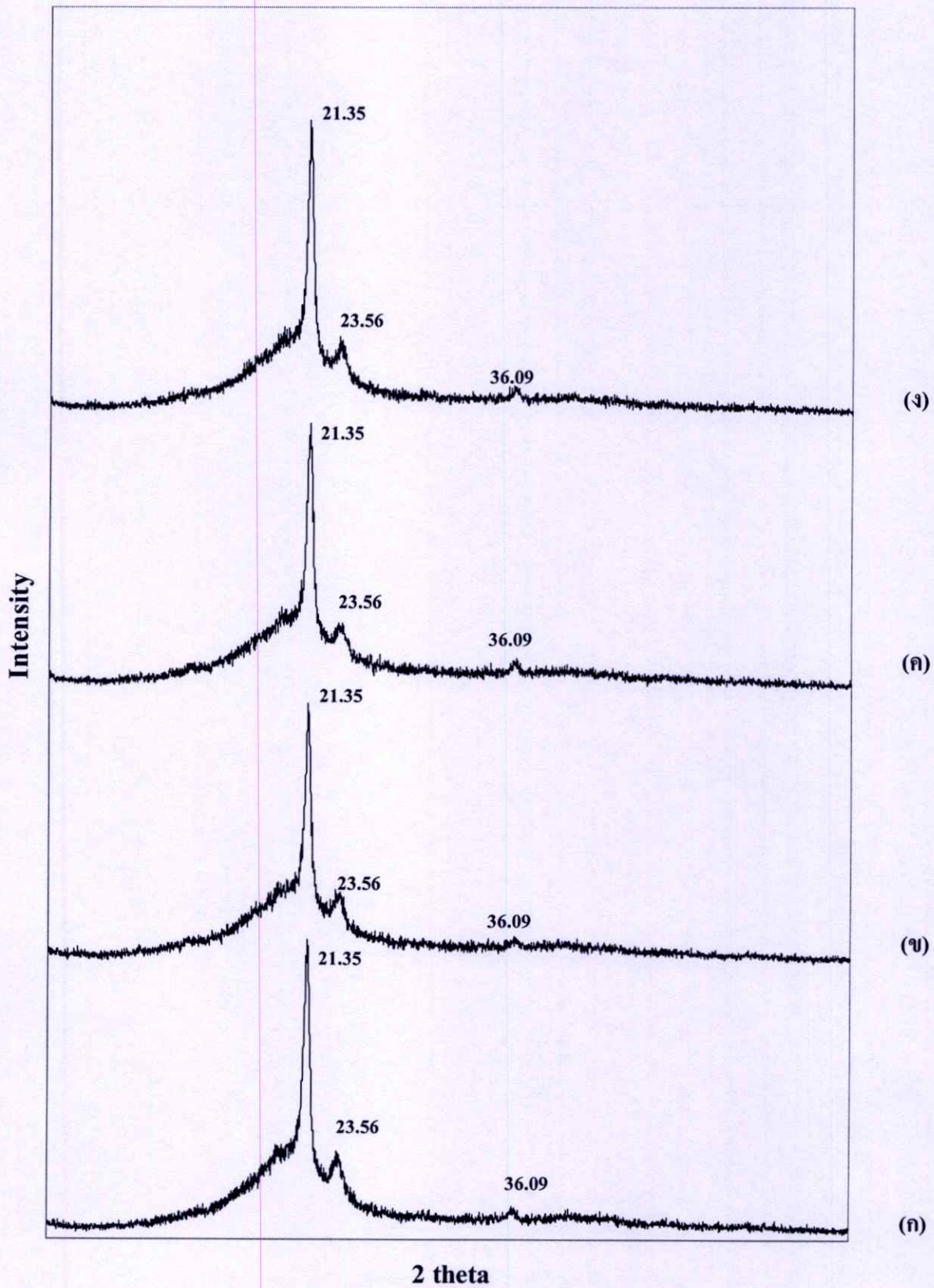
รูปที่ 4.16 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งข้าวเหนียวและเพกติน

4.2.2 XRD

การศึกษาโครงสร้างผลึกของเพกติน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17-4.18



รูปที่ 4.17 ดิฟแฟรคโตแกรมของเพกติน



รูปที่ 4.18 คิฟแฟรกโตแกรมของพอลิเมอร์สมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.17 แสดงโครงสร้างผลึกของเพกตินพบพีคที่มุม 2 θ เท่ากับ 9.34° 12.70° 18.62° 20.66° 28.43° และ 40.34° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ β -Helix [50, 51] เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเพกติน (รูปที่ 4.18 (ก)) พบพีคที่มุม 2 θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของ LDPE เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการใช้ปริมาณของ LDPE ที่ 50 % โดยน้ำหนัก และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มาปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน (รูปที่ 4.18 (ข)-(ง)) พบว่าดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้มีรูปแบบเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS และมีความเข้ม (Intensity) ของดิฟแฟรกโตแกรมไม่เปลี่ยนแปลง โดยพบพีคที่มุม 2 θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° ซึ่งเป็นพีคที่มุม 2 θ ของ LDPE แสดงให้เห็นว่าเพกตินที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของ LDPE

4.3.3 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10% โดยน้ำหนักโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L^* a^* b^* C^* และ H° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L^*	a^*	b^*	C^*	H°
LDPE/TPMBS blend + Pectin 0%	60.82	-0.53	4.79	4.83	82.72
LDPE/TPMBS blend + Pectin 2%	49.89	1.40	12.67	12.75	83.69
LDPE/TPMBS blend + Pectin 6%	36.09	6.52	14.67	16.05	66.04
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	31.76	7.97	17.39	19.13	65.38

หมายเหตุ ค่า L^* กำหนดค่าความสว่าง ค่า a^* กำหนดสีเหลืองหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว ค่า b^* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และ

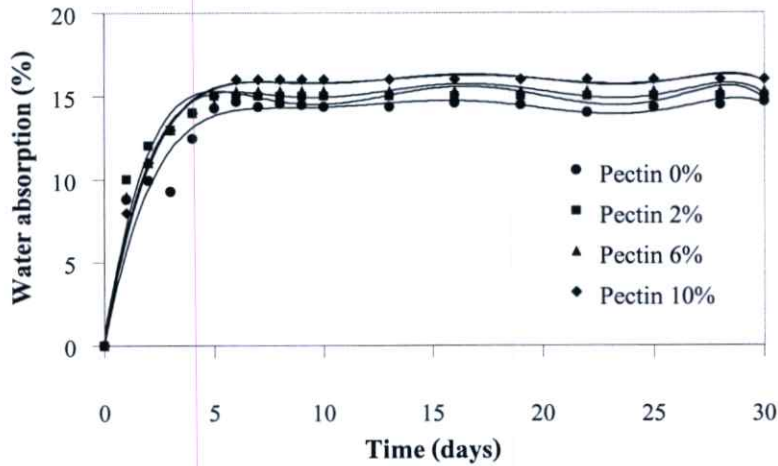
ถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน, ค่า C^* แสดงค่าความสดใสของสี และค่า H° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าการเปรียบเทียบการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณแตกต่างกัน พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (L^* a^* b^* และ H°) มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเพกติน โดยค่าความสว่าง (L^*) ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานตัวอย่างมีสีเข้มขึ้นและทึบแสงขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของเพกตินที่ใช้ต่างกัน (0% 2% 6% และ 10% โดยน้ำหนัก) พบว่าสีของชิ้นงานตัวอย่างมีแนวโน้มเข้มขึ้น โดยค่าความสว่างมีค่าลดลงเป็น 60.82 49.89 36.09 และ 31.76 ตามลำดับ

สำหรับค่า a^* มีแนวโน้มการเปลี่ยนสีไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินแสดงสีออกสีแดง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเพกตินเพิ่มขึ้น โดยที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเพกตินแสดงสีออกไปทางสีเขียว โดยชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีค่า a^* เท่ากับ -0.53 1.40 6.52 และ 7.97 ตามลำดับ สำหรับค่า b^* ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS แสดงสีออกไปทางสีเหลืองเช่นเดียวกันหมด โดยที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินให้ค่า b^* เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าแสดงค่าความสดใสของสี (C^*) ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินที่ปริมาณ 2 6 และ 10% โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเพกติน นอกจากนี้ค่าตำแหน่งของสี (H°) เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยภาพรวมแล้วชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินแสดงสีของชิ้นงานเป็นสีน้ำตาล

4.3.4 การดูดซับน้ำ

ศึกษาการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน แสดงได้ดังรูปที่ 4.19



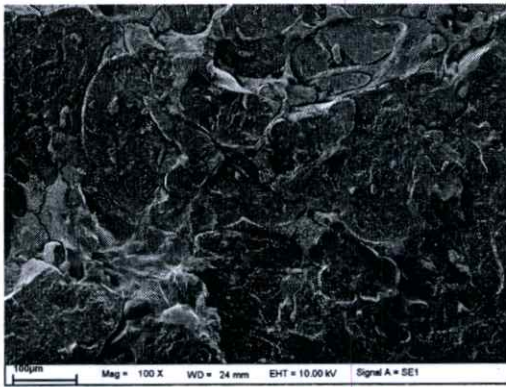
รูปที่ 4.19 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

จากการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.19 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรก เนื่องจากแป้งข้าวและเพกตินมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วมีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี โดยแป้งข้าวมีหมู่ไฮดรอกซิลและเพกตินมีหมู่คาร์บอกซิลิกและไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน [15] และเมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีการดูดซับน้ำได้น้อยลง จนถึงในที่ 5 ชิ้นงานมีความอึดตัวไม่สามารถดูดซับน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีก ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าคงที่ และเมื่อพิจารณาปริมาณของเพกตินที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเพกตินสามารถเกิดเจลได้ จึงทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี [15, 52] ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงสูงตามปริมาณของเพกติน

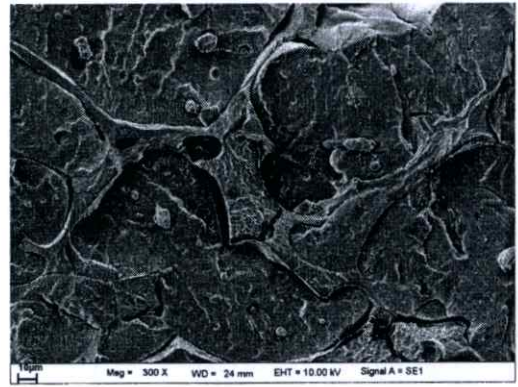
4.3.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สารช่วยผสม MAPE และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินในปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ทำได้โดยการใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของเมทริกซ์ของ LDPE แป้งถั่วเขียว และเพกติน ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.20

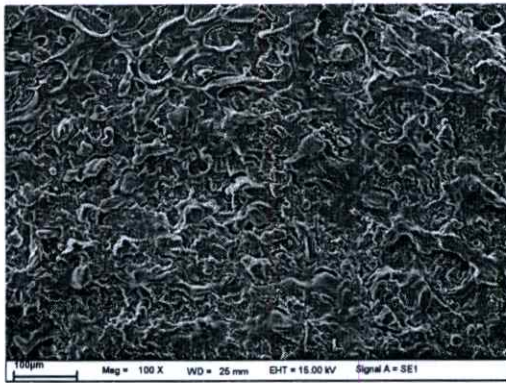
จากรูปที่ 4.20 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกติน 0 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.20 (ก)-(ข)) เพกติน 2 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.20 (ค)-(ง)) เพกติน 6 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.20 (จ)-(ฉ)) และเพกติน 10 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.20 (ช)-(ซ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าอนุภาคของแป้งถั่วเขียวและเพกตินมีการรวมตัวกันเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งถั่วเขียวและเพกตินมีความเป็นขั้วเหมือนกัน ทำให้สามารถเกิดการสร้างพันธะกันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.16 นอกจากนี้ได้มีการเติมสารช่วยผสม MAPE จึงส่งผลให้ภูมิภาคที่มีขั้วเกิดการรวมตัวกับภูมิภาคที่ไม่มีขั้ว กล่าวคือ อนุภาคของแป้งถั่วเขียว เพกตินและ LDPE เกิดการรวมตัวกันดังแสดงในผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.20 (ค)-(ซ)) และสังเกตได้ว่าความเข้ากันได้ระหว่างภูมิภาคของ LDPE และ TPMBS มีมากขึ้นเมื่อมีการเติมเพกตินลงไป นอกจากนี้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณต่างกันมีรูพรุนหรือช่องว่างกระจายตัวอยู่บ้าง เนื่องมาจากการที่ภูมิภาคของ TPMBS และอนุภาคของเพกตินมีการดูดซับความชื้นไว้ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นเกิดเป็นช่องว่างภายในชิ้นงาน



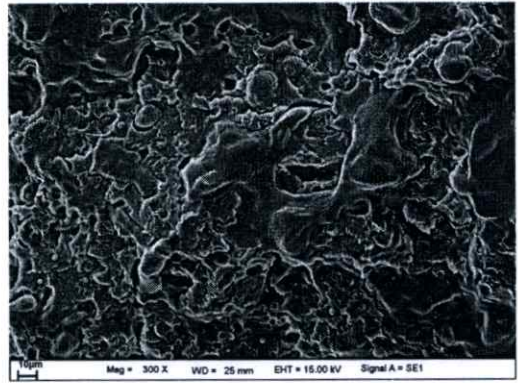
(ก)



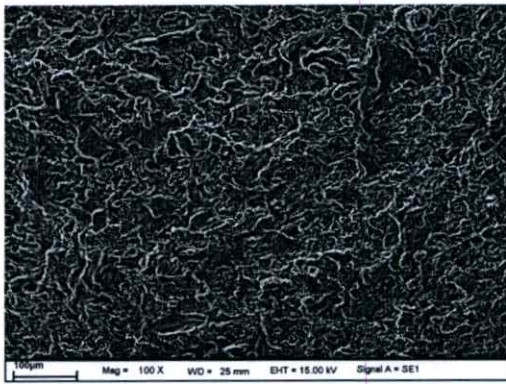
(ข)



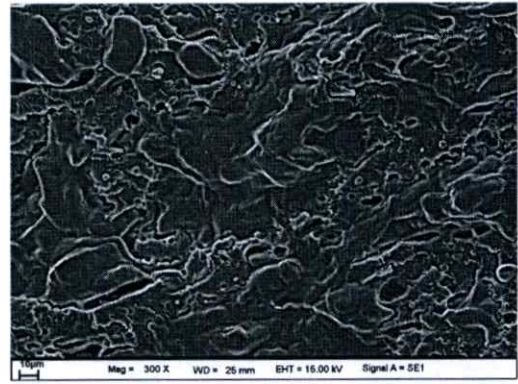
(ค)



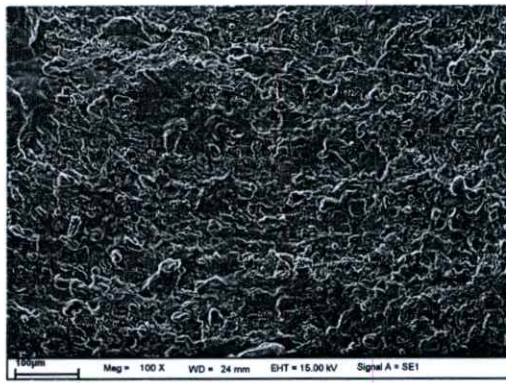
(ง)



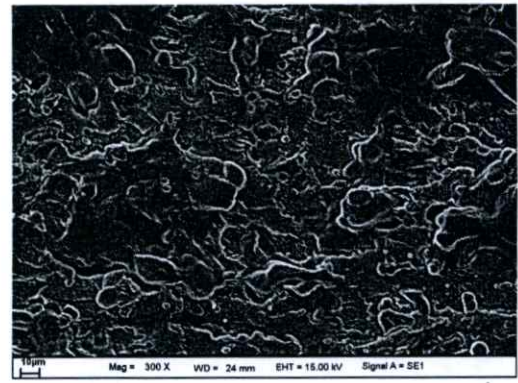
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินในปริมาณ 0.2, 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]

4.3.6 ดัชนีการไหล

การศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 °C และใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน

ตัวอย่าง	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ออกมาจากหัวตายของเครื่อง Melt Flow Indexer
LDPE/TPMBS blend + Pectin 0%	15.73±1.38	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Pectin 2%	14.23±2.09	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Pectin 6%	12.45±1.56	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	10.98±1.23	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง

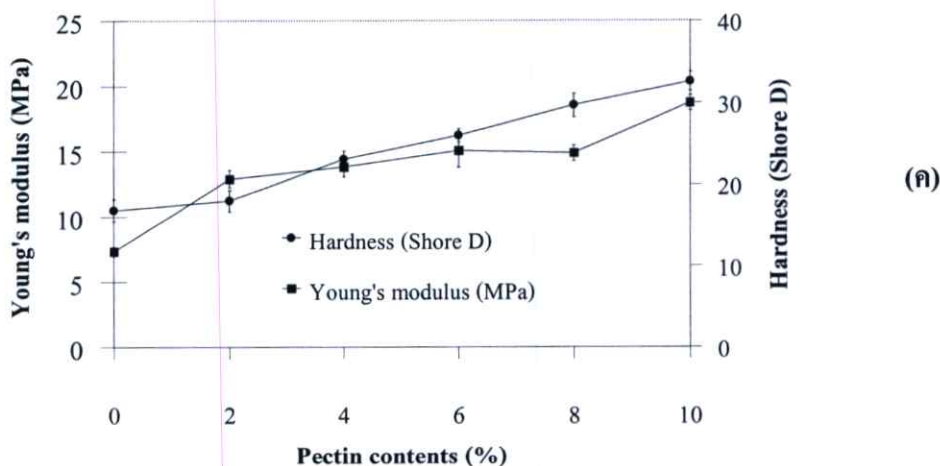
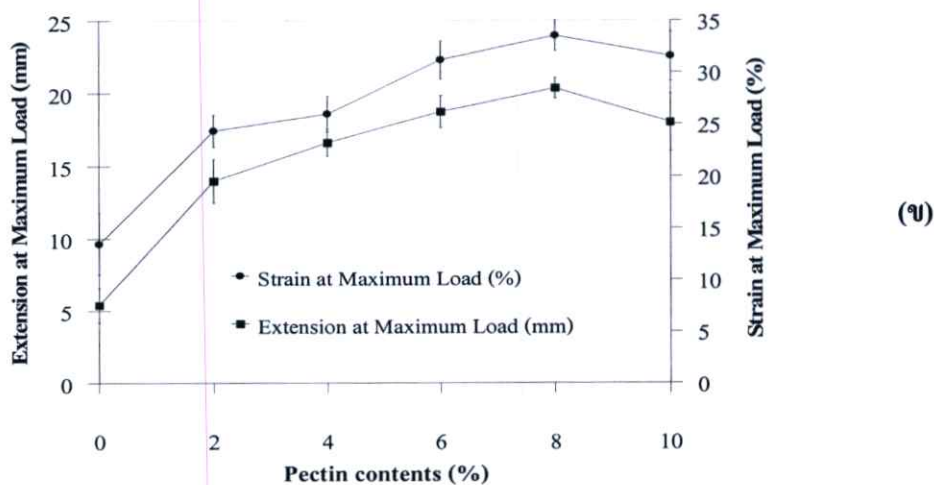
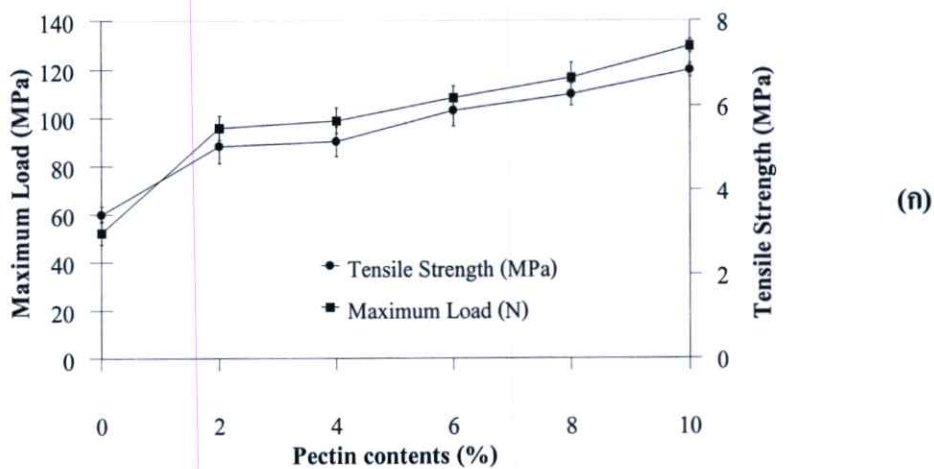
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเพกติน แสดงว่าเพกตินมีผลทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าเพิ่มขึ้น พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลได้ยากขึ้น เนื่องจากเพกตินที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS สามารถเข้ากันได้ดีกับอนุภาคของแป้งข้าวเจ้าและ LDPE ดังแสดงในผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.20) ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้รับความร้อนเกิดการไหลได้ยากขึ้น

4.3.7 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง การยืดออก เปอร์เซ็นต์ความเครียด มอดุลัสและความแข็งกด โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินในปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

รูปที่ 4.21 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.21 (ก)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.21 (ค)) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก LDPE มีความสามารถในการต้านทานแรงดึง เหนียว และยืดหยุ่นได้ดี ทำให้ชิ้นงานมีการรับแรงได้ดี และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้น เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของแป้งกล้วยและเพกตินเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น โดยอธิบายได้จากการที่พีคของ O-H stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังค่าที่น้อยลง (รูปที่ 4.14) และการสร้างพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่มาลิกแอนไฮไดรด์ของ MAPE จุดบกพร่องหรือรอยต่อระหว่างวัฏภาคจึงมีน้อยดังแสดงในผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.20) สำหรับค่าการยืดออกและเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.21 (ข)) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้นเป็น 10 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากเพกตินเป็นสารที่ก่อให้เกิดเจล ส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็ง ความยืดหยุ่นของชิ้นงานจึงมีค่าลดลง [52] นอกจากนี้การที่ปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าสูงขึ้นด้วย

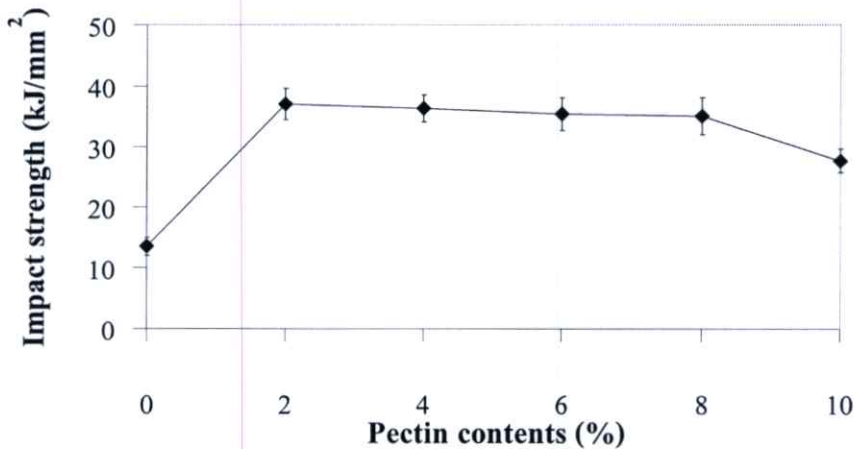
จากการพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินในปริมาณต่างๆ กันนั้น พบว่าปริมาณของเพกตินที่เหมาะสมที่สุด คือ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ดังแสดงได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงดึง ความแข็งแรงดึง การยืดออก เปอร์เซ็นต์ความเครียด มอดุลัส และความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินมีค่าเท่ากับ 148.4% 100.0% 216.0% 131.6% 153.5% และ 93.5% ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส ความแข็งกด

4.3.8 ความแข็งแรงกระแทก

การศึกษาความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพคตินในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบจากค่าความแข็งแรงกระแทก ให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.22

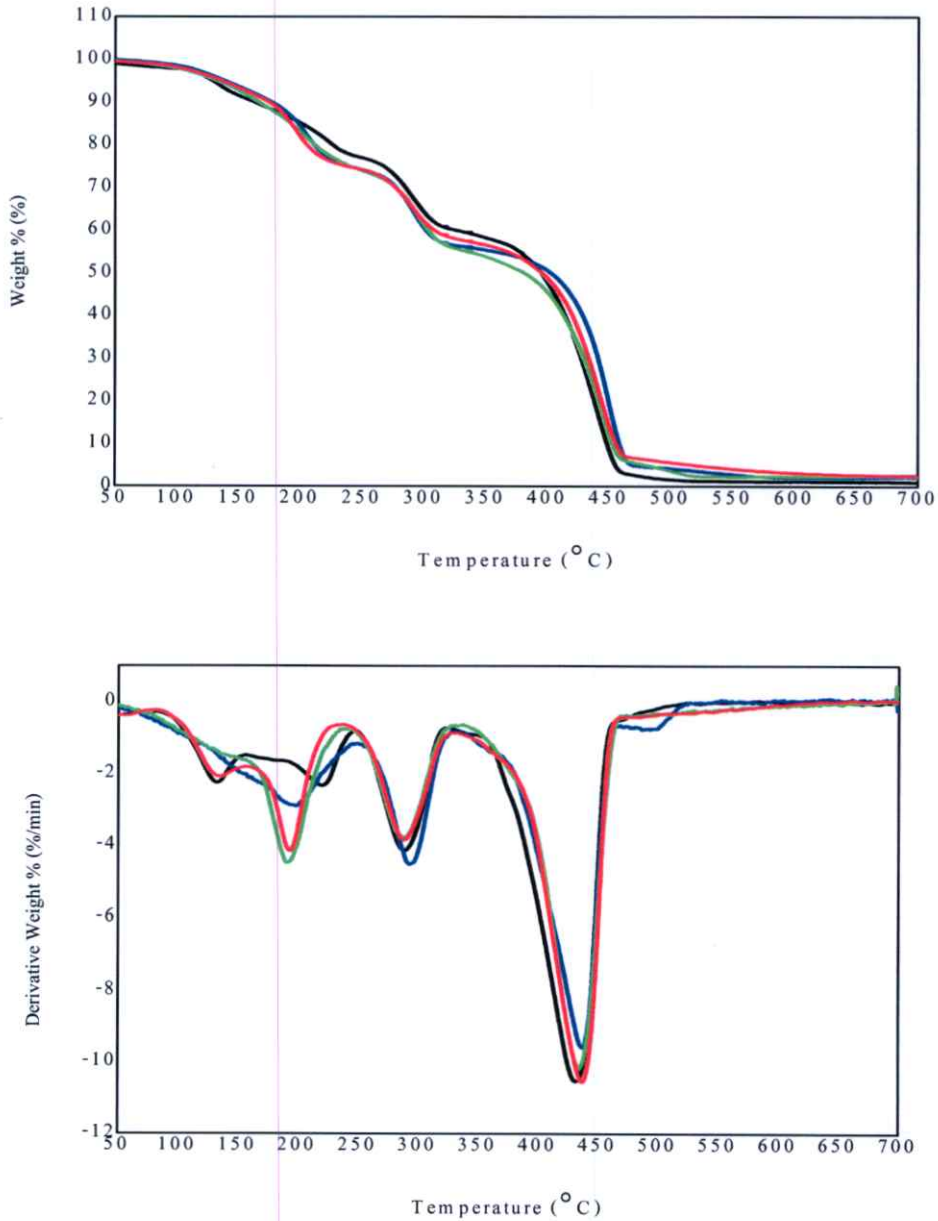


รูปที่ 4.22 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน

รูปที่ 4.22 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมเพคติน เนื่องจากโครงสร้างของเพคตินมีความเป็นขั้วทำให้สามารถเข้ากันกับอนุภาคของแป้งถั่วเขียวได้ นอกจากนี้ยังเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคของแป้งถั่วเขียวและเพคติน และการสร้างพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแป้งและ MAPE ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR (รูปที่ 4.14) ทำให้มีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณของเพคตินที่ใช้ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของเพคตินเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง เนื่องจากเพคตินเป็นสารที่ก่อให้เกิดเจลส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็ง ความยืดหยุ่นของชิ้นงานมีค่าลดลง

4.3.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.23 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ (สีดำ) 0 % (สีน้ำเงิน) 2 % (สีเขียว) 6 % และ (สีแดง) 10 % โดยน้ำหนัก

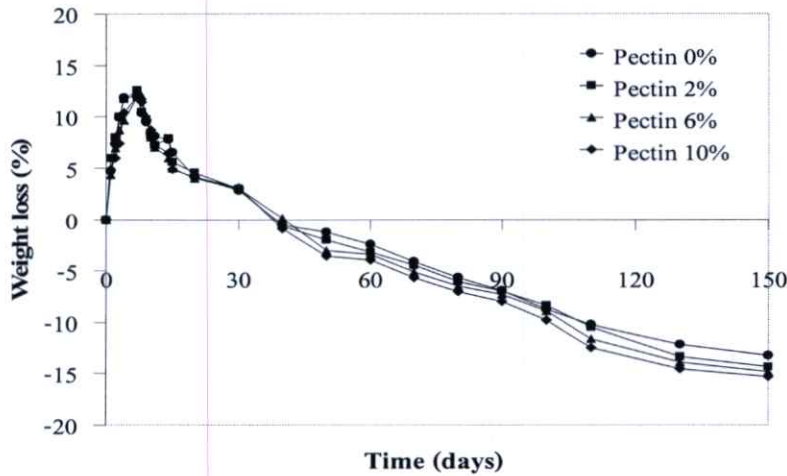
ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอลและเพคติน)	ช่วงที่ 2 (แป้งถั่วเขียว)	ช่วงที่ 3 (LDPE)
LDPE/TPMBS blend + Pectin 0 %	202.8	275.5	415.1
LDPE/TPMBS blend + Pectin 2 %	185.5	277.6	416.2
LDPE/TPMBS blend + Pectin 6 %	185.5	278.1	412.6
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10 %	182.2	279.9	414.5

จากรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.7 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 3 ช่วง กล่าวคือ ช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิประมาณ 202.8 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอล [45-46] ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 275.5 °C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งถั่วเขียว [5, 47] และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิ 415.1 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ LDPE [5, 48] จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ด้วยเพคตินที่ปริมาณ 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าเพคตินมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวประมาณ 190 °C [46] โดยอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเพคตินมีค่าใกล้เคียงกับกลีเซอรอล ดังนั้นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเพคตินและกลีเซอรอลจึงเกิดที่ตำแหน่งเดียวกัน และที่ปริมาณเพคติน 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งอยู่ที่ 277.6 °C 278.1 °C และ 279.9 °C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของแป้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคตินมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแป้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน แสดงให้เห็นว่าปริมาณของเพคตินที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวมีค่าไม่แตกต่างกัน

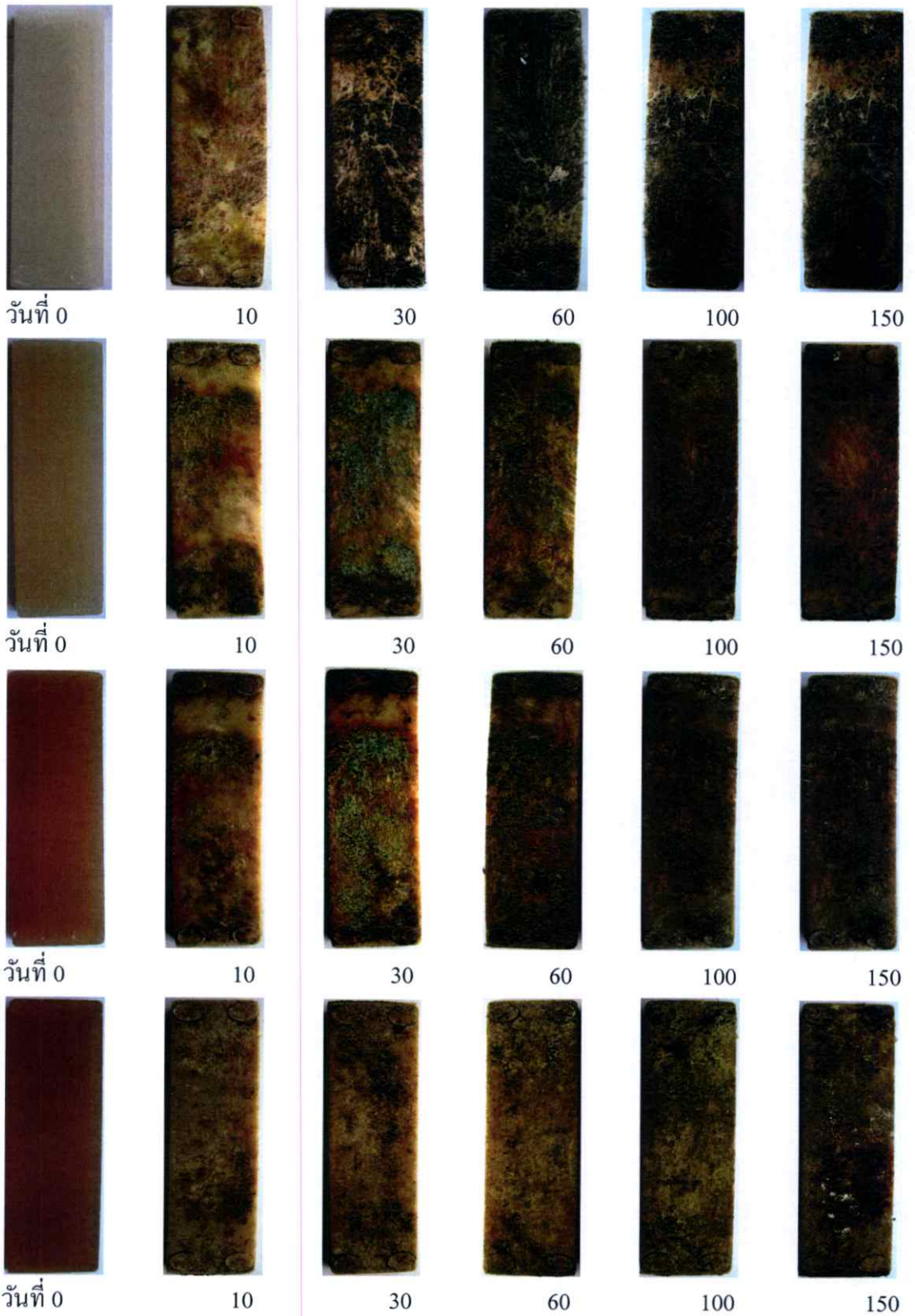
4.3.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยการนำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินดังรูปที่ 4.24 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน โดยในช่วงแรกน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซับน้ำจากดินเข้าไปในชิ้นงาน จากนั้นน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงโดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อพิจารณาปริมาณของเพกตินที่ใช้แตกต่างกันพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกติน 10 % โดยน้ำหนัก เกิดการย่อยสลายได้มากที่สุด [52]

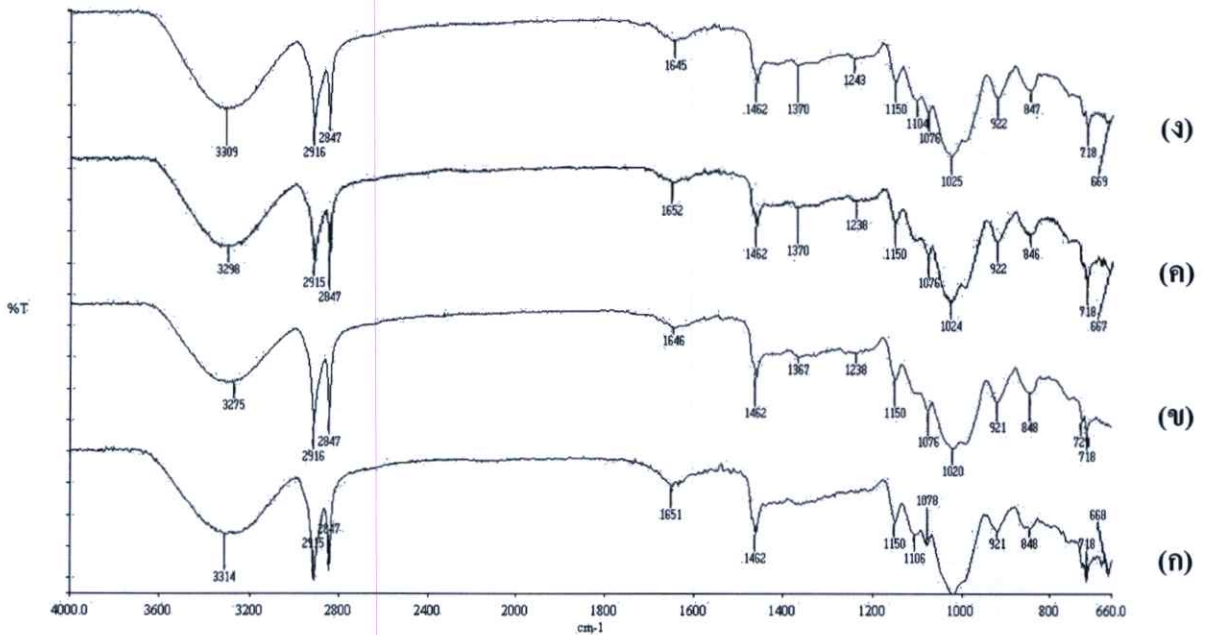


รูปที่ 4.25 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินที่ ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

4.4 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (TPMBS) ด้วยคาร์ราจีแนน

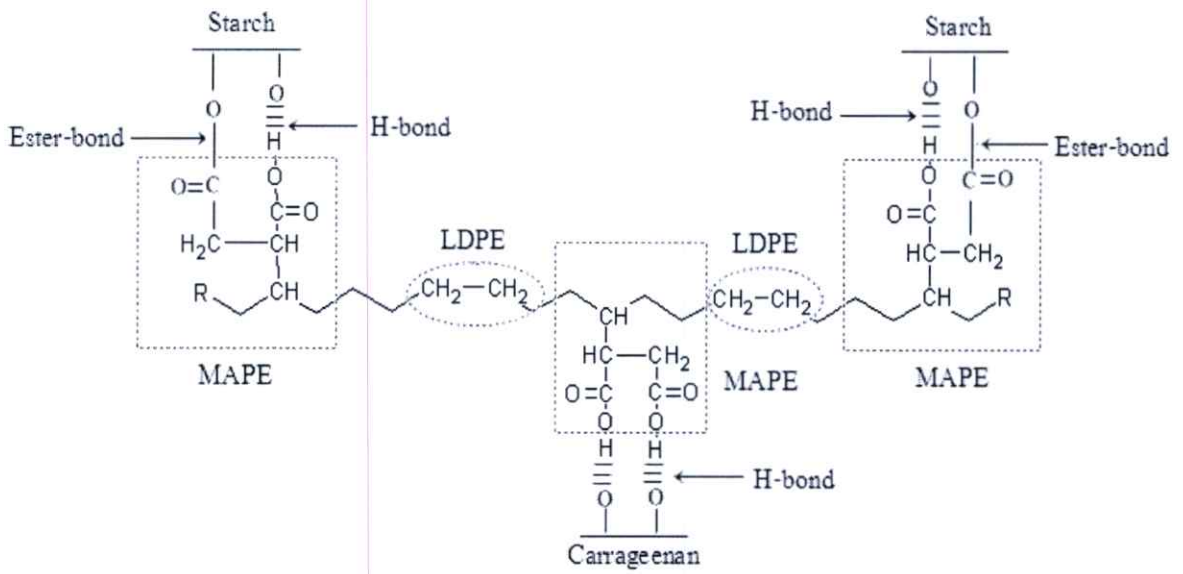
4.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.26

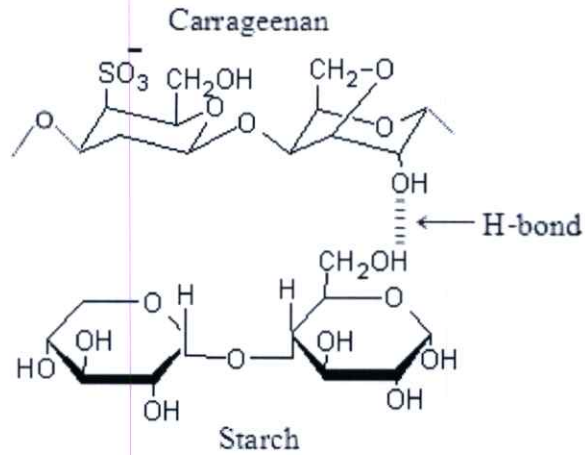


รูปที่ 4.26 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (ก) 0% (ข) 2% (ค) 6% และ (ง) 10% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.26 (ก) แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณต่างๆ กันพบพีคอินฟราเรดสเปกตรัมเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน โดยพีคในช่วงการสั่นแบบ OH-stretching มีการเลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง อาจเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์ราจีแนนเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น และการสร้างพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่มาลิคแอนไฮไดรด์ของ MAPE ซึ่งอันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.28 นอกจากนี้การเติมคาร์ราจีแนนลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ทำให้เกิดพีคใหม่ขึ้นที่ตำแหน่ง 1240 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ O=S=O stretching ของหมู่ $-\text{OSO}_3$ ของคาร์ราจีแนน [53]



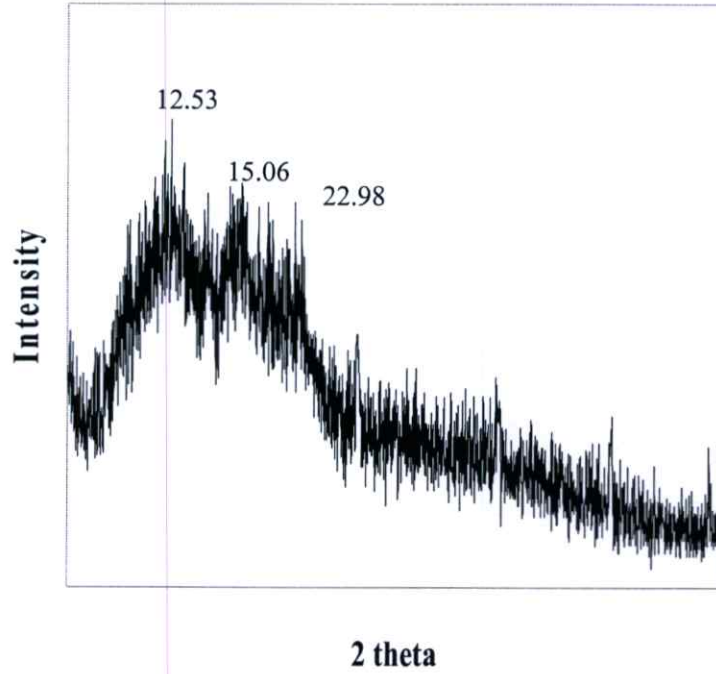
รูปที่ 4.27 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่าง LDPE แป้งถั่วเขียว คาร์ราจีแนน และ MAPE



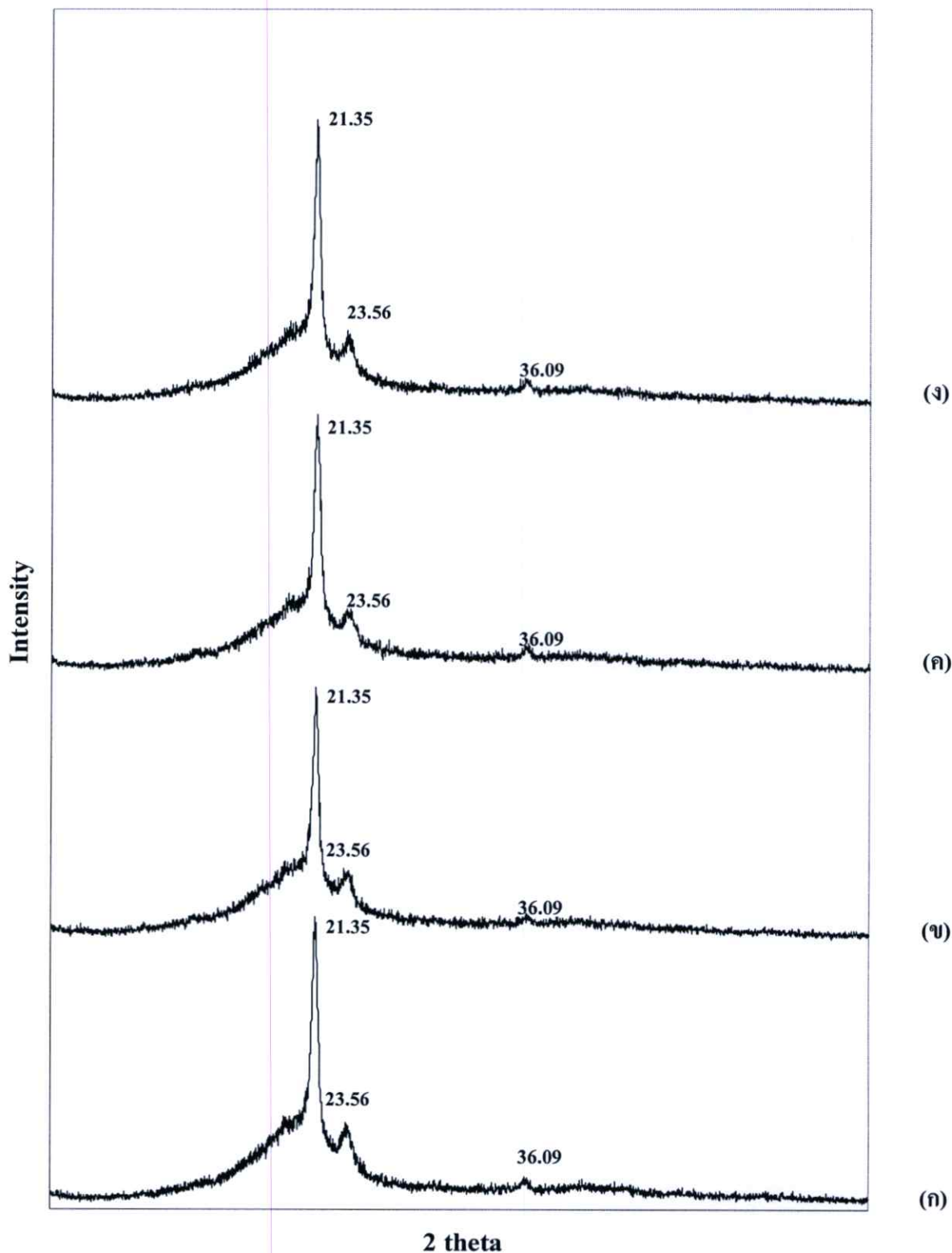
รูปที่ 4.28 อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นระหว่างแป้งถั่วเขียวและคาร์ราจีแนน

4.4.2 XRD

การศึกษาโครงสร้างผลึกของแป้งถั่วเขียว คาร์ราจีแนน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.29-4.30



รูปที่ 4.29 ดิฟแฟรคโตแกรมของคาร์ราจีแนน



รูปที่ 4.30 ดิฟแฟรคโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.29 แสดงโครงสร้างผลึกคาร์ราจีแนนพบพีคที่มุม 2 θ เท่ากับ 12.53° 15.06° และ 22.98° แสดงโครงสร้างผลึกแบบ double helix [54, 55] เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมคาร์ราจีแนน (รูปที่ 4.30) พบพีคที่มุม 2 θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของ LDPE เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการใช้ปริมาณของ LDPE ที่ 50 % โดยน้ำหนัก และมีการเติมสารช่วยผสม MAPE ทำให้วัฏภาคของ LDPE และ TPMBS มีความเข้ากัน และเมื่อมีการเติมคาร์ราจีแนนลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ส่งผลให้ความเข้ม (Intensity) ของพีคที่มุม 2 θ เท่ากับ 21.35° 23.56° และ 36.09° มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเติมคาร์ราจีแนนที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ไม่ขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ LDPE

4.4.3 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer เพื่อวัดค่า L* a* b* C* และ H° ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L*	a*	b*	C*	H°
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 0%	60.82	-0.53	4.79	4.83	82.72
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 2%	56.21	-0.75	6.07	6.08	82.96
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 6%	51.67	-1.16	11.90	11.96	84.43
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	47.49	-1.74	15.13	15.23	85.63

หมายเหตุ ค่า L* กำหนดค่าความสว่าง ค่า a* กำหนดสีเหลืองหรือสีเขียว ถ้า a* > 1 แสดงสีแดง และถ้า a* < 1 แสดงสีเขียว ค่า b* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า b* > 1 แสดงสีเหลือง และ

ถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน ค่า C^* แสดงค่าความสดใสของสี และค่า H° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

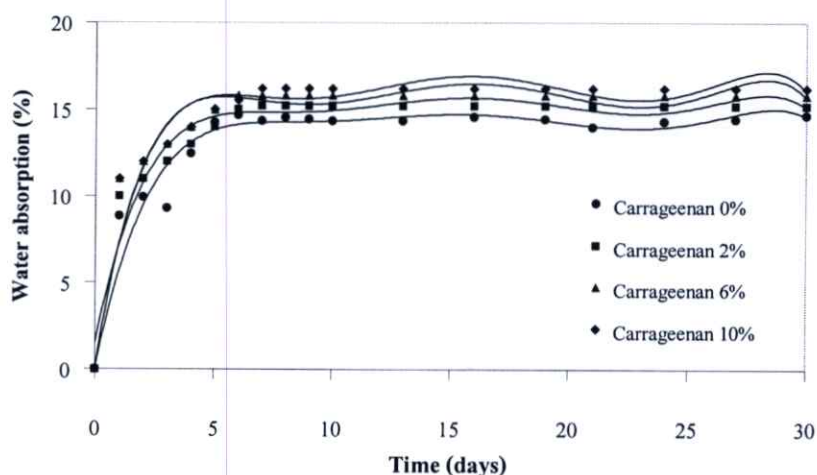
จากตารางที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่า L^* a^* b^* C^* และ H° ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS โดยค่าความสว่าง (L^*) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสีของชิ้นงานตัวอย่างมีแนวโน้มเข้มขึ้นโดยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนักให้ค่าความสว่างน้อยที่สุด

สำหรับค่า a^* ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสีของชิ้นงานไปในทางเดียวกัน กล่าวคือชิ้นงานตัวอย่างแสดงสีออกปาทงสีเขียว และตัวเลขแสดงค่า a^* มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ปริมาณของคาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก มีสีออกสีเขียวอ่อนที่สุด และเมื่อทำการพิจารณาค่า b^* ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS แสดงสีไปในทางสีเหลืองเช่นเดียวกันหมด โดยค่าความเข้มของสีเหลืองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่า C^* ซึ่งเป็นค่าแสดงความสดใสของสีมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน กล่าวคือ ความสดใสของสีของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ค่าตำแหน่งของสีเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน (H°) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ยกเว้นชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก ที่แสดงตำแหน่งของสีสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งของสีมาตรฐาน โดยภาพรวมแล้วชิ้นงานตัวอย่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีสีออกปาทงสีเหลือง

4.4.4 การดูดซับน้ำ

ศึกษาการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10% โดยน้ำหนัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.31



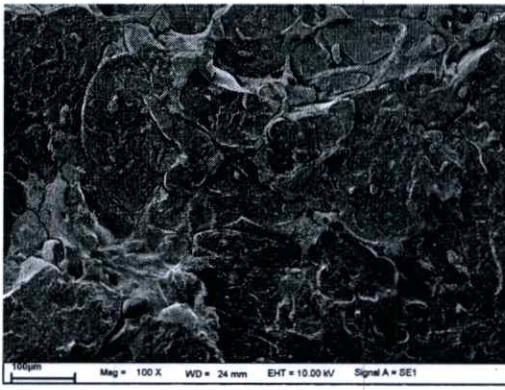
รูปที่ 4.31 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.31 แสดงการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนภายในระยะเวลา 30 วัน พบว่าในช่วง 5 วันแรกชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS มีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเวลาผ่านไปการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนกระทั่งอิ่มตัว โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีค่าประมาณ 14.67% 15.23% 15.98% และ 16.12% ตามลำดับซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์ราจีแนนมีหมู่ซัลเฟตและหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชันซึ่งมีขั้วทำให้มีความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ นอกจากนี้คาร์ราจีแนนยังสามารถเกิดลักษณะที่เป็นเจลทำให้สามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ [15, 56]

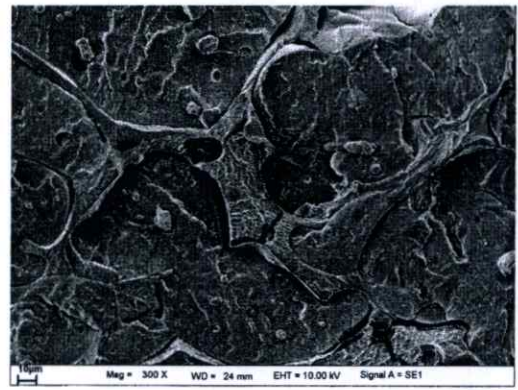
4.4.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้โดยใช้สายช่วยผสม MAPE และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณ 0 2.6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.32

จากรูปที่ 4.32 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนน 0 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.32 (ก)-(ข)) คาร์ราจีแนน 2 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.32 (ค)-(ง)) คาร์ราจีแนน 6 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.32 (จ)-(ฉ)) และคาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.32 (ช)-(ซ)) ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่าวิภาคของแป้งถั่วเขียว คาร์ราจีแนน และ LDPE มีความเข้ากัน เนื่องจากสารช่วยผสม MAPE ช่วยในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของวิภาคทั้งสาม โดยในส่วนที่มีขั้วของ MAPE จะไปยึดติดกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์ราจีแนนเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.27 และโมเลกุลของ MAPE ที่เป็นส่วนของพอลิเอทิลีนสามารถเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่โมเลกุลของ LDPE นอกจากนี้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีรูพรุนหรือช่องว่างกระจายตัวอยู่ในชิ้นงาน เนื่องมาจากการที่วิภาคของ TPMBS และอนุภาคของคาร์ราจีแนนมีการดูดซับความชื้นไว้ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดการระเหยของน้ำหรือความชื้นเกิดเป็นช่องว่างภายในชิ้นงาน



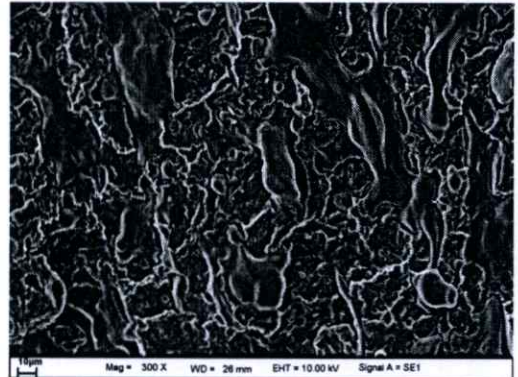
(ก)



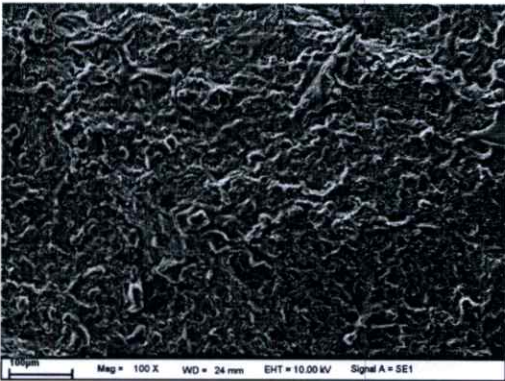
(ข)



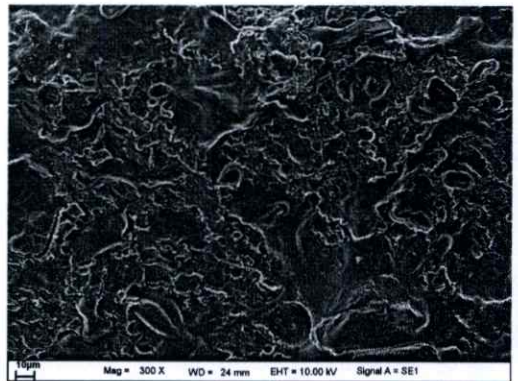
(ค)



(ง)



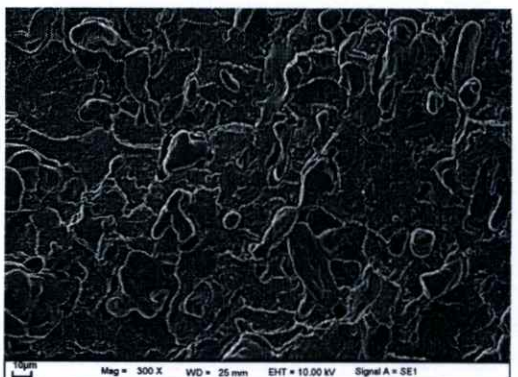
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 4.32 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณ 0.2, 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]

4.4.6 ดัชนีการไหล

การศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนนในปริมาณที่แตกต่างกัน ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน

ตัวอย่าง	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ออกมาจากหัวคายของเครื่อง Melt Flow Indexer
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 0%	15.73±1.38	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 2%	14.44±1.62	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 6%	12.67±1.28	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	11.09±2.01	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง

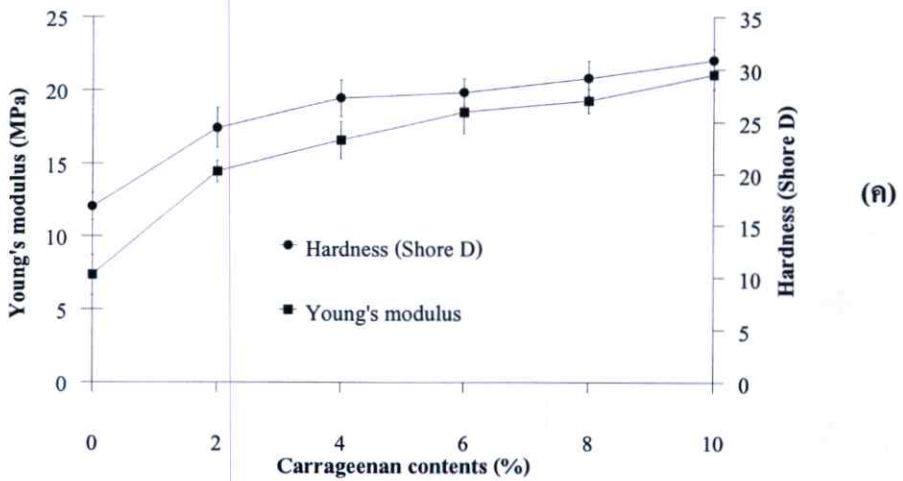
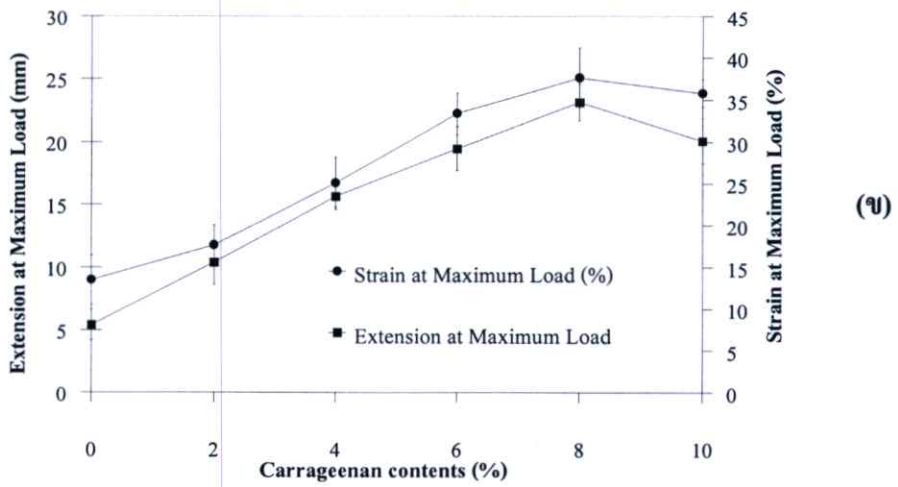
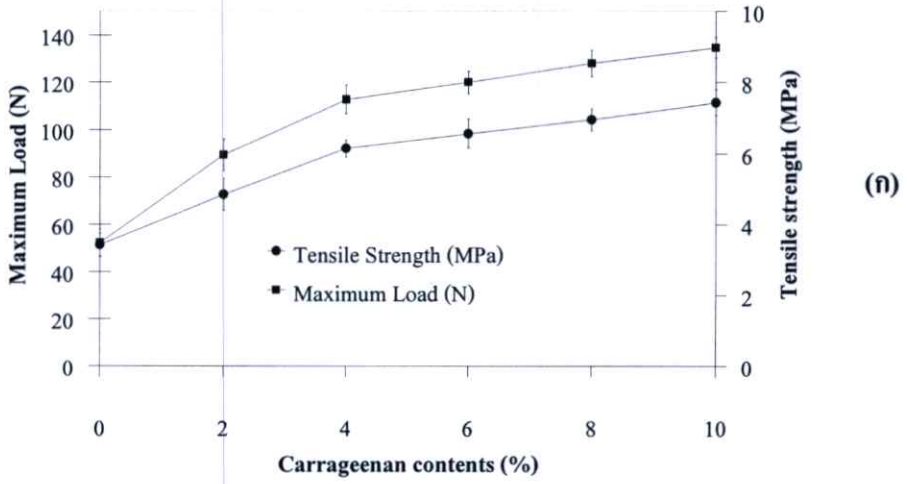
จากผลการศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณที่ต่างกัน ดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการาจีแนนที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ทำให้มีความหนืดสูง [15, 56] ดังนั้นเมื่อเติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ LDPE ขณะที่เกิดการหลอมเหลว ส่งผลให้สายโซ่ LDPE เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ระบบมีความหนืดสูงขึ้น ค่าดัชนีการไหลลดลง นอกจากนี้คาร์ราจีแนนสามารถเกิดการรวมตัวกับแป้งถั่วเขียวและ LDPE ดังแสดงจากผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.32) ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้รับความร้อนเกิดการไหลได้ยากขึ้น

4.4.7 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง การยืดออก เปอร์เซ็นต์ความเครียด มอดูลัสและความแข็งกด โดยพิจารณาจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณ 0 2 4 6 8 และ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

จากรูปที่ 4.33 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์ราจีแนนสามารถเกิดลักษณะที่เป็นเจลได้ ทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความแข็ง ดังนั้นจึงส่งผลให้การรับแรงสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้คาร์ราจีแนนที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความเข้ากันกับวัฏภาคของแป้งถั่วเขียวและ LDPE เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.32) เนื่องจากสารช่วยผสม MAPE ช่วยในการยึดติดระหว่างวัฏภาคที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS เกิดการถ่ายเทแรงได้ดี ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดูลัส (รูปที่ 4.33 (ก)-(ค)) จึงมีค่าสูงขึ้น แต่ค่าการยืดออกของชิ้นงาน และเปอร์เซ็นต์ความเครียด (รูปที่ 4.33 (ข)) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้นเป็น 10 % โดยน้ำหนัก เนื่องจาก MAPE ที่เติมลงไปจะทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่ลดลง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ D. Lafargue และคณะ [57] ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งดัดแปลงผสมแคปไซคาร์ราจีแนน พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคปไซคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น แต่ค่าการยืดตัวของฟิล์มแป้งลดลง เนื่องมาจากการรวมตัวกันเป็นผลึกของสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้ง เช่น อะมิโลสและอะมิโลเพคตินกับแคปไซคาร์ราจีแนน เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลง สำหรับค่าความแข็งกด (รูปที่ 4.33 (ค)) ของชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของคาร์ราจีแนนมีการกระจายตัวอยู่ที่พื้นผิวของชิ้นงานมากขึ้น

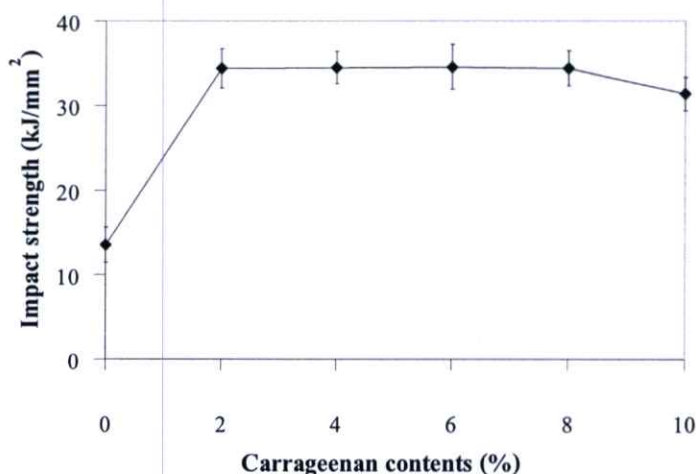
จากการพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนนในปริมาณต่างๆ กันนั้น พบว่าปริมาณของคาร์ราจีแนนที่เหมาะสมที่สุด คือ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ดังแสดงได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงดึง ความแข็งแรงดึง การยืดออก เปอร์เซ็นต์ความเครียด มอดูลัส และความแข็งกดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีค่าเท่ากับ 158.2% 177.5% 252.9% 165.6% 187.3% และ 83.4% ตามลำดับ



รูปที่ 4.33 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมคาร์ราจีแนน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส ความแข็งกด

4.4.8 ความแข็งแรงกระแทก

การศึกษาความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนนในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบจากค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength) ให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.34

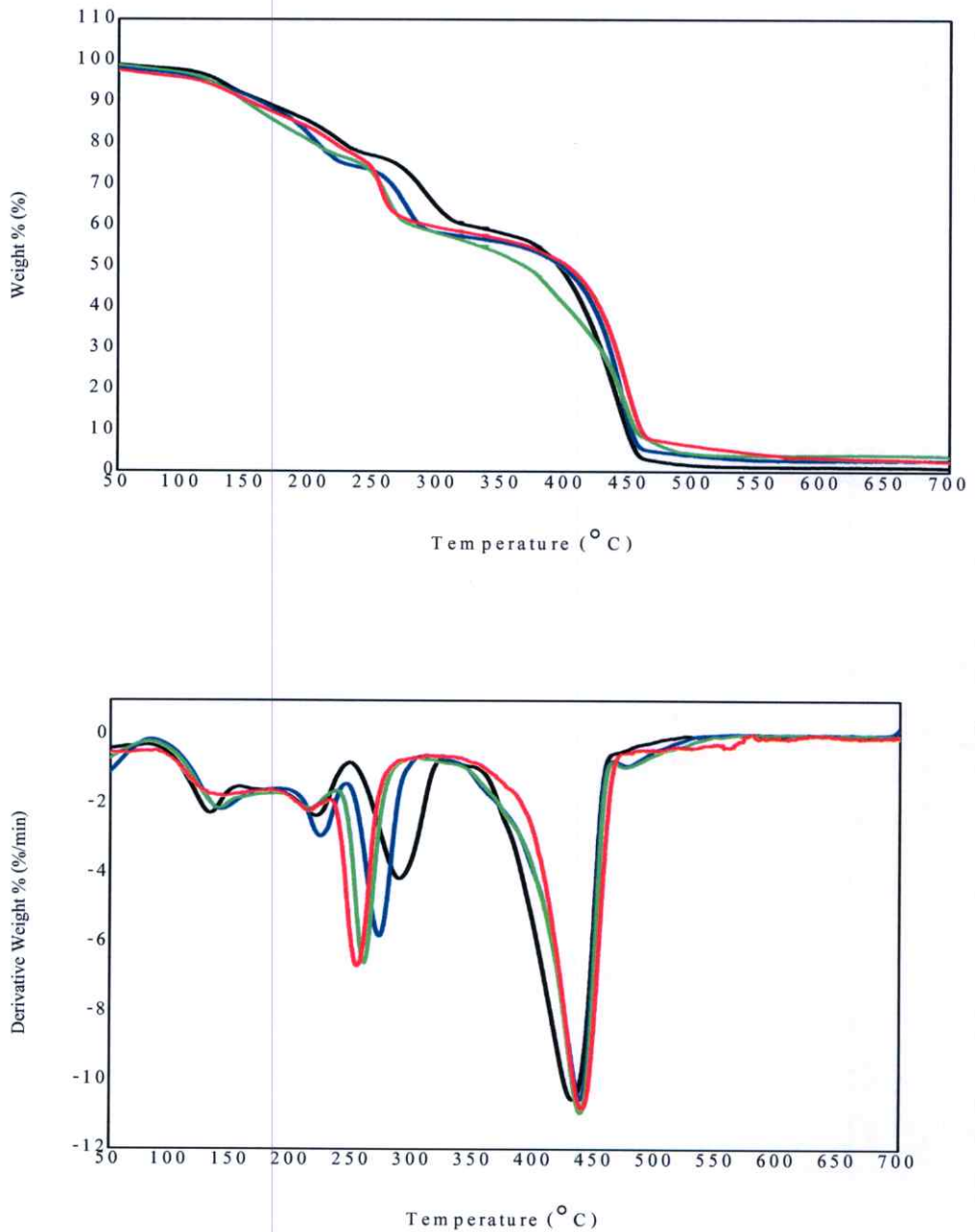


รูปที่ 4.34 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน

รูปที่ 4.34 แสดงค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการเติมคาร์ราจีแนน เนื่องจากโครงสร้างของคาร์ราจีแนนมีความเป็นขี้ผึ้งทำให้สามารถเข้ากันกับอนุภาคของแป้งถั่วเขียวได้ นอกจากนี้อาจเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอนุภาคของแป้งถั่วเขียวและคาร์ราจีแนน และการสร้างพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและหมู่มาลิอิกแอนไฮดรายด์ของ MAPE ทำให้มีความสามารถในการรับแรงได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณของคาร์ราจีแนนที่ใช้ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณของคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกลดลง เนื่องจากชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้นทำให้รับแรงกระแทกได้น้อยลง เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลง

4.4.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.35 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 % (สีดำ) 2 % (สีน้ำเงิน) 6 % (สีเขียว) และ 10 % (สีแดง)

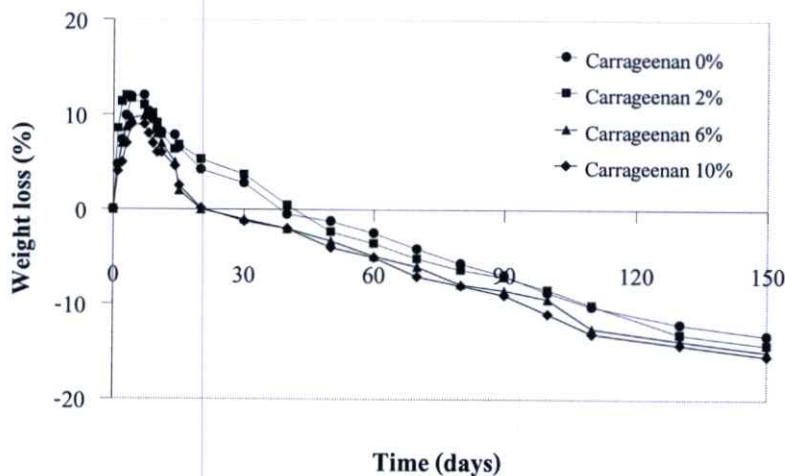
ตารางที่ 4.10 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้งถั่วเขียวและคาร์ราจีแนน)	ช่วงที่ 3 (LDPE)
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 0 %	202.8	275.5	415.1
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 2 %	208.8	259.5	416.1
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 6 %	199.6	250.5	415.7
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10 %	198.8	248.5	413.3

จากรูปที่ 4.35 และตารางที่ 4.10 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว 3 ช่วง กล่าวคือช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิประมาณ 202.8 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอล [45, 46] ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 275.5 °C เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งถั่วเขียว [5, 47] และช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิ 415.1 °C เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ LDPE [5, 48] จากการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งคาร์ราจีแนนมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวประมาณ 250 °C [56] โดยอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของคาร์ราจีแนนมีค่าใกล้เคียงกับแป้งถั่วเขียว ดังนั้นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งถั่วเขียวและคาร์ราจีแนนจึงเกิดที่ตำแหน่งเดียวกัน และที่ปริมาณคาร์ราจีแนน 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่ามีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งอยู่ที่ 259.5 °C 250.5 °C และ 248.5 °C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของแป้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของแป้งของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน เนื่องจากคาร์ราจีแนนดูดความร้อนแล้วสะสมความร้อนไว้ในระยะยาวได้โดยไม่เกิดการสลายตัวทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนไปยังแป้งถั่วเขียวได้ ส่งผลให้แป้งถั่วเขียวได้รับความร้อนมากขึ้นจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิลดลง [56]

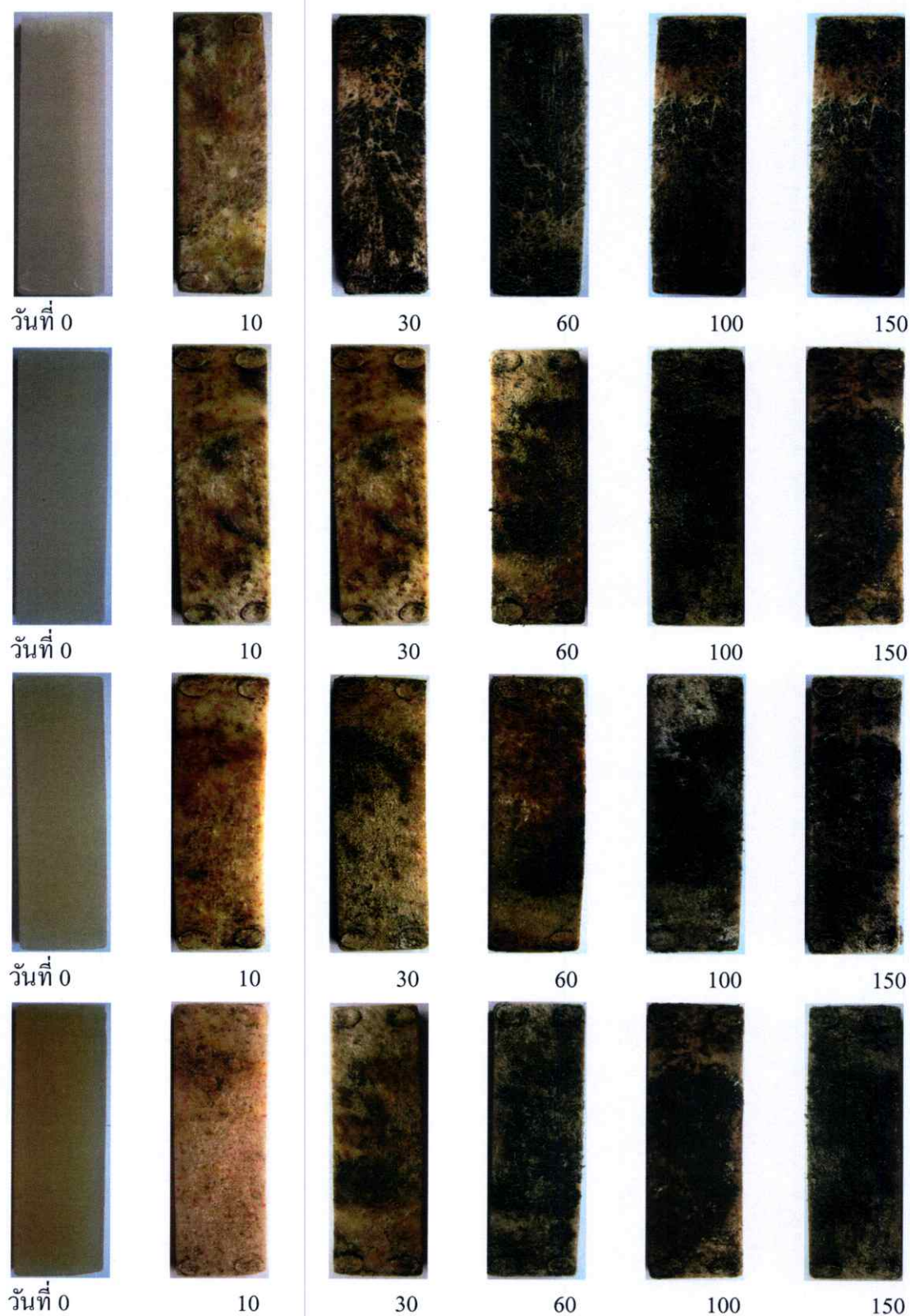
4.4.10 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินโดยการนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนน 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินดังรูปที่ 4.36 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 0 2 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน โดยในช่วงแรกน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดูดซับน้ำจากดินเข้าไปในชิ้นงาน โดยน้ำหนักของชิ้นงานมีค่ามากที่สุดในช่วง 5 วันแรกของการฝังดิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนในหัวข้อที่ 4.4.4 จากนั้นน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงโดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน ซึ่งบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อพิจารณาปริมาณของคาร์ราจีแนนที่ใช้แตกต่างกันพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมคาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มการย่อยสลายด้วยการฝังดินสูงที่สุด เนื่องจากคาร์ราจีแนนเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินได้ง่ายกว่าแป้ง [56] แสดงว่าคาร์ราจีแนนมีส่วนช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในดินได้มากยิ่งขึ้น โดยพบรอยสีดำเกิดขึ้นที่พื้นผิวของชิ้นงานซึ่งเกิดจากส่วนที่เป็นแป้งถั่วเขียวและคาร์ราจีแนนถูกกัดกินโดยจุลินทรีย์ ทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีพื้นผิวขรุขระดังแสดงในรูปที่ 4.37



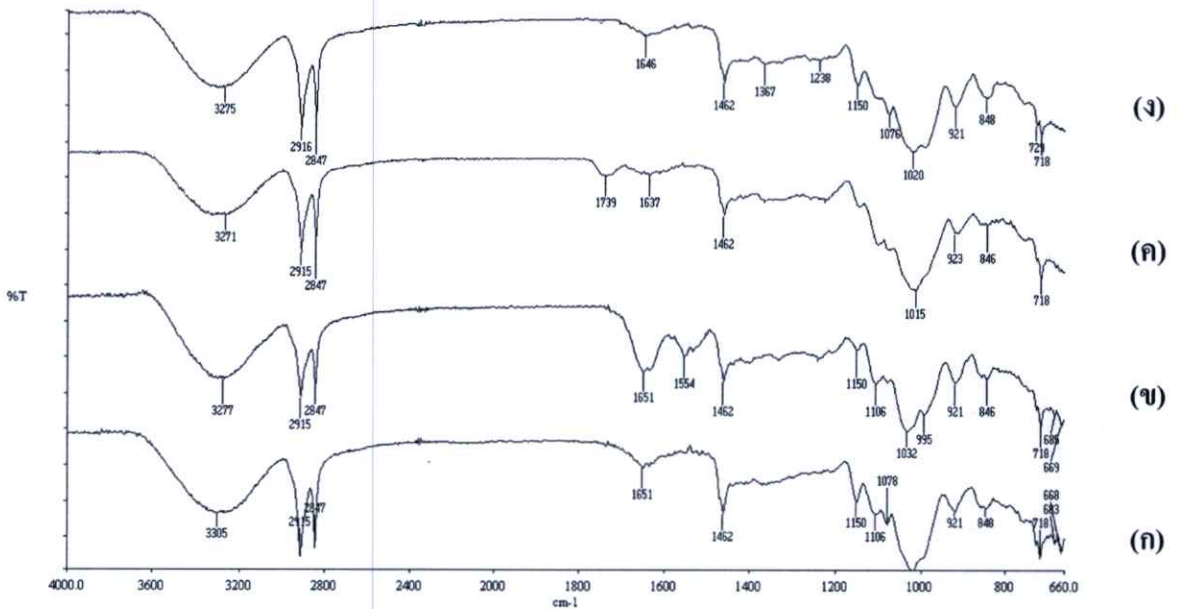
รูปที่ 4.37 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย
 คาร์ราจีแนนที่ปริมาณ (ก) 0 % (ข) 2 % (ค) 6 % และ (ง) 10 % โดยน้ำหนัก
 ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

4.5 ผลของเจลาติน เพกติน และคาร์ราจีแนนที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งถั่วเขียว (TPMBS)

การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก

4.5.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (ข) เจลาติน 10% (ค) เพกติน 10% และ (ง) คาร์ราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

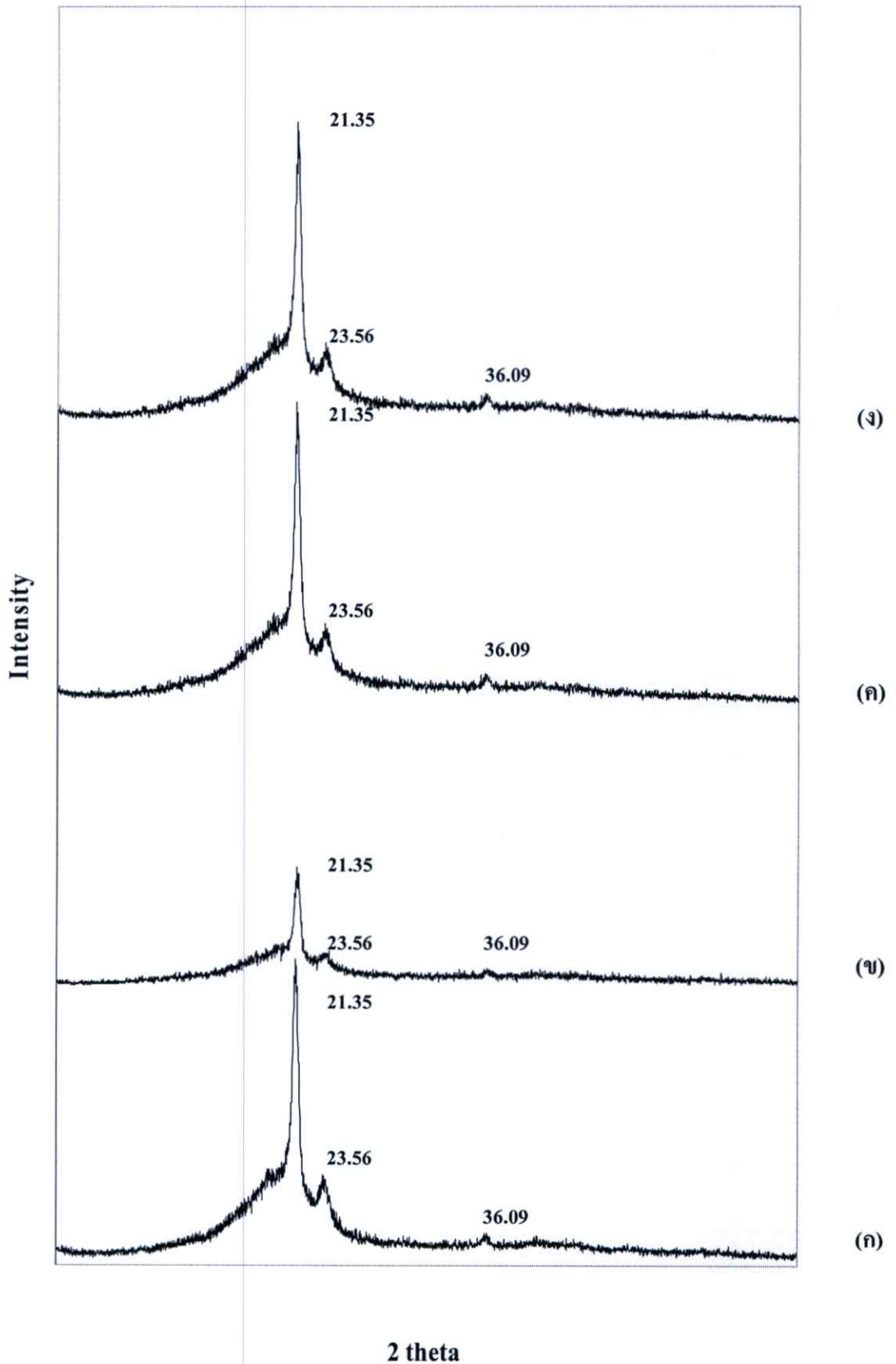
จากรูปที่ 4.38 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS เปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าพีคอินฟราเรดสเปกตรัมการสั่นของ OH-stretching มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง ซึ่งแสดงถึงอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแป้งถั่วเขียวกับหมู่ฟังก์ชันของเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน และการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและหมู่มาลิอิกแอนไฮไดรด์ของ MAPE นอกจากนี้อินฟราเรดสเปกตรัมยังแสดงตำแหน่งการสั่นต่าง ๆ ขององค์ประกอบที่มีอยู่ในเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างของสารแต่ละชนิด

4.5.2 XRD

การศึกษาโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังรูปที่

4.39

จากรูปที่ 4.39 แสดงดิฟแฟรคโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าดิฟแฟรคโตแกรมที่ได้มีรูปแบบคล้ายกัน กล่าวคือแสดงพีคที่มุม 2θ ซึ่งเป็นพีคที่มาจากส่วนของ LDPE ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน ยกเว้นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาตินให้ความเข้มข้นของดิฟแฟรคโตแกรมที่น้อยที่สุด



รูปที่ 4.39 ดิฟแฟร็กโตแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (ข) เจลาติน 10 % (ค) เพกติน 10% และ (ง) คาร์ราจีแนน 10 % โดยน้ำหนัก

4.5.3 การวัดสี

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าการวัดสีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

ตัวอย่าง	ค่าการเปลี่ยนแปลงสี				
	L*	a*	b*	C*	H°
LDPE/TPMBS blend	60.82	-0.53	4.79	4.83	82.72
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	44.27	2.06	22.42	22.51	84.77
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	31.76	7.97	17.39	19.13	65.38
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	47.49	-1.74	15.13	15.23	85.63

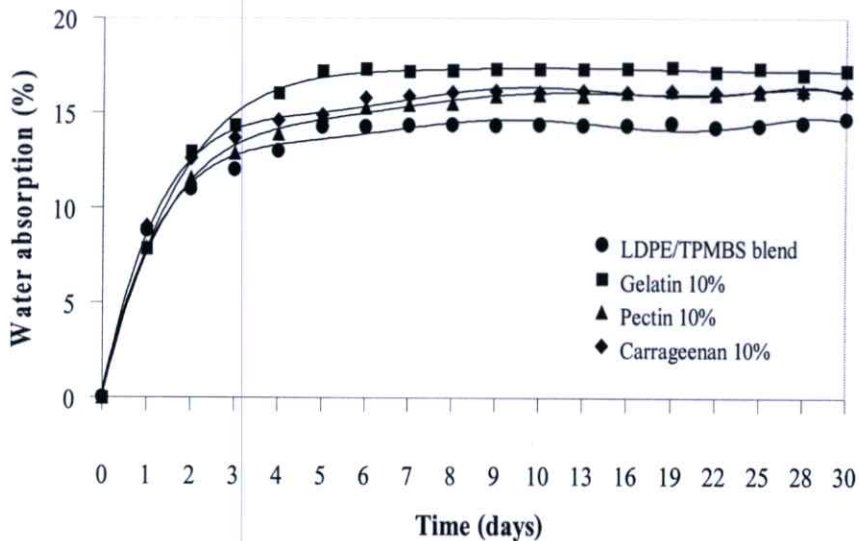
หมายเหตุ ค่า L* กำหนดค่าความสว่าง ค่า a* กำหนดสีเหลืองหรือสีเขียว ถ้า $a^* > 1$ แสดงสีแดง และถ้า $a^* < 1$ แสดงสีเขียว ค่า b* กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ถ้า $b^* > 1$ แสดงสีเหลือง และถ้า $b^* < 1$ แสดงสีน้ำเงิน ค่า C* แสดงค่าความสดไสของสี และค่า H° ระบุตำแหน่งของสีเทียบกับมาตรฐาน

จากตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าค่าความสว่างของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลง แต่ความสดไสของสีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนลงในชิ้นงาน สำหรับค่า a* ของชิ้นงานมีลักษณะต่างกัน กล่าวคือ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่เติมและเติมคาร์ราจีแนนมีเฉดสีไปทางสีเขียว ส่วนชิ้นงานที่เติมเจลาตินและคาร์ราจีแนนให้ค่า a* ไปทางสีแดง และเมื่อพิจารณาค่า b* พบว่าชิ้นงานตัวอย่างมีเฉดสีไปทางสีเหลือง ส่งผลให้ตำแหน่งของสี (H°) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนมีตำแหน่งที่แตกต่างกันไปตามค่าของ a* และ b* นอกจากนี้สีของชิ้นงานยังมีสีที่แตกต่างกันตามสารที่เติมลงไป ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS กล่าวคือ ชิ้นงาน

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน แสดงสีของชิ้นงานเป็นสีเหลือง น้ำตาลและเหลืองตามลำดับ

4.5.4 การดูดซับน้ำ

ศึกษาการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.40



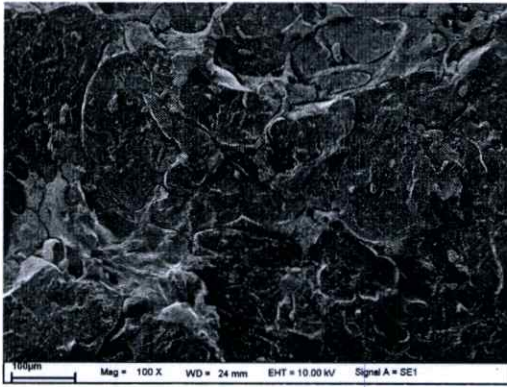
รูปที่ 4.40 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

จากผลการทดลองการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าประมาณ 14.67% 17.45% 16.20% และ 16.15% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนส่งผลให้ชิ้นงานมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น โดยภาพรวมเห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีการดูดซับน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ คาร์ราจีแนนและเพกติน ตามลำดับ เป็นผลเนื่องมาจากโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับน้ำของสารแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากรอยต่อระหว่างวัฏภาคของชิ้นงานดังแสดงในผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.38) ที่พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินมีรอยต่อวัฏภาคภายในชิ้นงานมากที่สุด ทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในชิ้นงานได้มาก

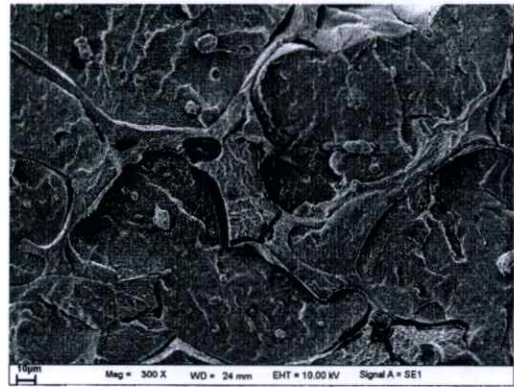
4.5.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.41

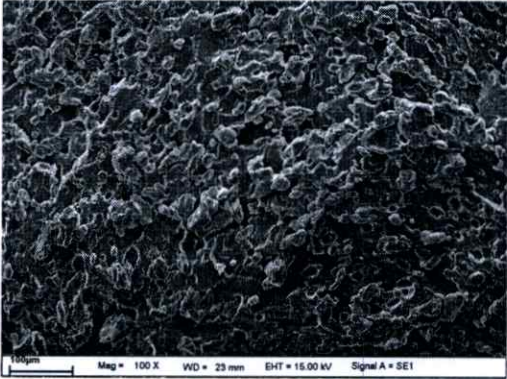
จากรูปที่ 4.41 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเพกตินและคาร์ราจีแนนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าการเติมเจลาติน



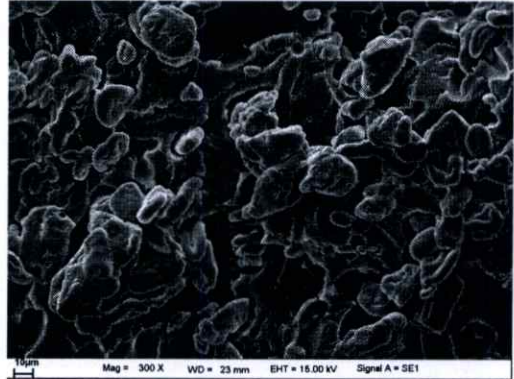
(ก)



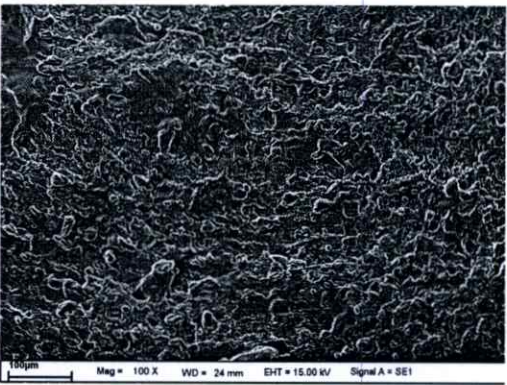
(ข)



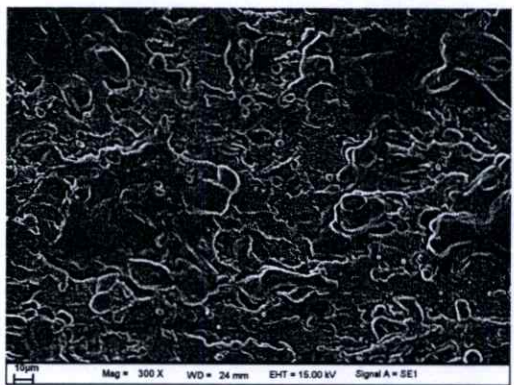
(ค)



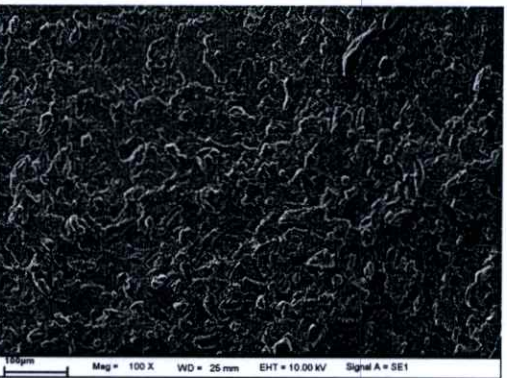
(ง)



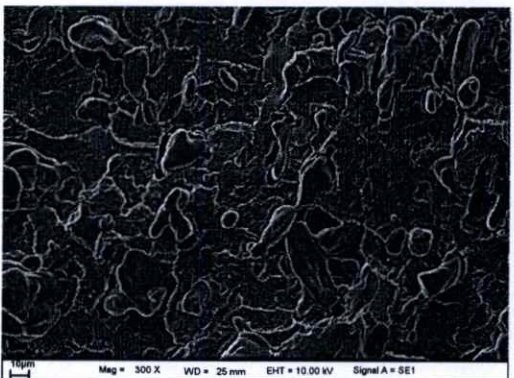
(จ)



(ฉ)



(ช)



(ซ)

รูปที่ 4.41 สัณฐานวิทยาแสดงภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 เท่า [(ก) (ค) (จ) และ (ช)] และ 300 เท่า [(ข) (ง) (ฉ) และ (ซ)]

4.5.6 ดัชนีการไหล

การศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

ตัวอย่าง	MFI (g/10 min)	ลักษณะของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ออกมาจากหัวคายของเครื่อง Melt Flow Indexer
LDPE/TPMBS blend	15.73±1.38	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	27.54±1.51	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	10.98±1.23	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	11.09±2.01	เกิดฟองอากาศในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว เนื่องจากการ พองตัวของเม็ดแป้ง

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าการเติมเจลาตินมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลได้ง่ายขึ้น ส่วนการเติมเพกตินและคาร์ราจีแนนส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลได้ยากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ อาจเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ของสารแต่ละชนิดกับวัฏภาคของแป้งข้าวเจ้าและ LDPE

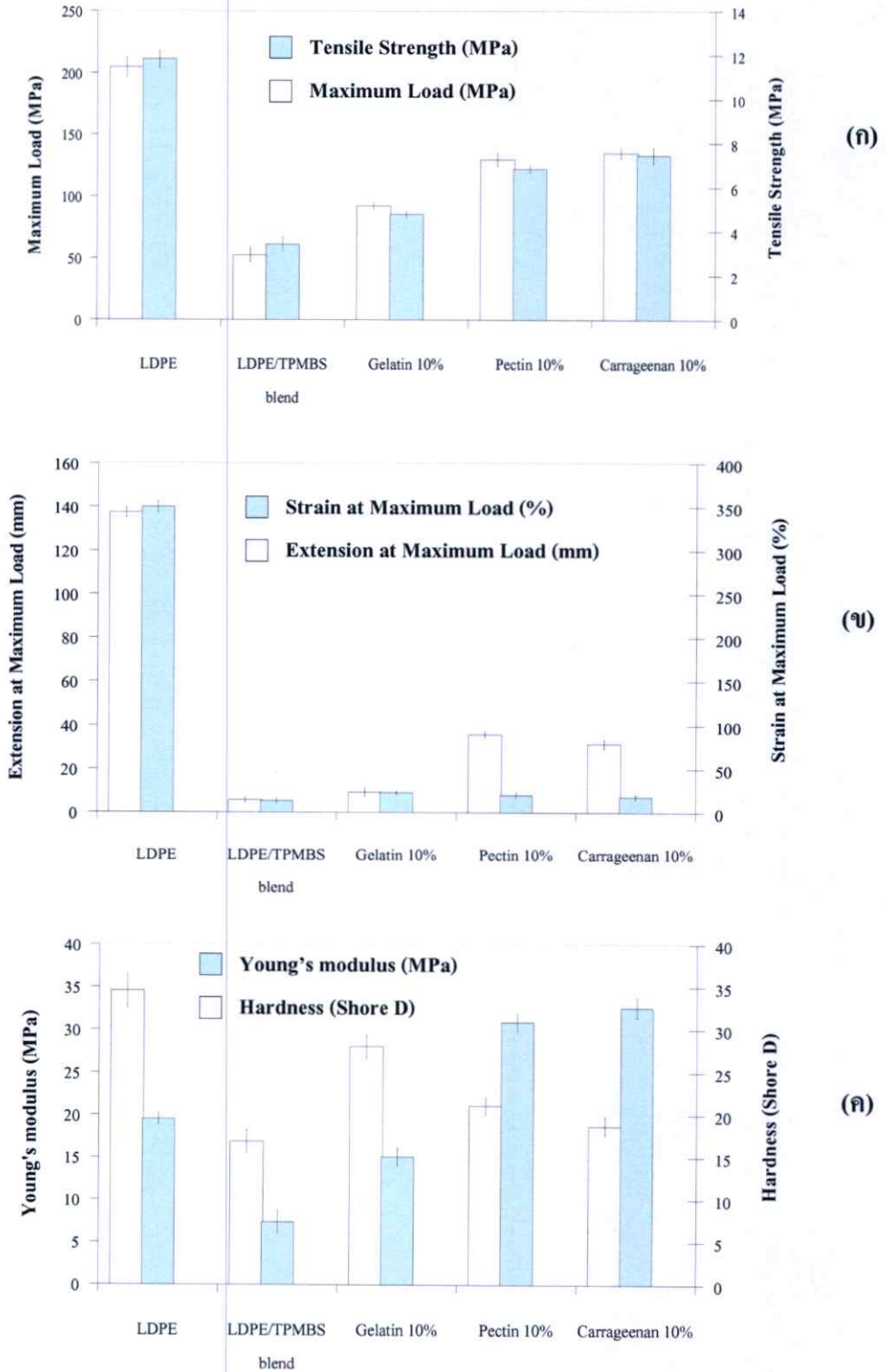
4.5.7 สมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้

จากรูปที่ 4.43 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง การดึงยืดเปอร์เซ็นต์ความเครียด โมดูลัสและความแข็งกคของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนให้ค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าการเติมคาร์ราจีแนนลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด รองลงมาคือเพกตินและเจลาติน ตามลำดับ อาจเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการเข้ากันได้ของสารแต่ละชนิดกับวัฏภาคของแป้งถั่วเขียวและ LDPE ซึ่งแสดงได้จากผลทางสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.41) และความเป็นผลึกของส่วนที่เป็น LDPE ซึ่งแสดงได้จากดิฟแฟรกโตแกรม (รูปที่ 4.39)

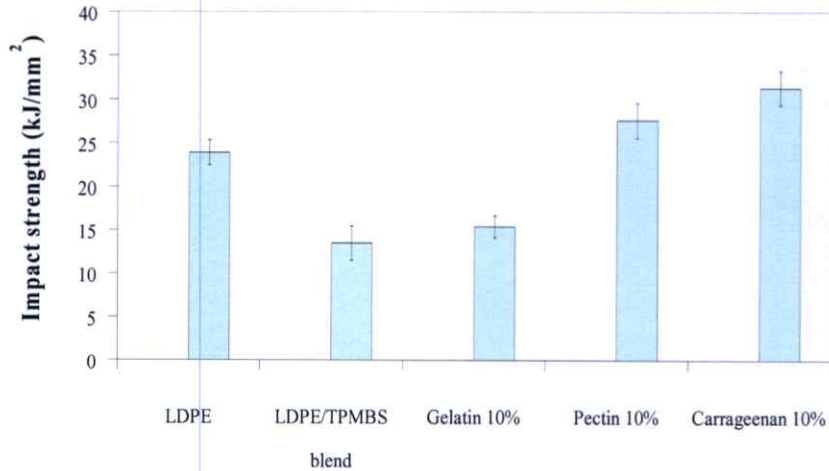
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS กับ LDPE พบว่าค่าสมบัติเชิงกลโดยรวมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมได้มีค่าต่ำกว่า LDPE



รูปที่ 4.42 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วย เจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) การดึงยืด เปอร์เซ็นต์ความเครียด และ (ค) มอดุลัส ความแข็งกด

4.5.8 ความแข็งแรงกระแทก

การศึกษาความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.43

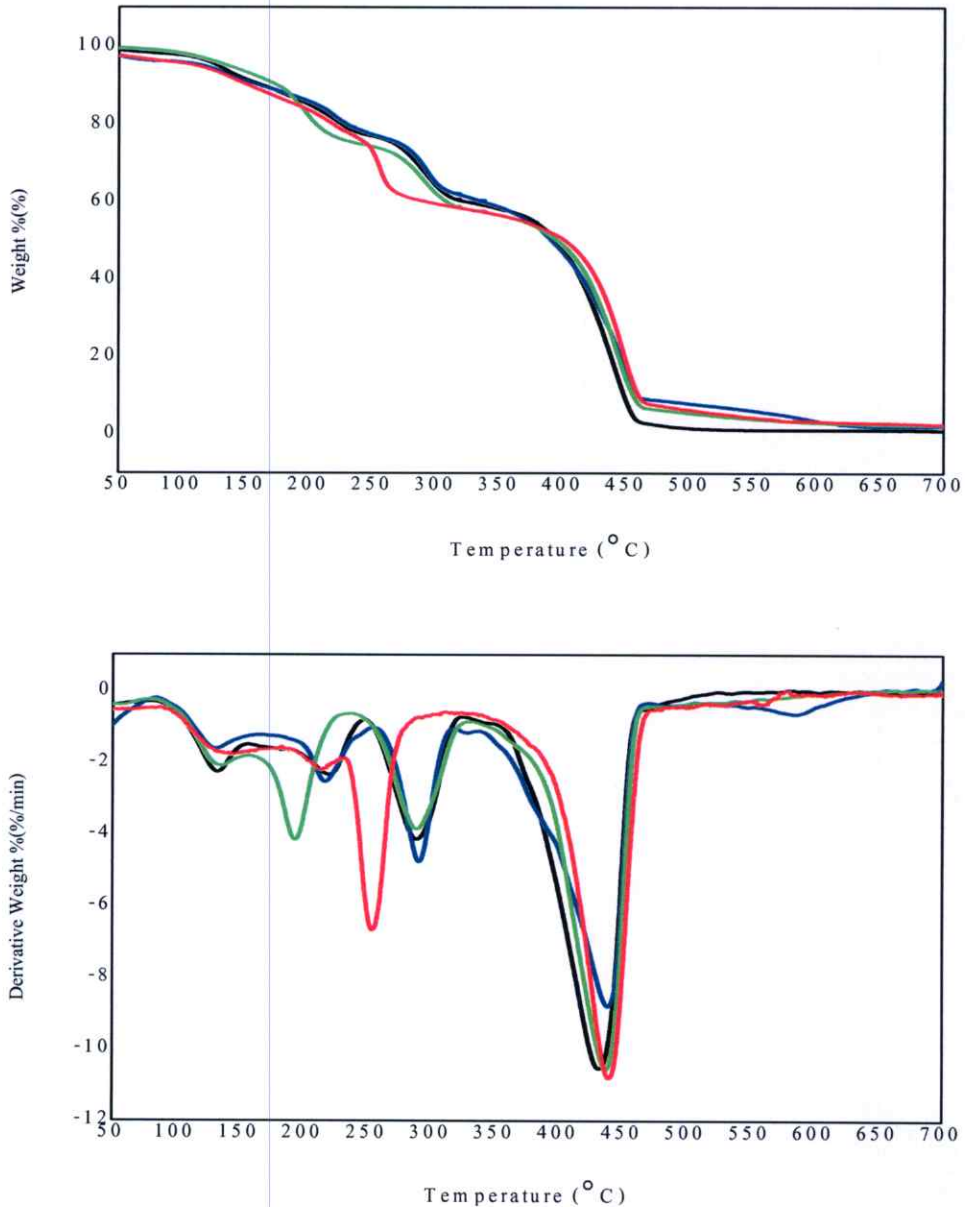


รูปที่ 4.43 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

จากรูปที่ 4.43 แสดงความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าการเติมคาร์ราจีแนนทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากที่สุด รองลงมาคือ เพกตินและเจลาติน สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติมีความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณ 13.51 15.41 27.62 และ 31.59 kJ/mm² ตามลำดับ

4.5.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.44 ตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.44 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS (สีดำ) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ (สีน้ำเงิน) เจลาติน 10% (สีเขียว) เพกติน 10% และ (สีแดง) คาร์ราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3
LDPE/TPMBs blend	202.8	275.5	415.1
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 10 %wt	201.5	280.2	414.2
LDPE/TPMBs blend + Pectin 10 %wt	182.2	279.9	414.5
LDPE/TPMBs blend + Carrageenan 10 %	198.8	248.5	413.3

จากผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินและเพกตินให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ส่วนการเติมคาร์ราจีแนนส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs มีค่าลดลง แสดงว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากคาร์ราจีแนนดูดความร้อนแล้วสะสมความร้อนไว้ในระยะยาวได้โดยไม่เกิดการสลายตัวทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนไปยังแป้งถั่วเขียวได้ ส่งผลให้แป้งถั่วเขียวได้รับความร้อนมากขึ้นจึงเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิลดลง

4.5.9 การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อหาค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) ของ LDPE ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ซึ่งให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.14

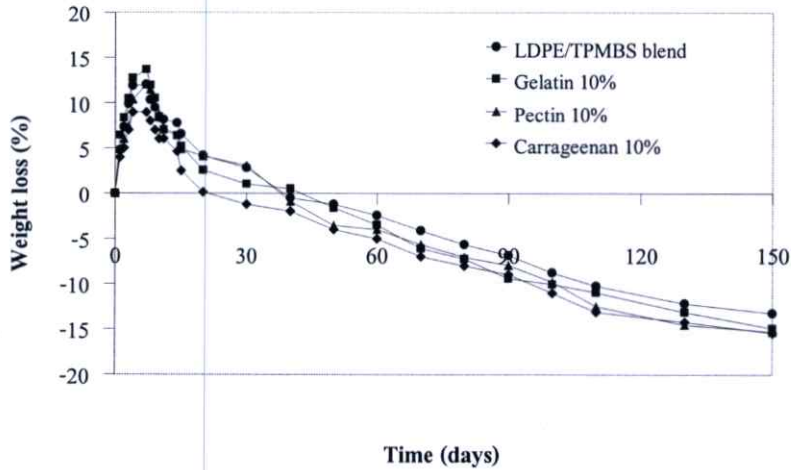
ตารางที่ 4.14 ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิตกผลึก และร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_f (J/g)	%Crystallinity
LDPE	101.7	85.2	76.2	26.7
LDPE/TPMBS blend	99.7	82.1	34.9	24.4
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	101.1	85.2	35.0	24.5
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	100.8	83.1	37.8	26.5
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	100.5	85.2	37.5	26.3

จากตารางที่ 4.14 พบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิตกผลึก (T_c) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ และเมื่อพิจารณาค่าเอนทัลปี (ΔH_f) พบว่าการเติมเพกตินและคาร์ราจีแนนให้ค่าเอนทัลปีสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและคาร์ราจีแนนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

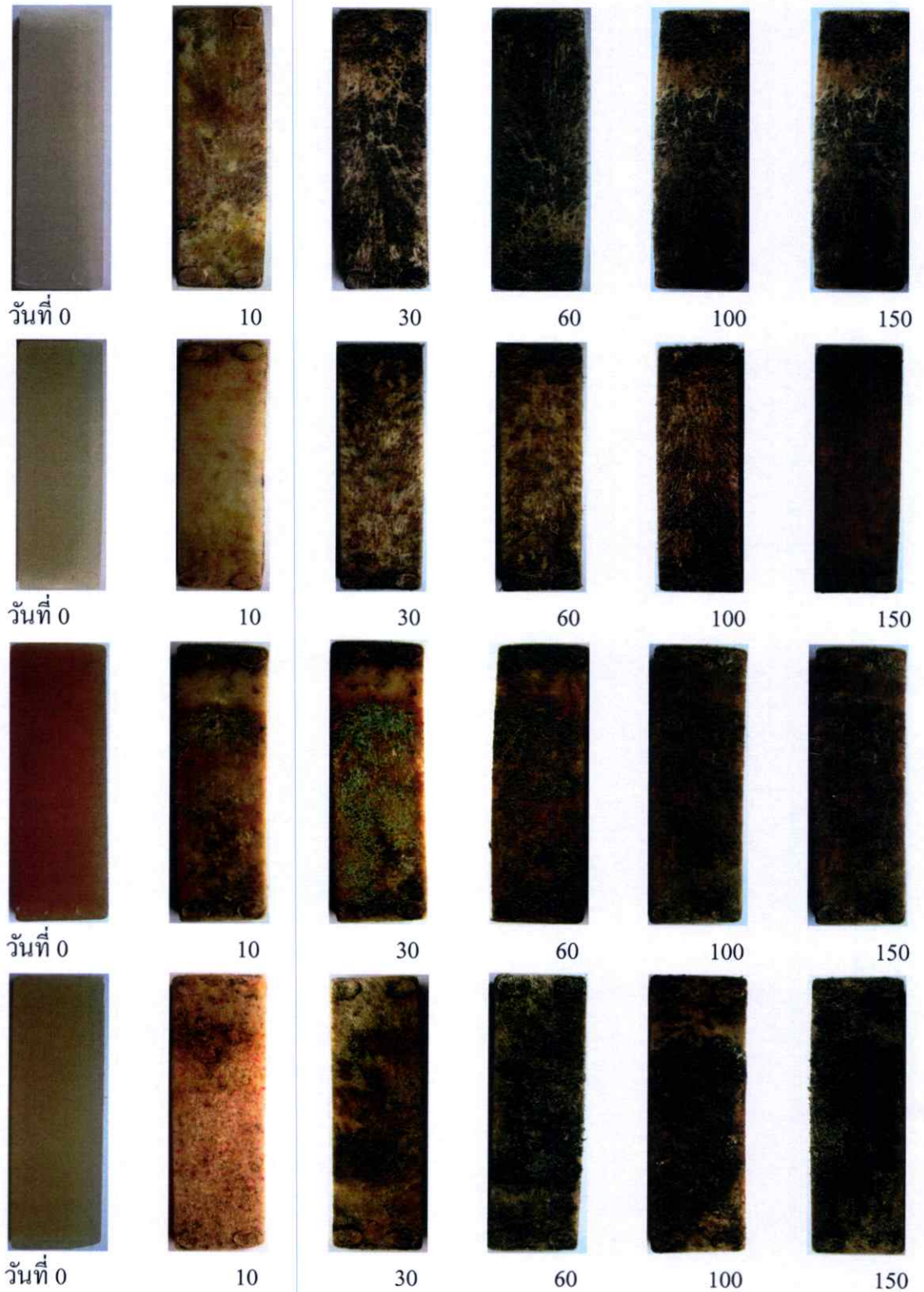
4.5.11 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนที่ปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 การย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน

จากรูปที่ 4.45 แสดงการเปรียบเทียบการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่เติมและเติมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนมีอัตราการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS โดยพบว่าการเติมเพกตินมีผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้มากที่สุด รองลงมา คือ คาร์ราจีแนน เจลาตินและพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าประมาณ 15.32% 15.03% 14.96% และ 13.26% ตามลำดับ เมื่อฝังดินไปเป็นระยะเวลา 150 วัน



รูปที่ 4.46 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs (ก) ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

(ข) เจลาติน 10% (ค) เพกติน 10% (ง) คาร์ราจีแนน 10% โดยน้ำหนัก

ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม และทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาติน เพกติน และคาร์ราจีแนน ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชัน พบว่า พิกของการสั่นที่ตำแหน่งของ OH-stretching มีการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ต่ำลง แสดงให้เห็นว่ามีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหุ้มฟังก์ชันของแป้งถั่วเขียวกับเจลาติน เพกตินหรือคาร์ราจีแนน

2. จากการศึกษาความเป็นผลึก พบว่า การเติมเจลาตินส่งผลให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลง ส่วนเพกตินและคาร์ราจีแนนไม่ส่งผลต่อความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS

3. จากการศึกษาการวัดสี พบว่า การผสมเจลาติน เพกตินและคาร์ราจีแนนทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความสว่างของสีลดลงแต่มีความสดใสของสีมากขึ้น โดยขึ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเจลาตินและคาร์ราจีแนนมีสีเหลืองสำหรับการเติมเพกตินให้สีขึ้นงานเป็นสีน้ำตาล

4. จากการศึกษาการดูดซับน้ำ พบว่า การเติมเจลาตินมีผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีการดูดซับน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ คาร์ราจีแนนและเพกติน

5. จากการศึกษาสัญญาณวิทยา พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการเติมเจลาตินเกิดการแยกวัฏภาคอย่างชัดเจน ส่วนการเติมเพกตินและคาร์ราจีแนนส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

6. จากการศึกษาสมบัติการไหล พบว่า การเติมเจลาตินมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลได้ง่ายขึ้น ส่วนการเติมเพกตินและคาร์ราจีแนนส่งผลให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลงพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถไหลได้ยากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

7. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ส่งผลให้ขึ้นงานมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด รองลงมาคือเพกติน เจลาติน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ ตามลำดับ

8. จากการศึกษาความแข็งแรงกระแทก พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากที่สุด รองลงมา คือ เพกติน เจลาติน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

9. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเจลาตินและเพกตินให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ส่วนการเติมคาร์ราจีแนนส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าลดลง แสดงว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยคาร์ราจีแนนมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง

10. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า การเติมเพกตินมีผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายได้มากที่สุด รองลงมาคือคาร์ราจีแนน เจลาติน และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง เป็นต้น และปริมาณที่แตกต่างกันออกไป
2. ศึกษาชนิดของแป้งต่างๆ เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า เป็นต้น และปริมาณที่แตกต่างกันออกไป
3. ศึกษาการเติมเส้นใยต่างๆ เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยไนลอน เป็นต้น
4. ศึกษาการความสามารถในการย่อยสลายด้วยเทคนิคอื่นๆ เช่น การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์ การวิเคราะห์ด้วยความร้อน เป็นต้น แทนการทดสอบโดยการฝังดิน เนื่องจากชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เตรียมได้ เกิดการย่อยสลายโดยการฝังดินได้ยาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] P. Veiga-Santos, L.M. Oliveira, M.P. Cereda and A.R.P. Scamparini. **Sucrose and inverted sugar as plasticizer. Effect on cassava starch–gelatin film mechanical properties, hydrophilicity and water activity.** Food Chemistry, 103 (2007) 255-262.
- [3] X.F. Ma, J.G. Yu and Y.B. Ma. **Urea and formamide as a mixed plasticizer for thermoplastic wheat flour.** Carbohydrate Polymers, 60 (2005) 11 – 116.
- [4] พิมพ์ชนก แสงนิตติเดช และเพ็ญฤทัย บุญประสิทธิ์. 2551. **ผลของสารตัวเติมและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า.** โครงการงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] คารินทร์ โพธิ์ศรี ลักษณะ หอมมณี และปาริชาติ จิรภักเสถียร. 2551. **การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.** โครงการงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] ศูนย์สารสนเทศการเกษตรสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
<http://www.oae.go.th> [20 September 2010]
- [7] <http://www.kasikorningmag.com> [23 September 2010]
- [8] <http://elibrary.eduzones.com/index> [29 September 2010]
- [9] ธนาวดี ลีจากภัย. 2549. **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [10] <http://www.european-bioplastics.org> [24 September 2010]
- [11] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง.** พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] อรุณา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1.** ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [13] เอกสารสมุนไพรรไทย สำนักวิทยบริการ สถาบันราชภัฏสมเด็จพระเจ้าพระยา [29 September 2010]
- [14] <http://www.maansajjaja.blogspot>. [2 November 2010]
- [15] A. Imeson. 1997. **Thickening and Gelling Agents for Food**. Blackie Academic and Professional, London.
- [16] จารุณี ยาห้องอากาศ. 2543. การผลิตคาร์โบไฮเดรตฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและเพกติน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] นิธิดา รัตนาปนนท์. 2554. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอ.เอส. พรินต์ติ้ง เฮ้าส์. กรุงเทพมหานคร.
- [18] สายสมร พูลพันธ์. 2547. ผลของสารที่ทำให้เกิดเจลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเยลลี่รสนมผสมน้ำสตอเบอร์รี่. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [19] D.R. Paul and C.B. Bucknall. 2000. **Polymer Blends**. Vol. 1. John Wiley & Sons. New York.
- [20] Dupont Polymer Modifiers. 2006. Compatibilizers improve the value of blended or recycled polymers. [Online]. Available : www.dupont.com/industrial-polymer/plastic/polymers/fusabond.html. [13 October 2010]
- [21] U. Ratanakamnuan and D. Ant-Ong. **Preparation and Characterization of Low-Density Polyethylene/Banana Starch Films Containing Compatibilizer and Photosensitizer**. Journal of Applied Polymer Science, 100 (2006) 2717 – 2724.
- [22] วรวิทย์ โพนนิกร. 2546. ผลของแป้งชนิดต่างๆ ที่มีต่อการเชื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกอบ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [23] L. Wang, M.A.E. Auty and J.P. Kerry. **Physical assessment of composite biodegradable films manufactured using whey protein isolate, gelatin and sodium alginate**. Journal of Food Engineering, 96 (2010) 199–207.
- [24] R. Zullo and S. Iannace. **The effects of different starch sources and plasticizers on film blowing of thermoplastic starch : Correlation among process, elongational**

- properties and macromolecular structure.** Carbohydrate Polymers, 77 (2009) 376-383.
- [25] W. Ning, Y. Jiugao, M. Xiaofei and W. Ying. **The influence of citric acid on the properties of thermoplastic starch/linear low-density polyethylene blends.** Carbohydrate Polymers, 67 (2007) 446-453.
- [26] A.L. Da Roz, A. J. F. Carvalho, A. Gandind and A. A. S. Curvelo. **The effect of plasticizers on thermoplastic starch composition obtained by melt processing.** Carbohydrate Polymers, 63 (2006) 417-424.
- [27] W.Shujun, Y.Jingao and Y.Jinglin. **Preparation and charecterizaion of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends.** Polymer Degradation and Stability, 87 (2005) 395-401.
- [28] D. Ant-Ong and K. Charoenkongthum. **Thermal Properties and Moisture Absorption of LDPE/Banana Starch Biocomposite Films.** Journal of Metals, Materials and Minerals. 12 (2002) 1-10.
- [29] M. L. Fishman, D. R. Coffin, R. P. Konstance and C. I. Onwulata **“Extrusion of pectin/starch blends plasticizer with glycerol.”** Carbohydrate Polymers, 41 (2000) 317-325.
- [30] ภูริสา ทศวิล, อรพิน เกิดชูชื่น และ ณัฏฐา เลหากุลจิตต์. 2553. **อิทธิพลของ K-คาร์ราจีแนตต่อคุณสมบัติทางเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้ง.** คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [31] ASTM D 638. **Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic.** Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1992.
- [32] ASTM D 2240 **Stardard Test Method for Rubber Property-Duroter Hardness.** West Conshohocken : American Society for Testing and Materails, 2000.
- [33] ASTM D 256. **Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastic and Electrial Insulating Material.** Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1993.
- [34] R. Chandra and R. Rustgi. **Biodegradable polymers.** Progress in Polymer Science, 23 (1998) 1273-1335.

- [35] American Standard for Testing and Materials. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastic**. ASTM D 624. ASTM D 570. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia, 1998.
- [36] เข็นททัย แน่นหนาไ 2549. **สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [37] J. Yang, J. Yu and X. Ma. 2006. **Study on the properties of ethylenebisformamide and sorbitol plasticized corn starch (ESPTPS)**. Carbohydrate Polymers, 66 (2 006) 110–116.
- [38] 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.
- [39] K. Pal, A.K. Banthia and D.K. Majumdar. **Preparation and Characterization of PolyvinylAlcogol-Gelatin Hydrogel Membranes for Biomedical Applications**. AAPS Pharmaceutical Science Technology, 8 (2007) E1-E5.
- [40] สมบัติ พุทธจักร. **โครงสร้างและสมบัติเชิงฟิสิกส์ของพอลิเมอร์**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ปัตตานี).
- [41] R.A. Pereira, E.B. Mano, M.L. Dias and E.B. Acordi. **Comparative study on the lamellar crystal structure of high and low density polyethylenes**. Polymer Bulletin 38, (1997) 707-714.
- [42] C.S. Ki, D.H. Baek, K.D. Gang, K.H. Lee, I.C. Um and Y.H. Park. **Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin–formic acid solution**. Polymer, 46 (2005) 5094–5102.
- [43] U.Funke,W.Bergthaller and M.G. Lindhauer. **Processing and characterization of biodegradable products based on starch** , Polymer Degradation and Stability, 58 (1998) 293-296.
- [44] J.F. Martucci and R.A. Ruseckaite. **Tensile properties, Barrier Properties, and Biodegradation in Soil of Compression-Molded Gelatin-Dialdehyde**. Journal of Applied Polymer Science, 112 (2009) 2166-2178.
- [45] A.A.S. Curvelo, A.J.F. Carvalho and J.A.M. Agnelli. **Thermoplastic starch cellulosic fibers composites preliminary results**. Carbohydrate Polymers, 45 (2001) 183-188.

- [46] 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.
- [47] L.Dobircau, P.A. Sreekumar, R. Satah, N. Leblanc, C. Terrie, R. Gattin and J.M. Saiter. **Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre : Agro-green composites.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 40 (2009) 329-334.
- [48] S.K. Singh, S.P. Tambe, A.B. Samui, V.S. Raja and Dhirendra Kumar. **Maleic acid grafted low density polyethylene for thermally sprayable anticorrosive coatings.** Progress in Organic Coatings, 55 (2006) 20-26.
- [49] R.K. Mishra, M. Datt, K. Pal and A.K. Banthia. **Preparation and characterization of amidated pectin based hydrogels for drug delivery system.** Journal of Material Science, 19 (2008) 2275-2280.
- [50] M. Kumar, R.K. Mishra and A.K. Banthia. **Development of pectin based hydrogel membranes for biomedical applications.** Journal of Plastic Technology, 14 (2010) 213-223.
- [51] O. Mayans, M. Scott, I. Connerton, T. Gravesen, J. Benen, J. Visser, R. Pickersgill and J. Jenkins. **Two crystal structures of pectin lyase A from Aspergillus reveal a pH driven conformational change and striking divergence in the substrate-binding clefts of pectin and pectate lyases.** Structure, 5 (1997) 677-689.
- [52] ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ ภาวิณี กิ่งสุข และยศธร ชเนสรุ่งโรจน์. 2553. **การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย.** โครงการงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [53] C.T. Aranilla, N. Nagasawa, A. Bayquen and A. D. Rosa. **Synthesis and characterization of carboxymethyl derivatives of Kappa-carrageenan.** Carbohydrate Polymers, 87 (2012) 1810-1816.
- [54] K. Prasad, R. Meena and A.K. Siddhanta. **Microwavv-Induced Rapid One-Pot Synthesis of k-Carrageenan-g-PMMA Copolymer by Potassium Persulphate Initiating System.** Journal of Applied Polymer Science, 101 (2006) 161-166.

- [55] S. Janaswamy and R. Chandrasekaran. **Three-dimensional structure of the sodium salt of iota-carrageenan.** Carbohydrate Research, 335 (2001) 181-194.
- [56] พัฒนา บัณฑิต.2553. **ผลของแคลป์ปาคาร์ราจีแนนที่มีต่อสมบัติต่างๆของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.** ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [57] D. Lafargue, D. Lourdin and J.L. Doublier. **Film-forming properties of a modified starch/k-carrageenan mixture in relation to its rheological behaviour.** Carbohydrate Polymers, 70 (2007) 101-111.

ภาคผนวก ก

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)															
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
DPE/TPMBS blend	0.00	8.81	9.26	9.92	12.45	14.26	14.67	14.34	14.53	14.45	14.36	14.24	14.43	14.36	14.78	14.46
DPE/TPMBS blend + Gelatin 2%	0.00	8.11	10.15	13.53	15.32	15.67	15.52	15.67	15.49	15.87	15.56	15.89	15.67	15.39	15.76	15.42
DPE/TPMBS blend + Gelatin 6%	0.00	7.62	10.62	12.18	16.74	16.98	16.78	16.54	16.34	16.78	16.56	16.87	16.69	16.55	16.34	16.56
DPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	0.00	7.85	12.94	14.34	17.05	17.23	17.34	16.98	17.25	17.32	17.52	17.34	17.58	17.24	17.51	17.39
DPE/TPMBS blend + Pectin 2%	0.00	8.81	9.92	10.21	12.65	13.87	14.98	15.04	15.13	14.791	15.09	15.01	14.88	15.09	15.12	14.94
DPE/TPMBS blend + Pectin 6%	0.00	8.59	9.63	11.26	12.45	14.67	14.98	15.34	15.13	15.21	15.09	15.19	15.18	15.09	15.22	15.24
DPE/TPMBS blend + Pectin 10%	0.00	10.12	11.58	12.24	13.26	14.71	14.99	15.38	15.68	16.02	16.15	16.22	15.98	15.87	16.09	16.17
DPE/TPMBS blend + Carrageenan 2%	0.00	7.69	10.23	11.67	13.42	14.66	14.56	15.24	15.09	15.13	15.22	15.18	15.27	15.23	15.32	15.26
DPE/TPMBS blend + Carrageenan 6%	0.00	9.21	11.68	12.81	14.56	14.79	14.98	15.18	15.65	15.47	15.61	15.69	15.59	15.98	15.81	15.81
DPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	0.00	8.77	10.37	12.56	13.98	14.75	15.02	15.13	15.69	15.98	16.32	16.19	16.23	16.29	16.15	16.27

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100%

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ (%)														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
LDPE/TPMBs blend	-	-	14.45	-	-	14.76	-	-	14.51	-	-	14.65	-	-	14.66
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 2%	-	-	15.98	-	-	15.34	-	-	15.65	-	-	15.49	-	-	15.71
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 6%	-	-	16.72	-	-	16.56	-	-	16.49	-	-	16.71	-	-	16.55
LDPE/TPMBs blend + Gelatin 10%	-	-	17.45	-	-	17.67	-	-	17.38	-	-	17.03	-	-	17.25
LDPE/TPMBs blend + Pectin 2%	-	-	14.98	-	-	15.12	-	-	15.07	-	-	15.11	-	-	15.15
LDPE/TPMBs blend + Pectin 6%	-	-	15.17	-	-	15.24	-	-	15.27	-	-	15.18	-	-	15.31
LDPE/TPMBs blend + Pectin 10%	-	-	15.79	-	-	15.91	-	-	16.13	-	-	16.16	-	-	16.05
LDPE/TPMBs blend + Carrageenan 2%	-	-	15.22	-	-	15.17	-	-	15.26	-	-	15.32	-	-	15.27
LDPE/TPMBs blend + Carrageenan 6%	-	-	15.69	-	-	15.79	-	-	15.86	-	-	15.91	-	-	15.87
LDPE/TPMBs blend + Carrageenan 10%	-	-	16.31	-	-	16.27	-	-	16.19	-	-	16.18	-	-	16.23

ภาคผนวก ข

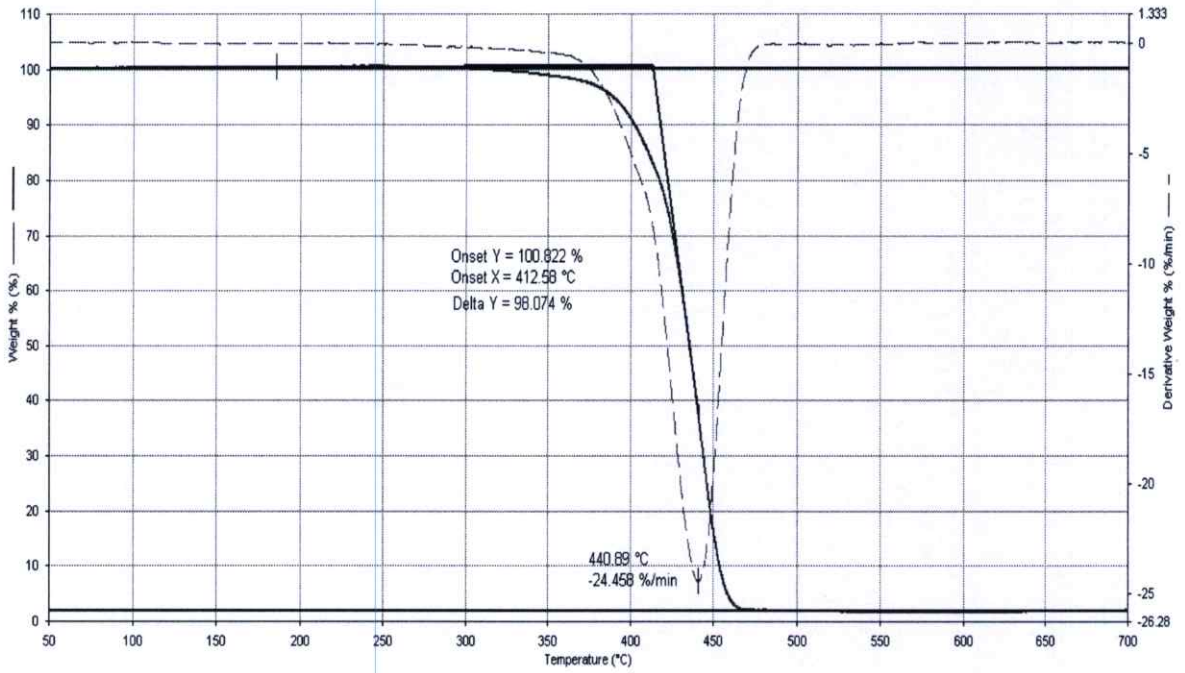
สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล							
	แรงดึง (MPa)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัสของยัง (MPa)	การดึงยืด (mm)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด (%)	ความแข็งกด (Shore D)	ความแข็งแรง กระแทก (kJ/mm ²)	
LDPE/TPMBS blend	52.23±4.21	3.42±0.19	7.34±0.37	5.69±0.87	13.49±2.98	26.85±1.35	13.51±1.97	
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 2%	90.63±4.98	5.45±0.23	12.34±0.48	19.86±0.92	60.03±3.81	23.62±1.14	19.23±1.54	
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 4%	104.12±3.98	5.96±0.22	14.95±0.51	17.22±1.40	52.50±4.02	27.15±1.66	19.34±2.08	
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 6%	113.93±4.76	6.10±0.18	15.87±0.45	16.03±1.32	45.63±3.40	27.15±1.15	19.17±1.77	
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 8%	102.44±5.76	5.45±0.21	15.66±0.41	14.87±1.15	33.13±2.93	27.65±1.09	18.69±1.82	
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	92.17±5.32	4.78±0.15	15.07±0.39	9.35±0.95	23.04±2.71	28.05±1.05	15.41±1.27	
LDPE/TPMBS blend + Pectin 2%	95.77±4.96	5.04±0.42	12.92±0.65	13.98±1.51	24.37±1.56	17.98±1.33	37.06±2.59	
LDPE/TPMBS blend + Pectin 4%	98.89±5.34	5.15±0.35	13.81±0.73	16.60±0.92	26.12±1.72	23.07±0.96	36.32±2.19	
LDPE/TPMBS blend + Pectin 6%	108.29±4.66	5.89±0.37	15.06±1.27	18.72±1.12	31.23±1.86	25.98±0.83	35.38±2.71	
LDPE/TPMBS blend + Pectin 8%	116.39±6.34	6.26±0.26	14.87±0.61	20.35±0.72	33.55±1.45	29.65±1.45	35.04±3.05	
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	129.75±2.68	6.84±0.16	18.73±0.59	17.98±1.99	31.56±2.38	32.60±1.18	27.62±1.57	

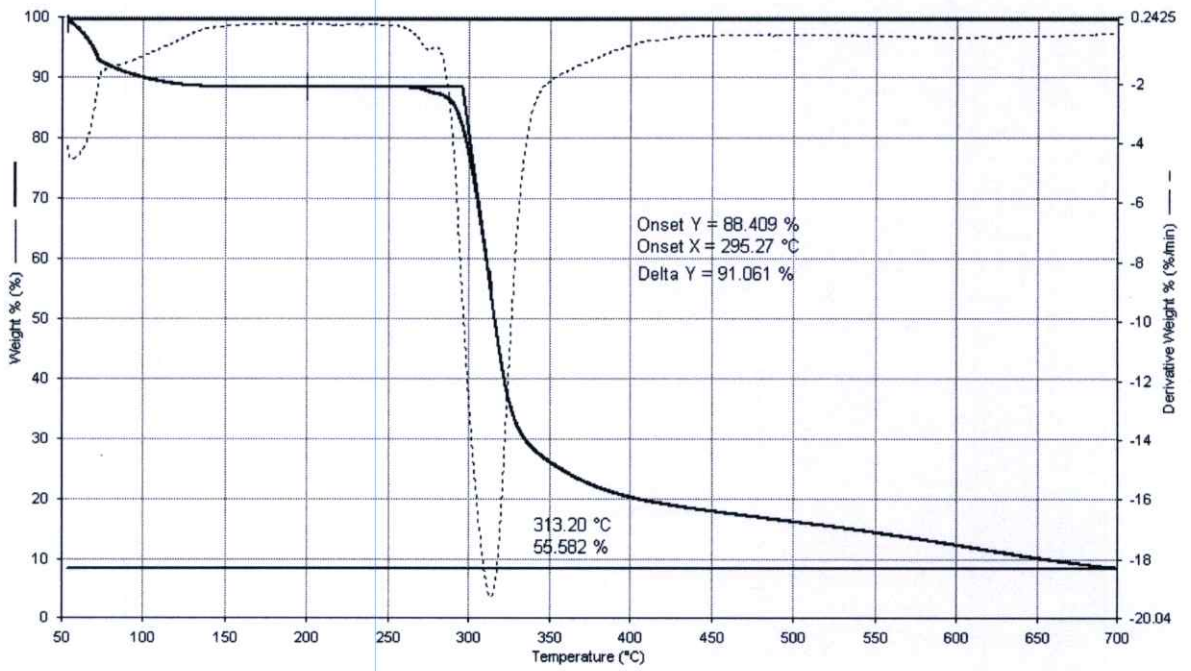
ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล						
	แรงดึง (MPa)	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดูลัสของยัง (MPa)	การดึงยืด (mm)	เปอร์เซ็นต์ ความเครียด (%)	ความแข็งกด (Shore D)	ความแข็งแรง กระแทก (kJ/mm ²)
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 2%	89.52±6.74	4.85±0.45	14.47±0.73	10.40±1.76	17.68±2.39	24.40±1.93	34.39±2.32
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 4%	112.88±5.95	6.15±0.25	16.62±1.26	15.64±0.82	25.08±3.12	27.25±1.77	34.52±1.94
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 6%	120.05±4.78	6.57±0.41	18.49±1.42	19.48±1.76	33.38±2.51	27.82±1.32	34.58±2.66
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 8%	128.05±5.57	6.96±0.31	19.26±0.83	33.14±1.47	37.67±3.56	29.15±1.69	34.42±2.04
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	134.87±4.35	7.44±0.36	21.09±1.03	20.08±1.83	35.83±1.64	30.93±1.02	31.39±1.97
LDPE	204.86±8.01	11.83±0.42	19.52±0.65	137.59±2.28	350.18±6.23	34.56±1.96	43.92±1.45

ภาคผนวก ก

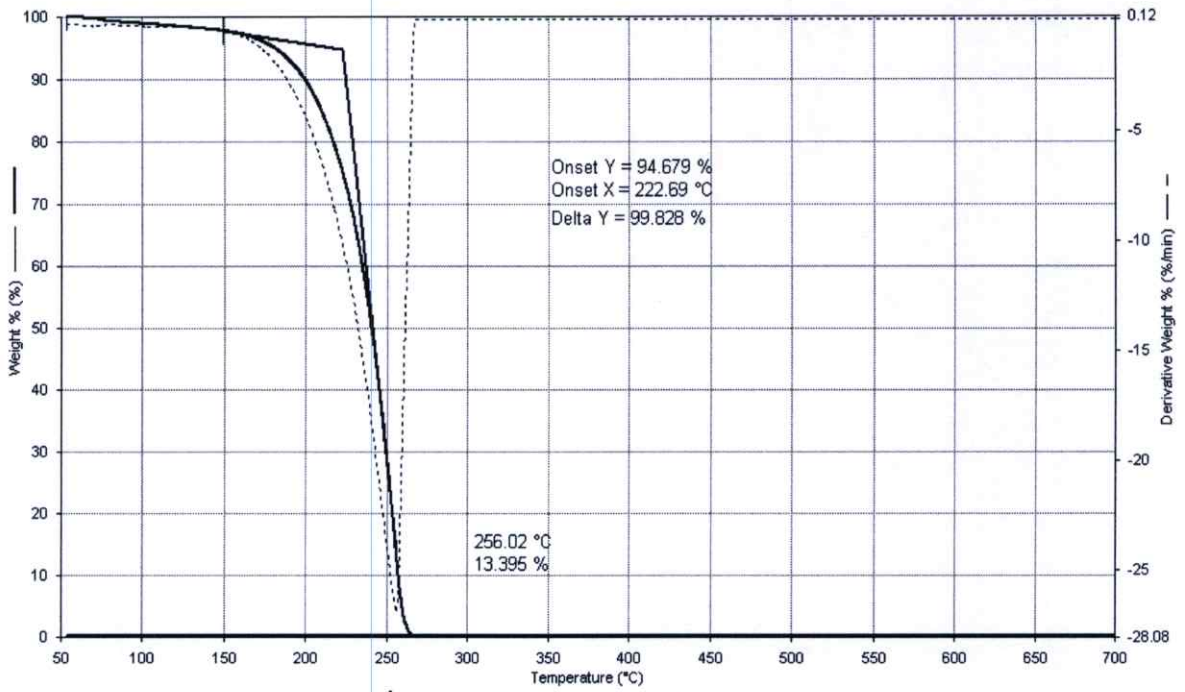
การทดสอบสมบัติทางความร้อน



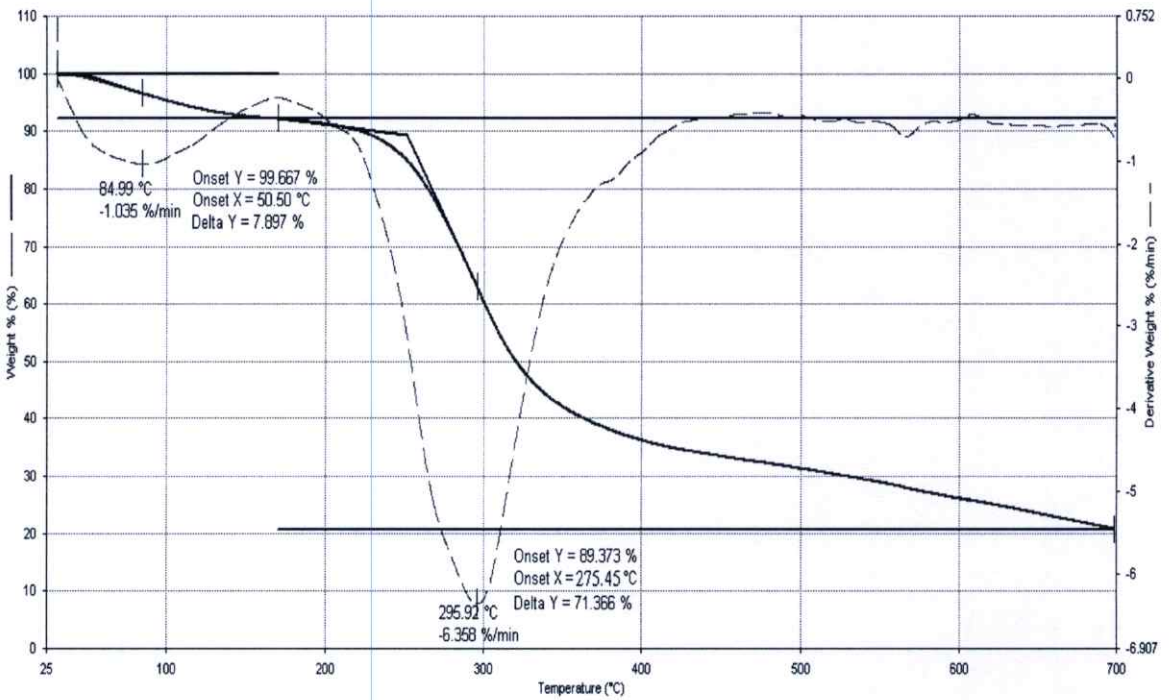
รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



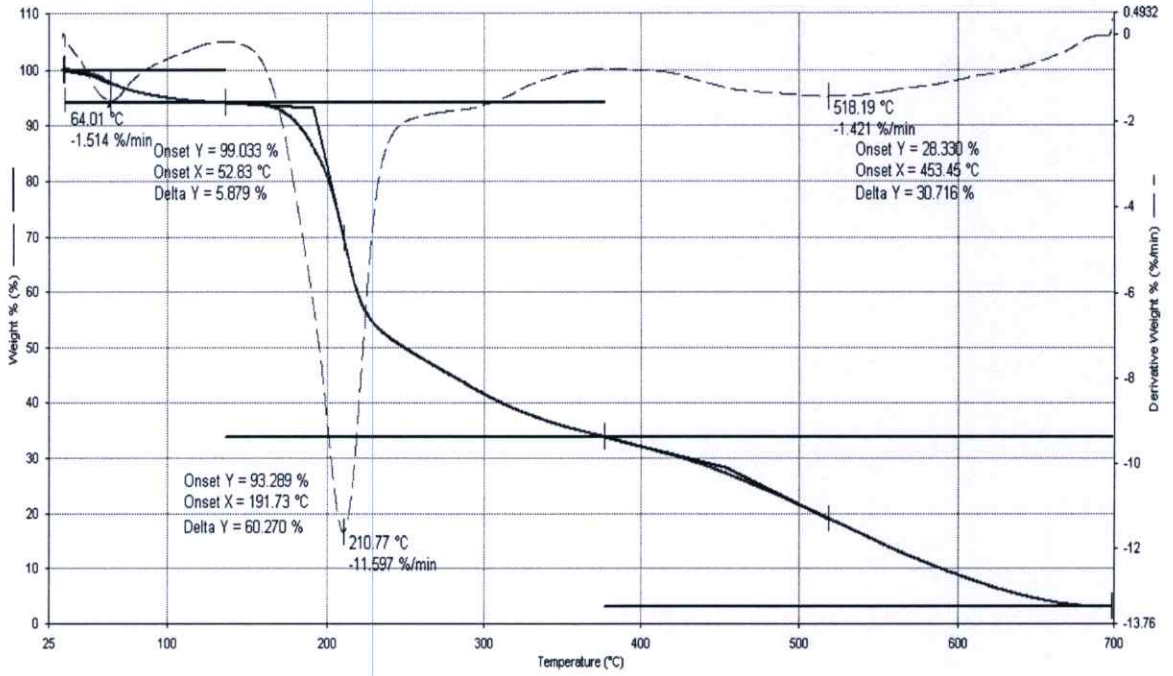
รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเจ้า



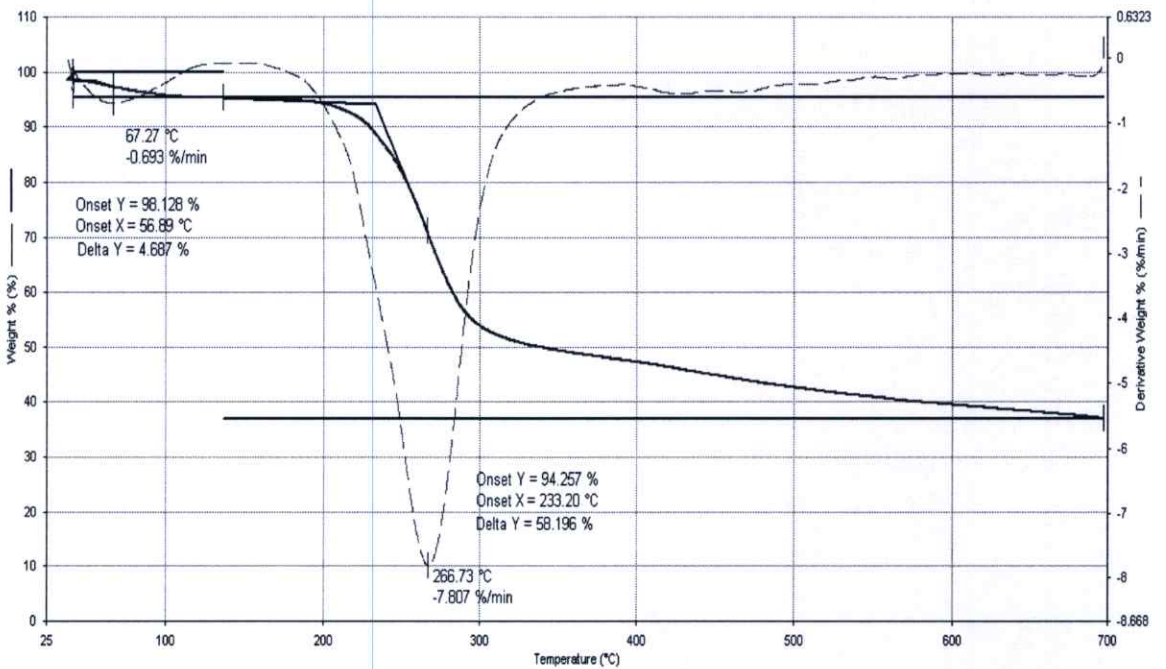
รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรมของกาลีเซอรอล



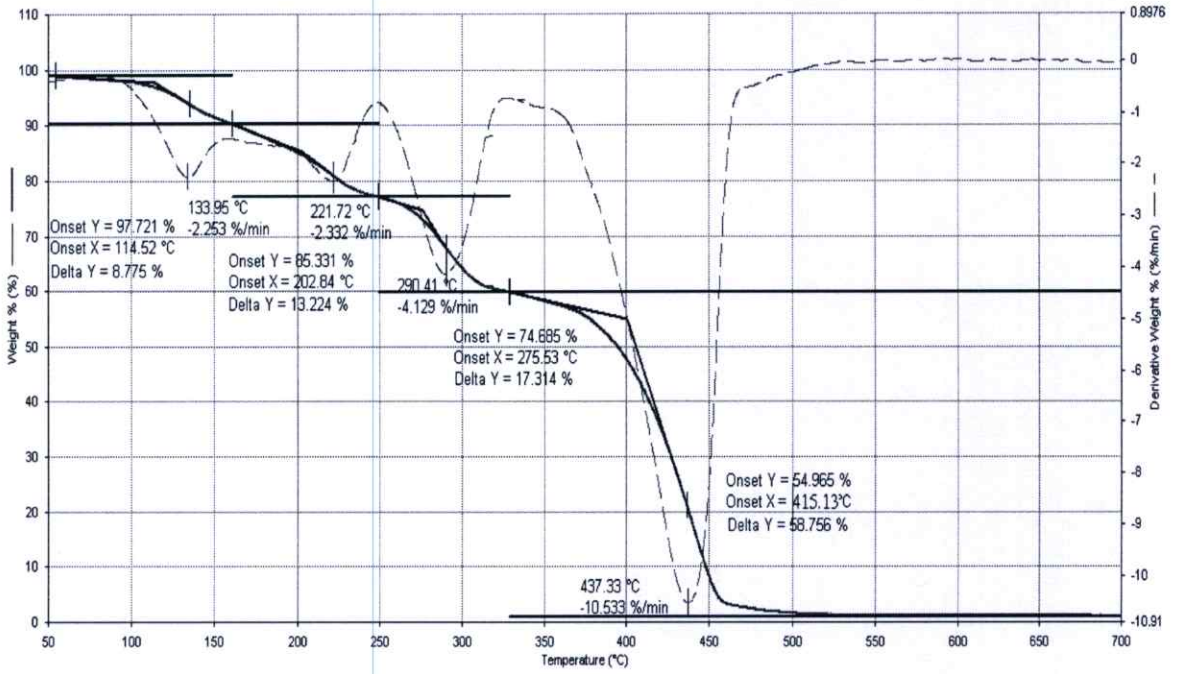
รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรมของเจลาติน



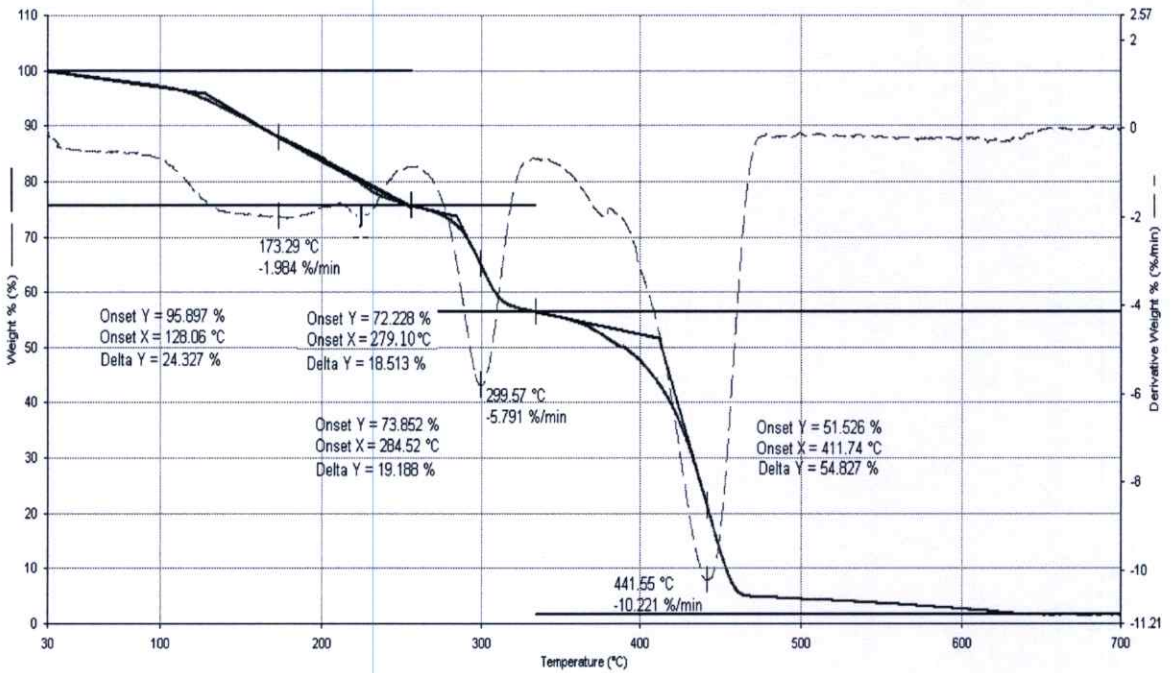
รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรมของเพคติน



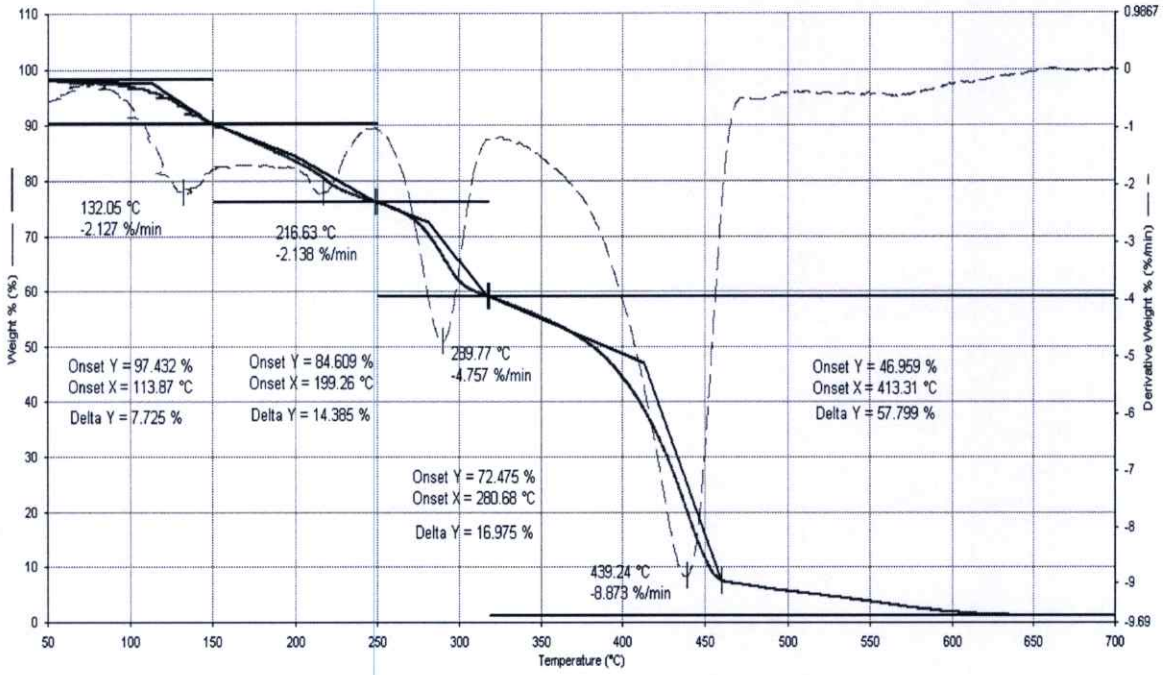
รูปที่ ค.6 เทอร์โมแกรมของคาร์ราจีแนน



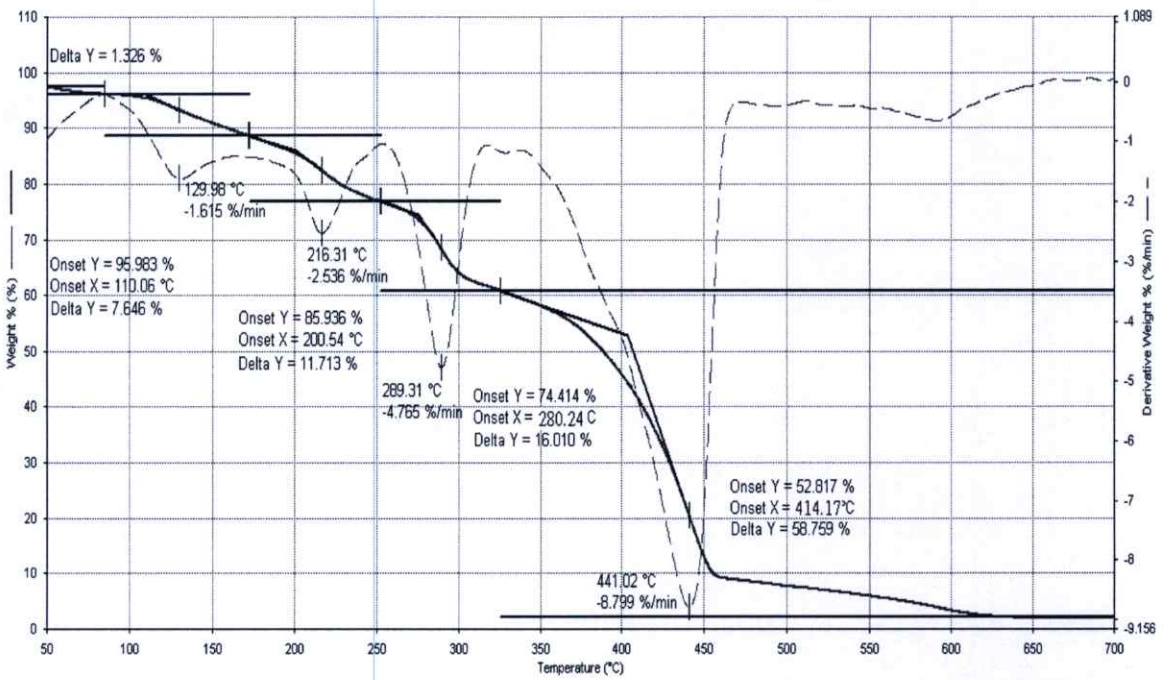
รูปที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS



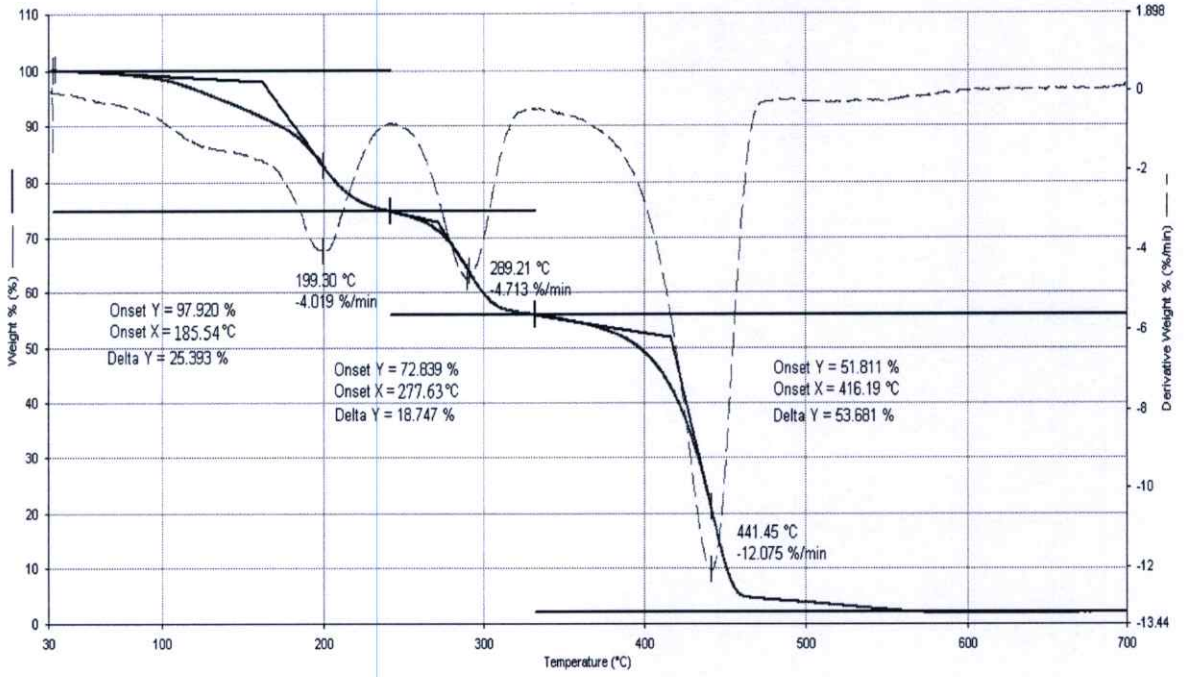
รูปที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเขลาดิน 2%



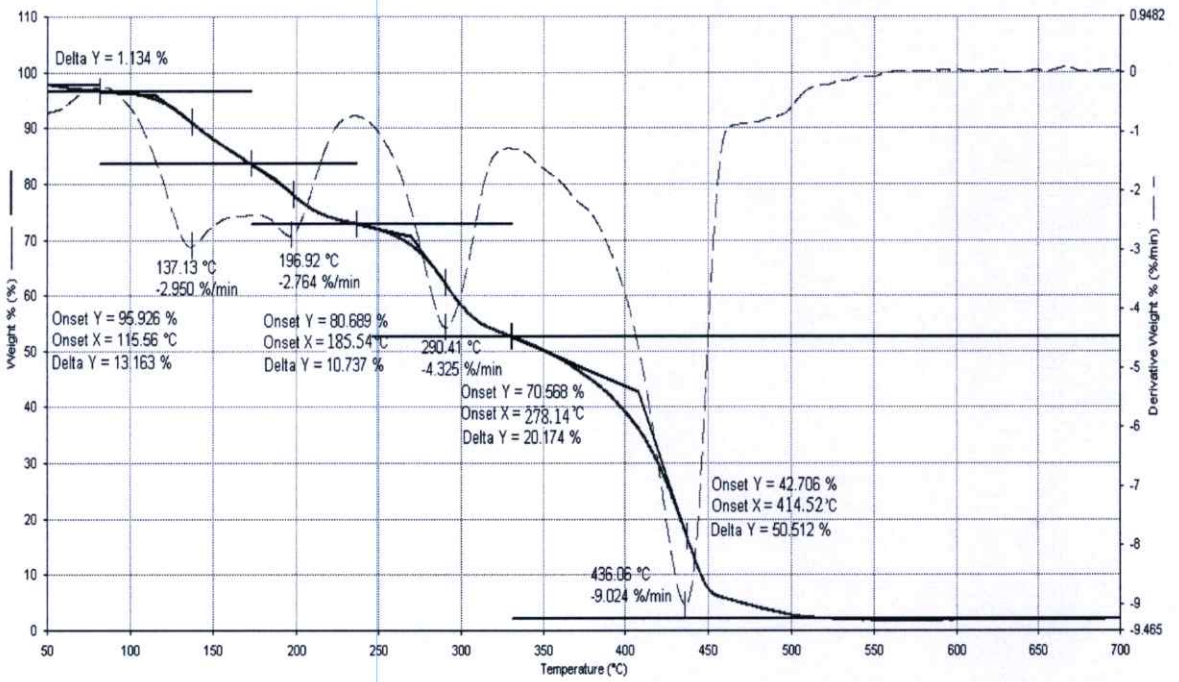
รูปที่ ค.9 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเขลาดิน 6%



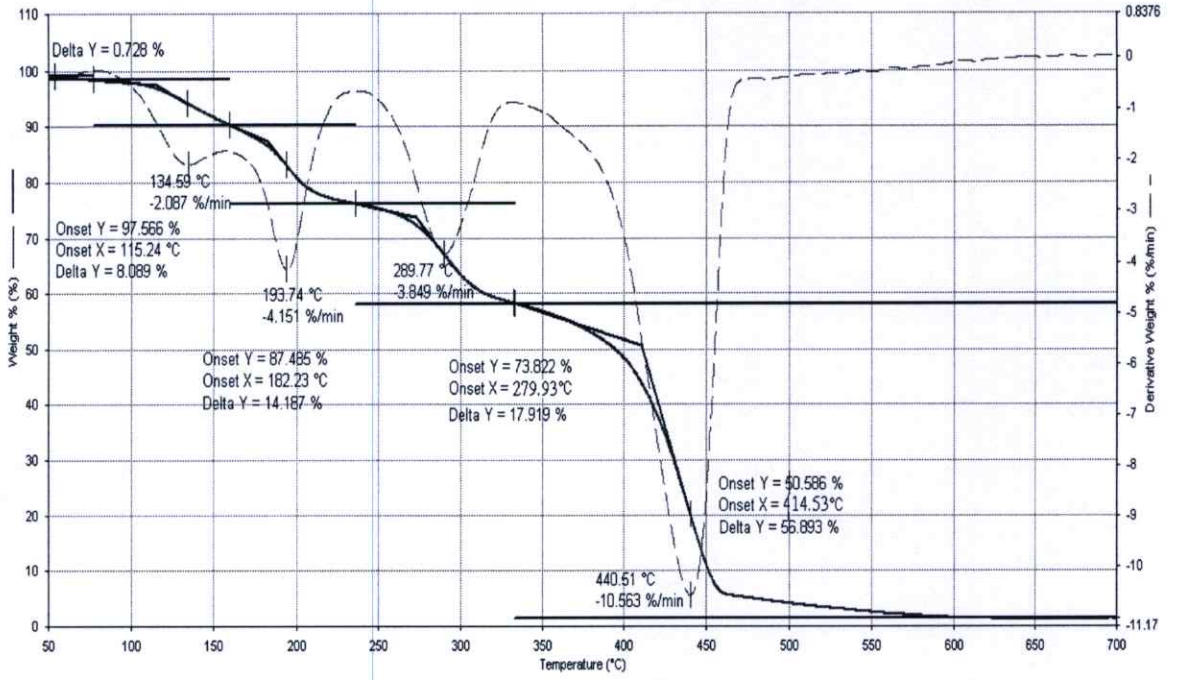
รูปที่ ค.10 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเขลาดิน 10%



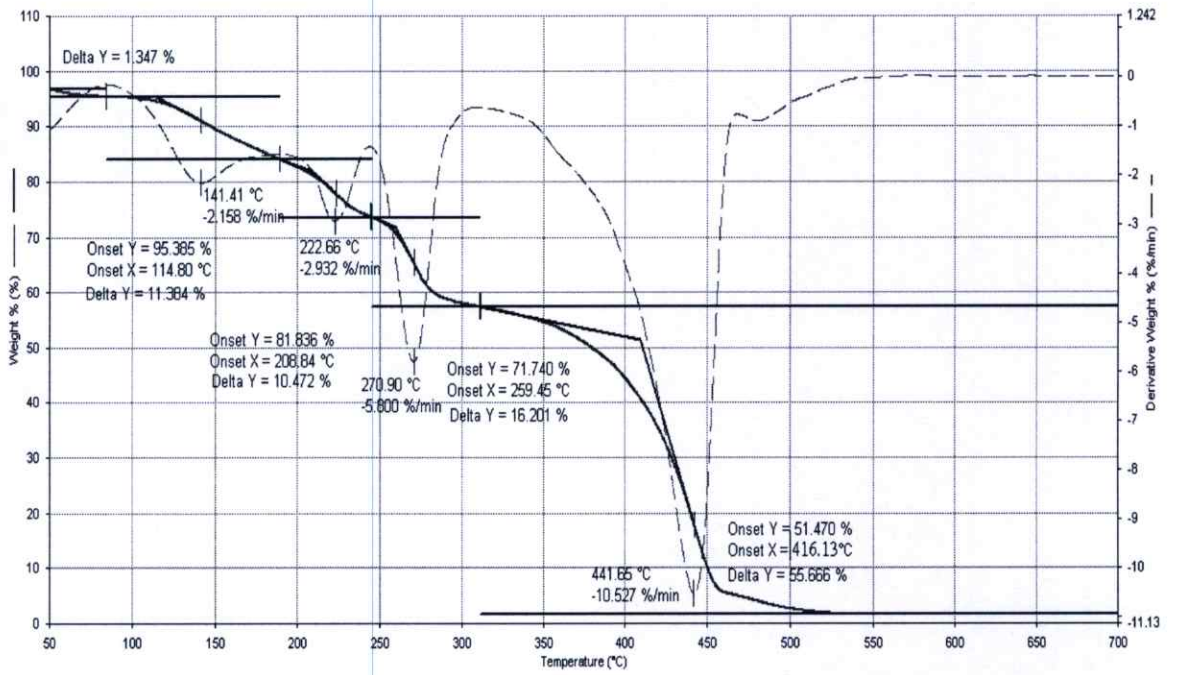
รูปที่ ค.11 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเพคติน 2%



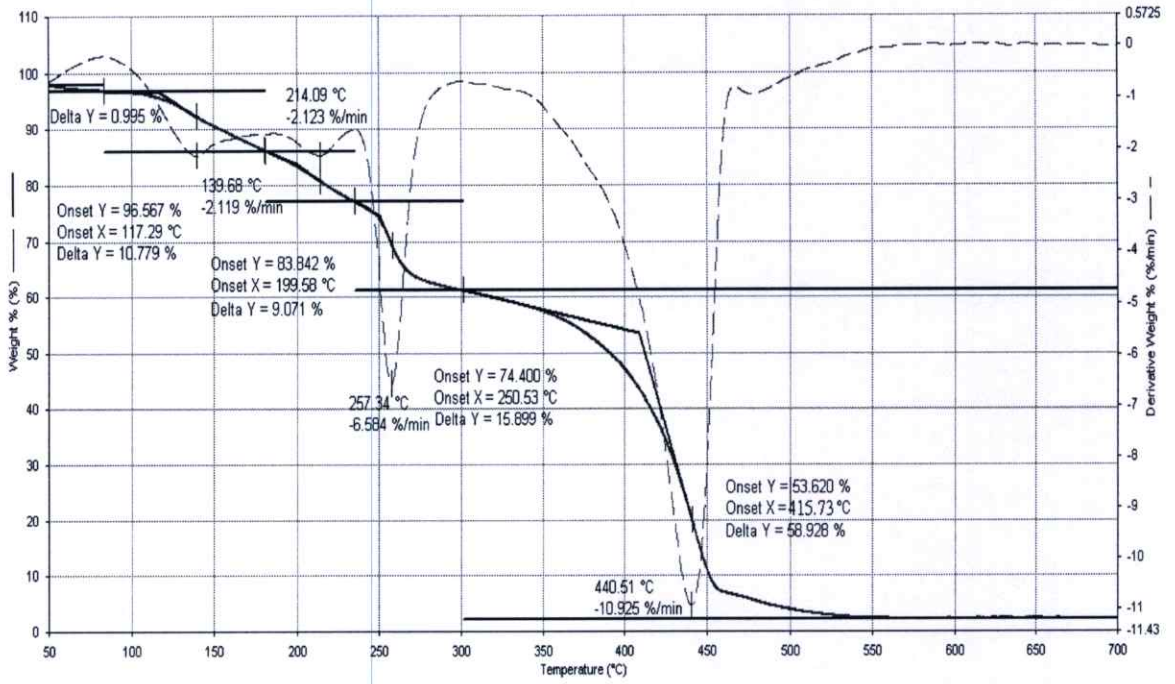
รูปที่ ค.12 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเพคติน 6%



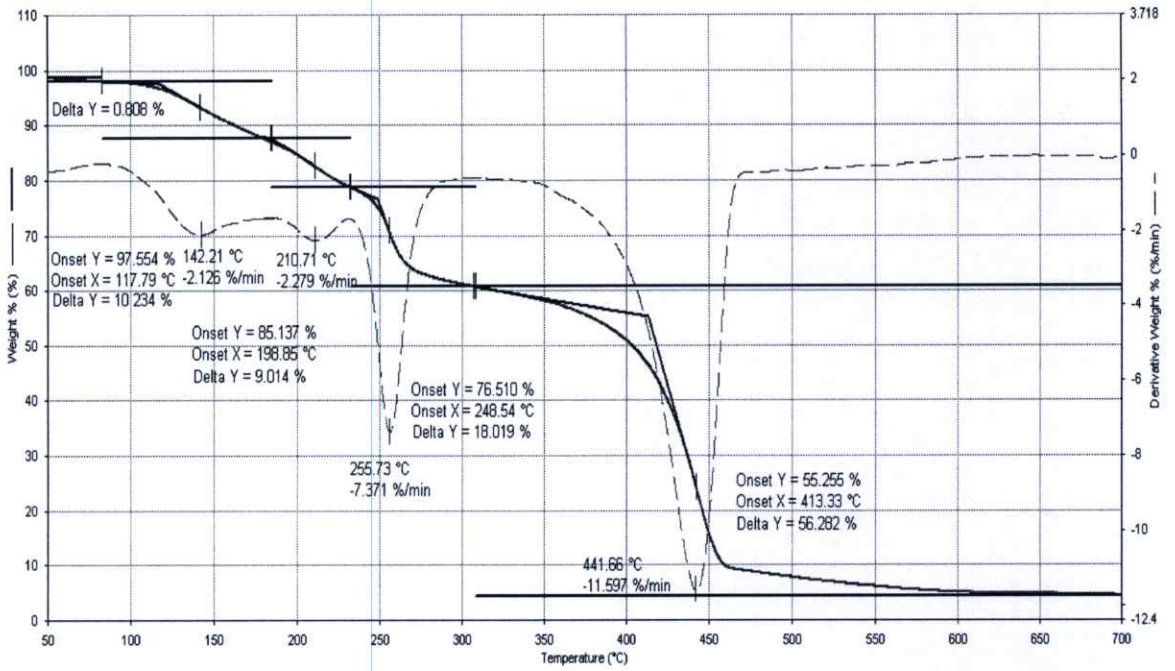
รูปที่ ค.13 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมเพกติน 10%



รูปที่ ค.14 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมคาร์ราจีแนน 2%

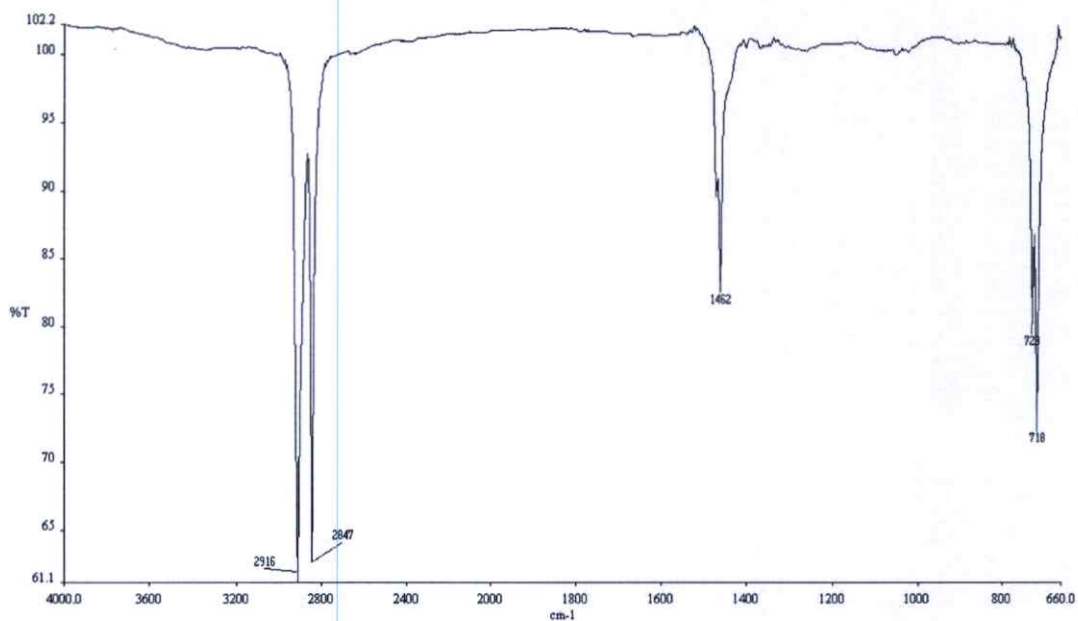


รูปที่ ค.15 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมคาร์บอราจีแนน 6%

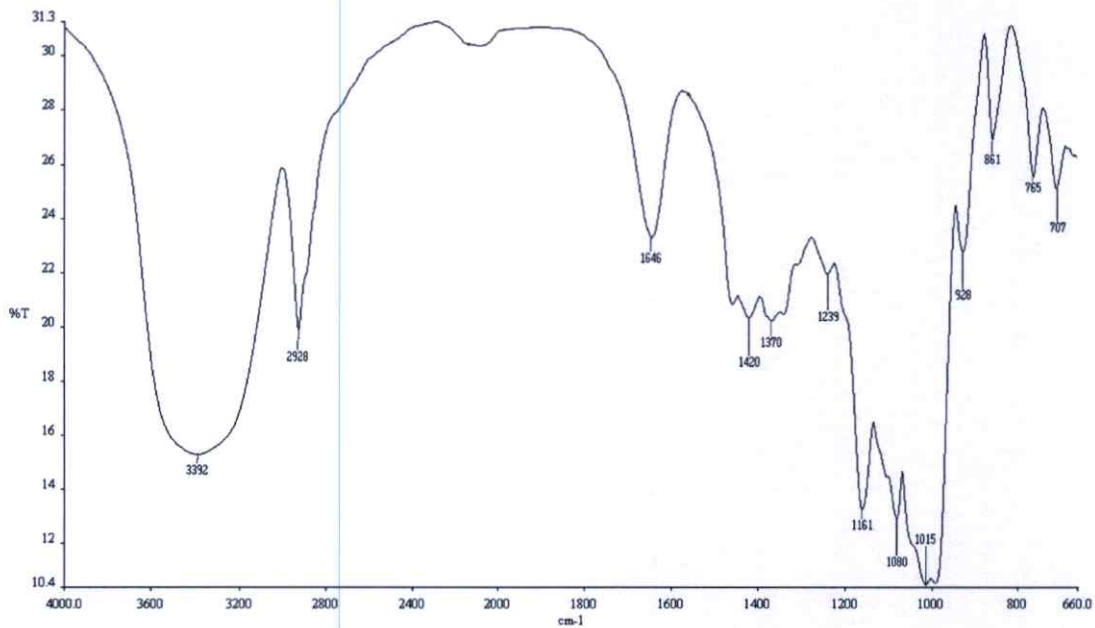


รูปที่ ค.16 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมคาร์บอราจีแนน 10%

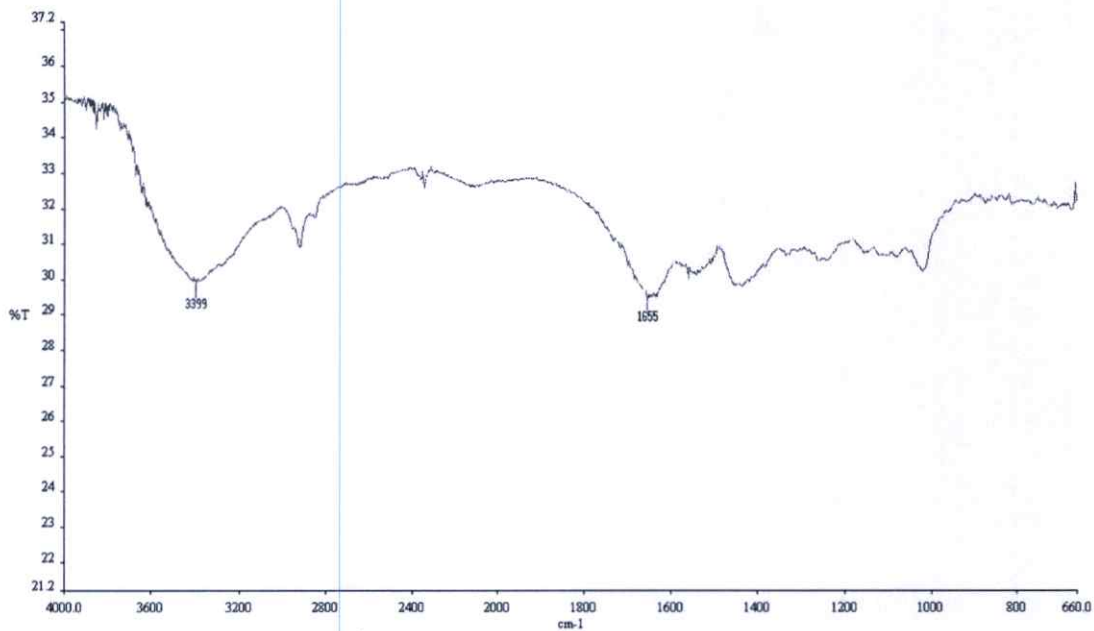
ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน



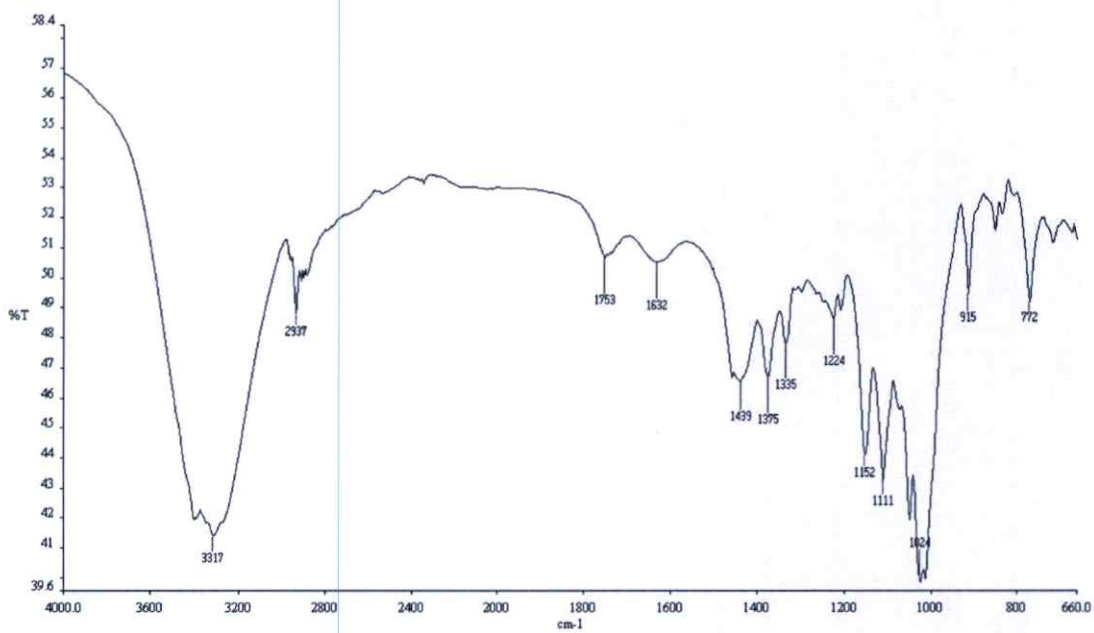
รูปที่ ง.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



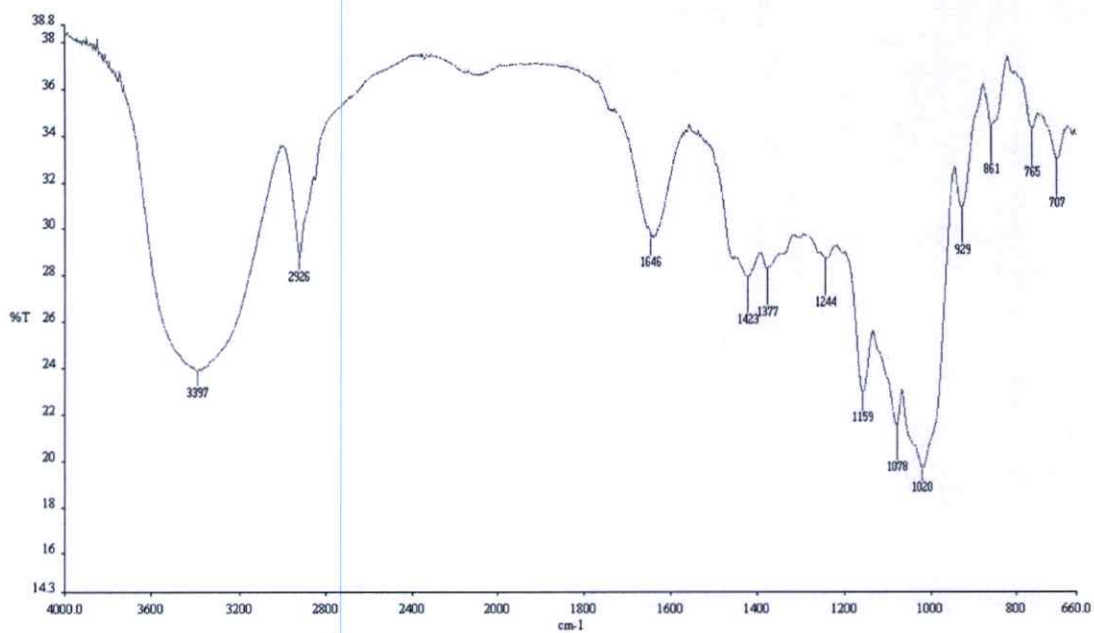
รูปที่ ง.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งถั่วเขียว



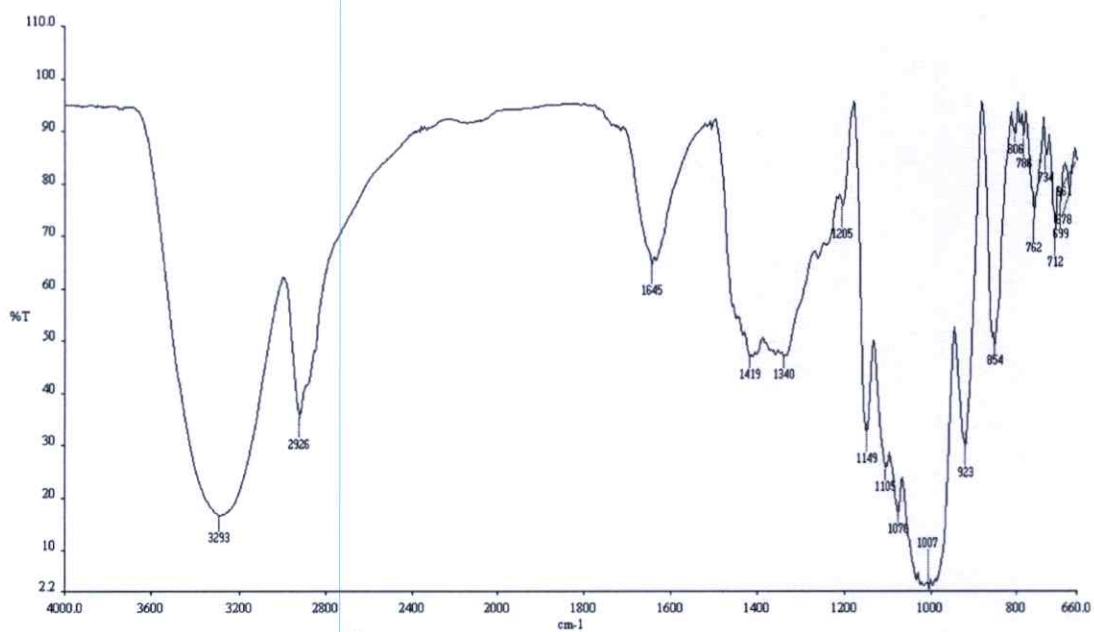
รูปที่ ง.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของเจลาติน



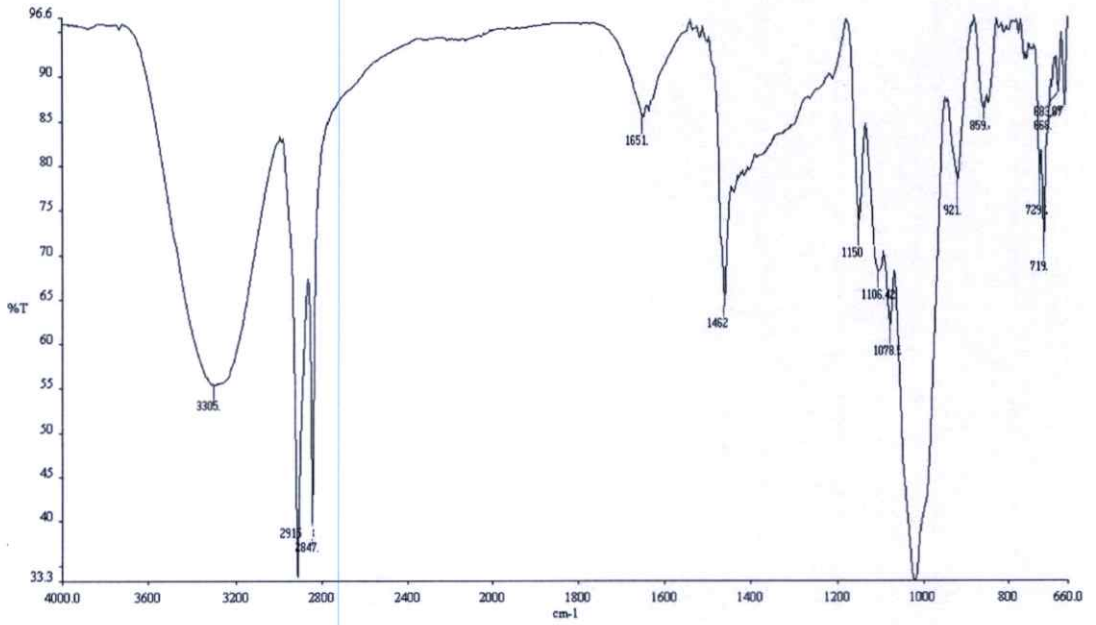
รูปที่ ง.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของเพกติน



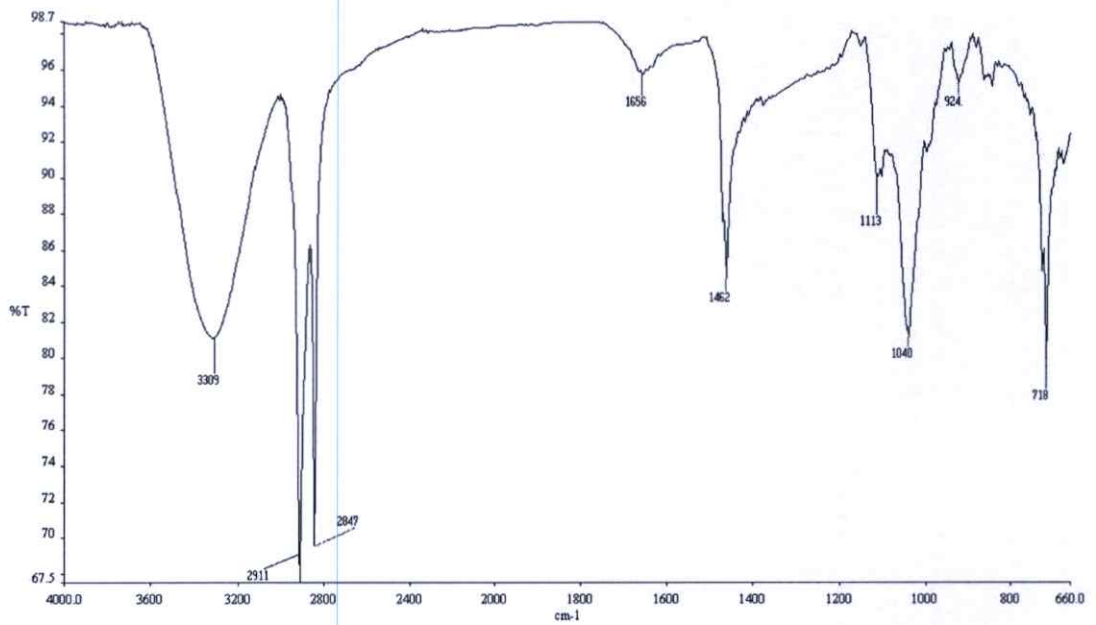
รูปที่ ๕.๕ อินฟราเรดสเปกตรัมของคาร์ราจีแนน



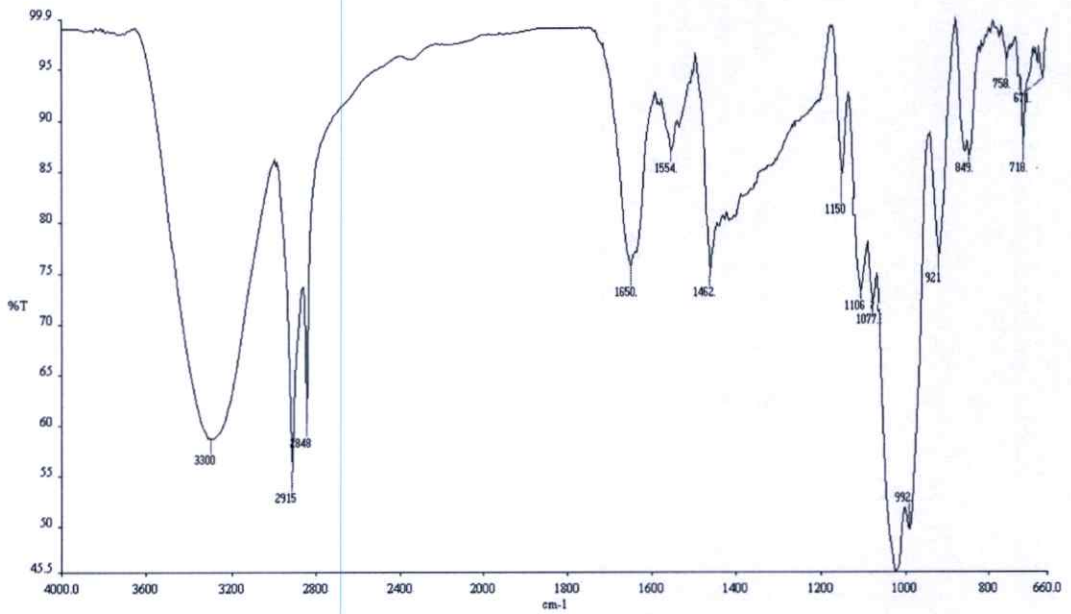
รูปที่ ๕.๖ อินฟราเรดสเปกตรัมของ TPMSB



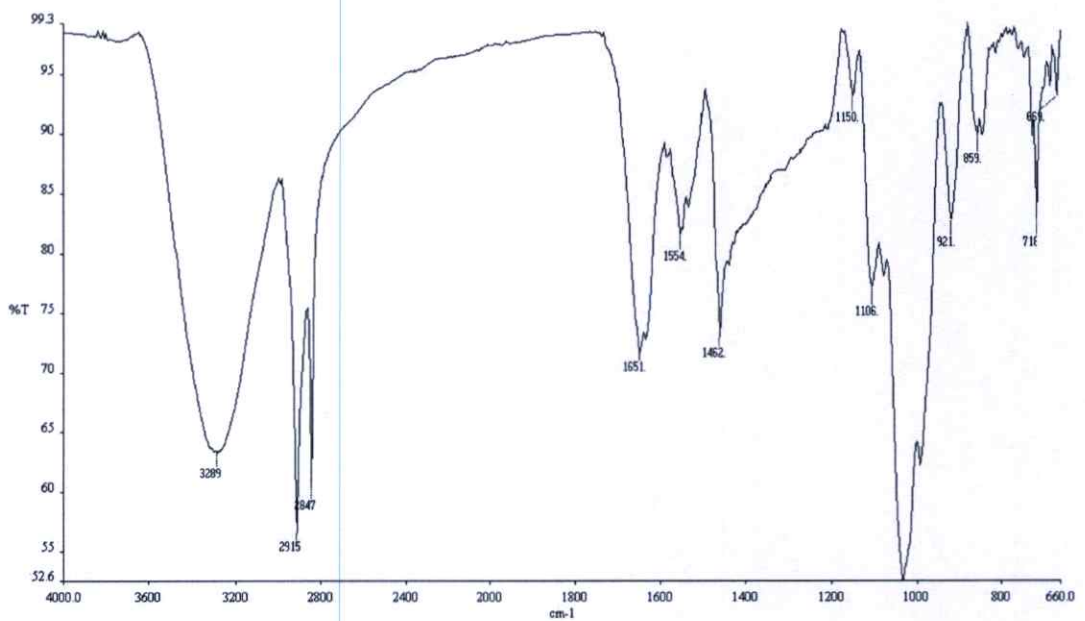
รูปที่ ๗.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMSB



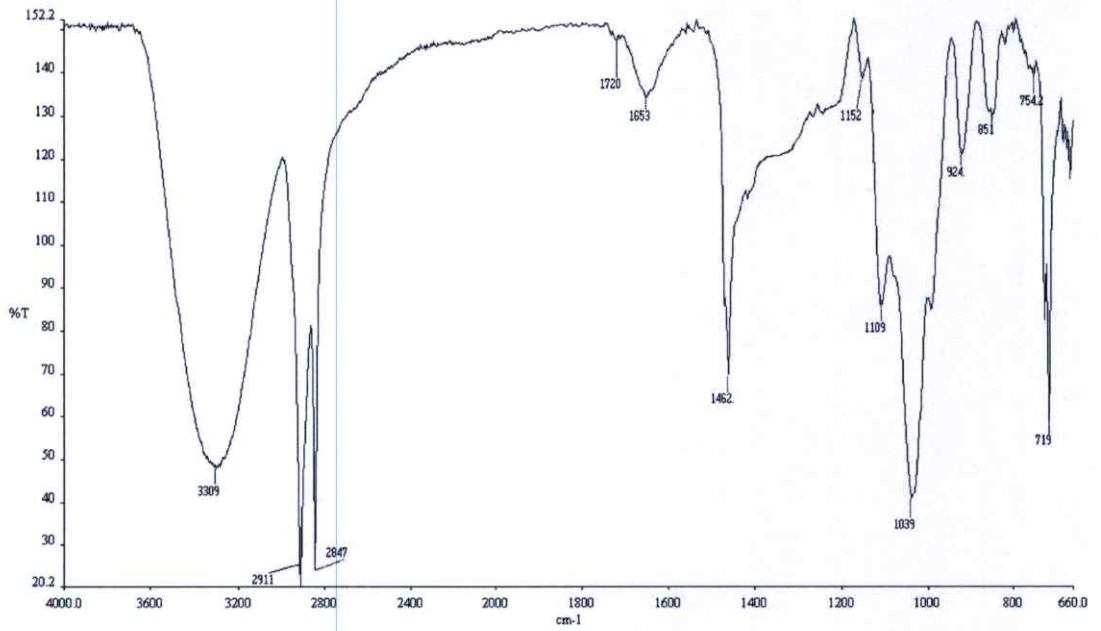
รูปที่ ๗.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMSB ที่เติมเจลาติน 2 %



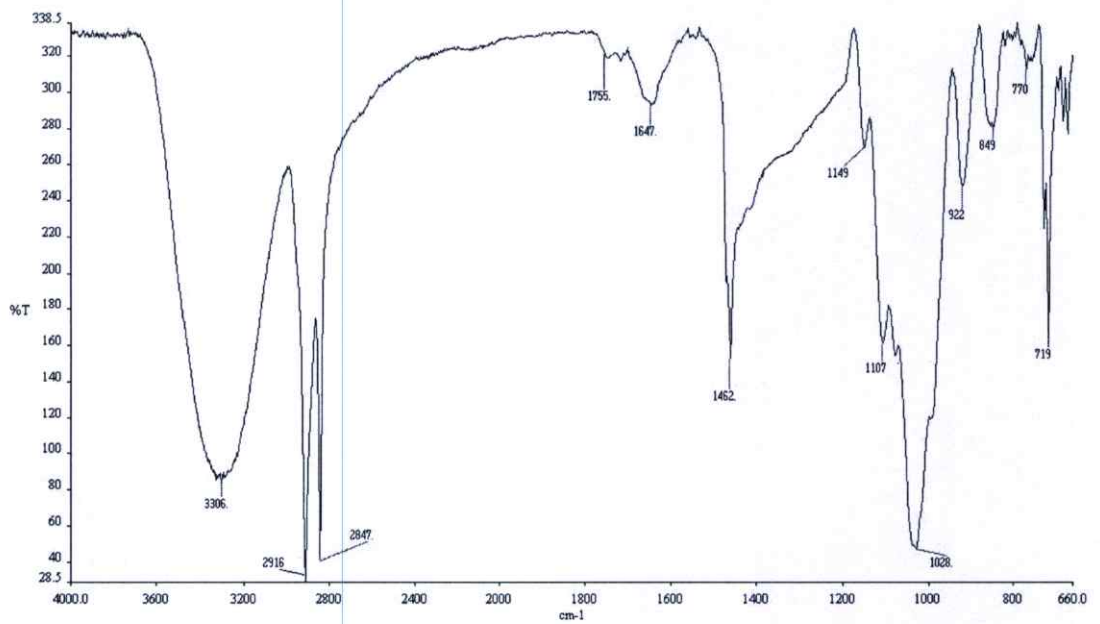
รูปที่ ๙.๑ อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่เติมเจลาติน 6 %



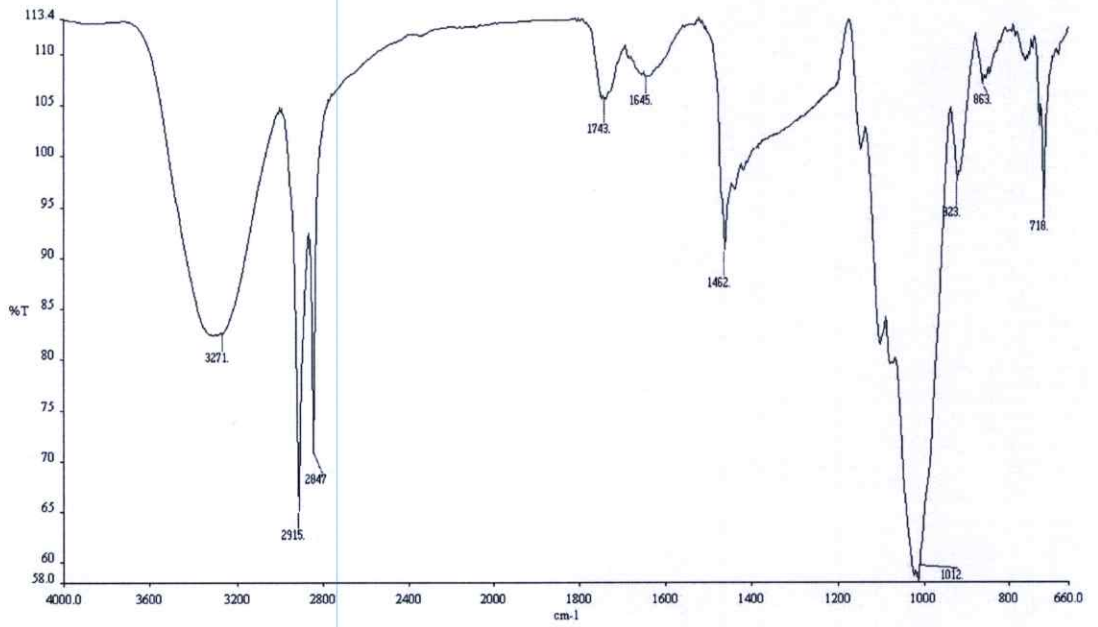
รูปที่ ๙.๑๐ อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่เติมเจลาติน 10 %



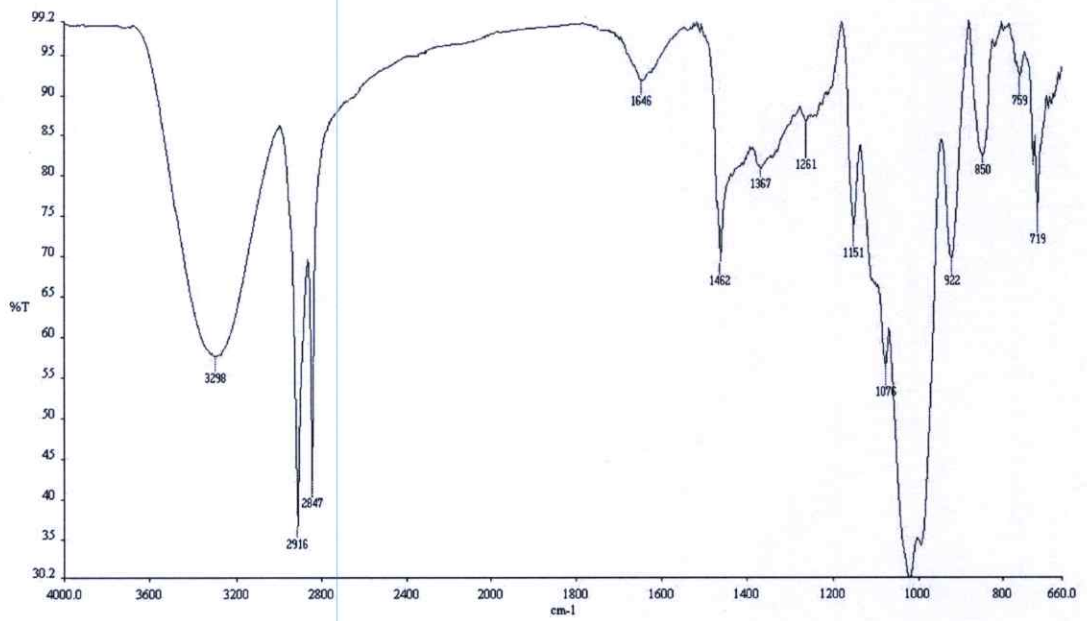
รูปที่ ง.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBMS ที่เติมเพคติน 2 %



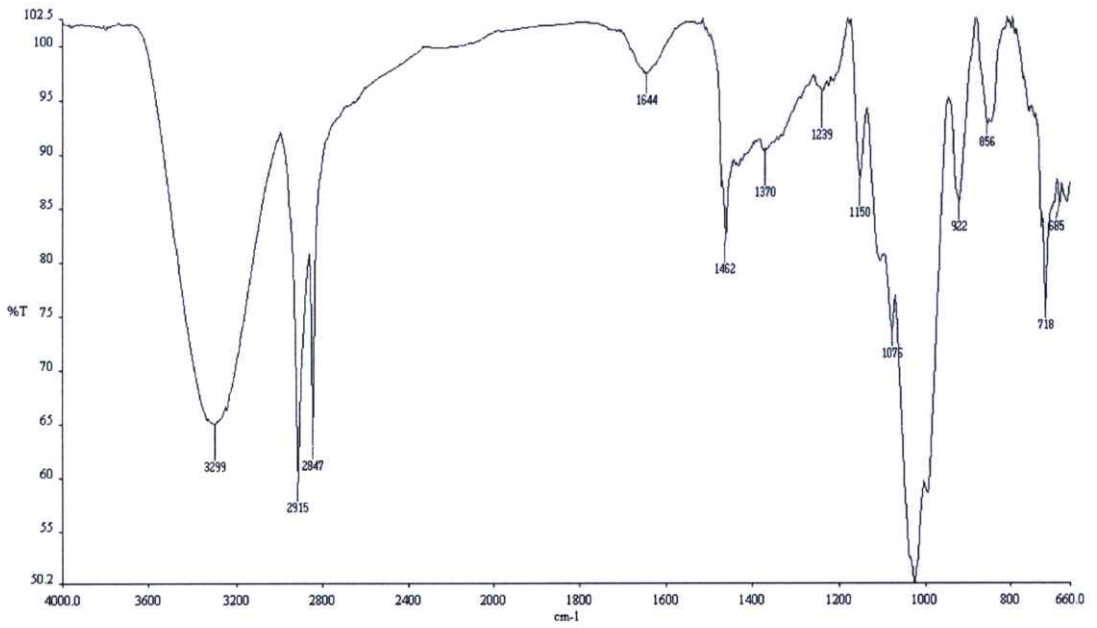
รูปที่ ง.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBMS ที่เติมเพคติน 6 %



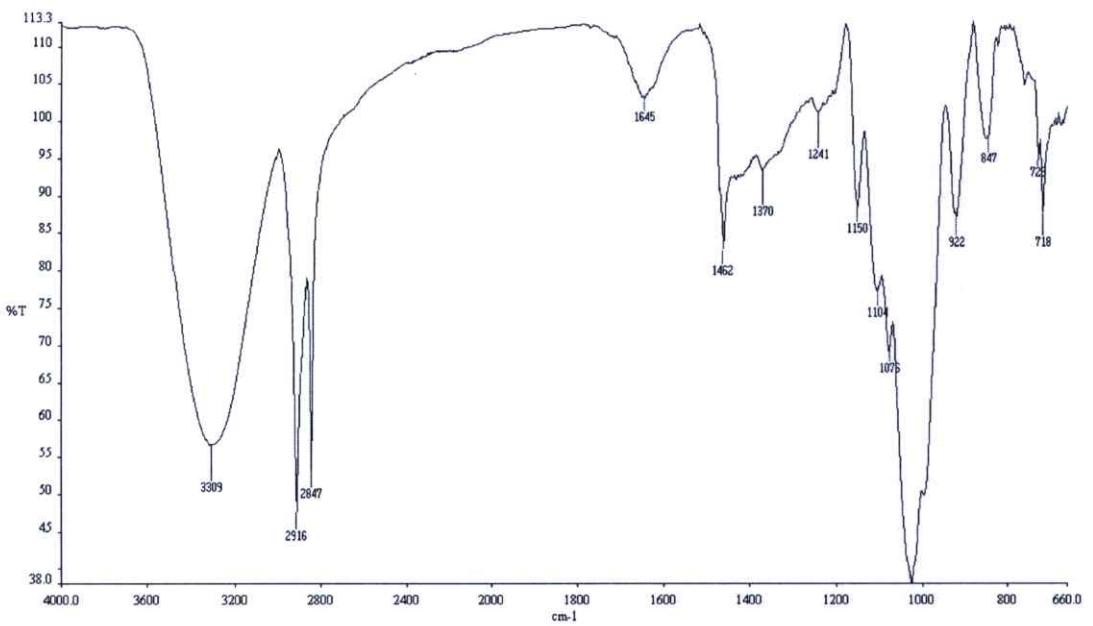
รูปที่ ง.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเพคติน 10 %



รูปที่ ง.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมคาร์บอซีเลต 2 %



รูปที่ ง.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมการางีแนน 6 %



รูปที่ ง.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมการางีแนน 10 %

ภาคผนวก จ

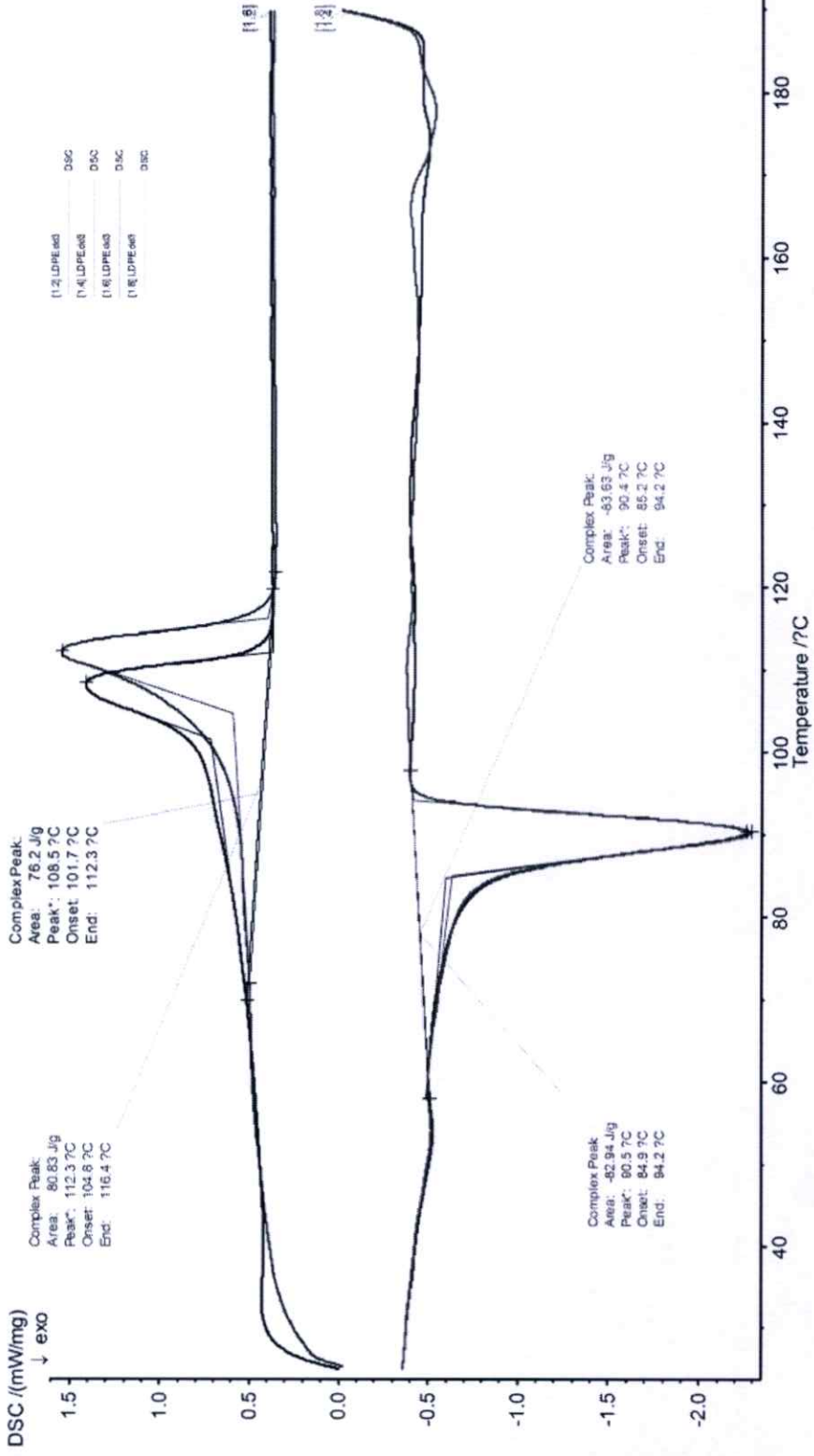
การย่อยสลายของพอลิเมอร์ระหว่าง LDPE และ TPMBS

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (%)															
	วันที่ 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
LDPE/TPMBS blend	0.00	4.73	7.32	9.88	11.87	11.24	11.67	11.98	10.34	9.42	8.36	8.12	8.34	7.92	7.78	6.52
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 2%	0.00	5.98	8.41	11.97	12.34	12.43	11.67	11.55	10.97	9.89	9.02	8.56	8.23	7.68	7.25	6.43
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 6%	0.00	6.34	8.01	9.36	11.90	12.02	12.56	12.87	11.12	9.27	8.21	7.26	7.21	6.93	6.69	5.67
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	0.00	6.42	8.34	10.47	12.72	12.76	12.98	13.63	11.96	10.52	8.43	6.98	7.12	6.58	6.37	5.21
LDPE/TPMBS blend + Pectin 2%	0.00	6.54	8.21	10.56	11.78	12.16	12.48	12.56	10.43	9.72	8.14	7.21	7.07	6.98	7.91	5.59
LDPE/TPMBS blend + Pectin 6%	0.00	4.34	6.96	8.72	9.61	12.03	11.34	11.92	12.05	10.08	8.39	7.65	7.38	6.83	6.49	5.76
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	0.00	4.98	6.24	7.41	10.38	12.56	12.43	11.99	11.45	9.65	8.72	7.27	6.99	6.12	6.44	4.91
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 2%	0.00	8.49	11.38	12.56	11.87	12.98	12.41	11.77	10.92	10.15	9.12	7.89	7.28	6.49	6.34	6.78
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 6%	0.00	4.34	6.96	8.72	9.61	12.48	11.67	9.92	10.54	9.65	8.34	7.21	6.33	5.94	5.57	2.96
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	0.00	4.21	5.43	7.98	9.66	12.34	11.22	9.34	8.98	7.81	6.01	6.55	5.79	4.69	4.62	2.54

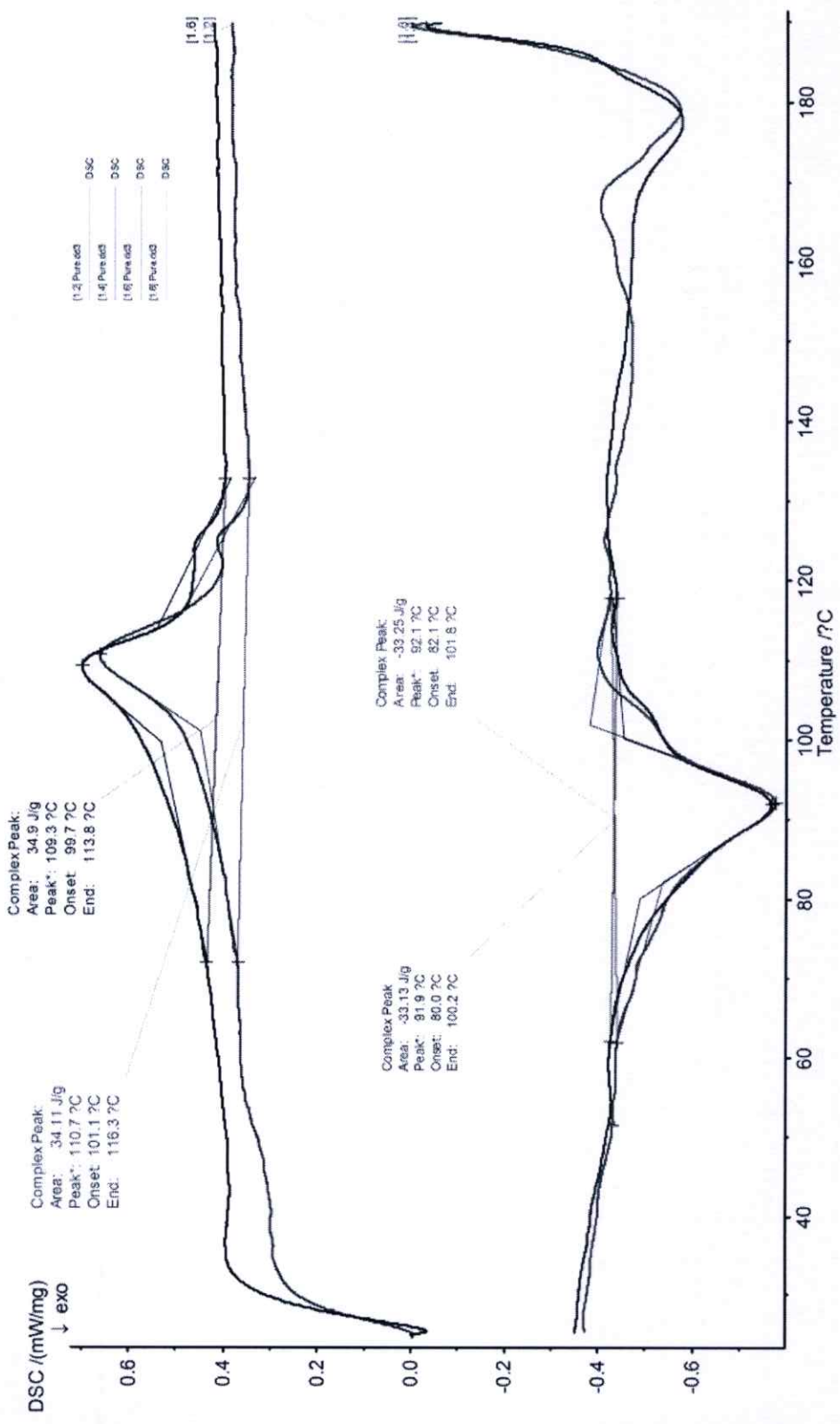
ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (%)															
	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
LDPE/TPMBS blend	4.19	3.89	2.79	1.05	-0.54	-1.23	-2.45	-4.12	-5.67	-6.89	-8.76	-10.23	-11.55	-12.02	-12.15	-13.26
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 2%	4.47	3.82	2.14	1.34	0.98	-1.32	-2.67	-4.79	-5.15	-7.21	-9.56	-10.97	-12.01	-12.34	-12.68	-13.97
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 6%	3.99	2.56	0.64	0.26	-0.34	-1.12	-1.98	-5.57	-6.91	-8.27	-10.48	-11.48	-11.92	-12.45	-12.79	-14.62
LDPE/TPMBS blend + Gelatin 10%	2.59	1.68	1.02	0.98	0.49	-1.53	-3.49	-6.07	-7.26	-9.43	-10.09	-10.97	-11.22	-11.98	-13.11	-14.95
LDPE/TPMBS blend + Pectin 2%	4.57	3.24	2.97	1.45	-0.62	-2.01	-3.17	-4.46	-6.05	-6.98	-8.39	-10.44	-11.39	-12.34	-13.36	-14.32
LDPE/TPMBS blend + Pectin 6%	4.65	3.79	3.09	2.48	0.11	-3.02	-3.43	-5.12	-6.44	-7.27	-8.92	-11.59	-12.01	-12.26	-13.89	-14.79
LDPE/TPMBS blend + Pectin 10%	4.18	3.45	3.12	2.16	-0.91	-3.55	-3.98	-5.67	-7.02	-7.98	-9.82	-12.47	-13.19	-13.56	-14.55	-15.32
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 2%	5.32	4.52	3.65	1.98	0.44	-2.34	-3.54	-5.13	-6.32	-7.11	-8.45	-10.12	-11.62	-12.23	-13.15	-14.29
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 6%	0.18	-0.11	-1.09	-1.58	-2.12	-3.38	-4.98	-6.17	-7.95	-8.55	-9.47	-12.58	-12.93	-13.67	-13.78	-14.99
LDPE/TPMBS blend + Carrageenan 10%	0.12	-1.26	-2.11	-2.44	-2.67	-3.62	-4.79	-5.52	-6.54	-7.93	-11.39	-13.43	-13.79	-14.16	-14.26	-15.23

ภาคผนวก จ

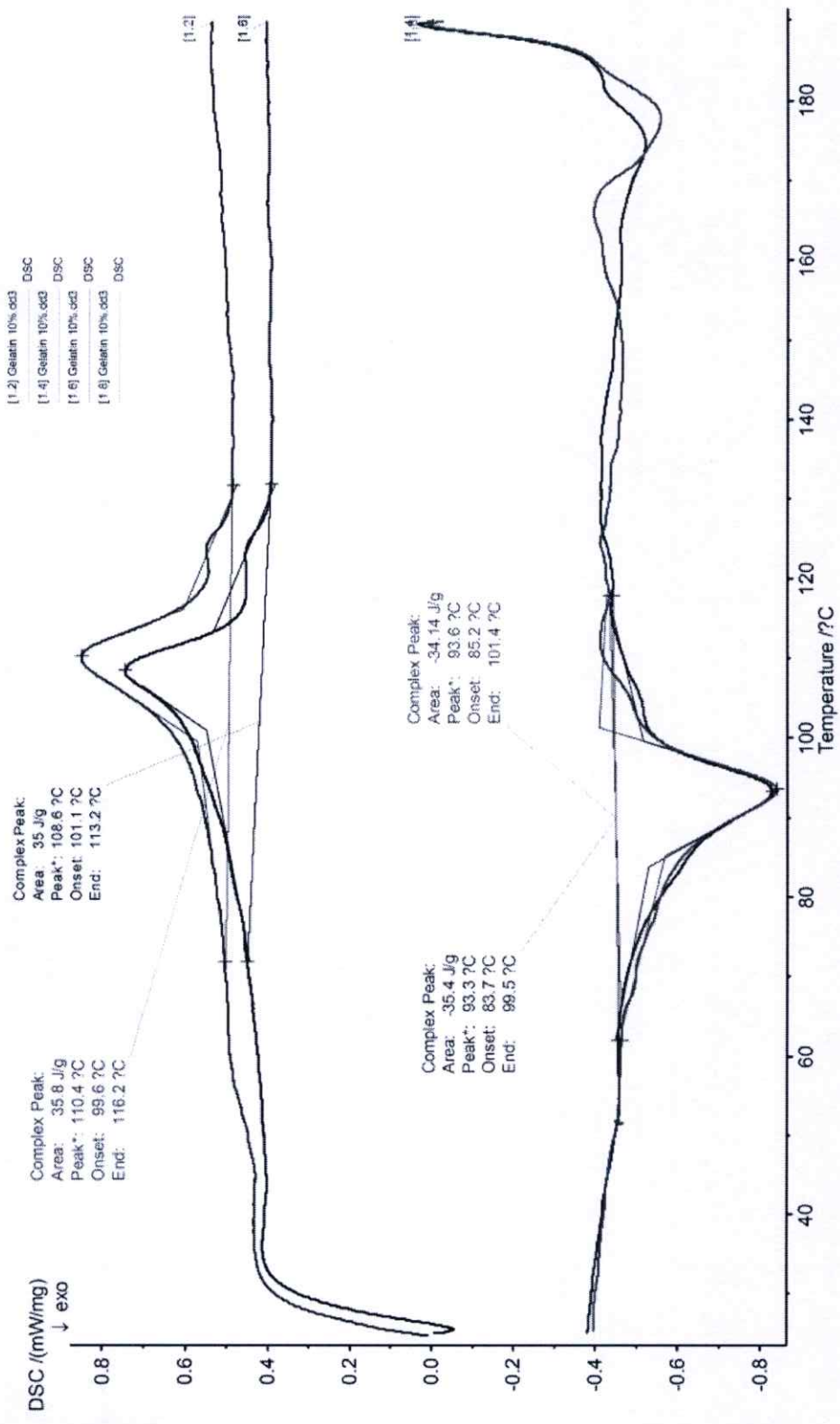
การทดสอบสมบัติทางความร้อน



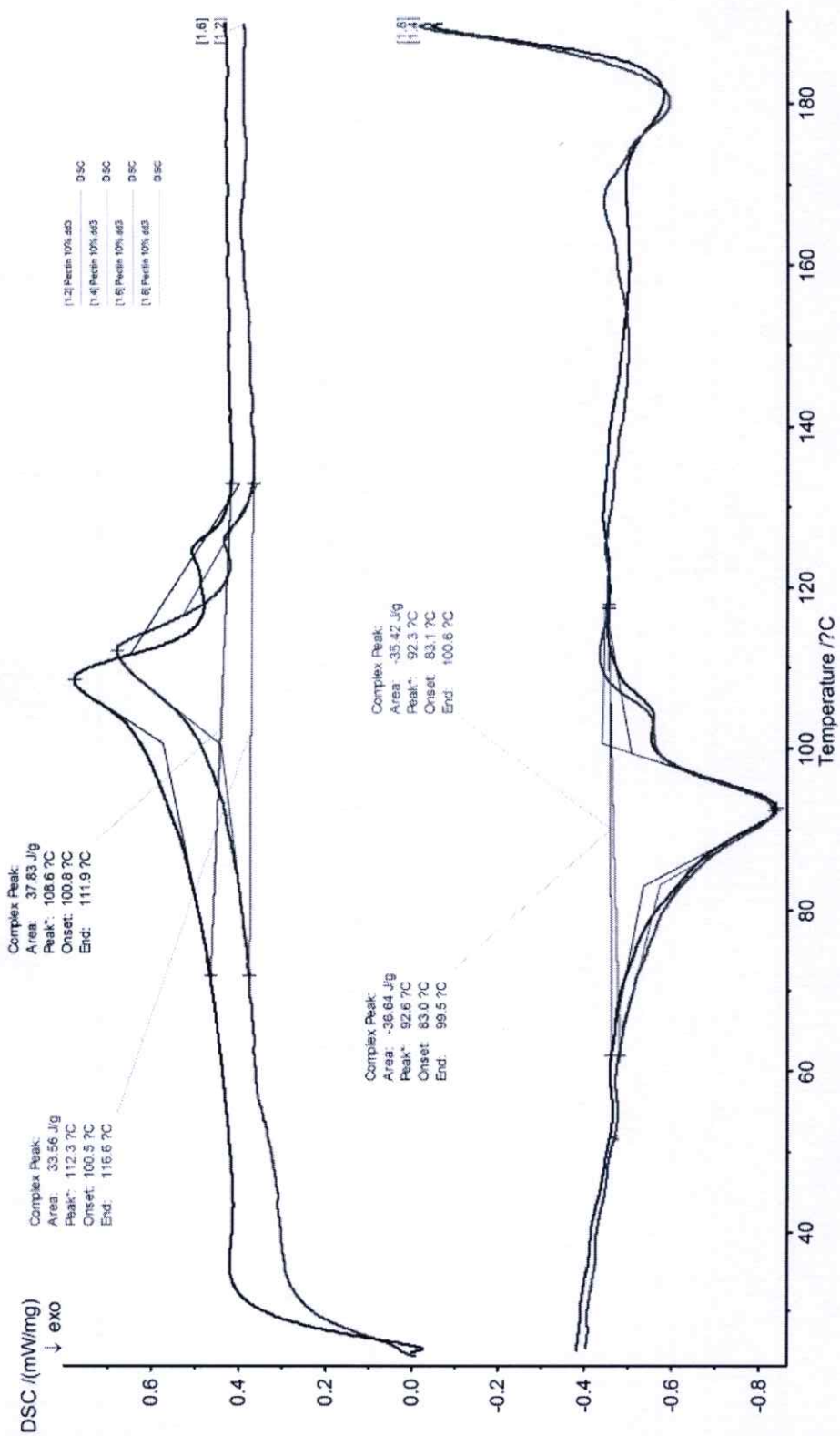
รูปที่ จ.1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



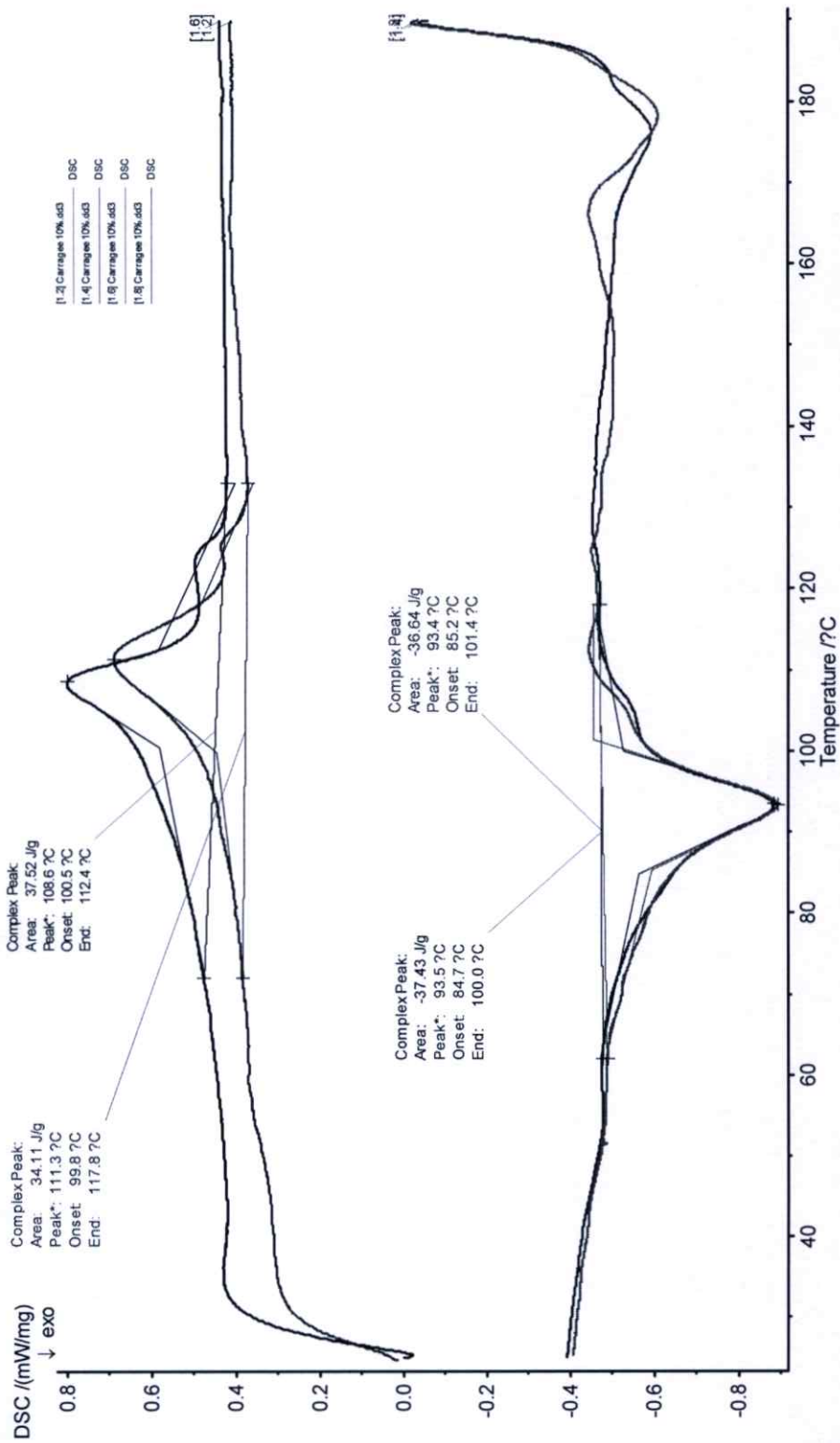
รูปที่ จ.2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs



รูปที่ ๑.3 DSC เทอร์โมแกรมของลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMS ที่เติมเจลาติน 10%



รูปที่ ๑.4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS ที่เติมเพคติน 10%



รูปที่ จ.5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBs ที่เติมคาร์บอน 10%

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity)

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

เมื่อ ΔH_f = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนตัวอย่าง (J/g)
 ΔH_f^0 = เอนทาลปีของการหลอมเหลวพอลิเอทิลีนที่มีความเป็นผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 293 J/g

ตัวอย่างการคำนวณ

- สูตร LDPE/TPMBS blend
 - น้ำหนักพอลิเมอร์ (PE) ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม เท่ากับ 50 g
 - น้ำหนักสารทั้งหมด เท่ากับ 102.5 g
 - ΔH_f ที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟ เท่ากับ 34.9 J/g

$$\begin{aligned} \% \text{ Crystallinity} &= \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \times \frac{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด (g)}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ (PE) ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม (g)}} \\ &= \frac{34.9}{293} \times 100 \times \frac{102.5}{50} \\ &= 24.4 \end{aligned}$$

ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LDPE ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง LDPE และ TPMBS มีค่าเท่ากับ 24.4%