

รายงานการวิจัย

ผลของแคปไคราจีแนนที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม
พอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

Effect of K-carrageenan on properties of
polyethylene/thermoplastic starch film

ชื่อผู้วิจัย

รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณรายได้

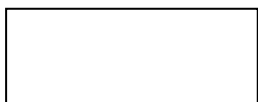
ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2554 ของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมถึงสิ่งอำนวยความสะดวกในเรื่องสถานที่การทำวิจัย การใช้อุปกรณ์ และ เครื่องมือในการวิจัย ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการวิจัย ต้องขอขอบพระคุณนักวิจัย คุณพัฒนา บัวดี และเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาเคมีที่ได้มีส่วนในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ เป็นอย่างดียิ่งตลอดช่วงเวลาของการดำเนินการวิจัย



ชื่อโครงการ ผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

Effect of K-carrageenan on properties of polyethylene/thermoplastic starch film

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และ ผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุหน่วยงานต้นสังกัด และ อีเมลล์

1. หัวหน้าโครงการ ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย
- ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์
- ภาควิชา เคมี
- มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- กระทรวง กระทรวงศึกษาธิการ
- อีเมลล์ kwosomsa@hotmail.com

คำสำคัญ (Keywords)

K-carrageenan , polyethylene/thermoplastic starch film

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาผลและหาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่ช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสามารถเป่าขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์ โดยทำการผสมพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลจากการทดลองพบว่าปริมาณแคลปาคาราจีแนนเหมาะสมที่ช่วยทำให้การเป่าขึ้นรูปสมบูรณ์ คือ 7 phr โดยให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุด เท่ากับ 7.71 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เท่ากับ 238 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรที่เติมแคลปาคาราจีแนน 3,5 และ 9 phr ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก และจากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาพบว่าแคลปาคาราจีแนนไม่เข้ากันกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แต่สามารถกระจายตัวได้ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่วนที่ 2 นำสูตรผสมที่ดีที่สุดจาก

ส่วนที่ 1 มาปรับปรุงให้ส่วนที่เป็นแคลปาคาราจีแนนที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสมมีสมบัติความเป็นความเป็นพลาสติกมากขึ้นโดยผสมกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ พบว่าปริมาณกลีเซอรอลที่เหมาะสมในแคลปาคาราจีแนนที่ช่วยทำให้พอลิเมอร์ในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบ

เกลียวหนอนคู่มีความเหนียวมากขึ้นและสามารถตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดอัตโนมัติได้ อยู่ที่ 30 % ของปริมาณแคลปาคาราจีแนน เพราะให้สมบัติเชิงกลที่ดี และส่วนที่ 3 นำสูตรผสมที่ดีที่สุดจากส่วนที่ 2 มาปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 70 °C และฉายแสงยูวี จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติกเพิ่มมากขึ้นมีแนวโน้มทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากสมบัติเชิงกลที่ลดลง ปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) ที่เหมาะสมคือ 3 phr ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับดัชนีการบดอัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นหลักฐานที่ยืนยันว่าฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปาคาราจีแนน ที่เติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์) สามารถเกิดการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสงได้จริง

ABSTRACT

This research was studied the effect of **K-Carrageenan** on the properties of LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch film. There were three parts. The first part was studied the effect and appropriate amount of **K-Carrageenan** for enhancing the polymer blend into film perfectly, by mixing the polymer blend with twin-screw extruder and then formed film by blown-film process. The mechanical properties were tested. The results were revealed that appropriate amount of **K-Carrageenan** added into polymer blend for well-formed blown film was 7 phr which dominate the highest tensile strength and percentage of elongation at break of 7.71 MPa and 238 , respectively when compared with polymer blend formula when added **K-Carrageenan** 3, 5 and 9 phr. The mechanical properties were corresponded to percentage of crystallinity. When morphology was studied , it was shown that was **K-Carrageenan** incompatible with LDPE/LLDPE/ Thermoplastic starch but **K-Carrageenan** could be distributed into LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch. The second part was improved the optimum formula of first part of **K-Carrageenan** in polymer blend by varied amount of glycerol for enhancing the polymer blend. It was found that the glycerol was supported to processability of **K-Carrageenan** with

twin-screw extruder and could be easily pelletized with cutting machine. The optimal amount of glycerol was 30% of **K-Carrageenan** because the mechanical properties was dominated. Finally,

the third part , the optimum formula for the second part was improved to degradability by using accelerating P-life with operating temperature of 70 °C and UV light. The results was revealed that the mechanical properties were decreased as the amount of P-life was increased. The optimum amount of P-life was 3 phr. In addition , carbonyl index was increased and supported the degradability evidence of polymer blend between LDPE/LLDPE/Thermoplastic starch/K-Carrageenan. This confirmed that the accelerating P-life could be accelerated degradation by thermal and UV light.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้.....	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลาย.....	4
2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางแสง.....	7
2.1.2.1 เสถียรภาพทางแสงอัลตราไวโอเลตของพอลิเมอร์.....	8
2.1.2.2 กระบวนการกายภาพทางแสง.....	10
2.1.2.3 กระบวนการทางเคมีของแสง.....	12
2.1.3 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	18
2.1.3.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	18
2.1.3.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	21
2.2 แป้ง.....	23
2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	23
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	23
2.2.3 แป้งมันสำปะหลัง.....	23
2.2.3.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง.....	24
2.2.3.2 การย่อยสลายของแป้ง.....	25
2.3 การจีแน.....	27

สารบัญ (ต่อ)

2.4 พอลิเมอร์ผสม.....	31
2.4.1 การแบ่งชนิดพอลิเมอร์ผสม.....	31
2.4.2 ความสามารถในการเข้ากันได้.....	32
2.5 พอลิเอทิลีนกราฟท์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	33
2.6 พลาสติกไฮเซอร.....	34
2.6.1 พลาสติกไฮเซชันและพลาสติกไฮเซอร.....	34
2.7 พอลิเอทิลีน.....	35
2.7.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	35
2.7.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	37
2.8 สารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก.....	38
2.9 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูปที่ใช้ในงานวิจัย	39
2.9.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	39
2.9.2 กระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม.....	40
2.9.2.1 หลักการของฟิล์มเป่า.....	41
2.9.2.2 สมบัติของฟิล์มเป่า.....	42
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	49
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	55
3.3.1 การศึกษาปริมาณแคลปการจีแนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่างสมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปการจีแนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....	55
3.3.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปการจีแนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปการจีแน	58
3.3.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปการจีแน ด้วยการเติมสารเร่งเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีไลฟ์)..	62

สารบัญ (ต่อ)

3.4 วิธีการทดสอบ.....	63
3.4.1 การวัดดัชนีการหักเห.....	63
3.4.2 การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด.....	63
3.4.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์ม.....	63
3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	64
3.4.4.1 เทคนิค Differential Scanning Calorimetry.....	64
3.4.4.2 เทคนิค Thermogravimetric Analysis.....	64
3.4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	64
3.4.5.1 การทดสอบแรงดึง.....	64
3.4.6 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	65
3.4.6.1 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม.....	65
3.4.6.2 ปริมาณการดูดซับน้ำ.....	65
3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายได้ของฟิล์ม	66
3.4.7.1 การทดสอบการย่อยสลายทางความร้อนและทางแสง.....	66
3.4.7.2 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน.....	66
3.4.8 การทดสอบโดยใช้สารละลายไอโอดีน.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	68
4.1 การศึกษาปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่เหมาะสมที่สามารถเป่าขึ้นรูปฟิล์มได้อย่าง สมบูรณ์และศึกษาผลของแคลปาคาราจีแนนที่มีต่อฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนา แน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์...	68
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	69
4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	73
4.1.2.1 Optical Microscope.....	73
4.1.2.2 Scanning electron microscope.....	75
4.1.3 สมบัติเชิงกล.....	79
4.1.4 สมบัติทางความร้อน.....	82

สารบัญ (ต่อ)

4.1.4.1 Differential scanning calorimetry	82
4.1.4.2 Thermogravimetric analysis	84
4.1.5 การศึกษาการดูดซับน้ำ.....	86
4.1.6 สมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน.....	87
4.2 ศึกษาปริมาณและผลของกลีเซอรอลที่มีต่อแคลปการาจีแนในฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/ แคลปการาจีแน.....	93
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	94
4.2.2 สมบัติทางความร้อน.....	97
4.2.3. สมบัติทางกล.....	102
4.3 ปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/แคลปการา จีแนด้วยการเติมสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติก(ฟีโลฟ).....	106
4.3.1 สมบัติทางกายภาพ.....	107
4.3.1.1 หลั่งเอจิงที่อุณหภูมิ 70 °C	107
4.3.1.2 หลั่งน่ายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน.....	108
4.3.2 สมบัติเชิงกล.....	110
4.3.2.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนที่จะนำไปทดสอบการย่อย สลายทางความร้อนและทางแสง.....	110
4.3.2.2 การย่อยสลายทางความร้อนโดยการเอจิง.....	112
4.3.3 การหาดัชนีคาร์บอนิล	122
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	131
เอกสารอ้างอิง.....	133
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	138
ภาคผนวก ข การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	144
ภาคผนวก ค การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก.....	152
ภาคผนวก ง การศึกษาสมบัติทางกายภาพ.....	153

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก จ การศึกษาสมบัติการย่อยสลายทางความร้อน.....	154
ภาคผนวก ฉ การทดสอบโดยสารละลายไอโอดีน.....	157
ภาคผนวก ช กระบวนการผสมและการเป่าขึ้นรูป.....	159
ภาคผนวก ซ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	161

สารบัญตาราง

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

สารบัญตาราง(ต่อ)

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

สารบัญรูป

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

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 แผนผังขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและการเป่าขึ้นรูปฟิล์มบางที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพพลาสติกต่างกัน.....	63
3.5 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าแรงดึง.....	65
3.6 การเตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน.....	66
3.7 การทดสอบชิ้นงานด้วยสารละลายไอโอดีน.....	67
4.1 แสดงการกระจายตัวของแคลปการาจีแนในฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ในสูตรต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 200 เท่า: (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5 (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	74
4.2 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของแป้งสตาซ์ : (ก) แป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) แคลปการาจีแน ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	75
4.3 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ (PE/TPS) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	75
4.4 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีการผสมแคลปการาจีแนปริมาณ 3 phr (PE/TPS/K3) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	76
4.5 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีการผสมแคลปการาจีแนปริมาณ 5 phr (PE/TPS/K5) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	76
4.6 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาซ์ ที่มีการผสมแคลปการาจีแนปริมาณ 7 phr (PE/TPS/K7) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาคตัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 SEM แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนน ปริมาณ 9 phr (PE/TPS/K9) : (ก) พื้นผิว ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ข) ภาควัดขวาง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	77
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	81
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนนในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	81
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการผสมแคลปาคาราจีแนนในปริมาณต่างๆทั้งในแนวตามเครื่องจักร(MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	82
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับน้ำสะสมกับจำนวนวันที่แช่อยู่ในน้ำกลั่นของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีปริมาณแคลปาคาราจีแนนที่แตกต่างกัน.....	87
4.12 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการทดสอบการฝังดินเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ด้วยความชื้น 30%, pH 7 : (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	89
4.13 ภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากฝังดินเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 600 เท่า : (ก) PE/TPS , (ข) PE/TPS/K3 , (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	90
4.14 ภาพการเกิดการบวมตัวของผงแคลปาคาราจีแนนที่มีกลีเซอรอลผสมอยู่ในปริมาณ 30% ของแคลปาคาราจีแนน ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง ที่กำลังขยาย 600 เท่า pH 7 : (ก) PE/TPS, (ข) PE/TPS/K3, (ค) PE/TPS/K5, (ง) PE/TPS/K7 และ (จ) PE/TPS/K9.....	100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แบบจำลองกลไกการเกิดเจลของแคปปาคาราจีแนน.....	101
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิเอ ทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/ แคปปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณต่างๆผสมอยู่ในแคปปา คาราจีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	103
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัสของฟิล์ม/พอลิเอทิลีนชนิดความหนา แน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคปปา คาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณ ต่างๆผสมอยู่ในแคปปาคาราจีแนนทั้งในแนว ตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD).....	104
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/ แคปปาคาราจีแนน ซึ่งมีกลีเซอรอลปริมาณ ต่างๆผสม อยู่ในแคปปาคารา จีแนนทั้งในแนวตามเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร(TD).....	104
4.19 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการทำเองจึงที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 7 วัน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3.....	108
4.20 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณสารเร่งการเสื่อมสภาพที่ ปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการฉายรังสีเป็นระยะเวลา 4 เดือน : (ก) สูตร PE/TPS/K7/G30 (ข) สูตร PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) สูตร PE/TPS/K7/G30/P3.....	109
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีน/ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคปปาคาราจีแนน ที่มีปริมาณสารเสื่อมสภาพพลาสติก (พีไอลฟ์) ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเองจึงและก่อนฉายแสงยูวี.....	110

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม พอลิเอทิลีน/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคปปาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพ พลาสติก(พีไอลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกันทั้งในแนวเครื่องจักร (MD) และแนวขวางเครื่องจักร (TD) ที่สภาวะก่อนการเอจจึงและก่อนฉายแสงยูวี.....	111
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์ม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โม พลาสติกสตาร์ช/ แคปปาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไอลฟ์)ใน ปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจาก เอจ จึงที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน.....	111
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดุลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่น ต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช/ แคปปาการา จีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (พีไอลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวตามเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจึงที่ สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน.....	113
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/ แคปปาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก (พีไอลฟ์)ใน ปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร (TD) หลังจากเอจจึง ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 1-7 วัน.....	115
4.27 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีน.....	116
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงสูงสุดของฟิล์มพอลิ เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช/ แคปปาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเร่งการเชื่อมสภาพพลาสติก(พีไอลฟ์)ใน ปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายังมอดูลัสของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาซ์/ แคปลาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(ฟิไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก)แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	119
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ/พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น/ เทอร์โมพลาสติกสตาซ์/ แคปลาการาจีแนน ที่มีปริมาณสารเชื่อมสภาพพลาสติก(ฟิไลฟ์)ในปริมาณที่ต่างกัน : (ก) แนวเครื่องจักร (MD) และ (ข) แนวขวางเครื่องจักร(TD) หลังจากฉายแสงยูวีเป็นเวลา 2 เดือน.....	120
4.31 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเอทิลีนโดยแสง.....	121
4.32 แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1800-1400\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆที่ทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะ 7 วัน : (ก) PE/TPS/K7/G30 (ข) PE/TPS/K7/G30/P1 และ (ค) PE/TPS/K7/G30/P3.....	123
4.33 การเปลี่ยนแปลงดัชนีการหักเหของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างหลังจากทำการเอจจิงที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 7 วัน.....	124
4.34 แสดงการดูดกลืนกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงความยาวคลื่น $1800-1400\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่างๆหลังจากที่ทำการฉายแสงยูวีเป็นระยะเวลา 4 เดือน: (ก) 0 เดือน (ข) 1 เดือน (ค) 2 เดือน (ง) 3 เดือน และ (จ) 4 เดือน.....	128