

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพอลิเมอร์ที่มีสมบัติย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง

นางสาวทัศนีย์ คำภูเวียง  
นางสาวนฤมล เปรมธีรวัฒน์ชัย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2538

เลขหมู่.....<sup>2/ว.</sup>  
<sup>๓364 ๗</sup>  
<sup>2538</sup>  
เลขทะเบียน.....**26206**  
วัน, เดือน, ปี.....**1.6.ค.ค. 2539**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **A BIODEGRADABLE POLYMER FROM TAPIOCA STARCH**

**MISS TASANEE KUMPOOWEING**  
**MISS NARUMON PREMTEERAWATCHAI**

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาพอลิเมอร์ที่มีสมบัติย่อยสลายทางชีวภาพ  
จากแป้งมันสำปะหลัง

โดย

นางสาวทัศนีย์ คำภูเวียง  
นางสาวนฤมล เปรมธีรวัฒน์ชัย

ภาควิชา

เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์พิเศษสิริกุล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้รับโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



( ผศ.ดร.เพ็ญชัย ไชยสิทธิ์ )

หัวหน้าภาควิชา



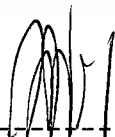
( รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล )

ประธานกรรมการ



( อ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ )

กรรมการ



( ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์พิเศษสิริกุล )

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	พอลิเมอร์ที่มีสมบัติย่อยสลายทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลัง
นักศึกษา	นางสาวทัศนีย์ คำภูเวียง นางสาวนฤมล เปรมธีรวัฒน์ชัย
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์พิเศษสิริกุล
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2538

### บทคัดย่อ

พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเมทิลอะครีเลต และพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิสไตรีน สามารถเตรียมได้โดยแปรเปลี่ยนชนิดของตัวริเริ่มคือ ซิริคแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เข้มข้น 0.1 โมลาร์ใน 1 นอร์มัลกรตไนตริก โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 60 , 100 , 200 และ 300 เปอร์เซ็นต์โมล ตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ พบว่าพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเมทิลอะครีเลต ที่ใช้ซิริคแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่ม เมื่ออัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ค่า AGU / chain และปริมาณความชื้นลดลง แต่ปริมาณ homopolymer เพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่ม ค่า AGU / chain และปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้น แต่ปริมาณ homopolymer ลดลง

พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิสไตรีน ที่ใช้ซิริคแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่ม เมื่ออัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลังสูงขึ้น ค่า AGU / chain ปริมาณความชื้น และปริมาณ homopolymer มีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่ม ค่า AGU / chain และปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้น แต่ปริมาณ homopolymer ลดลง

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่ออัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลังสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึง ( tensile strength ) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ( % elongation ) จะมีค่าสูงขึ้น

Special Project Title                    Biodegradable Polymer from Tapioca starch  
Name                                        Miss Tasanee Kumpooweing  
   Miss Narumon Premteerawatchai  
Special Project Advisor                Assistant Professor Doctor Nipon Wongvisetsirikul  
Department                                Chemistry  
Year    1995

#### Abstract

S - g - PMA and S - g - PS were prepared by varying 0.1 M / 1 N HNO<sub>3</sub> ceric ammonium nitrate and potassium persulphate as initiators. The ratio of monomer : tapioca starch ( 60 , 100 , 200 and 300 % by mole ) were studied and the products were characterized.

S - g - PMA initiated by ceric ammonium nitrate when increasing the ratio of MA : tapioca starch , the AGU / chain and the water content were decreased , but homopolymer content was increased. S - g - PMA initiated by potassium persulphate, the AGU / chain and the water content were increased , but homopolymer content was decreased.

S - g - PS initiated by ceric ammonium nitrate when increasing the ratio of PS : tapioca starch the AGU / chain , homopolymer content and water content were increased. S - g - PS initiated by potassium persulphate had higher AGU / chain and water content , but the homopolymer content was decreased.

The result of mechanical properties was found that when increasing the ratio of monomer : tapioca starch the tensile strength and % elongation at break were increased.

## กิติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.นิพนธ์ วงศ์วิเศษสิริกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล และ อ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยแก้ไขให้รายงานฉบับนี้ถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่เอื้อเฟื้อในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ช่วยให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

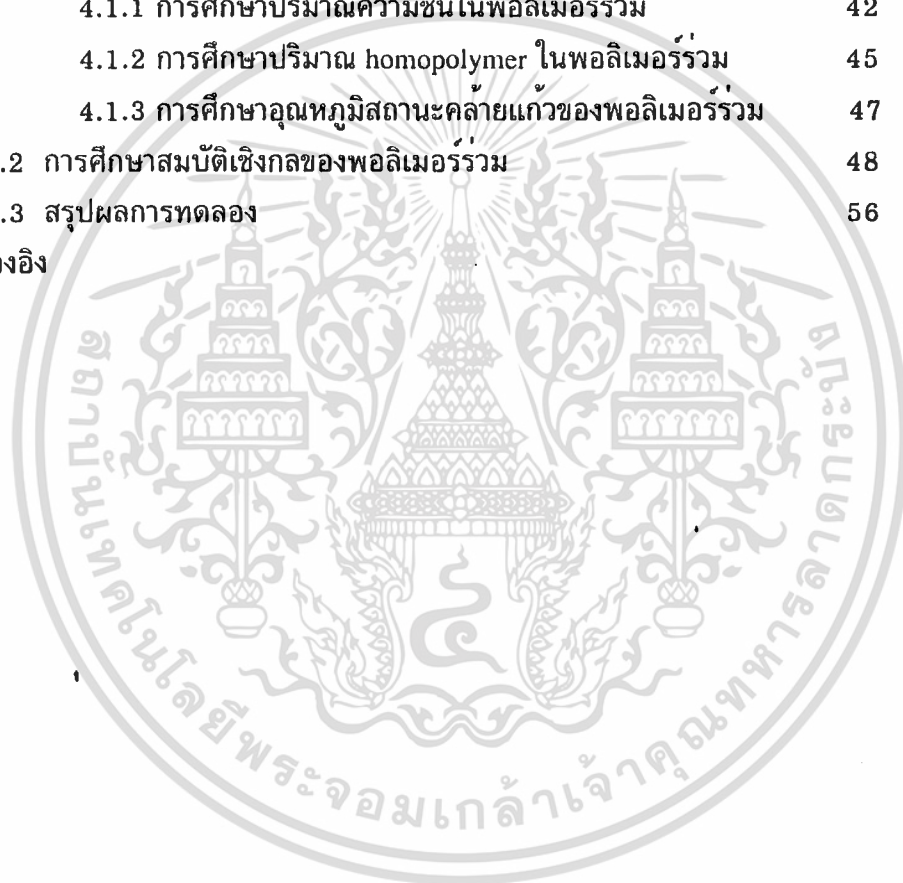
# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	1
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	2
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญรูป	6
สารบัญตาราง	7
สัญลักษณ์คำย่อ	8
บทที่ 1 บทนำ	9
1.1 วัตถุประสงค์	12
1.2 ขอบเขตการวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	13
2.1 แป้ง	13
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง	13
2.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	14
2.4 คุณสมบัติของแป้ง	17
2.5 เอนไซม์อะไมเลส	22
2.6 เสถียรภาพของพลาสติก	23
2.7 ประเภทของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้	24
2.8 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ	27
2.9 ข้อบกพร่องของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ	28
2.10 การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้	30
2.11 เมทิลอะครีเลต	30
2.12 สไตรีน	31
2.13 การกราฟท์โคพอลิเมอร์ไฮดรอกซีเบนซีนบนแป้ง	31
บทที่ 3 การทดลอง	34
3.1 สารเคมี	34
3.2 อุปกรณ์	35
3.3 วิธีเตรียมสารละลาย	36
3.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม	36
3.5 การสกัด homopolymer ด้วยเทคนิค acetone extraction	38
3.6 การตัดสายโซ่พอลิเมอร์ออกจากสายโซ่ของแป้งด้วยเทคนิค acid hydrolysis	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
3.7 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุล	38
3.8 การศึกษาอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ร่วม	39
3.9 การตรวจสอบหาหมู่ทำหน้าที่	39
3.10 การหาปริมาณความชื้นในพอลิเมอร์ร่วม	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การตรวจสอบสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ร่วม	42
4.1.1 การศึกษาปริมาณความชื้นในพอลิเมอร์ร่วม	42
4.1.2 การศึกษาปริมาณ homopolymer ในพอลิเมอร์ร่วม	45
4.1.3 การศึกษาอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ร่วม	47
4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ร่วม	48
4.3 สรุปผลการทดลอง	56
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารและสภาวะการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อ	41
ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PMA	42
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PS	44
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณ homopolymer ของ S - g - PMA	45
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณ homopolymer ของ S - g - PS	46
ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของ S - g - PS	47
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของ S - g - PMA	48
ตารางที่ 4.7 แสดงค่า AGU / chain ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PMA และ S - g - PS เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	50
ตารางที่ 4.8 แสดงค่า AGU / chain ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PMA และ S - g - PS เมื่อใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	50
ตารางที่ 4.9 แสดง % conversion ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PMA โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	51
ตารางที่ 4.10 แสดง % conversion ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PS โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	51
ตารางที่ 4.11 แสดงผลการสกัด ungrafted homopolymer ออกจาก S - g - PMA เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ด้วยเทคนิค acetone extraction	52
ตารางที่ 4.12 แสดงผลการสกัด ungrafted homopolymer ออกจาก S - g - PS เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ด้วยเทคนิค acetone extraction	52
ตารางที่ 4.13 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณ side chain ของ S - g - PMA เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ด้วยเทคนิค acid hydrolysis	53
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณ side chain ของ S - g - PS เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ด้วยเทคนิค acid hydrolysis	53

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของอะไมโลส	14
รูปที่ 2.2 แสดงการจัดตัวในรูป helical structure ของอะไมโลส	14
รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์รีโทรเกรดชัน ( retrogradation ) ของอะไมโลส	15
รูปที่ 2.4 แสดงสูตรโครงสร้างของอะไมโลเพกติน	16
รูปที่ 2.5 แสดงกราฟความหนืดของบราเบนเดอร์ ( brabender viscographs )	18
รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเริ่มต้นปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์เซชันบนแป้งด้วยไอออนซีรีด	31
รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อ	39
รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์ soxhlet เพื่อสกัดไฮโมพอลิเมอร์	40
รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องบดสองลูกกลิ้ง	40
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง	41
รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PMA	42
รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PS	44
รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณไฮโมพอลิเมอร์ของ S - g - PMA	45
รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณไฮโมพอลิเมอร์ของ S - g - PS	46
รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของ S - g - PS	47
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของ S - g - PMA	48
รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ S - g - PMA	49
รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาหมู่ทำหน้าที่ของ S - g - PMA ด้วยเครื่อง Infrared Spectrophotometer	54
รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์หาหมู่ทำหน้าที่ของ S - g - PS ด้วยเครื่อง Infrared Spectrophotometer	55

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

## ความหมาย

S - g - PMA

พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเมทิลอะคริเลต

S - g - PS

พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับพอลิสไตรีน

AGU / chain

จำนวน anhydroglucose ต่อการเกิด side chain 1 ตำแหน่ง

PMA

พอลิเมทิลอะคริเลต

PS

พอลิสไตรีน

conversion

การแปรเปลี่ยนของมอนอเมอร์ไปเป็นพอลิเมอร์

kN / m<sup>2</sup>

กิโลนิวตันต่อตารางเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

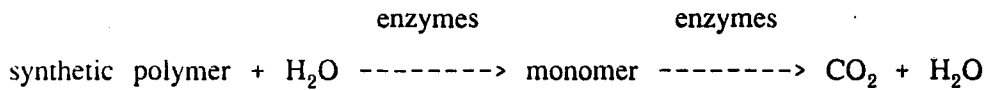
ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุที่เป็นพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติก จะมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นในอัตราสูงกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น เช่น กระดาษ โลหะ และแก้ว ทั้งนี้เนื่องจากมีความทนทาน สามารถกันน้ำได้ดี และมีน้ำหนักเบา แนวโน้มความต้องการใช้พลาสติกมีการขยายตัวมากขึ้น ปริมาณขยะซึ่งเกิดจากพลาสติกจึงสูงขึ้นเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ทั้งนี้เนื่องจากการจัดขยะพลาสติกยังมีอุปสรรคหลายประการ ได้มีผู้พยายามวิจัยค้นคว้าพลาสติกแบบใหม่ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งนับเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยแก้ไขปัญหามลพิษอันเนื่องมาจากขยะพลาสติกที่กำลังทวีความรุนแรง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันให้บรรเทาลง

พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ (degradable plastic) หมายถึงพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติกโดยทั่วไป เมื่อสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น แสง ความชื้น จุลินทรีย์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายเมื่อสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ในระยะเวลาหนึ่ง (Photodegradable Plastics)
2. พลาสติกย่อยสลายด้วยสารเคมีโดยผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือปฏิกิริยาเคมีอื่น ๆ (Chemically Degradable Plastics)
3. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) โดยใช้เอนไซม์จากเชื้อจุลินทรีย์

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการสังเคราะห์พลาสติกที่สามารถสลายตัวทางชีวภาพได้ โดยใช้เอนไซม์ (enzyme) ของจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย (bacteria) และเชื้อรา (fungi) ซึ่งจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์ไปยังพลาสติก ผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำ เอนไซม์ดังกล่าวจะย่อยสลายพลาสติกให้มีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์เพื่อย่อยให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กต่อไป ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และอุณหภูมิที่เหมาะสม

กลไกการย่อยสลายโดยทั่วไปเป็นดังนี้



ในการปรับปรุงให้การย่อยสลายทางชีวภาพมีประสิทธิภาพดีขึ้นสามารถทำได้ 2 วิธี

1. ปรับปรุงแบคทีเรียหรือเชื้อราให้ย่อยสลายพลาสติกได้ดีและเร็วขึ้น
2. ปรับปรุงพลาสติกให้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ของแบคทีเรียหรือราได้ง่ายขึ้น อาจทำได้โดยวิธีต่อไปนี้

1) เตรียมพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดใหม่ที่ย่อยสลายได้โดยสิ่งมีชีวิต ปัจจุบันสามารถผลิตพลาสติกดังกล่าวเป็นสารประกอบประเภทอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ( aliphatic polyester ) เช่น polycaprolactone , polyethylene adipate และ polyglycolic acid โดยคาดว่าเอนไซม์ของจุลินทรีย์จะไฮโดรไลสหมู่เอสเทอร์ของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ นอกจากนี้มีการทำโคพอลิเมอร์ไรเซชัน ( copolymerization ) ของมอนอเมอร์อื่น ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย แต่ยังมีได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

2) เติมสารที่สิ่งมีชีวิตย่อยสลายได้ เช่น แป้ง เซลลูโลส เข้าไปในพอลิเมอร์ ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ นอกจากนี้ยังอาจใช้สารดังกล่าวในลักษณะที่ปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางอย่างแล้ว เพื่อทำเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดแผ่นฟิล์มบางซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างดี เช่น การผลิตแผ่นบางคลุมดิน ภาชนะเพาะชำพืช

ในปี ค.ศ. 1974 นายจี เจ แอล กริฟฟิน ( G.J.L. Griffin ) ทำการทดลองเติมแป้งผสมในฟิล์มพอลิเอทิลีน พบว่าเมื่อสกัดแยกแป้งออกจากฟิล์มพอลิเอทิลีนแล้ว ฟิล์มมีลักษณะเป็นรูพรุนและสามารถเกิดการย่อยสลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ หรือถูกออกซิไดซ์โดยก๊าซออกซิเจน

ในปี ค.ศ. 1978 นายอาร์ เจ เดนเนนเบิร์ก ( R.J. Dennenberg ) และคณะ แห่งมหาวิทยาลัยอิลลินอยส์ ( Illinois University ) สหรัฐอเมริกา ได้ทดลองกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันเมทิลอะคริเลตบนแป้งข้าวโพด เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ในการผลิตพลาสติกที่ใช้ในทางเกษตรกรรม คือ เป็นพลาสติกคลุมดิน เพื่อรักษาความชุ่มชื้นของดิน ป้องกันการสูญเสียน้ำของพืช พบว่าแป้งที่ถูกกราฟท์ด้วยเมทิลอะคริเลตมีลักษณะเป็นผงละเอียด และสามารถผ่านเครื่องอัดรีด ( extruder ) ได้เป็นแผ่นฟิล์ม แสดงว่าแป้งข้าวโพดมิใช่เป็นเพียงสารตัวเติม ( filler ) ในพลาสติกเท่านั้น แต่ยังเป็นส่วนหนึ่งของพลาสติกด้วย นอกจากนี้ได้ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ พบว่ากราฟท์โคพอลิเมอร์มีน้ำหนักลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 22 วัน ในปีเดียวกัน L.A. Guglimelli ทำกราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชันในอัตราส่วนระหว่างแป้งกับ

เมทิลอะคริเลตเป็น 1 : 1 และ 1 : 2 ได้ฟิล์มที่มีลักษณะคล้ายฟิล์มพอลิเอทิลีน ยืดหยุ่นได้ และมีความเหนียวพอควร

ในประเทศไทยมีวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เช่น แป้ง เซลลูโลส ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ จึงอาจนำมาใช้เป็นวัสดุในการสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพได้ ในการวิจัยนี้จะนำเอาแป้งมันสำปะหลังที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับแป้งข้าวโพด มาทำกราฟท์โคพอลิเมอร์เซชันด้วยเมทิลอะคริเลต และสไตรีน ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของแป้งเพื่อผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ซึ่งมอนอเมอร์ดังกล่าวยังสามารถเพิ่มสมบัติบางประการให้แก่แป้ง มีความสามารถทำเป็นแผ่นฟิล์มบางได้ และทำการเปรียบเทียบกับแป้งข้าวโพดที่ได้มีผู้ทำวิจัยแล้วในต่างประเทศ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกราฟท์โคพอลิเมอร์เซชัน ได้แก่ ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณ และชนิดของมอนอเมอร์



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์พลาสติกที่มีสมบัติย่อยสลายทางชีวภาพ
2. เพื่อเป็นการแปรรูปแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีราคาถูก ให้มีคุณค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น
3. เพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกซึ่งย่อยสลายได้ช้า

## ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับเมทิลอะคริเลต (methyl acrylate) และพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับสไตรีน (styrene) โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้อัตราส่วนของมอนอเมอร์กับแป้งมันสำปะหลังต่างกัน
2. สังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับเมทิลอะคริเลต (methyl acrylate) และพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับสไตรีน (styrene) โดยศึกษาสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ตัวริเริ่ม (initiator) ต่างกัน คือ ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 แป้ง ( starch )

แป้งเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ ( polysaccharide ) มีอยู่ในพืชแทบทุกชนิด มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ประกอบไปด้วยหน่วยกลูโคส กระบวนการผลิตแป้งนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ หลักการทั่วไปคือแยกเม็ดแป้งออกจากองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เส้นใย โปรตีน เกลือแร่ จากนั้นทำให้บริสุทธิ์โดยการล้างน้ำ ทำการบั่นแยก และอบให้แห้ง ในกระบวนการผลิตเหล่านี้จะได้แป้งแขวนลอยอยู่ในน้ำ เนื่องจากแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น

สมบัติของแป้งสามารถแยกได้ 2 ประเภท คือ

1. starch ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่าง ๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องใช้แบบเปียก ( wet grinding ) ซึ่งจะช่วยให้แยก starch ออกมาได้

2. flour ผลิตได้จากการโม่แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้มีสมบัติต่างไปจาก starch

แป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งประเภท starch เม็ดแป้ง ( starch granule ) ไม่ละลายในน้ำเย็น รูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับแหล่งของพืชที่ให้แป้ง

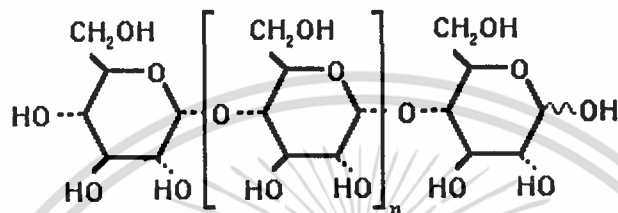
#### 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 ( $C_6H_{10}O_5$ ) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรต หน่วยกลูโคสในสายโซ่สามารถแสดงได้เป็นหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ( AGU ) หรือหน่วยกลูโคไพราโนซิล ( glucopyranosyl unit ) ซึ่งเกิดจากพันธะโควาเลนต์เชื่อมโยงระหว่างกลูโคสแต่ละหน่วย และทำให้โมเลกุลของน้ำถูกกำจัดออกไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น เนื่องจากแป้งที่พบอยู่ในต้นพืช ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพ ดังนั้นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลแป้งจึงเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ หน่วยกลูโคสจะต่อกันผ่านอะตอมของออกซิเจนที่ติดกับอะตอมของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับอะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสถัดไป เกิดเป็นพอลิเมอร์สายยาวขึ้น พันธะเชื่อมโยงระหว่างหน่วยกลูโคสนี้เรียกว่า “ พันธะกลูโคไซด์ ” ( glucoside bond )

## 2.3 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง

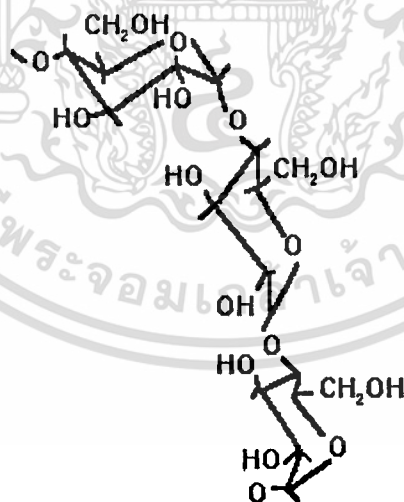
แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ

1. อะไมโลส ( amylose ) เป็นพอลิเมอร์ที่เป็นสายตรง ( linear polymer ) ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ( anhydroglucose unit ) เชื่อมกันด้วย  $\alpha$  - 1,4 glycosidic linkage ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสจะขึ้นกับแหล่งที่ให้แป้ง และสถานะของกระบวนการที่แยกแป้งอะไมโลสประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200 - 2000 หน่วย โดยแป้งส่วนใหญ่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ 25 เปอร์เซ็นต์ มีสูตรโครงสร้างดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของอะไมโลส

นอกจากนี้อะไมโลส อาจจะจัดตัวอยู่ในรูป helical structure โดยจะประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส 6 หน่วยย่อยต่อหนึ่งเกลียว และแต่ละเกลียวจะเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน

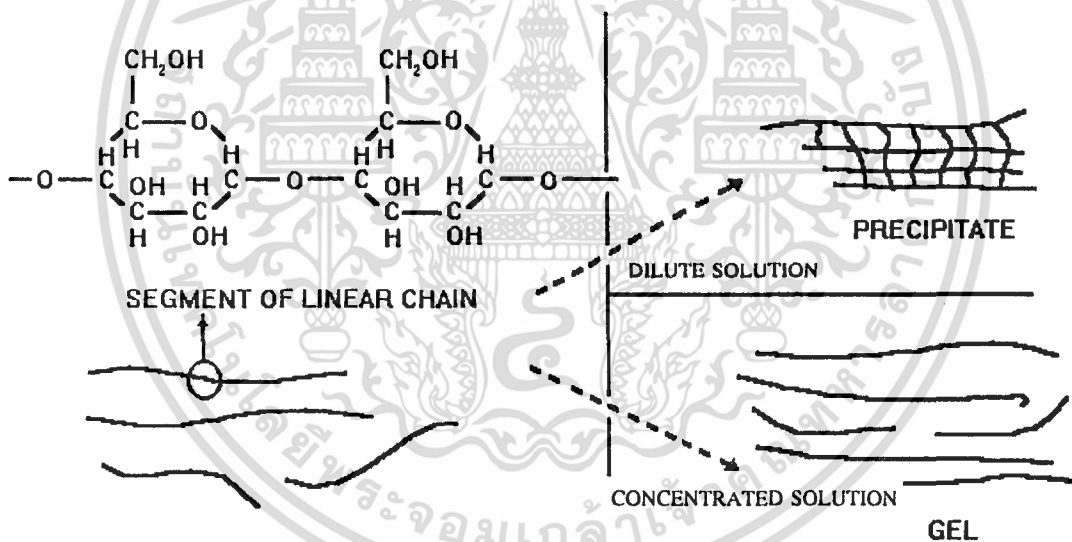


รูปที่ 2.2 แสดงการจัดตัวในรูป helical structure ของอะไมโลส

เนื่องจากอะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซีปริมาณมาก ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก ( hydrophilic ) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ อย่างไรก็ตามเพราะโมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีหมู่ไฮดรอกซีจำนวนมาก ทำให้อะไมโลสจัดเรียงตัวขนานกัน และไกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ทำให้เกิดโครงสร้างร่างตาข่ายขึ้น ทำให้สมบัติไฮโดรฟิลิกลดน้อยลง และสารละลายที่ได้จะมีลักษณะขุ่น

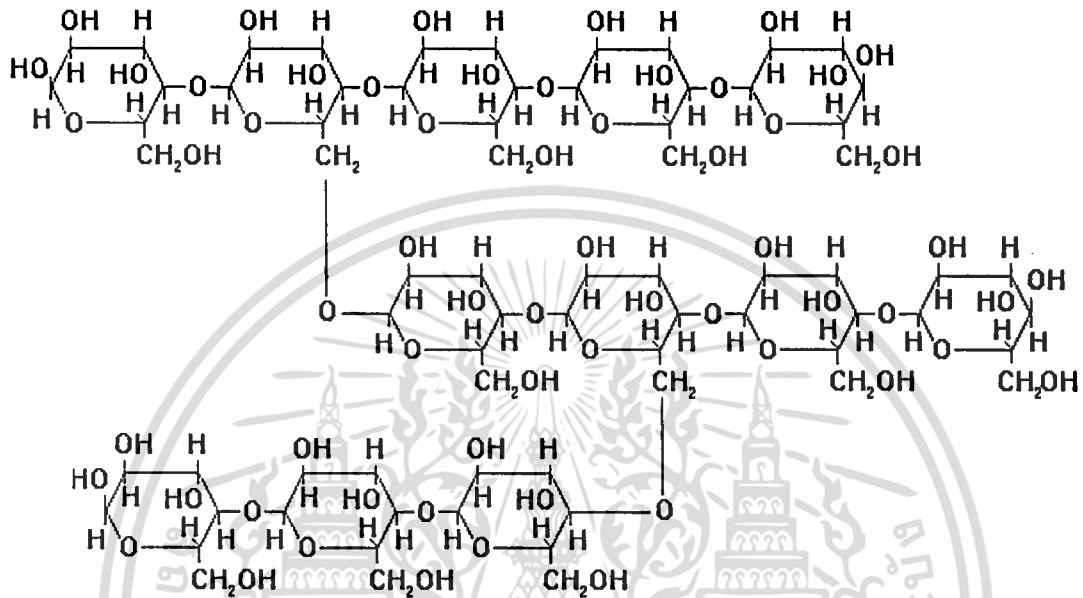
ในสารละลายเจือจาง จะเกิดการรวมตัวกันของอะไมโลสที่ติดกันเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ แต่สำหรับที่ความเข้มข้นสูง ๆ ผลของความเกะกะ ( steric hindrance ) จะขัดขวางการรวมตัว แต่จะมีการจัดตัวเพียงบางส่วนระหว่างช่วงของสายโซ่โมเลกุล ทำให้ได้เจลที่มีร่างแหสามมิติที่ยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปมักทำให้เกิดฟิล์มที่มีความแข็งแรง

ปรากฏการณ์ยึดติดกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลส เรียกว่า “ รีโทรเกรเดชัน “ ( retrogradation ) ซึ่งแสดงดังรูป



รูปที่ 2.3 แสดงปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชัน ( retrogradation ) ของอะไมโลส

2. อะไมโลเพกติน ( amylopectin ) เป็นพอลิเมอร์โซ่สาขา ( branched polymer ) ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ( anhydroglucose unit ) เชื่อมกันด้วย  $\alpha$  - 1,4 glycosidic linkage และ  $\alpha$  - 1,6 glycosidic linkage แต่ละโซ่สาขาในโมเลกุลอะไมโลเพกตินมีหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 20 - 30 หน่วย โดยโครงสร้างที่เป็นอะไมโลเพกตินจะคิดเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของแป้ง มีสูตรโครงสร้างดังนี้ คือ



รูปที่ 2.4 แสดงสูตรโครงสร้างของอะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลส และการที่มีโซ่สาขาของโมเลกุลอะไมโลเพกติน ทำให้ลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และขัดขวางการที่สายโซ่จะเกิดการเรียงตัวให้ใกล้กันพอที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้สารละลายของอะไมโลเพกตินจึงมีลักษณะใส ฟิล์มที่ได้จากอะไมโลเพกตินไม่มีความแข็งแรง และไม่สามารถโค้งงอได้เหมือนฟิล์มที่ได้จากอะไมโลส

สายโซ่หลักของอะไมโลเพกตินและอะไมโลสอยู่ขนานติดกัน จะมีโอกาสที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนที่ติดกันได้ ทำให้เกิดกลุ่มของโครงผลึก ( micellar crystallites ) ซึ่งจะเป็นตัวยึดให้แป้งอยู่เป็นเม็ด และมีสมบัติบัพริ่งเจนซ์ ( birefringence ) ซึ่งสามารถแสดงให้ทราบได้โดยการเกิดโพลาไรเซชันครอส ( polarization cross )

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ส่วนของแป้งที่เื้ออานวยต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ คือ โครงสร้างที่เป็นสายตรง จุลินทรีย์จะย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์เบตาอะไมเลส ( $\beta$  - amylase) ทำลายเฉพาะพันธะ  $\alpha$  - 1,4 glycosidic linkage เท่านั้น ส่วน  $\alpha$  - 1,6 glycosidic linkage ไม่สามารถทำลายได้ ดังนั้นการย่อยแป้งซึ่งส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะไมโลเพกติน ให้เป็นสายสั้นของแป้งที่เรียกว่า เดกซ์ตริน (dextrin) เท่านั้น

## 2.4 คุณสมบัติของแป้ง

แป้งสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสม และใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างมากมาย เช่น สารยึดติด สิ่งทอ กระดาษ อาหาร ยารักษาโรค และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น การที่สามารถนำแป้งไปใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เกิดจากสมบัติของแป้งในด้านความชื้นเหนียว การเกิดเป็นเจล การยึดติด และการเกิดเป็นฟิล์ม นอกจากนี้แป้งยังมีราคาถูก คุณภาพสามารถควบคุมได้ และหาได้ง่าย

แป้งสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ได้ โดยผ่านกระบวนการทางกายภาพทางเคมี และทางชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ เพื่อทำการผลิตแป้งที่มีสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง

สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา ในการนำแป้งไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ได้แก่

### 1. การบวมตัวและการเกิดเจล (swelling and gelatinization)

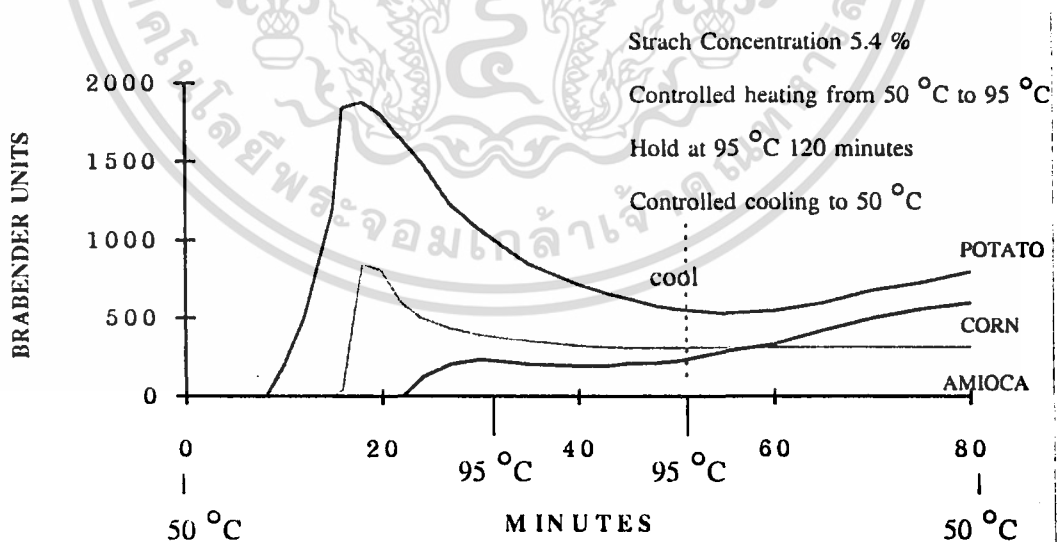
โดยทั่วไปเม็ดแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น เมื่อนำเม็ดแป้งมาตรวจสอบด้วยกล้องโพลาไรซ์ไมโครสโคป จะพบโพลาไรเซชันครอส และแป้งจะมีขีดจำกัดในการดูดน้ำ เมื่อปล่อยในที่ที่มีความชื้นสูง เมื่อนำแป้งมากระจายตัวในน้ำ เม็ดแป้งจะเกิดการบวมตัวเพิ่มขึ้น และโพลาไรเซชันครอสจะสูญหายไป ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ผันกลับได้ คือถ้าลดความชื้นของเม็ดแป้งลง หรือทำให้เม็ดแป้งแห้ง เม็ดแป้งจะหดตัว และมีโพลาไรเซชันครอสเกิดขึ้นใหม่ได้

เมื่อนำแป้งที่กระจายตัวในน้ำมาให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิวิกฤตค่าหนึ่ง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของแป้งและปัจจัยอื่น ๆ พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างเม็ดแป้งไว้จะอ่อนตัวลง ปล่อยให้ให้น้ำแทรก และล้อมรอบส่วนที่เป็นโซ่โพลีเมอร์ของอะไมโลเพกติน เมื่อเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น

โมเลกุลเริ่มที่จะจัดตัวเป็นเกลียว ทำให้เกิดความดันซึ่งเป็นสาเหตุให้เม็ดแป้งดูดน้ำ และบวมตัวเป็นหลายเท่าของปริมาตรเริ่มต้น

ระหว่างการบวมตัว อะไมโลสจะพยายามแยกออกจากเม็ดแป้ง และปล่อยให้ อะไมโลเพกตินมีน้ำล้อมรอบสูงขึ้น สารแขวนลอยเริ่มจะใส และความหนืดของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดที่เม็ดแป้งถูกน้ำล้อมรอบได้สูงสุด เมื่อให้ความร้อนต่อไป เม็ดแป้งจะแตก และปล่อยโมเลกุลของอะไมโลสออกมา ความหนืดจะลดลง เมื่อทำให้สารละลายเย็นความโปร่งใสจะลดลง และความหนืดมีแนวโน้มสูงขึ้น ในกรณีของธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี สารละลายจะเกิดเป็นเจลที่ความเข้มข้นสูง

การวัดคุณสมบัติการเกิดเจลมีหลายวิธี วิธีที่ว่องไวสำหรับวัดคุณสมบัติการเกิดเจล คือ การตรวจสอบด้วยกล้องโพลาไรซ์ไมโครสโคป พร้อมกับให้ความร้อนบนแท่น อุณหภูมิที่เม็ดแป้งเริ่มสูญเสียบายฟริงเจนซ์ เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจล จุดสิ้นสุดการเกิดเจลเกิดขึ้นเมื่อ 98 เปอร์เซ็นต์ของเม็ดแป้งสูญเสียบายฟริงเจนซ์ อีกวิธีเป็นการวัดความหนืดที่เพิ่มขึ้น เมื่อให้ความร้อนโดยใช้เครื่องวัดความหนืดบราเบนเดอร์ (brabender viscometer) ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่ออกแบบให้ทำการวัดได้ต่อเนื่อง ในขณะที่ให้ความร้อน หรือให้ความเย็นแก่สารแขวนลอยของแป้ง โดยสารแขวนลอยของแป้งในน้ำถูกให้ความร้อน ในถ้วยที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ การหมุนของตัวอย่างทำให้เกิดแรงหมุนรอบจานโลหะที่ติดกับหมุดโลหะหลายตัวที่จุ่มลงมาในตัวอย่าง แรงหมุนนี้ถูกทำให้สมดุลโดยแรงบิด (torsion) ของการหมุนรอบตัวเองของจานโลหะ และจะส่งสัญญาณไปบันทึกอย่างต่อเนื่อง ทำให้ได้กราฟที่แสดงค่าความหนืดบราเบนเดอร์ (brabender viscographs) ดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดงกราฟค่าความหนืดบราเบนเดอร์ (brabender viscographs)

สารละลายของแป้ง ได้แก่ แป้งข้าวโพด และข้าวสาลี มีความสัมพันธ์กับปริมาณของโมเลกุลอะไมโลส ซึ่งจะขุ่นและเกิดเจลเมื่อเย็น ขณะที่แป้งจากมันฝรั่งยังมีความโปร่งใสมากกว่าและไม่เกิดเป็นเจลเมื่อเย็น แป้งข้าวโพดชนิดแวกซี (waxy corn starch) จะมีพฤติกรรมคล้ายแป้งมันฝรั่ง พฤติกรรมที่ต่างกันของแป้งมันฝรั่งและแป้งข้าวโพด อาจเป็นผลมาจากปริมาณของอะไมโลสที่แตกต่างกัน และอีกปัจจัยหนึ่ง ในกรณีของแป้งมันฝรั่งที่มีหมู่ฟอสเฟตอยู่บ้าง

สมบัติของแป้งที่ยังไม่ปรับปรุง และสมบัติของเจลที่ได้จากการให้ความร้อน กับสารแขวนลอยของแป้งที่ยังไม่ปรับปรุง เป็นข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานของแป้งที่ยังไม่ปรับปรุงในทางด้านพาณิชย์ เนื่องจากต้องให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ นอกจากนี้ยังรวมถึงข้อบกพร่องในเรื่องการขาดสมบัติการไหลอย่างอิสระ หรือการไม่รวมตัวกับน้ำของเม็ดแป้ง การขาดความสามารถในการบวมและเพิ่มความหนืดในน้ำเย็น และภายหลังจากการให้ความร้อน ความหนืดสูงเกินไป หรือไม่สามารถควบคุมได้

ลักษณะการบวมตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง สามารถเปลี่ยนแปลงโดยการปรับปรุงทางเคมี การปรับปรุงด้วยกรด (acid modification) เป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุด และใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการทางการค้า ในการผลิตแป้งที่มีความหนืดต่ำ จะทำการผสมกรดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจล

แป้งที่มีความหนืดสูง ทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ฟิเคชัน (etherification) การทำปฏิกิริยานี้ จะทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้งอ่อนตัวลง โดยการใส่หมู่แทนที่เข้าไปในโมเลกุลแป้ง ซึ่งทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลต่ำลง และเพิ่มสมบัติการบวมตัวของแป้ง การลดลงของอุณหภูมิการเกิดเจล และการเพิ่มขึ้นของการบวมตัว จะขึ้นอยู่กับองศาการแทนที่ (degree of substitution) และธรรมชาติทางเคมีของหมู่แทนที่ จะเกิดการผลึกกันระหว่างโมเลกุล ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เหลืออยู่แยกตัวออกอย่างรวดเร็ว โมเลกุลของแป้งจะเป็นอิสระและสามารถละลายน้ำได้

นอกจากนี้ยังมีวิธีการปรับปรุงแป้งด้วยวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งการเชื่อมพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่ติดกันโดยโซ่ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต (sodium trimetaphosphate) อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) ฟอรัลดีไฮด์ (formaldehyde) และสารเคมีตัวอื่น ๆ

## 2. การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ( enzymatic degradation )

การนำแป้งมาใช้ในทางอุตสาหกรรมขึ้นอยู่กับความสามารถของเอนไซม์อะไมเลสที่จะเข้าไปย่อยแป้ง เช่น อัลฟา หรือเบตาอะไมเลส สามารถย่อยเม็ดแป้ง ( native granule ) การแยกแป้งออกจากพืชในหัตถ์ปฏิบัติการมีการเสียหายน้อยกว่าการผลิตแป้งในเชิงการค้า ซึ่งแป้งบางส่วนอาจถูกทำลายโดยสารเคมี หรือแรงเชิงกล การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ จะขึ้นอยู่กับชนิดเอนไซม์และแป้ง สำหรับอัลฟาอะไมเลสที่ได้จากสัตว์ แบคทีเรีย หรือพืช จะทำปฏิกิริยากับแป้งแต่ละชนิดให้ผลแตกต่างกันออกไป

## 3. สมบัติของโครงสร้าง ( structural properties )

เม็ดแป้งจะมีลักษณะของการเป็น “ บายฟริงเจนซ์ “ เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องโพลาไรซ์ ไมโครสโคป ( polarize microscope ) จะแสดงลักษณะของมอลเตสครอส ( moltess cross pattern ) เช่นเดียวกับผลึก ( crystalline ) และตรวจสอบโครงสร้างด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน แพทเทิร์น ( x - ray diffraction pattern ) ทำให้ทราบว่า เมื่อองศาของความเป็นระเบียบต่างกัน จะให้สมบัติที่ต่างกัน

การที่แป้งมีลักษณะบายฟริงเจนซ์นั้น หมายความว่าเม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอยู่อย่างเป็นระเบียบภายใน โดยปราศจากการเกี่ยวข้องกับโครงสร้างผลึกแต่อย่างใด เม็ดแป้งแสดงสมบัติแอนไอโซโทรปิก ( anisotropic properties ) ซึ่งสมบัติเช่นนี้เกิดขึ้นในเม็ดแป้งที่มีความแตกต่างกันของปริมาณอะไมโลสอยู่มาก

## 4. คุณลักษณะ ( specification )

คุณลักษณะของแป้งและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแป้ง จะเกี่ยวข้องกับความบริสุทธิ์ และขอบเขตของการปรับปรุง ( modification ) โดยทั่วไปแล้วสิ่งเจือปนมักหมายถึง เถ้า โปรตีน ไขมัน และรวมถึงความชื้นที่มีมากเกินไป ปริมาณสิ่งเจือปนสูงสุดที่ยอมรับได้จะมีกำหนดไว้สำหรับแป้งแต่ละชนิด ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพดจะมีความชื้น 12 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้า 0.15 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 0.4 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน ( ปริมาณสารที่สกัดได้ด้วยอีเทอร์ ) 0.9 เปอร์เซ็นต์ และสารที่ละลายได้ในน้ำเย็น 0.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น

แป้งบริสุทธิ์จะมีสีขาว การกำจัดสีสามารถทำได้โดยการสกัดสารอื่นและกลูเตน ( gluten ) ด้วยอีเทอร์ การปรับปรุงสีของแป้งจะไม่ขึ้นกับคุณลักษณะ แต่สามารถปรับปรุงองศาของความขาวได้ตามต้องการ

แป้งแต่ละชนิดไม่สามารถทดสอบด้วยวิธีที่เหมือนกันได้ วิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือการทดสอบแบบสก็อต ( scott test ) สำหรับแป้งข้าวโพดเปียกที่ขึ้นขณะร้อน การทดสอบทำได้โดยการเทแป้งลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำอยู่ 280 มิลลิลิตร และนำไปอังบนอ่างน้ำร้อน หลังจากนั้นเทลงในถ้วยหาความหนืดแบบสก็อต ( scott viscosity cup ) เวลาที่ใช้สำหรับการส่งผ่านที่ 100 มิลลิลิตรแรกประมาณ 40 - 80 วินาที แป้งข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ควรให้ค่าการทดสอบแบบสก็อตต่ำสุดประมาณ 40 วินาที / 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 12 กรัม / 280 มิลลิลิตร ส่วนแป้งที่ผ่านการปรับปรุง เช่น แป้งไฮโดรไลซ์ด้วยกรด หรือแป้งออกซิไดซ์ จะให้ค่าความหนืดแบบสก็อตต่ำกว่า และการทดสอบค่าความหนืดแบบสก็อต จะทำให้ทราบขอบเขตและองศาของการปรับปรุงของแป้งชนิดนั้น ๆ

## 2.5 เอนไซม์อะไมเลส ( amylase )

เอนไซม์อะไมเลส จะเร่งปฏิกิริยา hydrolysis พันธะ glycosidic ในแป้ง ( starch ) และ glycogen

1.  $\alpha$  - amylase ( starch - liquifying enzyme ) จะตัดพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage ภายในแป้งอย่างสุ่ม ( เป็น endoenzyme )

- ถ้า substrate เป็น amylose จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น maltose , maltotriose
- ถ้า substrate เป็น amylopectin / glycogen จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น glucose , maltose dextrin

2.  $\beta$  - amylase ( saccharifying enzyme ) จะตัดพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage จากปลาย nonreducing ( เป็น exoenzyme )

- ถ้า substrate เป็น amylose จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น maltose
- ถ้า substrate เป็น amylopectin / glycogen จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น maltose , dextrin

3.  $\gamma$  - amylase ( glucoamylase , amyloglucosidase ) จะตัดพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic linkage จากปลาย nonreducing ( เป็น exoenzyme )

- สามารถย่อยได้ทั้ง starch , glycogen , dextrin , maltose ได้ผลิตภัณฑ์เป็น glucose

เอนไซม์อะไมเลส ใช้ในอุตสาหกรรม

Brewing ( เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ )

Glucose and syrup ( กลูโคสและน้ำเชื่อม )

Breadmaking ( ขนมปัง )

Fruit juice ( น้ำผลไม้ )  
Papermaking ( กระดาษ )  
Textiles ( สิ่งทอ )  
Candy ( ลูกกวาด )

## 2.6 เสถียรภาพของพลาสติก

พลาสติกเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น เพราะพลาสติกมีความทนทานต่อการใช้งาน ไม่ผุกร่อนเหมือนเช่นโลหะ แต่ก็มีปัญหาคือ เราจะมีความยุ่งยากในการกำจัดหรือทำลายขยะพลาสติกให้หมดไป

การสลายตัวของพลาสติกเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลาย ๆ สาเหตุ แต่ที่น่าสนใจและมีการศึกษาอยู่มาก คือการสลายตัวอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ ( microorganism ) โดยเฉพาะแบคทีเรีย และรา

พลาสติกสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. พลาสติกที่ผลิตได้จากสารพอลิเมอร์ในธรรมชาติ
2. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์

พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์ในธรรมชาติ ทุกชนิดสามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ในขณะที่พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์จำนวนมากหลายชนิดไม่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์จะมีความสามารถถูกย่อยสลายได้นั้น จะต้องเป็นพลาสติกประเภทที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ ( aliphatic polyester ) พอลิเอไมด์ ( polyamide ) และพอลิยูรีเทน ( polyurethane ) ตัวอย่างของพอลิเมอร์ดังกล่าว เช่น พอลิไกลคอรริกแอซิด ( polyglycolic acid ) พอลิคาร์โพรแลคโตน ( polycaprolactone ) เป็นต้น

นักวิทยาศาสตร์ได้พยายามศึกษาว่า เหตุใดพลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์จึงไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ ซึ่งสามารถสรุปเหตุผลได้ 2 ข้อดังต่อไปนี้

1. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก เมื่อโซ่โมเลกุลมีขนาดยาวมาก ๆ ทำให้มีความทนทานต่อการย่อยสลายโดยเชื้อ

จุลินทรีย์ได้ดี จากการค้นคว้าวิจัยของบริษัทยูนิคาร์ไบด์ ( Union Carbide Co.,Ltd. ) โดยการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมาทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ โดยการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 123,000 และมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงมาเรื่อย ๆ พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดที่มีความหนาแน่นสูงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ จะไม่สามารถถูกย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ได้ และพอลิเอทิลีนจะสามารถถูกย่อยสลายได้เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 3,200

2. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ( hydrophobic ) ค่าการซึมผ่านของความชื้นต่ำ ลักษณะไม่เป็นรูพรุน พื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากในระหว่างการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ จะมีการปลดปล่อยเอนไซม์ผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปยังพลาสติก เอนไซม์จะทำหน้าที่ย่อยสลายโมเลกุลของพลาสติกทำให้มีขนาดเล็กลง โดยผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึม ( metabolism ) ของจุลินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นสารชนิดอื่นต่อไป แต่เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติไม่ชอบน้ำ และมีค่าการซึมผ่านของความชื้นต่ำ จะทำให้เอนไซม์สัมผัสกับผิวหน้าของพลาสติกน้อยลง และการที่พลาสติกไม่เป็นรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสก็ยิ่งน้อยลง จึงเป็นการยากที่จะทำให้พลาสติกถูกย่อยสลายได้

## 2.7 ประเภทของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้

พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ ( Biodegradable plastics )
2. พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยแสง ( Photodegradable plastics )
3. พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีการอื่น ๆ

### 2.7.1. พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ ( Biodegradable plastics )

เป็นพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยกระบวนการย่อยสลายทางชีวเคมีของพลาสติก อันเนื่องมาจากการกระทำของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย และรา เป็นต้น

การค้นคว้าวิจัยเพื่อผลิตพลาสติกประเภทนี้ สามารถจำแนกออกเป็น 3 แนวทาง คือ

1. การปรับปรุงสารพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ( Modified natural polymers )  
เป็นการนำเอาสารพอลิเมอร์ที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติมาปรับปรุงโดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ( Chemical modification ) หรือทางชีวภาพ เพื่อทำการผลิตพลาสติกให้มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

## 2. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ

จากที่กล่าวมาแล้วว่ามีพลาสติกสังเคราะห์ประเภทพอลิเอสเทอร์สามารถถูกย่อยสลายได้ นั้น จะต้องมีการสร้างเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ และนอกจากนี้ยังมีพอลิเมอร์อีกหลายตัว เช่น พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก ( block copolymer ) และพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟท์ ( graft copolymer ) ของอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งก็เป็นความพยายามของนักวิทยาศาสตร์ ที่ต้องการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผลิตได้ให้ดีขึ้น

นอกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่กล่าวมาแล้ว ยังมีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง มอนอเมอร์ที่ใช้ทั่วไป เช่น เอทิลีน หรือ สไตรีน กับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น อะคริลิกแอซิด ( acrylic acid ) อะคริลาไมด์ ( acrylamide ) หรือ ไวนิลอะซิเตต ( vinyl acetate ) จะทำให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติในการย่อยสลายดีขึ้น เช่น เอทิลีน - อะคริลิกแอซิด โคพอลิเมอร์ ( ethylene acrylic acid copolymer )

พอลิเมอร์สังเคราะห์ตัวอื่น ๆ ที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ เช่น ไฮโดรไลซ์อะคริโลไนไตรล์ โคพอลิเมอร์ ( hydrolyzed acrylonitrile copolymer ) ซึ่งเป็น สารพอลิเมอร์ที่มีสมบัติดูดซึมน้ำ เป็นต้น

## 3. การศึกษานำสารเติมแต่งใส่ลงในพลาสติกเพื่อปรับปรุงให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ

วิธีการนี้จะแตกต่างจาก 2 วิธีที่กล่าวมาแล้ว โดยจะทำการศึกษาเพื่อนำสารเติมแต่งใส่ลงในพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งจะทำให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ สารเติมแต่งที่ได้รับความสนใจทำการศึกษากันมาก ได้แก่ แป้ง

*การเติมแป้งเพียงอย่างเดียวลงในพลาสติกโดยไม่ใส่สารเติมแต่งชนิดอื่น*

พลาสติกประเภทนี้ จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้ง ทำให้เหลือโครงสร้างของพลาสติกในรูปโครงสร้างแบบรูพรุน ( porous structure ) ต่อมาก็จะกลายเป็นผงละเอียด ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ พลาสติกที่ใช้ส่วนมากจะเป็นเทอร์โมพลาสติก พลาสติกชนิดนี้สามารถทำการผลิตได้โดยใช้กระบวนการผลิตแบบเดิมได้ โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเครื่องจักร

*การเติมแป้งผสมกับสารเติมแต่งบางประเภท*

เช่น กรดไขมัน ( fatty acid ) และเอสเทอร์ของกรดไขมัน ( fatty acid ester ) เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ต้องเป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งจะมีพันธะคู่อย่างน้อยหนึ่งตัว เช่น อัลคีนิล เอสเทอร์ ( alkenyl ester ) หรือ ไขมันธรรมชาติ ( natural fats ) พลาสติกชนิดนี้มีการสลายตัวเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจุลินทรีย์จะเข้าไปทำการ

ย่อยสลายแบ่งจนหมด เหลือไว้เฉพาะเนื้อพลาสติกที่ง่ายต่อการทำลายและมีพื้นที่ผิวมาก  
ชั้นตอนที่สอง กลือของโลหะในดินหรือน้ำ บริเวณที่สัมผัสกับพลาสติก จะเป็นตัวเร่ง  
ปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ด้วยตัวเอง ( autooxidation ) สารเติมแต่ง  
ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง เช่น กรดไขมัน โดยจะเกิดเป็น  
เปอร์ออกไซด์ และ / หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์ขึ้น เปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวการ  
สำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ และเป็นผลทำให้น้ำหนัก  
โมเลกุล ของพอลิเมอร์ลดลงจนกระทั่งมีน้ำหนักโมเลกุลเพียงพอที่จุลินทรีย์จะสามารถ  
ย่อยสลายได้ โดยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของ  
จุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

ในกระบวนการผลิตพลาสติกชนิดนี้ ควรจะมีเอสเทอร์ของกรดไขมันอยู่ในส่วน  
ผสม เนื่องจากมีสมบัติในการดูดซับสารเคมีบนผิวของอนุภาคแบ่ง ( chemisorption )  
และพบว่ากรดไขมันจะถูกดูดซับบนผิวของอนุภาคแบ่ง ดังนั้นจะต้องใส่เอสเทอร์ของ  
กรดไขมันลงไป เนื่องจากเอสเทอร์ของกรดไขมันจะมีความสามารถในการเข้ากันได้กับ  
เทอร์โมพลาสติกมากกว่ากรดไขมัน

#### การเติมแบ่งผสมกับสารเชื่อมโยง

งานวิจัยของมหาวิทยาลัยเปอร์โตริโก ได้นำแบ่งมาผสมกับพอลิสไตรีน แล้วเติม  
สารช่วยในการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิสไตรีนกับโมเลกุลของแบ่ง ทำให้สายโซ่  
โมเลกุลของแบ่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพลาสติก

นอกจากการนำแบ่งมาใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติกแล้ว ยังมีการศึกษาใช้สาร  
ตัวเติมอีกหลายชนิดที่สามารถย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ และสามารถผสมเข้ากันได้กับ  
พลาสติก เช่น การนำพอลิเมอร์รวมแบบกราฟท์ของแบ่งกับพอลิอะครีโลไนไตรล์  
หรือพอลิเมทิลเมทาอะครีเลตมาใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ หรือการนำ  
วัสดุทั้งทางการเกษตรมาใช้เป็นสารตัวเติมในพลาสติก เป็นต้น

### 2.7.2. พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยแสง ( Photodegradable plastics )

เป็นพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้เมื่อได้รับแสง ซึ่งพลาสติกชนิดนี้จะมีหมู่คาร์บอนิล  
( carbonyl group ) เมื่อได้รับแสงอาทิตย์ จะสามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สายโซ่  
โมเลกุลของสารพอลิเมอร์สลายตัว ดังนั้นถ้านำพลาสติกชนิดนี้ไปทิ้งไว้กลางแจ้งหลังจากการใช้  
งานแล้ว โดยปล่อยให้โดนแสงอาทิตย์ พลาสติกชนิดนี้จะเสื่อมสภาพและค่อย ๆ สลายตัวไป

### 2.7.3. พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีการอื่น ๆ

พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยวิธีการอื่น ๆ ยังมีอีกมากมายหลายชนิด เช่น พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้โดยน้ำ และพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ทั้งทางชีวภาพและแสง เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ดังกล่าวเป็นสิ่งที่น่าสนใจมาก เพราะเป็นการรวมเอาข้อดีของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้แต่ละวิธีเอาไว้ เช่น พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย เอโซอะโรมาติก ( azoaromatic ) และหมู่คีโต ( keto groups ) ที่ไวต่อแสง ในระหว่างใช้งาน หมู่เอโซ ( azo ) จะช่วยป้องกันการสลายตัวเนื่องจากแสง และหลังจากการเลิกใช้งานแล้ว พลาสติกชนิดนี้จะถูกทิ้งไว้ในสิ่งแวดล้อม ทำให้หมู่เอโซถูกจุลินทรีย์เข้าทำลาย และเหลือหมู่ที่สามารถสลายตัวเนื่องจากแสง ดังนั้นเมื่อทิ้งไว้กลางแจ้งจะสามารถสลายตัวได้ต่อไป

## 2.8 การสลายตัวของพลาสติกในทางชีวภาพ

การสลายตัวได้ในทางชีวภาพของพลาสติกมี 3 ลักษณะ คือ

1. พลาสติกไม่ได้เสื่อมสลายเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่น ๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุน และต่อไปก็จะกลายเป็นผงละเอียด
2. การเสื่อมสลายที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง ( autooxidation ) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายต่อ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำต่อไป
3. การเสื่อมสลายเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นได้โดยตรง เช่น พอลิคาร์โพรแลคโตน และ พอลิไฮดรอกซีบีวที่เรทอาร์เรท เป็นต้น

## 2.9 ข้อบกพร่องของพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ

พลาสติกชนิดนี้แม้จะมีข้อดีอยู่มากมาย แต่ก็มีข้อบกพร่องอยู่บ้าง ซึ่งจะต้องมีการศึกษาวิจัยต่อไป สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

### 1. เพิ่มต้นทุนการผลิต

เนื่องจากการเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการผลิต เช่น ขั้นตอนการผสมสารเติมแต่งกับพลาสติก และกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกที่สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เลย การเพิ่มขึ้นตอนในกระบวนการผลิตเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพมีราคาแพงขึ้น ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผู้บริโภค

### 2. พลาสติกที่สามารถสลายตัวเพียงบางส่วน อาจก่อให้เกิดปัญหา

คือ เมื่อพลาสติกชนิดนี้ถูกทิ้งลงบนพื้นดิน และตามถนนหนทางต่าง ๆ ในที่สาธารณะเป็นระยะเวลาานาน พลาสติกดังกล่าวจะเกิดการย่อยสลายขึ้นเป็นบางส่วน โดยการสลายตัวเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ พลาสติกดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นรูพรุนบ้าง และเป็นผงละเอียดบ้าง ทำให้เกิดเป็นภาพที่ไม่สวยงามต่อผู้พบเห็น และยากต่อการตามเก็บทำลายเป็นอย่างยิ่ง

### 3. การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในระหว่างการสลายตัวของพลาสติก

การสลายตัวของพลาสติกโดยจุลินทรีย์ จะเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีและเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารมัธยันต์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมาก ถึงแม้จะค่อนข้างแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่จะให้ความมั่นใจได้อย่างไร สารมัธยันต์ที่อยู่ในธรรมชาติจะไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปเป็นสารอื่นที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมที่ร้ายแรงยิ่งกว่าพลาสติกที่ใช้โดยทั่วไป

### 4. ระยะเวลาในการสลายตัว

เวลาที่ใช้ในการสลายตัวของพลาสติกแต่ละชนิด จะขึ้นอยู่กับความหนาของผลิตภัณฑ์พลาสติก ดังนั้นหากนำพลาสติกดังกล่าวไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนามาก ๆ จะทำให้การสลายตัวของพลาสติกใช้เวลายาวนาน

### 5. อาจจะเป็นการส่งเสริมให้มีการทิ้งขยะกันอย่างไม่ระมัดระวัง

การใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ อาจช่วยส่งผลให้ผู้บริโภคคิดอยู่เสมอว่าพลาสติกชนิดนี้สามารถสลายตัวได้ ดังนั้นจะทิ้งที่ใดก็ได้เหมือนกัน ก็จะทำให้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะพลาสติกอาจจะทวีความรุนแรงมากขึ้น

## 6. ขัดขวางการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

เป็นการลำบากที่จะทำการคัดแยกพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้กับพลาสติกที่ใช้ทั่วไปออกจากกัน เพราะกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของพลาสติกทั้งสองชนิดนี้แตกต่างกัน ดังนั้นการนำพลาสติกชนิดนี้มาใช้งาน จะต้องมีการทำเครื่องหมายให้เห็นได้อย่างเด่นชัด เพื่อความสะดวกในการคัดแยกพลาสติก และเพื่อเป็นการบอกให้ผู้บริโภคทราบว่า ผลิตภัณฑ์ชนิดใดใช้พลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ

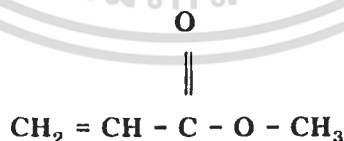
### 2.10 การนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ของพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้

ในอดีตพลาสติกชนิดนี้ไม่สามารถที่จะนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ แต่ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถนำพลาสติกชนิดนี้กลับมาใช้ได้แล้ว โดยบริษัท Resource Plastics Corp. ในประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นบริษัทแรกที่สามารถนำพลาสติกที่มีส่วนผสมของแป้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้ จึงนับว่าเป็นประโยชน์ในการลดความสูญเสียได้อย่างมาก

### 2.11 เมทิลอะคริเลต (methyl acrylate, MA)

เป็นมอนอเมอร์ที่มีสถานะเป็นของเหลว มีกลิ่นเหม็นแสบจมูก (acid odor) มวลโมเลกุลเท่ากับ 86.09 ความหนาแน่น 0.95 g / ml เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ง่าย เมื่อทิ้งไว้สัมผัสกับความชื้น แสง หรือออกซิเจน เมื่อเป็นพอลิเมอร์จะมีลักษณะโปร่งใส ยืดหยุ่นได้ ไม่มีกลิ่น ทนต่อตัวทำละลาย โดยทั่วไปสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม เคลือบหนัง เคลือบกระดาษ หรือพลาสติก

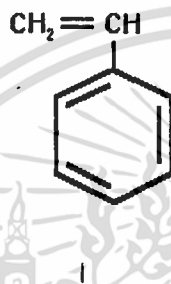
เมทิลอะคริเลตมีสูตรโครงสร้างดังนี้



## 2.12 สไตรีน ( styrene , S )

เป็นมอนอเมอร์ที่มีสถานะเป็นของเหลว มีกลิ่นเหม็น มวลโมเลกุลเท่ากับ 104 ความหนาแน่น 1.05 g / ml เมื่อเป็นพอลิเมอร์จะมีลักษณะแข็ง เปราะ ดูดซึมน้ำได้น้อย ใสเหมือนแก้ว ไม่มีกลิ่น ทนต่อแอลกอฮอล์ กรด ต่าง ไขมัน น้ำมัน และสารละลายเกลือ แต่ไม่ทนต่อน้ำมันเบนซิน และตัวทำละลาย PS จะไวต่อเปลวไฟ ถ้าถูกเผาไหม้โดยเปลวไฟ จะให้เขม่าออกมา

สไตรีนมีสูตรโครงสร้างดังนี้



## 2.13 การกราฟท์โคพอลิเมอร์เซชันบนแป้ง (Graft Copolymerization on Starch)

การกราฟท์โคพอลิเมอร์เซชันส่วนใหญ่ จะเกิดผ่านกลไกไอออนแรดิคัล ( radical ion mechanism ) โดยที่การเกิดปฏิกิริยากราฟท์จะเกิดได้ทั้งโคพอลิเมอร์เซชัน และ โฮโมพอลิเมอร์เซชัน มีวิธีการหลายวิธีในการที่จะทำให้เกิดฟรีแรดิคัล ( free radical ) บนสายของโซ่พอลิเมอร์ เช่น ใช้แสง รังสี หรือสารเคมี

วิธีการพอลิเมอร์เซชัน โดยทั่วไปมี 4 วิธี คือ

### 1. บัลค์พอลิเมอร์เซชัน ( bulk polymerization )

นำมอนอเมอร์มาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันโดยไม่ใช้ตัวทำละลายหรือตัวทำให้อุ่น

### 2. พอลิเมอร์เซชันในสารละลาย ( solution polymerization )

นำมอนอเมอร์มาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น เบนซีน ( benzene ) ทอลูอีน ( toluene ) คลอโรฟอร์ม ( chloroform ) เป็นต้น พอลิเมอร์ที่ได้อาจจะละลายในตัวทำละลาย หรืออาจตกตะกอนออกจากสารละลายได้

### 3. พอลิเมอไรเซชันในอิมัลชัน ( emulsion polymerization )

นำมอนอเมอร์ไปทำให้เกิดอิมัลชันในของเหลวที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เกิดเป็นหยดเล็ก ๆ ลอยอยู่

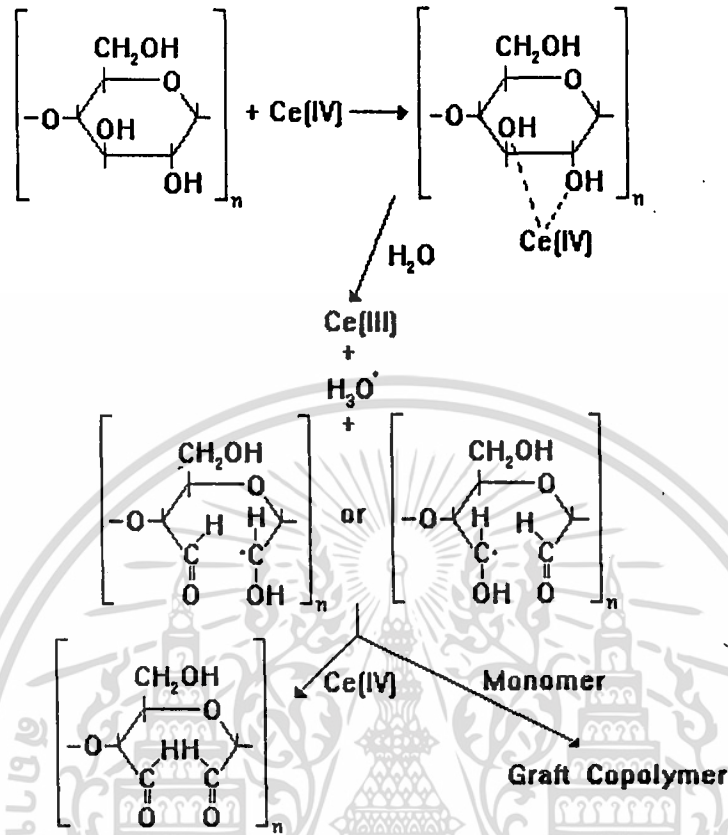
### 4. พอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย ( suspension polymerization )

นำมอนอเมอร์มาแขวนลอยในของเหลวที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยไม่ต้องมีสารลดความตึงผิว แต่รักษาสภาพหยดน้ำมันไว้ โดยอาศัยการเขย่ากวน ( mechanical agitation )

เนื่องจากแบ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาว มีกิ่งก้านสาขาขนาดใหญ่ จึงละลายได้ยาก เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่นี้เอง ทำให้โมเลกุลของตัวทำละลายเข้าล้อมรอบได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการกราฟท์โคพอลิเมอไรเซชันบนแบ่ง จึงมักจะใช้วิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย การกราฟท์โคพอลิเมอไรเซชันบนแบ่ง จะเกี่ยวข้องกับการเติมมอนอเมอร์ที่ไม่อิมัลส์ไปบนส่วนที่เป็นแรติคัลอิสระบนสายของแบ่ง การทำให้เกิดแรติคัลอิสระบนสายของแบ่งนั้นมักใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา ( initiator ) โดยตัวริเริ่มที่ใช้ในการวิจัยนี้มี 2 ตัว คือ



1. ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต ซึ่งกลไกของปฏิกิริยาเป็นดังนี้

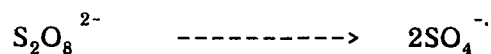


รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการเริ่มต้นปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันบนแบ่งด้วยไอออนซีริก

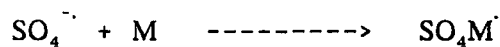
ในขั้นแรกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนซีริก (ceric ion, Ce(IV)) กับหมู่ไฮดรอกซี (hydroxy group) ที่อยู่ติดกันที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 2 และ 3 แล้วเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยที่พันธะระหว่างคาร์บอน 2 และ 3 แตกเป็นแรดิคัลอิสระ และหมู่อัลดีไฮด์ อีกด้านหนึ่ง ต่อจากนั้นอาจจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ 2 ทาง คือ อาจทำปฏิกิริยากับไอออนซีริก ต่อได้เป็นไดอัลดีไฮด์ (dialdehyde) หรืออาจทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์เกิดกราฟท์โคพอลิเมอร์

## 2. โพลีเอทิลีนเพอร์ซัลเฟต ซึ่งกลไกของปฏิกิริยาเป็นดังนี้

### 1. การแตกตัวของตัวริเริ่ม ( Initiator dissociation )



### 2. ปฏิกิริยาเริ่ม ( Initiation reaction )



เนื่องจากในระบบมีน้ำเป็นตัวทำละลายอยู่ด้วย ดังนั้นซัลเฟตไอออนอนุมูลอิสระ ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ) สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮดรอกซีอนุมูลอิสระ ( hydroxy radical ) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ได้ดังสมการ



### 3. ปฏิกิริยาการเจริญเติบโต ( Propagation reaction )



### 4. ปฏิกิริยาขั้นสิ้นสุด ( Termination )

#### 4.1 แบบรวมตัว ( Combination )

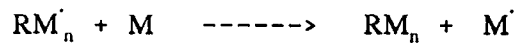


#### 4.2 Disporprotination reaction

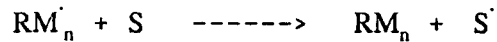


#### 4.3 แบบย้ายสายโซ่อนุมูลอิสระ ( Transfer reaction )

- ย้ายสายโซ่อนุมูลอิสระไปที่มอนอเมอร์ ( transfer to monomer )



- ย้ายสายโซ่อนุมูลอิสระไปที่ตัวทำละลาย ( transfer to solvent )



- ย้ายสายโซ่อนุมูลอิสระไปที่พอลิเมอร์ ( transfer to polymer )



- ย้ายสายโซ่อนุมูลอิสระไปที่ตัวย้ายสายโซ่ ( transfer to chain transfer )



- ย้ายสายโซ่อนุมูลอิสระไปที่ตัวริเริ่ม ( transfer to initiator )



การใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาควรคำนึงถึงชนิดของมอนอเมอร์ร่วม ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เหมาะสมควรแตกพันธะในโมเลกุลแล้วได้โมเลกุลอนุมูลอิสระที่่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ตัวริเริ่มอาจเป็นแบบที่พันธะแตกออกเนื่องจากความร้อน ( thermal - induced dissociation initiator ) หรือเป็นตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ ( redox initiator ) เช่น โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เป็นต้น และโดยส่วนใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต
1. แป้งมันสำปะหลัง	ตราดอกไม้	Thai - Wah Co., Ltd.
2. เมทิลอะคริเลต	การค้า	-
3. สไตรีนมอนอเมอร์	การค้า	-
4. ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรด	วิเคราะห์	Sigma Chemical Co., Ltd.
5. โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	วิเคราะห์	Fluka
6. กรดไนตริก	วิเคราะห์	J.T Baker Inc.
7. กรดอะซิติก	วิเคราะห์	Merck
8. กรดเปอร์คลอริก	วิเคราะห์	J.T Baker Inc.
9. อะซิโตน	การค้า	Merck
10. เมทานอล	วิเคราะห์	J.T Baker Inc.
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์	วิเคราะห์	J.T Baker Inc.
12. เตรดตระไฮโดรฟิวแรน	วิเคราะห์	J.T Baker Inc.
13. โพแทสเซียมโบรไมด์	วิเคราะห์	Fluka
14. แกสไนโตรเจน	การค้า	Thai Industrial Gas
15. ไนโตรเจนเหลว	การค้า	Thai Industrial Gas

### 3.2 อุปกรณ์

1. หม้อปฏิกิริยา ขนาด 2000 มิลลิลิตร บริษัท PYREX จำกัด
2. ไบพัตกวน 3 ชั้น
3. มอเตอร์ชนิดความเร็วรอบสูง
4. อ่างน้ำร้อน ( water bath ) พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รุ่น B - 480  
บริษัท Buchi จำกัด
5. เครื่องอินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ( Infrared Spectrophotometer , IR ) รุ่น IR - 810  
บริษัท Jasco จำกัด
6. เครื่องดีฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งคาลอริมิเตอร์ ( Differential Scanning Calorimeter ,  
DSC ) รุ่น DSC - 50 บริษัท Shimadzu จำกัด
7. เครื่องเจล เพอร์มิเอชัน โครมาโตกราฟี ( Gel Permeation Chromatography , GPC )  
รุ่น WATERS 150 - C บริษัท Water Associates จำกัด
8. เครื่องกรองสุญญากาศ ( buchner ) รุ่น A - 35 บริษัท Tokyo Rikakikai จำกัด
9. เครื่องอบแห้งแบบแช่แข็ง ( Freeze dryer ) รุ่น FD - 1 Eyda  
บริษัท Tokyo Rikakikai จำกัด
10. เครื่องกวนเชิงกลระบบแม่เหล็ก รุ่น RC 1 บริษัท IKA - Labortechnik จำกัด
11. เครื่องไมพลาสติก รุ่น NEMA A600 บริษัท Bosco Engineering จำกัด
13. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ( Two rolls mill ) รุ่น LRM 110  
บริษัท Lab Tech Engineering จำกัด
14. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง รุ่น LR 30K บริษัท LLOYD Instrument จำกัด
15. กระดาษกรอง เบอร์ 1 บริษัท Whatman International จำกัด
16. Cellulose Extraction Thimbles บริษัท Whatman International จำกัด
17. อุปกรณ์ soxhlet
18. เครื่องแก้ว
19. ตู้อบ

### 3.3 วิธีเตรียมสารละลาย

3.3.1 การเตรียมสารละลายซีริกแอมโมเนียมไนเตรต เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 1 โมลาร์

ละลายซีริกแอมโมเนียมไนเตรต 54.82 กรัม ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร เขย่าจนซีริกแอมโมเนียมไนเตรดละลายหมด

3.3.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์

ละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 27.2 กรัม ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร เขย่าจนโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟดละลายหมด

3.3.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ในน้ำกลั่นที่ต้มจนเดือดและปล่อยให้เย็น คนจนโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายหมด

### 3.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม

3.4.1 วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแบง์มันสำปะหลังกับเมทิลอะคริเลต โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต เป็นตัวริเริ่ม

ชั่งแบง์มันสำปะหลัง 120 กรัม ผสมน้ำกลั่น 1500 มิลลิลิตร ในหม้อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งผ่านแก๊สไนโตรเจน บันจันได้เจลใส เป็นเวลาประมาณ 45 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

เติมเมทิลอะคริเลต พร้อมกับปั่นตลอดเวลา หลังจากเติมมอนอเมอร์แล้ว 10 นาที เติมนสารละลายซีริกแอมโมเนียมไนเตรดเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องผ่านแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา บันต่อไปเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ซึ่งน้ำหนักแล้วจึงนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง บดให้ละเอียด เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อถนอมความชื้น

3.4.2 วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับเมทิลอะคริเลต โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่ม

ซึ่งแป้งมันสำปะหลัง 120 กรัม ผสมน้ำกลั่น 1500 มิลลิลิตร ในหม้อปฏิริยาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งผ่านแก๊สไนโตรเจน บันจันได้เจลใส เป็นเวลาประมาณ 45 นาที หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นจนได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เติม NP-40 น้ก 20 กรัม บันตลอดเวลาเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเติมเมทิลอะคริเลต บันต่อเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 โมลาร์ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องผ่านแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา บันต่อไปเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ซึ่งนำหนักแล้วจึงนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งนำหนักอีกครั้ง บดให้ละเอียด เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์เพื่อกันความชื้น

3.4.3 วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับสไตรีน โดยใช้ซีริคแอมโมเนียมไนเตรด เป็นตัวริเริ่ม

เหมือนข้อ 3.4.1 โดยใช้สไตรีน และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิริยาเป็น 60 องศาเซลเซียส

3.4.4 วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลังกับสไตรีน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่ม

เหมือนข้อ 3.4.2 โดยใช้สไตรีน

### 3.5 การสกัดโฮโมพอลิเมอร์ ( homopolymer ) ด้วยเทคนิค acetone extraction

บดพอลิเมอร์รวมที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 , 3.4.2 , 3.4.3 , 3.4.4 ให้ละเอียด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียด

นำสารที่อบแห้งแล้วประมาณ 2 - 3 กรัม มาทำการสกัดด้วยเทคนิค acetone extraction โดยใช้สารละลาย acetone กลั่นแล้ว 150 มิลลิลิตร ใช้เวลาในการสกัด 48 ชั่วโมง จะได้สารที่ต้องการ 2 ส่วน

ส่วนที่ 1 อบตะกอนที่เหลือในทิมเบิล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียด แล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ส่วนที่ 2 สารละลายในขวดก้นกลม นำไประเหยตัวทำละลายด้วยชุดระเหยแบบลดความดัน หลังจากนั้นนำไประเหยตัวทำละลายซ้ำด้วยเครื่อง Freeze dryer เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียด แล้วเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.6 การตัดสายโซ่พอลิเมอร์ออกจากสายโซ่ของแป้งด้วยเทคนิค acid hydrolysis

นำตะกอนที่ได้จากข้อ 3.5 ส่วนที่ 1 ซึ่งน้ำหนักโดยละเอียดประมาณ 1 กรัม ละลายใน glacial acetic ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ตั้งบน hot plate อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งปั่นกวนด้วยชุดปั่นกวนแบบแม่เหล็ก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่อย ๆ เติมสารละลายกรดเปอร์คลอริก 60 % ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่ละลายให้หมดภายในเวลา 1 - 2 นาที จะได้สารละลายใส

นำสารละลายใสที่ได้ไปตกตะกอนในน้ำกลั่นที่เย็น กรองตะกอนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วนำไปตกตะกอนซ้ำ ด้วยการนำตะกอนที่ได้ละลายด้วยสารละลาย acetone พร้อมทั้งปั่นกวนด้วยชุดปั่นกวนแบบแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายขุ่น นำมาตกตะกอนด้วยสารละลายเมทานอลที่เย็น กรองตะกอน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียด

### 3.7 การศึกษาน้ำหนักโมเลกุล

นำตะกอนจากข้อ 3.6 ซึ่งน้ำหนักโดยละเอียดประมาณ 60 มิลลิลิตร ละลายในสารละลาย tetrahydrofuran ( THF ) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร โดยปั่นกวนด้วยชุดปั่นกวนแบบแม่เหล็ก ที่อุณหภูมิห้อง จนได้สารละลายใส หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้นี้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GPC

### 3.8 การศึกษาอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของพอลิเมอร์ร่วม

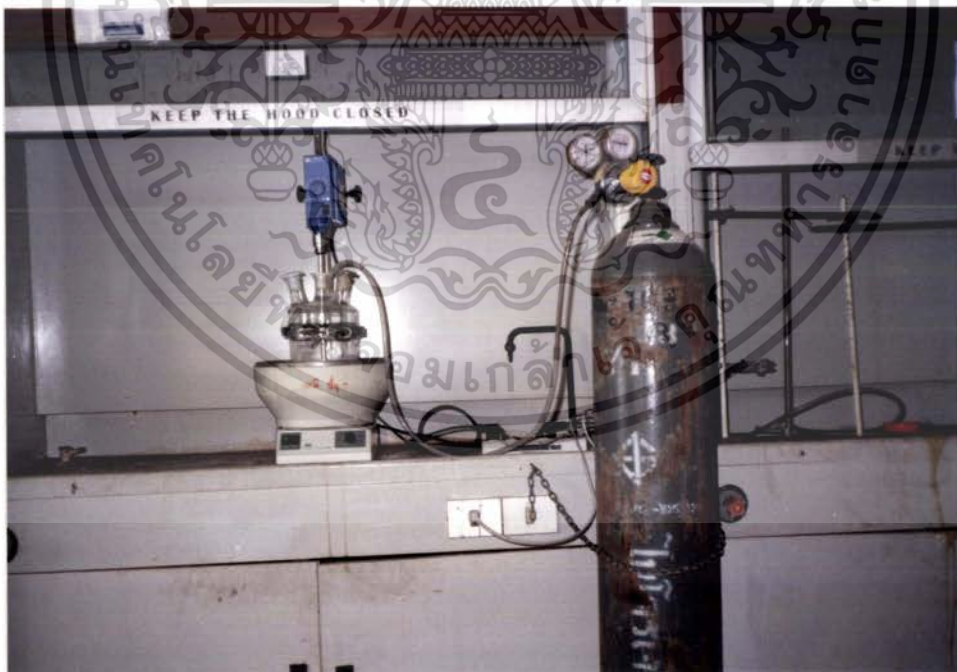
นำสารที่ผ่านการสกัดด้วยเทคนิค acetone extraction จากข้อ 3.5 มาวิเคราะห์หาค่า  $T_g$  ด้วยเครื่อง DSC

### 3.9 การตรวจสอบหาหมู่ทำหน้าที่

นำสารจากข้อ 3.5 ส่วนที่ 1 มาวิเคราะห์หาหมู่ทำหน้าที่ด้วยเครื่อง IR โดยใช้เทคนิค KBr Disk

### 3.10 การหาปริมาณความชื้นในพอลิเมอร์ร่วม

อบกระดาษฟอยด์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารที่ได้จากข้อ 3.4.1 , 3.4.2 , 3.4.3 , 3.4.4 ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียด นำมาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักอย่างละเอียด



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดอุปกรณ์การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อ



รูปที่ 3.2 แสดงการจัดอุปกรณ์ soxhlet เพื่อสกัดไฮโมพอลิเมอร์



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องบดสองลูกกลิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารและสภาวะการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อ

ชนิดมอนอเมอร์	ซีริคแอมโมเนียมไนเตรด 100 ml				โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ( 100 ml )				
	แป้ง ( กรัม )	มอนอเมอร์ ( กรัม )	น้ำ ( ml )	อุณหภูมิ ( °C )	แป้ง ( กรัม )	มอนอเมอร์ ( กรัม )	น้ำ ( ml )	อุณหภูมิ ( °C )	NP - 40 ( กรัม )
เมทิลอะครีเลต	120	38	1500	35	120	38	1500	60	20
	120	64	1500	35	120	64	1500	60	20
	120	127	1500	35	120	127	1500	60	20
	120	190	1500	35	120	190	1500	60	20
สไตรีน	120	46	1500	60	120	46	1500	60	20
	120	77	1500	60	120	77	1500	60	20
	120	154	1500	60	120	154	1500	60	20
	120	230	1500	60	120	230	1500	60	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

เมื่อสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบต่อได้แล้ว นำผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมาตรวจสอบสมบัติที่สำคัญและสมบัติเชิงกล ได้ผลดังนี้

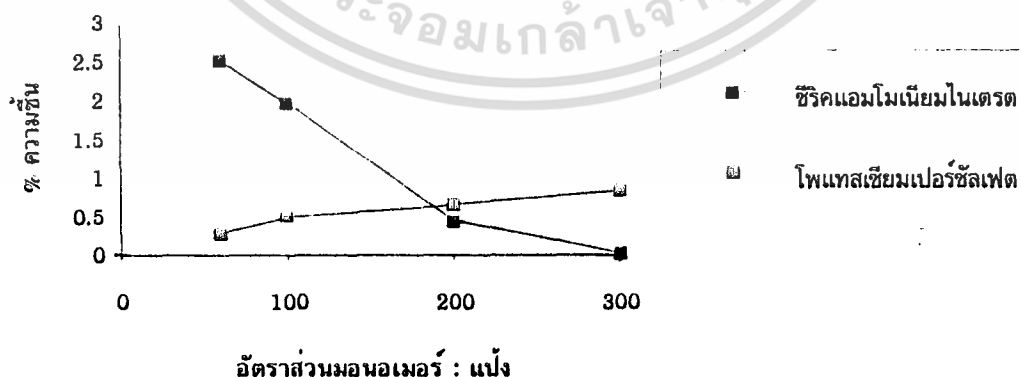
#### 4.1 การตรวจสอบสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์ร่วมแบบต่อของแป้งมันสำปะหลัง

##### 4.1.1 การศึกษาปริมาณความชื้นในพอลิเมอร์ร่วม

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PMA

อัตราส่วนมอโนเมอร์ต่อแป้ง (% โมล)	ปริมาณความชื้นของ S - g - PMA (%)	
	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
60	2.5145	0.2886
100	1.9784	0.5158
200	0.4536	0.6723
300	0.0379	0.8624

รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PMA



จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแบง์มันสำปะหลัง โดยใช้ในกรณีที่ใช้ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณความชื้นในพอลิเมอร์รวมจะลดลง พิจารณาค่า AGU / chain จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อใช้ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ค่า AGU / chain จะต่ำ นั่นคือ พอลิเมอร์รวมที่ได้จะมีความถี่ของ side chain มาก เนื่องจากซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต มีความว่องไวในการกำเนิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของแบง์มาก ส่งผลให้สมบัติความไม่ชอบน้ำ ( hydrophobic ) สูงขึ้น ดังนั้นปริมาณความชื้นจึงลดลง

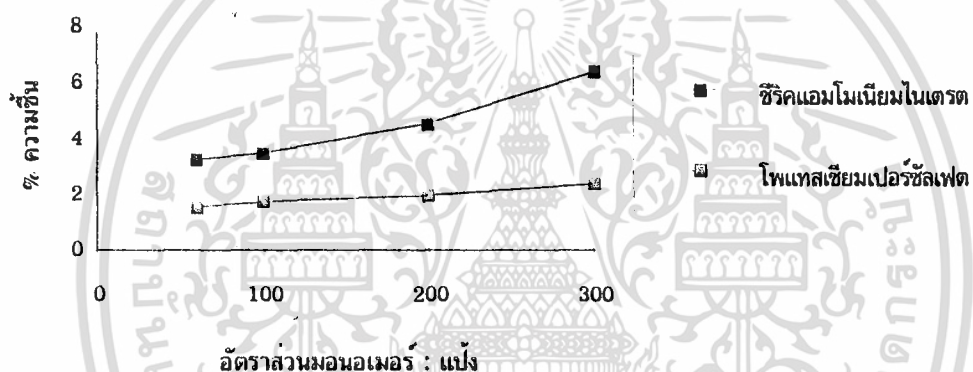
ในกรณีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณความชื้นในพอลิเมอร์รวมจะมีค่าใกล้เคียงกันคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตมีความว่องไวในการกำเนิดอนุมูลอิสระบนสายโซ่ของแบง์ต่ำ พอลิเมอร์รวมที่ได้จะมีความถี่ของ side chain น้อย ส่งผลให้สมบัติความชอบน้ำ ( hydrophilic ) สูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถจับโมเลกุลของน้ำได้ดี ปริมาณความชื้นจึงมีแนวโน้มสูงขึ้น



ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PS

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ปริมาณความชื้นของ S - g - PS (%)	
	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
60	3.2017	1.4899
100	3.4337	1.6732
200	4.5129	1.9155
300	6.3472	2.3737

รูปที่ 4.2 แสดงปริมาณความชื้นของ S - g - PS



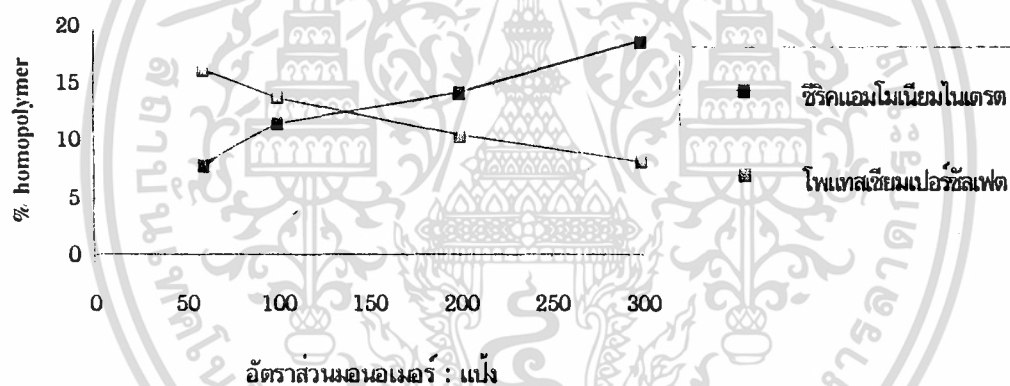
จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อใช้ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต หรือโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ปริมาณความชื้นไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจาก โมเลกุลของพอลิสไตรีนเองมีขนาดใหญ่ ความเกาะกะของโมเลกุลจึงส่งผลให้ side chain มีขนาดไม่ยาวนัก ความเป็นขั้วเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาต่างชนิดกัน จึงไม่มีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นปริมาณความชื้นจึงใกล้เคียงกัน

#### 4.1.2 การศึกษาปริมาณ homopolymer ในพอลิเมอร์รวม

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณ homopolymer ของ S - g - PMA

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ปริมาณ homopolymer ของ S - g - PMA (%)	
	ซีริคแอมโมเนียมไนเตรต	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
60	7.82	16.06
100	11.37	13.65
200	14.12	10.36
300	18.59	8.09

รูปที่ 4.3 แสดงปริมาณ homopolymer ของ S - g - PMA

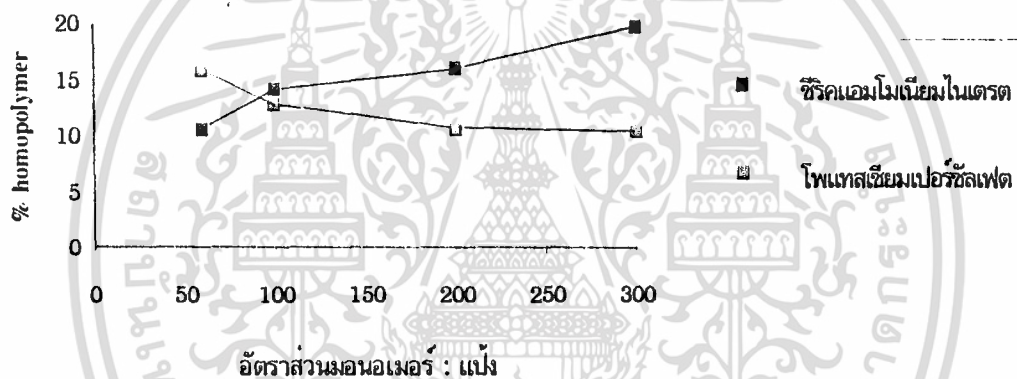


จากตารางที่ 4.3 เนื่องจาก ซีริคแอมโมเนียมไนเตรต มีความว่องไวต่อการกำเนิดอนุมูลอิสระมากกว่าโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ดังนั้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลัง side chain จะยาวขึ้น จึงขัดขวางการเข้าไปเกิดปฏิกิริยาที่สายโซ่หลัก มอนอเมอร์จึงจับตัวกันเอง เกิดเป็น homopolymer มากกว่า ในขณะที่โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตมีความว่องไวได้นั้นคือเสถียรภาพสูงกว่า จึงมีโอกาสเข้าไปทำปฏิกิริยาที่สายโซ่หลักได้มากกว่า ปริมาณ homopolymer จึงมีแนวโน้มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณ homopolymer ของ S - g - PS

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ปริมาณ homopolymer ของ S - g - PS (%)	
	ซีริคแอมโมเนียมไนเตรต	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
60	10.61	15.89
100	14.16	12.83
200	16.02	10.70
300	19.65	10.39

รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณ homopolymer ของ S - g - PS



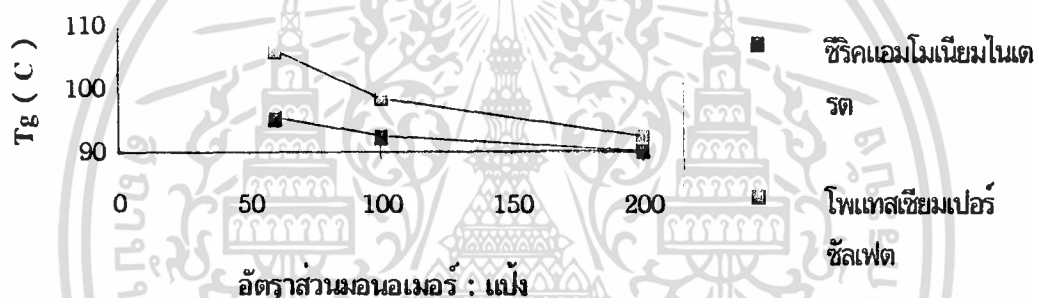
จากตารางที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลัง เมื่อใช้  
 ซีริคแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะมีแนวโน้ม  
 เช่นเดียวกับกรณีของ S - g - PMA

### 4.1.3 การศึกษาอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ร่วม ( Tg )

ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของ S - g - PS

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	อุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของ S - g - PS ( ° C )	
	ซีริคแอมโมเนียมไนเตรต	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต
60	95.4	106.1
100	92.6	98.4
200	90.3	92.6

รูปที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้วของ S - g - PS



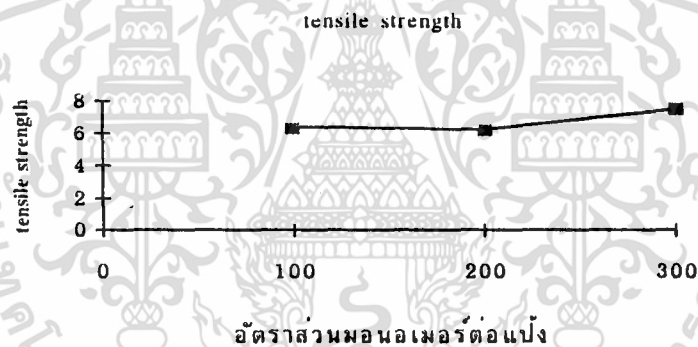
จากตารางที่ 4.5 พบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ค่า Tg มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีค่า Tg สูงกว่า PS การเพิ่มปริมาณ PS จึงเป็นการเพิ่ม soft segment ของพอลิเมอร์ร่วม ค่า Tg จึงลดลง

## 4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์รวม เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่ม

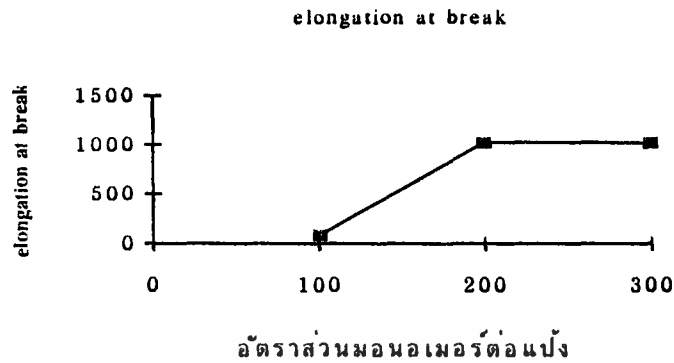
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของ S - g - PMA

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	tensile strength (kN / m <sup>2</sup> )	elongation at break ( % )
100	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	6.401	74.48
200	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	6.228	1027
300	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	7.499	1020
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	7.469	1470

รูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของ S - g - PMA



รูปที่ 4.7 แสดงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ S - g - PMA



จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลัง ค่าความแข็งแรงดึง ( tensile strength ) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ( elongation at break ) จะสูงขึ้น พิจารณาค่า AGU / chain จากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่ออัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น ค่า AGU / chain จะมีค่าลดลง นั่นคือมีความถี่ในการเกิด side chain สูงขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

สำหรับ S - g - PMA เมื่อใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ไม่สามารถขึ้นรูปเพื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบได้

สำหรับ S - g - PS เมื่อใช้ซีริคแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา สามารถขึ้นรูปได้แต่ในกรณีที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะไม่สามารถขึ้นรูปได้ แต่อย่างไรก็ตาม S - g - PS นั้นไม่สามารถทดสอบสมบัติเชิงกลได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งเปราะมากและแตกในหัวจับ ( grip ) ก่อนที่จะขาดเนื่องจากแรงดึง

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า AGU / chain ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PMA และ S - g - PS เมื่อใช้ซีริคแอมโมเนียมไนเตรต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดมอนอเมอร์	W <sub>1</sub> (กรัม)	Mw	AGU / chain
60	เมทิลอะคริเลต	148.77	-	-
100	เมทิลอะคริเลต	178.09	500,623	9,667
200	เมทิลอะคริเลต	228.62	505,938	9,116
300	เมทิลอะคริเลต	280.82	-	-
60	สไตรีน	165.90	-	-
100	สไตรีน	181.92	586,549	9,059
200	สไตรีน	247.85	-	-
300	สไตรีน	281.48	1,056,591	12,906

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า AGU / chain ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PMA และ S - g - PS เมื่อใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดมอนอเมอร์	W <sub>1</sub> (กรัม)	Mw	AGU / chain
60	เมทิลอะคริเลต	164.70	1,648,863	57,776
100	เมทิลอะคริเลต	185.03	1,873,873	46,069
200	เมทิลอะคริเลต	219.11	-	-
300	เมทิลอะคริเลต	282.76	-	-
60	สไตรีน	169.62	959,132	25,892
100	สไตรีน	206.67	1,109,194	23,138
200	สไตรีน	246.53	507,245	6,904
300	สไตรีน	331.07	-	-

W<sub>0</sub> = น้ำหนักแป้ง

W<sub>1</sub> = น้ำหนัก polymer grafted

Mw = น้ำหนักโมเลกุลของ polymer grafted

$$AGU / chain = \frac{W_0 / 162}{W_1 / Mw}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดง % conversion ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PMA โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	% solid content ( theory )	% solid content ( laboratory )	% conversion
60	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	9.2993	8.4627	91.00
100	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	10.6212	9.9828	93.99
200	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	13.6698	12.3781	90.55
300	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	16.5174	14.7028	89.01
60	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	9.7225	8.8646	91.18
100	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	10.9713	9.8213	89.52
200	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	13.8521	11.2537	81.24
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	16.5522	14.0675	84.99

ตารางที่ 4.10 แสดง % conversion ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ S - g - PS โดยใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	% solid content ( theory )	% solid content ( laboratory )	% conversion
60	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	9.7102	9.3942	96.75
100	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	11.2678	10.1233	89.84
200	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	14.9137	13.2256	88.68
300	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	18.2298	14.4351	79.18
60	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	10.0053	8.9937	89.89
100	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	11.4606	10.7811	94.07
200	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	14.8796	12.3637	83.09
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	18.0048	15.9937	88.83

$$\% \text{ conversion} = \frac{\% \text{ solid content ( laboratory )} * 100}{\% \text{ solid content ( theory )}}$$

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการสกัด ungrafted homopolymer ออกจาก S - g - PMA  
เมื่อใช้ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา  
ด้วยเทคนิค acetone extraction

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	น้ำหนักก่อนสกัด ( กรัม )	น้ำหนักหลังสกัด ( กรัม )	% ungrafted homopolymer
60	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.0436	2.8057	7.82
100	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.0884	2.7373	11.37
200	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.0087	2.5840	14.12
300	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.0927	2.5179	18.59
60	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.1728	2.6634	16.06
100	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.2533	2.8093	13.65
200	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.0896	2.7712	10.36
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.2129	2.9531	8.09

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการสกัด ungrafted homopolymer ออกจาก S - g - PS  
เมื่อใช้ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา  
ด้วยเทคนิค acetone extraction

อัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	น้ำหนักก่อนสกัด ( กรัม )	น้ำหนักหลังสกัด ( กรัม )	% ungrafted homopolymer
60	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.1676	2.8316	10.61
100	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.0081	2.5821	14.16
200	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	2.9572	2.4835	16.02
300	ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรต	3.1179	2.5051	19.65
60	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.1561	2.6547	15.89
100	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.0863	2.6904	12.83
200	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.2379	2.8915	10.70
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	3.2376	2.9013	10.39

$$\% \text{ ungrafted homopolymer} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนสกัด} - \text{น้ำหนักหลังสกัด}}{\text{น้ำหนักก่อนสกัด}} * 100$$

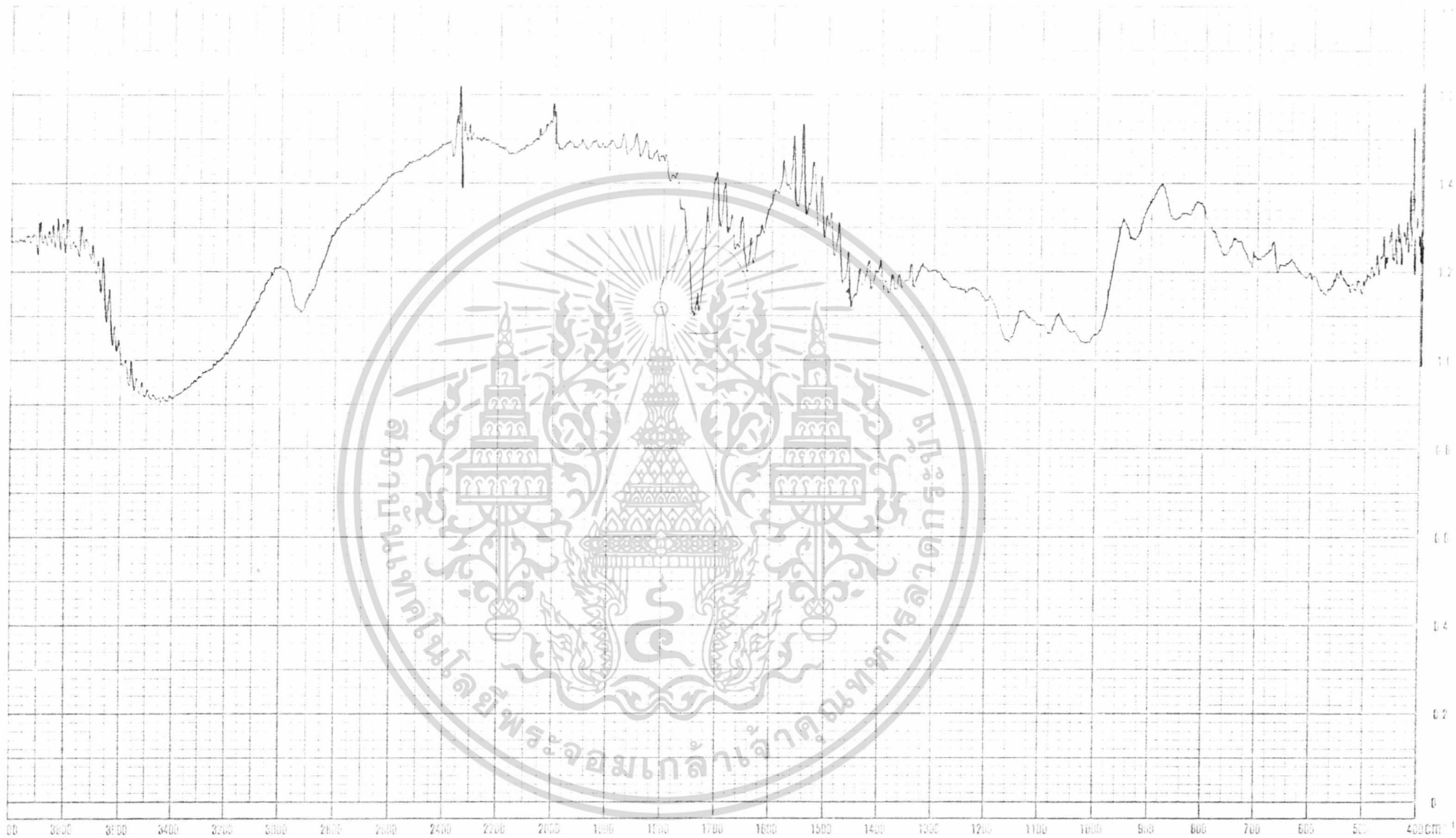
ตารางที่ 4.13 แสดงผลวิเคราะห์หาปริมาณ side chain ของ S - g - PMA  
เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา  
ด้วยเทคนิค acid hydrolysis

อัตราส่วนมอโนเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	น้ำหนักก่อนทำ hydrolysis ( กรัม )	น้ำหนักหลังทำ hydrolysis ( กรัม )	% side chain
60	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0079	0.3029	30.05
100	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0401	0.2527	24.30
200	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0075	0.2110	20.94
300	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0129	0.2005	19.79
60	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0067	0.1539	15.29
100	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0052	0.1896	18.86
200	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0159	0.2544	25.04
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0161	0.2892	28.46

ตารางที่ 4.14 แสดงผลวิเคราะห์หาปริมาณ side chain ของ S - g - PS  
เมื่อใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา  
ด้วยเทคนิค acid hydrolysis

อัตราส่วนมอโนเมอร์ต่อแป้ง ( % โมล )	ชนิดของตัวริเริ่มปฏิกิริยา	น้ำหนักก่อนทำ hydrolysis ( กรัม )	น้ำหนักหลังทำ hydrolysis ( กรัม )	% side chain
60	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0410	0.3427	32.92
100	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0196	0.3131	30.71
200	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.0216	0.2820	27.60
300	ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต	1.1017	0.2954	26.81
60	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0084	0.1939	19.23
100	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0386	0.2047	19.71
200	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0417	0.2575	24.72
300	โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	1.0300	0.2688	26.10

$$\% \text{ side chain} = \frac{\text{น้ำหนักหลังทำ hydrolysis} * 100}{\text{น้ำหนักก่อนทำ hydrolysis}}$$



รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์หาหมู่ทำหน้าที่ของ S - g - PMA ด้วยเครื่อง Infrared Spectrophotometer



รูปที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์หาหมู่ทำหน้าที่ของ S - g - PS ด้วยเครื่อง Infrared Spectrophotometer

จากรูปที่ 4.8 พบว่า S - g - PMA จะปรากฏ peak ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1750\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงความเป็นหมู่คาร์บอนิลเอสเทอร์ ( C = O ) ของเมทิลอะคริเลต

จากรูปที่ 4.9 พบว่า S - g - PS จะปรากฏ peak คู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ  $750\text{ cm}^{-1}$  และ  $700\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงความเป็น monosubstituted aromatics ของสไตรีน

### 4.3 สรุปผลการทดลอง

#### 1. ผลของอัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลัง ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

เมื่ออัตราส่วนมอนอเมอร์ต่อแป้งมันสำปะหลัง เพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้ว่า AGU / chain มีค่าลดลง คือมีการกราฟที่บนสายโซ่หลักถี่ขึ้น ทำให้พอลิเมอร์รวมแบบต่อของแป้งที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น คือ มีค่าความแข็งแรงดึง ( tensile strength ) และ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ( % elongation ) สูงขึ้น

#### 2. ผลของตัวริเริ่มต่อสมบัติเชิงกล

เมื่อใช้ซีรีคแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่ม จะได้ค่า AGU / chain ต่ำกว่าใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต คือ side chain มีการกราฟที่บนสายโซ่หลักถี่กว่า ทำให้สมบัติเชิงกลดีกว่า คือ ค่าความแข็งแรงดึง ( tensile strength ) และ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ( % elongation ) สูงกว่า

## เอกสารอ้างอิง

1. Felix H.Otey, Richard P.Westhoff, and William M.Doane., "Starch-Based Blown Films" Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev. **19** (1980) : 592-595
2. Felix H.Otey, Arthur M.Mark, Charies L.Mehltretter, and Charles R.Russel., "Starch-Based Film for Degradable Agricultural Mulch" Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev. **13** (1974) : 90-92
3. Felix H.Otey and Richard P.Westhoff., "Starch-Based Films, Preliminary Diffusion Evaluation" Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev. **23** (1984) : 284-287
4. Felix H.Otey, Richard P.Westhoff, and Charles R.Russell., "Biodegradable Films from Starch and Ethylene-Acrylic Acid Copolymer" Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev. **16** (1977) :305-308
5. Felix H.Otey, Richard P.Westhoff, and William M.Doane., "Starch-Based Blown Films 2" Ind. Eng. Chem., Res. **26** (1987) : 1659-1663
6. C.E BROCKWAY, "Extractability of Homopolymer of Methyl Methacrylate from Its Graft Copolymers with Starch" Polymer Science : Part A. **2** (1961) : 3733- 3742
7. Damodar R.Patil, Crookston, MN, and George F.Fanta, Peoria., "Synthesis and Processing of Graft Copolymers from Cornstarch and Methyl Acrylate : Physical and Mechanical Properties" J. Starch. **46** (1994) : 142-146
8. Alex M.Henderson and Alfred Rudin., "Effects of Water on Starch-g-Polystyrene and Starch-g-Poly(methyl acrylate) Extrudates" J. Appl. Polym. Sci. **27** (1982) : 4115-4135
9. D.Trimnell, C.L.Swanson, R.L.Shogren, and G.F.Fanta., "Extrusion Processing of Granular Starch-g-Poly(methyl acrylate) : Effect of Extrusion Conditions on Morphology and Properties" J. Appl. Polym. Sci. **48** (1993) : 1665-1675