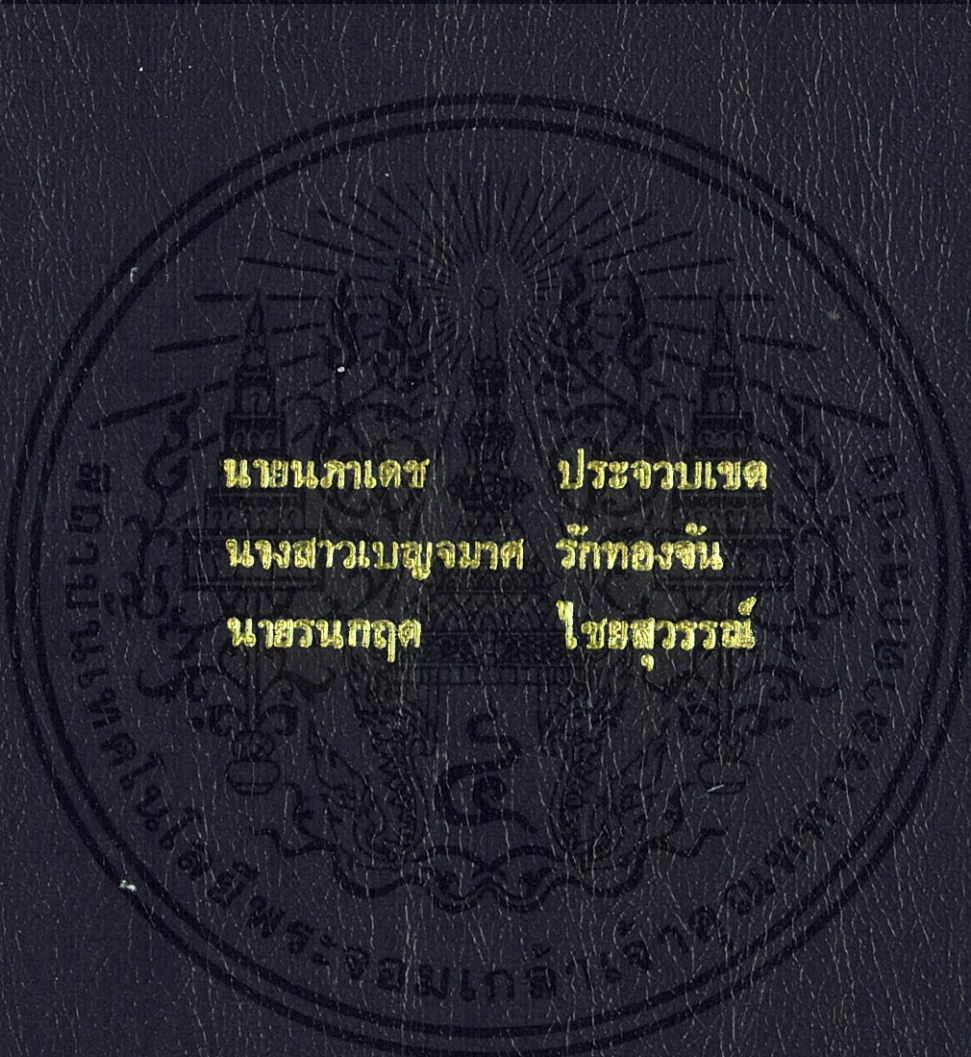


ผลของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่มีต่อ  
เทอร์โมพลาสติกสตาARCH

Effect of calcium dihydrogenphosphate monohydrate on  
thermoplastic starch



นายเนกาเดช      ประจวบเขต  
นางสาวเบญจมาศ      วัคทองจัน  
นาสรนกฤต      ไชยสุวรรณ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ วิทยาลัยราชภัฏบรจ  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
คณะศึกษาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

ผลของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่มีต่อ  
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

Effect of calcium dihydrogenphosphate monohydrate on  
thermoplastic starch



นายภาคช ประจวบเขต  
นางสาวเบญจมาศ รักทองจัน  
นายรณกฤต ไชยสุวรรณ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

**Effect of calcium dihydrogenphosphate monohydrate on  
thermoplastic starch**

**MR. NAPADECH**

**PRAJUABKET**

**MISS. BENJAMAT**

**RAGTONGJUN**

**MR. RONNAKIT**

**CHAISUWAN**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

**IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ ผลของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่มีต่อ  
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช  
Effect of calcium dihydrogenphosphate monohydrate  
on thermoplastic starch

ชื่อนักศึกษา นายภาเคช ประจวบเขต  
นางสาวเบญจมาศ รักทองจัน  
นายรณกฤต ไชยสุวรรณ

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.บรรจง บุญชม	
ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ	
รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่มีต่อเทอร์โมพลาสติกสตาโรล
ชื่อนักศึกษา	นายณภาคช ประจวบเขต นางสาวเบญจมาศ รักทองจัน นายรณกฤต ไชยสุวรรณ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่มีต่อเทอร์โมพลาสติกสตาโรล โดยทำการผสมแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอล ในอัตราส่วน 70:30 เติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตในอัตราส่วน 0,1,2 และ3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) นำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ทดสอบสมบัติการซึมผ่านน้ำ สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไปทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความเหนียวติดเพิ่มขึ้น ขึ้นรูปได้ยากขึ้น สามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น ค่าการรับแรงสูงสุด ค่ามอดูลัส อุณหภูมิการหลอมเหลว (Tm) และค่าร้อยละความเป็นผลึกลดลง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสังเกตรูปลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าสูตรที่เติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์ มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ทำให้การดูดซับน้ำมีแนวโน้มคงที่ ค่าการรับแรงสูงสุด ค่ามอดูลัส และ อุณหภูมิการหลอมเหลว แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต 1 เปอร์เซ็นต์ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต 2 เปอร์เซ็นต์มาทำการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมสารก่อเจล คือ เพกตินที่ปริมาณ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำชิ้นงานไปขึ้นรูปกดอัดแล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเมื่อเติมเพกตินลงไปทำให้ชิ้นงานมีสีเข้มขึ้น ไม่เหนียวติด ปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ดูดซับน้ำได้มากขึ้น ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละความเป็นผลึก และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลง เมื่อสังเกตรูปลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าเพกตินมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกสูตร

**คำสำคัญ** เทอร์โมพลาสติกสตาโรล แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต เพกติน

<b>Title</b>	Effect of calcium dihydrogenphosphate monohydrate on thermoplastic starch
<b>Students</b>	Napadech Prajuabket Benjamat Ragtongjun Ronnakit Chaisuwan
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Somsak Woramongkolchai

### ABSTRACT

This research was aimed to study the effects of thermoplastic starch added with calcium dihydrogenphosphate monohydrate by mixing starch and glycerol in the ratio 70:30. The ratio of added calcium dihydrogenphosphate monohydrate was 0, 1, 2 and 3 %w/w. The compound was then mixed with internal mixer and formed shape with compression molding. The samples were studied to physical and morphology properties. They were tested with water absorption, thermal and mechanical properties. It was found that added calcium hydrogen phosphate monohydrate into thermoplastic starch caused more stickiness, hard to form and enhancing water absorption. In addition, the stress at maximum load, yong's modulus, melt temperature and percent of crystallinity was decreased. Moreover, the percent strain at break was increase. The morphology was revealed that the calcium dihydrogen phosphate monohydrate was penetrated into thermoplastic starch. The 2%w/w of calcium dihydrogen phosphate monohydrate was dominated well dispersion. This was lead to regularly water absorption of calcium hydrogen phosphate monohydrate caused constant water absorption. As maximum value of the modulus and melting temperature were no significant figures. The thermoplastic starch with added calcium hydrogen phosphate monohydrate 2%w/w was selected to improve by the added pectin of 5, 10 and 15%w/w, respectively. It was found that the samples were changed to darkened colors, did not sticky and easily eject from the mould. In addition water absorption, melt temperature, tensile strength, at maximum load, and young's modulus were increase. However, the percent crystallinity and percentage strain at break were decrease. The evidence of morphology indicated that pectin could be inserted into the thermoplastic with well dispersed in all formula.

**Keywords :** Masterbatch, Thermoplastic starch, Calcium dihydrogen phosphate Hydrate, pectin

# กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ที่  
กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. มนตรี ทองคำ และ ผศ.ดร.บรรจง บุญชม ที่กรุณาเป็นกรรมการ  
ตรวจสอบโครงการพิเศษโดยกรุณาช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้อง  
สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ พี่เจ้าหน้าที่ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งทางด้าน สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวก  
สะดวกตลอดระยะเวลาการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนใน  
ด้านต่างๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้	4
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้	4
2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ	5
2.2 การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้	8
2.3 แป้ง	10
2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง	10
2.3.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	15
2.3.3 สมบัติของแป้ง	15
2.3.4 มันสำปะหลัง	18
2.4 การย่อยสลายของแป้ง	20
2.5 แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต	21
2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต	21
2.5.2 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ	21
2.5.3 สันฐานวิทยา	21
2.6 พลาสติกไซเซออร์	22
2.7 เพกติน	23
2.8 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 เครื่องมือผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน	24
2.8.2 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด	25
2.9 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์	28
2.9.1 เครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC)	28
2.9.2 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)	29
2.9.3 เครื่อง X-ray Diffraction (XRD)	30
2.9.4 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)	31
2.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล	33
2.10.1 การทดสอบแรงดึง	33
2.11 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	34
2.11.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ	34
2.11.2 วิเคราะห์สมบัติการดูดน้ำ	34
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.3.1 การเตรียมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร	39
3.3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	39
3.3.3 การเตรียมชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต	39
3.3.4 การปรับปรุงสมบัติชิ้นงานด้วยเพกติน	40
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)	41
3.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	41
3.4.1.1 วิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการต้นของสาร	41
3.4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะผลึกและอสัณฐาน	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตของเจ้าของสิทธิ์

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงาน	41
3.4.2.1 การทดสอบแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดูลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์ การดึงยืด ณ จุดขาด	41
3.4.2.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	42
3.4.2.3 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา	42
3.4.2.4 ปริมาณการดูดซับน้ำ	42
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	
4.1 การสังเคราะห์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )	43
4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR	43
4.1.2 XRD	45
4.2 การศึกษาผลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต	46
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน	46
4.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	46
4.2.3 ปริมาณการดูดซับน้ำ	48
4.2.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)	49
4.2.5 สมบัติเชิงกล	49
4.3 การปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน	52
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพ	52
4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	52
4.3.3 ปริมาณการดูดซับน้ำ	53
4.3.4 สมบัติทางความร้อน	55
4.3.5 สมบัติเชิงกล	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก ก	62
ภาคผนวก ข	63
ภาคผนวก ค	67
ภาคผนวก ง	68

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่บ่งถึงพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมาตรฐานรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	8
ตารางที่ 2.2 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	11
ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส	12
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกติน	14
ตารางที่ 2.5 ลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง (มอก.274-2521)	19
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต	40
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตและเพกติน	40
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันของเลขคลื่นที่พบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR	44
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน	46
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน	49
ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการเติม เพกตินลงไป ปริมาณ 5%,10% และ 15%	52
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน ที่ทำการเติมเพกตินลงไป 5%,10% และ 15%	55
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของชิ้นงานที่ทำการทดสอบการดูดซับน้ำในแต่ละวัน	62
ตารางที่ ก.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานที่ทำการทดสอบการดูดซับน้ำในแต่ละวัน	62
ตารางที่ ง.1 ค่าการรับแรงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ค่ามอดูลัส (Young's Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break)	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	11
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส	12
รูปที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส	13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน	14
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	16
รูปที่ 2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	17
รูปที่ 2.7 กลไกการคืนตัวของแป้ง	18
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต	21
รูปที่ 2.9 SEM ของ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่เตรียมโดยใช้แอซิโตนเป็นตัวกลาง	21
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกลีเซอรอล	23
รูปที่ 2.11 แสดงโมเลกุลของเพกติน (เส้นสีชมพู) ในเนื้อเยื่อบริเวณ middle lamella และผนังเซลล์ (cellwall)	23
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเพกติน	24
รูปที่ 2.13 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	25
รูปที่ 2.14 เครื่องอัด (Compression molding machine)	26
รูปที่ 2.15 ขั้นตอนกระบวนการอัด	27
รูปที่ 2.16 ปริมาณความร้อนที่พอลิเมอร์คายออกมาเนื่องจากการตกผลึกที่อัตราการลดอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้ง 6 อัตรา	29
รูปที่ 2.17 แสดงภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM	30
รูปที่ 2.18 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	31
รูปที่ 2.19 แสดงแผนภูมिरะบบ The Michelson Interferometer	32
รูปที่ 2.20 แสดง อินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum)	32
รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต	43
รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรกโตแกรมของ (ก) แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตอ้างอิง และ(ข) แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตที่สังเคราะห์	45
รูปที่ 4.3 SEM ของ (ก.) TPS100, (ข.) TPS100/Ca1, (ค.) TPS100/Ca2 และ (ง.) TPS100/Ca3 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	47
รูปที่ 4.4 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานสูตรต่างๆ ในแต่ละวัน	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่าการพิมพ์หรือการเผยแพร่ในรูปแบบใดๆ โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัย

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.5 แผนภูมิค่าการรับแรงดึงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ	50
รูปที่ 4.6 แผนภูมิค่ามอดุลัส (Young's Modulus) ของชิ้นงานสูตรต่างๆ	50
รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break) ของชิ้นงานสูตรต่างๆ	51
รูปที่ 4.8 SEM ของ (ก.) TPS100/Ca2/Pectin5, (ข.) TPS100/ Ca2/Pectin10, และ (ค.) TPS100/Ca2/Pectin15 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	53
รูปที่ 4.9 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานสูตรต่างๆ ในแต่ละวัน	54
รูปที่ 4.10 แผนภูมิค่าการรับแรงดึงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเพกติน	56
รูปที่ 4.11 แผนภูมิค่ามอดุลัส (Young's Modulus) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเพกติน	56
รูปที่ 4.12 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเพกติน	57
รูปที่ ข.1 DSC thermogram ของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	63
รูปที่ ข.2 DSC thermogram ของชิ้นงานผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต	63
รูปที่ ข.3 DSC thermogram ของชิ้นงานผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตสูตร TPS100/Ca2	64
รูปที่ ข.4 DSC thermogram ของชิ้นงานผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตสูตร TPS100/Ca3	64
รูปที่ ข.5 DSC thermogram ของชิ้นงานผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แคลเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตและเพกติน สูตร TPS100/Ca2/Pectin5	65
รูปที่ ข.6 DSC thermogram ของชิ้นงานผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แคลเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตและเพกติน สูตร TPS100/Ca2/Pectin10	65
รูปที่ ข.7 DSC thermogram ของชิ้นงานผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แคลเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตและเพกติน สูตร TPS100/Ca2/Pectin15	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมเริ่มมีผู้ให้ความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาจากขยะพลาสติก เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติการใช้งานที่ครอบคลุมวัตถุประสงค์การใช้งานหลายด้าน เช่น สมบัติทางกายภาพ มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่นและอื่นๆ สมบัติทางไฟฟ้า เป็นฉนวนไฟฟ้า สมบัติทางเคมี ทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่นๆ ทั้งยังผลิตได้ง่ายต้นทุนต่ำ และมีอัตราการผลิตสูง จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่ย่อยสลายยาก ทำให้เป็นการยากที่จะกำจัด ซึ่งหากนำไปกำจัดโดยวิธีการเผาจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางด้านอากาศ แม้จะมีการรณรงค์ให้มีการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำ แต่ปริมาณขยะพลาสติกก็ยังคงมีมากขึ้น ทำให้มีการศึกษาการใช้วัสดุย่อยสลายมาทดแทน การใช้พลาสติกจากปิโตรเคมี

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) เป็นวัสดุที่ได้จากการนำแป้งมาผสมกับพลาสติกไซเซอรมาขึ้นรูปและสามารถย่อยสลายได้ หน่วยงานต่างๆ ได้มีการวิจัยและพัฒนาพลาสติกที่เกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกันอย่างกว้างขวางโดยทำการศึกษาจากแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งบาร์เลย์ แป้งข้าวเจ้า แป้งถั่วเหลือง แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถปลูกทดแทนได้และสามารถย่อยสลายได้โดยแสงหรือกระบวนการทางชีวภาพในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากแป้งมีส่วนสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ซึ่งเป็นกลไกการดำรงชีวิตของสัตว์ทั้งหลายเมื่อนำมาผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้จะสามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) โดยใช้แสงและจุลินทรีย์จะทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพเกิดการย่อยสลายกลับมาเป็นปุ๋ยและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับมายังพืชเพื่อสังเคราะห์แสงและเก็บเป็นแป้งหมุนเวียนเข้าสู่วัฏจักรต่อไป

แป้งชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด คือแป้งมันสำปะหลังเนื่องจากมันสำปะหลังเป็นสินค้าเกษตรกรรมอันดับหนึ่งของประเทศไทย ซึ่งในโครงสร้างของแป้งนั้นประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) เป็นโครงสร้างเชิงเส้น และอะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นโครงสร้างแบบกิ่ง ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีจำนวนอะไมโลเพกตินมาก นอกจากนี้ โครงสร้างทางเคมีของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานแป้งเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชยังคงมีความยุ่งยากเนื่องจากแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงต้องมีเติมกลีเซอรอลเป็นสารปรับสภาพพลาสติกเพื่อให้แป้งเกิดการยืดหยุ่นได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (mechanical energy) ได้สารที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แต่มีข้อเสียคือเมื่อเติมแป้งมัน

ลำปะหลังจะมีความเปราะและการเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคที่ทำให้เกิดการเสียหายได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง ด้วยเหตุนี้จึงมีการเติมสารอนินทรีย์ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น จึงทำให้มีความยุ่งยากในการนำไปใช้งานจริง

งานวิจัยนี้นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและสารอนินทรีย์ที่เลือกใช้คือแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตไฮดรต ซึ่งเป็นสารที่ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต เนื่องจากมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัส ที่เป็นแร่ธาตุที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตพืช อีกทั้งยังเป็นสารที่มีความหนาแน่นต่ำมีเสถียรภาพทางเคมีและต้านทานการสึกหรอสูงและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[4] โดยนำมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal Mixer) และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีกดอัด (compression) ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนเพื่อหาสูตรที่เหมาะสม จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยใช้เพกตินซึ่งเป็นสารก่อเจลเนื่องจากเพกตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลัง มาใช้พัฒนาการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาบทบาทของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพและสัญญาณวิทยา เมื่อเติมในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติเชิงกลชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต โดยการใช้เพกติน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลโดยนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับกลีเซอรอล

1.3.2 นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมาผสมกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต จากนั้นทำการขึ้นรูปแล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพและสัญญาณวิทยา

1.3.3 ทำการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานโดยเติมเพกติน จากนั้นทำการขึ้นรูปแล้วนำไป

ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพและสัญญาณวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถผลิตชิ้นงานของแป้งมันสำปะหลังและแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรต

1.4.2 ทราบถึงบทบาทของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรต ที่มีต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ [2]

#### 2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้

จากปัญหาในการกำจัดขยะพลาสติก ปัญหาสิ่งแวดล้อม และการลดลงของปริมาณปิโตรเลียมสำรองในธรรมชาตินั้น สาเหตุเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยที่ผลักดันให้เกิดการศึกษาค้นคว้าเพื่อผลิตวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพเทียบเคียงกับพลาสติก แต่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ไม่ได้จากปิโตรเลียม กล่าวคือ ใช้วัตถุดิบทดแทน (Renewable) ที่มีวงจรการผลิตค่อนข้างสั้น เช่น ผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น และสมบัติที่สำคัญคือ การย่อยสลายได้ โดยเรียกพอลิเมอร์หรือพลาสติกเพื่อวัตถุประสงค์นี้ว่า พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หรือ พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic) ซึ่งปัจจุบันมีหลายชนิด

พลาสติกย่อยสลายได้ (Degradable plastic) คือ พลาสติกที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่กำหนด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดค่าได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ

ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้โดยทั่วไป สามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradable)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืดหรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่สามารถสัมผัสกับยูวีได้โดยตรง

- การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradable)

การย่อยสลายทางกลโดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative Degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

- การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradable)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไซครายด์พอลิคาบอเนต และ พอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของ พอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) กรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

- การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้

endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อไปในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

### 2.1.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) [3]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีคำจำกัดความตามมาตรฐาน DIN103.2 ว่าการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ของวัสดุพลาสติก (Biodegradation of a Plastic material) คือ กระบวนการที่พลาสติกถูกเปลี่ยน โครงสร้างทางเคมีอันเนื่องมาจากจุลินทรีย์ วัสดุพลาสติกจะได้ชื่อว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดย จุลินทรีย์นั้น สารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดต้องถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์มากกว่าร้อยละ 90 โดยที่สภาพแวดล้อม และอัตราการย่อยสลายจะถูกกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้จุลินทรีย์ หรือการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลาย (Composting) เป็นต้น

สำหรับคำว่า Biodegradation (หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) ย่อมาจาก Bioplastic degradation ในมาตรฐานต่างๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สมีเทนและน้ำ

ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการศึกษาทั้งหมด 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่

- กลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากพืช เช่น แป้ง และเซลลูโลส เป็นต้น
- กลุ่มพอลิเมอร์ที่ผลิตได้โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น พอลิเบตาไฮดรอกซีบิวทิเรต (Poly- $\beta$ -Hydroxybutyrate) และพอลิแลคเตท (Polylactate) เป็นต้น
- กลุ่มพอลิเมอร์จากการดัดแปรพอลิเมอร์ธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ผลิตจากแป้ง (Starch Based Polymer) ที่มีการผสมสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น กลีเซอรอล

#### 2.1.2.1 ลักษณะของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [3, 5-7]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่สามารถถูกจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรียหรือเชื้อราใช้เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงเปลี่ยนสภาพของพลาสติกให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้แก่ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ภายหลังจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์พลาสติกจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 หน่วย

ซึ่งโครงสร้าง ส่วนใหญ่ที่จุลินทรีย์ได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ตรง เช่น อะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic polyester) เป็นต้น จากการศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ เช่น โพรตีน เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น พบว่าการย่อยสลายเริ่มจากจุลินทรีย์จะใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้เกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ภายในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดอนุมูลอิสระจนทำให้เกิดการย่อยสลายเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาโดยทั่วไปพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เมื่อมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 500 หน่วย ซึ่งสามารถวัดอัตราการสลายตัวได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) โดยตรวจวัดปริมาณหมู่คาร์บอนิลที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อจุลินทรีย์ปล่อยเอนไซม์เข้า ทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีน พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าการเข้าทำปฏิกิริยาของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจึงเกิดการย่อยสลาย โดยการสลายตัวทางชีวภาพของพลาสติกมีทั้งหมด 3 ลักษณะ ดังนี้

- พลาสติกไม่ได้สลายตัวเนื่องจากจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถูกจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายสารเติมแต่งในส่วนอื่นๆ ทำให้เหลือพลาสติกอยู่ในสภาพโครงสร้างรูพรุนและต่อไปก็จะสลายกลายเป็นผงละเอียด
- การสลายตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเปอร์ออกไซด์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเอง (Autooxidation) ซึ่งทำให้สายโซ่โมเลกุลของพลาสติกสลายตัวสั้นลง เพื่อให้จุลินทรีย์สลายตัวต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำต่อไป
- การสลายตัวเนื่องจากการกระทำของจุลินทรีย์โดยตรง นั่นคือจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยสลายพลาสติกประเภทนั้นโดยตรง เช่น พอลิแคโรไลน (Polycaprolactone) และ พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรท (Poly hydroxybutyrate) เป็นต้น

#### 2.1.2.2 มาตรฐานในการตรวจสอบการย่อยสลาย [8]

ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) ได้กำหนดวิธีการวิเคราะห์การย่อยสลาย 5 วิธี คือ

- วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มี Municipal sewage sludge (D5209-91)
- วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนในขณะที่มี Municipal sewage sludge (D5209-91)
- วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายของพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated sludge (D5271-92)

- วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในระบบที่มีการควบคุมสภาวะการหมัก (D5338-93)
- วิธีวิเคราะห์การย่อยสลายพลาสติกโดยกระบวนการทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนในขณะที่มีจุลินทรีย์ที่ได้รับการคัดเลือกมา (D5271-92)

สองวิธีแรกจะจำลองสภาพแวดล้อมของระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งก็คือสภาวะการหมักและระบบบำบัดน้ำเสีย ทำให้ทราบว่ากรย่อยสลายควรใช้ระบบใด ส่วนวิธีสุดท้ายไม่ได้ทดลองกับระบบจริงแต่เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบความสามารถในการถูกย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ที่ทราบชนิดที่แน่นอนที่พบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม

### 2.1.2.3 สัญลักษณ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมาตรฐานรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์ที่บ่งถึงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมาตรฐานรับรองการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4]

สัญลักษณ์	สถาบันรับรอง/ประเทศ	มาตรฐานรับรอง
	AIB-Vincotte International (AVI) เบลเยียม	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตาม มาตรฐาน EN 13432:2000
	DIN CERTCO เยอรมนี	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตาม มาตรฐาน ASTM 6400 DIN EN 13432
	BPI (Biodegradable Product Institute) สหรัฐอเมริกา	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตาม มาตรฐาน ASTM 6400 ASTM 6868
	PBS (Biodegradable Plastics Society) ญี่ปุ่น	ผลิตภัณฑ์ต้องผ่านสมบัติตาม มาตรฐาน OECD301C JIS K 6950 (ISO 14851) JIS K695 (ISO 14852) JIS K 6953 (ISO 14855)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ [9]

การนำแป้งมาผลิตเป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเลือกใช้แป้งให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในการใช้งานในลักษณะดังกล่าวสามารถทำได้โดยแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่

### ○ การใช้แป้งเป็นวัสดุโดยตรง

การใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่าร้อยละ 90 โดยน้ำหนักในการผลิตเป็นวัสดุจะทำได้โดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยแป้งมีลักษณะเป็นแป้งผสมน้ำ (Dough) จะถูกอัดรีดผ่านรูทางออก

### ○ การใช้แป้งเป็นสารตัวเติม

การใช้แป้งเป็นสารตัวเติมผสมลงไปในพลาสติกจะทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแป้งซึ่งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพลาสติก (ซึ่งอาจจะเกิดการย่อยสลายได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกนั้นๆ) โดยแป้งที่ใช้ผสมลงไปในที่นี้อาจจะมีได้ 2 ลักษณะ คือ ในรูปของเม็ดแป้งและในรูปของเจล ในกรณีที่ใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิเอทิลีนชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายจะไม่เกิดการย่อยสลายโดยสมบูรณ์ จากนั้นส่วนที่เหลือจะถูกทำลายโดยวิธีต่างๆ เช่น แร่ทางกล การย่อยสลายทางเคมี เป็นต้น

### ○ การใช้งานในรูปของเม็ดแป้ง

การใช้งานในรูปของเม็ดแป้งจะทำการผสมเม็ดแป้งกับพลาสติกเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของแป้งในเนื้อพลาสติก จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำการให้เม็ดแป้งแตกตัวออก โดยก่อนทำการผสมแป้งจะถูกนำไปทำให้แห้งจนความชื้นเหลืออยู่น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีดหรือบางครั้งอาจมีการให้เม็ดแป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างแป้งกับพลาสติก และนอกจากนี้ยังมีการเติมสารเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated ester) เช่น น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean) หรือน้ำมันข้าวโพด (corn oil) ซึ่งเป็นสารเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Auto oxidant) ซึ่งจะช่วยให้การย่อยสลายของพลาสติกดีขึ้น โดยสารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะ (Metal salt) ภายในดินจากสิ่งแวดล้อมทำให้เกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ซึ่งจะไปย่อยสลายพอลิเมอร์ให้กลายเป็น โอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่เล็กลง

### ○ การใช้งานในรูปของแป้งเจล

การใช้งานในรูปของแป้งเจล (Gelatinized starch) จะต้องทำให้แป้งผ่านกระบวนการเจลาติไนซ์ก่อนแล้วจึงนำแป้งเจลไปผสมกับพลาสติกและขึ้นรูปต่อไป จากการศึกษาการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับพอลิคาโปแลคโตนซึ่งเลือกใช้รูปแบบ

ต่างกัน จากการตรวจสอบเมื่อปริมาณของเม็ดแป้งและแป้งเจลดต่ำกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทั้งประเภทแป้งเม็ดและแป้งเจลดจะไม่แตกต่างกันมากนัก

#### ○ การใช้แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติก

การเติมแป้งในพอลิเมอร์ผสมปริมาณมากมักทำให้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากความหนืดสูงและชิ้นงานที่ได้มีความเปราะ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวโดยการเติมน้ำลงไปผสมซึ่งในที่นี้ทำหน้าที่คล้ายสารเพิ่มสภาพพลาสติก ช่วยให้ความหนืดลดลงและแป้งกลายเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous) โดยเรียกแป้งที่อยู่ในรูปนี้ว่าแป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch) ในการเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติกจะทำการดัดแปลงโครงสร้างทางกายภาพโดยทำให้เม็ดแป้งเกิดการแตกออกทำให้สูญเสียความเป็นผลึก จากนั้นนำแป้งที่ได้มาผ่านเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิสูงจะได้แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีความเป็นผลึกของแป้งเหลืออยู่

### 2.3 แป้ง [9]

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

#### 2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง [9]

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.2) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

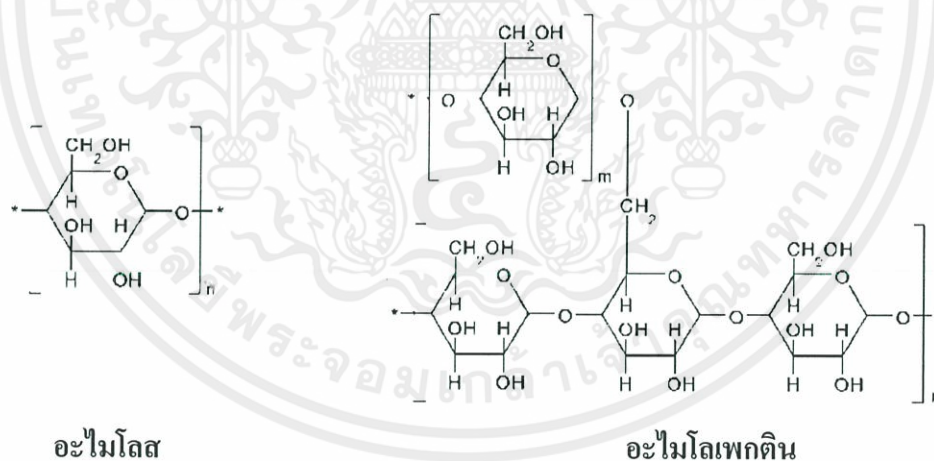
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน [9]

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

องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.1 ได้แก่

1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพกติน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate material)

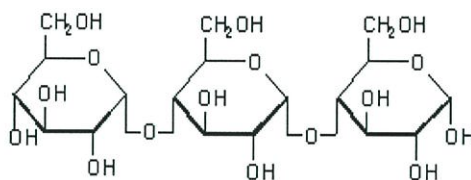


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [9]

### 1. อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1, 4 ( $\alpha - 1, 4$ ) ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับความรู้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลส [9]

อะไมโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณมากทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง

แป้งจากธัญพืชเช่นแป้งข้าวโพดแป้งสาลีแป้งข้าวฟ่างมีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวเช่นแป้งมันสำปะหลังแป้งมันฝรั่งแป้งสาคุมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20% Waxy starch ไม่มีอะไมโลสเลยและแป้งจาก Amylomaize มีอะไมโลสสูงมากถึง 80% ของน้ำหนัก โมเลกุล อะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 คาลตัน (Da) ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1000 ถึง 6000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลงในธรรมชาติอะไมโลสมีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มากสมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลสของแป้งหลายๆชนิดดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลส [9]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะไมโลส (%)	$\beta$ -Amylolysis Limit (%)	ขนาด โมเลกุล เฉลี่ย (DP)	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17					
อินดิกา		73	1,000	4.0	250	49
จาโปนิก		81	1,100	3.4	320	31
แป้งมัน สำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	

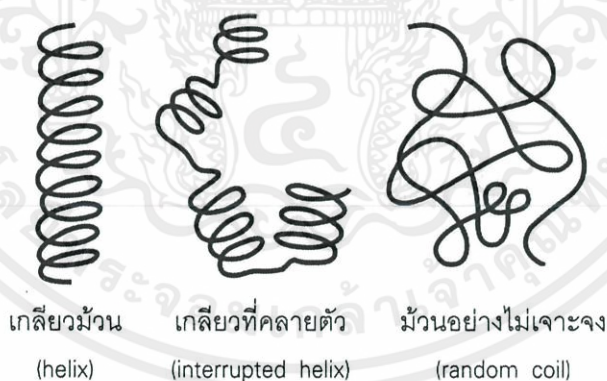
หมายเหตุ:  $\beta$ -amylolysis = %การย่อยแป้งโดย $\beta$ -amylase

DP = Degree of polymerization

NC = Number of chain

CL = Chain length

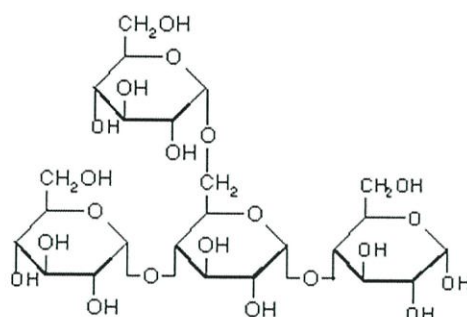
ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลลาทีนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะไมโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพกตินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะไมโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดโครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ดังรูปที่ 2.3 ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะไมโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะไมโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วยอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้



รูปที่ 2.3 ลักษณะเกลียวของอะไมโลส [9]

## 2. อะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก  $\alpha$ -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดการคำนวณ (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,6 ดังรูปที่ 2.4 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกตินจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน [9]

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสในอะไมโลเพกตินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^8$  ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพกตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งตามรูปที่ 2.4 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกติน [9]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะไมโลเพกติน (%)	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย(DP)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย(CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
อินดิกา		4,700	21	220	14	6
จาโปนิก		12,800	19	670	13	5
ข้าวเหนียว		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันสำปะหลัง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันฝรั่ง	83					

### 3. สารตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลสและสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับ

อะไมโลเพกติน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลสอะไมโลเพกติน และสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

#### 4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง

2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง

3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

4. ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

### 2.3.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

### 2.3.3 สมบัติของแป้ง [9]

#### 2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เดิมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เดิมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

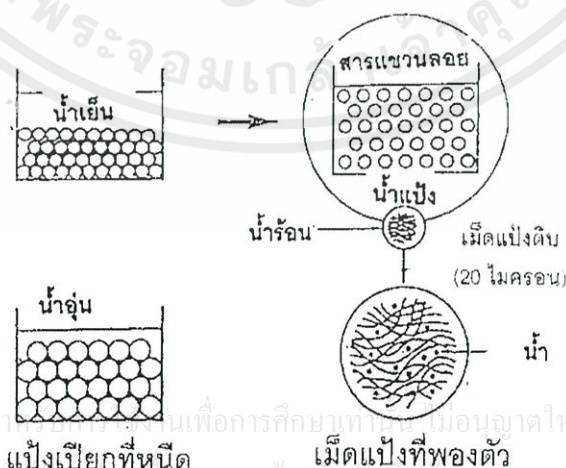
น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bonded water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นไม่เท่ากันตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้น

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

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้งรูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

### 2.3.3.2 การเกิดเจลาทีไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปฏิกิริยานี้เรียกว่าการเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

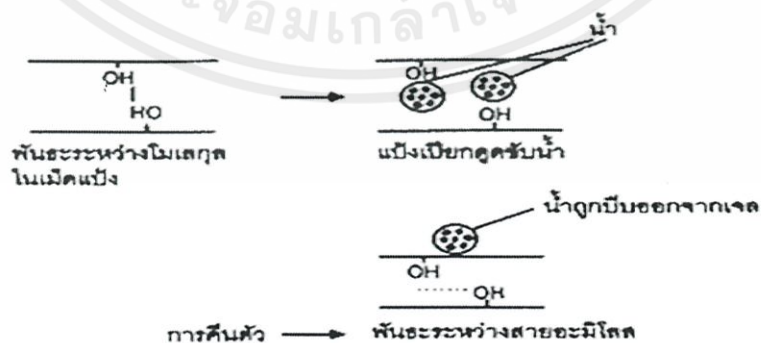
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [9]

### 2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาคือในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กระยะจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.6 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมา นอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

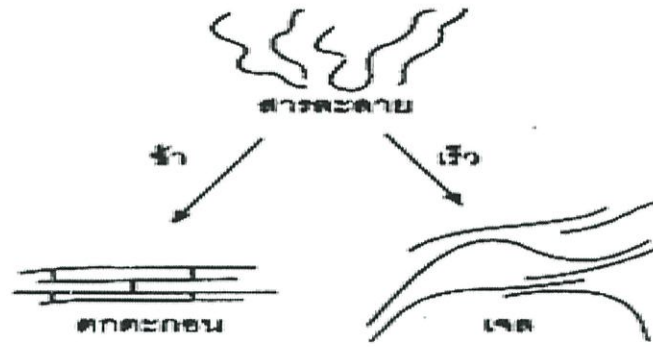
การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย กลไกการคืนตัวของแป้งแสดง ได้ดังรูปที่ 2.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.6 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [9]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กลไกการคืนตัวของแป้ง [10]

### 2.3.4 มันสำปะหลัง [11]

มันสำปะหลัง (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Manihot esculenta* Crantz) มีชื่อสามัญเรียกได้หลายชื่อแตกต่างกันตามท้องถิ่นและภาษาที่ใช้ในภาษาอังกฤษเรียกว่า Cassava หรือ Tapioca แต่โดยทั่วไปคำว่า Tapioca มักจะใช้แทนผลิตภัณฑ์ที่ทำจากมันสำปะหลังในภาษาสเปน โดยประเทศแถบอเมริกาใต้และอเมริกากลางเรียกว่า Yuca ในภาษาโปรตุเกส โดยประเทศบราซิลเรียกว่า Mandioca และในภาษาฝรั่งเศส โดยประเทศทวีปแอฟริกาที่ใช้ภาษาฝรั่งเศสเป็นภาษาพูดเรียกว่า Manioc มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตร้อนของทวีปอเมริกาต่อมาได้มีการขยายการเพาะปลูกไปสู่แหล่งอื่นๆ จนทำให้มันสำปะหลังกลายเป็นพืชอาหาร (พืชที่ให้คาร์โบไฮเดรตสูง) ที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลกรองจากข้าวสาลีข้าวโพดข้าวและมันฝรั่งสำหรับประเทศไทยคาดว่าได้มีการนำมันสำปะหลังจากประเทศมาเลเซียเข้ามาปลูกในไทยเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2329 โดยเริ่มปลูกเพื่อใช้ทำแป้งและสาकुในภาคใต้ในระหว่างแถวของคันยางพาราต่อมาเมื่อมีการขยายการเพาะปลูกยางพาราในเขตภาคใต้มากขึ้นการปลูกมันสำปะหลังในภาคใต้จึงค่อยๆ ลดลงและแพร่กระจายการเพาะปลูกไปยังเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือมากขึ้นจนกระทั่งปัจจุบันพบว่าไม่มีการเพาะปลูกมันสำปะหลังในภาคใต้แล้ว

มันสำปะหลังเป็นพืชเขตร้อนสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการปลูกคือเขตร้อนช่วงบริเวณเส้นรุ้งที่ 30 องศาเหนือถึง 30 องศาใต้และที่ความสูงระดับน้ำทะเลจนถึง 2,000 เมตรจากระดับน้ำทะเลสามารถเจริญเติบโตได้ในดินทุกชนิดแต่ชอบดินร่วนปนทรายเพราะจะลงหัวง่ายสภาพอากาศที่เหมาะสมคือที่ระดับอุณหภูมิตั้งแต่ 10-35 องศาเซลเซียสแต่อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยเฉลี่ยต้องไม่ต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียสประเทศไทยมีสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการปลูกมันสำปะหลังมากแห่งหนึ่งของโลกข้อดีของมันสำปะหลังคือเป็นพืชที่ปลูกง่ายทนแล้งได้ดีกว่าพืชอื่นๆ ต้องการการดูแลต่ำมีโรคและศัตรูพืชรบกวนน้อยและสามารถปลูกได้ผลแม้จะปลูกในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินไม่เพียงพอจึงทำให้เกษตรกรนิยมปลูกมันสำปะหลังกันมาก

พันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือพันธุ์ที่ใช้ระดับพันธุ์ที่ใช้บริโภคเป็นอาหารโดยตรง (พันธุ์หวาน) และพันธุ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆ (พันธุ์ขม)

#### 2.3.4.1 สมบัติของแป้ง [12]

แป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีความขาวมันวาว เมื่อผสมน้ำและให้ความร้อนจะเหนียวเป็นกาวใส กล่าวได้ว่าแป้งไทย ขาวใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีสี เหมาะสมมากเมื่อนำมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะในอาหารจะไม่มีกลิ่นรสแปลกปลอม ตลาดได้เลือกแป้งมันสำปะหลังประเภทสตาร์ช ชั้นพิเศษ เป็นสินค้ามาตรฐานในการซื้อขายเนื่องจาก เป็นประเภทที่ผลิตกันอยู่ส่วนใหญ่ในอุตสาหกรรม โดยมีคุณภาพตามมาตรฐานสินค้าแป้งมันสำปะหลังในประกาศของกระทรวงพาณิชย์ ฉบับที่ 4 โดยมีลักษณะแสดงตามตารางที่ 2.5 ดังนี้

ตารางที่ 2.5 ลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง (มอก. 274-2521)

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

หมายเหตุ: คำนวณจากน้ำหนักแห้งเป็นร้อยละ

#### 2.3.4.2 ชนิดของแป้งมันสำปะหลัง

- แป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch) คือแป้งที่เกิดจากการแปรรูปหัวมันสำปะหลังขั้นต้นโดยไม่มีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงร่วมในการผลิตเช่นการนำหัวมันมาบดให้เป็นแป้งแป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวและมีความบริสุทธิ์สูงมีสิ่งปนเปื้อนต่ำโดยจะมีปริมาณแป้ง (Starch) อยู่มากกว่าร้อยละ 95 และมีปริมาณโปรตีนและไขมันรวมถึงฟอสฟอรัสค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ และเมื่อได้รับความร้อนจะมีความหนืดสูงทำให้ได้แป้งเปียกที่ใสไม่ทึบแสงและมีอัตราการคืนตัวต่ำ (Retrogradation)

- แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified Starch) คือแป้งที่ได้จากการนำแป้งดิบไปผ่านกระบวนการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางโมเลกุลเพื่อให้มีคุณสมบัติเฉพาะเช่นคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแต่ละประเภทแป้งแปรรูป

เป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้แป้งมันสำปะหลังดิบเพราะมีราคาสูงกว่าแป้งดิบกว่าเท่าตัว

## 2.4 การย่อยสลายของแป้ง [13]

การย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เชื้อรา (Biodegradation by fungi)

เชื้อราสามารถเข้าทำลายหรือสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุได้ 3 วิธี คือ ทางกายภาพ ทางเคมี และการก่อให้เกิดรอยดำ

### ○ การทำลายทางกายภาพ (Mechanical damage)

การทำลายนี้เกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์สามารถทำลายวัสดุในทางกายภาพ เช่น การกัดแทะของเปลือกไม้โดยมด และการเจาะผิวของแผ่นพลาสติกบางๆ โดยปลวกซึ่งเป็นที่ยูจกกันดีในทางอายุศาสตร์ของพืช เชื้อราสามารถเจาะผิวหนังและผนังเซลล์ได้

### ○ การทำลายทางเคมี (Chemical damage)

การทำลายทางเคมีเกิดขึ้นได้โดยตัวการทางเคมี ซึ่งเชื้อราเองที่เป็นสาเหตุหลักหรือการที่เชื้อราเองเข้าทำลายวัสดุ โดยการปลดปล่อยสารเคมีเข้าไปยังวัสดุ ยกตัวอย่างเช่นผลิตภัณฑ์ของ Mycotoxin โดยเชื้อราที่เจริญเติบโตบนอาหาร เช่น Aflatoxin ที่ผลิตมาจาก *Aspergillus flavus* หรือรอยดำซึ่งเกิดบนสิ่งทอ

### ○ การเกิดรอยดำ

ความเสียหายสุดท้ายคือการเกิดรอยดำซึ่งเป็นผลมาจากเส้นใยของเชื้อราจะก่อให้เกิดสปอร์ที่มีสีได้ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบหรือสีน้ำตาลแก่เกือบดำ รอยดำเช่นนี้มักเกิดขึ้นในสถานะซึ่งไม่มีการแข่งขันจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น แบคทีเรีย ดังนั้นการเกิดรอยดำของเครื่องมือทางไฟฟ้าหรือผิวหนังของแก้วโดยการเจริญเติบโตของเส้นใยเชื้อราสืบเนื่องมาจากการที่เชื้อราสามารถผลิตเส้นใยเฉพาะจากที่ได้รับอาหารเลี้ยงเชื้อตามชนิดต่างๆ และโยความสามารถของเส้นใยที่จะเชื่อมต่อกันในช่องว่างของอากาศ เชื้อจุลินทรีย์สำคัญที่ใช้ในการย่อยสลายแป้งและน้ำตาลมีดังนี้

○ แอลฟา-อะไมเลส เป็น Endo-enzyme ซึ่งไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของอะไมโลเพคติน

○ กลูโคส-อะไมเลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลของแป้งซึ่งสามารถดึงหน่วยกลูโคสจากปลายโซ่อนรีดิวซิงและสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,6 ไกลโคซิดิกของพันธะอะไมโลเพคติน ดังนั้นจึงสามารถเปลี่ยนแป้งและเดกซ์ทรินไปเป็นกลูโคส

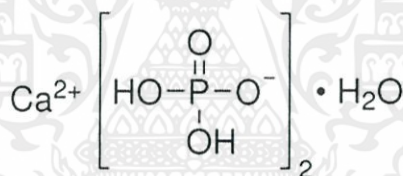
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เบต้า-อะไมโลส เอนไซม์ชนิดนี้สามารถสามารถไฮโดรไลซ์พันธะ 1,4 ไกลโคซิดิกของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลของแป้งให้ได้มอลโตสจากปลายอนรีดิวง

## 2.5 แคลเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) [28]

### 2.5.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแคลเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ )ส่วนใหญ่จะพบในรูปแบบที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้าง ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุในการทดแทนกระดูกในอุตสาหกรรมชีวการแพทย์เนื่องจากการเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีความหนาแน่นต่ำ มีเสถียรภาพทางเคมี ด้านทานการสึกหรอสูงและแคลเซียมฟอสเฟตส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกับเฟสแร่ของกระดูกนอกจากนี้แคลเซียม ไดไฮโดรเจน โมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นปุ๋ย และ แร่ธาตุเสริมในอาหารสัตว์ โดยเตรียมจากหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) หรือกรดฟอสฟอริก(phosphoric acid) สำหรับในห้องปฏิบัติการจะเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ )กับกรดฟอสฟอริก(phosphoric acid;  $\text{H}_3\text{PO}_4$ )



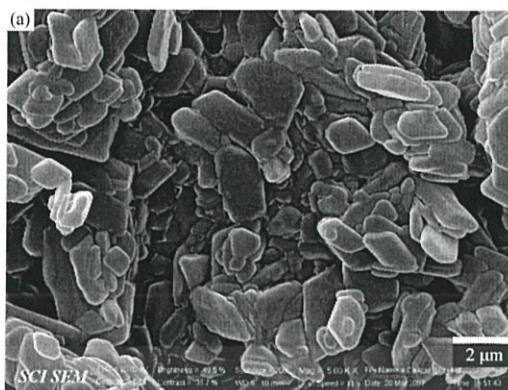
รูปที่ 2.8 โครงสร้างแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรต [28]

### 2.5.2 ลักษณะและสมบัติทางกายภาพ

แคลเซียม ไดไฮโดรเจน โมโนไฮเดรต( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุล 252.08g/mol สามารถละลายน้ำได้ปานกลางและสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) และกรดแอสซิติค( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ )แต่ไม่ละลายในเอทานอล( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 109 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสลายตัวที่ 203 องศาเซลเซียส โดยสามารถทำให้แห้งมีความชื้นน้อยกว่า 1 % ได้โดยการอบที่ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นอกจากนี้มีความหนาแน่น 2.220 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งต่ำกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้มีน้ำหนักน้อยกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ลัทธิฐานวิทยา [28]



รูปที่ 2.9 SEM ของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมโดยใช้เอซีโตนเป็นตัวกลาง [28]

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่เตรียมโดยใช้น้ำเอซีโตนแสดงผลขนาดเล็กลงและขนาดใหญ่สลับกัน ซึ่งขนาดผลึกมีขนาดความกว้างประมาณ 0.10-0.40 ไมโครเมตรและมีความยาว 0.20-0.50 ไมโครเมตร และความกว้างประมาณ 0.50-1.50 ไมโครเมตรและมีความยาว 0.30-8.00 ไมโครเมตร

## 2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [14,15]

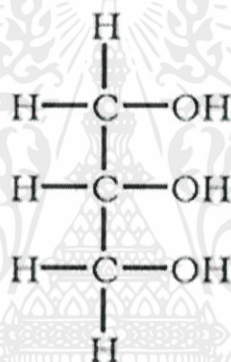
พลาสติไซเซอร์ ตามนิยามของ IUPAC หมายถึงสารที่เข้าไปรวมอยู่กับพลาสติก หรือ อิลาสโตเมอร์ แล้วช่วยเพิ่มความอ่อนตัว ความคงทนการใช้งานและการยืดตัว แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปโครงสร้างของ พอลิเมอร์แล้วทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือการจับกลุ่มของโมเลกุล เนื่องจากพลาสติไซเซอร์ ไปจับยึดกับพอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ทุติยภูมิ (secondary covalent) ทำให้แรงระหว่าง โมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้เคียงกันอ่อนลง เกิดโครงสร้างที่อ่อนตัว ส่วนพลาสติไซเซอร์ ภายใน (Internal plasticizer) เป็นสารที่เติมลงไปแล้วทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสมในการเกิดพอลิเมอร์ (copolymerization)

สมบัติของพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยมีแรงยึดระหว่างโมเลกุลของสารทั้งสองคล้ายคลึงกัน มีจุดเดือดสูง ระเหยยาก ละลายในตัวทำละลายที่ใช้ได้ ดี นอกจากนี้ไม่ควรมีกลิ่น สี รส ไม่เป็นพิษ และไม่ติดไฟ ถ้าใช้พลาสติไซเซอร์ที่มีสมบัติเหมาะสม จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกตัวระหว่างการทำผลิตภัณฑ์ให้แห้ง พลาสติกที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่ดี สามารถคงทนความยืดหยุ่นตลอดการใช้งาน

พลาสติไซเซอร์ที่นำมาใช้กับพลาสติกจากแป้งมีหลายประเภท ได้แก่ มอนอโอด และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ พอลิออลและลิพิดหรืออนุพันธ์ของลิพิด

พอลิออล (Polyols) พอลิไฮดรอกซีแอลกอฮอล์เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลซึ่งมีหมู่คีโตนหรืออัลดีไฮด์ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล พอลิออลพบชนิดพบในน้ำผลไม้ โดยเฉพาะพวกที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่นซอร์บิทอล หรือสามารถผลิตจากปฏิกิริยาเติมไฮโดรเจนให้กับน้ำตาล (Hydrogenation) พอลิออลมีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดีจึงไม่สลายตัวง่าย ดูดซับน้ำและเก็บความชื้นได้ดี ละลายน้ำได้ มีรสหวานน้อยกว่าน้ำตาล เนื่องจากดูดซับน้ำได้ช้ำมากจึงสามารถใช้กับผู้ที่ เป็นโรคเบาหวานได้

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerine) เป็นพอลิออลที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีสูตรโครงสร้าง  $C_3H_8O_3$  มีน้ำหนักโมเลกุล 92 เป็นผลพลอยได้จากการผลิตสบู่และกรดไขมัน มีสมบัติเป็นของเหลวที่มีความหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาลสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีมาก เป็นสารที่ละลายน้ำได้ดีพอสมควร ดูดความชื้นจากอากาศได้ปานกลาง โครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกลีเซอรอล [15]

## 2.7 เพกติน (Pectin) [16-18]

สารกลุ่มเพกตินเป็น โพลีแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนในพืช พบในพืชชั้นสูงโดยปรากฏในชั้นระหว่างเซลล์หรือจุดเชื่อมต่อบนผนังเซลล์ ทำให้เกิดช่องสำหรับอาหารและน้ำผ่าน ในผนังเซลล์ สารกลุ่มเพกตินเป็นสารเคลือบเส้นใยเซลลูโลสที่สำคัญและอาจจะเชื่อมต่อกับพันธะโคเวเลนต์กับพอลิเมอร์อื่นๆ สารกลุ่มเพกตินจัดจำแนกได้เป็น โปรโตเพกติน และกรดเพกติก เพกตินมีอิทธิพลต่อการเจริญ พัฒนาการและการแก่ชรา และมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อพืชและผลไม้ มีการใช้เพกตินอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารด้วยสมบัติในการก่อรูปเป็นเจล จึงใช้เป็นสารก่อเจลและความคงตัวในแยม เยลลี่ และผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยว ผิวของผลพืชตระกูลส้ม กากผลแอปเปิล และลำต้นของซูการ์ บีต เป็นแหล่งที่ดีของเพกติน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

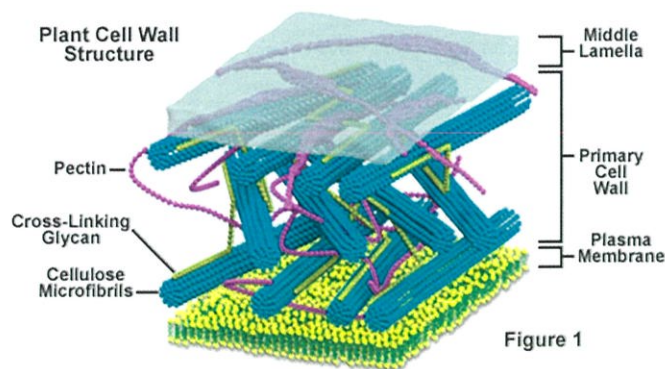
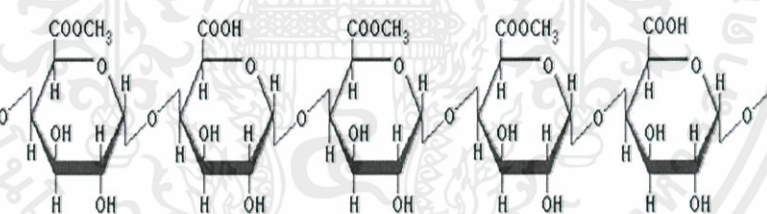


Figure 1

รูปที่ 2.11 แสดง โมเลกุลของเพกติน (เส้นสีชมพู) ในเนื้อเยื่อบริเวณ middle lamella และผนังเซลล์ (cellwall) [15]

เพกตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนที่ประกอบด้วยกรดกาแลกทูโรนิก (galacturonic acid) 150-500 หน่วย (น้ำหนักโมเลกุล 30000-100000) และส่วนที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ (esterified) กับกลุ่มเมทอกซี (methoxy group) ส่วนที่เป็นกิ่งกับสายโซ่หลักที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ประกอบด้วย บีต้า-ดี-กาแลกโทไพราโนส ( $\beta$ -D-galactopyranose) และแอลฟา-แอล-อาบีโนฟูรานอส ( $\alpha$ -L-arabinofuranose)



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเพกติน [18]

## 2.8 หลักการของเครื่องมือผสมและการขึ้นรูป [19]

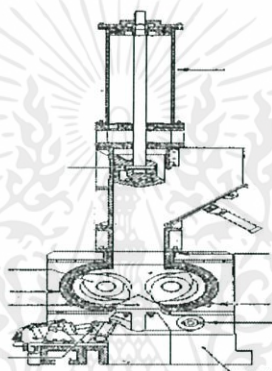
### 2.8.1 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer) [19]

การคอมปาวด์เป็นการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆกับพลาสติกโดยพลาสติกจะถูกให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอมจากนั้นสารเติมแต่งและพลาสติกหลอมจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อ

เดียวกันเทคนิคการคอมปาวด์พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็นการคอมปาวด์แบบรุ่น (Batch compounding) และการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer) เป็นเครื่องผสมที่เป็นการคอมปาวด์ที่ละเอียด โดยเครื่องผสมแบบนี้ประกอบด้วยโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งมีพื้นผิวไม่ราบเรียบเหมือนผิวลูกกอล์ฟจำนวนสองชุดบรรจุอยู่ในห้องผสมที่สามารถปรับอุณหภูมิได้โดยใช้น้ำมันร้อนหรือน้ำไหลหมุนเวียนโรเตอร์ทั้งสองหมุนสวนทางกันด้วยความเร็วในการหมุนที่สามารถปรับได้ การหมุนของโรเตอร์ภายในห้องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนภายในห้องผสมสูงมากจึงทำให้การกระจายตัวของสารเติมแต่งในพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี ข้อดีของเครื่องผสมแบบนี้คือใช้เวลาในการผสมสั้น ผู้ปฏิบัติไม่จำเป็นต้องมีทักษะสูง ไม่มีการสูญเสียวัสดุหรือเกิดการปนเปื้อน เนื่องจากการผสมทำในระบบปิด ขนาดและความสม่ำเสมอของการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างแน่นอน สำหรับข้อเสียของเครื่องผสมแบบนี้คือไม่สามารถมองเห็นการผสมได้ และการทำความสะอาดห้องผสมทำได้ยาก



รูปที่ 2.13 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [19]

## 2.8.2 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression molding) [19]

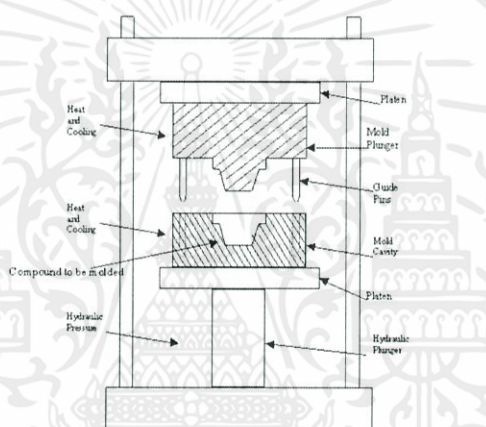
### 2.8.2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการอัด

กระบวนการแปรรูปพลาสติกด้วยการอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่ที่สุด เทคนิคหนึ่ง โดยเริ่มมีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกหลังจาก Bakeland ค้นพบการสังเคราะห์ ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินในปี ค.ศ. 1908 แต่ในปัจจุบันก็ยังคงมีการใช้เทคนิคนี้ในการแปรรูปพลาสติกอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแปรรูปยางและพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง เช่น ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) อีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) และยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea formaldehyde) เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่แปรรูปโดยเทคนิคอื่นได้ยาก เช่น การแปรรูปเทอร์โมพลาสติกที่ผสมไฟเบอร์ต่างๆ การแปรรูปเทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ และการแปรรูปพลาสติก ไวนิล และ สไตรีน สำหรับทำแผ่นเสียงที่ต้องการความละเอียดแน่นอน เป็นต้น สำหรับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปด้วย

เทคนิคการอัดได้แก่ชั้นซามงานที่เขียนหรือสวิตซ์ไฟกล่องบรรจุสวิตซ์หม้อหุงกระทะมือจับเตารีดแผ่นเสียงตัวกวนของเครื่องซักผ้าและที่รองนั่ง โถชักโครก เป็นต้น

### 2.8.2.2 ลักษณะเครื่องอัด (Compression molding machine) [19]

กระบวนการอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปพลาสติกที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงานของกระบวนการอัดคือการนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (Mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้พลาสติกหลอมและไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (Cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่องคือแผ่นเหล็กอัด (Platens) จำนวนสองชุดซึ่งแผ่นหนึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (Movable platen) ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะถูกยึดติดกับที่ (Fixed platen) แม่แบบสำหรับการแปรรูปพลาสติกทั้งตัวผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นนี้



รูปที่ 2.14 เครื่องอัด (Compression molding machine) [19]

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ รวมด้วยได้แก่

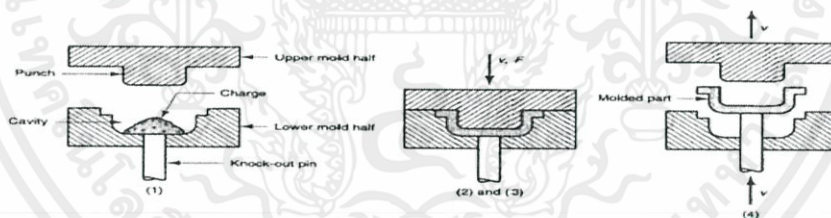
ระบบการขับเคลื่อนในปัจจุบันเครื่องอัดส่วนใหญ่ได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานอัตโนมัติโดยใช้แรงขับเคลื่อนจากระบบไฮดรอลิกในการเคลื่อนที่แผ่นเหล็กอัดขึ้นลง นอกจากนี้ระบบขับเคลื่อนยังทำหน้าที่ในการให้ความดันในการอัดอีกด้วย เครื่องอัดขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 5-100 ตัน ส่วนเครื่องอัดที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีระบบขับเคลื่อนที่ให้ความดันในช่วง 10-4000 ตัน โดยขนาดของความดันจะขึ้นกับขนาดของแผ่นเหล็กอัดซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 8 ตารางนิ้วถึง 5 ตารางฟุต ชนิดของพลาสติกความหนาของผนังชิ้นงานพลาสติกและการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนการอัด

ระบบให้ความร้อนและหล่อเย็นระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของผนังชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีและในการอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่

โมเลกุลได้ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการอัดนานมาดั่งนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบเพื่อทำให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้นลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลงและยังสามารถลดความดันที่ใช้ในการอัดได้อีกด้วย

### 2.8.2.3 วัฏจักรกระบวนการอัด (Compression molding cycle) [19]

กระบวนการอัดเริ่มจากการยึดแม่แบบติดกับแผ่นเหล็กอัดทั้งสองแผ่นแล้วให้ความร้อนแก่แม่แบบตามชนิดของพลาสติกโดยทั่วไปอุณหภูมิแม่แบบสำหรับการอัดเทอร์โมเซตจะเป็นอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลซึ่งอยู่ในช่วง 140-200 องศาเซลเซียสหลังจากนั้นจึงเติมเม็ดหรือผงพลาสติกหรือพลาสติกคอมปาวด์โดยปริมาณการเติมต้องเหมาะสมกับขนาดของชิ้นงานจากนั้นปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดลงด้วยความดันที่เหมาะสมพลาสติกจะเกิดการหลอมหรืออ่อนตัวไหลเข้าสู่ช่องว่าง (Cavity) ของแม่แบบสำหรับพลาสติกเทอร์โมเซตต้องปล่อยให้ยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมินี้ระยะหนึ่งตามระยะเวลาการสุก (Cure time) ของพลาสติกเทอร์โมเซตนั้นๆ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงเกิดอย่างสมบูรณ์หลังจากนั้นความดันภายในแม่แบบจะลดลงในขณะที่ทำการหล่อเย็นจากนั้นจึงเปิดแม่แบบโดยเคลื่อนแผ่นเหล็กอัดขึ้นปลดชิ้นงานออกจากแม่แบบซึ่งในการปลดชิ้นงานออกจะต้องเป็นช่วงที่พลาสติกแข็งตัวเรียบร้อยแล้วเพื่อป้องกันความเสียหายหรือการบิดตัวของชิ้นงานแล้วเริ่มเติมพลาสติกลงในแม่แบบเพื่อทำงานในวัฏจักรต่อไป



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนกระบวนการอัด [19]

การอัดพลาสติกบางครั้งจะเกิดก๊าซหรือไอน้ำขึ้นซึ่งอาจทำให้เกิดการฝั่งตัวของก๊าซใต้ผิวของชิ้นงานทำให้เกิดรอยบุ๋มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกที่ไม่ได้ให้ความร้อนก่อนการอัดเพื่อแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องมีขั้นตอนการไล่ก๊าซ (Degassing stage) โดยในขณะที่ทำการอัดต้องมีการยกแม่แบบตัวผู้ขึ้นจนความดันภายในแม่แบบลดลงถึงความดันบรรยากาศเมื่อก๊าซระเหยออกไปแล้วจึงทำการอัดต่อไปจนพลาสติกแข็งตัวออกจากปัญหาการเกิดก๊าซแล้วระยะเวลาของการแข็งตัวก็มีอิทธิพลต่อสมบัติของชิ้นงานพลาสติกเช่นกัน หากระยะเวลาแข็งตัวของพลาสติกสั้นเกินไปจะทำให้ผิวของชิ้นงานของชิ้นงานทนความร้อนได้ไม่ดีและทำให้ชิ้นงานดูซึมน้ำมันได้มากขึ้นแต่หากปล่อยให้แข็งตัวเกินไปอาจทำให้

เกิดรอยร้าวได้ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้นอีกดังนั้นผู้ปฏิบัติจึงต้องมีความชำนาญและประสบการณ์ค่อนข้างสูงในการควบคุมขั้นตอนการทำงานอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานพลาสติกได้ตรงตามความต้องการ

#### 2.8.2.4 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัด [19]

แม้การแปรรูปด้วยกระบวนการอัดจะเป็นเทคนิคที่ใช้กันมานานแต่ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้งานสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างกว้างขวางทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการอัดมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับกระบวนการแปรรูปด้วยเทคนิคอื่นๆหลายประการดังนี้

- แม่แบบมีราคาถูกและผลิตได้ง่าย
- มีการสูญเสียวัสดุน้อยมากคือมีครีบหรือ Flash เกิดขึ้นน้อยมากประมาณ 2-5% เท่านั้น
- โมเลกุลของพลาสติกเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Reorientation) น้อยมากเนื่องจากในระหว่างการอัดเกิดการไหลของพลาสติกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- เครื่องอัดมีราคาถูกกว่าเครื่องแปรรูปพลาสติกชนิดอื่นๆ
- ไม่เกิดเส้นรอยเชื่อม (Weld line) บนชิ้นงานซึ่งเส้นรอยเชื่อมนี้เป็นจุดบกพร่องที่ทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ง่าย
- แม่แบบสำหรับกระบวนการอัดไม่มีส่วนของทอวิ่ง (Runners) ท่อนำ (Sprue) และประตูเข้า (Gates) ทำให้ไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงาน

ถึงแม้ว่ากระบวนการอัดจะมีข้อได้เปรียบดังได้กล่าวมาแล้วแต่เทคนิคนี้ก็ยังมีข้อเสียเปรียบหลายประการเช่น

- วัตถุดิบอยู่ในสถานะของแข็งหรือกึ่งของแข็งทำให้เกิดความเครียดภายในแม่แบบสูงมากในขณะที่ทำการอัดจึงไม่สามารถใส่วัสดุอื่นๆเช่น โลหะลงไป ในแม่แบบได้เนื่องจากจะทำให้โลหะเกิดการบิดเบี้ยวและแม่แบบเกิดการเสียหายได้จึงทำให้ไม่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์แบบหุ้มด้วยเทคนิคนี้ได้
- ไม่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้
- เวลาของวัฏจักรการผลิต (Cycle time) ค่อนข้างยาวทำให้กำลังการผลิต (Productivity) ต่ำการผลิตชิ้นงานที่หน้าต้องใช้เวลาอันจำเป็นต้องมีการตัดครีบทิ้งเสมอ

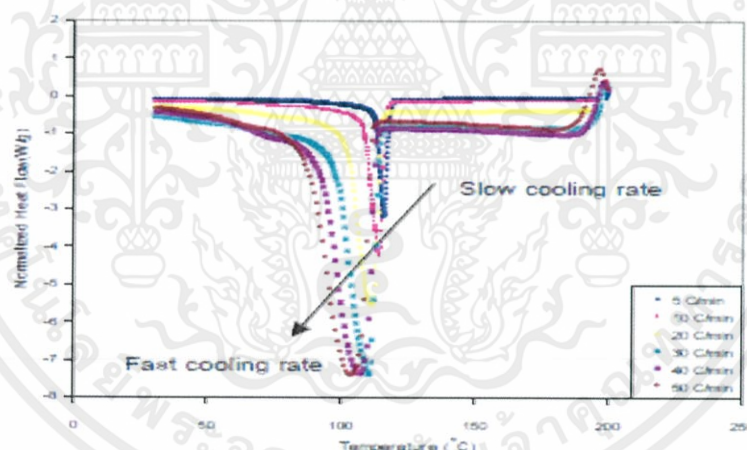
สำหรับกรรมวิธีในการไล่ครีบออกนั้นสามารถทำได้ 2 วิธีคือการทำด้วยมือได้แก่การขีดด้วยตะไบหรือหินเจียรการเลื่อยและการใช้เหล็กกระทิงเป็นต้นการไล่ครีบออกด้วยมือเป็นวิธีที่ทำได้เรียบร้อยแต่ช้าและมีค่าแรงสูงนิยมใช้สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ส่วนอีกวิธีเป็นการทำด้วยเครื่องอัด โนมัติได้แก่การใส่ในถังหมุนการพันทรายการใช้แปรงขัด

และการใช้การสั่นเป็นต้นวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้เร็วประหยัดเวลาได้มากแต่ต้องระวังผิวของชิ้นงานอาจถูกขีดข่วนเสียหาย

## 2.9 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์

### 2.9.1 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) [20,21]

เทคนิค DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยความร้อนที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยการนำสารตัวอย่างและสารอ้างอิงอยู่บนเทอร์โมคัพเพิลที่ต่อกับเตาเผา เมื่อให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างและสารอ้างอิงที่เฉื่อยหรือทำให้สารเย็นลง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในสารตัวอย่าง ทำให้อุณหภูมิของสารตัวอย่าง ( $T_s$ ) และสารอ้างอิง ( $T_r$ ) แตกต่างกันเมื่อวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $T_s - T_r$ ) แล้วเปรียบเทียบเวลาหรืออุณหภูมิ จะได้เส้นกราฟของ DSC ค่าความแตกต่างของอุณหภูมินี้จะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความร้อนที่ไหลเข้าสู่สารตัวอย่างและสารอ้างอิง เมื่อพล็อตค่าความร้อนในหน่วย  $mW(mJ/sec)$ ;  $1 mJ/sec = 0.21 mCal/sec$  กับอุณหภูมิ พิกัดที่อยู่เหนือแกนแสดงถึงการคายความร้อน และพิกัดที่อยู่ใต้แกนแสดงถึงการดูดกลืนความร้อน โดยปริมาณความร้อนคำนวณได้จากพื้นที่ใต้พิก ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ปริมาณความร้อนที่พอลิเมอร์คายออกมาเนื่องจากการตกผลึกที่อัตราการลดอุณหภูมิที่แตกต่างกันทั้ง 6 อัตรา [21]

### 2.9.2 เครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM) [22]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นอุปกรณ์ที่ประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้สนามไฟฟ้าแทนเลนส์กระจกโดยมีตัวเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าให้ประโยชน์ด้านค่าตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิววัตถุต่อจากนั้นจะมีไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสนอกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้อุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอร์รับภาพโดยภาพของวัตถุจะมี

กำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าถึงระดับมากกว่า 100,000 เท่าและสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพซึ่งจะขึ้นกับลักษณะของวัตถุได้ตั้งแต่ระดับ 3 ถึง 100 นาโนเมตรหลักการเกิดภาพในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเริ่มต้นจากเมื่ออิเล็กตรอน

หลักการเกิดภาพในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จะเริ่มต้นจากเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000-3,000 eV) ที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกดึงดูดลงสู่เบี่ยงล่างโดยแผ่นแอโนด (anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  ทอร์และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน ซึ่งลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนลงสู่เบี่ยงล่างผ่านเลนส์วัตถุซึ่งทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิววัตถุพอดี และลำของอิเล็กตรอนที่กระทบผิววัตถุจะมีขนาดอยู่ในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยจะมีชุดควบคุมการส่องกราด (scan coil) ของลำอิเล็กตรอนซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมทิศการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิววัตถุ โดยจะสามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (control unit)

เมื่ออิเล็กตรอนกระทบผิววัตถุจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุของวัตถุและจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ชั้นความลึกจากพื้นผิวที่ระดับต่างๆเป็นผลให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ชนิดต่างๆออกมาซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคและวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบในวัตถุโดยสัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนชนิดต่างๆมีดังนี้

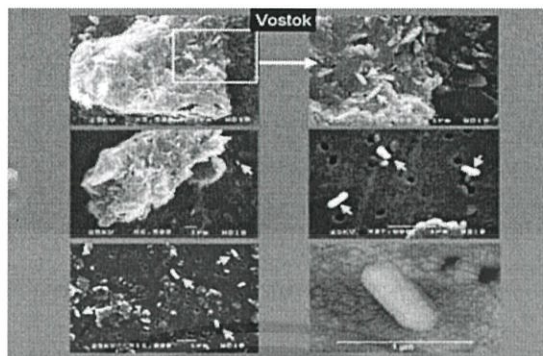
- สัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image, SEI) เป็นภาพที่เกิดจากกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ (ประมาณ 3-5 eV) เกิดขึ้นในระดับพื้นผิวที่ไม่ลึก (น้อยกว่า 10 นาโนเมตร) โดยจะเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ผิวต่ำ

- สัญญาณภาพที่ได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image, BEI) ซึ่งเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมของวัตถุและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะเกิดที่พื้นผิวระดับลึกมากกว่า 10 นาโนเมตร โดยจะเกิดขึ้นกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

- สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image, XRI) ชนิดที่เป็นเป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆถูกกระตุ้น (excited) หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจรออกมาทำให้อะตอมต้องรักษาสถิตของโครงสร้างรวมภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่และต้องลดระดับพลังงาน

ภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่าโดยการปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นวงโคจรที่ไปแทนที่ซึ่ง

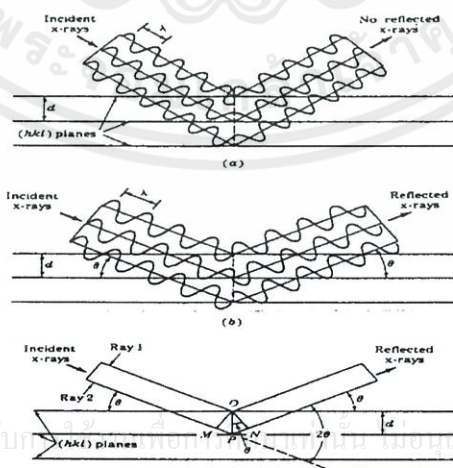
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามระดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ



รูปที่ 2.17 แสดงภาพตัวอย่างที่ถ่ายได้จากเครื่อง SEM [22]

### 2.9.3 เครื่อง X-ray diffraction (XRD) [23]

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน หรือ เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่นำรังสี X มาใช้วิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีหัววัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณของสารประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้น ของสารประกอบในสารตัวอย่าง อีกทั้งความหนาของฟิล์มได้อีกด้วย



รูปที่ 2.18 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [23]

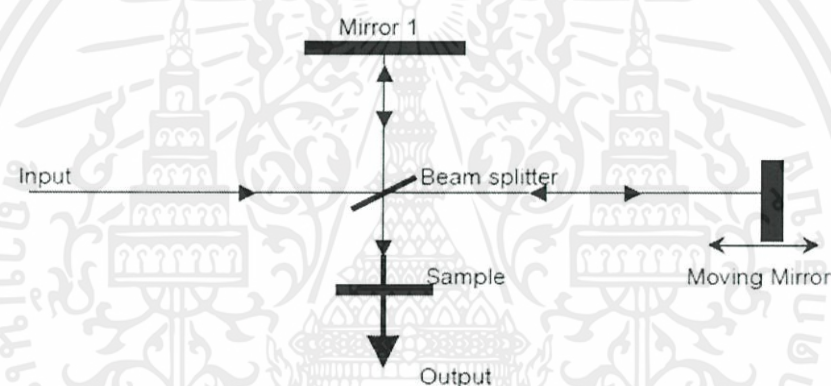
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.4 Fourier Transform InfraRed Spectrometer (FT-IR) [24]

Fourier Transform InfraRed Spectrometer (FT-IR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ที่พัฒนาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆได้

หลักการและวิธีการวิเคราะห์

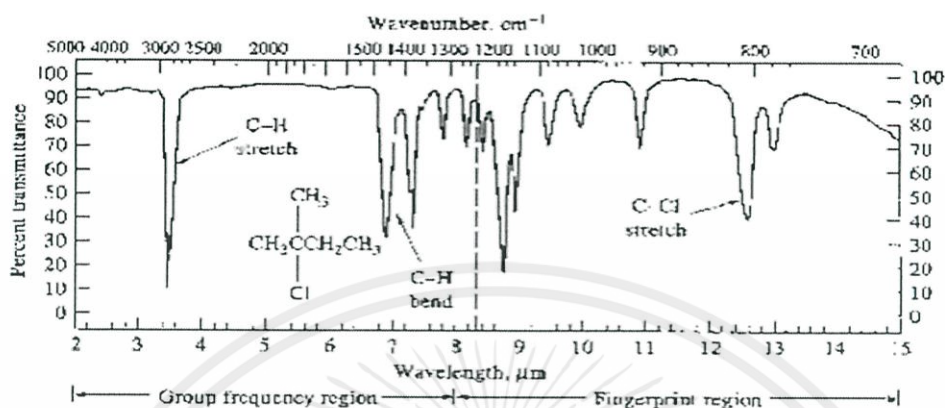
แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด สู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีก ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่คลื่นที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer [24]

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็นช่วงๆคือ คลื่นอินฟราเรดในช่วง Wave number 4,000-12,800  $\text{cm}^{-1}$  (2.5-0.78 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number 200-4,000  $\text{cm}^{-1}$  (50-2.5 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number 10-200  $\text{cm}^{-1}$  (1,000-50 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น คลื่นอินฟราเรดในช่วง wave number 4,000 – 400  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืน

แสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรด สเปกตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum) ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดง อินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum) [24]

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของ โมเลกุลของสารนั้นๆว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่น สารกลุ่มแอลกอฮอล์ จะพีกของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,300-3,600  $\text{cm}^{-1}$  หมู่เอมีน มีพีกพันธะ N-H อยู่ที่ 3,500  $\text{cm}^{-1}$  สารเอสเทอร์พีกของหมู่ C-O อยู่ที่ประมาณ 1,000-1,300  $\text{cm}^{-1}$  เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน IR spectrum พีกในช่วง 1,350-4,000  $\text{cm}^{-1}$  จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910-1,350  $\text{cm}^{-1}$  จะได้ แถบการดูดกลืนคลื่นแสง ที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region)

การใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาน้อยมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมี จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตร โครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณา เปรียบเทียบจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่าง ที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พีกต่อพีก ถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างพอลิเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) [25]

### 2.10.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile tests) [25]

ความแข็งแรงดึง (Tensile test) มอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) นับเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุต่างๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ การทดสอบแรงดึงคือ การวัดความสามารถของวัสดุหนึ่งที่จะทนทานต่อแรงดึงยึดออกจากกัน ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด แตกหัก หรือเสียหาย ค่ามอดูลัสแรงดึงจะเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งเปราะ (Stiffness) ของวัสดุสามารถหาได้จากความชันของกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve)

การทดสอบแรงดึงทำได้โดยการยึดชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดและรูปร่างตามมาตรฐาน โดยใช้ที่จับ (grips) สองชุด ที่จับข้างหนึ่งจะถูกยึดให้อยู่กับที่และอีกข้างหนึ่งจะเคลื่อนที่โดยมีเซลล์วัดแรง (load cell) เป็นตัววัดและควบคุมแรงที่กระทำต่อชิ้นงานตัวอย่างซึ่งพลาสติกโดยทั่วไปใช้ความเร็วในการดึง 50-100 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากอัตราเร็วนี้เปรียบเสมือนการดึงธรรมดา ในขณะที่การดึงในอัตราเร็วสูงเปรียบเสมือนการกระแทกหรือการกระตุกชิ้นงานตัวอย่าง การเพิ่มอัตราเร็วในการดึงจะทำให้ความชันของเส้นกราฟความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้น หรือค่ามอดูลัสที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเครื่องวัดแรงดึงที่นิยมใช้เรียกว่า เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile testing machine) หรือ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine) เนื่องจากมีความหลากหลายในการใช้งาน

## 2.11 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) [26]

### 2.11.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ [26]

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อน โดยจะพิจารณาจากลักษณะภายนอกของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ง่าย เช่น ลักษณะพื้นผิว สี และกลิ่นของพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น วิธีการวิเคราะห์นี้อาจใช้วิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า และอาศัยการสัมผัสด้วยมือ

### 2.11.2 วิเคราะห์สมบัติการดูดน้ำ [26]

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 โดยสามารถคำนวณปริมาณการดูดซึมน้ำได้จากสมการ

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

เมื่อ  $M_n$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ เวลาใดๆ

$M_c$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

$W_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามมิให้ผู้อื่นนำข้อมูลไปใช้โดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ดร.บรรจง บุญชม และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  จากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ที่อุณหภูมิ ใน น้ำ, แอซิโตนและเอทานอล ซึ่งจะเกิดตะกอนขึ้น จากนั้นตรวจสอบเอกลักษณ์ของตะกอนโดยใช้เทคนิค thermoanalytical ( TG / DTG / DTA ) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน ( SEM ) , X- ray ( XRD ) และ FTIR สเปกโทรสโกปี ผล XRD ของตะกอน  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ใน ระบบ น้ำ และ แอซิโตนมีลักษณะ ที่คล้ายกัน ซึ่งแตกต่างจาก ระบบ เอทานอล สำหรับผล FTIR spectra พบว่าทั้งในสามระบบ แสดง ลักษณะ ที่คล้ายกัน ทั้งพฤติกรรมทางความร้อนและรูปร่างลักษณะของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ใน สามระบบแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ กระบวนการสังเคราะห์แคลเซียมฟอสเฟตแสดง คุณสมบัติทางกายภาพ ที่แตกต่างกัน ที่มีความสำคัญสำหรับการใช้งาน ที่เฉพาะเจาะจง

ดร.บรรจง บุญชม [28]  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ถูกสังเคราะห์ประสบความสำเร็จโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองอย่างรวดเร็วและง่ายจาก  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ในตัวกลางที่เป็นของเหลว คือ แอซิโตนที่อุณหภูมิห้องนานด้วยระยะเวลาอันสั้น (15 นาที) ซึ่งแอซิโตนจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดก๊าซ  $\text{CO}_2$  และลดปฏิกิริยาร้อนแรงระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{H}_3\text{PO}_4$  และเป็นการเตรียมการแก้ปัญหา พฤติกรรมทางความร้อนและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ที่แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  เป็น parallelogram-like crystals งานนี้นำเสนอที่เรียบง่ายประหยัดค่าใช้จ่ายที่มีประสิทธิภาพการใช้เวลารวดเร็วและเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการตกตะกอนของ  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  การใช้สารตัวกลางที่แตกต่างกันจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีบางส่วนของวัสดุที่น่าสนใจซึ่งอาจจะเป็นวิธีการทางเลือกสำหรับการใช้งานที่มีศักยภาพเช่นการเร่งปฏิกิริยา, เซรามิกและวัสดุการแพทย์ ฯลฯ

Nakamura E.M. และคณะ [29] ได้ศึกษาการทำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) โดยทำการผสมแป้งชนิดต่าง ๆ กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อเป็นสารประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยการนำแป้งปริมาณ 5, 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding) เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้ง แต่สมบัติอื่น ๆ เช่น เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และความแข็งแรงโค้งลดลง สารประกอบระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งในอัตราส่วน 20% โดยน้ำหนัก มีมอดูลัส (Modulus) มากที่สุดและจากการทดลองกับแป้งหลายชนิดพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลดีที่สุดเมื่อใส่ปริมาณ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

M. Thunwall และคณะ [30] ได้ศึกษากระบวนการขึ้นรูปฟิล์มของเทอร์โมพลาสติกสตาρχ (Thermoplastic starch) โดยทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาρχจากแป้งมันสำปะหลัง 2 ชนิด ได้แก่ แป้งมันสำปะหลังทั่วไป และแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์ร่วมกับกลีเซอรอล ซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอรัไว้กับแป้งมันสำปะหลังดังกล่าวด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ที่ต่อเข้ากับเครื่องเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (Blown film) โดยในขั้นตอนการผสมจะผสมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่นำไปผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาρχที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังออกซิไดซ์จะมีเสถียรภาพในการเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มดีกว่า และฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

Mali และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาผลของพลาสติกไซเซอรั 3 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และกลีเซอรอลผสมกับซอร์บิทอลในอัตราส่วน 1:1 โดยใช้ปริมาณ 0, 20 และ 40% ต่อแป้ง 100 กรัม พบว่า ชนิดและความหนาแน่นของพลาสติกไซเซอรัมีผลต่อปริมาณและอัตราการดูดความชื้น โดยกลีเซอรอลจะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดีที่สุด และถ้าใส่ในปริมาณที่มากกว่า 40% จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลน้อย

ปิยะวิทย์ สดสุขชาติ [32] ได้ทำการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการผสมแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลในอัตราส่วน 75:25 จากนั้นทิ้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่อง internal mixer โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมคือ 160 องศาเซลเซียส ความเร็วสกรู 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง compression molding โดยจะต้องนำแผ่นใสชนิดทนความร้อนมาวางไว้ระหว่างแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถแกะชิ้นงานได้ง่ายขึ้น โดยในการอัดเข้าแม่พิมพ์จะมี 3 stage คือ stage ที่ 1 อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงดัน 5000 psi เป็นเวลา 20 นาที stage ที่ 2 อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงดัน 15000 psi เป็นเวลา 10 นาที และ stage ที่ 3 อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แรงดัน 25000 psi เป็นเวลา 5 นาที และปล่อยให้แม่พิมพ์เย็นตัว 15 นาที

A.L. N. da Silva และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PP/CaCO<sub>3</sub> คอมโพสิต โดยเปรียบเทียบปริมาณของ CaCO<sub>3</sub> ที่ใช้ในการผสมจากผลงานวิจัยพบว่า CaCO<sub>3</sub> มีผลให้ค่ามอดูลัสของยังส์ของ PF เพิ่มขึ้นทุกปริมาณการผสมแต่เมื่อพิจารณาจากค่าการทนต่อแรงกระแทกพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อผสม CaCO<sub>3</sub> ในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักอธิบายได้ว่าเมื่ออนุภาคฟิลเลอร์กระจายตัวใน PP เมทริกซ์ส่งผลให้พลังงานจากการกระแทกสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้นแต่เมื่อผสม CaCO<sub>3</sub> ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักพบว่าค่าการทนต่อแรงกระแทกลดลง เนื่องจากอนุภาคของ CaCO<sub>3</sub> มีแนวโน้มเกิดการรวมตัวกันแสดงให้เห็นว่าการทนต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของอนุภาคฟิลเลอร์ใน PP เมทริกซ์

K. Yang และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาผลของการผสม  $\text{CaCO}_3$  ขนาดอนุภาค 0.07 ไมครอนต่อสมบัติเชิงกลและสัญญาณวิทยาของ PP/ $\text{CaCO}_3$  คอมโพสิตโดยเปรียบเทียบความแตกต่างของการผสมใน PP 3 ชนิด ได้แก่ PP โพลิโพรพิลีน (PP1), PP-PE โพลิโพรพิลีน (PP2) และ PP1 ผสม PP2 อัตราส่วน 1:1 (PP3) จากงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อผสม  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณร้อยละ 2-10 โดยน้ำหนักใน PP ทั้ง 3 ชนิดมีผลให้ค่าการต้านทานแรงดึงของคอมโพสิตสูงกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์และเมื่อเพิ่มปริมาณการผสมเป็นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่าค่าการต้านทานแรงดึงลดลงต่ำกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์แต่ค่าการต้านทานแรงดัดและค่าโมดูลัสของแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยนอกจากนี้พบว่าค่าการต้านทานแรงกระแทกของ PP2/ $\text{CaCO}_3$  และ PP3/ $\text{CaCO}_3$  คอมโพสิตมีค่าสูงกว่า PP1/ $\text{CaCO}_3$  มากแสดงให้เห็นว่า PP2/ $\text{CaCO}_3$  และ PP3/ $\text{CaCO}_3$  มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ดีกว่า PP1/ $\text{CaCO}_3$  นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ PP ทั้ง 3 ชนิดที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักพบว่า  $\text{CaCO}_3$  มีการกระจายตัวที่ดีและเนื่องจากความเหนียวของ PP ทั้ง 3 ชนิดต่างกันรูปแบบการแตกหักจึงไม่เหมือนกันโดยสังเกตได้ว่า PP1 มีรูปแบบการแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fracture) พื้นผิวจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบต่างจาก PP2 และ PP3 ที่มีรูปแบบการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) พื้นผิวจะมีลักษณะค่อนข้างขรุขระเนื่องจากบริเวณผิวสัมผัสของคอมโพสิตมีความแข็งแรงซึ่งเชื่อว่ามีส่วนช่วยหยุดการขยายตัวของรอยแตกสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทก

ลักษณะ หอมมณี [35] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและสมบัติต่างๆของพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งถั่วเขียว โดยใช้มาลิคแอนไฮดรายด์กราฟพอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม และปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยสารก่อเจล ได้แก่ เจลาติน เพกติน หรือคาร์ราจีแนน ที่ปริมาณ 0 2 4 6 8 10% โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาศึกษาสมบัติต่างๆพบว่า สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมคาร์ราจีแนนให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและค่าโมดูลัสสูงที่สุด และเมื่อศึกษาสัญญาณวิทยาพบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมเพกตินหรือคาร์ราจีแนนมีความเข้ากันได้ดีกับวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งถั่วเขียว จากการทดสอบการดูดซับน้ำ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงดูดซับน้ำต่ำที่สุด สำหรับสมบัติทางความร้อน พบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมเพกตินหรือคาร์ราจีแนนมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้ง M. L. Fishman และคณะ [36] ศึกษาการเตรียมฟิล์มรับประทานได้และย่อยสลายได้จากแป้งผสมเพกติน โดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในการทดลอง

ผสมเพกตินและเม็ดแป้งที่มีอะไมโลสสูง และกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอดคู่ นำฟิล์มที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลทางความร้อน ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าภาพจาก SEM บอถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำในระหว่างการอัดรีดซึ่งใช้ในการควบคุมการเกิดเจลทีโนซ์ของแป้งได้ และข้อมูลจากเทคนิค DMTA พบว่าปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอัดรีดส่งผลถึงการเกิดเจลทีโนซ์ของแป้งซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งผสมเพกตินที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว มีค่า -50 องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิห้องฟิล์มสามารถดึงยืดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เกรดการค้า บริษัท LAB System จำกัด
2. กรดฟอสฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) เกรดการค้า บริษัท อิตัสมาร์ จำกัด
3. แอซีโตน (Acetone) เกรดวิเคราะห์บริษัท Fisher Chemical Co., Ltd
4. แป้งมันสำปะหลัง Food grade เกรดอาหาร เครื่องหมายการค้าต้นสน
5. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า บริษัท LAB System จำกัด
6. เพกติน (pectin) เกรดอาหาร บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ชุดเครื่องแก้ว
2. ชุดปั่นกวน
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก : Mettler Toledo Co., Ltd รุ่น ML3002
4. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Ultrafiltration) : SIBATA Circulating Aspirator WJ-20
5. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter : DSC) : Mettler – Toledo รุ่น DSC822 และ (Thermogravimetric Analyzer : TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris1
6. เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด : Mach Group (1992) Co., Ltd รุ่น MGLP-20AT
7. เครื่องตรวจวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FTIR spectrum GX
8. เครื่องตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ X-ray Diffractometer (XRD) : XRD รุ่น D8 Advance
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.
10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : Lloyd Instrument Ltd. รุ่น LR 5 K
11. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : Chareon TUT Co., Ltd รุ่น MX500-D75L90
12. เครื่องบดพลาสติก (plastic grinder) : Bosco Engineering รุ่น Bosco A600

เอกสารนี้เป็น 13. ตู้อบ (Oven) ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

ตวงกรดฟอสฟอริก 683 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น (ได้สารละลายกรดฟอสฟอริก 10 M ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร)

#### 3.3.2 การสังเคราะห์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

นำ  $\text{CaCO}_3$  มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ



ขั้นตอนการทำมีดังนี้

1. ชั่งน้ำหนัก  $\text{CaCO}_3$  ปริมาณ 100.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง จดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้แน่นอนลงในสมุดบันทึก เดิมแอซิโตน ลงในบีกเกอร์จนพอท่วมสาร  $\text{CaCO}_3$
2. ตวงสารละลาย 10 M  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ปริมาตร 210 มิลลิลิตร แล้วเติมลงในของผสมในข้อ 1 จากนั้น ปั่นกวนด้วยความเร็วสม่ำเสมอ ให้ทำในตู้ควั่น เพราะเป็นกรดเข้มข้น ไอกรดระเหยง่ายและปฏิกิริยาจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ปั่นกวนประมาณ 30 นาที
3. นำตะกอนที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ ล้างตะกอนด้วยแอซิโตน ห้ามล้างด้วยน้ำกลั่น เพราะตะกอนละลายน้ำได้ นำตะกอนไปอบที่ 45 องศาเซลเซียสจนแห้ง จากนั้นเก็บตะกอนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR และวิเคราะห์ลักษณะผลึกและอัฐฐานด้วยเทคนิค XRD

#### 3.3.3 การเตรียมชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตัดซ์กับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต

1. นำแป้งมันสำปะหลังมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำแป้งมันสำปะหลังออกจากตู้อบแล้วทิ้งไว้ให้เย็น
2. นำแป้งมันสำปะหลังผสมกับพลาสติกไซเซอร (กลีเซอรอล) โดยมีอัตราส่วนดังตารางที่ 3.1 แล้วพักทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง เพื่อให้พลาสติกไซเซอรเข้าไปแทรกในแป้งมันสำปะหลัง
3. นำแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮเดรตมาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตัดซ์ โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความเร็วสกรู เท่ากับ 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบหมายให้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กลิเซอรอล และแคลเซียมไโคโรเจน ฟอสเฟตโมโนไฮดรต

สูตร	แป้งมันสำปะหลัง (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	แคลเซียมไโคโรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรต (กรัม)
1	70	30	0
2	70	30	1
3	70	30	2
4	70	30	3

- นำสารที่ผสมแล้วไปตัดเม็ดด้วยเครื่องบดพลาสติก (plastic grinder) จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression) โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความดันกดอัด 2500 N/m<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที
- นำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยา

### 3.3.4 การปรับปรุงสมบัติขึ้นงานด้วยเพกติน

- นำอัตราส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กลิเซอรอลและแคลเซียมไโคโรเจน ฟอสเฟต โมโนไฮดรตสูตรที่ดีที่สุดมาผสมกับเพกตินในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง กลิเซอรอล แคลเซียมไโคโรเจน ฟอสเฟตและเพกติน

สูตร	ขึ้นงาน			Pectin (กรัม)
	แป้ง (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	แคลเซียมไโคโรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรต (กรัม)	
1	70	30	2	0
2	70	30	2	5
3	70	30	2	10
4	70	30	2	15

- นำสารที่ผสมแล้วไปบดด้วยเครื่องบดพลาสติก (plastic grinder) จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression) โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความดันกดอัด 2500 N/m<sup>2</sup> เป็นเวลา 15 นาที
- นำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยา และเปรียบเทียบกับขึ้นงานที่ไม่มีการเติมเพกติน

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับกริใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

#### 3.4.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต



##### 3.4.1.1 วิเคราะห์การตรวจสอบเอกลักษณ์พื้นฐานของการสันของสาร

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^4 \text{ kg/cm}^2$  นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้กราฟสเปกตรัมของสารตัวอย่าง

##### 3.4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะผลึกและออสติฐาน

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึก ขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของสารตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกันเพื่อระบุวิฤภาคขององค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้  $2\theta$  ในช่วง  $3-60^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^\circ/\text{นาที}$  แล้วปล่อยรังสีเอกซ์เข้าชิ้นตัวอย่าง

#### 3.4.2 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงาน

##### 3.4.2.1 การทดสอบแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดูลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 3 ชิ้น ต่อ 1 สูตร โดยทำการทดสอบตามสถานะดังนี้

น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 N
ระยะห่างของตัวจับชิ้นงาน (Gauge length)	25 mm.
ความเร็วในการดึง (Cross head speed)	60 mm/min

ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ได้จากสมการต่อไปนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) =  $F/A$

มอดูลัส (Young's Modulus,  $E$ ) =  $(F/A) / [(L - L_0) / L_0] * 100$

เมื่อ	F	คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )
	L	คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
	$L_0$	คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

### 3.4.2.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

เทคนิค Differential Scanning Calorimetry : DSC

นำชิ้นงานตัวอย่างมาศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ( $T_c$  onset) ด้วยเครื่อง DSC โดยทำการชั่งน้ำหนักสารประมาณ 10 mg. นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ 400 °C

### 3.4.2.3 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองคำและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป

### 3.4.2.4 ปริมาณการดูดซับน้ำ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D570 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 วัน โดยจดบันทึกน้ำหนักทุก 2 วัน ซึ่งปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ	$M_a$	คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ เวลาใดๆ
	$W_c$	คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่น้ำ
	$W_0$	คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

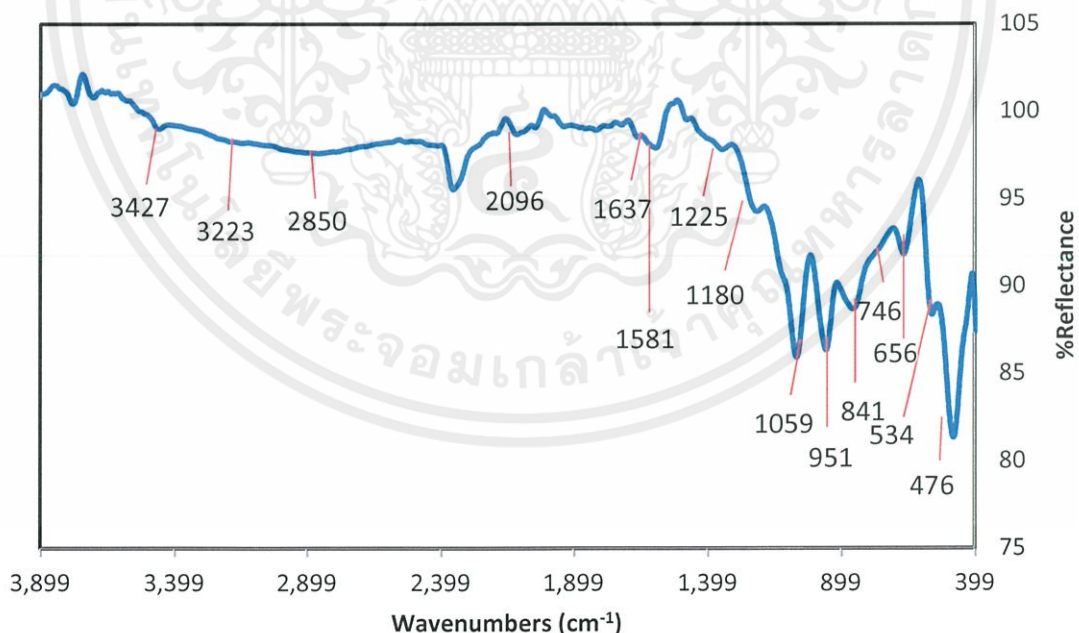
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ โดยการศึกษาแบ่งเป็น 3 ตอน ดังนี้ ตอนที่ 1 การสังเคราะห์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ตอนที่ 2 การศึกษาผลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรตและตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน การวิเคราะห์ผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนได้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 การสังเคราะห์แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

จากการทดลองนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M โดยมีเอซิโตนเป็นตัวกลาง พบว่าเมื่อสารดังกล่าวทำปฏิกิริยากันจะเกิดตะกอนสีขาวขึ้น นำตะกอนไปกรองแล้วอบให้แห้ง จากนั้นจึงนำตะกอนที่แห้งแล้วไปวิเคราะห์ผลต่อไป

##### 4.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ทำได้โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในอินเทอร์เน็ตโดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) แล้วปรากฏพิกที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่าง ๆ ระบุหมู่ฟังก์ชันตามตารางที่ 4.1 ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในโครงสร้างของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต แม้ว่าจะอบแห้งแล้วแต่เมื่อนำมาวิเคราะห์ก็ยังคงปรากฏพิกของน้ำอยู่ที่ตำแหน่ง 1581 3223 และ 3427 อยู่แต่มีปริมาณไม่มาก นอกจากนั้นยังมีพิกปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง 476 841 และ 951 เป็นพิกของ  $\text{P}(\text{OH})_2$  ที่ตำแหน่ง 534 656 1059 และ 1180 เป็นพิกของ  $\text{PO}_2$  ที่ตำแหน่ง 746 และ 1225 เป็นพิกของ P-O-H และที่ตำแหน่ง 2850 2096 และ 1637 เป็นพิกของ  $\text{H}_2\text{PO}_4$

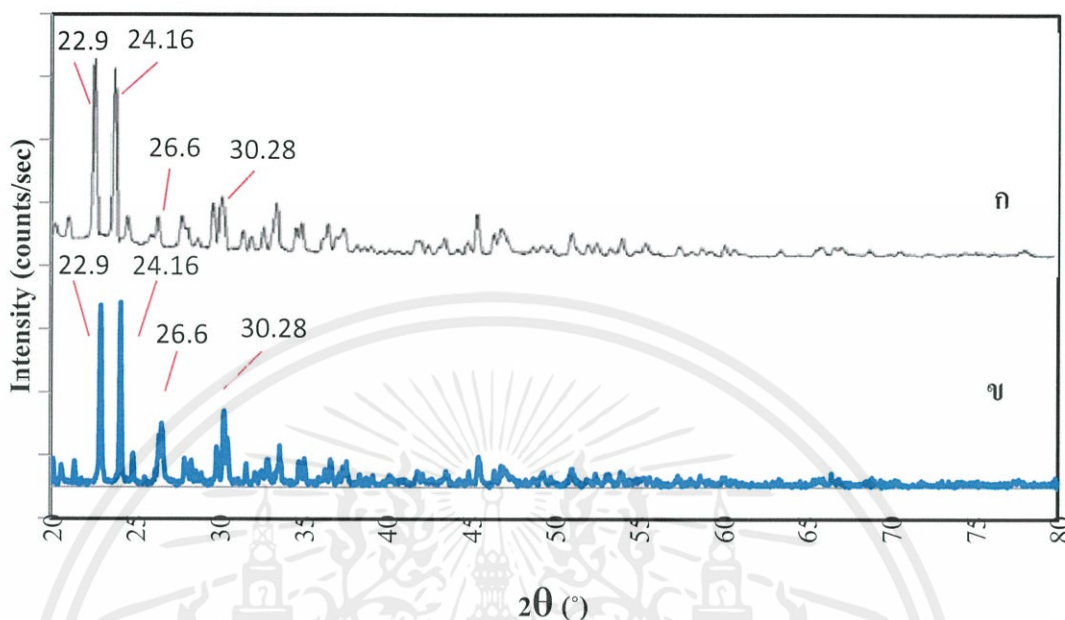
ตารางที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันของเลขคลื่นที่พบในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR

เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน
476	$\text{P}(\text{OH})_2$ bending
534	$\text{PO}_2$ rocking
656	$\text{PO}_2$ bending
746	P-O-H out of plane bending
841	$\text{P}(\text{OH})_2$ symmetric stretching
951	$\text{P}(\text{OH})_2$ asymmetric stretching
1059	$\text{PO}_2$ symmetric stretching
1180	$\text{PO}_2$ asymmetric stretching
1225	P-O-H in plane bending ( $A_1$ )
1581	H-O-H bending ของ water
1637	O-H stretching ของ $\text{H}_2\text{PO}_4$ (band C)
2096	O-H stretching ของ $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ (band B)
2850	O-H stretching ของ $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ (band A)
3223	O-H stretching mode ของ HOH
3427	O-H stretching mode ของ HOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 XRD

การศึกษาโครงสร้างผลึกของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตโดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ดิฟแฟร็กโตแกรมของ (ก) แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตอ้างอิง และ (ข) แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่สังเคราะห์

จากรูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างผลึกของของ (ก) แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตอ้างอิงและ (ข) แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่สังเคราะห์ พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบพิกทั้งสองแล้ว เห็นได้ว่ามีพิกที่ตรงกัน คือ ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 22.9 24.16 26.6 และ 30.28 แสดงว่าแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างใกล้เคียงกับข้อมูลมาตรฐาน

จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าสารที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาโดยการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M และมีเอซิโตนเป็นตัวกลางนั้นคือแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาผลของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรต

จากการทดลองนำแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตที่สังเคราะห์ได้ในขั้นตอนที่ 1 มาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในสัดส่วนตามตารางที่ 3.1 แล้วนำไปผสมในเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) จากนั้นนำไปตัดเม็ด ทำการขึ้นรูป แล้วนำไปทดสอบ ได้ผลดังนี้

### 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน

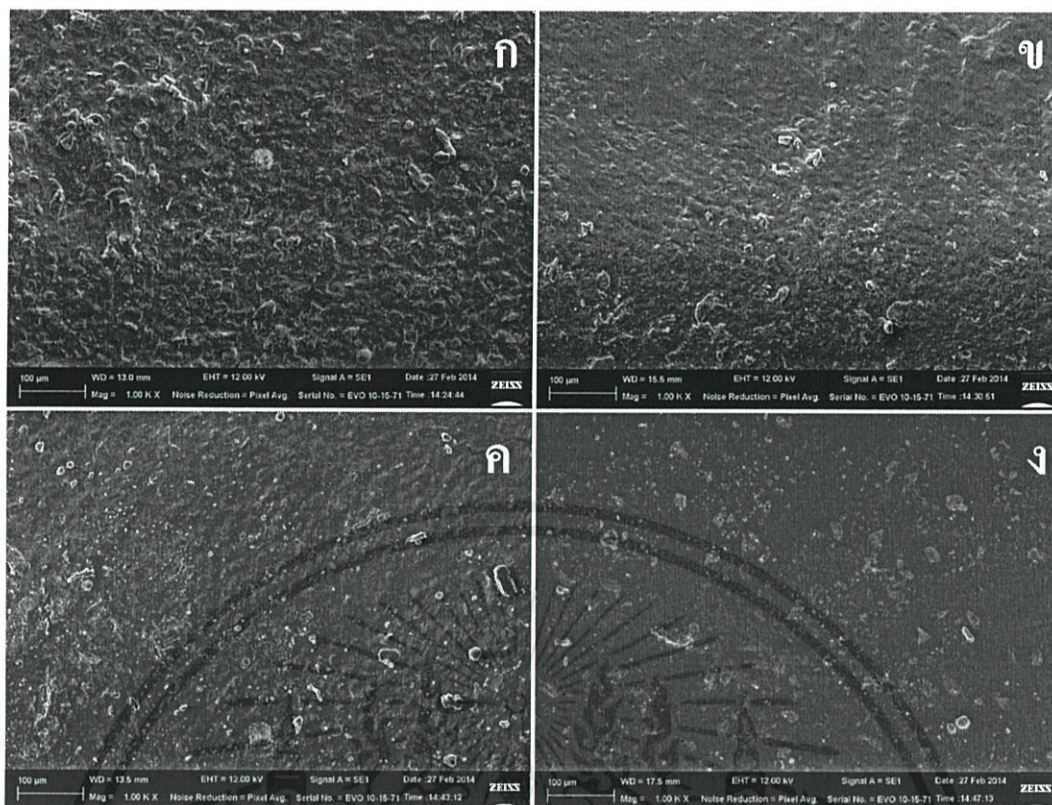
สูตร	ลักษณะที่สังเกตได้
TPS100	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ง่าย มีสีน้ำตาลอ่อน พื้นผิวเรียบ ไม่เหนียวติด
TPS100/Ca1	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ มีสีน้ำตาลอ่อน พื้นผิวเรียบ เหนียวติดเล็กน้อย
TPS100/Ca2	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ มีสีน้ำตาลอ่อน พื้นผิวเรียบ เหนียวติด
TPS100/Ca3	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ มีสีน้ำตาลอ่อน พื้นผิวเรียบ เหนียวติดมาก ปลดชิ้นงานยาก ชิ้นงานนุ่ม

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตลงไป ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีความเหนียวติดเพิ่มขึ้น ขึ้นรูปได้ยากขึ้น เพราะแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตเข้าไปแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในสายโซ่ลดลง

### 4.2.2 ลักษณะทางลักษณะพื้นฐานวิทยา

การวิเคราะห์ทางลักษณะพื้นฐานวิทยาเป็นการวิเคราะห์เพื่อสังเกตการจัดเรียงตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และการกระจายตัวของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตที่ทำการเติมลงไปประมาณ 1%, 2% และ 3% ได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



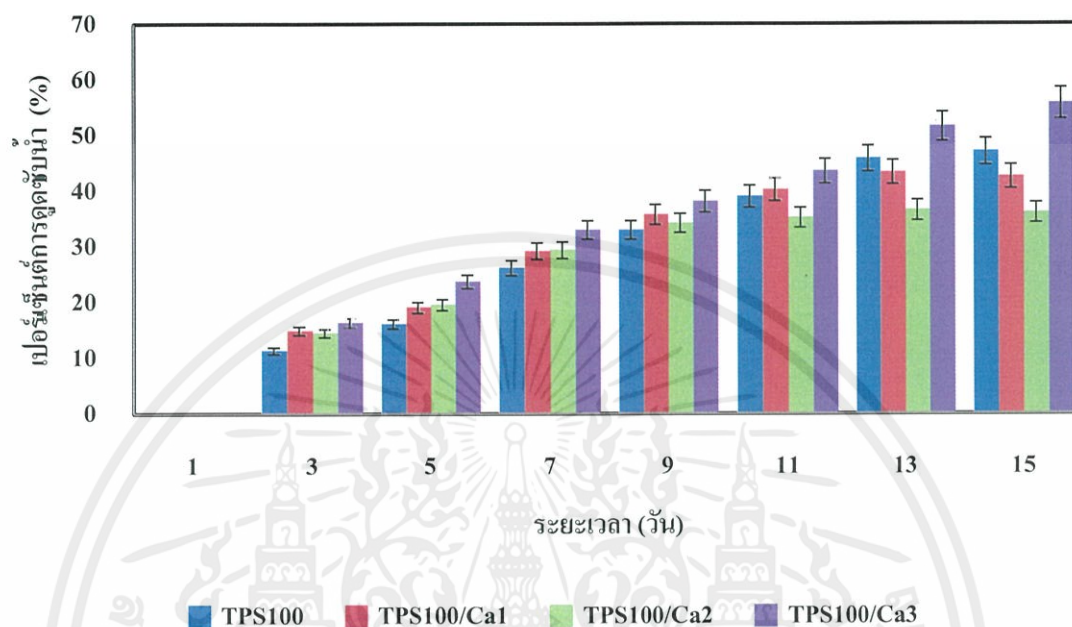
รูปที่ 4.3 SEM ของ (ก.) TPS100, (ข.) TPS100/Ca1, (ค.) TPS100/Ca2 และ (ง.) TPS100/Ca3 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจะมีลักษณะเป็นก้อนกลม ๆ เรียงตัวใกล้กันเป็นริ้ว เมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไปในปริมาณ 1% พบว่าจะมีก้อนลักษณะเหลี่ยม ๆ ของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตมาปะปนอยู่ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไปที่อีก 1% ก้อนลักษณะเหลี่ยม ๆ ของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตก็จะมาปะปนอยู่ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมากขึ้น และเมื่อสังเกตการกระจายตัวของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต พบว่าแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตมีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งเป็นผลดีเพราะจะทำให้ชิ้นงานมีสมบัติที่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตพบว่าที่ 1% และ 3% มีการกระจายตัวของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ 2% ที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ปริมาณการดูดซับน้ำ

จากการทดสอบการดูดซับน้ำของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ ได้ผลการทดลองดังนี้ [ภาคผนวก ก]



รูปที่ 4.4 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานสูตรต่างๆ ในแต่ละวัน

จากรูปที่ 4.4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานสูตรต่างๆ ในแต่ละวันพบว่าเมื่อนำชิ้นงานสูตรที่ไม่เติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตไปวางไว้ในที่ชื้น และทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนไปในแต่ละวัน พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสไตร์มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้น้ำเข้ามาเกาะที่ชิ้นงาน ส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานเพิ่มขึ้น และเมื่อนำชิ้นงานที่เติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตไปทำการทดลอง พบว่าน้ำหนักจะมีค่ามากกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตลงไป เพราะแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตมีหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิลเช่นกัน จึงสามารถดูดน้ำได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการวัดไประยะหนึ่งพบว่าค่าการดูดซับน้ำของสูตรที่มีการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตลงไป 2% มีค่าเริ่มคงที่เนื่องจากที่ 2% เมื่อทำการวัดไประยะหนึ่งจะถึงจุดอิ่มตัวก่อนจึงไม่สามารถดูดต่อไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าถึงความสามารถในการกระจายตัวของเอกสารนี้แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตที่สม่ำเสมอ ในขณะที่ 1% และ 3% การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

#### 4.2.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) พลังงานความร้อนที่หลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) และร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน ได้ผลดังตารางที่

#### 4.3 [ภาคผนวก ข, ภาคผนวก ค]

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงาน

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	พลังงานความร้อนที่หลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ )	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)
TPS100	141.05	24.1325	17.83102
TPS100/Ca1	131.18	1.1337	0.837668
TPS100/Ca2	129.49	0.9254	0.683759
TPS100/Ca3	129.41	0.7304	0.5396778

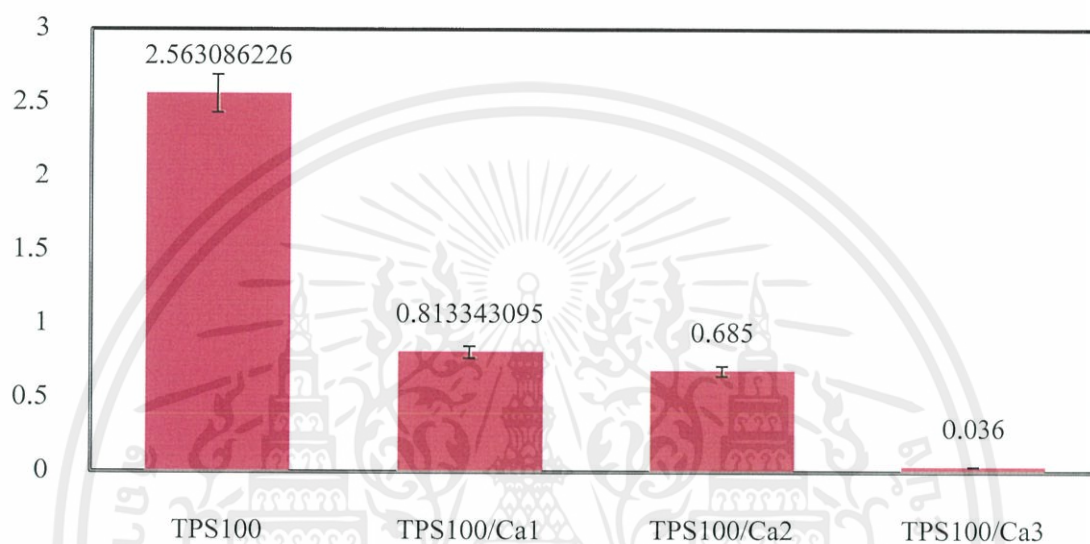
จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไป ทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลลดลง เนื่องจากแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่เติมลงไปนั้นส่งผลให้สายโซ่อยู่ห่างกันมากจึงไม่สามารถส่งผ่านความร้อนได้ และเมื่อสังเกตร้อยละความเป็นผลึกพบว่าเมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต ค่าความเป็นผลึกจะลดลงเนื่องจากแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเทอร์โมพลาสติกสตาบิล ทำให้สายโซ่สามารถจัดเรียงตัวได้ชิดกันน้อยลง ส่งผลให้ความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 สมบัติเชิงกล

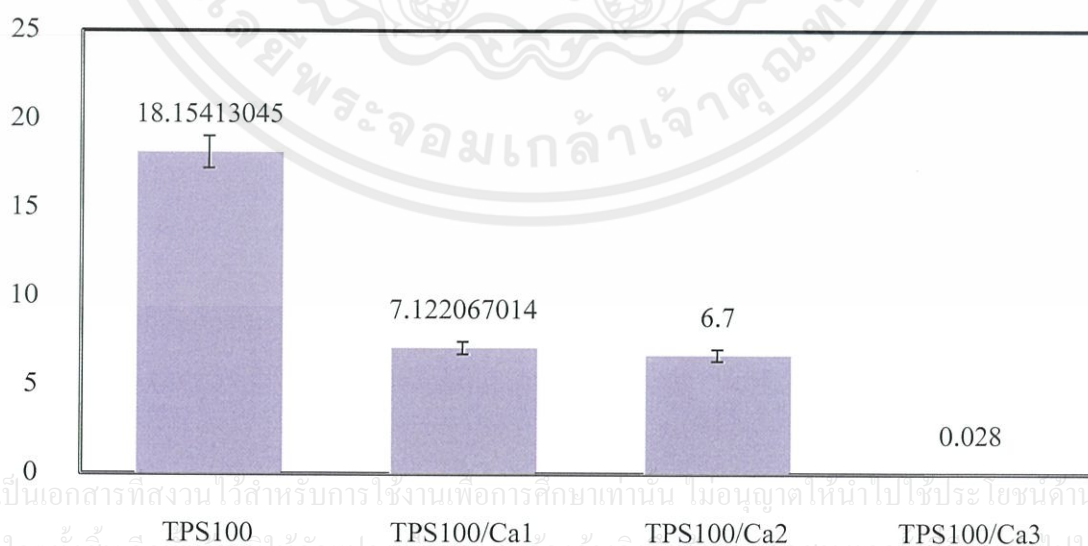
การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานชิ้นงานสูตรต่าง ๆ ด้วยเครื่อง Universal Tensile Tester โดยวัดค่าการรับแรงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ค่ามอดูลัส (Young's Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break) ได้ผลการทดสอบดังนี้ [ภาคผนวก ง]

**Stress at Maximum Load (MPa)**



รูปที่ 4.5 แผนภูมิค่าการรับแรงดึงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ

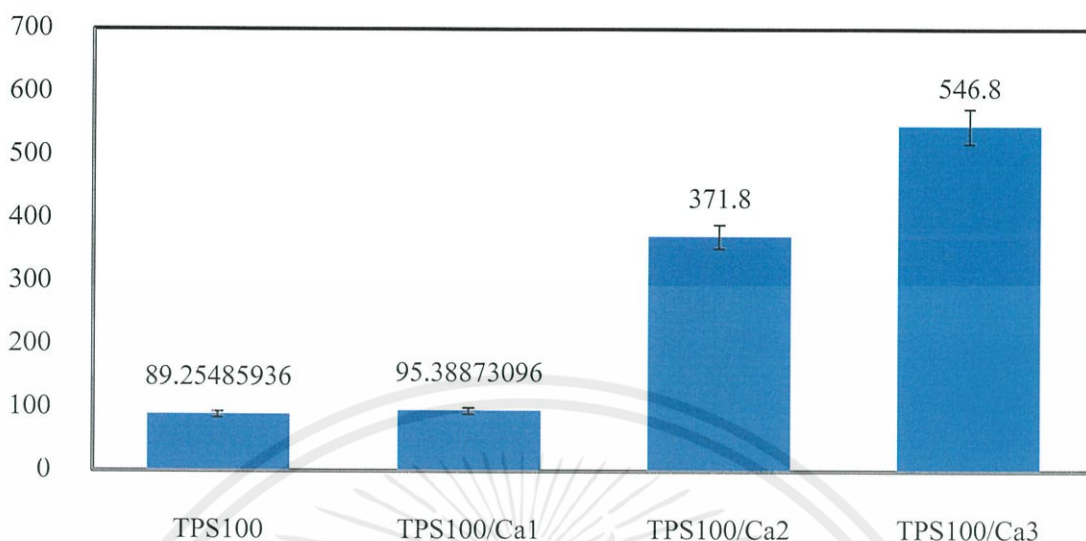
**Young's Modulus (MPa)**



รูปที่ 4.6 แผนภูมิค่ามอดูลัส (Young's Modulus) ของชิ้นงานสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Percentage Strain at Break



รูปที่ 4.7 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดึงยึด (Percentage Strain at Break) ของชิ้นงานสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าเมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลง ไป ส่งผลให้ค่า Stress at Maximum Load และ Young's Modulus ลดลง เนื่องจากแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่เติมลงไปนั้นมีโมเลกุลค่อนข้างใหญ่ทำให้เข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่งผลให้สายโซ่ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอยู่ห่างกันมากจึงไม่สามารถส่งแรงต่อไปได้ทำให้ค่าลดลง และเมื่อสังเกตรูปที่ 4.7 พบว่าค่า Percentage Strain at Break มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไป ที่เป็นอย่างนั้นเพราะเมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไปทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่มีมากขึ้น สายโซ่จึงสามารถเคลื่อนที่ได้ดี และสามารถยืดได้มากขึ้น ค่า Percentage Strain at Break จึงเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาผลของสัณฐานวิทยาในชิ้นงานที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตพบว่า เมื่อทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไป 2% มีการกระจายตัวของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่สม่ำเสมอ ทำให้ค่า Stress at Maximum Load, Young's Modulus และ อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต 1% แต่เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่ทำการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไป 3% พบว่าค่า Stress at Maximum Load, Young's Modulus และ อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตลงไป 2% มาใช้งาน

### 4.3 การปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน

จากผลการทดสอบสมบัติของชิ้นงานที่มีการเติมแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรอลไป 2% พบว่าสมบัติที่ได้ยังมีค่าที่ต่ำ ดังนั้นจึงทำการปรับปรุงสมบัติโดยทำการเติมเพกตินลงไปในสูตรดังกล่าว เนื่องจากเพกตินเป็นสารก่อเจลซึ่งจะช่วยเพิ่มความหนืด และยังเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลัง จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูปแล้วทำการสังเกตลักษณะทางกายภาพ ทดสอบพื้นฐานวิทยาศาสตร์ สมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล ได้ผลการทดสอบดังนี้

#### 4.3.1 ลักษณะทางกายภาพ

หลังจากทำการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงาน โดยการเติมเพกตินลงไปตามตารางที่ 3.2 พบว่าชิ้นงานที่ได้มีลักษณะทางกายภาพดังตารางที่

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ทำการเติมเพกตินลงไป ปริมาณ 5%, 10% และ 15%

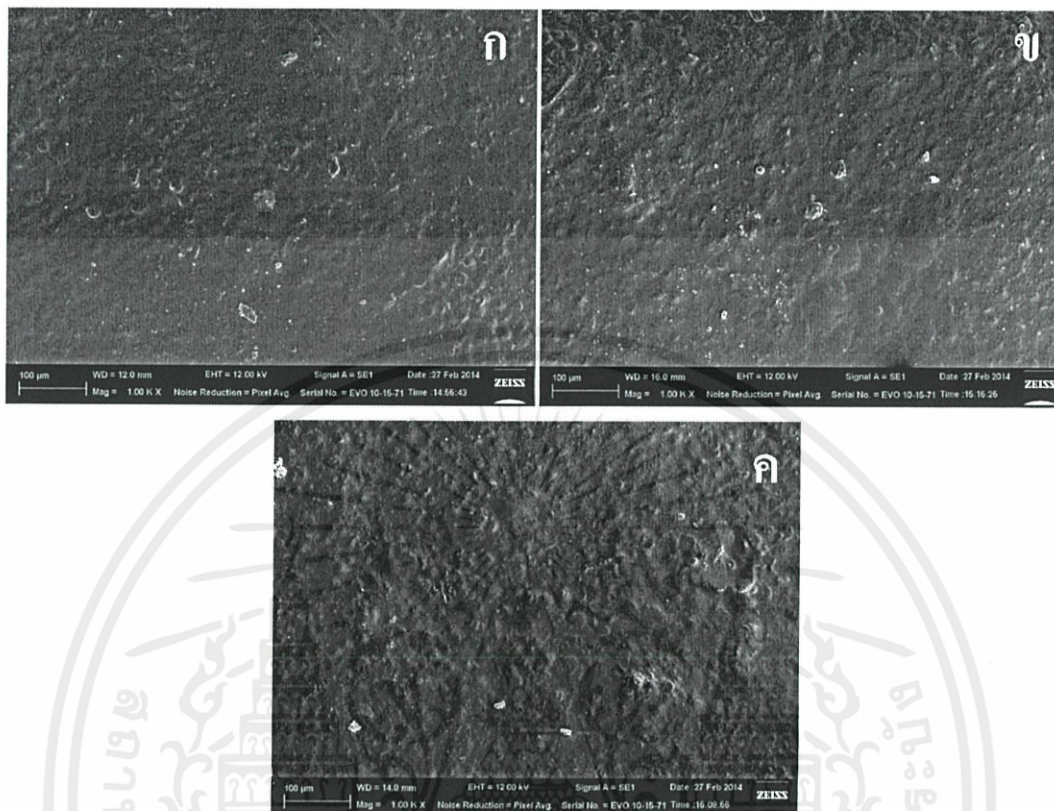
สูตร	ลักษณะทางกายภาพ
TPS100/Ca2/Pectin5	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ง่าย มีสีน้ำตาลอ่อน พื้นผิวเรียบ ไม่เหนียวติด
TPS100/Ca2/Pectin10	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ง่าย มีสีน้ำตาล พื้นผิวเรียบ ไม่เหนียวติด
TPS100/Ca2/Pectin15	ขึ้นรูปแบบกดอัดได้ง่าย มีสีน้ำตาลเข้ม พื้นผิวเรียบ ไม่เหนียวติด

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการเติมเพกตินลงไปส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีสีเปลี่ยนไป คือสีของชิ้นงานจะเข้มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อทำการเติมเพกตินลงไป ปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเพกตินที่ใช้มีสีน้ำตาลเมื่อทำการเติมลงไปมากขึ้นสีจึงเข้มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังไม่เหนียวติด และปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย เนื่องจากเพกตินที่เติมลงไปช่วยให้ชิ้นงานหนืด และแข็งขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีความเหนียวลดลง และสามารถปลดชิ้นงานได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เป็นการวิเคราะห์หาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ทำการเติมเพกตินลงไป  
ในชิ้นงานและสังเกตการณ์กระจายตัวของเพกตินในชิ้นงาน ได้ผลการทดลองดังนี้



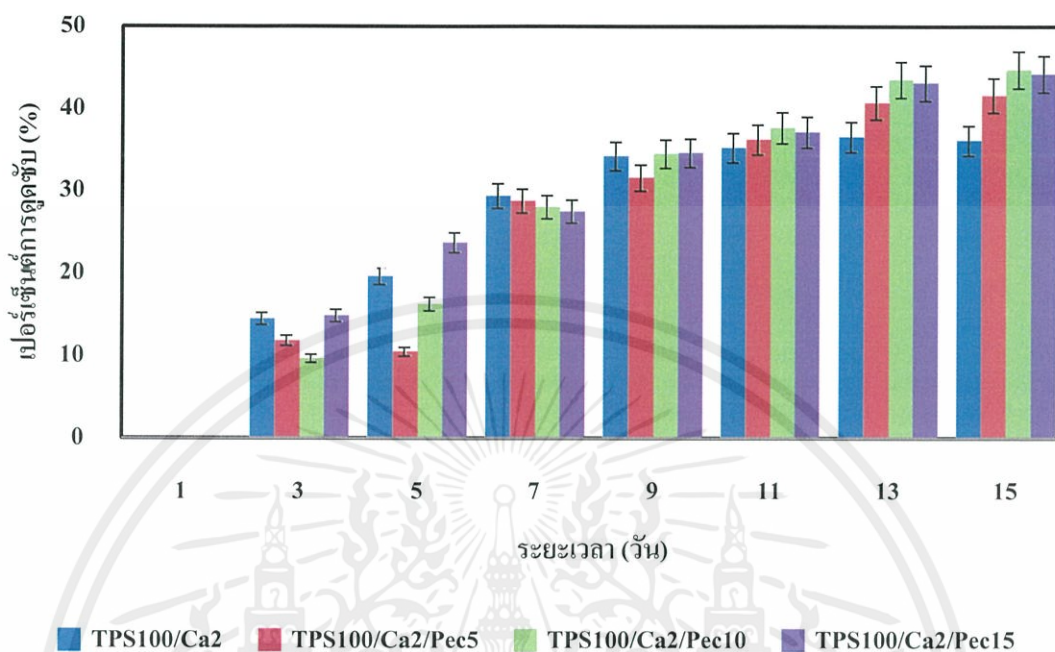
รูปที่ 4.8 SEM ของ (ก.) TPS100/Ca<sub>2</sub>/Pectin5, (ข.) TPS100/ Ca<sub>2</sub>/Pectin10,  
และ (ค.) TPS100/Ca<sub>2</sub>/Pectin15 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อทำการเติมเพกตินปริมาณ 5% ลงไปในชิ้นงานสังเกตเห็นว่ามีส่วนที่มีลักษณะก้อน ๆ ขนาดใหญ่ปะปนอยู่กับส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และเมื่อทำการเติมเพกตินลงไปมากขึ้น จะสังเกตเห็นว่าส่วนกลม ๆ ดังกล่าวนั้นมีจำนวนมากขึ้นเช่นกัน จึงคาดว่าส่วนดังกล่าวเป็นส่วนของเพกติกเนื่องจากเพกตินและแป้งมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ในส่วนของการกระจายตัวพบว่าเพกตินที่เติมลงไปมีการกระจายตัวที่ดีในทุก ๆ สูตร คือมีเพกตินเข้าไปแทรกตัวอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 ปริมาณการดูดซับน้ำ

จากการทดลองปริมาณการดูดซับน้ำของชิ้นงานที่ทำการเติมและไม่เติมเพคตินลงไป เป็นเวลา 15 วัน ได้ผลการทดลองดังนี้ [ภาคผนวก ก]



รูปที่ 4.9 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานสูตรต่างๆ ในแต่ละวัน

จากรูปที่ 4.9 พบว่าในระยะแรกเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานที่ทำการเติมเพคตินลงไปจะมีค่าที่ต่ำกว่าชิ้นงานไม่ได้ทำการเติมเพคตินลงไป แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานที่ทำการเติมเพคตินลงไปจะมีค่าที่สูงกว่า เป็นผลมาจากชิ้นงานที่ทำการเติมเพคตินลงไปมีผิวหน้าของชิ้นงานที่ประกอบไปด้วยเพคตินลักษณะเป็นก้อนใหญ่จึงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้ำน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเติมเพคติน เมื่อเวลาผ่านไปแป้งเริ่มอืดตัวจึงดูดซับน้ำได้น้อยลง แต่ชิ้นงานที่ทำการเติมเพคตินลงไปยังสามารถดูดซับน้ำได้อยู่ เนื่องจากในสูตรดังกล่าวมีทั้งส่วนของแป้ง และส่วนของเพคตินที่มีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับน้ำได้จึงส่งผลให้ยังสามารถดูดซับน้ำได้อีก และจากการเปรียบเทียบผลของปริมาณเพคตินพบว่าเมื่อทำการเติมเพคตินเข้าไปมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเติมส่วนของเพคตินเข้าไปส่งผลให้ส่วนของหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น จึงสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน

เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าชิ้นงานที่มีเติมเพคตินลงไป 5% 10% และ 15% มีแนวโน้มคงที่ในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะทางสัญญาณวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของเพคตินมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในทุก ๆ สูตร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนจะใช้วิธีเช่นเดียวกับข้างต้น แต่จะเปลี่ยนชิ้นงานเป็นชิ้นงานที่มีการเติมเพกตินลงไป 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) พลังงานความร้อนที่หลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ ) และร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) ได้ผลดังตารางที่ 4.5 [ภาคผนวก ข, ภาคผนวก ค]

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานที่ทำการเติมเพกตินลงไป 5%, 10% และ 15%

สูตร	อุณหภูมิการหลอมเหลว $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	พลังงานความร้อนที่หลอมเหลวผลึก ( $\Delta H_f$ )	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)
TPS100/Ca2/Pectin5	126.72	3.5898	2.652431
TPS100/Ca2/Pectin10	138.14	1.1787	0.870918
TPS100/Ca2/Pectin15	159.95	0.7803	0.576548

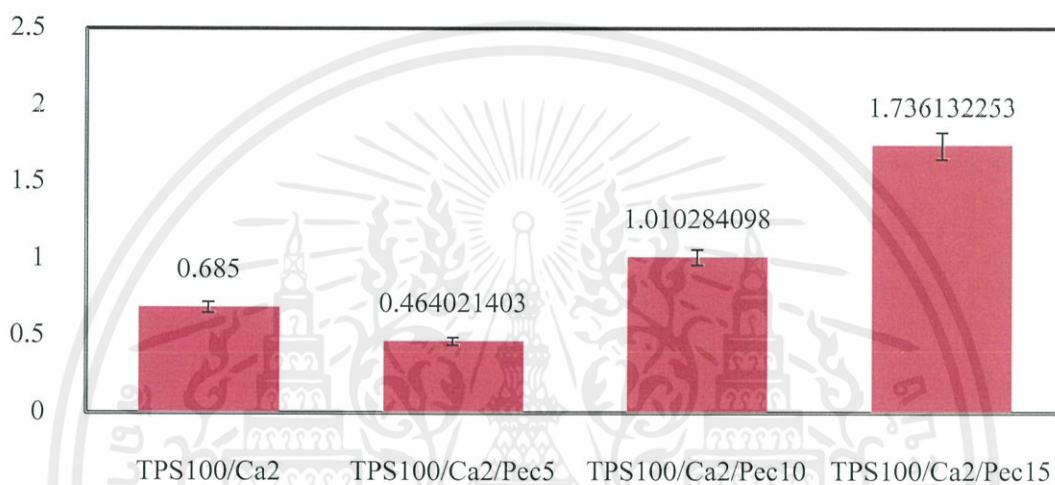
จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อทำการเติมเพกตินลงไปมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของชิ้นงานมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจากเพกตินจะเข้าไปแทรกตัวกับแป้งได้ดีจึงทำให้สามารถส่งผ่านความร้อนได้ดี เป็นผลให้ชิ้นงานทนความร้อนได้ดีขึ้นด้วย และเมื่อสังเกตร้อยละความเป็นผลึกพบว่าเมื่อทำการเติมเพกติน ค่าความเป็นผลึกจะลดลงเนื่องจากเพกตินจะเข้าไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ทำให้สายโซ่สามารถจัดเรียงตัวได้ชิดกันน้อยลง ส่งผลให้ความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 สมบัติเชิงกล

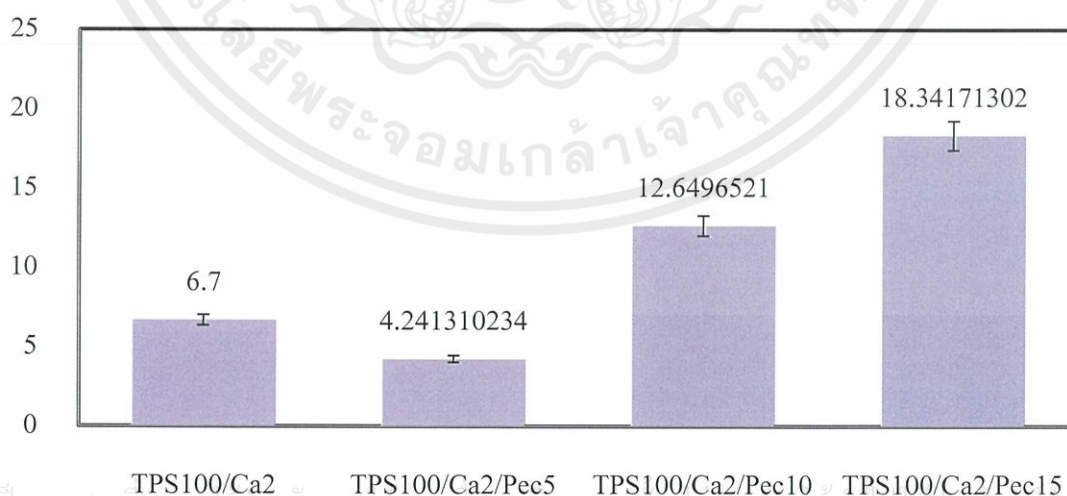
การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้ทำการปรับปรุงโดยการเติมเพกตินลงไป 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ สามารถทำการทดสอบโดยใช้วิธีการเช่นเดียวกับข้างต้น แล้วทำการวัดค่าการรับแรงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ค่ามอดูลัส (Young's Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break) ได้ผลการทดสอบดังนี้ [ภาคผนวก ง]

Stress at Maximum Load (MPa)



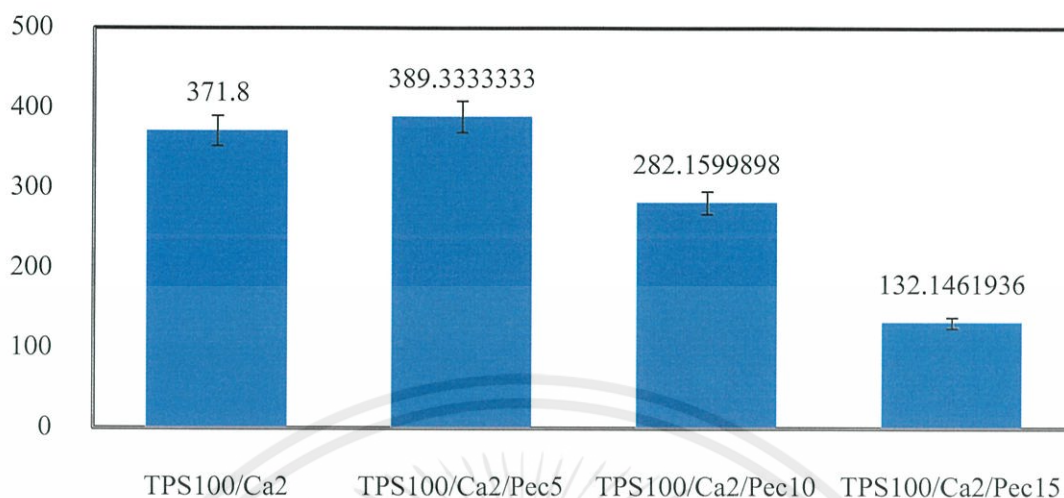
รูปที่ 4.10 แผนภูมิค่าการรับแรงดึงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเพกติน

Young's Modulus (MPa)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น รูปที่ 4.11 แผนภูมิค่ามอดูลัส (Young's Modulus) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเพกติน

### Percentage Strain at Break



รูปที่ 4.12 แผนภูมิเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break) ที่ทำการปรับปรุงด้วยเพกติน

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าเมื่อเติมเพกตินลงไปปริมาณ 5% ค่า Stress at Maximum Load และ Young's Modulus จะต่ำลง และเมื่อเติมลงไปปริมาณ 10% และ 15% ค่า Stress at Maximum Load และ Young's Modulus จะสูงขึ้นกว่าสูตรที่ไม่ได้ทำการเติมเพกตินลงไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเติมเพกตินไป 5% จะทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคจึงเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานดังนั้นจึงรับแรงได้น้อย ส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำลง แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเพกตินเพิ่มสูงขึ้น ค่า Stress at Maximum Load และ Young's Modulus จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเพกตินสามารถเข้ากับแป้งได้ดี เพราะในโมเลกุลของแป้งและเพกตินมีหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเหมือนกัน จึงส่งผลให้การรับแรงได้มากขึ้น สมบัติเชิงกลจึงสูงขึ้นด้วย และเมื่อสังเกตค่า Percentage Strain at Break พบว่าเมื่อเติมเพกตินลงไป 5% ค่าจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของเพกตินกับแป้งยังผสมเข้ากันได้ไม่ดี ชิ้นงานมีความนิ่ม ทำให้ Percentage Strain at Break เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเพกตินลงไปอีกค่าจะลดต่ำลง เนื่องจากเพกตินสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับโมเลกุลของแป้ง ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ Percentage Strain at Break ลดลง

จากการทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้วยเพกตินนั้น พบว่าเมื่อเติมเพกตินลงไปทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว(Tm) Stress at Maximum Load และ Young's Modulus เพิ่มขึ้น แต่ค่า Percentage Strain at Break ลดลง ดังนั้นจึงเลือกชิ้นงานที่มีการเติมเพกตินลงไป 10% เนื่องจากมีค่า Stress at Maximum Load และ Young's Modulus ที่สูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมาก และมีค่า Percentage Strain at Break และค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว(Tm) ที่ใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นำมาใช้ในงาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมชิ้นงานจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต โดยทำการสังเคราะห์โดยการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M ที่มีแอซิโตนเป็นตัวกลาง แล้วทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ จากนั้นจึงทำการศึกษาถึงปริมาณแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ด้วยการศึกษสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน และทำการปรับปรุงสมบัติของชิ้นงานด้วยเพคติน แล้วทำการศึกษาปริมาณของเพคตินที่เหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่ทำการสังเคราะห์จากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกความเข้มข้น 10 M โดยมีแอซิโตนเป็นตัวกลาง พบว่าสารที่ทำการสังเคราะห์ได้นั้น คือแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต เนื่องจากผลการวิเคราะห์ของหมู่ฟังก์ชัน และโครงสร้างผลึกของสารที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่นำมาอ้างอิง จึงกล่าวได้ว่าสารดังกล่าวคือแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต

2. การศึกษาปริมาณของแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน พบว่าสูตร TPS100/Ca2 ซึ่งมีปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาโรล : แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรตในอัตราส่วน 100:2 ตามลำดับ มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด

3. การปรับปรุงชิ้นงานด้วยเพคติน แล้วทำการศึกษาปริมาณเพคตินที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน พบว่าสูตร TPS100/Ca2/Pectin10 ซึ่งมีปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาโรล : แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโมโนไฮดรต : เพคตินในอัตราส่วน 100:2:10 ตามลำดับ มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชนิดของตัวปรับปรุงสมบัติ โดยให้มีการใช้ตัวปรับปรุงสมบัติหลากหลายชนิด เอกสารแล้วทำการเปรียบเทียบผลรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ
2. ศึกษาปริมาณของชิ้นงานที่เหมาะสมต่อการใช้งานเมื่อนำไปผสมกับพลาสติกการนำไปใช้
3. ศึกษาเทคนิคการขึ้นรูปชิ้นงาน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพโรจน์ เกรียงเขียวชาญ. วารสารพลาสติก.  
[Online] <http://library.dip.go.th/multim/edoc/03291.pdf> ; 19 กุมภาพันธ์ 2557
- [2] พลาสติก. [Online]. Available :  
[http://www.2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/index.html](http://www.2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/index.html) ; 28 กุมภาพันธ์ 2556.
- [3] ธนาวดี ถีจากภักย์. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์
- [4] พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. [Online]. Available :  
<http://www.nia.or.th/download/document/chapter2.pdf> ; 28 กุมภาพันธ์ 2556.
- [5] R. Gachter, and H. Muller. 1993. **Plastic Additive Handbook**. Hanser Publishers. Munich Vienna
- [6] S. Bonhome, A. Cuer, A-M. Delort, J. Lemaire, M. Sancelme and Scott. **Environmental biodegradation of polyethylene**. Polymer Degradation and Stability. 81 (2003) 441-452
- [7] M. Patel. 2001. **Review of Life Cycle Assessments for Bioplastics**. Science, Technology and Society, Utrecht University
- [8] กิตติวุฒิชัย ชนรัตน์พัฒนกิจม พชร เทียมธรา และราชวัลลภ แจ่มมงคล. การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูป. โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [9] กถ้านรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [10] สมศักดิ์ วรมงคลชัย, อธิธิพล แจ่มชัด, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ. 2546. ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] ปรรารถนา ปรรารถนาดี, จิรัชย์ พุทธกุลสมศิริ, เจริญชัย โขมพัตราภรณ์ และ ชุมพล มณฑาทิพย์กุล. 2552. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยการจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ของผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในประเทศไทย
- [12] การใช้และการแปรรูปแป้งมันสำปะหลัง. [Online]. Available :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

[13] ปราโมทย์. 2551. พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic). [online]. Available :

<http://www.thaigoodview.com/node/17034.mht>

- [14] ธนาวดี ลีจากภักย์. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสังคม. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ไทยเอฟเฟคท์ สตูดิโอ. 2549
- [15] เอกสารบริษัท Thai Pure Science จำกัด
- [16] A. Imeson. 1997. **Thickening and Gelling Agents for Food**. Blackie Academic and Professional, London
- [17] นิธิดา รัตนานนท์. 2554. เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอ.เอส. พรินต์ติ้ง เฮ้าส์. กรุงเทพมหานคร.
- [18] จารุณี ยาห้องอากาศ. 2543. การผลิตคาร์โบไฮเดรตฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและเพกติน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ครรชนี พัทธวรารกร. เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [20] เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เครื่องมือวิเคราะห์. [Online] Available: [http://www.sec.psu.ac.th/facilities/ins\\_disp.php?id=13](http://www.sec.psu.ac.th/facilities/ins_disp.php?id=13) [28 มิถุนายน 2556]
- [21] สราพร เกตุดี และ สิริพล อนันตวรตกุล การศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกแบบสถานะอุณหภูมิต่ำของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [22] เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. (Scanning Electron Microscope, SEM) [Online] Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf> [28 มิถุนายน 2556]
- [23] ห้องปฏิบัติการเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction , XRD). [Online]. Available : <http://www.mtec.or.th/laboratory/xrdxrf/> [16 มีนาคม 2556]
- [24] [online]. Available; <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>
- [25] American Standard for testing and materials. 1998. **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet. ASTM D882**. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [26] American Standard for testing and materials. 2005. **Standard Test Method for Water Absorption of Plastic. ASTM D570**. Annual Book of ASTM Standard 08.01., Philadelphia.
- [27] Banjong Boonchom และ Chanaiporn Danvirutai. **The morphology and thermal behavior of Calcium dihydrogen phosphate monohydrate (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>•H<sub>2</sub>O) obtained by a rapid precipitation route at ambient temperature in different media**. Journal of Optoelectronics and Biomedical 1 (2009), 115-123

- [28] Banjong Boonchom. **Parallelogram-like microparticles of calcium dihydrogen phosphate monohydrate ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) obtained by a rapid precipitation route in aqueous and acetone media.** Journal of Alloys and Compounds. 482 (2009), 199–202.
- [29] Nakamaru E.M., Cordi L., Duran N. and Mei H.I. 2005. **Study and development of LDPE/Starch partially biodegradable compound.** Journal of Materials Processing Technology. (Article in press)
- [30] M. Thunwall, V.Kuthanovo, A. Boldizar and M. Rigdahl. **Film blowing of thermoplastic starch.** Carbohydrate Polymers. 71 (2008), 583-590.
- [31] Mali S., Sakanaka L.S., Yamachita F. and Grossmann M.V.E. 2005. **Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect.** Carbohydrate Polymer. Vol 60, 283-289
- [32] ปิยะวิทย์ สดสุขชาติ 2552. การปรับปรุงสมบัติการดูดความชื้นของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้งโดยใช้อนุพันธ์ของไคโตซานและกรดไขมัน.
- [33] A. L. N. da Silva, et al. **Mechanical and Rheological Properties of Composites based on Polyolefin and Mineral Additives.** Polymer Testing, 21 (2002), 57-60.
- [34] K. Yang, et al. **Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites.** Materials Letters. 60 (2006) : 805-809.
- [35] ดักษณา หอมมณี 2555. การปรับปรุงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทีลีนความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียวด้วยสารก่อเจล.
- [39] M. L. Fishman, D. R. Conffin, R.P. Konstance and C.I. Ownwulata **Extrosion of pectin/starch blends plasticizer with glycerol.** Carbohydrate Polymer, 41 (2000) 317-325
- [40] Jingwei Xu, Denis F.R. Gilson and Ian S. Butler **FT-Raman and high-pressure FT-infrared spectroscopic investigation of monocalcium phosphate monohydrate,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .** Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 54 (1998), 1869–1878

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
การทดสอบการดูดซับน้ำ

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักของชิ้นงานที่ทำการทดสอบการดูดซับน้ำในแต่ละวัน

วันที่	น้ำหนักของชิ้นงาน						
	TPS100	TPS100/ Ca1	TPS100/ Ca2	TPS100/ Ca3	TPS100/ Ca2/Pectin5	TPS100/ Ca2/Pectin 10	TPS100/ Ca2/Pectin 15
1	2.646667	2.236667	2.28	1.56	2.226667	2.213333	2.11
3	2.946667	2.57	2.61	1.815	2.49	2.426667	2.423333
5	3.073333	2.663333	2.726667	1.93	2.46	2.573333	2.61
7	3.34	2.89	2.95	2.075	2.866667	2.833333	2.69
9	3.52	3.036667	3.06	2.155	2.93	2.976667	2.84
11	3.68	3.136667	3.083333	2.24	3.033333	3.046667	2.893333
13	3.86	3.206667	3.113333	2.365	3.133333	3.176667	3.02
15	3.893333	3.19	3.103333	2.43	3.153333	3.203333	3.043333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

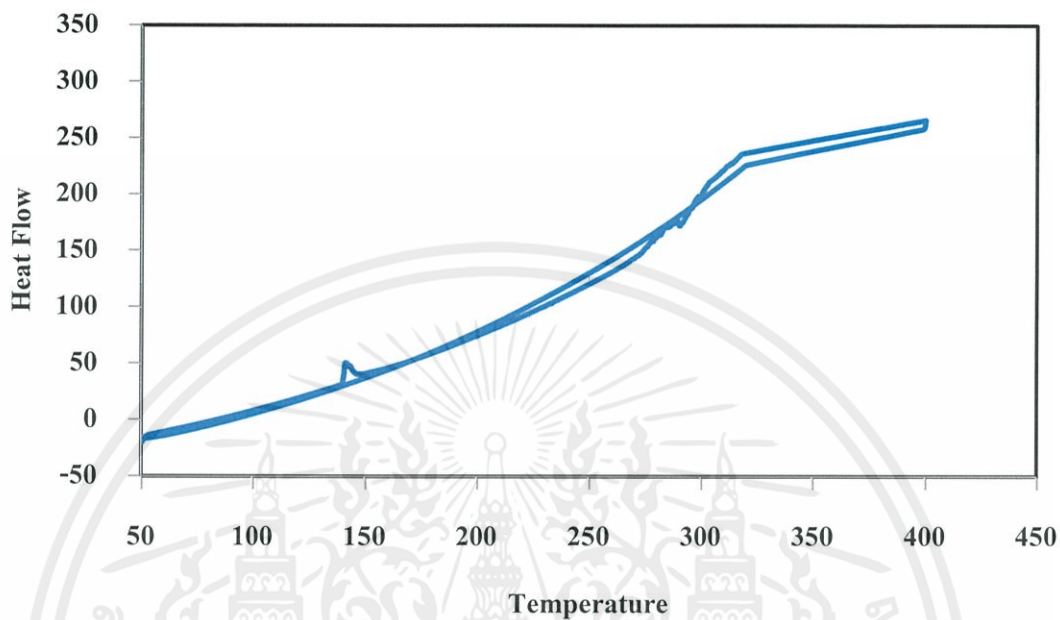
ตารางที่ ก.2 เปรอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงานที่ทำการทดสอบการดูดซับน้ำในแต่ละวัน

วันที่	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของชิ้นงาน						
	TPS100	TPS100/ Ca1	TPS100/ Ca2	TPS100/ Ca3	TPS100/ Ca2/Pectin5	TPS100/ Ca2/Pectin 10	TPS100/ Ca2/Pectin 15
1	0	0	0	0	0	0	0
3	11.33501	14.90313	14.47368	16.34615	11.82635	9.638554	14.84992
5	16.12091	19.07601	19.59064	23.71795	10.47904	16.26506	23.69668
7	26.19647	29.21013	29.38596	33.01282	28.74251	28.01205	27.48815
9	32.99748	35.76751	34.21053	38.14103	31.58683	34.48795	34.59716
11	39.04282	40.23845	35.23392	43.58974	36.22754	37.6506	37.1248
13	45.84383	43.36811	36.54971	51.60256	40.71856	43.5241	43.12796
15	47.10327	42.62295	36.11111	55.76923	41.61677	44.72892	44.23381

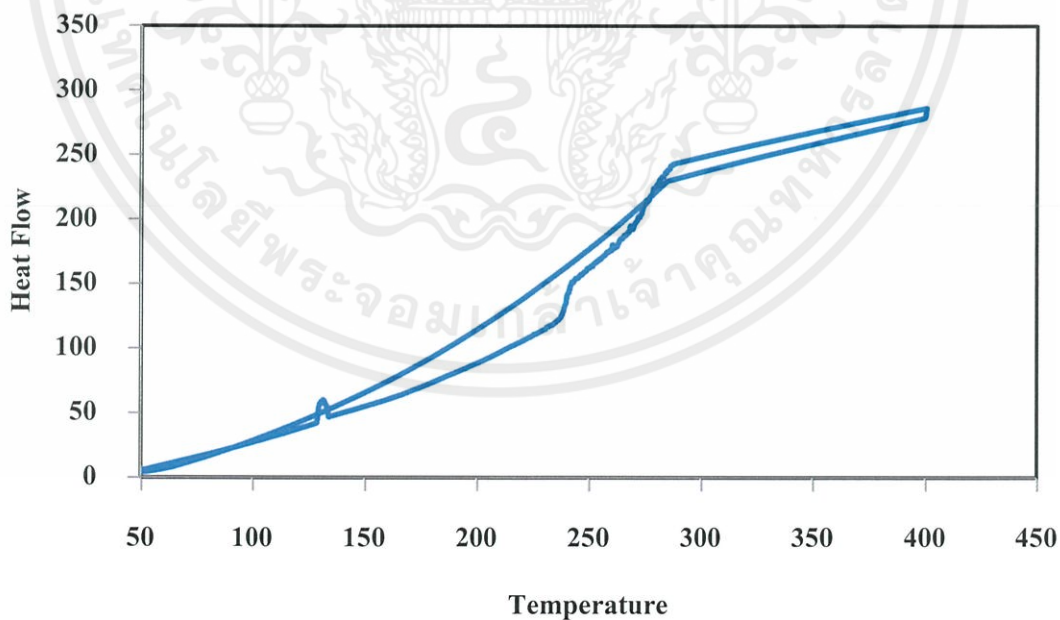
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

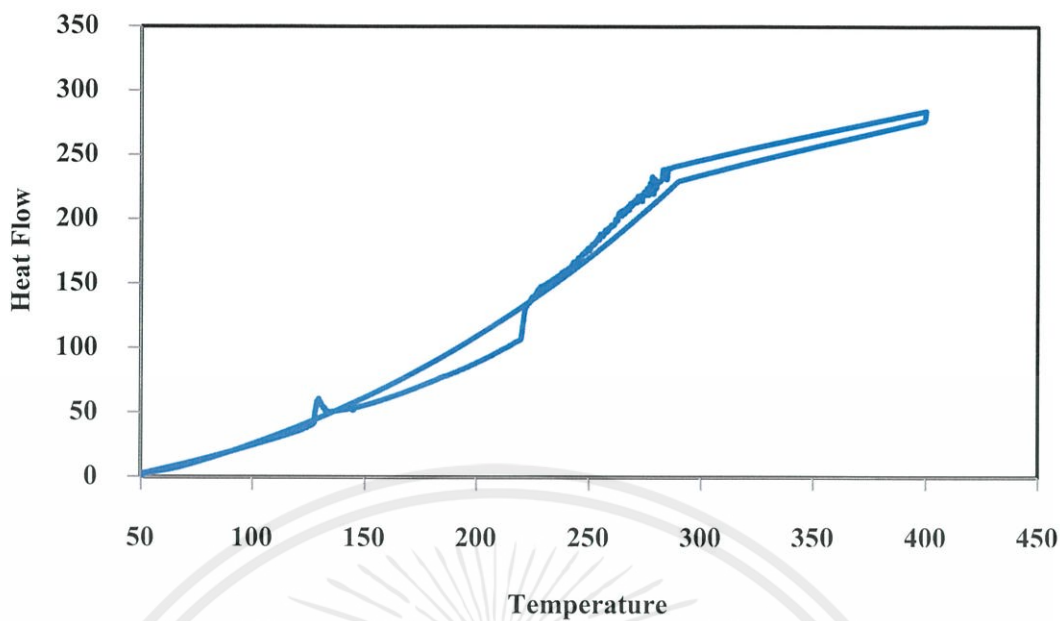
## การทดสอบสมบัติทางความร้อน



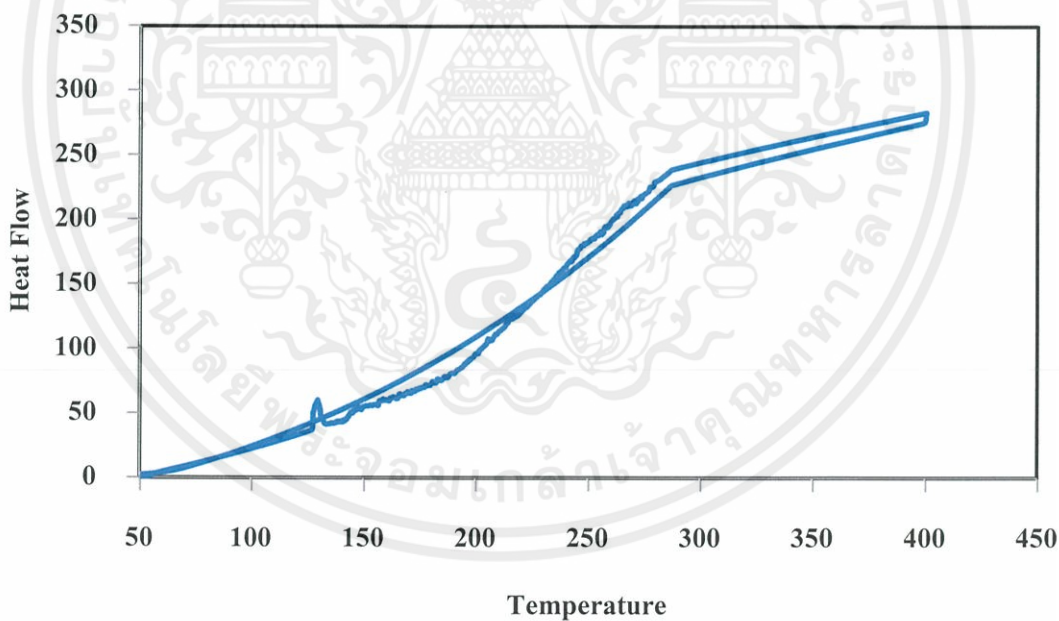
รูปที่ ข.1 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ ข.2 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับแคลเซียม ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต  
 ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 โมโนไฮดรต สูตร TPS100/Ca1

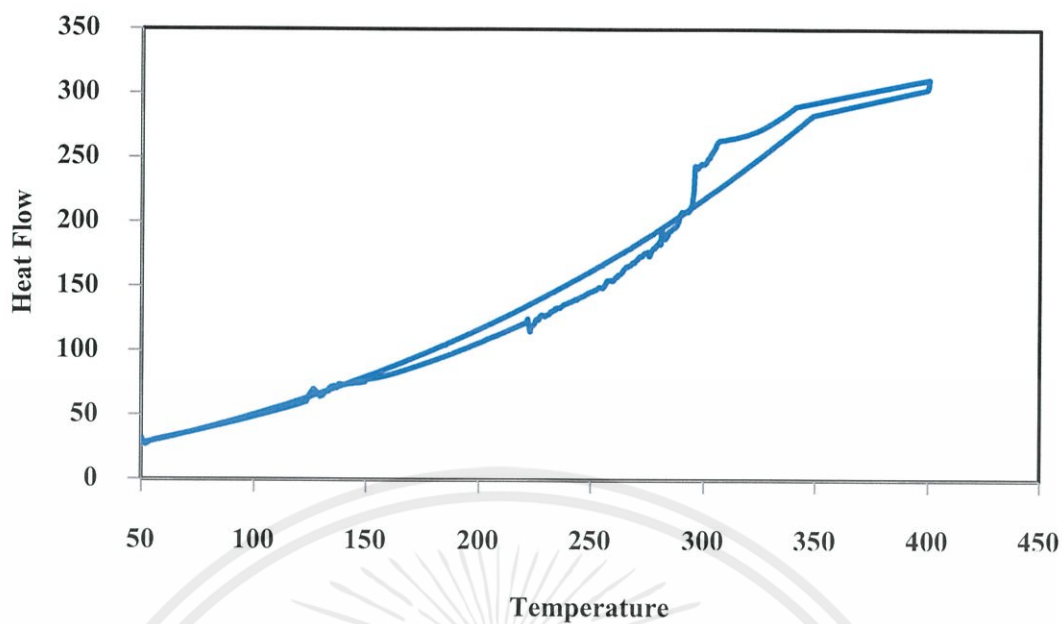


รูปที่ ข.3 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรตสูตร TPS100/Ca2

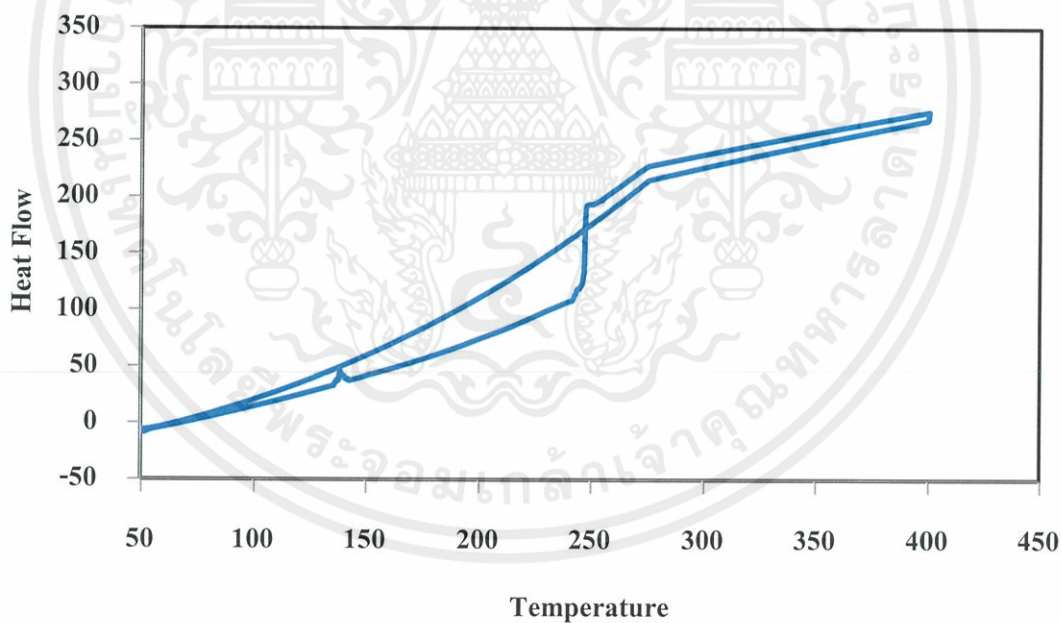


รูปที่ ข.4 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับแคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โมโนไฮดรต สูตร TPS100/Ca3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

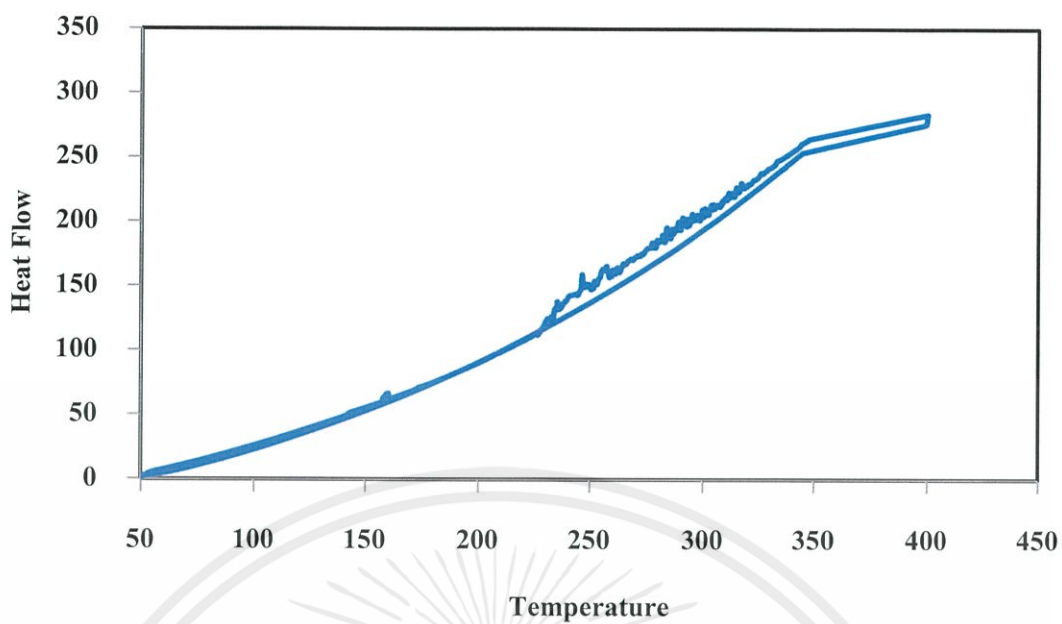


รูปที่ ข.5 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต  
โมโนไฮดรตและเพกติน สูตร TPS100/Ca<sup>2</sup>/Pectin5



รูปที่ ข.6 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต  
โมโนไฮดรตและเพกติน สูตร TPS100/Ca<sup>2</sup>/Pectin10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 DSC thermogram ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แคลเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต  
โมโนไฮเดรตและเพกติน สูตร TPS100/Ca2/Pectin15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก

## การคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)

$$\Delta H_f = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}}$$

$$\% \text{ Crystallinity} = (\Delta H_f / \Delta H_f^0) \times 100$$

- เมื่อ  $\Delta H_f$  คือ Enthalpy of fusion ของสารซึ่งได้จากพื้นที่ใต้กราฟ (J/g)  
 $\Delta H_f^0$  คือ Enthalpy of fusion ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่มีความเป็นผลึก 100% (มีค่าเท่ากับ 135.34 J/g)

## ตัวอย่างการคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึกของ สูตร TPS100/Ca2/Pectin15

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \Delta H_f^0 &= 135.34 \text{ J/g} \\ \Delta H_f &= \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (mg)}} \\ &= \frac{17.447 \text{ mJ}}{9.8 \text{ mg}} \\ &= 1.7803 \text{ J/g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Crystallinity} &= (\Delta H_f / \Delta H_f^0) \times 100 \\ &= [(1.7803 \text{ J/g}) / (135.34 \text{ J/g})] \times 100 \\ &= 1.315428 \% \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละความเป็นผลึกของ สูตร TPS100/Ca2/Pectin15 เท่ากับ 1.315428 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

## การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ง.1 ค่าการรับแรงสูงสุด (Stress at Maximum Load) ค่ามอดูลัส (Young's Modulus) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด (Percentage Strain at Break)

สูตร	Stress at Maximum Load (MPa)	Young's Modulus (MPa)	Percentage Strain at Break
TPS	2.563086	18.15413	89.25486
TPS/Ca1	0.813343	7.122067	95.38873
TPS/Ca2	0.685	6.7	371.8
TPS/Ca3	0.036	0.028	546.8
TPS/Ca2/Pectin5	0.464021	4.24131	389.3333
TPS/Ca2/Pectin10	1.010284	12.64965	282.16
TPS/Ca2/Pectin15	1.736132	18.34171	132.1462

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้