

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งด้วยเสริมแรง

ด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

BIODEGRADABLE FILM FROM BANANA STARCH REINFORCED

BY PECTIN AND COTTON FIBERS



T117347

นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์

นางสาวภาวิณี ถึงสุข

นายยศธร ธเนตรรุ่งโรจน์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เลขหมู่  
เลขทะเบียน 117347  
ปี เดือน ปี 20 ก.ค. 2554

b. 12340613  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


**BIODEGRADABLE FILM FROM BANANA STARCH REINFORCED**

**BY PECTIN AND COTTON FIBERS**

**Miss Chayapa Weerapoprasit**

**Miss Pawinee Tuengsook**

**Mr. Yossathorn Tanetrungroj**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF  
SCIENCE**

**IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

**FACULTY OF SCIENCE**

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

**ACADEMIC YEAR 2009**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเพคติน และเส้นใยฝ้าย

Biodegradable film from banana starch reinforced by pectin and cotton fibers

นักศึกษา นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ รหัสนักศึกษา 50050304

นางสาวภาวิณี ถึงสุข รหัสนักศึกษา 50050359

นายยศธร ธเนสรุ่งโรจน์ รหัสนักศึกษา 50050361


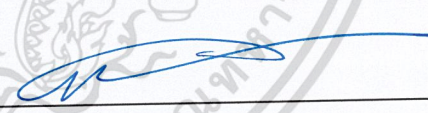

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

พ.ศ. 2553

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์ รหัสนักศึกษา 50050304

นางสาวภาวิณี ถึงสุข รหัสนักศึกษา 50050359

นายยศธร ธเนศรุ่งโรจน์ รหัสนักศึกษา 50050361

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**พ.ศ.** 2553

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งกล้วยด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย โดยเปลี่ยนปริมาณเพกตินและเส้นใยฝ้าย ฟิล์มจากแป้งกล้วยนี้ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ เมื่อใส่สารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย ทำให้ฟิล์มแป้งกล้วยมีความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่วนสมบัติการดูดซับน้ำฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกติน 50% มีการดูดซับน้ำมากที่สุด สำหรับสัณฐานวิทยาพบว่า การเติมสารละลายเพกตินลงในฟิล์มจากแป้งกล้วยแสดงความเข้ากันได้ระหว่างสารละลายเพกตินและแป้งกล้วย ส่วนสมบัติด้านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงหมู่เพกตินและเส้นใยฝ้าย ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง นอกจากนี้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในด้านแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดูลัส คือ ฟิล์มแป้งกล้วยที่ใส่สารละลายเพกติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10% ส่วนในด้านการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด คือ ฟิล์มแป้งกล้วยที่ใส่สารละลายเพกติน 40 % สำหรับสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำฟิล์มมีค่าสูงสุดที่ฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมเพกติน 50 % และต่ำสุดที่ฟิล์มจากแป้งกล้วย อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มแป้งกล้วยพบว่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเพกติน ส่วนสมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10% มีแนวโน้มย่อยสลายช้าที่สุด จากงานวิจัยฟิล์มแป้งกล้วยที่ใส่สารละลายเพกติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10% ให้สมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Title** Biodegradable film from banana starch reinforced by pectin and cotton fibers

**Students**

1. Miss Chayapa Weerapoprasit	50050304
2. Miss Pawinee Tuengsook	50050359
3. Mr. Yossathom Tanetrungroj	50050361

**Degree** Bachelor of Science

**Major Program** Industrial Chemistry

**Academic Year** 2010

**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

### Abstract

Biodegradable films were prepared from banana starch plasticized by glycerol and modified by different contents of pectin and cotton fibers, using casting technique. It was found crystallinity of the banana film increased by the addition of pectin and cotton fibers. For the highest water uptake were found in banana film with 50% pectin. For morphology, banana starch and pectin were compatible and cotton fiber surface was wetted by banana starch and pectin. In addition, IR peak shifted and change in IR peak intensity were obtained by the incorporation of pectin and cotton fibers. Moreover, the highest load, stress at maximum load and Young's modulus were found in the banana film with 10% pectin and 10% cotton fibers; however, the highest extension and strain at maximum load were obtained in the banana film with 40% pectin. The highest and lowest water vapor permeability values were found in banana film with 50% pectin and banana film without pectin and cotton fibers, respectively. Thermal degradation temperature of the banana film was found to increase with the pectin content. From this study, the best overall properties were obtained from the banana film with 10% pectin and 10% cotton fibers.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการ  
อุดมศึกษา(สกอ.)ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนวิจัยทั้งหมด ในการจัดทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่  
ให้คำแนะนำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้ทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์และดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ที่กรุณาเป็น  
กรรมการตลอดจนให้คำแนะนำโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ที่คอยให้แรงกระตุ้นและกำลังใจ พร้อมข้อเสนอแนะดีๆ จนทำให้โครงการ  
พิเศษนี้ประสบความสำเร็จอย่างงดงาม

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่ให้ทุกสิ่งอย่างต่อคณะผู้จัดทำ จนประสบ  
ความสำเร็จในการศึกษา

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์

นางสาวภาวิณี ถึงสุข

นายศรร ฐเนศรุ่งโรจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญรูปภาพ.....	VI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของโครงการงานพิเศษ.....	1-2
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>4</b>
2.1 แนวโน้มการผลิตพลาสติกจากปิโตรเคมีไปสู่การผลิตโดยอาศัยกลไกทางชีวภาพ..	4
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้.....	5
2.2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	10
2.2.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง.....	10
2.2.2.1 การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก.....	11
2.2.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้.....	11
2.2.2.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์.....	13
2.2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	13
2.2.3.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน.....	13
2.2.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป.....	14
2.2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	14
2.2.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	15
2.2.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.6 การทดสอบ โดยการฝังดิน.....	15
2.3 แป้ง .....	16
2.3.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง.....	16
2.3.2 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	19
2.3.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	27
2.3.4 สมบัติของแป้ง .....	27
2.3.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....	27
2.3.4.2 การเกิดเจลที่ในเซชัน .....	28
2.3.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน .....	29
2.3.5 กล้วย.....	32
2.3.6 แป้งกล้วย .....	37
2.3.6.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งกล้วย.....	37
2.3.6.2 การใช้ประโยชน์จากแป้งกล้วย.....	44
2.4 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช .....	44
2.5 พลาสติกไซเซออร์ .....	46
2.5.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซออร์.....	46
2.6 เส้นใย .....	47
2.7 เส้นใยฝ้าย.....	49
2.7.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย.....	49
2.7.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	50
2.7.3 สมบัติทางกายภาพ.....	51
2.7.4 ธรรมชาติของการยืดหยุ่นและความเป็นพลาสติก.....	52
2.7.5 ธรรมชาติของการดูดซึมความชื้น.....	52
2.7.6 อุณหภูมิวิกฤต.....	53
2.8 เพกติน.....	53
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	62
3.1 สารเคมี.....	62
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	63
3.3 การทดลอง.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดสอบ.....	68
3.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	68
3.4.2 การดูค้ำน้ำ.....	68
3.4.3 สัณฐานวิทยา.....	69
3.4.4 สมบัติเชิงกล.....	69
3.4.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ.....	70
3.4.6 สมบัติทางความร้อน.....	70
3.4.7 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	82
4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติ ต่างๆของฟิล์มด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย.....	71
4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	73
4.3 การทดสอบการดูค้ำน้ำ.....	75
4.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยอินฟราเรดเปกโทรสโกปี.....	80
4.5 การทดสอบสัณฐาน.....	82
4.6 สมบัติเชิงกล.....	93
4.7 การซึมผ่านของไอน้ำ.....	96
4.8 สมบัติทางความร้อน.....	97
4.9 สมบัติการย่อยสลาย.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	104
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	105
เอกสารอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	10
รูปที่ 2.2 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเจลาตินในซ์.....	12
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ .....	13
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ชนิด A และ B ของอะไมโลส .....	17
รูปที่ 2.5 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน.....	18
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลส .....	20
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน.....	24
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม .....	29
รูปที่ 2.9 กลไกการกินตัวของแป้งสุก.....	31
รูปที่ 2.10 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์จากกล้วย .....	36
รูปที่ 2.11 รูปร่างและขนาดเม็ดสตาร์ชจากกล้วยดิบ.....	38
รูปที่ 2.12 ลักษณะเม็ดสตาร์ชจากกล้วยสุก.....	38
รูปที่ 2.13 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากกล้วย.....	40
รูปที่ 2.14 สายโมเลกุลเชลลูโลส (conformation) ของเส้นใยฝ้าย, เส้นประแดงพันธุ์ไฮโดรเจนภายใน และระหว่าง โมเลกุล .....	51
รูปที่ 2.15 โครงสร้างโมเลกุลของเพกติน.....	53
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 2.....	65
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัยตอนที่ 3 .....	66
รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกติน ปริมาณ ต่างๆ (ก) 0 % (ข) 10 % (ค) 30 % และ (ง) 50 %.....	73
รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย โดยใช้สารละลายเพกตินปริมาณ ต่างๆ (ก) 0 % (ข) 10 % (ค) 30 % และ (ง) 50 %.....	74
รูปที่ 4.3 การดูดซึมน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 0%.....	75
รูปที่ 4.4 การดูดซึมน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 10%.....	75
รูปที่ 4.5 การดูดซึมน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 30%.....	75
รูปที่ 4.6 การดูดซึมน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 50%.....	75
รูปที่ 4.7 การดูดซึมน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยใยฝ้าย10%.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน10% และเส้นใยฝ้าย 10%.....	76
รูปที่ 4.9 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน30% และเส้นใยฝ้าย 10%.....	76
รูปที่ 4.10การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน50% และเส้นใยฝ้าย 10%.....	76
รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งกล้วยผสมเพกตินที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%.....	76
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%.....	78
รูปที่ 4.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10 % (ค) 30 % และ (ง) 50 %.....	80
รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงโดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้าย โดยใช้สารละลายเพกตินปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10 % (ค) 30 % และ (ง) 50 %.....	81
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านบนของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก) – (ข) เพกติน 0% (ค) – (ง) เพกติน 10% (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ(ช) – (ซ) เพกติน 50%.....	83
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านบนของฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก) – (ข) เพกติน 0% (ค) – (ง) เพกติน 10% (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ (ช) – (ซ) เพกติน 50%.....	84
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านล่างของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่กำลังขยาย 100 เท่าและ300เท่าที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก)–(ข) เพกติน 0% (ค)–(ง)เพกติน 10% (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ(ช) – (ซ)เพกติน 50%.....	85
รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านล่างของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก) – (ข) เพกติน 0% (ค) – (ง) เพกติน 10% (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ (ช) – (ซ) เพกติน50%.....	86
รูปที่ 4.19 ลักษณะฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน ที่ปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %.....	88
รูปที่ 4.20 ลักษณะฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย ที่ปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %.....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.21 ลักษณะการส่องผ่านแสงของฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน ที่ปริมาณสารละลาย เพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %.....	90
รูปที่ 4.22 ลักษณะการส่องผ่านแสงของฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย ที่ ปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %.....	91
รูปที่ 4.23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีปริมาณเพกตินต่างๆกัน (ก) แรง ดึงและความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด.....	93
รูปที่ 4.24 สมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้เพกติน และเส้นใยฝ้าย (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึง ยืด.....	94
รูปที่ 4.25 สมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้าย 10 % เปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ใส่เส้นใยฝ้าย 10 % (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) โมดูลัส (ง) การ ดึงยืด และ (จ) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด.....	95
รูปที่ 4.26 กราฟ (ก) TGA (ข) DTG ของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย เพกตินในปริมาณต่างๆ.....	98
รูปที่ 4.27 กราฟ (ก) TGA (ข) DTG ของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย เพกตินและเส้นใยฝ้าย 10 %.....	99
รูปที่ 4.28 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเติมเพกติน 0%.....	100
รูปที่ 4.29 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเติมเพกติน 10%.....	100
รูปที่ 4.30 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเติมเพกติน 30%.....	101
รูปที่ 4.31 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเติมเพกติน50%.....	100
รูปที่ 4.32 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยใยฝ้าย10 % .....	101
รูปที่ 4.33 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 10% และเส้นใยฝ้าย10%.....	101
รูปที่ 4.34 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 30% และเส้นใยฝ้าย10%.....	101
รูปที่ 4.35 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 50% และเส้นใยฝ้าย10%.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.36 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน.....	104
รูปที่ 4.37 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใย ฝ้าย.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด .....	18
ตารางที่ 2.2 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	19
ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.4 สมบัติของอะไมโลสจากแป้งชนิดต่างๆ .....	22
ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของ อะไมโลสกับไอโอดีน.....	23
ตารางที่ 2.6 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพคติน .....	26
ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ห้องประกอบของแป้งกล้วยที่ได้จากตูบแห้ง .....	37
ตารางที่ 2.8 ลักษณะของกล้วยที่ระยะการสุกต่างๆ.....	39
ตารางที่ 2.9 ปริมาณเม็ดศตวรรษขนาดต่างๆ (เปอร์เซ็นต์)ที่พบในกล้วยที่มีระยะการสุกต่างๆ... ..	41
ตารางที่ 2.10 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชกล้วยที่มีระยะการสุก ตัวต่างๆ.....	41
ตารางที่ 2.11 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของผลกล้วยที่ระยะความแก่ต่างๆ.....	43
ตารางที่ 2.12 ปริมาณผลผลิตแป้งกล้วยที่ผลิตจากกล้วยที่ความแก่ต่างๆเมื่อทำแห้งโดยใช้ตูบและการ ตากแดด.....	43
ตารางที่ 2.13 สมบัติของเส้นใยฝ้าย.....	52
ตารางที่ 2.14 ปริมาณของเพคตินที่มีอยู่ในพืชผักผลไม้ .....	55
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของแป้งกล้วย เพคติน กลีเซอรอล และน้ำที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากแป้ง กล้วย.....	67
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแป้งกล้วย เพคติน เส้นใยฝ้าย กลีเซอรอล น้ำและกาวกัมที่ใช้ในการเตรียม ฟิล์มจากแป้งกล้วย.....	68
ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งกล้วยที่เตรียมได้.....	70
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมของฟิล์มจากแป้งกล้วย.....	71
ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย.....	72
ตารางที่ 4.3 ลักษณะของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งกล้วย เนื่องจากการดูดซับน้ำ.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย.....	96
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของการสลายตัวของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่มีการปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย.....	97
ตารางที่ 4.6 ลักษณะของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งกล้วย เนื่องจากการฝังดิน.....	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

การเพิ่มจำนวนของประชากรโลก เป็นสาเหตุของปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญหลายประการ ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ การเพิ่มขึ้นของขยะแข็ง ซึ่งยากต่อการย่อยสลายโดยเฉพาะพอลิเมอร์พลาสติก ที่ผลิตจากปิโตรเคมีภัณฑ์ ซึ่งกลายเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่งในปัจจุบัน มีการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ผลิตเฟอร์นิเจอร์ และบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ และพบว่าในบรรดาขยะแข็งที่เกิดขึ้นจากบ้านเรือนนั้นกว่าร้อยละ 13 เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่ผลิตจากพลาสติก และคิดเป็นสัดส่วนถึงสองในสามของปริมาณขยะแข็งทั้งหมด ซึ่งได้ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดและการจัดการ เนื่องจากขยะพลาสติกเหล่านี้กินเนื้อที่ในการฝังกลบ และหากกำจัดโดยการเผา สามารถก่อให้เกิดปัญหาควันพิษและปัญหาสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ได้ แม้ว่าการนำกลับมาใช้ใหม่จะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ ส่วนหนึ่ง แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหานี้ได้อย่างสมบูรณ์

ทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ คือ การผลิตพอลิเมอร์ชีวภาพที่ง่ายต่อการย่อยสลาย เพื่อใช้แทนที่พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีภัณฑ์เดิม พอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุที่ง่ายต่อการย่อยสลาย เช่น พอลิแซคคาไรด์ เซลลูโลสและอนุพันธ์ แป้ง แอลจินท การาจิแนน เพคติน โปรตีน และ ไคโตซาน เป็นต้น เป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ เพราะสมบัติต่างๆ ที่สามารถช่วยรักษาคุณภาพของอาหารไว้ได้ใกล้เคียงกับฟิล์มพลาสติก และยังสามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ

พอลิเมอร์ชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุที่ง่ายต่อการย่อยสลาย สามารถทำได้จากผลิตภัณฑ์ทั้งจากพืช และสัตว์ และแนวความคิดนี้มีมาช้านานแล้ว มีการผลิตแผ่นฟิล์มที่ทำมาจากโปรตีนพวกคอลลอยด์ เคซีน แป้งสาทิ และโปรตีนจากถั่วเหลือง และพอลิแซคคาไรด์ โดยใช้สตาร์ช อะมิโลส เซลลูโลส และอนุพันธ์เซลลูโลส สมบัติและลักษณะของฟิล์มจากแหล่งวัตถุดิบ มีลักษณะแตกต่างกันในแง่ของการละลายน้ำ ความทนทานต่อแรงกระแทกและแรงดึง

การใช้พอลิแซคคาไรด์เป็นวัสดุในการทำฟิล์มได้รับความสนใจมากพอสมควร แต่มักเป็นฟิล์มที่ได้จากแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง ฯลฯ เนื่องจากฟิล์มที่ได้สามารถ

ละลายน้ำได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ผลิตผลทางการเกษตรของประเทศชนิดที่มีปริมาณแป้งสูง เช่น กกล้วย มาผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์

กล้วย เป็นพืชที่ปลูกง่าย มีการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์เร็ว ปลูกได้ในดินแทบทุกชนิด นิยมปลูกแพร่หลายทุกภาคของประเทศไทย ให้ผลผลิตตลอดปี ต้นกล้วยที่สมบูรณ์เต็มที่อาจจะให้ผลกล้วยมากถึง 200 ผล และมีน้ำหนักรวมถึง 20 กิโลกรัม เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่ปลูกแพร่หลายตามบ้านเรือนของเกษตรกร มักจะปลูกต้นกล้วยเพื่อเป็นร่มเงา และเก็บใบกล้วยมาใช้สอยเป็นครั้งคราว ต้นกล้วยมีการแตกหน่อแตกใบให้ผลผลิตตลอดทั้งปี ปัจจุบันเกษตรกรจำนวนมากหันมาปลูกกล้วยเป็นอาชีพหลัก ผลิตผลจากต้นกล้วยนับว่าเป็นวัตถุดิบ ที่จะนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มมูลค่าได้อย่างดีเยี่ยม เนื่องจากปริมาณการผลิตแต่ละปีมากมาย มีส่วนเหลือทิ้งมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ ใบกล้วย ต้นกล้วย เหง้าของต้นกล้วย เปลือกกล้วยสุก ปลีกล้วย และหยวกกล้วย เป็นต้น

เนื่องจากในกล้วยดิบมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก และง่ายต่อการย่อยสลายในธรรมชาติ ดังนั้นในการใช้จึงปลอดภัยกับมนุษย์ สัตว์และสิ่งแวดล้อม และยังสามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ค่อนข้างหลากหลาย

นอกจากนี้แล้วเส้นใยฝ้าย ยังเป็นเส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber) ที่ทำได้ง่าย ราคาถูก น้ำหนักเบา และง่ายต่อการย่อยสลายในธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้ว เส้นใยธรรมชาติ มีสมบัติเหมาะสมในการเสริมแรงเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง และมีความหนาแน่นต่ำ

เพกติน (Pectin) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) หรือพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) จะประกอบไปด้วยน้ำตาลหลายชนิด เช่น Rhamnose, Galactose, Arabinose และน้ำตาลอื่นๆ จำนวนเล็กน้อยที่มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ (Water soluble) เพกตินสกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้ม และยังพบเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล ฝรั่ง เป็นต้น จึงมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางค์มาช้านาน โดยใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมแป้งจากกล้วยน้ำว้าดิบ จากนั้นนำแป้งที่เตรียมได้มาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม เพื่อนำไปผลิตฟิล์มที่ย่อยสลายได้ จากงานวิจัยของพัชรินทร์ โคตรสุวรรณ และคณะ [1] พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใช้กลีเซอรอลในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด แต่สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ยังไม่ดีนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม โดยใช้เพกตินและเส้นใยจากใบกล้วยเป็นตัวเสริมแรง สูดท้ายเป็นการทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มกล้วย ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติ

ทางความร้อน สมบัติการเปลี่ยนแปลงสี สมบัติการดูดซับน้ำ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่เตรียมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อเตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย (Banana starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer)

1.2.2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของแป้งกล้วย โดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้ายเป็นสารเสริมแรง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1. เพื่อเตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วย โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.2. ศึกษาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผสมองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกัน ได้แก่ อุณหภูมิในการผสม ระยะเวลาในการให้อุณหภูมิ อัตราส่วนขององค์ประกอบที่ใช้ในการผสม

1.3.3. ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม โดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้าย ในปริมาณต่าง ๆ กัน

1.3.4. เพื่อทดสอบสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่เตรียมได้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. เพื่อผลิตในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้ายเป็นสารเสริมแรง

1.4.2. ส่งเสริมการนำผลิตผลจากกล้วย มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้นและยังเป็นการเพิ่มให้แก่ผลผลิตจากกล้วยอีกด้วย

1.4.3. เพื่อนำในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย มาใช้ทดแทนวัสดุย่อยสลายยากในปัจจุบัน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 แนวโน้มการผลิตพลาสติกจากปิโตรเคมีไปสู่การผลิตโดยอาศัยกลไกทางชีวภาพ [2]

อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่เริ่มต้นจากน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ไปสู่กระบวนการผลิต สังกะระห์เป็นผลิตภัณฑ์ต่อเนื่อง และพัฒนาไปสู่วัสดุพอลิเมอร์ เส้นใย หรือพลาสติกชนิดต่างๆ ที่เข้ามามีบทบาทใน ชีวิตประจำวันของมนุษย์มานานกว่าร้อยปี ตลอดศตวรรษที่ผ่านมา มนุษย์ได้พบถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งประมาณการได้ว่าจะต้องหมดไปในที่สุด นอกจากนี้ในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยเฉพาะ การเผาไหม้ ยังก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะ ซึ่งได้ขยายไปในวงกว้างต่อระบบนิเวศน์ของโลก ทำให้การคิดค้น และพัฒนากระบวนการใหม่ รวมถึงการสร้างนวัตกรรมเพื่อผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี อย่าง ครบวงจรภายในเวลาอัน รวดเร็ว เป็นสิ่งหนึ่งที่ทุกประเทศจำเป็นต้องพัฒนา ทั้งนี้นอกจากจะหมายถึง การรักษาสีงแวดล้อมที่ดีของประเทศของตนแล้ว ยังหมายถึงการเพิ่มศักยภาพและโอกาสในการ แข่งขันอันจะเชื่อมโยง ไปสู่ความเป็นผู้นำด้านเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศอีกด้วย

ในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติก เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเด่นมากมาย จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากพลาสติกมีความ ทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้เป็น ระยะเวลาอันยาวนานนับร้อยๆ ปี จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกขึ้นส่งผล โดยตรงต่อสภาพแวดล้อม

สาเหตุที่พลาสติกที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้มี 2 ประการ คือ

1. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้มีความทนทานต่อการย่อย สลายโดยเชื้อจุลินทรีย์
2. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีลักษณะไม่เป็นพรุณ และมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไป สัมผัสกับผิวของพลาสติกน้อยลง จึงยากที่จะทำให้พลาสติกย่อยสลายได้

เนื่องจากพลาสติกที่ผลิตสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ดังที่ กล่าวไป แล้ว ดังนั้นด้วยความตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมโลก พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable

plastic) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิตและกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลก โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำและสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ภายหลังจากการใช้งานโดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้น จะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (Commodity Plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้

เมื่อพิจารณาประเทศหรือกลุ่มประเทศธุรกิจหลักแล้ว จะเห็นได้ว่าการตื่นตัวด้านพลาสติกย่อยสลาย ได้ทางชีวภาพ ทั้งด้านนโยบาย การวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรม และการสร้างผลิตภัณฑ์เพื่อเร่งรัดให้เกิดการตลาดพลาสติกทั่วไปนั้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว และมีขั้นตอนที่เป็นชี้ทิศทางอย่างชัดเจน อาทิ ประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นหนึ่งในประเทศผู้นำด้านวิชาการ และเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้ก้าวเป็นผู้นำการผลิตพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้โดยเริ่มตั้งแต่การประสบความสำเร็จในการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ใน ระดับอุตสาหกรรม เช่น บริษัท CargillDow หรือ Natureworks ได้ใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ เพื่อผลิตกรด แลคติกและพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid หรือ PLA) ในขณะที่บริษัท Metabolix Inc. เป็นผู้นำด้านการผลิตพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ชนิดพอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (Polyhydroxyalkanoates หรือ PHAs)

ในอนาคตการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น

## 2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ [3]

คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตาม ASTM D6400-99 หมายถึงพลาสติกที่ย่อยสลายได้อันเนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรียรา และสาหร่าย โดยทั่วไป เราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

### 1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่

พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

## 2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

## 3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหัก และสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและ พัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายใน ช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสีย สมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

## 4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮดรคาร์บ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาการทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล(Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ บริเวณปลายของสายโซ่ พอลิเมอร์ ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

### 5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายในเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่ พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อ พอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (มวลชีวภาพ หมายถึง มวลรวมของสสารที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดำรงชีวิตและเติบโตของสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์)

นอกจากนี้ยังพบว่า มีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) หมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึมและย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย โดยการย่อยสลาย และการดูดซึมนี้ต้องเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environmental friendly Plastics) หรือ พลาสติกสีเขียว (Green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบโดยรวมต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

### การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

#### 1. การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวนั่งเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวย่อยอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นดามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่

สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับบริการออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดชำรุดเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

## 2. สารเคลือบกระดาษ หรือ โฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแสมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

## 3. फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นใน ขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

## 4. ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขณะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป เพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

## 5. ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bags)

ฟิล์ม และถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะดวกไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงชันอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ต้นต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

## 7. โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟม เม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

### ข้อดีของพลาสติกย่อยสลายได้

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน พร้อมทั้งช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุ ในขณะที่การใช้พลาสติกมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา

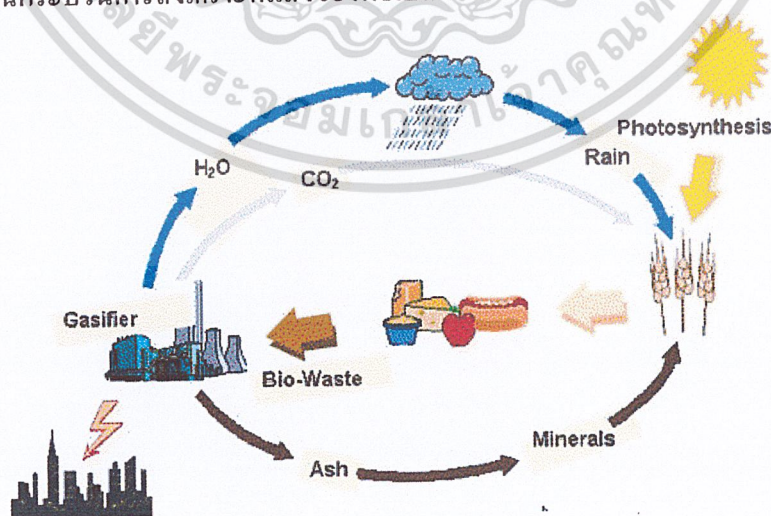
2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและถุงที่ย่อยสลายได้ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากแก๊สมีเทนได้ การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มเนื้อที่ให้บ่อฝังกลบ เนื่องจากการปิดหน้าบ่อฝังกลบด้วยดินทุกวันจะใช้เนื้อที่รวม 25% ของเนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

3. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป

4. การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญจากการใช้ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่จากการศึกษาโดยวิธีประเมินวัฏจักร ตั้งแต่เริ่มการผลิต จนถึงการกำจัด ภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน พบว่า พลาสติกย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกใน ปริมาณที่ต่ำกว่า พอลิเอทิลีน ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีที่เป็นพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ พื้นฐาน ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของพลาสติกจะถูกใช้ไปใน การเติบโต ของพืชที่จะปลูกขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดการหมุนเวียนแก๊ส คาร์บอน ไดออกไซด์ในธรรมชาติซึ่งเป็นส่วน หนึ่งของวัฏจักรคาร์บอน ทำให้เกิดความสมดุลของปริมาณแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ในบรรยากาศ

### 2.2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีสมบัติต่างๆ ในการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะซึ่งจะอยู่ในสถานะที่ เหมาะสม คือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ก็จะเกิดการย่อยสลายได้หรือ ถูกหมักเป็นปุ๋ยในสถานะที่เหมาะสม การพัฒนาของระบบในธรรมชาตินั้นเริ่มจากมวลชีวภาพหลาย พันล้านตันถูกผลิตขึ้น โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งมวลชีวภาพนี้จะถูกย่อยสลายได้ กลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งชีวภาพและแร่ธาตุ การเกิดขึ้นในวัฏจักร นี้ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ ซึ่งวัฏจักรของธรรมชาตินี้มีเกิดขึ้นและย่อยสลาย ได้ครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะซึ่งทำให้เกิดปัญหาด้านมลพิษและไม่เสีย ค่าใช้จ่ายสูง หลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปกำจัดโดยตรงย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อ ใ้ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ ซึ่งก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้น จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 เทคโนโลยีสถิตพลาสติกจากแป้ง [5]

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มีการพัฒนามานานแล้วเริ่มตั้งแต่มีการเริ่มใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ ราคาถูกคือ แป้งผสมในการฉีดพลาสติกและได้รับการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์อย่างต่อเนื่อง ขณะนี้มีการแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้

### 2.2.2.1 การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือ 90% ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่ในรูปที่เรียกว่า “Gelatinized” starch tuff หรือ Plate expanded by extrusion หรือ Baking with water หมายถึง การให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้น เนื่องจากแรงดันของน้ำภายในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็น การทดแทนโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน เรียกกันว่า “โฟมแป้ง” ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกใน กล่องโฟมแป้งแบ่งออกเป็น

#### 1) โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (Extruder) แป้งจะพองออกมาจาก หัวฉีด เนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดันเมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟม สำหรับอุ้มอากาศ สมบัติของโฟมแป้งนี้ (ความหนาแน่น, ความเหนียว) เกิดจากสมบัติของแป้ง ปริมาณน้ำ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง (Additive)

#### 2) โฟมจากแป้ง

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

### 2.2.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

พลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้ง สามารถย่อยสลายได้ และส่วนได้แสดงดังรูปที่ 2.2 แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้ สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูปเม็ดแป้งและแป้งที่ผ่านการเจลาทิไนซ์ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี

#### 1. ในรูปเม็ดแป้ง

แป้งจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี นำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตก ออกปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัด ไม่ได้เกิด 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการ

เกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีด อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่นๆ ได้เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพดซึ่งเป็น Auto-oxidation เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือ โลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อมเกิดอนุมูลอิสระชนิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไปย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของ ปีโตรเคมีให้ได้ โอลิโกเมอร์ที่เสถียรเพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเม็ดแป้ง

## 2. ในรูปแป้งเจลาตินไนซ์

วิธีนี้เม็ดแป้งจะแตกตัวทั้งหมด ผสมรวมกับอนุพันธ์ปีโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



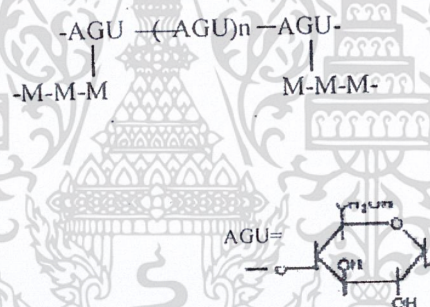
รูปที่ 2.2 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเจลาตินไนซ์ [5]

ในประเทศไทยได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ จากส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง พอลิลาโพรแลคแทม โดยแป้งมันที่ใช้อยู่ในรูปแบบเม็ดแป้งเจลาตินไนซ์ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติของส่วนผสม ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งที่ใช้ เมื่อปริมาณแป้งในรูปแบบเม็ดแป้ง และแป้งเจลาตินไนซ์ในส่วนผสมต่ำกว่า 40% พบว่าความแข็งแรงดึงของส่วนผสมทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน %การดึงยึดขึ้นกับรูปแป้งที่ใช้ ถ้าปริมาณแป้งมากกว่า 30% ในการทดลองพบว่า ในรูปเม็ดแป้งมี %การดึงยึดสูงกว่าแป้งรูปเจลาตินไนซ์ถึง 125 เท่าที่ปริมาณแป้ง 50% เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon analyzer) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่า

ในรูปแป้ง เจลละทิไนซ์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างลำดับที่น้อยกว่าในรูปเม็ดแป้งเมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าส่วนผสมที่มีแป้งเจลาทิไนซ์ 30% และพอลิคาโปแลคแทม 70% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกที่มีสมบัติทางกายภาพดีและมีความสามารถในการย่อยสลายสูง

### 2.2.2.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์

โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ (Starch graft copolymer) แสดงได้ดังรูปที่ 2. โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคสและ M เป็นมอนอเมอร์ที่จะมาทำปฏิกิริยากับแป้ง แป้งที่ใช้อาจจะใช้ในรูปเม็ดแป้งเจลาทิไนซ์ การทำปฏิกิริยา Graft copolymerization ขึ้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ( Free radical) บนสายโซ่โมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีไหนขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีเป็นที่นิยมที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีริก (Ceric salts ) ปฏิกิริยาแสดงได้ในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ [5]

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลแป้ง ไอออนของมอนอเมอร์ปีโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย

### 2.2.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [5]

#### 2.2.3.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้

โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาหน้าหนักแห้ง สมดุลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ  $C_g$  = คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

$C_s$  = คาร์บอนที่ละลายได้

$C_m$  = คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (C_d/C_i) * 100$$

เมื่อ  $C_i$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

### 2.2.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือ เกิดการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้น โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของ พอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูงจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่า พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณแป้งต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

### 2.2.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

#### ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและแป้ง ที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

#### ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งฝังไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาวซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มี

กำลังขยายสูง ยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนิของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือน มาตรวจวัดหาปริมาณไนโตรเจน พบว่า ปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคโลนิบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

#### 2.2.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าใน พอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมี CO<sub>2</sub> เกิดขึ้น ซึ่งสามารถวัดจากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

#### 2.2.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

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

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนที่อสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

#### 2.2.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x 120 มิลลิเมตร หลายนๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 2 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ

## 2.3 แป้ง [5]

แป้งเป็น Homopolysaccharide ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช และเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้นและผล โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (Starch granule) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่างและบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกันและเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

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

1. Starch ผลิตได้จากพืชผลทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และจากพืชหัวชนิดต่างๆ เช่น มันฝรั่ง มันสำปะหลัง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งต้องเป็นแบบเปียก (Wet grinding) จะทำให้แยก Starch ออกมาได้
2. Flour ผลิตได้จากการ โม่แบบแห้ง และยังคงเหลือองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ด้วย จึงทำให้มีสมบัติต่างไปจาก Starch

### 2.3.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง [5]

เม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า Growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ หรือ Scanning electron microscopy เม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น Growth ring ได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำ จะสังเกตเห็น Growth ring ได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบ Growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือ

ย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ Growth ring แสดงถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (Hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน Reducing end ของโมเลกุลแป้ง มีด้าน Non-reducing end ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (Branch point) ของอะไมโลเพคตินอยู่ในส่วนอสังฐานและสาขอยู่ในส่วนผลึก

ถ้าส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ (Polarized microscope) จะมองเห็นวงแหวนและไฮลัม เป็นเครื่องหมายกากบาทสี่ค่าชัดเจน (Birefringence หรือ Polarization cross) โดยจุดตัดของ กากบาทจะเป็นตำแหน่งของไฮลัมและบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาบ ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะ ที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ

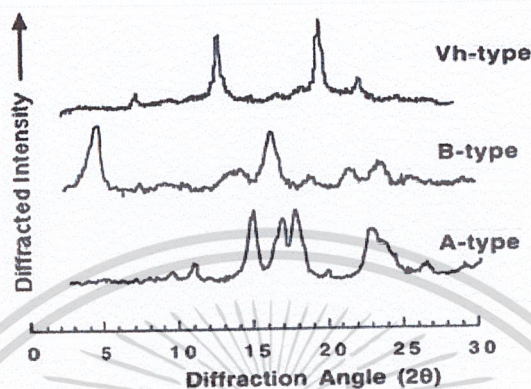
เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.4 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ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



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง ชนิด A และ B ของอะมิโลส [6]

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค Wide angle x-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ X-ray diffraction ต่างกันดังรูปที่ แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 2θ เท่ากับ 17 และ 18 และพีคเดี่ยวที่ 2θ เท่ากับ 23 แต่ไม่มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.6 แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 2θ เท่ากับ 5.6 และ 17 แต่ไม่มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 18 และมีพีคคู่ (Doublet) ที่ 2θ เท่ากับ 22 และ 24 ซึ่งได้แก่ แป้งจากพืชหัว และแป้งที่มีอะมิโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.6 และ 17.9 ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้นและแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบใน

ธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับวิธีการปฏิบัติ (Treatment) ต่อเมล็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งขึ้นที่ถูกบ่มไวนานที่อุณหภูมิสูง ( $110^{\circ}\text{C}$ , 30 นาที :Heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นชนิด B ไปเป็นชนิด A ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [6]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [6]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน ( $^{\circ}\text{C}$ )	ปริมาณอะไมโลส (%)
<b>โครงสร้าง A</b>			
ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
<b>โครงสร้าง B</b>			
Amylomaize	15 – 22	86.0	55 – 75
สาธู	26	70.5	28
มันฝรั่ง	28	67.3	22
<b>โครงสร้าง C</b>			
มันเทศ	38	70.0	20
มันสำปะหลัง	38	66.0	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 องค์ประกอบภายในแป้ง [5]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง ซึ่งแป้งประกอบด้วย พอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (Amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (Amylopectin) วางตัวในแนวรัศมี amylose ประกอบด้วยกลูโคส 250-300 โมเลกุลซึ่งต่อกันเป็นโซ่ยาวแบบไม่มีกิ่งแต่โซ่จะมีลักษณะขดเป็นเกลียว (Helix) อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อยและ อะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “Intermediate material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและ อะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [6]

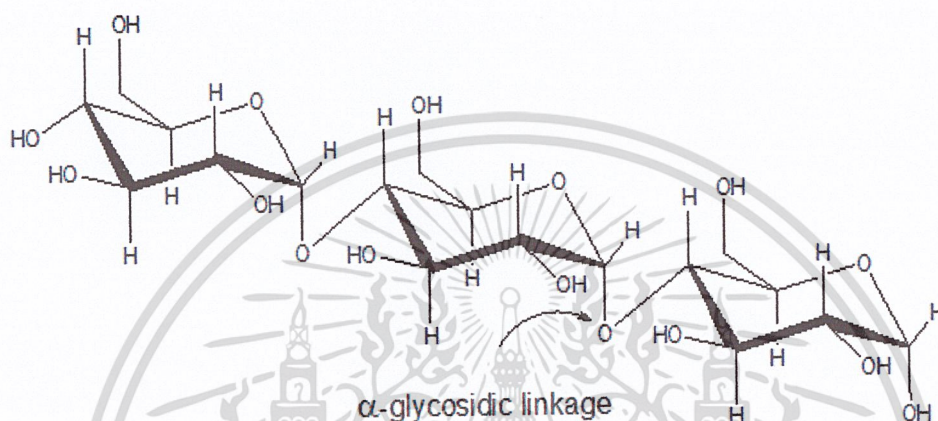
อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 และมี การแตกกิ่งด้วยพันธะ $\alpha$ -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลาย ไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง [5]

### 1. อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4 – glycosidic linkage และส่วนน้อยเป็น  $\alpha$ -1,6- glycosidic bonds อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลส [6]

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาเกตจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  คาลตัน โดย อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลส แตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลสยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ปริมาณและสมบัติของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [6]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (% น.น.แห้ง)
ข้าวสาลี	28.8
ข้าวโพด	29.4
ข้าวเจ้า	25.0
ข้าวบาร์เลย์	25.5
มันฝรั่ง	36.0
มันสำปะหลัง	23.5
พุทธรักษา	43.2
ถั่วเขียว	37.9

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) ไม่ละลายน้ำแต่เมื่อเติมน้ำลงไปอะไมโลสจะเกาะตัวกันเป็นตะกอนที่ไม่ละลาย และเนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลสเป็นสายยาวจึงมีโอกาสที่จะจับคู่กับอะไมโลสอีกโมเลกุลหนึ่ง เป็นสายยาวคู่ขนานเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกลายเป็นตาข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงและตกตะกอนได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Retrogradation แต่ Waxy starch ซึ่งไม่มีอะไมโลสเลยหรือมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบน้อยมากจะไม่เกิด Retrogradation การศึกษาการเกิดเจลาทีไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะไมโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติของอะไมโลสจากแป้งชนิดต่างๆ [6]

สมบัติ	มันฝรั่ง	แป้งข้าว	มันเทศ	มัน สำปะหลัง	เกล็ด	ถั่ว
Iodine binding capacity(g 100 g <sup>-1</sup> )	20.5	20.0-21.1	20.2	20.0	20.2	19.9
<i>beta</i> -amylolysis limit (%)	80	73-84	73	75	95	82
DP <sub>w</sub> (range)	840-21800	210-12900	840-19100	580-22400	160-8090	
DP <sub>w</sub> (mean)	6360	2750-3320	5430	6680	4210	
DP <sub>a</sub> (mean)	4920	920-1110	4100	2660	800	1290
DP <sub>w</sub> /DP <sub>a</sub>	1.29	2.64-3.39	1.31	2.51	5.76	
CL ความยาวเฉลี่ย	670	***	***	340	420	270
Chain number	7.3	2.5-4.3	11	7.8	1.9	4.8
Unbranched amylose (mol %)	66	69	30	58	89	73

### วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณอะไมโลสที่สำคัญ

#### 1. วิธีการทำให้เกิดสี (Colorimetric Method)

วิธีนี้อาศัยคุณสมบัติในการจับตัวกันระหว่างอะไมโลสกับไอโอดีน แล้วได้สารประกอบสีน้ำเงิน วัสดุที่เกิดขึ้นได้ด้วย Spectrophotometer เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด แต่วิธีนี้จะใช้เวลาและต้องเตรียมกราฟมาตรฐานนอกจากนี้อะไมโลเพคตินที่มีกิ่งแขนงเป็นจำนวนมาก จะจับกับไอโอดีนได้น้อย ให้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีม่วงแดงซึ่งสามารถรบกวนการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารเชิงซ้อนระหว่างไอโอดีนกับ อะไมโลสได้ อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ ไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น Butanol, Fatty acid, Surfactant, Phenol และ Hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำ โดย อะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบ

อินทรีย์ อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับ ไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง (ตารางที่ 2.5) ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง

**ตารางที่ 2.5** ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับ ไอโอดีน [6]

ความยาวสายโซ่ ( glucose unit )	Number of helix turns	Color
12	2	None
12-15>	2	Brown
20-30	3-5	Red
35-40	6-7	Purple
>45	9	Blue

การตรวจสอบปริมาณอะไมโลสโดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ ไอโอดีนและวัดสีที่เกิดขึ้น เป็นวิธีการที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก แต่อาจมีข้อผิดพลาดได้จากความไม่อยู่ตัวของสีที่เกิดขึ้น การรบกวนผลการวัดจากอะไมโลเพคติน โดยเฉพาะอะไมโลเพคตินที่มีความยาวสายโซ่มากๆ ซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อนกับ ไอโอดีนได้เช่นเดียวกันทำให้วิเคราะห์ปริมาณอะไมโลสได้มากเกินจริง นอกจากนี้ไขมันที่เกิดสารเชิงซ้อนกับอะไมโลสอยู่เดิมจะทำให้อะไมโลสโมเลกุลนั้นจับกับ ไอโอดีนไม่ได้ทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณีนี้ต้องทำการสกัด ไขมันออกก่อน

## 2.2 การใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC)

วิธีนี้จะคำนวณค่าปริมาณอะไมโลสจากพลังงานที่ใช้ในการละลายสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและไขมัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลายน้ำแป้งถูกให้ความร้อนในสภาพที่มีไขมันมากเกินพอเพื่อให้อะไมโลสในแป้งทั้งหมดจับกับไขมัน พลังงานที่ใช้ในการละลายจะได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ Peak ที่เกิดขึ้น วิธีนี้จะสะดวกและรวดเร็วให้ผลการทดลองที่ถูกต้องสำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณอะไมโลสสูง

## 2.3 การใช้ High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC)

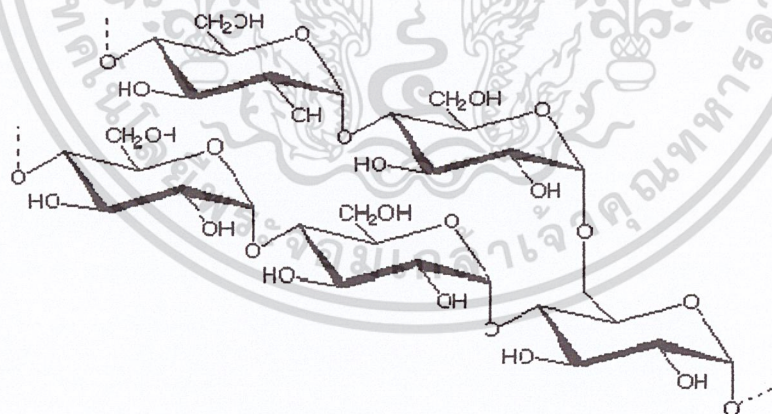
วิธีนี้อาศัยความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของ โมเลกุลของตัวอย่าง โดยโมเลกุลที่มีขนาดต่างกัน เมื่อเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยวัสดุที่มีรูพรุนจะมีความสามารถในการแพร่ผ่านแตกต่างกัน โมเลกุลที่มีขนาดเล็กสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนและถูกกักไว้ทำให้ถูกชะออกมาได้ช้า

ที่สุดส่วน โมเลกุลที่มีขนาดกึ่งกลาง ไม่ใหญ่มากนักจะแพร่ผ่านได้เฉพาะบางส่วนของ รูพรุนและจะถูกกั้นจากรูที่เล็กมาก ๆ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่มากจะไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้จึงถูกชะออกจากคอลัมน์เป็นอันดับแรก

นอกจาก 3 วิธีที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส อาจใช้วิธีการวัดเอนทัลปีในการหลอมเหลวของ Starch-lipid complex แต่ประสิทธิภาพของวิธีการนี้ จะขึ้นกับความสามารถในการละลายของอะมิโลสในตัวอย่างแป้งแต่ละชนิด วิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่า คือ การใช้ Gel permeation chromatography (GPC) แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีจำนวนมาก นอกจากนี้ก็มีการใช้ High pressure size exclusion chromatography ซึ่งจะเร็วกว่าการใช้ GPC อีกวิธีการ คือการใช้ concanavalin A มาตกตะกอนอะมิโลเพคติน ออกไปและวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่เหลืออยู่

## 2. อะไมโลเพคติน (amylopectin) [6]

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส มีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีสายแขนงแยกออกมาซึ่งแต่ละแขนงจะมีน้ำตาลกลูโคสประมาณ 20-35 หน่วย ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [5]

โดยปกติอะไมโลเพคตินมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าอะไมโลสมาก อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลสคือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาล อะไมโลเพคตินมีพันธะ

ไฮโดรเจนน้อยกว่าอะไมโลสและมีความคงตัวมากกว่า ยังคงสภาพเหลว มีความหนืดยืดหยุ่น สำหรับอะไมโลเพคตินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลังและมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90 % ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีก 10-20 % จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะไมโลเพคตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (Double helix) การเกิดเกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกันถึงอะไมโลเพคตินภายในเม็ดแป้งสามารถเกิดเป็นผลึกได้ ทั้งที่ที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกันหรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ  $\alpha$ -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลสคือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง อะไมโลสประกอบด้วยสายโซ่ 3 แบบ คือ

- 1) สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
- 2) สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า สายโซ่แบบ B นี้ยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อย B1, B2, B3 และ B4 ซึ่งมีความยาวक्रमหนึ่ง สอง สามและสี่คลัสเตอร์ (Cluster) ตามลำดับ
- 3) สาย C (C-chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ความยาวของสายกิ่งอะไมโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย ประกอบด้วยสาย A และสาย B ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งมี DP ประมาณ 45-60 หน่วย ประกอบด้วยสาย B สายยาว สายโซ่เหล่านี้อยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster)

ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินที่มี ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่เหล่านี้ จะอยู่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) โดยลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว (Cluster) สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไปในโครงสร้างที่ประกอบด้วย 2 และ 3 กลุ่มตามลำดับ โดยสาย A , B1 และ B2 จะมีขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization, DP) อยู่ช่วง 6-12 , 12-24 และ 24-25 ตามลำดับ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของ อะไมโลเพคตินจากมันฝรั่งโดยใช้เอ็กซ์เรย์ที่ขย่พันธะกิ่งโดยส่วนหนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (Crystallite region) ที่เกิดจากสายโซ่

ที่เป็นเส้นตรงสั้นๆ ของอะไมโลเพกติน ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็น โครงสร้างบริเวณที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อของสายโซ่กลูโคส ซึ่งแสดงถึงส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) ของแป้ง

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางโครงสร้างของอะไมโลเพกติน [6]

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

### 3. สารตัวกลาง (Intermediate material)

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะไมโลเพกตินแต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่าปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลสกับอะไมโลเพกตินและสารตัวกลางในเมล็ดแป้งไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูกเช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างเพาะปลูก เป็นต้น

### 4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particular material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเมล็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเมล็ดแป้ง (Internal component) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเมล็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่วนประกอบอื่นๆที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน เถ้า และ ฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

### 2.3.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง [5]

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

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วย โมเลกุลของอะไมโลส และสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่

### 2.3.4 สมบัติของแป้ง [6]

#### 2.3.4.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงไปแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำจากบรรยากาศจนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10-16%

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูป Bound water และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8-10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 แต่ละหน่วยแป้งจะได้สูตรโมโนไฮเดรต :  $[n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)]$

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซล (Micelles) ในเม็ดแป้งได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดเม็ด เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟตลงไป พบว่าสีจะหายไปอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าเม็ดแป้งประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Molecular sieve รูพรุนเหล่านี้อาจจะเกิดขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้งหรืออาจจะมียูเรียในแป้งธรรมชาติ แต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้นเนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกัน หรือ Water bridges แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้ง

เพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายโมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลายความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิดBirefringence จะหมดไปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้งและการตัดแปลงแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

เมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนของแป้งจะเกิดการละลายออกมา กำล้างการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ

#### 2.3.4.2 การเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อยแต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายเม็ดแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัวส่วนผลสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “เจลาทีไนเซชัน” (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายที่เกิดความหนืดเรียกว่า “อุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์” เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า “อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด” (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

การเกิดเจลาทีไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้อย่างจำกัดความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบBirefringence ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิจากสารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่าง

รวดเร็วย่างแพร่หลายในเมล็ดแป้งจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามา และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า “การเกิดเจลาทีนในเซชัน” เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง Birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิด เจลาทีนในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยาของแป้งได้ดีมากขึ้นรวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม [5]

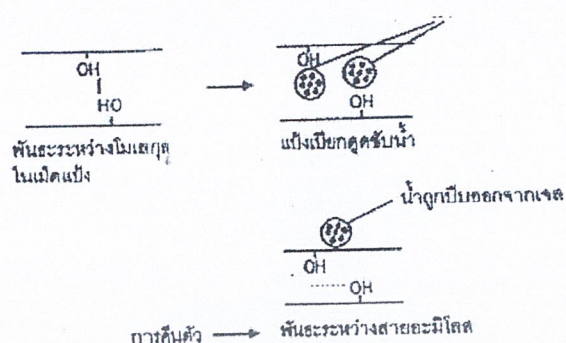
#### 2.3.4.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีนในเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จะถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็ก จะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มี การดูดน้ำเข้ามาอีกมีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “รีโทรเกรเดชัน” (Retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ Setback เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีกลักษณะการเรียงจัดของ โครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาออกเจล ซึ่งเรียกว่า “Syneresis” ปรากฏการณ์ทั้ง 2 นี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดมากขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลายทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำที่ถูกบีบออกมาออกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอนเมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด - เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมเลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง ในสถานะที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้ แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะได้เกลือของ Monovalent anion และ Mation nitrate และ Urea

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวมากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง อัตราในการคืนตัวสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่ Degree of polymerization ของอะไมโลสเท่ากับ 100-200 อัตราในการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส อะไมโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในแป้งข้าวโพด ข้าวเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะไมโลสในแป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในแป้งธัญพืชมีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 28%) มีอะไมโลสโมเลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูงทำให้เกิดการจับตัวเป็น Amylose-lipid complex



รูปที่ 2.13 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [5]



การตรวจสอบความสามารถในการเกิด Retrogradation ของแป้งแต่ละชนิดอาจประมาณได้จากค่า setback ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (Setback from trough) โดยเครื่อง Brabender หรือ Rapid visco analyzer นอกจากนี้การเกิด Retrogradation ของแป้งสามารถวัดได้โดยการใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter โดยนำแป้งดิบไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีนในเซชัน (เอนทัลปี,  $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ ) แล้วนำแป้งที่ผ่านเจลลาทีนในเซชันนี้ไปบ่มไว้ในสภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรเกรเดชันโดยใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน เช่น -20, 4, 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 21 วัน แล้วนำแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันแล้วไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้ ( $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ ) % รีโทรเกรเดชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทัลปีของแป้งรีโทรเกรเดชันต่อ เอนทัลปีของแป้งเจลลาทีนในเซชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทัลปีของแป้งรีโทรเกรเดชันต่อเอนทัลปีของแป้งเจลลาทีนในเซชัน คือ

$$\% \text{ Retrogradation} = \frac{\Delta H_{\text{gelatinization}}}{\Delta H_{\text{Retrogradation}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งจะทำให้เกิดการแยกตัวของน้ำจากเจล (Syneresis) ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติ Freeze-thaw stability ของแป้ง โดยแป้งที่มีการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีจะมีค่า Freeze-thaw stability ต่ำ ในขณะที่แป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันต่ำจะมีค่า Freeze-thaw stability สูง ดังนั้นการวัด Freeze-thaw stability จึงสามารถใช้ประเมินการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งได้

### 2.3.5 กล้วย [8]

#### ข้อมูลทั่วไป

กล้วยเป็นผลไม้ที่มีการเพาะปลูกและนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากรับประทานง่าย มีราคาถูก และอุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหาร แหล่งเพาะปลูกกล้วยที่สำคัญของโลก อยู่ในประเทศแถบเอเชีย มีปริมาณการผลิตกล้วยรวมกันมากถึงครึ่งหนึ่งของผลผลิตกล้วยทั้งหมดของโลกประเทศที่ผลิตกล้วยได้มากที่สุดในโลก คือ อินเดีย รองลงมาได้แก่ ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย จีน ไทย และเวียดนาม สำหรับแหล่งเพาะปลูกและส่งออกกล้วยช่วยเสริมและสนับสนุนให้เกษตรกรหันมาปลูกกล้วยเพื่อการส่งออกมากขึ้นการจำหน่ายทั้งกล้วยสดและผลิตภัณฑ์กล้วย ส่วนใหญ่มีการแปรรูปกล้วยในอุตสาหกรรมอาหารและยา ซึ่งเราสามารถแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของกล้วย

#### สถานการณ์ผลิตและการตลาดกล้วย

1. สถานการณ์ผลิต กล้วยน้ำว้ามีการปลูกกันทั่วไปทั้งแถบหลังบ้านและเชิงการค้า ปี 2538 มีพื้นที่ปลูก 732,000 ไร่ ผลผลิต 1,185,000 ตัน แหล่งปลูกได้แก่ เลย นครพนม หนองคาย ชุมพร ระนอง และ นครราชสีมา

กล้วยหอม ส่วนใหญ่มีการปลูกเชิงการค้าแหล่งปลูกได้แก่ ชุมพร ระนอง สงขลา นราธิวาส และ กรุงเทพมหานคร ปี 2538 มีพื้นที่ปลูก 53,560 ไร่ ผลผลิต 90,439 ตัน ผลผลิตเฉลี่ย 2,391 กิโลกรัม/ไร่

กล้วยไข่เป็นกล้วยที่ปลูกเชิงการค้าเป็นส่วนใหญ่ แหล่งปลูกสำคัญ จังหวัดกำแพงเพชร เพชรบูรณ์ ประจวบคีรีขันธ์ นครสวรรค์ สุโขทัย ชลบุรี ตรัง นครศรีธรรมราช ปี 2538 มีพื้นที่ปลูก 93,000 ไร่ ผลผลิต 150,000 ตัน ผลผลิตเฉลี่ย 2,140 กิโลกรัม/ไร่

2. สถานการณ์ตลาด การตลาดกล้วยส่วนใหญ่ปลูกเพื่อส่งขายตลาดภายใน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกล้วยน้ำว้า กล้วยหักมุก กล้วยเล็บมือนาง กล้วยหอม และกล้วยไข่

## การปลูกกล้วยในกลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนล่าง

กลุ่มภาคเหนือตอนล่างมีการปลูกกล้วยเพื่อการค้าเป็นจำนวนมาก โดยพันธุ์กล้วยที่นิยมปลูกส่วนใหญ่ คือ กล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้า กล้วยไข่จำหน่ายในรูปกล้วยสด ส่วนกล้วยน้ำว้าจะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์กล้วยในรูปแบบต่างๆเพื่อส่งจำหน่ายในตลาดต่อไป โดยจากการเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นพบว่า กลุ่มภาคเหนือตอนล่าง 3 จังหวัด คือ ตาก สุโขทัย และพิษณุโลก มีปริมาณผลผลิตกล้วยดังนี้

### จังหวัดตาก

อำเภอที่ปลูกกล้วยเพื่อจำหน่ายมี 2 อำเภอ ดังนี้

#### อำเภอสามเงา

เขตพื้นที่อำเภอสามเงามีการส่งออกกล้วยปริมาณสูง โดยมีเกษตรกรทั้งรายเล็กและรายใหญ่ เกษตรกรรายใหญ่ปัจจุบันได้มีการขยายพื้นที่เพาะปลูกไปยังอำเภออื่นๆเกษตรกรในพื้นที่ปลูก

กล้วย 2 พันธุ์คือ

1.กล้วยไข่ มีพื้นที่การเพาะปลูกในเขตอำเภอสามเงาทั้งหมด 6,000 ไร่ ให้ปริมาณผลผลิต 10,900 ตัน/ปี และมีช่องทางการจำหน่าย 2 ทาง คือ การจำหน่ายให้จตุรัสซึ้งซึ่งมีทั้งหมด 6 จุด โดยมีลักษณะเป็นโรงงานรับซื้อและคัดเกรดกล้วยไข่เพื่อบรรจุลงกล่อง แล้วใส่ตู้คอนเทนเนอร์ส่งจำหน่ายไปยังประเทศจีน และได้หวั่น ส่วนอีกหนึ่งช่องทางการจำหน่าย คือ การรับซื้อกล้วยสาย (กล้วยที่ไม่ได้คุณภาพ) เพื่อส่งจำหน่ายภายในประเทศต่อไป

2.กล้วยน้ำว้ามีพื้นที่เพาะปลูก 500 ไร่ ให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมด 1,400 ตัน/ปี โดยมีพ่อค้าคนกลางมารับซื้อถึงสวนและจำหน่ายในประเทศ

#### อำเภอพบพระ

เกษตรกรนิยมปลูกกล้วยไข่ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูก 1,280 ไร่ ให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมด 2,560 ตัน/ปี ซึ่งมีบริษัทหรือโรงงานมารับซื้อที่จังหวัดเชียงใหม่ และ กรุงเทพฯ

### จังหวัดสุโขทัย

อำเภอที่ปลูกกล้วยเพื่อจำหน่ายมี 2 อำเภอ ดังนี้

#### อำเภอกงไกรลาส

เกษตรกรมีการลดปริมาณการปลูกกล้วยน้ำว้าซึ่งส่วนใหญ่จะเน้นเรื่องของการแปรรูปเป็นกล้วยอบเนยเพื่อการจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ มีกลุ่มเกษตรกรที่ทำการแปรรูปหลายกลุ่ม มีพ่อค้าจากต่างชาติเข้ามารับซื้อเพื่อส่งออกจำหน่ายสู่ประเทศจีนโดยการบรรทุกใส่ตู้คอนเทนเนอร์ ซึ่งมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งออกไปยังประเทศจีนเป็นเวลา 2-3 ปีแล้วผู้ประกอบการบางรายมีความสามารถในการหาตลาดเอง เช่น เจ็กิมถ่าน ปัจจุบันส่งออกไปยังประเทศมาเลเซียหรือสิงคโปร์ กลุ่มเกษตรกรแปรรูปรายอื่นๆ ส่งผลิตภัณฑ์จำหน่ายที่ตลาดสี่มุมเมืองหรือบางรายส่งจำหน่ายที่ภาคอีสาน

#### อำเภอศีร์ษะมาศ

ปัจจุบันมีพื้นที่เพาะปลูกกล้วยน้ำว้าประมาณ 6,000 ไร่ ซึ่งผลผลิตโดยเฉลี่ยประมาณ 1.2 ตัน/ไร่ มีการจำหน่ายผ่านพ่อค้าคนกลาง

#### จังหวัดพิษณุโลก

อำเภอที่ปลูกกล้วยเพื่อจำหน่ายมี 2 อำเภอ ดังนี้

##### อำเภอชาติตระการ

เกษตรกรนิยมปลูกกล้วยน้ำว้า ซึ่งมีพื้นที่ปลูก 700 – 1,000 ไร่ โดยพื้นที่ปลูกส่วนใหญ่อยู่ที่ตำบลท่าสะแก การจำหน่ายกล้วยมี 2 รูปแบบ คือ จำหน่ายกล้วยสดใหม่ผ่านพ่อค้าคนกลางเพื่อไปจำหน่ายต่อที่ตลาดไท จำหน่ายผลิตภัณฑ์กล้วยแปรรูปของกลุ่มแม่บ้านเพื่อจำหน่ายในพื้นที่ และผ่านพ่อค้าคนกลาง

##### อำเภอบางกระทุ่ม

เกษตรกรปลูกกล้วยน้ำว้ามาเป็นเวลานาน มีพื้นที่ปลูกทั้งหมด 2,900 ไร่ ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 1.35 ตัน/ไร่ ช่องทางการจำหน่ายหลัก คือ จำหน่ายให้โรงงานแปรรูปท้องถิ่นซึ่งมีหลายโรงงานและจำหน่ายผ่านพ่อค้าคนกลาง โดยปัจจุบันมีพ่อค้าคนกลาง 2 ราย จากจังหวัดพิจิตร รับซื้อเพื่อทำกล้วยตากหรือกล้วยเคลือบน้ำตาล กล้วยน้ำผึ้ง

#### การส่งออก

กล้วยที่นิยมปลูกเพื่อการส่งออก ได้แก่ กล้วยหอมทอง กล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้า ซึ่งการส่งออกในรูปแบบของกล้วยสดแช่เย็น และผลิตภัณฑ์กล้วยที่สำคัญ มีดังนี้

##### กล้วยสดแช่เย็น

- กล้วยหอม โดยเฉพาะกล้วยหอมทองปลูกมากที่จังหวัดชุมพร ระนอง และ สุโขทัย ตลาดส่งออกกล้วยหอม ที่สำคัญของไทย ได้แก่ ญี่ปุ่น จีน ฮองกงและไต้หวัน
- กล้วยอื่นๆ เช่นกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้า ตลาดส่งออกสำคัญ ได้แก่ ฮองกง จีน และ ญี่ปุ่น

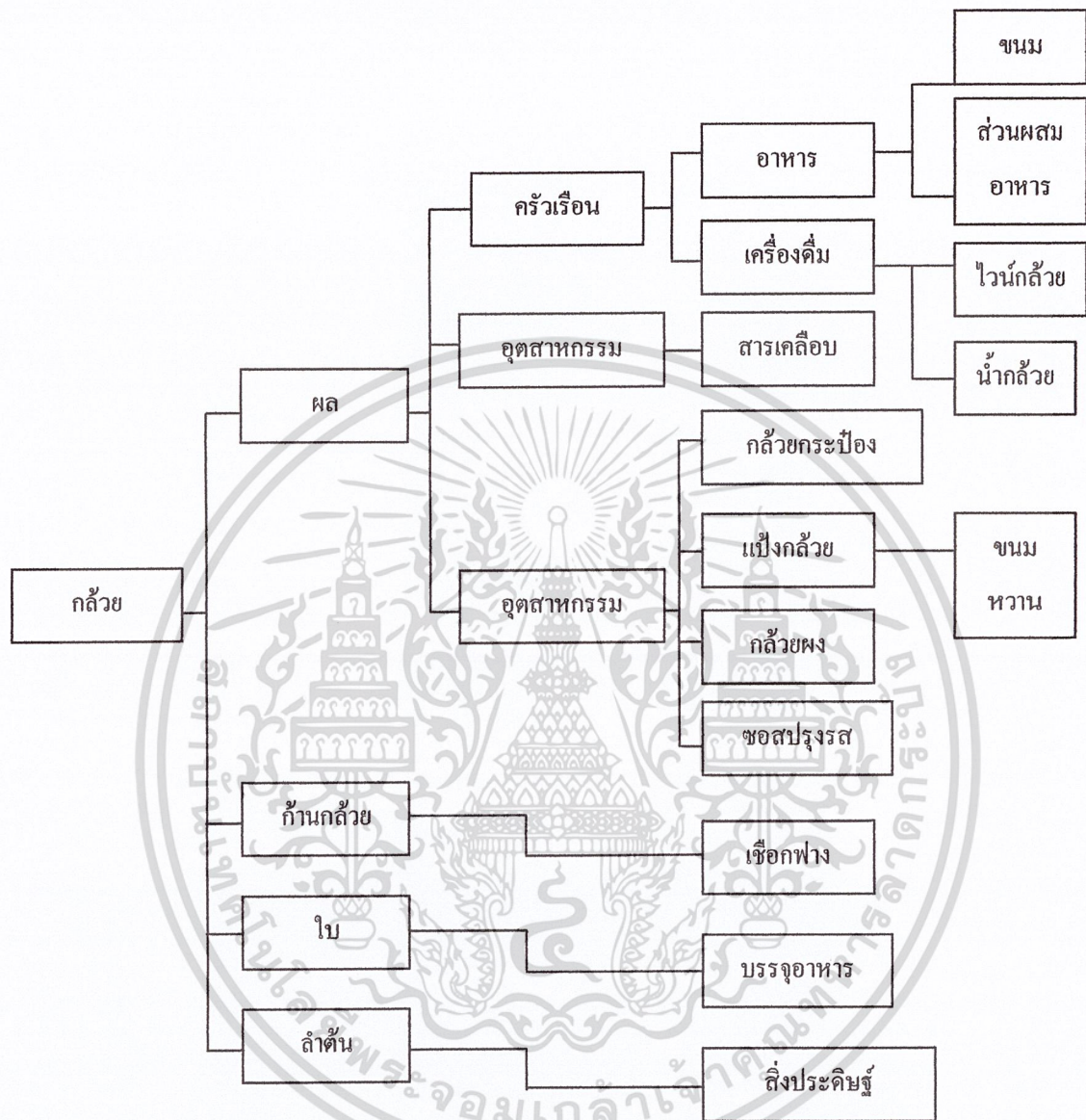
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลิตภัณฑ์กล้วยที่สำคัญ ได้แก่

1. กล้วยแปรรูปอย่างง่าย เช่น กล้วยกวน กล้วยตาก และกล้วยอบกรอบ (banana chip) ตลาดส่งออกกล้วยแปรรูปอย่างง่ายที่สำคัญของไทย ได้แก่ สหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย
2. กล้วยกระป๋อง ตลาดส่งออก กล้วยกระป๋องที่สำคัญของไทย ได้แก่ สหรัฐอเมริกา แคนาดา และฝรั่งเศส
3. สารปรุงแต่งรสและกลิ่นกล้วยใช้สำหรับปรุงแต่งอาหาร ตลาดส่งออกสำคัญ คือ สหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส อิตาลี ออสเตรเลีย และญี่ปุ่น

ประเทศไทยมีแนวโน้มการส่งออกกล้วยเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งยังมีช่องทางในการขยายการส่งออกได้อีกมาก โดยเฉพาะตลาดญี่ปุ่นเนื่องจากชาวญี่ปุ่นนิยมบริโภคกล้วยหอมของไทยอย่างไรก็ตามกล้วยและผลิตภัณฑ์กล้วยแปรรูปของไทยสามารถแข่งขันได้ในตลาดโลกได้ ถ้าทั้งเกษตรกรและโรงงานแปรรูปมีระบบการจัดการผลิตและการใช้เทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้มาตรฐานตามความต้องการของประเทศคู่ค้าที่กำหนดต่อไป

กล้วยสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลายชนิด ซึ่งผลิตภัณฑ์จากกล้วยได้มาจากส่วนต่างๆของกล้วยได้แก่ ผล ก้าน ใบและลำต้นดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์จากกล้วย [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6 แป้งกล้วย [8]

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำจากผลกล้วยดิบ เพราะในกล้วยดิบจะมีปริมาณแป้งมาก แป้งกล้วยมีการทำและขายในตลาดท้องถิ่นมาก่อน และเริ่มทำเป็นอุตสาหกรรมเมื่อปี ค.ศ. 1982 ในประเทศอิเควดอร์ด้วย กล้วยหอมกลุ่มคาเวนนิชและมีการผลิตแป้งกล้วยกันเพิ่มมากขึ้นเป็นอุตสาหกรรม ในประเทศอิเควดอร์ มีการผลิตประมาณปีละ 850 ตันและประเทศคอสตาริกามีการผลิตปีละประมาณ 2,700 ตัน เพื่อใช้เป็นอาหารของเด็กทารกและคนชรา ปัจจุบันการนำกล้วยมาแปรรูปเป็นแป้งกล้วยนับเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจมีผู้นิยมทำกันมากในอุตสาหกรรมอาหาร เพราะมีประชากรโลกจำนวนมากนิยมบริโภคแทนข้าว และล้วนเป็นประเทศที่มีปัญหาในด้านการผลิตซึ่งมีปริมาณการนำเข้าสูงมากเพื่อความมั่นคงทางอาหารของประเทศ

ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งกล้วยที่ได้จากข้อมูลแห่ง [8]

องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบ
ความชื้น	9.19
Reducing sugar	1.03
Non reducing sugar	3.72
แป้ง	66.0-78.0
อะไมโลส	21% ของแป้ง
อะไมโลเพคติน	79% ของแป้ง
Crude fiber	0.93
โปรตีน	3.26

#### 2.3.6.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งกล้วย

Kayisu และคณะ [9] ศึกษาสมบัติของสตาร์ชจากกล้วย พบว่าแป้งจากกล้วยดิบประกอบด้วยสตาร์ช 78.0 เปอร์เซ็นต์ และแป้งจากกล้วยสุกประกอบด้วยสตาร์ช 16.1 เปอร์เซ็นต์และเมื่อส่องดูด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope พบว่าสตาร์ชจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเม็ด (Starch granule) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างทรงกลม (Spheroid) และแท่งยาว (Elongated) โดยรูปร่างทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 – 40 ไมโครเมตร มีความกว้าง 5 – 25 ไมโครเมตร และยาว 20 – 50 ไมโครเมตร (รูปที่ 2.15) พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชจากกล้วยดิบมีลักษณะเรียบ ในขณะที่เม็ดสตาร์ชจากกล้วยสุกมีลักษณะเป็นริ้วๆ ซึ่งเกิดจากการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ในระหว่างการสุกของกล้วย (รูปที่ 2.16) ส่วนสมบัติด้านความหนืดของเม็ดสตาร์ชเมื่อตรวจสอบโดย Brabender viscoamylograph พบว่า การตรวจสอบของผสมสตาร์ชกับน้ำที่ความเข้มข้นต่ำไม่พบการเกิด peak viscosity และมีความหนืดเกิดขึ้นเล็กน้อยในระหว่างให้ความร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวน้อย จึงมีความแข็งแรงมากพอที่จะต้านทานต่อการกวนได้ แต่เมื่อตรวจสอบของผสมสตาร์ชกับน้ำที่ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์ กราฟความหนืดที่ได้ใกล้เคียงกับสตาร์ชจากธัญพืช โดยหลังจากเกิด Peak viscosity แล้วเมื่อให้ความร้อนและเวลาต่อไป ความหนืดจะลดลง หลังจากนั้นเมื่อลดอุณหภูมิลงความหนืดจะสูงขึ้น และพบว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ (Gelatinization temperature) อยู่ในช่วง 67 – 70 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่าสตาร์ชจากกล้วยมีรูปแบบการพองตัว (Swelling pattern) เป็น 2 ชั้น (Two-stage swelling pattern)



รูปที่ 2.11 รูปร่างและขนาดเม็ดสตาร์ชจากกล้วยดิบ [9]



รูปที่ 2.12 ลักษณะเม็ดสตาร์ชจากกล้วยสุก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

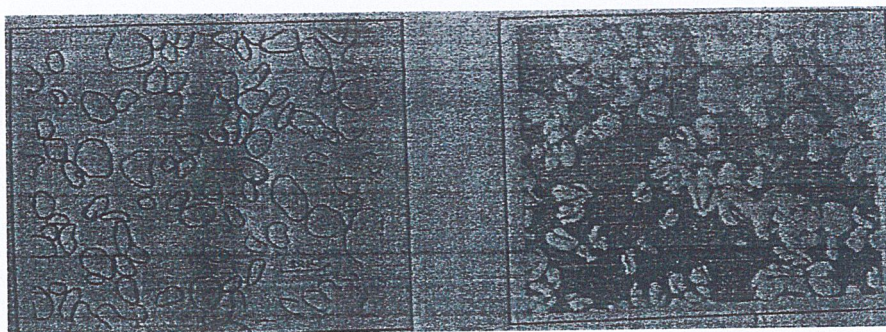
Lii และคณะ [10] ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสตาρχจากกล้วย (Musa sp.) ที่ระยะการสุกแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.8 ลักษณะของกล้วยที่ระยะการสุกต่างๆ [10]

ระยะการสุก	ลักษณะกล้วย
0	เปลือกเขียว ผลแข็ง
1	เปลือกเขียว ผลแข็ง ยังไม่มีการสุก
2	เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองนิดๆ
3	เปลี่ยนจากเขียวออกเหลืองมากขึ้น แต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง
4	เริ่มเปลี่ยนจากสีเขียวออกเหลือง และมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว
5	เปลือกเป็นสีเหลืองแต่ที่ปลายยังเป็นสีเขียว
6	ทั้งผลเป็นสีเหลือง(ผลสุก)
7	ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล(สุกที่มึกลิ่นหอม)
8	ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น(สุกเกินไป เนื้ออ่อนตัว และมีกลิ่นแรง)

พบว่าเมล็ดสตาρχเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงธรรมดา (Normal light) (รูปที่ 2.18) มีรูปร่างวงรี (Oval) และรูปร่างไม่แน่นอน (irregular) และเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์และแสงโพลาไรซ์ (Polarized light) พบการเกิดลักษณะไบรีฟริงเจน (Birefringence)(ในรูป 2.19(2)) เม็ดสตาρχมีขนาดอยู่ระหว่าง 6-80 ไมโครเมตร แต่ที่พบมากที่สุดอยู่ระหว่าง 20-60 ไมโครเมตร และเมื่อกกล้วยมีระยะการสุกมากขึ้น พบเม็ดแป้งที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยจะไม่พบเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กกว่า 15 ไมโครเมตร เมื่อกกล้วยมีระยะการสุกมากกว่าระยะที่ 1 และจะไม่พบเม็ดสตาρχที่มีขนาดเล็กกว่า 20 ไมโครเมตร เมื่อกกล้วยมีระยะการสุกมากกว่าระยะที่ 4 (ตารางที่ 2.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจากกล้วย [10]

เมื่อตรวจสอบสมบัติการพองตัวและการละลายของสตาร์ชจากกล้วยที่มีระยะการสุก 0 ถึง 3 ตรวจสอบที่อุณหภูมิ 65-95 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่ 2.9 พบว่าสตาร์ชจากกล้วยมีกำลังการพองตัวน้อยมาก (Fairly restricted swelling power) แต่สูงกว่าสตาร์ชจากธัญพืช ส่วนความสามารถในการละลายน้ำก็เช่นเดียวกัน นอกจากนี้สมบัติทางด้านความหนืดของผสมสตาร์ชจากกล้วยกับน้ำที่เข้มข้น 5, 7 และ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อตรวจสอบด้วย Brabender viscoamylograph ที่อุณหภูมิ 35-95-35 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที พบว่าของผสมสตาร์ชที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่พบ Peak viscosity เนื่องจากสตาร์ชมีการพองตัวน้อย จึงมีความหนืดเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่การตรวจสอบของผสมสตาร์ชที่ความเข้มข้น 7 และ 8 เปอร์เซ็นต์ พบ Peak viscosity ในระหว่างให้ความร้อน และเมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดการ set back ขึ้น และเมื่อตรวจสอบสตาร์ชจากกล้วยที่มีระยะการสุกต่างกัน มี Gelatinization temperature ใกล้เคียงกัน โดยมี Gelatinization temperature อยู่ในช่วง 74-83 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวกันอย่างแข็งแรง จึงทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวในระหว่างการให้ความร้อนน้อย (Fairly restricted-swelling) ดังนั้นต้องให้ความร้อนสูงเพื่อทำลายพันธะภายในเม็ดสตาร์ชจึงสามารถดูดน้ำและพองตัวได้

ตารางที่ 2.9 ปริมาณเมื่อดสตาร์ชขนาดต่างๆ (เปอร์เซ็นต์) ที่พบในกล้วยที่มีระยะการสุกต่างๆ [10]

ขนาด (ไมโครเมตร)	ระยะการสุกตัว							
	0	1	2	3	4	5	6	7
9	1.55	0.18	-	-	-	-	-	-
9-15	6.19	3.06	-	-	-	-	-	-
15-20	22.05	21.58	5.00	0.59	2.88	-	-	-
20-30	40.62	48.38	63.33	45.10	19.60	23.56	25.72	28.40
30-45	24.56	22.30	27.78	50.15	58.21	68.44	64.29	59.88
45-60	5.03	4.32	3.89	4.15	19.02	8.00	8.57	8.64
60	-	0.18	-	-	0.92	-	-	0.30

ตารางที่ 2.10 กำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชกล้วยที่มีระยะการสุกตัวต่างๆ [10]

	ระยะการ สุก	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)			
		65	75	85	95
กำลังการพอง ตัว	0	2.08	17.58	24.05	31.60
	1	2.25	18.14	24.03	33.47
	2	2.19	16.19	24.63	35.29
	3	2.51	12.27	20.90	30.07
ความสามารถ ในการละลาย น้ำ(เปอร์เซ็นต์)	1	0.15	10.00	13.61	16.33
	2	0.33	10.88	14.25	20.33
	3	0.14	9.98	15.09	21.74
	4	0.77	8.75	13.20	18.77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น [11] ศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งกล้วย ได้ผลสรุปว่า

1. กล้วยน้ำว้าที่มีความแก่ 70 80 90 และ 100 เปอร์เซ็นต์ มีอายุการเก็บเกี่ยว 15 16 17 และ 18 สัปดาห์หลังจากแทงปลี มีความยาวของเส้นรอบวง และอัตราส่วนเปลือกต่อเนื้อ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยกล้วยน้ำว้ามีความแก่เพิ่มขึ้น ความยาวเส้นรอบวงมากขึ้น แต่อัตราส่วนเปลือกต่อเนื้อลดลง

2. ในการคัดแยกกล้วยน้ำว้าที่มีระยะความแก่ต่างกันสามารถใช้วิธีการวัดความยาวเส้นรอบวง ร่วมกับการพิจารณาเหลี่ยมของผล และจำนวนวันหลังจากแทงปลีจนกระทั่งเก็บเกี่ยวเป็นดัชนีในการเก็บเกี่ยวกล้วยน้ำว้าเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแป้งกล้วยได้

3. ผลของวิธีการทำให้แป้งในกระบวนการผลิตแป้งกล้วย โดยการใช้ตู้อบและการตากแดด ทำให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของแป้งกล้วยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แป้งกล้วยที่ทำให้แห้งโดยการตากแดดจะมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดสูงกว่าแป้งกล้วยที่ทำให้แห้งโดยใช้ตู้อบแห้ง

4. แป้งกล้วยที่ผลิตจากกล้วยที่มีความแก่ต่างกัน มีปริมาณโปรตีน เถ้า เส้นใย คาร์โบไฮเดรต อะไมโลส และน้ำตาลทั้งหมด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยแป้งกล้วยที่ผลิตจากกล้วยที่มีความแก่มากขึ้น ปริมาณโปรตีน และเถ้า และน้ำตาลทั้งหมดจะเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณเยื่อใย คาร์โบไฮเดรตจะลดลง แป้งกล้วยจะมีปริมาณน้ำตาลและอะไมโลสมากที่สุด เมื่อกล้วยมีความแก่ 90% โดยประกอบด้วยสตาร์ชและอะไมโลส 66 และ 23% ตามลำดับ

5. แป้งกล้วยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองนวล จากการศึกษาของวิธีการทำให้แห้งในกระบวนการผลิตแป้ง โดยการใช้ตู้อบและการตากแดด พบว่าค่า L (ค่าความสว่าง) ค่า a (ค่าสีแดง) และค่า b (ค่าสีเหลือง) ของแป้งกล้วยไม่มีการแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) และเมื่อพิจารณาระยะความแก่ของกล้วยต่อค่าสีของแป้งกล้วยที่ผลิตได้ พบว่าค่า L (ค่าความสว่าง) ค่า a (ค่าสีแดง) และค่า b (ค่าสีเหลือง) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยค่า L (ค่าความสว่าง) ลดลงเมื่อกล้วยมีความแก่มากขึ้น ส่วนค่า b (ค่าสีเหลือง) เพิ่มขึ้นเมื่อกล้วยมีความแก่มากขึ้น

6. เม็ดแป้งกล้วยมีรูปร่างทั้งที่เป็นวงรีและรูปร่างไม่แน่นอน มีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 27-45 ไมโครเมตร วิธีการทำให้ในการผลิตแป้งกล้วยไม่มีผลต่อรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งและเมื่อพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะความแก่ของกล้วยที่มีต่อขนาดเมล็ดแป้งพบว่ากล้วยที่มีความแก่ 70 80 90 และ 100% มีขนาดเมล็ดแป้งโดยเฉลี่ยประมาณ 27 30 38 และ 45 ไมโครเมตรตามลำดับกล้วยที่มีความแก่มากขึ้นจะมีขนาดของเมล็ดแป้งใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 2.11 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของผลกล้วยที่ระยะความแก่ต่างๆ [11]

ความแก่(เปอร์เซ็นต์)	ความยาวเส้นรอบวง
70	3.14±0.14
80	3.49±0.28
90	3.70±0.28
100	4.15±0.35

ตารางที่ 2.12 ปริมาณผลผลิตแป้งกล้วยที่ผลิตจากกล้วยที่ความแก่ต่างๆ เมื่อทำแห้งโดยใช้ตู้ และการตากแดด [11]

วิธีทำแห้ง	ความแก่(เปอร์เซ็นต์)	เปลือก(เปอร์เซ็นต์)*	ผลผลิต(เปอร์เซ็นต์)*
ตู้อบแห้ง	70	39.75±0.85	22.20±1.80
	80	35.02±0.63	24.90±2.52
	90	32.43±0.55	21.90±1.48
	100	30.56±0.40	22.13±0.85
ตากแดด	70	39.02±0.70	20.90±2.86
	80	36.31±0.57	20.77±2.31
	90	34.64±0.55	22.37±0.61
	100	29.08±0.55	22.56±0.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

$$\begin{aligned} * \text{เปลือก(เปอร์เซ็นต์)} &= \frac{\text{น้ำหนักเปลือก} \times 100}{\text{น้ำหนักกล้วยทั้งผล}} \\ ** \text{ผลผลิต(เปอร์เซ็นต์)} &= \frac{\text{น้ำหนักแป้งกล้วย} \times 100}{\text{น้ำหนักกล้วยทั้งหมด}} \end{aligned}$$

### 2.3.6.2 การใช้ประโยชน์จากแป้งกล้วย [12]

ฉันทิสา รัตตอาภาและคณะ [12] ได้ทำการประกอบอาหารจากแป้งกล้วยพบว่า เมื่อใช้แป้งกล้วย น้ำว่า 25 เปอร์เซ็นต์ของแป้งทั้งหมดในขนมกล้วย และแป้งกล้วยหักมุกเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของแป้งทั้งหมดในขนมเหนียว ขนมถั่วแปบ และขนมต้มข้าวนี้ ผู้ชิมชอบและยอมรับแต่ข้าวตูและขนมกล้วยที่ใส่แป้งกล้วยน้ำว่านั้นผู้ชิมไม่ชอบ

วลัย หุตะโกวิท และคณะ [13] ได้นำแป้งกล้วยมาใช้ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง เค้ก คุกกี้ โดนัท ขนมเปียะไหว้พระจันทร์ ในอัตราส่วน 25 50 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์พบว่า สามารถนำแป้งกล้วยมาทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง เค้ก คุกกี้ โดนัท และขนมเปียะไหว้พระจันทร์ได้สูงสุด โดยผลิตภัณฑ์ จากแป้งกล้วยยังมีลักษณะดีตามลักษณะของผลิตภัณฑ์ชนิดนั้นๆ และหากเพิ่มปริมาณแป้งกล้วยมากกว่านี้พบว่าผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะร่วนซุยสีคล้ำ และนอกจากนี้ยังมีการทดลองเสริมแป้งกล้วยในผลิตภัณฑ์ขนมไทยบางชนิด เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและลดปริมาณการใช้แป้งอื่นๆ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมไทยจากแป้งกล้วย พบว่าสามารถนำแป้งกล้วยเสริมในผลิตภัณฑ์เสริมในผลิตภัณฑ์ขนมลูกชุบและเม็ดขนุนได้ 10 เปอร์เซ็นต์ ทำผลิตภัณฑ์ที่ออฟี่แป้งกล้วยและเสริม ในขนมหม้อแคงกล้วยทองได้

### 2.4 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) [6]

แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาทดแทนได้ง่าย มีอยู่มากในธรรมชาติและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ทั้งนี้ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มเนื้อ (filler) ใน polyolefins ต่อมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้งให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีดกลายเป็นแผ่นฟิล์มที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับ Low density polyethylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตา์ช (Thermoplastic starch) หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้ โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่น หรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆได้ พลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตา์ช (Thermoplastic starch, TPS)

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

ในการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปในการเตรียม Thermoplastic starch นั้น พลาสติกไซเซอร์จะไปช่วยให้ Glass transition temperature ( $T_g$ ) ลดต่ำลง ช่วยไม่ให้แป้งเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนและแรงเฉือน นอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์ยังช่วยปรับคุณสมบัติของ Thermoplastic starch ที่เตรียมได้อีกด้วย คือ ช่วยลดการเกิด Re-crystallization ลง และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้สามารถใช้งานได้จริงอีกด้วย โดยพลาสติกไซเซอร์จะเข้าไปเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้งโดยจะไปเกิดกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโมเลกุลของแป้ง ซึ่งจะช่วยให้แป้งสามารถทำเป็นพลาสติกได้ ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้กันมากคือ พวก Polyol plasticizer เช่น กลีเซอรอล เป็นต้น ปัญหาที่พบโดยทั่วไปของ Thermoplastic ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ คือ มันมีโอกาสในการเกิด Re-crystallization หลังจากการเก็บรักษาไว้ หรือขณะใช้งาน เป็นผลทำให้ Thermoplastic starch แข็งและเปราะ ดังนั้น จึงมีความสำคัญ

อย่างยิ่งในการพัฒนาให้ได้พลาสติกไซเซออร์ที่มีความสมบูรณ์แบบมากที่สุด เพื่อให้ Thermoplastic starch มีความยืดหยุ่นที่ดี (Flexibility) และลดการเกิด Re-crystallization หรือ Retrogradation ขณะเก็บรักษาได้

## 2.5 พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) [14]

พลาสติกไซเซออร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

### 2.5.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซออร์ (Plasticization and Plasticizer)

พลาสติกไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติกไซเซออร์ โดยพลาสติกไซเซออร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติกไซเซออร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติกไซเซออร์และพอลิเมอร์เรียกว่า “พลาสติกไซเซชันภายนอก” (External plasticization) และเรียกพลาสติกไซเซออร์ที่ผสมลงไปว่า “พลาสติกไซเซออร์ภายนอก” (Internal plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซออร์ ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย

ข้อดีของพลาสติกไซเซชันภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ที่ใส่ลงไป แต่มีจุดด้อย คือ พลาสติกไซเซออร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้วพลาสติกไซเซออร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณหรือใกล้เคียง  $-50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ พลาสติกไซเซออร์แท้จริงหรือพลาสติกไซเซออร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer) และ พลาสติกไซเซออร์เสริมหรือพลาสติกไซเซออร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) โดย พลาสติกไซเซออร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้และไม่เอี่ยมออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติกไซเซออร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกไซเซออร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติกไซเซออร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติกไซเซออร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์ด้วย

## 2.6 เส้นใย (fiber) [15]

เส้นใย หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบของเซลล์ส่วนใหญ่ เป็น เซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส ซึ่งโมเลกุลของ เซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัวกันเป็นเส้น ใยขึ้น โดยปกติจะถูกจำแนกโดยความอ่อนตัว ความละเอียด และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความ หนาต่างๆ เส้นใยสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. เส้นใยที่มาจากธรรมชาติ (Natural fibers)
2. เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือเส้นใยสังเคราะห์ (Man-made Fibers)
3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ (Modified natural fibers)

1. เส้นใยธรรมชาติ หมายถึง เส้นใยที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เช่น เส้นใยพืช เส้นใยสัตว์ หรือเส้น ใยจากแร่ธาตุต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทใหญ่ ตามแหล่งกำเนิด เส้นใยที่ได้มาจากพืช เส้น ใยที่ได้จากสัตว์เส้นใยที่ได้มาจากแร่ธาตุ

1.1 เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วน ต่างๆ ของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ใยสับปะรด ใยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น ป่านศรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็นโพลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา

1.2 เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ผม เล็บ เขา ใยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติคือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียว ความแข็งแรงจะลดลง ถ้าถูกแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

1.3 เส้นใยจากแร่ธาตุ ได้แก่ ใยหิน ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

2. เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ทดแทน เส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 3 ประเภท

2.1 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโอรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่นไม่เป็นอันตราย ต่อผิวหนัง สำหรับดาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีก ชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

2.2 เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมใน มอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก มีความแข็งแรงมากว่า พอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก

(เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซดาแลม ( $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้เร็กเก็ต เป็นต้น

2.3 เส้นใยอะคริลิก ใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่านพรหม เป็นต้น

2.4 เซลลูโลสแอซีเตด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตด เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์เนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอสเรยอง แบบเบอร์กเรยอง เป็นต้น

#### สมบัติของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ เส้นใยโดยทั่วไปควรมีสมบัติดังนี้คือ

1. มีความแข็งแรง และทนทาน (strength and durability)
2. สามารถปั่นได้ (Spunable)
3. มีความสามารถในการดูดซับดี (Absorbency)

โดยทั่วไปผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่แข็งแรงจะมีความแข็งแรงทนทานตามไปด้วย หรือผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้นการทราบสมบัติของเส้นใย จะทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้นๆ ได้และทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภทได้ถูกต้องตามความต้องการที่จะนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เส้นใยฝ้าย [15]

เส้นใยฝ้าย คือ เส้นใยที่มีลักษณะนุ่มที่เกิดขึ้นรอบๆเมล็ดจากต้นฝ้ายซึ่งเป็นไม้พื้นเมืองชนิดต้นเดี่ยวที่มีอยู่ทั่วโลก ทั้งในประเทศอเมริกา อินเดีย และแอฟริกาเป็นส่วนใหญ่ แต่เส้นใยฝ้ายในตลาดส่วนใหญ่ทั่วโลกเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่มีชื่อว่า กอสลีเปียม ฮิสซูตัม (*Gossipium hirsutum*) และกอสลีเปียม บาบาคอนส์ (*Gossipium barbadense*) จากประเทศอเมริกา เส้นใยฝ้ายถูกทอเป็นหลอด และใช้เป็นด้ายที่นุ่ม และมีการระบายอากาศที่ดีนิยมใช้แปรรูปเป็นเครื่องนุ่งห่มอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันเส้นใยฝ้ายสามารถผลิตได้โดยการแยกเมล็ด จี๊ฟี่และโปรตีนออก เป็นรูปของเซลลูโลสบริสุทธิ์ (Cellulose) หรือเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ผลิตภัณฑ์จากเส้นใยฝ้ายมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง มีความแข็งแรงสูง คงทน และดูดซับได้ดี เพราะมีการเสียน้ำหนักน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างกระบวนการแปรรูปจากวัตถุดิบฝ้าย (Raw cotton balls) เป็นเส้นใยฝ้ายโดยเส้นใยหนึ่งเส้นเกิดจากเซลลูโลส 20-30 ชั้นเรียงตัวเป็นขดซึ่งยังช่วยให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้นอีกด้วย เมื่อเมล็ดฝ้าย (Cotton balls) แตกออก เส้นใยแห้งจะถูกทำให้อยู่ในรูปแบบแผ่นแบน เกลียว หรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon-like shapes) และจะขดเข้าด้วยกัน จากนั้นจะผูกติดกันไว้เพื่อความสะดวกในกระบวนการปั่น (Spinning) เป็นเส้นด้าย (Yarn) ต่อไป เส้นใยฝ้ายนั้นมีความละเอียดมาก มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 10-56 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเส้นใย เส้นใยฝ้ายจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11-12 ไมครอน เป็นเส้นใยที่มีความละเอียดมากๆ มีขนาดค่อนข้างละเอียดเสมอตลอดเส้นใย ซึ่งเส้นใยฝ้ายจะมีสีออกขาวจนถึงเทาอ่อน

### 2.7.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย

1. บริเวณที่เป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous regions) เป็นบริเวณที่สามารถรับน้ำและความชื้น ดังนั้นจะเป็นบริเวณที่สีซึมเข้าไปได้แต่จะเป็นส่วนที่ไม่แข็งแรง
2. บริเวณที่เป็นส่วนที่เป็นระเบียบ (Crystalline regions) เป็นบริเวณที่ไม่สามารถรับน้ำและความชื้น เป็นส่วนที่แข็งแรงของเส้นใยเนื่องจากโซ่โมเลกุลเรียงตัวกันเป็นระเบียบ
3. การจัดเรียงตัวของส่วนที่เป็นระเบียบตามแนวแกนเส้นใย (Orientation) เป็นบริเวณที่มีส่วนที่เป็นระเบียบ เรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย ทำให้เพิ่มความแข็งแรงในด้านการทนแรงดึงตามแนวแกนเส้นใยได้

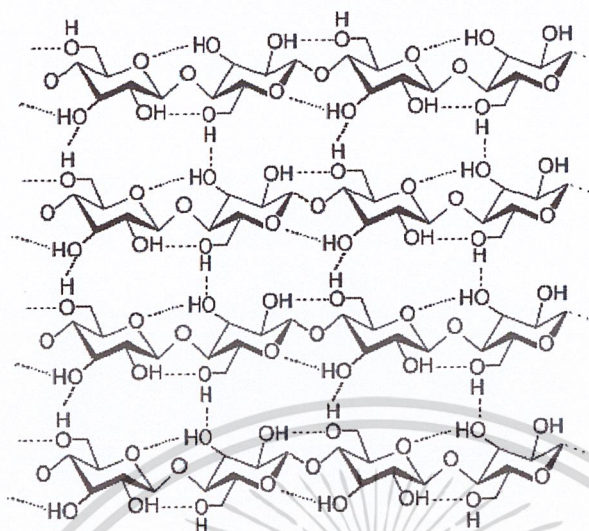
## 2.7.2 องค์ประกอบทางเคมี [15]

เซลลูโลส ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ที่เกิดจากกลูโคส จำนวนประมาณ 50,000 โมเลกุล เชื่อมต่อกันเป็นโซ่ยาว และมีลักษณะคล้ายตาข่าย มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่ เซลลูโลสจึงมีโครงสร้างเป็นเส้นใย มีในไม้และลำต้นพืช ร้อยละ 50 มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ย่อยสลายยาก กระทบอาหาร คนเราไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ ยกเว้นในสัตว์ประเภทกินพืช เช่น วัว ควาย ม้า ซึ่งมีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้

เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของเซลล์ (Structural carbohydrate) ประกอบด้วยหน่วยย่อย คือ โมเลกุลของกลูโคส (Glucose subunits) 1,000-10,000 โมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) 200,000 - 2,000,000 หน่วยย่อยพื้นฐาน (Basic subunit) คือ เซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -(1-4) ไกลโคซิดิก โดยที่ไม่มีการแตกแขนง

เซลลูโลสใน Primary cell wall ประกอบด้วยกลูโคสยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล และอย่างน้อย 14,000 โมเลกุลใน Secondary cell wall โดยโมเลกุลของเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า Microfibril ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช ปริมาณของเซลลูโลสอาจพบน้อยมากในส่วนที่สะสมอาหาร เช่น ในอินทผลัมมีเพียง 0.8% ขณะที่ในส่วนของเส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) มีมากถึง 98% การสังเคราะห์เซลลูโลสยังไม่เป็นที่เข้าใจทั้งหมดแต่น่าจะเป็นการรวมตัวของ หน่วยย่อยพื้นฐานคือเซลโลไบโอสเข้าไปในลูกโซ่ของโมเลกุลมากกว่าที่จะเป็น การเติมโมเลกุลเดี่ยวๆ ของกลูโคส UDP-glucose และน้ำตาล Lipid-pyrophosphate มีความจำเป็นในขั้นตอนการสังเคราะห์ ส่วนในผลิตภัณฑ์หลังการเก็บเกี่ยวการสังเคราะห์เซลลูโลสค่อนข้างจำกัดเว้นแต่จะมีการเจริญเติบโตซึ่งนับว่าน้อยมาก

โมเลกุลของเซลลูโลสมีความเสถียรมาก แต่สามารถถูกทำลายได้ด้วยกรดแก่หรือโดยการย่อยของเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) แต่เอนไซม์เซลลูเลสนี้พบปริมาณน้อยมากในผลิตภัณฑ์หลังการเก็บเกี่ยวและพบว่าไม่มีความสำคัญในการอ่อนนิ่มของผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของเซลลูโลสในผลไม้ที่กำลังสุกมีน้อยมากและระดับ ของปฏิกิริยาของเอนไซม์ก็ไม่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงการอ่อนนิ่มของผลไม้ในระหว่างการสุก เป็นที่ทราบกันว่าเซลลูเลสจะมีการทำงานในขณะที่มีการหลั่งตัวของใบ ไม้หรืออวัยวะส่วนอื่นจากต้นพ่อแม่ แต่อย่างไรก็ตามปรากฏว่าเป็น Isoenzyme ซึ่งแตกต่างจากเอนไซม์เซลลูเลสทั่วไปที่พบในเซลล์ส่วนใหญ่



รูปที่ 2.14 สายโมเลกุลเซลลูโลส (conformation) ของเส้นใยฝ้าย, เส้นประแสดงพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุล [15]

### 2.7.3 สมบัติทางกายภาพ

#### ความเหนียว (Tenacity)

ความแข็งแรงของฝ้ายเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวที่ดีของพอลิเมอร์ที่ยาว (มีค่าความเป็นผลึกประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์) มีการสร้างตัวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์ที่ติดกัน

เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยที่แข็งแรงกว่าเดิมเมื่อเปียกน้ำ เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่อย่างชั่วคราวใน ส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวที่ดี เมื่อเปียกน้ำมีผลต่อการเพิ่มของพันธะไฮโดรเจน ทำให้ค่าความเหนียว (Tenacity) เพิ่มขึ้นประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

#### 2.7.4 ธรรมชาติของการยืดหยุ่นและความเป็นพลาสติก

เส้นใยฝ้ายไม่มีความยืดหยุ่นตัว เพราะว่าเป็นเส้นใยที่มีส่วนที่เป็นผลึกสูง เนื่องจากการที่มีส่วนที่เป็นระเบียบมาก ทำให้ไม่สามารถจะพับเพราะจะทำให้พอลิเมอร์ขาดออกจากกัน ทำให้ฝ้ายฉีกขาดง่าย เป็นจุดอ่อนของพอลิเมอร์นี้

#### 2.7.5 ธรรมชาติของการดูดซึมน้ำ

ฝ้ายเป็นเส้นใยที่ดูดซึมน้ำได้ดี เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มากมายในพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามน้ำจะสามารถซึมได้ที่บริเวณที่ไม่เป็นระเบียบเท่านั้น เพราะช่องว่างภายในของส่วนที่เป็นผลึกมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าของน้ำ การพองตัวในน้ำก็จะเกิดบริเวณที่ไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.13 สมบัติของเส้นใยฝ้าย [15]

Property	Evaluation
รูปร่าง	ความกว้างสม่ำเสมอประมาณ 12-20 ไมครอน มีความยาวตั้งแต่ ½ - 2 ½ นิ้ว
ความเป็นเงา	ต่ำ
ความเหนียว (ความแข็งแรง)	
- แห้ง	
- เปียก	3.0-5.0 g/d
ความยืดหยุ่น	3.3-6.0 g/d
ความหนาแน่น	ต่ำ
การดูดซับความชื้น	1.54-1.56 g/cm <sup>3</sup>
- raw:conditioned	
Saturation mercerized:	
- Conditioned	8.5 %
- Saturation	15-20 %
Dimensional stability	8.5-10.3 %
ความทนทานต่อ	ดี
- กรด	
- ด่าง	เส้นใยจะถูกทำลาย ทำให้อ่อนลง
- ตัวทำละลายอินทรีย์	ทนทาน ไม่มีอันตราย
- แสงแดด	ทนทาน ได้ดีเป็นส่วนใหญ่
- จุลินทรีย์	เส้นใยจะอ่อนลงเมื่อดูดน้ำเป็นเวลานาน
	เส้นใยจะถูกทำลายโดยแบคทีเรีย ทำให้เน่าเปื่อยและขึ้นรา
- แผลง	แผลงสามง่ามทำลายเส้นใย
ปฏิกิริยาทางความร้อน	
- ความร้อน	
- เปลวไฟ	สลายตัวหลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลานานหรือถูกเผาไปเลย

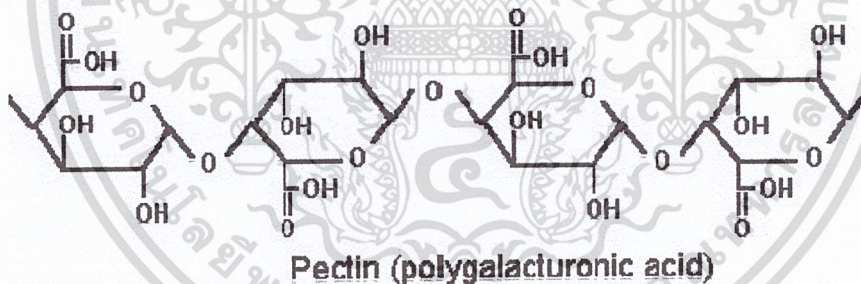
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.6 อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperatures)

- อุณหภูมิใช้งานทั่วไป ต้องไม่ต่ำกว่า 77 °F (25 °C)
- อุณหภูมิที่เหมาะสม 68 °F (20 °C)
- อุณหภูมิวาบไฟ 248 °F (120 °C)
- อุณหภูมิลุกไหม้ 401 °F (205 °C)
- อุณหภูมิเผาไหม้ 410 °F (210 °C)
- อุณหภูมิจุดติด 765 °F (407 °C)

โดยเซลล์โลสที่แห้งจะแข็งกระด้างและเปราะไม่ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) และจะติดไฟได้ง่ายในช่วงอุณหภูมิ 25 °C ถึง 65 °C เป็นช่วงเวลาที่เหมาะแก่การขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งาน และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C จะช่วยหยุดการเน่าเสียของเส้นใยฝ้ายได้ จึงเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาเซลล์โลสที่ใช้กันทั่วไป

### 2.8 เพกติน(Pectin) [16]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของเพกติน [16]

เพกติน (Pectin) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) หรือพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องสำอางค์มาช้านาน โดยใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารก่อเจล ในผลิตภัณฑ์แยม เจลลี่ และสารเพิ่มความคงตัวของระบบคอลลอยด์ในเครื่องสำอางค์ น้ำผลไม้และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำเพกตินมาใช้ในทางเภสัชกรรมและอุตสาหกรรมยาเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเพกตินมีสมบัติเฉพาะที่ทำให้สามารถนำมาใช้เก็บกักหรือนำส่งยา โปรตีน และเปปไทด์ เป็นต้น และจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟเบอร์หรือเส้นใยอาหารที่ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในระบบการย่อยของร่างกายมนุษย์ ซึ่งได้รับความสนใจจากนักโภชนาการมากขึ้น เพราะจากการวิจัยให้ผลออกมาว่าอาหารที่มีไฟเบอร์สูงจะช่วยป้องกันการเกิดโรคต่างๆ หรือในทางกลับกันคนที่กินอาหารที่มีไฟเบอร์น้อยก็มีความเสี่ยงที่จะเกิดโรคต่างๆ ได้ง่ายขึ้น

เพกตินเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงเกือบทุกชนิด จัดเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับแป้งและเซลลูโลส ค้นพบในศตวรรษที่ 18 ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดเจล โดยในปี ค.ศ.1825 Henri Braconnot (เภสัชกรและนักพฤกษเคมีชาวฝรั่งเศส) ได้ตั้งชื่อและริเริ่มศึกษากรรมวิธีการสกัดเพกติน เพกตินมาจากภาษากรีกว่า “pektikos” ซึ่งแปลว่าทำให้ข้นแข็ง (To congeal) หรือทำให้กลายเป็นของแข็ง (to solidify) Kertesz ได้ให้คำจำกัดความของเพกตินว่าเป็นกรดเพกติก (Pectinic acid) ชนิดละลายน้ำได้ซึ่งมีปริมาณหมู่เมทิลเอสเทอร์หลากหลาย สามารถเกิดเป็นเจลในสภาวะที่มีน้ำตาลและความเป็นกรดที่เหมาะสมหรือสภาวะที่มีเกลือแคลเซียมรวมอยู่ด้วย สารประกอบเพกตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์และเป็นสารที่สำคัญในบริเวณชั้นผนังเชื่อมยึดระหว่างเซลล์หรือมิดเดิลลามেলা (middle lamella) ที่ยึดเหนี่ยวเซลล์เข้าด้วยกัน โดยจับกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และไกลโคโปรตีนของผนังเซลล์พืชเพกตินช่วยเสริมผนังเซลล์ให้หนา แข็งแรง และยึดหยุ่นได้เล็กน้อย โดยเฉพาะบริเวณที่มีเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม เช่น ต้นอ่อน ใบ และผลไม้

#### การผลิต

แอปเปิ้ล , ฝรั่ง , ผลไม้ขนาดเล็ก , พลัม , gooseberries , ส้ม และอื่นๆ ส้ม ผลไม้มีจำนวนมาก เพกตินในขณะที่ผลไม้อ่อนเช่น เชอร์รี่ , องุ่นและ สตรอเบอร์รี่ มีจำนวนน้อยเพกติน ระดับทั่วไปของเพกตินในพืช (น้ำหนักสด) :

- แอปเปิ้ล , 1-1.5%
- apricot , 1%
- เชอร์รี่ , 0.4%
- ส้ม 0.5-3.5%
- แครอท ประมาณ 1.4%
- ส้ม เปลือก 30%

#### สมบัติทางเคมี

สารกลุ่มเพกตินเป็นโพลีแซคคาไรด์เชิงซ้อนในพืช พบในพืชชั้นสูงโดยปรากฏในชั้นระหว่างเซลล์หรือจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังเซลล์ ทำให้เกิดช่องสำหรับอาหารและน้ำผ่านกุดในผนังเซลล์ สารกลุ่มเพกตินเป็นสารเคลือบเส้นใยเซลลูโลสที่สำคัญและอาจจะเชื่อมต่อกับพันธะโควาเลนต์กับพอลิ

เมอร์อื่นๆ สารกลุ่มเพกตินจัดจำแนกได้เป็น โพรโตเพกติน เพกติน (เพกตินมีหมู่ methoxyl สูง – เพกตินจัดตัวเร็วและเพกตินจัดตัวช้า- และเพกตินมีหมู่ Methoxyl ต่ำ) และกรดเพกติก เพกตินมีอิทธิพลต่อการเจริญ พัฒนาการและการแก่ชรา และมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อพืชและผลไม้ มีการใช้เพกตินอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารด้วยคุณสมบัติในการก่อรูปเป็นเจล โดยใช้เป็นสารก่อเจลและความคงตัวในแยม เยลลี่ และผลิตภัณฑ์นมเปรี้ยว ผิวของผลพืชตระกูลส้ม กากผลแอปเปิล และลำต้นของซูการ์บีต เป็นแหล่งที่ดีของเพกติน

เพกตินเป็นเฮเทอโรโพลิแซ็กคาไรด์ที่ซับซ้อน ประกอบด้วย Homogalacturonan, Rhamnogalacturonan I, และ Rhamnogalacturonan II เป็นโครงสร้างหลัก Homogalacturonan ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-Galacturonic acid หมู่คาร์บอกซิล หมู่เอสเทอร์ที่เติมเมทิลและหมู่ไฮดรอกซิล บางกลุ่มถูกเติมหมู่อะซีติลเชื่อมติดกับออกซิเจนตัวที่ 2 หรือ 3 ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของเพกติน Rhamnogalacturonan I ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-Galacturonic acid และ  $\alpha$ -L-Rhamnose ซึ่งจะรวมตัวซึ่งกันและกันในส่วนที่เป็นสายหลัก และบางส่วนของ Rhamnose มีการแตกกิ่งเป็นสายย่อยด้านข้าง ซึ่งมี Arabinose, Galactan, และ Arabinogalactan ที่ออกซิเจนตำแหน่งที่ 4 ของ Rhamnose Rhamnogalacturonan II มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-galacturonic acid ในส่วนสายหลัก และมีน้ำตาลแปลกๆ เช่น D-Apiose, 2-Keto-3-deoxy-D-manno-2-octulosonic acid (Rdo) , 3-Deoxy-D-lyxo-2-heptulosaric acid (Dha) และอื่นๆซึ่งอยู่ในสายย่อยเชื่อมติดกับออกซิเจนตัวที่ 2 หรือ 3 ของ Galacturonic acid ที่สายหลัก

ตารางที่ 2.14 ปริมาณของเพกตินที่มีอยู่ในพืชผักผลไม้ [16]

ชนิดพืช	ปริมาณเพกติน	ชนิดพืช	ปริมาณเพกติน	ชนิดพืช	ปริมาณเพกติน	ชนิดพืช	ปริมาณเพกติน
ถั่วลิสง	5.98%	แครอท	2.00%	แอปเปิล	0.78%	องุ่น	0.19%
ส้มเขียว	3.90%	ฟักทอง	1.24%	สตอเบอรี่	0.75%	แตงโม	0.18%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถั่ว เหลือง	3.45%	กระเทียม	1.11%	ถั่วเขียว	0.70%	แตงกวา	0.16%
มะนาว	2.90%	กล้วย	0.94%	หัวหอม	0.35%	สับปะรด	0.09%
ส้ม	2.36%	มัน	0.83%	มะเขือ เทศ	0.20%	พริก เขียว	0.09%

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พัชรินทร์ โตรสุวรรณ และคณะ [1] ศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ในปริมาณต่างๆ และปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งกล้วยโดยใช้เส้นใยฝ้าย ฟิล์มจากแป้งกล้วยนี้ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่กลีเซอรอล 20 % และเส้นใยฝ้าย 15 % มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และทดสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูความเข้ากันได้ของแป้งกล้วยกับเส้นใยฝ้าย พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่กลีเซอรอล 20 % และเส้นใยฝ้าย 10 % มีความเข้ากันได้มากที่สุด ทดสอบการดูดซับน้ำ พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่กลีเซอรอล 10 % และเส้นใยฝ้าย 0 % มีการดูดซับน้ำมากที่สุดและฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่กลีเซอรอล 40 % และเส้นใยฝ้าย 10 % มีการดูดซับน้ำน้อยที่สุด ทดสอบสมบัติการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรด (FT-IR) พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณกลีเซอรอลและเส้นใยฝ้าย ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเลขคลื่น และความเข้มของพีคเกิดขึ้น สมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึกของแป้งกล้วยและฟิล์มจากแป้งกล้วย พบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ A-type และ C - type ตามลำดับ และทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยใช้เวลาในการย่อยสลายตัวเร็วที่สุดและช้าที่สุดคือฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่กลีเซอรอล 40 % และเส้นใยฝ้าย 10 %

เกศศิณี ตระกูลทิวากร และคณะ [17] ทดลองผลิตภัณฑ์ฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง ในการทดลองใช้วัตถุดิบ คือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลังผสมกลีเซอรอลหรือกลีเซอรอล โมโนสเตียเนต (Glycerol monostearate) ร้อยละ 0.2 5 และ 10 ทำการผลิตวัสดุทำฟิล์มโดยใช้เครื่องทำแท่งแบบลูกกลิ้งเดี่ยวหรือเครื่องเอ็กทрудเดอร์แบบสกรูคู่ เครื่องเอ็กทрудเดอร์แบบสกรูคู่สามารถผลิตวัสดุทำฟิล์มได้ดี ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการละลายน้ำสูง ปริมาณ

กลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นทำให้ผิวแผ่นฟิล์มเรียบขึ้น แต่ทำให้คุณภาพด้านการทนต่อการแตกเมื่อพับลดลง การผสมกลีเซอรอลโมโนสเตียเรตในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 ไม่ทำให้แผ่นฟิล์มมีลักษณะดีขึ้น ลักษณะของเป็งมันลำปะหลังผสมกลีเซอรอล คือ ไส ยืดหยุ่นดี ส่วนฟิล์มที่ทำจากเป็งมันลำปะหลัง ผสม กลีเซอรอล มีสีขาวขุ่น ยืดหยุ่นพอใช้ เพราะบางกว่าฟิล์มที่ทำจากเป็งมันลำปะหลัง

สุวีรยา สังก้าว และคณะ [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิต ย่อยสลายทางชีวภาพระหว่าง เป็งมันลำปะและเส้นใยป่านสรนารายณ์ งานวิจัยนี้เตรียมคอมโพสิตย่อย สลายทางชีวภาพของเป็งมันลำปะ ซึ่งใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์และเสริมแรงด้วยเส้นใยป่าน สรนารายณ์ชนิดสั้นด้วยการอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวหลังจากนั้นศึกษาผลของปริมาณเส้นใยป่านสรนารายณ์ ต่อสมบัติเชิงกล การดูดซับน้ำ และการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ผลการศึกษาพบว่า การเติมเส้นใยป่าน สรนารายณ์ชนิดสั้นในพลาสติกเป็ง ทำให้คอมโพสิตแสดงสมบัติเชิงกลดีขึ้น และดูดซับน้ำลดลง และ พบว่าสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการดูดซับน้ำของคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของเส้น ใยป่านสรนารายณ์ ผลการศึกษากการย่อยสลายของคอมโพสิตด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส พบว่าค่า ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของคอมโพสิตมากกว่ากรณีพลาสติกเป็งและเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้น ใยป่านสรนารายณ์

F. H. Otey และคณะ [19] ได้เตรียมฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากสตาร์ชข้าวโพดและ Ethylene- acrylic acid (EAA) พบว่าการเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปในโครงสร้างฟิล์มทำให้ฟิล์มมีความต้านทานน้ำ (Water resistance) และความยืดหยุ่น (Flexibility) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น เหตุผลที่ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่น มากขึ้น อาจเกิดจากโมเลกุลสตาร์ชเกิดการขยายตัวทำให้ความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อนำสารละลายสตาร์ ชมาทำให้แห้งการเติม EAA เข้าไปทำให้โมเลกุลมีการเชื่อมกันอยู่ห่างๆ และทำให้โมเลกุลแผ่กว้างมาก ขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จากการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้นฟิล์มมีความ ยืดหยุ่น ความสามารถในการยึดตัวและความคงทนต่อการพับลดลง และพบว่าการใช้สตาร์ชเพียงอย่าง เดียวในการเตรียมฟิล์มทำให้ฟิล์มแตก

M. L. Fishman และคณะ [20] ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่กินได้และย่อยสลายได้จากเป็งผสม เพกตินโดยขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีด โดยมีกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ในการทดลองผสมเพกติน และเม็ดเป็งที่มี อะไมโลสสูงและกลีเซอรอล ในปริมาณต่างๆ ทำขึ้นรูปโดยการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีด แบบเกลียวคู่ นำฟิล์มที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกลทางความร้อน ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) และศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าภาพจาก SEM บอถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำในระหว่างการอัดรีดซึ่งใช้ในการ

ควบคุมการเกิดเจลที่ไนซ์ของแป้งได้ และข้อมูลจากเทคนิค DMTA พบว่าปริมาณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอัดรีด ส่งผลถึงการเกิดเจลที่ไนซ์ของแป้งซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งผสมเพคติน โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) มีค่า  $-50$  องศาเซลเซียส ส่วนที่อุณหภูมิห้องฟิล์มสามารถดึงยืดได้ สรุปได้ว่าฟิล์มที่ได้จากกระบวนการอัดรีดมีสมบัติเช่นเดียวกันกับฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเทหล่อ

ดวงดาว อาองค์และกาญจนา เจริญคุณธรรม [21] ศึกษาผลของแป้งและสารช่วยผสม ในด้านสมบัติทางความร้อนและการดูดความชื้นของฟิล์มไบโอคอมโพสิตพอลิเมอร์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ผสมกับแป้งกล้วย โดยสารช่วยผสมที่ใช้ในงานนี้คือ พอลิเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (EVA) แป้งกล้วยถูกสกัดจากกล้วยสีเขียวโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  $0.05$  N ปริมาณแป้งกล้วยที่ใช้ในปริมาณที่แตกต่างกันที่  $5-20\%$  ของน้ำหนักของ LDPE, EVA คือ  $0, 5, 10,$  และ  $20$  wt% ขนาดเฉลี่ยของเม็ดแป้งที่สกัด เป็น  $21-24$  ไมครอน ในขณะที่แป้งมีความหนาแน่น  $1.74$  g/cm<sup>3</sup> ผลของการเติมแป้งกล้วยพบว่าไม่มีผลในอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (EVA) แต่ส่งผลต่อองศาความเป็นผลึกของฟิล์มไบโอคอมโพสิตพอลิเมอร์ สำหรับเสถียรภาพทางความร้อน พบว่า LDPE แป้งกล้วยผสมกับ  $20\%$  EVA มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงสุด และพบว่าการดูดซึมความชื้นของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณแป้งกล้วยเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่มีแป้งกล้วย  $20\%$  การดูดความชื้นเพิ่มขึ้น  $4.5\%$  แต่การดูดซึมความชื้นลดลงเมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น

K. Waliszewska และคณะ [22] ศึกษาการดัดแปลงแป้งกล้วยทางเคมีและทางกายภาพดัดแปลงแป้งกล้วย โดยวิธีการเจลที่ไนซ์ การเชื่อม โยงด้วยฟอสฟอริเลทและไฮดรอกซีพรีอพิเลท เพื่อให้แป้งกล้วยมีสมบัติที่ดีขึ้น แป้งกล้วยเตรียมได้  $33.8$  % จากน้ำหนักกล้วยแห้งที่บริสุทธิ์  $99$  % และอนุภาคเม็ดแป้งมีความกว้าง  $14-88$  ไมครอน ความยาว  $21-108$  ไมครอน แป้งกล้วยมีปริมาณอะไมโลส เท่ากับ  $40.7$  % และแป้งกล้วยสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้ ที่ความยาวคลื่นสูงสุด  $563$  นาโนเมตร พบว่า แป้งกล้วยที่เชื่อมโยงแบบไฮดรอกซีพรีอพิเลท มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ถึง  $50$  % ซึ่งมากกว่าแป้งในธรรมชาติ พบว่าแป้งกล้วยมีลักษณะการบวมตัวอย่างมีขอบเขตและมีความสามารถในการละลายน้ำที่น้อย เมื่อทดสอบอนุภาคเม็ดแป้งด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าโครงสร้างผลึกของแป้งเป็นแบบ C type และแป้งกล้วยที่ถูกดัดแปลงด้วยฟอสฟอริเลทและไฮดรอกซีพรีอพิเลท พบว่ามีการลดลงของอุณหภูมิในการเกิดเจล

A. Dimantov และคณะ [23] ศึกษาลักษณะพื้นผิวและสมบัติในการละลายของสารเคลือบผิวที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูงและเพคตินเพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ตรวจสอบลักษณะแผ่นแก้วที่เคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) ทดสอบสมบัติในการละลายและทดสอบสมบัติการย่อยด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนไซม์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูง พื้นผิวแผ่นแก้วที่เคลือบผิวด้วยสารละลายผสมระหว่างแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงและเพกตินมีความขรุขระเพิ่มขึ้น สมบัติในการละลายของสารเคลือบผิวแป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูงและเพกติน มีค่าลดลงด้วยเมื่อทดสอบในห้อง (pH 1.6) และในลำไส้ของคน (pH= 7.0) ประสิทธิภาพของการต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่ามีค่ามากที่สุดเมื่อทดสอบในตับอ่อน และการเคลือบผิวด้วยแป้งข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูงและเพกติน จะสามารถใช้ในการรักษาลำไส้ได้โดยการเคลือบผิว

รววิทย์ โพนนิกร [24] ศึกษาถึงการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene , HDPE) จากขวดน้ำดื่มมาทำการผสมกับสารตัวเติมอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้แป้ง 10% 20% และ 30% โดยการหลอมและนำไปขึ้นรูปเพื่อศึกษานิดและปริมาณของแป้งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าชนิดและปริมาณของแป้งมีผลต่อการทดสอบความแข็งแรงดึง กล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมากขึ้นทำให้ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่า พอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และเมื่อทำการศึกษาลักษณะวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่า หลังการฝังกลบ พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และการเติมแป้งสาลีทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อม ตามลำดับ

R. Shi และ คณะ [25] ศึกษาถึงการยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำจากแป้งข้าวโพดที่มีน้ำอยู่ 12% โดยน้ำหนัก โดยการหลอมของผสมเข้ากับกลีเซอรอลในปริมาณแตกต่างกันที่ 30 40 50 และ 60% โดยน้ำหนักภายใต้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$  เก็บไว้ 3 เดือนแล้วทดสอบหรือทดสอบไปเรื่อยๆจนครบ 3 เดือน จากผลการทดสอบ XRD พบว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นช่วยทำให้โครงสร้างแบบเกลียวเดี่ยว (Single helix structure) เกิดได้มากขึ้นด้วย แต่จำกัดการเกิดโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (Double helix structure) และผลการทดสอบทางความร้อน DMTA พบว่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าเหนือสภาวะทรานซิชัน (Onset temperature of upper transition) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลไม่มากนัก และสมบัติเชิงกลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก ผลจากการวัด FTIR ยังสามารถแสดงถึงกราฟ Hydroxyl group stretching เคลื่อนที่ได้ช้าลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นและยังพบว่ามีแกว่งกวัดมากขึ้นเรื่อยๆ ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และพบว่ามีปริมาณน้ำมากขึ้นพร้อมๆ กับปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเติมกลีเซอรอลในปริมาณมากช่วยยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**R. Sothornvit และ N. Pitak [26]** ศึกษาการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่มีผลต่อฟิล์มแป้งกล้วย โดยใช้ น้ำ 100 มิลลิลิตร แป้งกล้วยปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 4.6 และ 8% โดยน้ำหนัก กลีเซอรอล 30 และ 50% โดยน้ำหนัก เพกติน 0 และ 1% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนเซชัน 75 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะแข็งและมีสีเหลืองจากแป้งกล้วยที่ส่วนผสมของเพกตินมีความแข็งแรงสูงและฟิล์มแป้งกล้วยที่มีส่วนผสมของกลีเซอรอล 50% ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยึดมีค่าสูงสุด และยังพบว่าเมื่อกลีเซอรอลและ เพกตินมีปริมาณมากขึ้นทำให้การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในแป้งกล้วยลดลง นอกจากนี้วัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารแห้งยังสามารถย่อยสลายได้โดยการฝังดิน

**พลกฤต พลตรีและศตายุ นาโค [27]** ศึกษาการพัฒนาแผ่นฟิล์มบรรจุสารสกัดชาเพื่อใช้ทางทันตกรรม โดยประเมินความเหมาะสมจากสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม คือ ความสามารถในการลอกออก การละลาย ความสม่ำเสมอของน้ำหนัก และความหนา โดยพอลิเมอร์ที่เป็นสารก่อฟิล์มที่นำมาพัฒนามี 4 ชนิด คือ High methoxy pectin และ Low methoxy pectin ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ และ Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) และ Methylcellulose (MC) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ การเตรียมแผ่นฟิล์มจากพอลิเมอร์ดังกล่าวโดยใช้ความร้อนในการอบแห้งที่ 50 °C จนกระทั่งแผ่นฟิล์มแห้งและทำการประเมินสมบัติทางกายภาพ พบว่าสูตรตำรับที่เหมาะสมในการใช้เตรียมแผ่นฟิล์ม คือ MC 0.5%, HPMC 1.0%, High methoxy pectin 2.0% + Glycerin 0.2% และ Low methoxy pectin 2.5% + Glycerin 0.2% โดย Glycerin ที่เติมมีสมบัติเป็น Plasticizer เมื่อนำแต่ละสูตรมาเติมสารสกัดชาเขียวที่มีความเข้มข้น 125 mg/L และประเมินสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม พบว่าสูตรที่ใช้ High methoxy pectin 2.0% + Glycerin 0.2% + Green tea extract แผ่นฟิล์มมีสมบัติทางกายภาพที่ดี คือ สามารถบรรจุสารสกัดชาได้ดีกว่าสูตรอื่นๆ และมีความแข็งแรงดึงยึดมากกว่าสูตรอื่นๆ

**C.M.O. Muller และคณะ [28]** ได้ศึกษาผลกระทบของเส้นใยเซลลูโลสที่มีผลต่อฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง เส้นใยมีความยาว 1.2 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ใช้ปริมาณเส้นใย 0.1, 0.3 และ 0.5 ต่อแป้ง 1 กรัม กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อยับยั้งการคืนรูปของแป้ง และใส่คาร์บอนเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของเส้นใย ผลการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนจุลทรรศน์แบบส่องกราด เส้นใยมีการกระจายตัวดีในแป้งมันสำปะหลังและผลกระทบของเส้นใยฝ้ายที่มีผลต่อสมบัติฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง คือ ช่วง 2-3 นาทีขึ้นไป ความชื้นสัมพัทธ์ 0-33, 33-64 และ 64-90 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การละลายน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 64-90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ความชื้นสัมพัทธ์ 33-64 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด ค่าน้ำซึมผ่านของแป้งมันสำปะหลังที่มีส่วนผสมเส้นใยที่ความชื้น

สัมพัทธ์ 64-90 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสูงสุด และปริมาณเส้นใย 50 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด แต่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำสุด และมีค่ามอดูลัสสูงสุด

สมฤทัย จิตภักดีปดินทร และอมราวดี จางวาง [29] ศึกษาถึงการนำสารสกัดเพกตินจากเปลือกมะนาวไปใช้ในการเตรียมฟิล์มเพื่อรักษาบาดแผลบนผิวหนังของหนู การทดลองได้เตรียมฟิล์มจากสูตรตำรับที่ประกอบด้วยสารสกัดเพกตินจากเปลือกมะนาว 10-20 %w/w และ Glycerin 10 %w/w เป็น Plasticizer จะได้แผ่นฟิล์มความหนาเฉลี่ย  $1.53 \pm 0.09$  มม. และน้ำหนักของแผ่นฟิล์มขนาด  $2 \times 2$  ตร.ซม. เฉลี่ยหนัก  $0.0465 \pm 0.0049$  กรัม ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มใส มีสีเหลืองอ่อนๆถึงไม่มีสี มีความยืดหยุ่นพอสมควร มีความคงตัวในสภาวะปกติ แต่ในสภาวะเร่ง ความยืดหยุ่นของฟิล์มลดลง โดยมีลักษณะเปราะเล็กน้อย เมื่อนำแผ่นฟิล์มไปทดสอบรักษาบาดแผลบนผิวหนังของหนู พบว่าแผลด้านที่ใช้สารสกัดเพกตินจากเปลือกมะนาว มีขนาดของแผลลดลงจากแผลที่เกิดขึ้นในครั้งแรกมากกว่า แผลด้านที่ควบคุมไม่ใช้สารสกัดเพกติน ร้อยละ  $3.3 \pm 1.2$  อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

กนกพร สังข์รักษ์ และเจนจิรา โตะแบ [30] ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดเพกตินจากเศษผักกาดขาวที่เหลือทิ้ง รวมทั้งการนำเพกตินที่สกัดได้ไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบของฟิล์มที่ย่อยสลายได้ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดเพกตินจากเศษผักกาดขาว โดยศึกษาผลของความชื้น อุณหภูมิ พีเอช ชนิดและความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการสกัด ปริมาณโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต และเวลาต่อปริมาณเพกตินที่สกัดได้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเพกตินและให้ปริมาณเพกตินสูงสุด คือ การใช้เศษผักกาดขาวสดสกัดกับกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ (พีเอช 3.0) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ร่วมกับโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต 8% (น้ำหนักต่อปริมาตร) เป็นเวลา 90 นาที จากสภาวะที่เหมาะสมนี้ได้ผลผลิตเพกติน  $3.46 \pm 0.002$  กรัม% เมื่อตรวจสอบสมบัติของเพกตินที่ได้ พบว่าอยู่ในช่วงมาตรฐานเพกตินตามที่ The Joint/WHO Expert Committee on Food Additive (JECFA) ได้กำหนด เมื่อนำเพกตินที่ได้ไปใช้เตรียมแผ่นฟิล์มโดยนำไปผสมกับแป้ง และกลีเซอรอล พบว่าฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการทนแรงดึง (9 นิวตัน) และสามารถต้านการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี เมื่อฟิล์มละลายอยู่ในน้ำฟิล์มสามารถละลายน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

- 3.1.1 กัลวยคิบที่มีระยะสุกเท่ากับศูนย์
- 3.1.2 เส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) ความยาว 1-2 มิลลิเมตร
- 3.1.3 เพคติน จากบริษัท รวมเคมี

สมบัติทางเคมีและกายภาพ	ผลลัพธ์
Degree of Esterification	71%
pH	3.5
ขนาดอนุภาค	60 เมช

3.1.4 น้ำมันพีชตราโอสติน

3.1.5 น้ำกลั่น

3.1.6 กัวร์กัมจากบริษัท SIGMA

สมบัติ	ค่าที่วัดได้
Total impurities	6-12 wt. %
Particle size	< 300 $\mu\text{m}$
pH	5-7 (1.0 wt. % in H <sub>2</sub> O)
Viscosity	32 poise, 1 wt. % in H <sub>2</sub> O (25 °C, Brookfield RV, spindle #3)(20 rpm) (lit.)
mp	> 300 °C (lit.)
Density	1.3 g/mL at 25 °C (lit.)

3.1.7 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 บีกเกอร์

3.2.2 ตู้อบ

3.2.3 แท่งแก้วคน

3.2.4 เครื่องให้ความร้อน

3.2.5 ถาด ( ขนาดกว้าง 18 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร )

3.2.6 เครื่องปั่นยี่ห้อพานาโซนิค ( Panasonic )

3.2.7 เครื่องชั่งละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง )

3.2.8 ตะแกรงร่อน ขนาด 100 เมช (0.15 มิลลิเมตร) และ 200 เมช (0.75 มิลลิเมตร)

3.2.9 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์

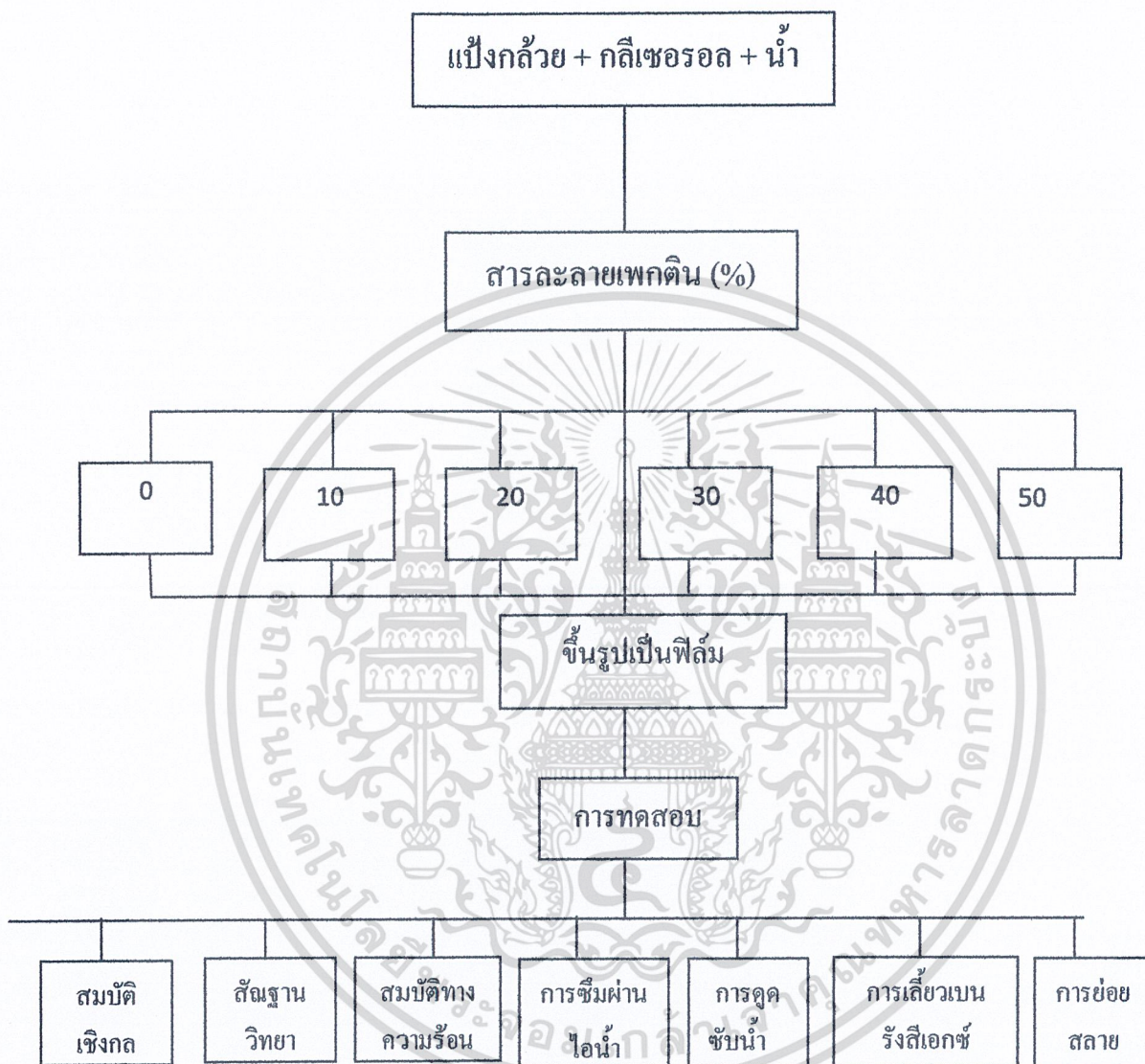
3.2.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing machine) :Lloyd Instrument รุ่น LR 5k

3.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy:SEM) LEO รุ่น 1455 VP

3.3.12 เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) : Hunterlab , Miniscan Xe plus

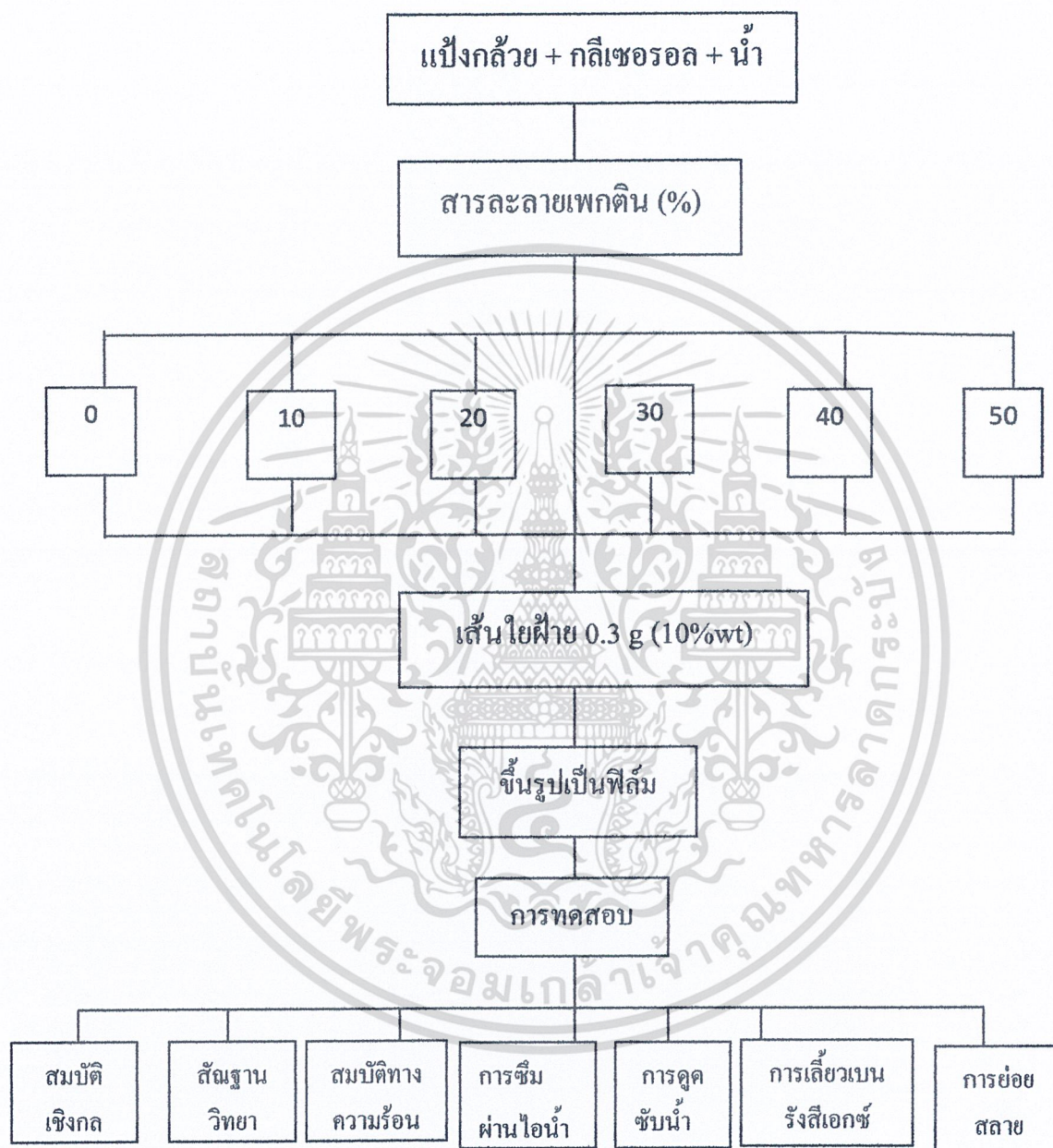
3.3.13 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) :XRD รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัยตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนงานวิจัยตอนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

แผนภาพขั้นตอนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งในการทดลองจะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

#### ตอนที่ 1 การเตรียมแป้งกล้วย

- 1.1 เลือกกล้วยดิบที่มีระยะสุกเท่ากับศูนย์ จากนั้นทำการปอกเปลือก แล้วนำไปแช่ในน้ำเกลือที่เตรียมจากอัตราส่วน 500 มิลลิลิตร / 3 กรัม เพื่อล้างยางออกจากกล้วย
- 1.2 ทำการซังน้ำหนักล้วยดิบ แล้วนำมาหั่นและสับให้ละเอียดใส่ภาชนะที่มีลักษณะแบนราบเพื่อการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ
- 1.3 นำมาเข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำออกจากตู้อบแล้วรอให้เย็น
- 1.4 จากนั้นนำไปปั่นโดยเครื่องปั่นที่ความเร็วรอบเบอร์หนึ่ง โดยหนึ่งรอบการปั่นใช้เวลา 7 วินาที จำนวน 7 รอบ
- 1.5 นำกล้วยที่ปั่นเรียบร้อยแล้ว มาซังน้ำหนัจะได้น้ำหนักของแป้งกล้วยที่เตรียมได้
- 1.6 จากนั้นนำแป้งกล้วยที่เตรียมไปร่อน ให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง โดยใช้เครื่องร่อน ซึ่งใช้ขนาดของตะแกรงเบอร์ 100 เมช (0.15 มิลลิเมตร) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดอนุภาค 200 เมช (0.75 มิลลิเมตร)
- 1.7 นำแป้งกล้วยมาเก็บบรรจุไว้ในภาชนะที่เป็นภาชนะที่เป็นถุงพลาสติกปิดปากถุงให้แน่น เพื่อป้องกันการ

ดูดซับความชื้นของแป้งกล้วย

#### ตอนที่ 2 การเตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วยและเพกติน

- 2.1 เตรียมสารละลายเพกติน โดย นำเพกติน 3 g ละลายในน้ำ 100 ml (3%w/v) โดยนำมาปั่นจนโดยใช้แท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 2.2 ซังแป้งกล้วย สารละลายเพกติน กลีเซอรอล และน้ำลงในบีกเกอร์ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1
- 2.3 นำส่วนผสมในข้อ 2.1 ที่เตรียมได้มาผสมลงในบีกเกอร์แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อน ซึ่งจะทำการคนสารละลายดังกล่าวตลอดระยะเวลาที่ให้ความร้อน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 80 – 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่แป้งกล้วยเกิดเจลาทีไนเซชัน
- 2.4 เตรียมถาดสำหรับเทสาร โดยการทาด้วยน้ำมันพืช ใช้น้ำแป้งที่เกิดเจลาทีไนเซชันออกจากเครื่องให้ความร้อนแล้วเทลงในกระบอกลงให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา นำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็นตัว แล้วทำการลอกฟิล์มออกจากถาด เก็บในถุงที่ปิดปากถุงสนิท

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของแป้งกล้วย เพกติน กลีเซอรอล และน้ำที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วย

แป้งกล้วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลายเพกติน	
			(กรัม)	(%)
3.00	0.67	60	0.00	0
2.70	0.54	54	0.30	10
2.40	0.48	48	0.60	20
2.10	0.42	42	0.90	30
1.80	0.36	36	1.20	40
1.50	0.30	30	1.50	50

\*หมายเหตุ ปริมาณน้ำ คิดเป็น 20 % ของแป้งกล้วย

### ตอนที่ 3 การเตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วย เพกตินและเส้นใยฝ้าย

3.1 ชั่งแป้งกล้วย สารละลายเพกติน กลีเซอรอล น้ำและกัวกัมลงในบีกเกอร์ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งกัวกัมช่วยให้เส้นใยไม่จับตัวกันเป็นก้อน

3.2 นำส่วนผสมในข้อ 3.1 ยกเว้นเส้นใยฝ้ายที่เตรียมได้มาผสมลงในบีกเกอร์แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อน ซึ่งจะทำการคนสารละลายดังกล่าวตลอดระยะเวลาที่ให้ความร้อน เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 40-50°C ค่อยๆ ใส่เส้นใยฝ้ายลงไป

3.3 คนสารละลายต่อไปจนเริ่มเกิดเจลลาทีโนเซชัน คือ อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส

3.4 เตรียมถาดสำหรับเทสาร โดยการทาด้วยน้ำมันพืชไว้หน้าเบี่ยงที่เกิดเจลลาทีโนเซชันออกจากเครื่องให้ความร้อนแล้วเทลงในกระบอกลงให้ได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

3.5 จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา นำออกจากตู้อบปล่อยให้เย็นตัว แล้วทำการลอกฟิล์มออกจากถาด เก็บในถุงที่ปิดปากถุงสนิท

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของแป้งกล้วย เพกติน เส้นใยฝ้าย กลีเซอรอล น้ำและกาวกัมที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วย

แป้งกล้วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลายเพกติน		เส้นใย ฝ้าย (กรัม)	กาวกัม (กรัม)
			(กรัม)	(%)		
3.00	0.67	60	0	0	0.30	0.030
2.70	0.54	54	0.3	10	0.27	0.027
2.40	0.48	48	0.6	20	0.24	0.024
2.10	0.42	42	0.9	30	0.21	0.021
1.80	0.36	36	1.2	40	0.18	0.018
1.50	0.30	30	1.5	50	0.15	0.015

### 3.4 การทดสอบ

#### 3.4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

วิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มจากแป้งกล้วยโดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของฟิล์มแป้งกล้วยที่มุมต่างๆเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบ นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยการเตรียมฟิล์มแป้งกล้วยที่มีความหนา 200 ไมโครเมตรและขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ ( $2\theta$ ) ในช่วง  $3-60^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^\circ /$  นาที

#### 3.4.2 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

ทำการอบฟิล์มแป้งกล้วยที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำฟิล์มแป้งกล้วยมาชั่งน้ำหนัก (ภายใต้สภาวะนี้การระเหยของพลาสติกไฮเซอรจะยังไม่เกิดขึ้น) จากนั้นนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และเก็บตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุด้วย แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM E 104 แล้วทำการชั่งน้ำหนักภายหลังการดูดซับน้ำทุกวัน โดยสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำได้จากสมการนี้

$$W_a = ((W_e - W_o) / W_o) * 100$$

เมื่อ  $W_a$  คือ เปอร์เซนต์การดูดซับน้ำ

$W_e$  คือ น้ำหนักหลังการดูดน้ำ

$W_o$  คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

### 3.4.3 ศึกษานิวทริยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope , SEM) ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มแป้งกล้วย ทำการเตรียมตัวอย่าง โดยนำมาเคลือบด้วยทอง และนำไปเข้าเครื่อง SEM โดยการศึกษานิวทริยาของฟิล์มแป้งกล้วยก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังแสดงใน ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มแป้งกล้วยที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 882	MPa
มอดูลัส ( Young' s modulus )	ASTM D 882	MPa
% การดึงยืด ณ จุดขาด	ASTM D 882	%

ความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล ( Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D882 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 \* 15 มม<sup>2</sup> จำนวน 5 ชิ้นงานของแต่ละสูตร โดยทำการควบคุมสถานะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสถานะดังนี้

Test speed : 50 mm./min

Gauge length : 50 mm.

Load cell : 100 N

ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง ( Tensile Strength )} = F/A$$

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ( \% Elongation at break )} = [(L-L_0)/L_0] \times 100$$

### 3.4.5 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ

ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Rate of water vaportransmission ; WVT) คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ผ่านหนึ่งหน่วยของพื้นที่หรือความหนาของตัวอย่างต่อเวลา วัดจากค่าความแตกต่างของน้ำหนัก ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน มีหน่วยเป็น กรัม/ ตารางเซนติเมตร/วัน ทดสอบโดยใช้วิธี Desiccant Method โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E 691 ทำการทดสอบโดยตัดฟิล์มเป็นวงกลมให้มีพื้นที่ประมาณ 5 ตารางเซนติเมตร ให้พอดีกับปากถ้วย ปิดผนึกฟิล์มลงบนถ้วยที่บรรจุด้วยซิลิกาเจล 10 กรัม ด้วยพาราฟิน และนำไปวางไว้ใน desiccators คือ  $\text{CaCl}_2$  ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 90 % ที่อุณหภูมิ  $38^\circ\text{C}$  ชั่งน้ำหนักถ้วยทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 7 วัน ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (Rate of water vaportransmission ; WVT) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{WVT} = G/tA = (G/t)A$$

เมื่อ G = ความแตกต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนและหลังการซึมผ่านไอน้ำ (กรัม)

t = เวลาที่น้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง (วัน)

A = พื้นที่ของปากถ้วย (ตารางเซนติเมตร)

G/t = ความชันของเส้นกราฟระหว่างค่า G กับ t

WVT = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (กรัม/ ตารางเซนติเมตร/วัน)

\*หมายเหตุ ข้อมูลจากศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์

### 3.4.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิการสลายทางความร้อน (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนัก (%Weight loss) ของฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยการชั่งตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม และนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5\*7 เซนติเมตรฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 30-40% การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจาก ตัวอย่างอาจจะกระจายไปกับดิน แล้วทำการชั่งน้ำหนักฟิล์มทุกวัน และเปรียบเทียบน้ำหนักของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปภายในระยะเวลา 2 เดือน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยโดยมีกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้ และเลือกศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม โดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพจากสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลายด้วยการฝังดิน จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้าย ให้ผลดังนี้

#### 4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของฟิล์มด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

การหาอัตราส่วนที่เหมาะสม น้ำ/แป้งกล้วย/กลีเซอรอล/เส้นใยฝ้าย โดยได้มีการทดลองหลายสูตรดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมของฟิล์มจากแป้งกล้วย

สูตร	แป้งกล้วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลายเพกติน	
				(กรัม)	(%)
1	3.00	0.67	60	0.00	0
2	2.70	0.54	54	0.30	10
3	2.40	0.48	48	0.60	20
4	2.10	0.42	42	0.90	30
5	1.80	0.36	36	1.20	40
6	1.50	0.30	30	1.50	50

จากตารางที่ 4.1 สารละลายแป้งที่เตรียมได้ (สูตรที่ 1) มีลักษณะชั้นที่สุกเมื่อใช้แท่งแก้วคนสารผสมให้เข้ากันด้วยมือและมีสีน้ำตาล ลักษณะฟิล์มที่เตรียมได้พบว่าสีน้ำตาลเข้มและพื้นผิวมีความขรุขระ จึงมีการปรับปรุงสูตร โดยใช้สารละลายเพกตินในสูตรที่ 2-6

จากสูตรที่ 2-6 ใส่สารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากแป้งกล้วย พบว่าเมื่อมีการเติมสารละลายเพกตินปริมาณมากขึ้น พบว่าสารละลายมีความเหนียวมากขึ้นกว่าสูตรที่ 1 และสารละลายมีสีน้ำตาลอ่อนลงด้วย ตามปริมาณเพกตินที่เพิ่มขึ้น ลักษณะฟิล์มที่เตรียมได้พบว่าฟิล์มมีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น พื้นผิวฟิล์มมีความเรียบมากขึ้นด้วย ซึ่งเกิดจาก

ความสามารถในการก่อตัวเป็นฟิล์มของเพกติน แต่พบฟองอากาศในฟิล์มแป้งกล้วยมากขึ้น เนื่องจากความหนืดของสารละลายที่มากขึ้น ตามปริมาณเพกตินที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ส่วนผสมของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย

สูตร	แป้งกล้วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลาย เพกติน (กรัม)	เส้นใยฝ้าย (กรัม)	กัวกัม (กรัม)
7	3.00	0.67	60	0	0.30	0.030
8	2.70	0.54	54	0.3	0.27	0.027
9	2.40	0.48	48	0.6	0.24	0.024
10	2.10	0.42	42	0.9	0.21	0.021
11	1.80	0.36	36	1.2	0.18	0.018
12	1.50	0.30	30	1.5	0.15	0.015

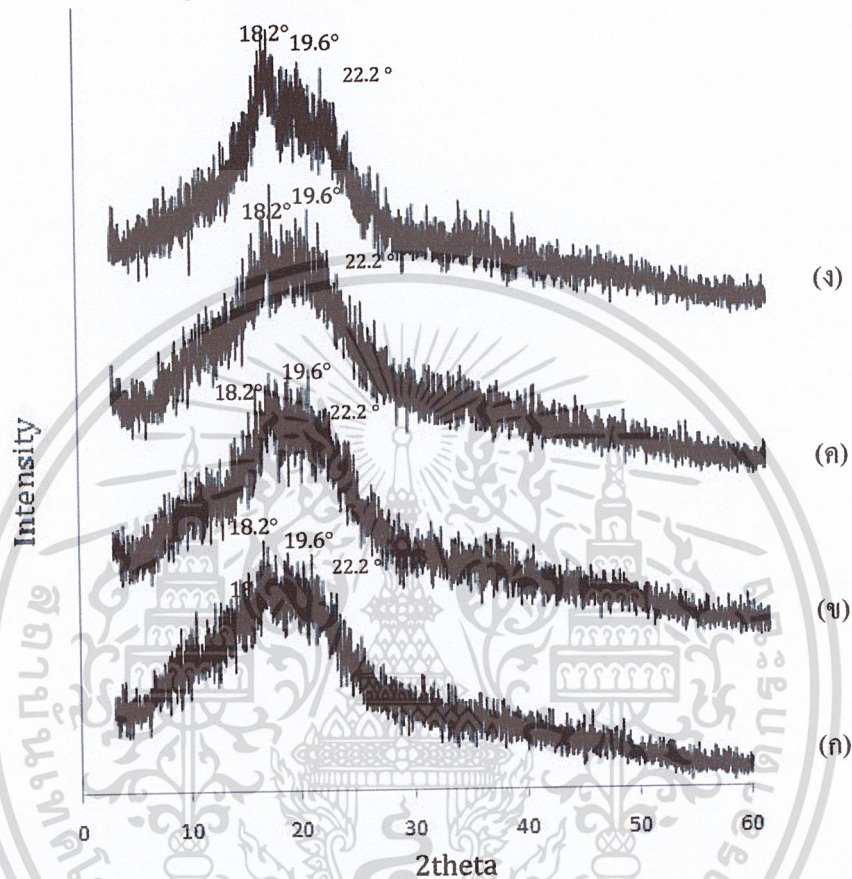
ตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อมีการเติมเส้นใยฝ้ายเพื่อเสริมแรง เส้นใยฝ้ายที่นำมาใช้นั้นไม่ควรยาวเกินยาวเกิน 2 มิลลิเมตร เพื่อให้เกิดการกระจายตัวในสารละลายได้อย่างทั่วถึง เนื่องจากเส้นใยยาวมากจะทำให้เส้นใยรวมกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้แผ่นฟิล์มที่อบแล้วเป็นรอยขรุขระ และมีการพ่นผิวไม่เรียบและในสูตรนี้ได้มีการเติมกัวกัม 0.01 กรัมต่อแป้งกล้วย 1 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณกัวกัมที่มากกว่านี้ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดมากเกินไป ในทุกสูตรต้องคนสารละลายตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้แป้งตกตะกอน และสูตรที่มีการเติมเส้นใยควรคนสารละลายแป้งขึ้นลงจะทำให้สารละลายแป้งกระจายตัวทั่วสารละลาย

จากสูตรที่ 7 พบว่าสารละลายแป้งที่เตรียมได้ที่มีการใส่เส้นใยฝ้าย มีลักษณะขุ่นที่สุดและสารละลายมีสีน้ำตาลเข้มที่สุดและมีความหนืดมากที่สุด ลักษณะฟิล์มที่เตรียมได้พบว่ามีสีน้ำตาลเข้มและพ่นผิวมีความขรุขระ

จากสูตรที่ 8-12 พบว่าเมื่อมีการเติมสารละลายเพกตินปริมาณมากขึ้นร่วมกับเส้นใยฝ้าย พบว่าสารละลายมีความหนืดน้อยลง สารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกันและมีสีน้ำตาลอ่อนลงกว่าสูตรที่ 7 ตามปริมาณเพกตินที่เพิ่มขึ้น ลักษณะฟิล์มที่เตรียมได้พบว่ามีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น พ่นผิวฟิล์มมีความเรียบมากขึ้นด้วย

## 4.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

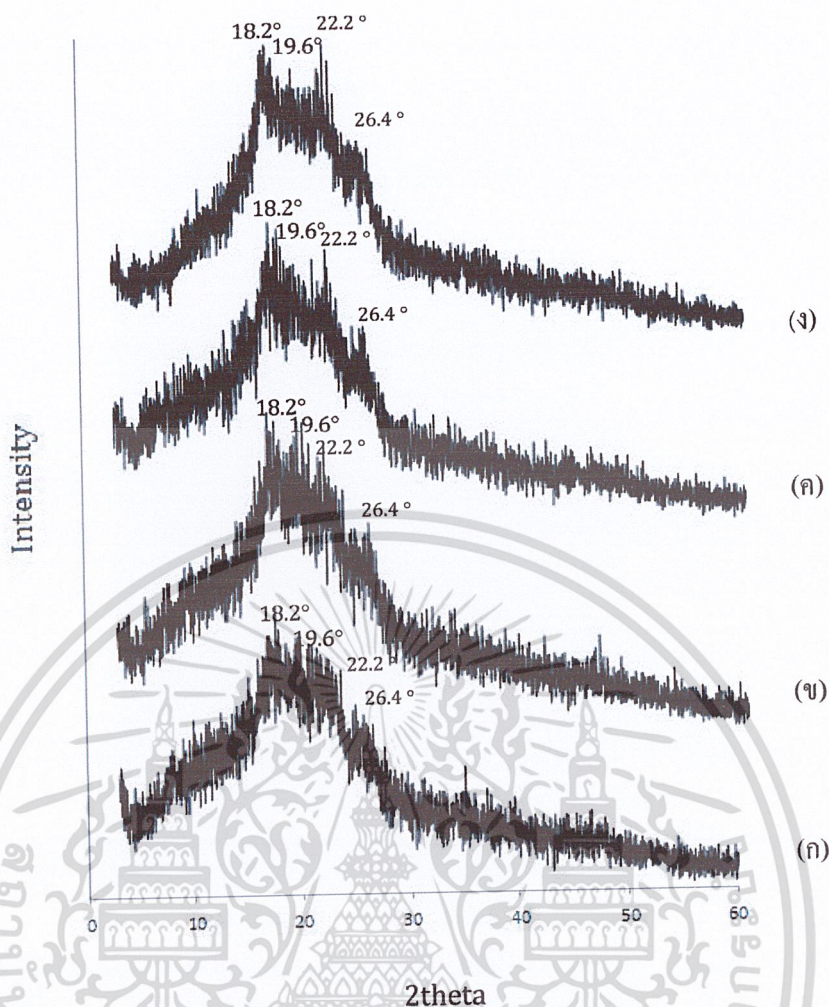
การวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ ( $2\theta$ ) ในช่วง  $3-60^\circ$  ด้วยอัตราเร็ว  $1^\circ$  / นาที ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 - 4.2



รูปที่ 4.1 ดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพคตินปริมาณ ต่างๆ (ก) 0 % (ข) 10 % (ค) 30 % และ (ง) 50 %

จากรูปที่ 4.1 (ก) - (ง) แสดงดิฟแฟรกโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ผสมสารละลายเพคตินในปริมาณต่าง ๆ พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มในทุกสูตร มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ  $V_H$ -type [32] ทั้งหมด โดยเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V โดยให้พีคของผลึกที่มุม  $2\theta$  ที่  $18.2^\circ$ ,  $19.6^\circ$  และ  $22.2^\circ$  [31]

เมื่อพิจารณาถึงผลของสารละลายเพคตินที่เติมลงไป จากรูปที่ 4.1 (ข) - (ง) พบว่าเพคตินทำให้ความเข้ม (Intensity) ของพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $18.2^\circ$ ,  $19.6^\circ$  และ  $22.2^\circ$  มีความแหลมมากขึ้นตามปริมาณเพคตินที่มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ไม่ผสมสารละลายเพคติน (รูปที่ 4.1 (ก)) แสดงให้เห็นว่า การเติมเพคตินลงไปทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเพิ่มขึ้น



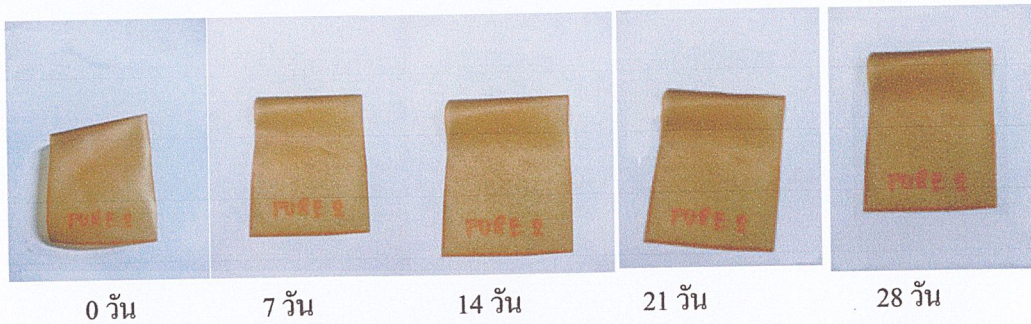
รูปที่ 4.2 ดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลาย เพกตินและเส้นใยฝ้าย โดยใช้สารละลายเพกตินปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50%

จากรูปที่ 4.2 (ก) – (ง) แสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ผสม สารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย พบว่าผลึกของฟิล์มในทุกสูตร มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ  $V_H$ -type [31] โดยให้พีคของผลึกที่มุม  $2\theta$  ที่  $18.2^\circ$ ,  $19.6^\circ$  และ  $22.2^\circ$  [31] และพบพีคเพิ่มขึ้นมาจากผล ของเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไป ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ Cellulose I คือ พีคที่  $26.4^\circ$  โดยเส้นใยฝ้ายปกติ พบพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $17.7^\circ$ ,  $23.3^\circ$  และ  $26.4^\circ$  [32]

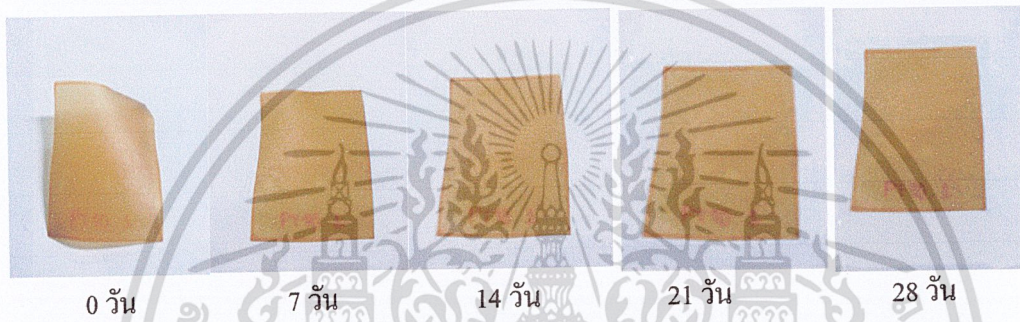
เมื่อพิจารณาถึงผลของการเติมเส้นใยฝ้ายร่วมกับสารละลายเพกติน จากรูปที่ 4.2 (ก) – (ง) พบว่าเส้นใยฝ้ายทำให้ความเข้มของพีคที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ  $18.2^\circ$ ,  $19.6^\circ$  และ  $22.2^\circ$  มีความแหลมเพิ่ม สูงขึ้นและมีความคมชัดมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ไม่ใส่เส้นใย ฝ้าย (รูปที่ 4.1 (ก)–(ง)) แสดงให้เห็นว่าการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มย่อย สลายได้จากแป้งกล้วยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเติมเส้นใยฝ้ายทำให้ฟิล์มแป้งกล้วยมี ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีค่าสูงขึ้น

### 4.3 การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption)

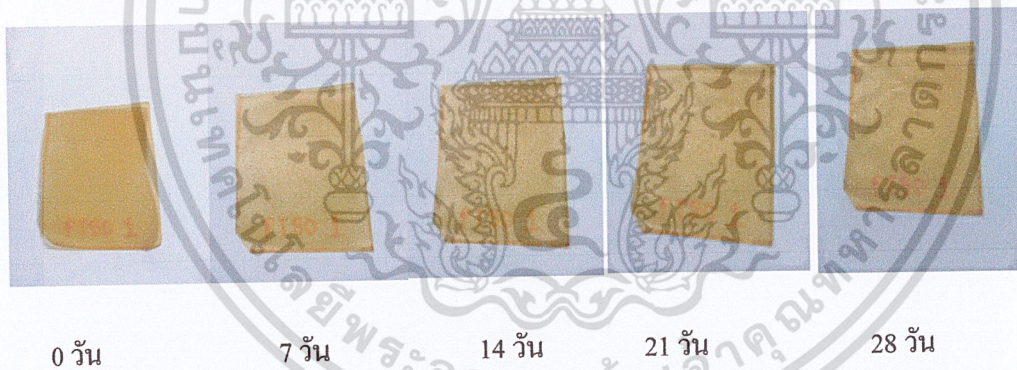
ผลการศึกษาการดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วย โดยศึกษาถึงผลของการเติมเพกตินและเส้นใยฝ้าย ลงในฟิล์มจากแป้งกล้วย ทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ตามมาตรฐาน ASTM E 104



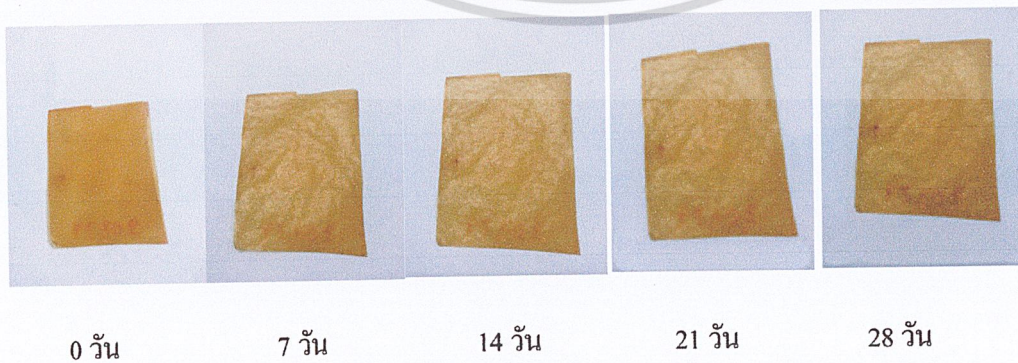
รูปที่ 4.3 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 0%



รูปที่ 4.4 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 10%

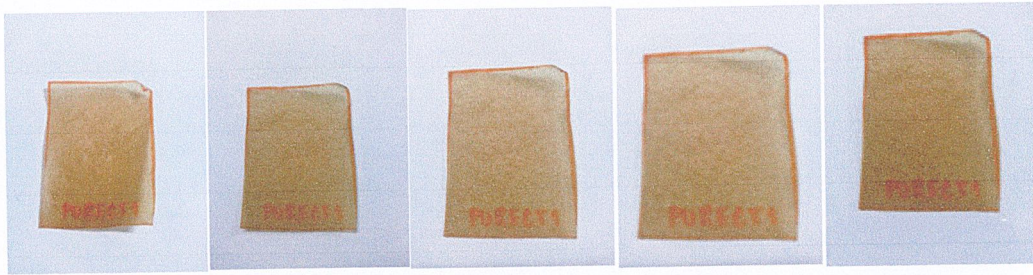


รูปที่ 4.5 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 30%



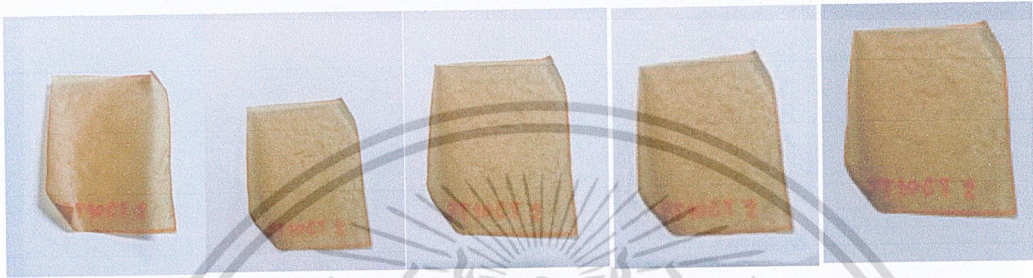
รูปที่ 4.6 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



0 วัน                      7 วัน                      14 วัน                      21 วัน                      28 วัน

รูปที่ 4.7 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 10%



0 วัน                      7 วัน                      14 วัน                      21 วัน                      28 วัน

รูปที่ 4.8 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 10% และเส้นใยฝ้าย 10%



0 วัน                      7 วัน                      14 วัน                      21 วัน                      28 วัน

รูปที่ 4.9 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 30% และเส้นใยฝ้าย 10%

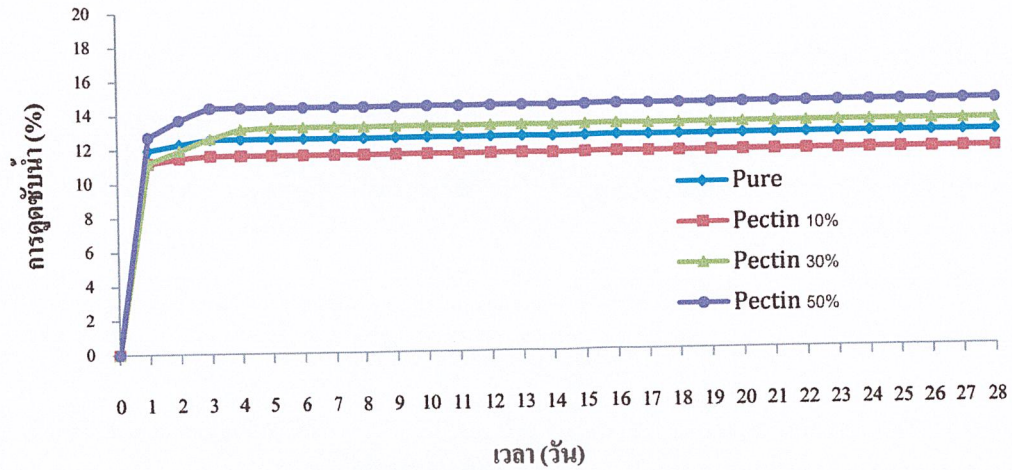


0 วัน                      7 วัน                      14 วัน                      21 วัน                      28 วัน

รูปที่ 4.10 การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 50% และเส้นใยฝ้าย 10%

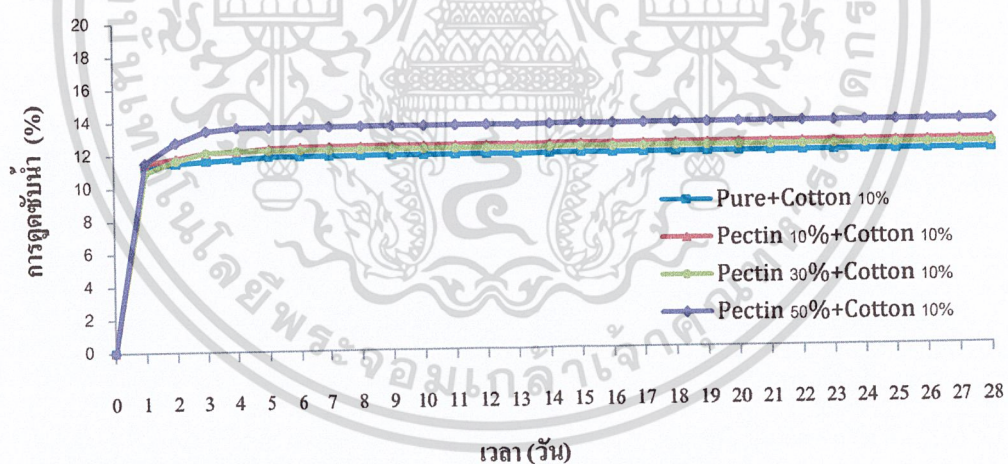
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 4.11 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งกล้วยผสมเพกตินที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

จากการทดสอบ การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน รูปที่ 4.11 พบว่า ในช่วง 4 วันแรก ฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกตินทุกสูตร มีความสามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นขึ้นงานมีการดูดซับน้ำคงที่ โดยฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกตินทุกสูตร มีความสามารถในการดูดซับน้ำใกล้เคียงกัน และฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกติน 50% มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากที่สุด



รูปที่ 4.12 เปรอ์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับน้ำของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย รูปที่ 4.12 พบว่า ในช่วง 4 วันแรกฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้ายทุกสูตร มีความสามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นชิ้นงานมีการดูดซับน้ำมีแนวโน้มคงที่ โดยฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้ายทุกสูตร มีความสามารถในการดูดซับน้ำใกล้เคียงกัน และฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 50%และเส้นใยฝ้าย 10% มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากที่สุด

จากการทดสอบการดูดซับน้ำ สามารถสรุปได้ว่า ฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกติน 50% สามารถดูดน้ำได้มากที่สุด กล่าวคือ ปริมาณเพกตินมีผลทำให้ฟิล์มจากแป้งกล้วยดูดซับน้ำได้มากขึ้น เนื่องจากเพกตินสามารถเกิดเจลได้ จึงทำให้กักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี ซึ่งความสามารถในการดูดซับน้ำที่สูง ทำให้ฟิล์มจากแป้งกล้วยมีอายุการใช้งานสั้นลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มสูตรที่ไม่มีเส้นใยฝ้ายกับที่เติมเส้นใยฝ้าย พบว่าสูตรที่เติมเส้นใยฝ้ายมีการดูดซับน้ำที่น้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยเซลลูโลสมีสภาพขรุขระน้อยกว่าแป้งมาก [37]

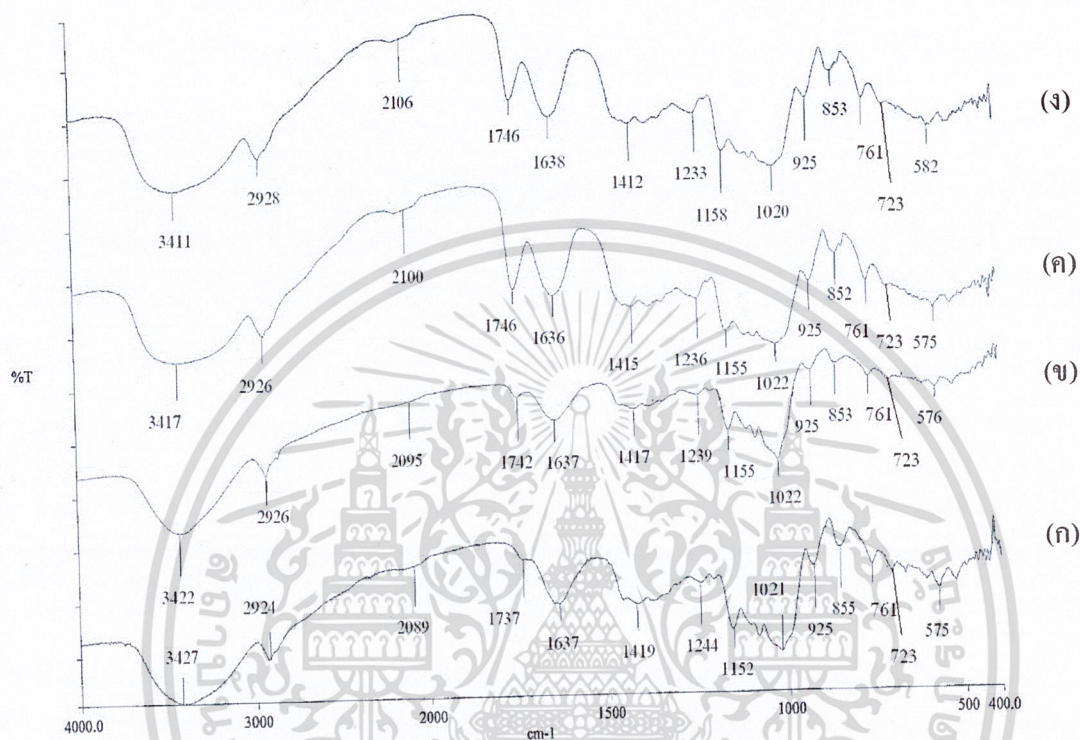


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

ผลจากการศึกษาโดยเทคนิค Fourier-Transform Infrared Spectroscopy ของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย โดยศึกษาถึงผลของการเติมเพกตินและเส้นใยฝ้าย ลงในฟิล์มจากแป้งกล้วย

##### 4.4.1 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ กัน



รูปที่ 4.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50%

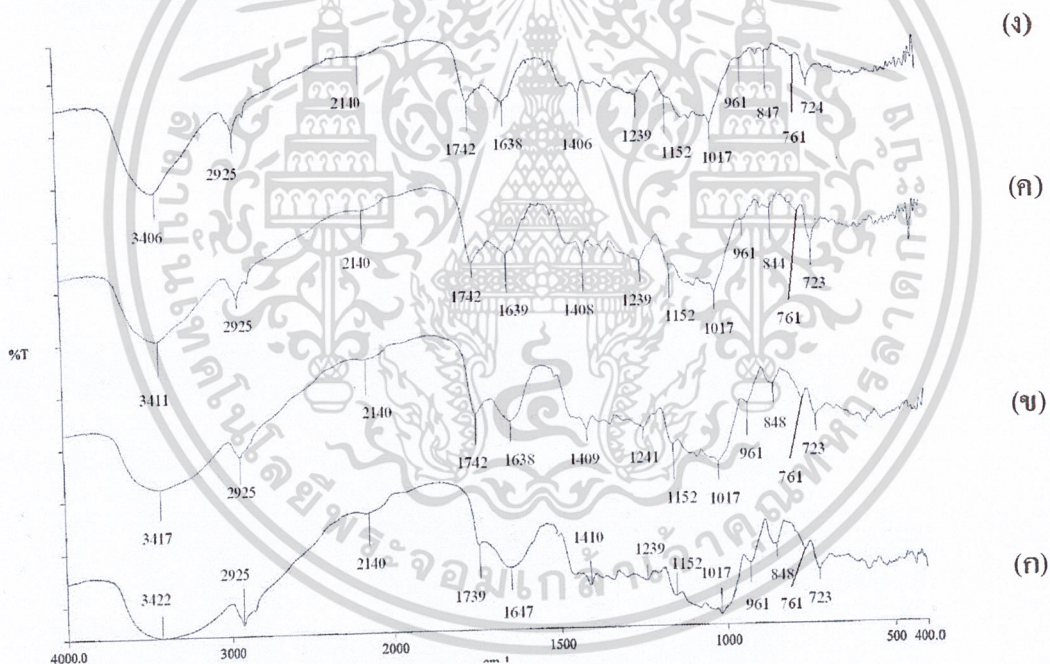
จากรูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีปริมาณเพกตินต่างๆกัน พบว่าอินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้จากทุกสูตรมีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสตามลักษณะดังนี้

แถบพิกที่ความยาวคลื่น  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ O-H stretching จากแป้งและกลีเซอรอล แถบพิกในช่วง  $2800-2900\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  หรือ  $\text{CH}_3$  ของแป้ง แถบพิก  $1650\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถอธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลของน้ำแล้วเกิดการ Dehydration เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งการ Hydrated ของ OH group ใน Amylose พิกช่วง  $1400\text{ cm}^{-1}$  เป็นพิกของ O-H bending พิกช่วง  $1300-1100\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching ของแป้ง และแถบพิกช่วง  $1200-1100\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่น C-O-H bending ของแป้ง พบพิกที่  $800-850\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ C-H bending [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความแตกต่างระหว่างฟิล์มย่อยสลายได้ที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วย เพกติน พบว่าการเติมสารละลายเพกตินลงไปในฟิล์มของแป้งกล้วย จากรูปที่ 4.11 (ข) และ (ง) ทำให้ พีคที่ตำแหน่ง  $3300-3500\text{cm}^{-1}$  และ  $1410-1420\text{cm}^{-1}$  ที่แสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching และ O-H bending เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นที่ลดลง แสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ ระหว่างโมเลกุลของแป้งและเพกติน [34] ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Pawlak and M.Mucha และ K.Aoi et al [35] โดยรายงานวิจัยทั้งสองได้กล่าวว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกันสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FTIR โดยที่เมื่อสององค์ประกอบมีความเข้ากันได้จะทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้น ระหว่างองค์ประกอบ (พันธะไฮโดรเจน) ที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 ได้ โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยว ๆ นอกจากนี้มีพีคสำคัญเพิ่มขึ้นมา คือ พีคที่  $1735-1750\text{cm}^{-1}$  มีความเข้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการใส่สารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพีคของการสั่นแบบ C=O stretching ซึ่งแสดงอยู่ในหมู่ฟังก์ชัน -COOH ของเพกติน [16]

#### 4.2.2 การเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายจากแป้งกล้วยได้ปรับปรุงสมบัติโดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้าย



รูปที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงโดยใช้เพกตินและเส้นใยฝ้าย โดยใช้สารละลายเพกตินปริมาณต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50%

จากรูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมของรอยละการส่งผ่านแสงของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้เพกตินและเส้นใย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง รูปที่ 4.11 (ก) – (ง) และ 4.12 (ก) – (ง) พบว่าผลจากการเติมเส้นใยฝ้ายลงในฟิล์มจากแป้งกล้วย พบว่าทำให้พีกที่ตำแหน่งการสั่นแบบ O-H stretching ที่ตำแหน่ง  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  เคลื่อนไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ในฟิล์มจากแป้งกล้วยเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายลงไป เพกติน และพีกที่ตำแหน่ง  $1700\text{ cm}^{-1}$  เกิดจากการ Hydrated ของหมู่ OH group ใน Amylose โมเลกุลของน้ำปรากฏพีกของการดูดซับขึ้นสองพีก คือ  $3200-3700\text{ cm}^{-1}$  และ  $1600-1700\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้จากพีกที่ตำแหน่ง  $1640\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีกของ O-H stretching ที่อยู่บนโมเลกุลแป้ง มีความเข้มลดลงแสดงให้เห็นว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลของแป้ง นอกจากนี้ยังพบพีกหลักในช่วง  $2800 - 2900\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจาก C-H stretching พีกที่  $1640\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ O-H stretching ที่อยู่ในโมเลกุลของแป้งพีกช่วง  $1400\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีกของ O-H bending และพีกช่วง  $1000-1100\text{ cm}^{-1}$  เกิดจาก Anhydroglucose ring พบพีกที่  $800-850\text{ cm}^{-1}$  เป็นของ C-H bending [33] และนอกจากนี้พบพีกที่ตำแหน่ง  $723\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ  $\text{CH}_2$ -rocking และพีกที่ตำแหน่ง  $1410\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ CH wagging

จากการเติมสารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้ายลงในฟิล์มของแป้งกล้วยทำให้พีกที่ตำแหน่ง O-H stretching  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  และ O-H bending  $1420-1410\text{ cm}^{-1}$  เกิดการ Shift ไปที่เลขคลื่นลดลงแสดงว่าเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างโมเลกุลของแป้งและสารละลายเพกติน นอกจากนี้มีพีกสำคัญที่เพิ่มขึ้นมา คือ พีกที่  $1735-1750\text{ cm}^{-1}$  มีความเข้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการใส่สารละลายที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพีก C=O stretching ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่แสดงอยู่ในโครงสร้างของเพกติน [16] และพีกที่ตำแหน่ง  $1410\text{ cm}^{-1}$  เพิ่มขึ้นใหม่ เป็นลักษณะการสั่นของ CH wagging ซึ่งเป็นผลจากการเติมเส้นใยฝ้ายลงไป

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของฟิล์มแป้งกล้วยสูตรที่ใส่เส้นใยและไม่ได้ใส่เส้นใยฝ้าย พบว่าเลขคลื่นที่พีกที่ตำแหน่ง O-H stretching  $3300-3600\text{ cm}^{-1}$  และ O-H bending  $1420-1410\text{ cm}^{-1}$  ของสูตรที่เติมเส้นใยฝ้ายมีเลขคลื่นที่น้อยกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมเส้นใย เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างโมเลกุลของแป้งและสารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย

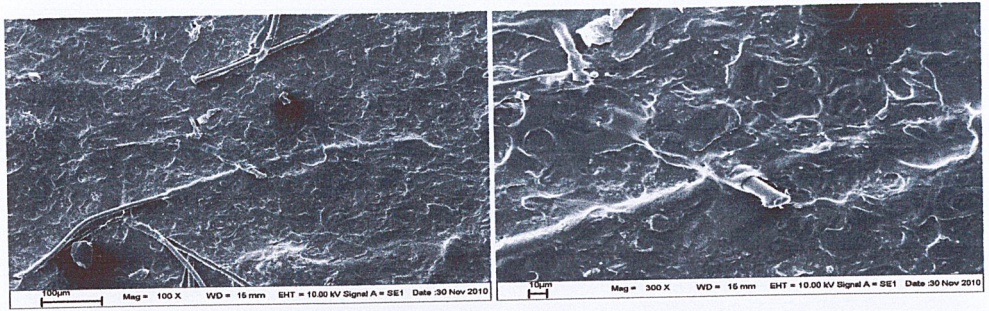
#### 4.5 ฐานวิทยา

เทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ได้นำมาใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจากแป้งกล้วย โดยการศึกษาลักษณะวิทยาของฟิล์มแป้งกล้วยก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย



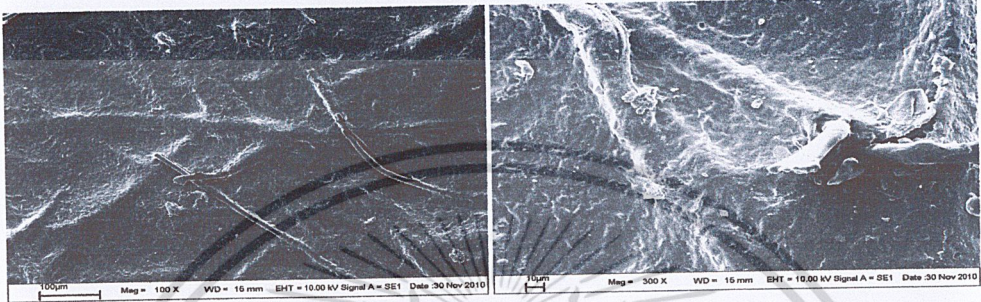
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านบนของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก) – (ข) เพกติน 0% (ค) – (ง) เพกติน 10% (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ (ช) – (ซ) เพกติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



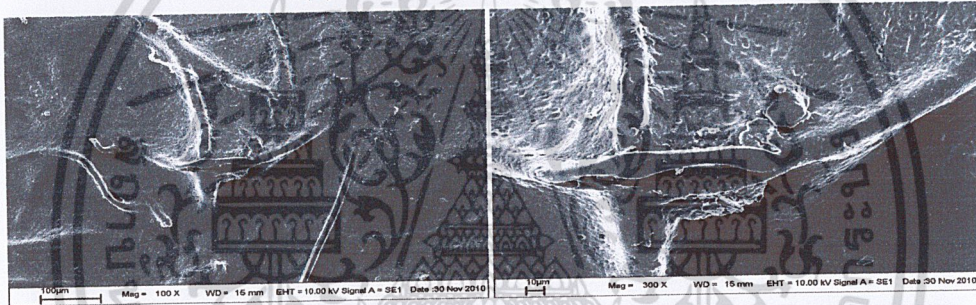
(ก)

(ข)



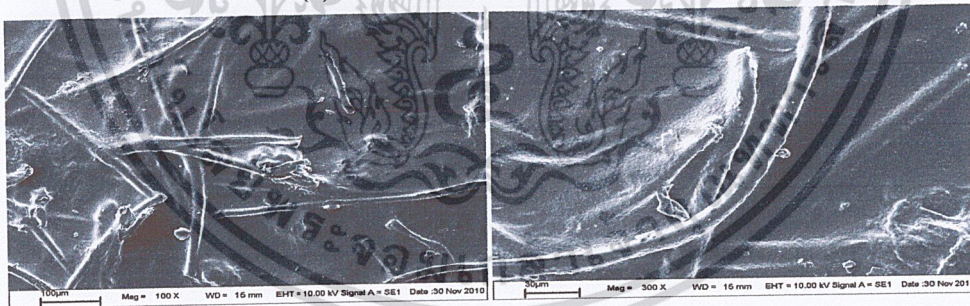
(ค)

(ด)



(จ)

(ฉ)

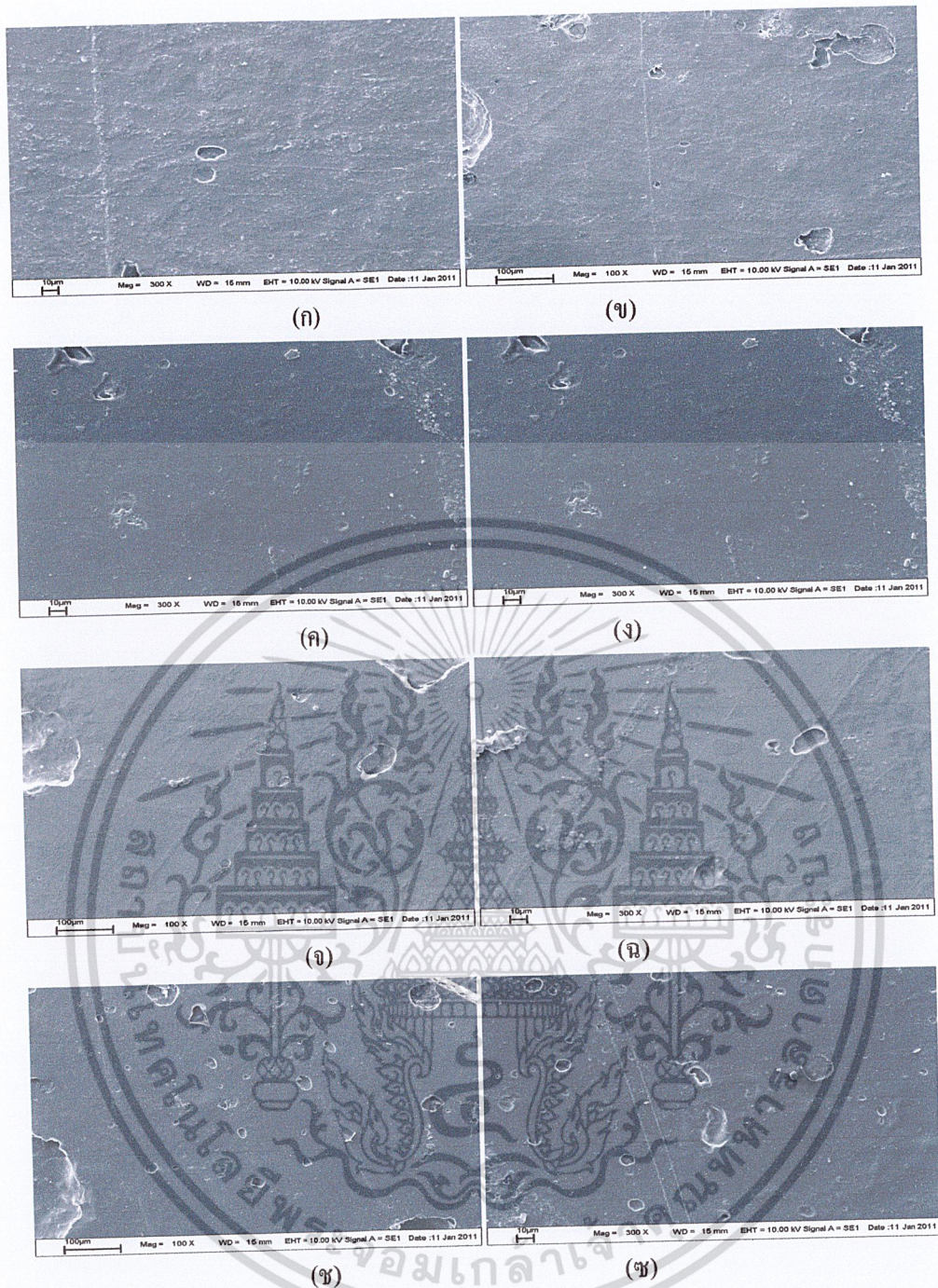


(ช)

(ซ)

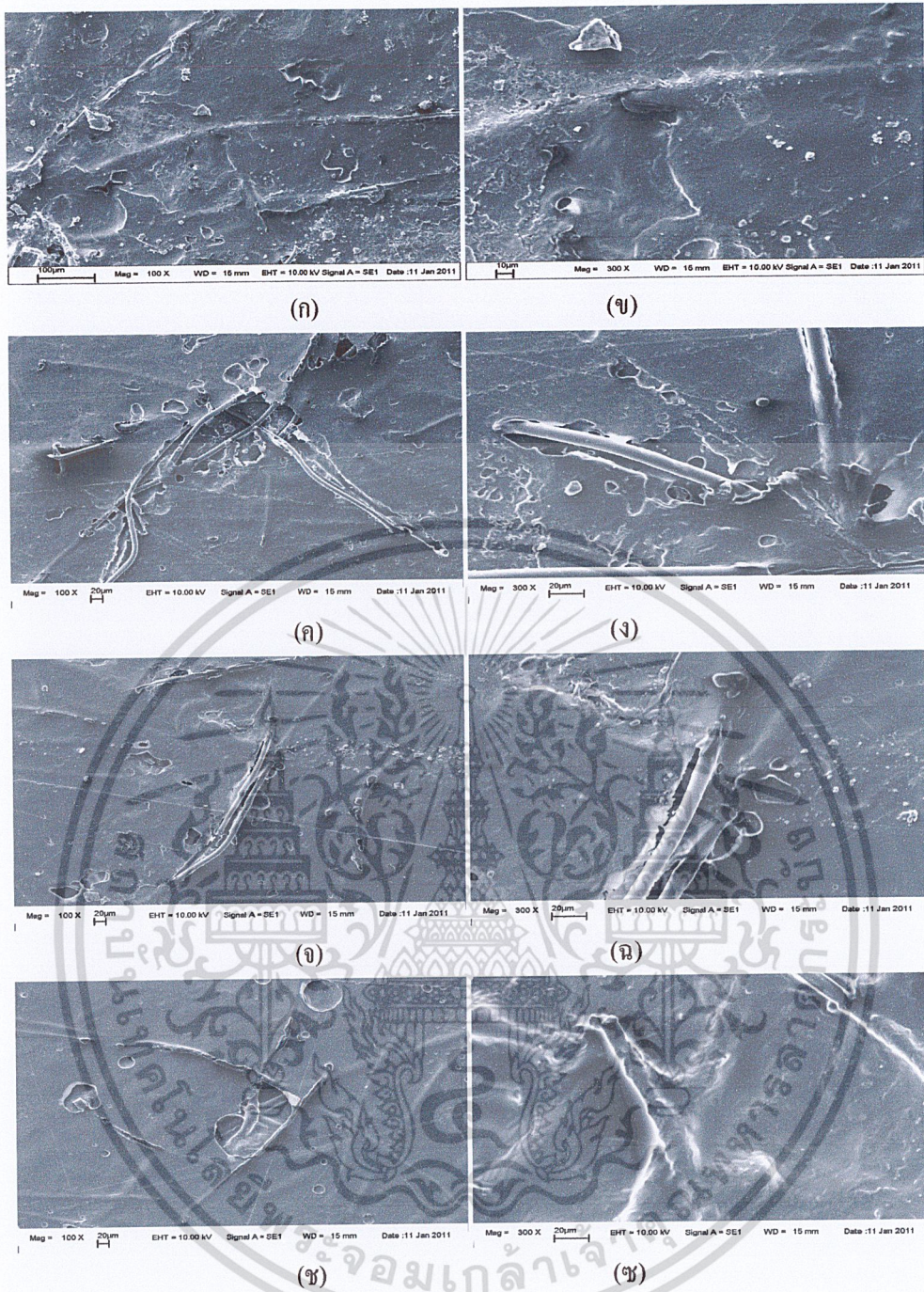
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านบนของฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่  
 กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก) – (ข) เพกติน 0% (ค) – (ง) เพกติน 10%  
 (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ (ช) – (ซ) เพกติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านล่างของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ก่าลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ ปริมาณเพคตินต่างๆ (ก) – (ข) เพคติน 0% (ค) – (ง) เพคติน 10% (จ) – (ฉ) เพคติน 30% และ (ช) – (ซ) เพคติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สัตถฐานวิทยา (พื้นผิว) ด้านล่างของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า ที่ปริมาณเพกตินต่างๆ (ก) – (ข) เพกติน 0% (ค) – (ง) เพกติน 10% (จ) – (ฉ) เพกติน 30% และ (ซ) – (ซ) เพกติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

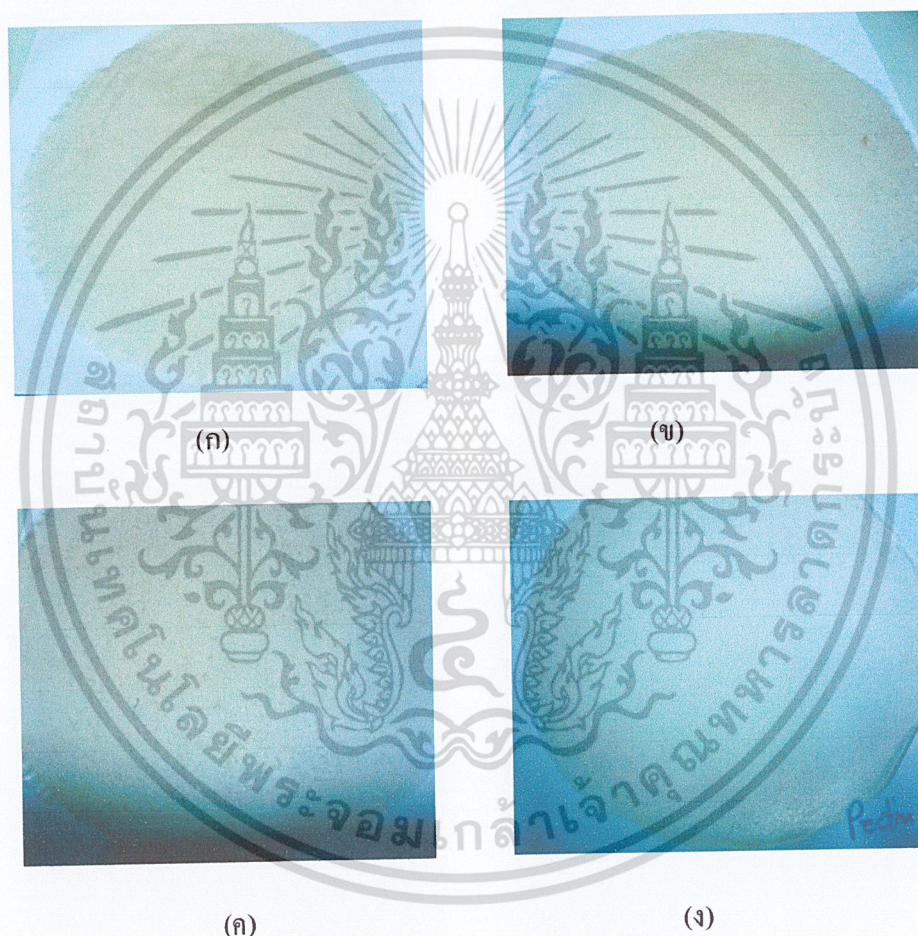
รูปที่ 4.15 (ก) - 4.15 (ข) แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวด้านบน (ด้านที่ไม่ได้สัมผัสกับแม่พิมพ์) ของฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า รูปที่ 4.15 (ก) และ รูปที่ 4.15 (ข) พื้นผิวของฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะขรุขระ (รูปที่ 4.15 (ก) - รูปที่ 4.15 (ข)) พื้นผิวของฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะเรียบขึ้นและเกิดฟองอากาศมากขึ้น แต่มีขนาดฟองอากาศเล็กลง เนื่องมาจากการเติมสารละลายเพกตินปริมาณมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเพกตินทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งกล้วยและเพกตินเนื่องมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งแสดงความมีขี้้วเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ทำให้ฟิล์มที่ได้มีความเรียบมากขึ้น แต่พบฟองอากาศเกิดมากขึ้นเนื่องจากสารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.16 (ก) - รูปที่ 4.16 (ข) แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวด้านบน (ด้านที่ไม่ได้สัมผัสกับแม่พิมพ์) ของฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆ กันและเส้นใยฝ้าย 10% ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า รูปที่ 4.16 (ก) - 4.16 (ข) พบว่าพื้นผิวฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะขรุขระ มีเส้นใยฝ้ายฝังตัวเข้าไปในเมทริกซ์ของแป้งกล้วยได้บางส่วนจึงทำให้พื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระ และเส้นใยฝ้ายเกิดการยึดเกาะในเมทริกซ์ของแป้งกล้วยจึงทำให้พื้นผิวของเส้นใยถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์ของแป้ง (Surface wetting) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับเส้นใยฝ้าย รูปที่ 4.16 (ค) - รูปที่ 4.16 (ข) พื้นผิวฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะเรียบขึ้น และมีเส้นใยฝ้ายฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของแป้งกล้วยมากขึ้น ตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้พื้นผิวของฟิล์มที่ได้เรียบมากขึ้น เมทริกซ์ของแป้งและเพกติน ปกคลุมพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายได้ แสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างแป้ง เพกตินและเส้นใยฝ้าย แต่พบฟองอากาศมากขึ้น และมีขนาดฟองอากาศเล็กลง ตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16

รูปที่ 4.17 (ก) - 4.17 (ข) แสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวด้านล่าง (ด้านที่สัมผัสกับแม่พิมพ์) ของฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า พบว่าจากรูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.17 (ข) พื้นผิวของฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะไม่เรียบ (รูปที่ 4.17 (ก) - รูปที่ 4.17 (ข)) พื้นผิวของฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะเรียบขึ้นและตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเติมสารละลายเพกตินปริมาณมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเพกติน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะไฮโดรเจนระหว่างแป้งกล้วยและเพกตินเนื่องมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งแสดงความมีขี้้วเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 นอกจากนี้เมื่อปริมาณเพกตินเพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มที่ได้มีฟองอากาศมากขึ้น แต่ขนาดฟองอากาศเล็กลง เนื่องจากสารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.18 (ก) - รูปที่ 4.18 (ข) แสดงลักษณะพื้นผิวด้านล่าง (ด้านที่สัมผัสกับแม่พิมพ์) ของฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆ กันและเส้นใยฝ้าย 10% ที่กำลังขยาย 100 เท่าและ 300 เท่า พบว่าจากรูปที่ 4.18 (ก) และ รูปที่ 4.18 (ข) พื้นผิวฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะขรุขระและ

มีเส้นใยฝ้ายฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของแป้งกล้วยได้บางส่วนจึงทำให้พื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระและเส้นใยฝ้ายถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์ของแป้งกล้วย (Surface wetting) สำหรับรูปที่ 4.18 (ค) – รูปที่ 4.18 (ง) พื้นผิวฟิล์มแป้งกล้วยมีลักษณะเรียบขึ้นและมีเส้นใยฝ้ายฝังตัวอยู่ใน เมทริกซ์ของแป้งกล้วยมากขึ้นตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้พื้นผิวของฟิล์มที่ได้เรียบมากขึ้น เส้นใยฝ้ายเกิดการยึดเกาะในเมทริกซ์ของแป้งกล้วยได้ดีเมื่อใส่สารละลายเพกติน แสดงถึงความเข้ากันได้กับเมทริกซ์แป้งเนื่องมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งแสดงความมีขั้วเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จึงทำให้เกิดการยึดเกาะกันแน่นหนาระหว่างสองวัสดุ ส่งผลให้เกิดแรงกระทำระหว่างเมทริกซ์แป้ง สารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย แต่พบฟองอากาศมากขึ้น และมีขนาดฟองอากาศเล็กลงตามปริมาณสารละลายเพกตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น

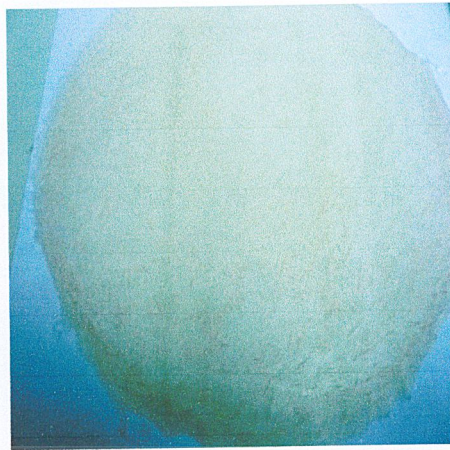


รูปที่ 4.19 ลักษณะฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน ที่ปริมาณสารละลายเพกตินต่าง ๆ  
(ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %

จากรูปที่ 4.19 (ก) – (ง) ลักษณะของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ถ่ายจากกล้องดิจิทัล พบว่าฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกติน มีสีน้ำตาลเข้มที่สุด เมื่อเติมสารละลายเพกตินในปริมาณมากขึ้น ฟิล์มที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนลงและมีความใสมากขึ้น แต่พบฟองอากาศในชิ้นงานมากขึ้น



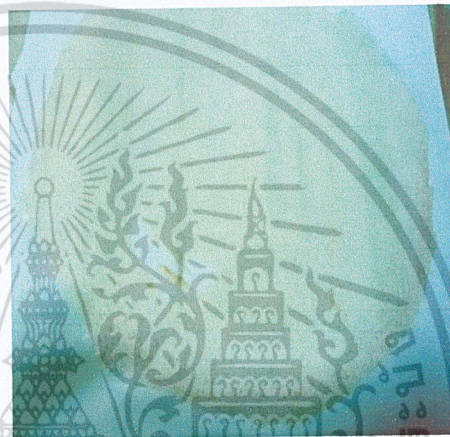
(ก)



(ข)



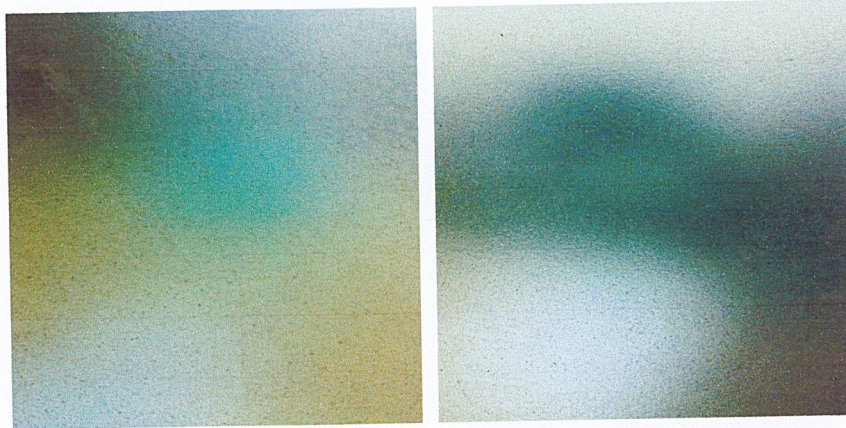
(ค)



(ง)

รูปที่ 4.20 ลักษณะฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย ที่ปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %

จากรูปที่ 4.20(ก) – (ง) ลักษณะของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ พบว่าฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกติน มีสีน้ำตาลเข้มที่สุด เมื่อเติมสารละลายเพกตินในปริมาณมากขึ้น ฟิล์มที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนลงและมีความใสมากขึ้น แต่พบฟองอากาศในชิ้นงานมากขึ้น



(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 4.21 ลักษณะการส่องผ่านแสงของฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลาย เพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %

จากรูปที่ 4.21 พบว่าฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกตินและฟิล์มที่ปริมาณสารละลายเพกติน 10 % ไม่พบฟองอากาศในชิ้นงาน ส่วนฟิล์มที่ปริมาณสารละลายเพกติน 30 % และ 50 % พบฟองอากาศในชิ้นงานมากขึ้น ตามปริมาณการใส่สารละลายเพกติน แต่ขนาดของฟองอากาศมีขนาดเล็กลง

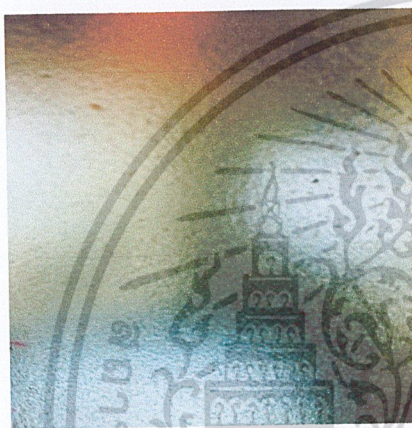
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.22 ลักษณะการส่องผ่านแสงของฟิล์มที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้ายที่ปริมาณสารละลายเพกตินต่างๆ (ก) 0% (ข) 10% (ค) 30% และ (ง) 50 %

จากรูปที่ 4.22 พบว่าฟิล์มที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกตินและฟิล์มที่ปริมาณสารละลายเพกติน 10 % ไม่พบฟองอากาศในชิ้นงาน ส่วนฟิล์มที่ปริมาณสารละลายเพกติน 30 % และ 50 % พบฟองอากาศในชิ้นงานมากขึ้น ตามปริมาณการใส่สารละลายเพกติน แต่ขนาดของฟองอากาศมีขนาดเล็ก

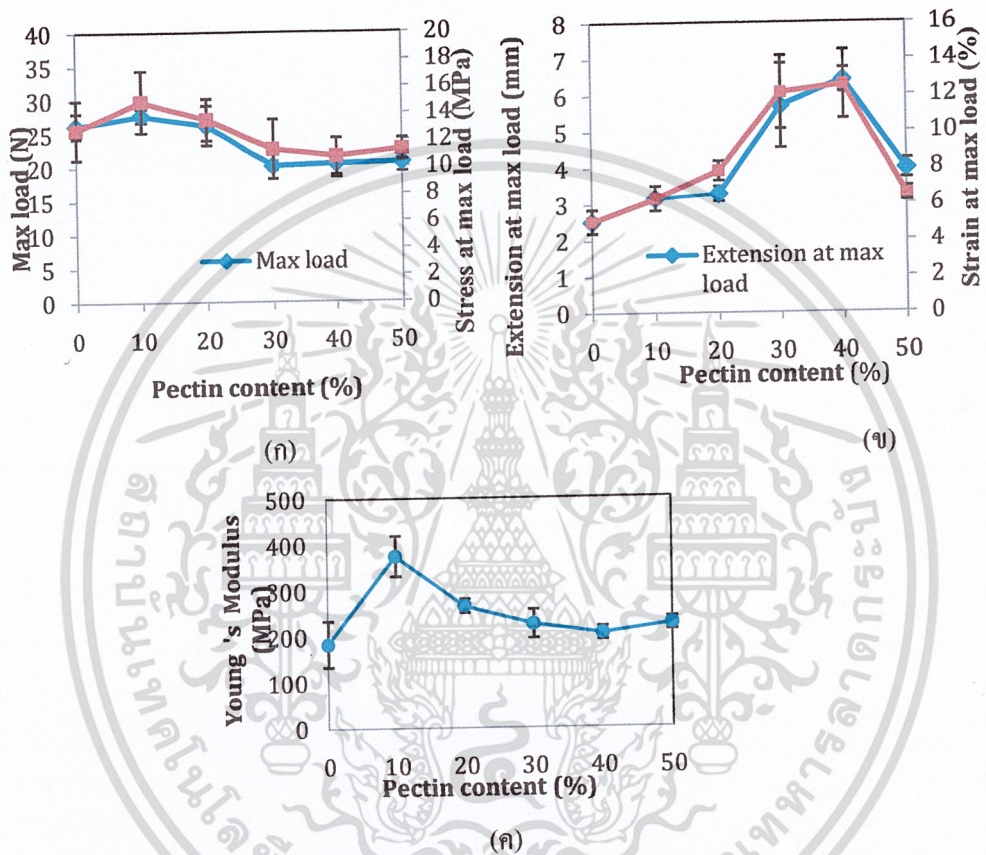
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และมอดูลัส

##### 4.6.1. สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติโดยใช้เพกติน

ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้ที่เตรียมได้จากแป้งกล้วยโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยใช้ปริมาณสารละลายเพกติน 0% , 10%, 20%, 30% , 40% และ 50% ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.23 สมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีปริมาณเพกตินต่างกัน (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) มอดูลัส และ (ค) การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด

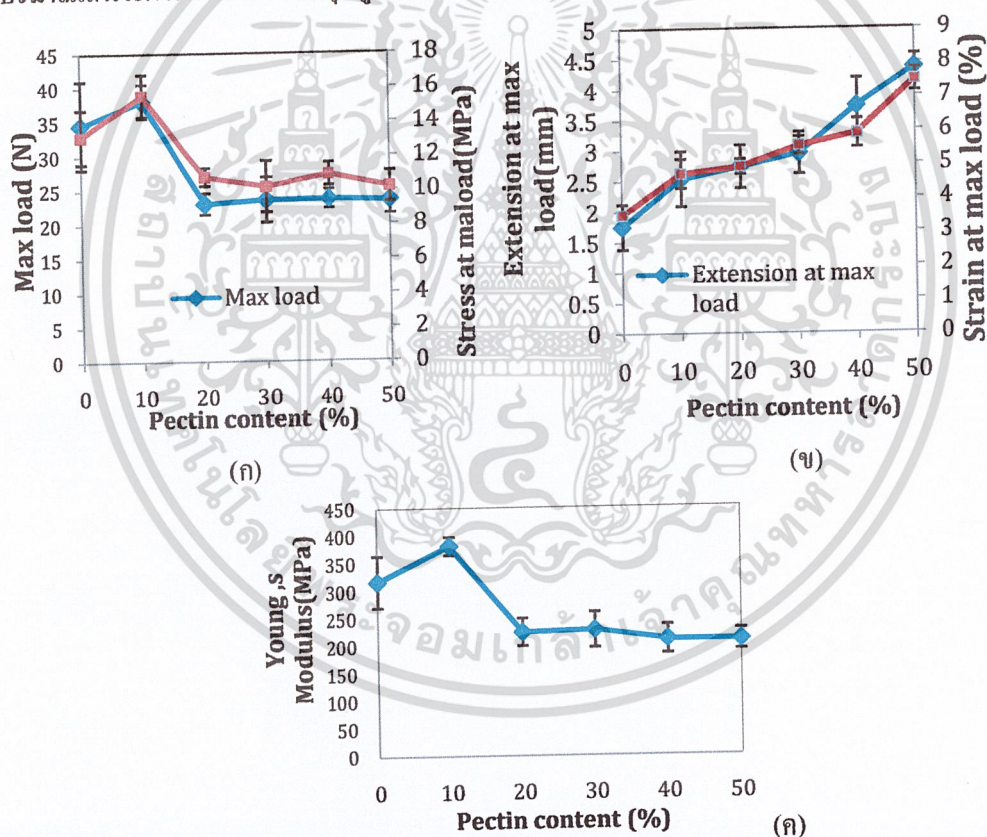
จากรูปที่ 4.23 (ก) – (ข) พิจารณาผลของสารละลายเพกติน ที่ปริมาณ 0 , 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารละลายเพกตินเป็น 10% ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสมบัติของเพกตินเป็นสารเพิ่มความชื้นหนืด สารก่อเจล มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่และยืดหยุ่นดี [16] คาดว่าทำให้ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงลดลง แต่จากการทดลองพบว่าฟิล์มที่ได้มีความเรียบมากขึ้น (รูปที่ 4.15 และ 4.17) และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าการ Shift ของเลขคลื่นที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างแป้งกล้วยและเพกติน จึงทำให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่

เมื่อเพิ่มปริมาณเพกตินมากกว่า 10% พบว่า ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัส มีแนวโน้มลดลง แม้ว่า จะพบ IR shift เช่นเดียวกับฟิล์มที่เติมเพกติน 10% เนื่องจากการใส่สารละลายเพกตินมาก ทำให้ฟองอากาศในชิ้นงานเกิดขึ้นมาก ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน (รูปที่ 4.21) ส่งผลทำให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.23 (ค) พิจารณาค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด แนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารละลายเพกตินเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณสารละลายเพกติน 40% โดยสมบัติของเพกตินเป็นสารเพิ่มความชื้นหนืด และเป็นสารก่อเจล [16] ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสายโซ่ของแป้งกล้วยมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและค่าการดึงยืดมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณเพกตินสูงขึ้น (รูปที่ 4.23(ค))

#### 4.6.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติโดยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

ผลการทดลองสมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้ที่เตรียมได้จากแป้งกล้วยโดยมีกลีเซอรอลเป็น พลาสติไซเซอร์ โดยใช้ปริมาณสารละลายเพกติน 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% และใช้ปริมาณเส้นใยฝ้ายคงที่ 10% ในทุกสูตร ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

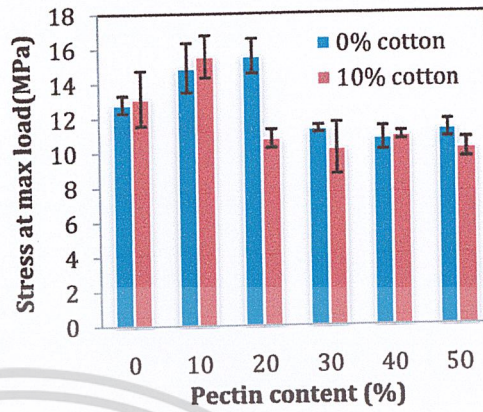
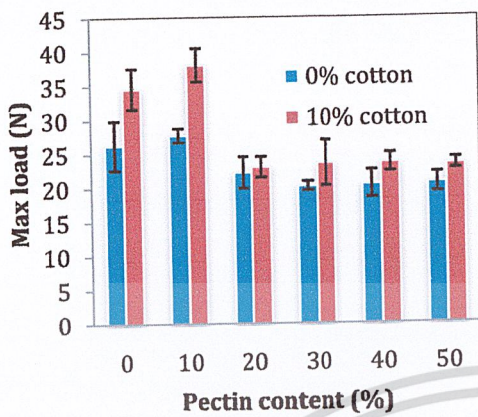


รูปที่ 4.24 สมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้เพกติน และเส้นใยฝ้าย (ก) แรงดึง ความแข็งแรงดึง (ข) มอดุลัส และ (ค) การดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด

จากรูปที่ 4.24(ก) –(ข) พิจารณาผลของสารละลายเพกติน ที่ปริมาณ 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% และใช้ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% คงที่ในการเสริมแรง พบว่าเมื่อปริมาณสารละลายเพกตินเพิ่มขึ้น ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และให้ค่าสูงสุดที่ปริมาณเพกติน 10% เนื่องจากสารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้ฟิล์มย่อยสลายได้จากแบงก์กล้วยมีความแข็งแรงและความแข็งมากขึ้น สามารถรับแรงและส่งผ่านแรงจากการดึงยึดได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการรับแรง แต่ที่ปริมาณสารละลายเพกตินเพิ่มขึ้นเป็น 20%, 30%, 40% และ 50% พบว่าค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึงและมอดุลัส มีค่าลดลงและมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการใส่สารละลายเพกตินมาก ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและเกิดฟองอากาศในชิ้นงานมากขึ้น ซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน(รูปที่ 4.22) ส่งผลทำให้ค่าแรงดึง ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับเมื่อใส่เพกตินเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาค่าการดึงยึดและเปอร์เซ็นต์การดึงยึด จากรูปที่ 4.24(ค) แนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณสารละลายเพกตินเพิ่มขึ้น ร่วมกับการใส่เส้นใยฝ้าย เนื่องจากการใส่สารละลายเพกตินทำให้ สายโซ่ของแบงก์กล้วยมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยึดและค่าการดึงยึดมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณเพกตินสูงขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับเมื่อใส่เพกตินเพียงอย่างเดียว

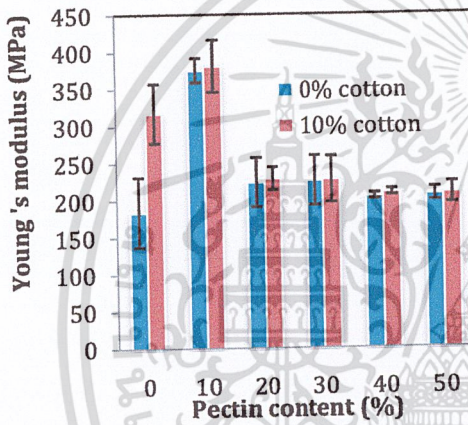
จากรูปที่ 4.25 ก) – (ค) กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสของฟิล์มแบงก์กล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้ายเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่ได้ใส่เส้นใยฝ้าย พบว่าค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ของสูตรที่เติมเส้นใยฝ้ายมีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่ได้ใส่เส้นใยฝ้าย เนื่องจากเส้นใยฝ้ายที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความยืดหยุ่นลดลง

สรุปสูตรฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลรวมดีที่สุด พบได้ในฟิล์มจากแบงก์กล้วยที่ใส่ปริมาณสารละลายเพกติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10 % เมื่อพิจารณาจากค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ซึ่งมีแรงดึงเพิ่มขึ้น 37 % ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น 19 % มอดุลัสเพิ่มขึ้น 117 % เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแบงก์กล้วยที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยสารละลายเพกตินและเส้นใย แต่เมื่อพิจารณาจากการดึงยึดและเปอร์เซ็นต์การดึงยึด สมบัติเชิงกลรวมดีที่สุด พบได้ในฟิล์มจากแบงก์กล้วยที่ใส่ปริมาณสารละลายเพกติน 40 % ซึ่งมีค่าการดึงยึดเพิ่มขึ้น 200 % เปอร์เซ็นต์การดึงยึดเพิ่มขึ้น 154 % เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแบงก์กล้วยที่ไม่มีการปรับปรุงด้วยสารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย

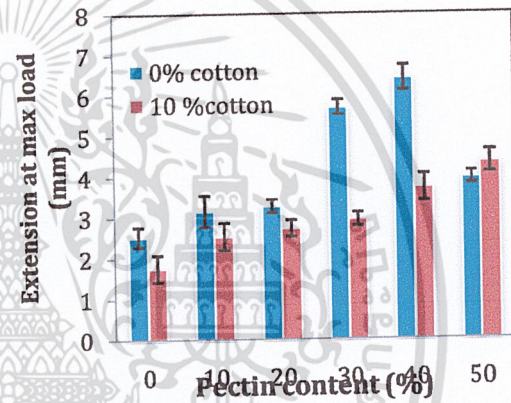


(ก)

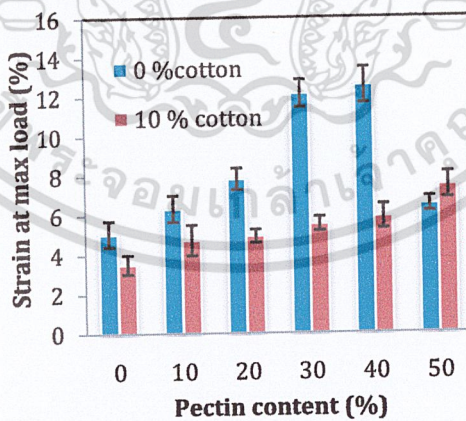
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.25 สมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้าย 10 % เปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ใส่เส้นใยฝ้าย 10 % (ก) แรงดึง (ข) ความแข็งแรงดึง (ค) มอดุลัส (ง) การดึงยืด และ (จ) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Transmission)

จากผลการทดสอบโดยวิธีดูดความชื้น (Desiccant method) ที่อุณหภูมิ 38 ° C และความชื้นสัมพัทธ์ 90 % ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย

สูตร	ความหนา (Micron)	การซึมผ่านของไอน้ำ (วัน/ตารางเมตร/กรัม)
ฟิล์มแป้งกล้วย	140	1134
ฟิล์มแป้งกล้วย + 10% เพกติน	122	1202
ฟิล์มแป้งกล้วย + 30% เพกติน	95	1450
ฟิล์มแป้งกล้วย + 50% เพกติน	90	1521
ฟิล์มแป้งกล้วย + เพกติน0% + เส้นใยฝ้าย10%	135	1182
ฟิล์มแป้งกล้วย + เพกติน10% + เส้นใยฝ้าย10%	124	1271
ฟิล์มแป้งกล้วย + เพกติน30% + เส้นใยฝ้าย10%	130	1196
ฟิล์มแป้งกล้วย + เพกติน50% + เส้นใยฝ้าย10%	105	1352

\*หมายเหตุ ข้อมูลผลการทดสอบจากศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์

จากตารางที่ 4.4 พบว่าฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีการเติมเพกติน ทำให้การซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเพกตินมีความสามารถในการดูดความชื้นได้ดี [36] จากงานวิจัยนี้พบว่า ฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมเพกตินมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำสูงสุด และฟิล์มจากแป้งกล้วยมีการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมเส้นใยฝ้าย นอกจากนี้อาจเกิดขึ้นจากความหนาของฟิล์มที่ลดลง เมื่อพิจารณาฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมเพกตินลงไป 10 % ที่มีการใส่และไม่ใส่เส้นใยฝ้ายที่มีความหนาใกล้เคียงกันพบว่าให้อัตราการซึมผ่านไอน้ำใกล้เคียงกัน

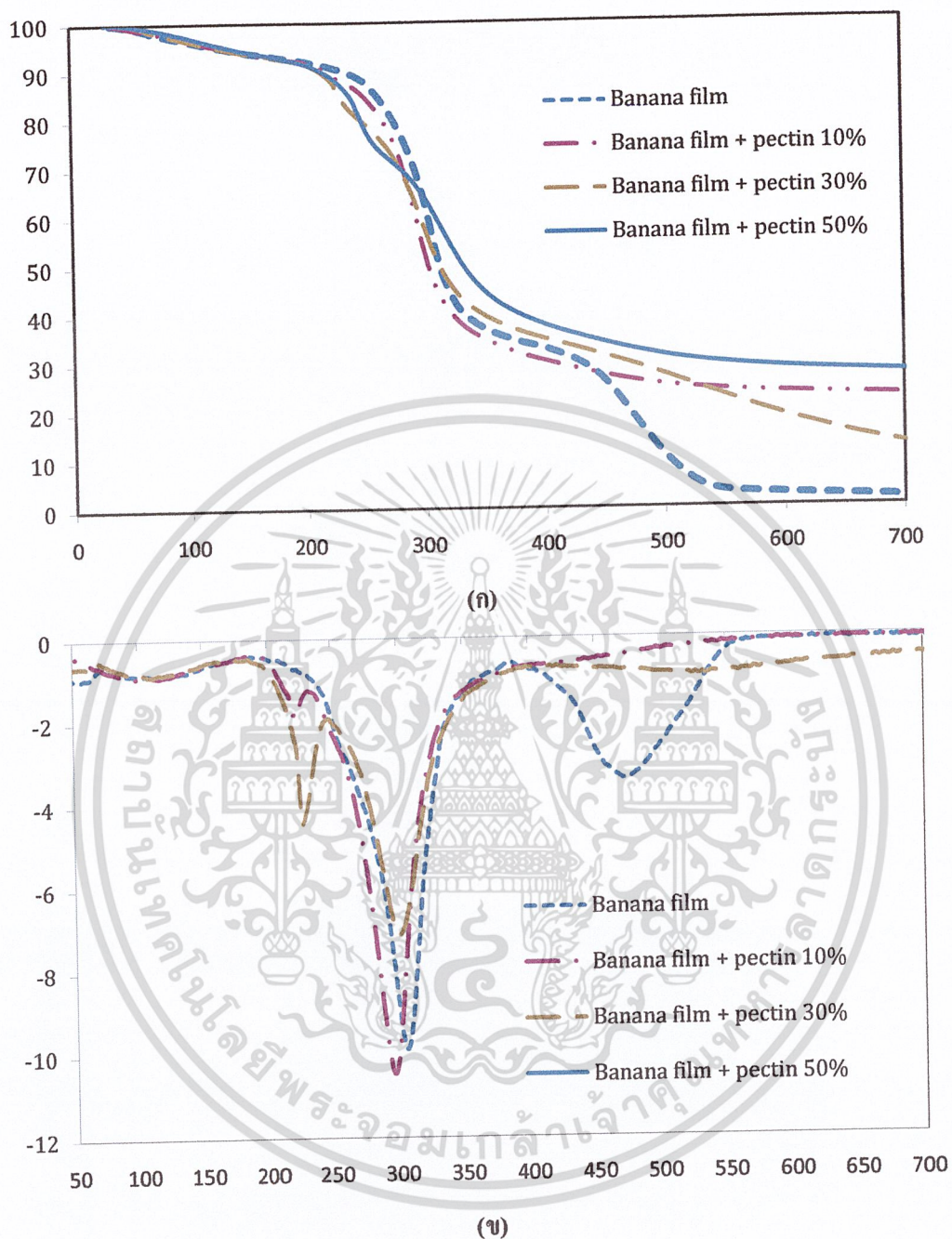
#### 4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

เพื่อศึกษาถึงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกตินและเส้นใยฝ้าย ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยการชั่งตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัมและนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิช่วง 50 - 700 องศาเซลเซียสและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีโดยสมบัติทางความร้อนที่ทำการศึกษา ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของการสลายตัวของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่มีการปรับปรุงด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

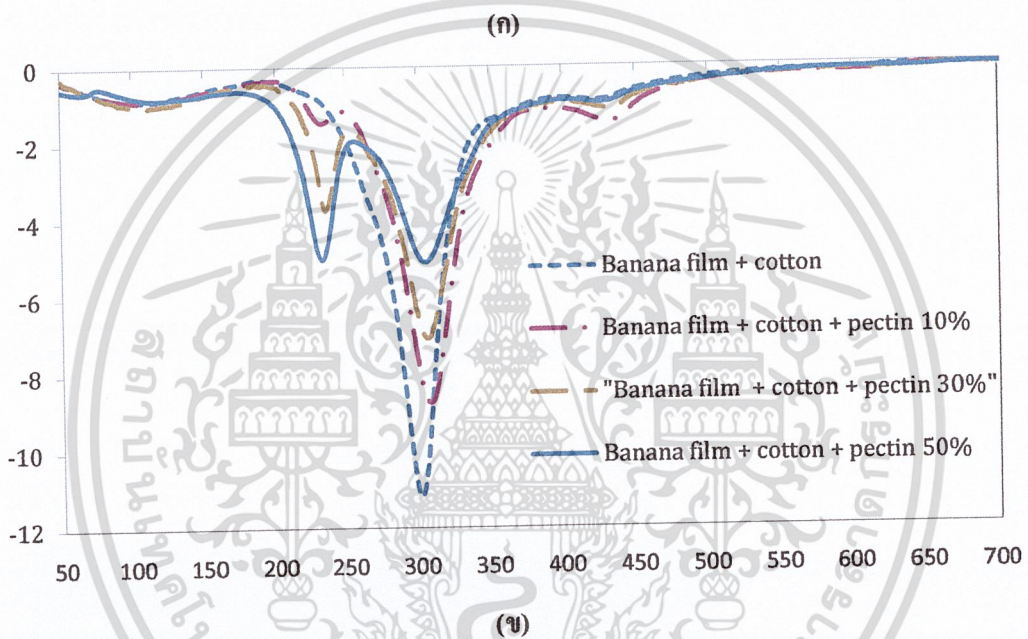
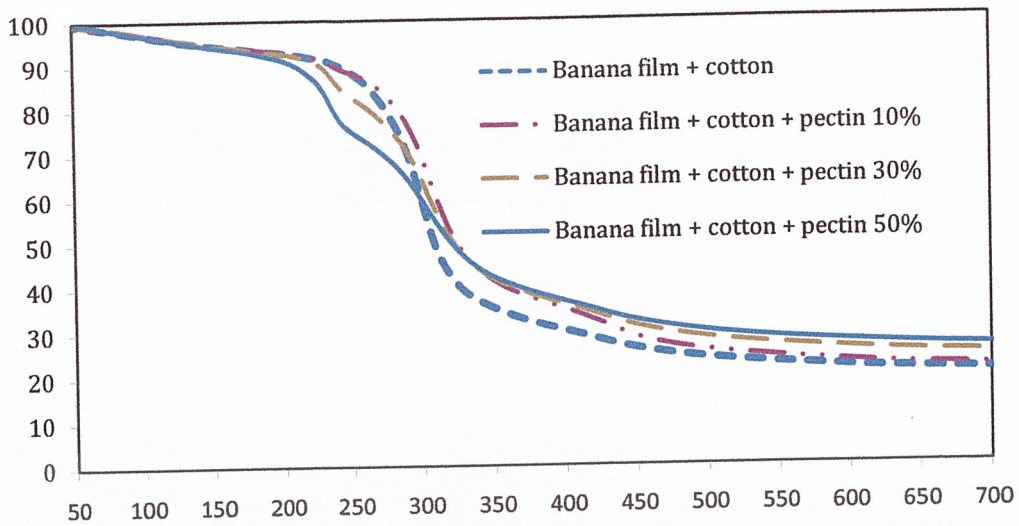
สูตรฟิล์มแป้งกล้วย	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)		
	ช่วงที่ 1 (เพกติน)	ช่วงที่ 2 (แป้งกล้วย)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยฝ้าย)
Banana film	-	275.7	-
Banana film + Pectin 10%	211.0	271.7	-
Banana film + Pectin 30%	215.7	276.5	-
Banana film + Pectin 50%	229.6	295.1	-
Banana film + Cotton fibers 10%	-	272.5	410.7
Banana film + Pectin 10% + Cotton fibers 10%	218.7	283.4	409.8
Banana film + Pectin 30% + Cotton fibers 10%	221.9	280.9	427.9
Banana film + Pectin 50% + Cotton fibers 10%	217.6	279.5	413.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 (ก) TGA (ข) DTG ของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

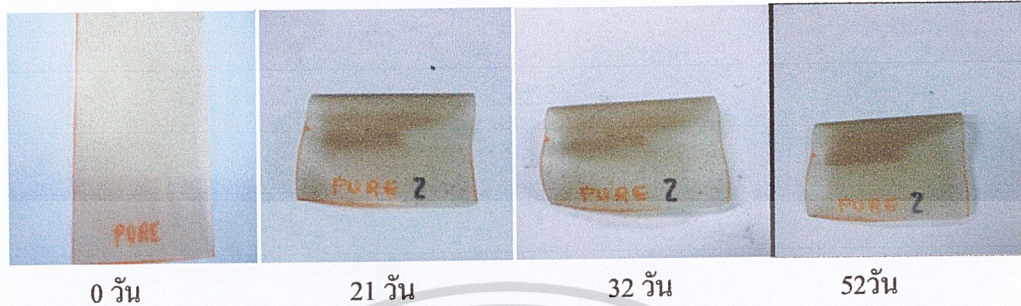


รูปที่ 4.27 (ก) TGA (ข) DTG ของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้าย

จากรูปที่ 4.26 - 4.27 แสดงเทอร์โมแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินในปริมาณต่างๆ และตารางที่ 4.5 พบว่าฟิล์มแป้งกล้วยมีช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่อุณหภูมิ 275.7 °C และเมื่อเติมเพกตินลงไป พบว่าเพกตินมีช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 211.0 - 229.6 °C และช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งกล้วยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใส่เพกตินที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมเส้นใยฝ้ายลงไปช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวมีสามช่วง โดยช่วงอุณหภูมิที่ 211.0 - 229.6 °C เป็นช่วงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเพกติน และช่วงอุณหภูมิที่ 275.7 - 295.1 °C เป็นช่วงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของแป้งกล้วย และช่วงอุณหภูมิที่ 410.7 - 413.3 °C เป็นช่วงอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของเส้นใยฝ้าย

#### 4.9 สมบัติการย่อยสลาย

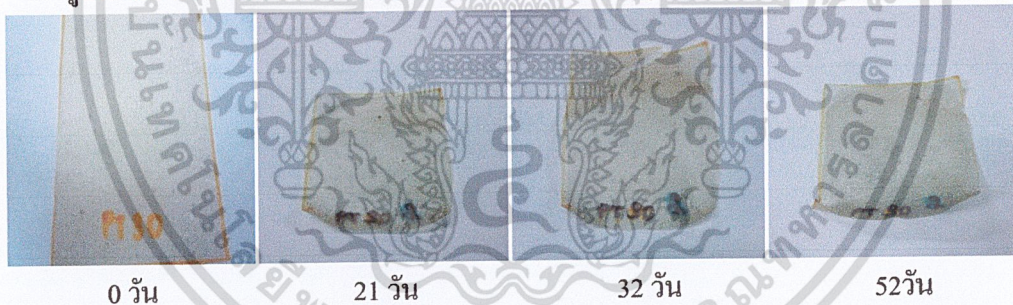
สมบัติการย่อยสลาย ทดสอบได้โดยการฝังดิน โดยนำฟิล์มจากกล้วยมาฝังดินที่มีความเป็นกรดค่าเท่ากับ 7 และควบคุมความชื้นของดินคงที่อยู่ในช่วง 15-20 % เปรียบเทียบน้ำหนักของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป เป็นเวลา 58 วัน



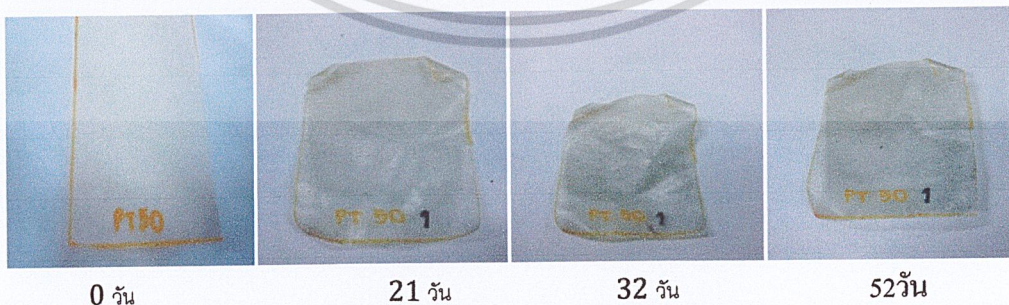
รูปที่ 4.28 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเติมเพคติน 0%



รูปที่ 4.29 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 10 %

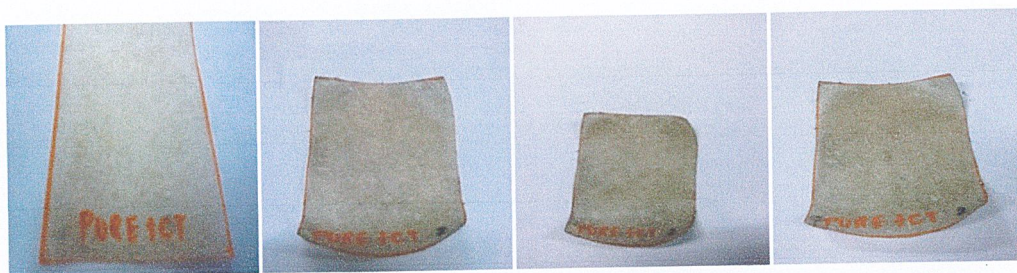


รูปที่ 4.30 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 30%



รูปที่ 4.31 การย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



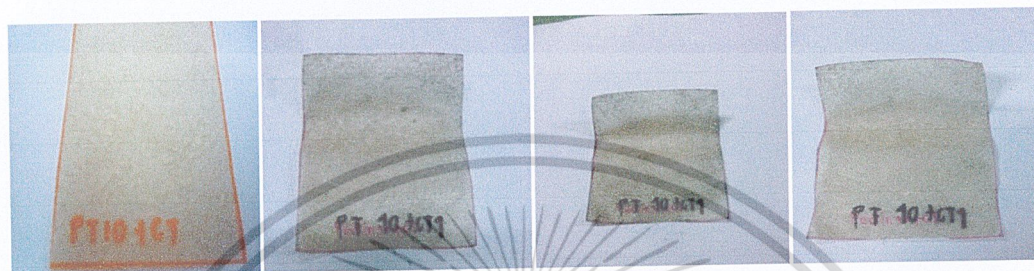
0 วัน

21 วัน

32 วัน

52 วัน

รูปที่ 4.32 การย่อยสลายของฟิล์มจากเป๊งก๊วยที่ปรับปรุงด้วยใยฝ้าย 10%



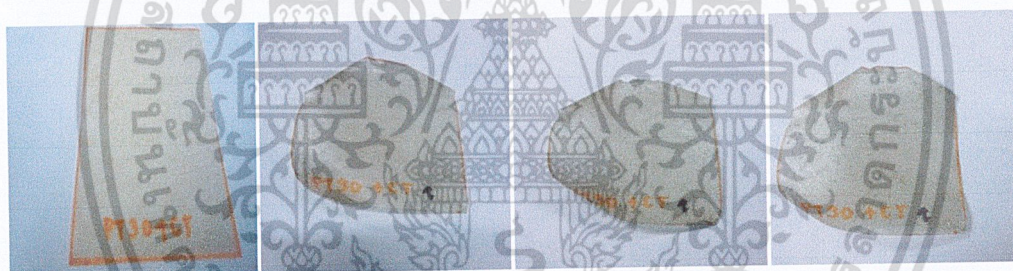
0 วัน

21 วัน

32 วัน

52 วัน

รูปที่ 4.33 การย่อยสลายของฟิล์มจากเป๊งก๊วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 10% และเส้นใยฝ้าย 10%



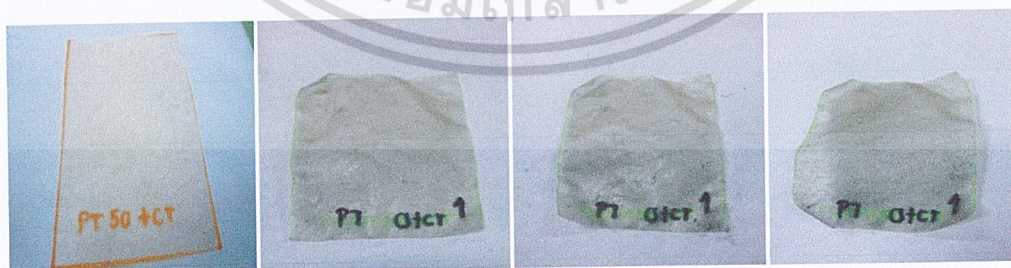
0 วัน

21 วัน

32 วัน

52 วัน

รูปที่ 4.34 การย่อยสลายของฟิล์มจากเป๊งก๊วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 30% และเส้นใยฝ้าย 10%



0 วัน

21 วัน

32 วัน

52 วัน

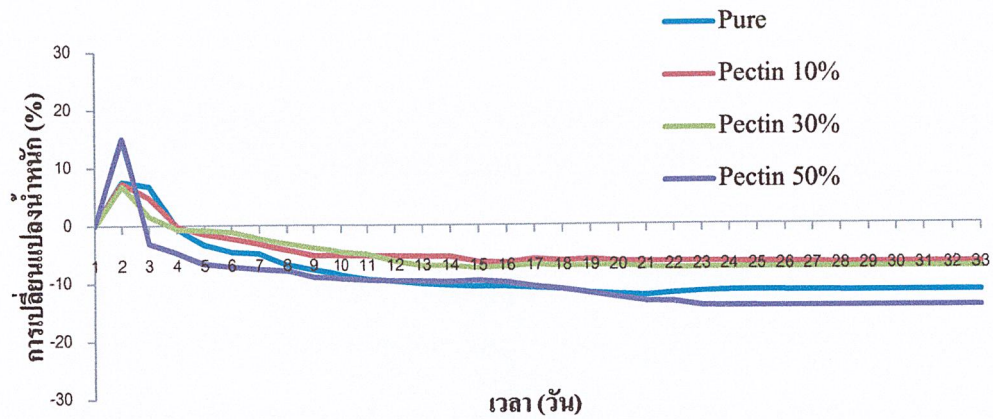
รูปที่ 4.35 การย่อยสลายของฟิล์มจากเป๊งก๊วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 50% และเส้นใยฝ้าย 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

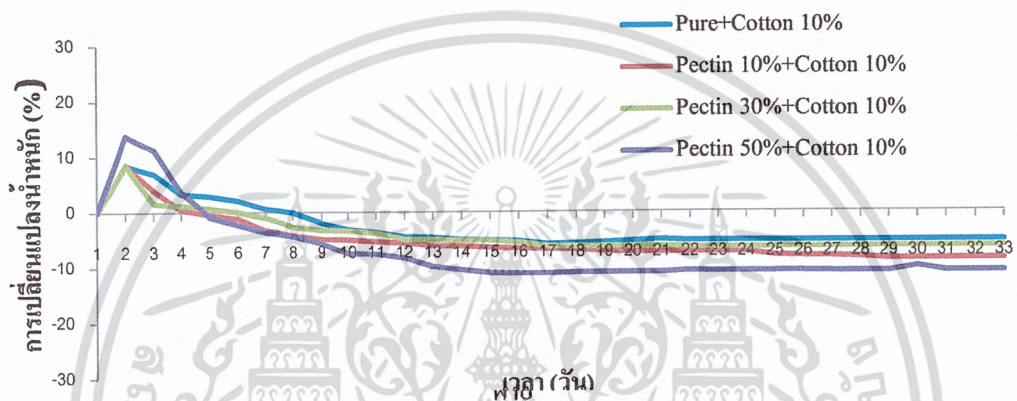
ตารางที่ 4.6 ลักษณะของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งกล้วย เนื่องจากการฝังดิน

ปริมาณ %		ลักษณะของชิ้นงานฟิล์มจากแป้งกล้วย
เพกติน	เส้นใยฝ้าย	
0	0	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มบิดเบี้ยว เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มม้วนงอ เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานแข็งขึ้น เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานเกิดรอยแตก เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานเปราะมากขึ้น
10	0	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มบิดเบี้ยว เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มม้วนงอ เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานแข็งขึ้น เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานม้วนงอมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานเปราะมากขึ้น
30	0	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มบิดเบี้ยว เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานเริ่มม้วนงอ เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานแข็งขึ้นและเกิดรอยแตก เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานม้วนงอมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น
50	0	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มบิดเบี้ยว เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานคงสภาพเดิม เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานบิดเบี้ยวมากขึ้น เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานบิดเบี้ยวมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น
0	10	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มโค้งงอ เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานโค้งงอมากขึ้น เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานเริ่มแข็งขึ้น เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานแห้งแข็งมากขึ้น
10	10	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มโค้งงอ เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานโค้งงอมากขึ้น เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานเริ่มแข็งขึ้น เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานแห้งแข็งมากขึ้น
30	10	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มโค้งงอ เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานโค้งงอมากขึ้น เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานเริ่มโค้งงอมากขึ้น เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น
50	10	ผ่าน ไป 7 วัน ชิ้นงานเริ่มบิดเบี้ยว เมื่อผ่านไป 14 วัน ชิ้นงานบิดเบี้ยวมากขึ้น เมื่อผ่านไป 21 วัน ชิ้นงานคงสภาพเดิม เมื่อผ่านไป 28 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น เมื่อผ่านไป 32 วัน ชิ้นงานแห้งมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการย่อยสลายของฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน



จากการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่า ฟิล์มจากแป้งกล้วยทุกสูตรมีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน กล่าวคือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการฝังดิน เนื่องจากฟิล์มแป้งกล้วยมีการดูดความชื้นมาจากดิน ดังรูปที่ 4.36 และรูปที่ 4.37 และพบว่าฟิล์มแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 50% มีการดูดความชื้นได้มากที่สุด เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสูงที่สุด และในช่วงหลังเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในดิน นอกจากนี้ฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินเกิดการย่อยสลายได้ช้ากว่าฟิล์มจากแป้งกล้วย โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่น้อยกว่า (รูปที่ 4.36) และเมื่อเติมเส้นใยฝ้ายลงในฟิล์มจากแป้งกล้วยสูตรต่างๆ (รูปที่ 4.37) พบว่า ฟิล์มจากแป้งกล้วยที่เติมเส้นใยฝ้ายลงไป ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นช้าลงอย่างชัดเจน ส่วนฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินและเส้นใยฝ้ายทำให้แนวโน้มการย่อยสลายไม่เปลี่ยนแปลงไปจากฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกตินอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบซึ่งฟิล์มจากแป้งกล้วยทุกสูตร พบว่าฟิล์มแป้งกล้วยมีแนวโน้มย่อยสลายเร็วที่สุด ส่วนฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10% มีแนวโน้มย่อยสลายช้าที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

1. จากการศึกษาสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มในทุกสูตร มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ  $V_H$ -type และการเติมเพกตินและเส้นใยฝ้ายทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเพิ่มขึ้น

2. จากการศึกษาสมบัติด้านการดูดซับน้ำ พบว่าฟิล์มจากแป้งกล้วยผสมเพกติน 50% สามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างฟิล์มที่ไม่เติมเส้นใยฝ้ายกับที่เติมเส้นใยฝ้าย พบว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยฝ้ายมีการดูดซับน้ำที่น้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมเส้นใยฝ้าย

3. จากการศึกษาสมบัติด้านการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันหลักที่มีอยู่ในฟิล์มจากแป้งกล้วย และหมู่ฟังก์ชันหลักที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงหมู่เพกตินและเส้นใยฝ้าย นอกจากนี้พีคช่วง OH-stretching เกิดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง

4. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าการเติมสารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้ายลงในฟิล์มจากแป้งกล้วยแสดงความเข้ากันได้ระหว่างสารละลายเพกติน แป้งกล้วย และเส้นใยฝ้าย

5. จากการศึกษาสมบัติด้านสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณสารละลายเพกตินเป็น 10ค่าแรง % ดึง ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสมีแนวโน้มสูงที่สุด ส่วนค่าการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด มีสูงสุดที่ปริมาณสารละลายเพกตินค่า 40% นอกจากนี้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดูลัส ของสูตรที่เติมเส้นใยฝ้ายมีค่าสูงกว่าสูตรที่ไม่ได้ใส่เส้นใยฝ้าย สำหรับสมบัติเชิงกลรวมดีที่สุด พบได้ในฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่ปริมาณสารละลายเพกติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10 % โดยพิจารณาจากค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดูลัส แต่เมื่อพิจารณาจากการดึงยืดและเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสมบัติเชิงกลรวมดีที่สุด พบได้ในฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ใส่ปริมาณสารละลายเพกติน 40 %

6. พบว่าจากการศึกษาสมบัติด้านสมบัติด้านการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มที่ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่มีการเติมเพกติน ทำให้การซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น ที่ฟิล์มแป้งกล้วยที่เติมเพกติน 50 % ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงสุด และต่ำสุดพบในฟิล์มจากแป้งกล้วย

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งกล้วยมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณเพกตินที่เพิ่มขึ้น

8. พบว่าจากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าฟิล์มแป้งกล้วยมีแนวโน้มย่อยสลายเร็วที่สุด ส่วนฟิล์มจากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10% มีแนวโน้มย่อยสลายช้าที่สุด

9. สรุปสูตรที่มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด จากงานวิจัยนี้ คือ फिल्मจากแป้งกล้วยที่มีเพกติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10 % โดยพิจารณาจากการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกล และการซึมผ่านไอน้ำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมและทดสอบฟิล์มจากแป้งกล้วย ที่ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มแป้งกล้วยโดยใช้สารเสริมแรงชนิดอื่น เช่น วนิน
2. ศึกษาผลของเส้นใยชนิดอื่น ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มจากแป้งกล้วย เช่น เส้นใยปาล์ม เส้นใยไหม เส้นใยมะพร้าว เส้นใยสังเคราะห์
3. ควบคุมการเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน โดยการนำฟิล์มไปอบในตู้สุญญากาศ
4. ควบคุมความหนาของชิ้นงานให้เท่ากันในทุกสูตร เพื่อความแน่นอนของผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] พชรินทร์ โศตรสุวรรณ, พินทุอร พวงมาลี และพนิดา เจริญสุข" .ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2552 .
- [2] [http://www.tbia.or.th/en/post.php?post\\_id=26](http://www.tbia.or.th/en/post.php?post_id=26)
- [3] [http://www2.mtec.or.th/th/special/...plastic/bio\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/...plastic/bio_de_plas.html)
- [4] <http://www.european-bioplastics.org>
- [5] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกมล ปิยะจอมขวัญ,เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์เกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 2543.
- [7] [http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/.../chapter2\\_3.html](http://www.eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/.../chapter2_3.html)
- [8] กรมส่งเสริมวิชาการเกษตร. สถิติการเกษตรของประเทศไทยปีการเพาะปลูก 2535/2536 ถึง 2543/44 กรุงเทพฯ. ฝ้ายข้อมูลส่งเสริมการเกษตร กองแผนงาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2544.
- [9] เดช วัฒนชัยยิ่งเจริญ.“ กล้วยไทยสู่ปี 2000.” กรุงเทพฯ กรมส่งเสริมการเกษตร. เอกสารประกอบการสัมมนา , 2542.
- [9] K. Kayisu and L. F Hood . “ Molecular structure of banana starch” Journal of Food Science, 46 (1988) 1894-1897.
- [10] C. K. Lii , S. M. Chang and Y. L.Young. “Investigation of the Physical and Chemical Properties of Banana starches.” Journal of Food Science, 47(1982) 1493-1497.
- [11] สุภารัตน์ อินทรชั้น. “ การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งกล้วย ” วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [12] ญาณิศรา รัตอาภา,วิภา สุโรจนะเมธากุล,มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์,ตวิษา โลหะนะ, ไพลิน ผู้พัฒน์ และวารุณี ประดิษฐ์ศรีกุล. “ การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งกล้วย .” วารสารอาหาร, 23 (3) (2536) 197-208.
- [13] วลัย หุตะโกวิท, นุชรา ศรีอระย้า , ดวงแข สุขโข ,เฟื่องฟ้า เมฆเกรียงไกร ,รัมภา สุวรรณพฤกษ์,จุฑา วิริยะ และวิไลลักษณ์ สุทธา “ กล้วยไทยสู่ปี 2000. ” กรุงเทพฯ กรมส่งเสริม การเกษตร เอกสารประกอบการสัมมนา . 2542.
- [14] อรอุษา สรวารี “สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม1.” ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] มณฑา จันทร์เกิดเล็ก “วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น.” ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร.2541.
- [16] พรศักดิ์ ศรีอมรศักดิ์ .“ เพกติน . พอลิเมอร์ชีวภาพทางเภสัชกรรม :” โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากรหน้า . 188, 2551
- [17] เกศศิณี ตระกูลทิวากร, วิชา สุโรจนะเมธากุล, ประชา บุญญศิริกุล และสมยศ จรรยาวิลาศ. “ การทำฟิล์มที่รับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง.” วารสารอาหาร , 26 (2529) 249-262.
- [18] สุวีรยา ส่งแก้วแวงอาแซ, แวงหามะวีริยะ, ทองเรือง และณัฐนิ โล่ห์พัฒนานนท์. **ผลของปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิตย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเส้นใยป่านศรนารายณ์.** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี,2551 .
- [19] F. H. Otey, R. P. Westhoff and C. R. Russell. “**Biodegradable films from starch and Ethylene-acrylic acid copolymer.**” *Ind.Eng.Chem.Prod.Res.Dev.*, 16 (1977) 305-308.
- [20] M. L. Fishman, D. R. Coffin, R. P. Konstance and C. I. Onwulata. “ **Extrusion of pectin/starch blends plasticized with glycerol.**” *Carbohydrate Polymers*, 41 (2000) 317– 325.
- [21] ดวงดาว อัจจงค์ และ กาญจนา เจริญกษรธรรม “ **Thermal Properties and Moisture Absorption of LDPE/Banana Starch Biocomposite Films.**” *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 12 ( 1) (2002) 1-10.
- [22] K. Waliszewska,, M. A. Aparicio, L. A. Bello, J. A. Monroy. “**Changes of banana starch by chemical and physical modification.**” , *Carbohydrate Polymers* 52 (2003) 237–242
- [23] A. Dimantov, E. Kesselman, E. Shimoni. “ **Surface characterization and dissolution.**” properties of high amylose corn starch–pectin coatings.”, *Original Research Article Food Hydrocolloids*, 18 (2004) 29-37.
- [24] วรวิทย์ โพนนิกร .“ ผลของแป้งชนิดต่างๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝังกลบ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [25] R. Shi . Q .Liu , T . Ding ,Y. Han ,L. Zhang , D.Chan and W.Tian. “**Ageing of soft Thermoplastic Starch with High Glycerol Content**” , *Journal of Applied Polymer Science*, 103 (2007) 574-586.
- [27] R. Sothornvit and N. Pitak. “**Oxygen permeability and mechanical properties of banana films.**” *Food Research International*, 40 (3) (2007) 365-370.
- [28] พลกฤต พลตรี และศดา俞นาโด “ การพัฒนาแผ่นฟิล์มบรรจุสารสกัดชาเพื่อใช้ทางทันตกรรม โครงการงานพิเศษเภสัชศาสตรบัณฑิต คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.2548.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] สมฤทัย จิตภักดีบดินทร์ และอมราวดี จางวาง. “ฟิล์มเพกตินจากมะนาวรักษาบาดแผล” การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 19 ประจำปี 2552.
- [30] กนกพร สังข์รักษ์ และเจนจิรา โตะแบ “สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดเพกตินจากเศษผักกาดขาวที่เหลือทิ้ง” การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 19 ประจำปี 2552.
- [31] K. N. Waliszewski, M. A. Aparicio, L. A. Bello and J.A. Monroy, “Changes of banana starch by chemical and physical modification”, *Carbohydrate Polymers* , 52 (2003) 237-242.
- [32] G.O. Aspinall, “*Polysaccharides*”, Vol 2 , Academic Press, Florida, 2002
- [33] J. N. BeMiller and R.L. Whistler, “*Starch : chemistry and technology*” , 3<sup>rd</sup> ed., Academic Press, New York, 2009.
- [34] U.S.Elesini , A.P.Cuden and A.F.Richards, “*Study of green cotton fiber*”, *Acta Chimica Slovenica*, 49 (2002) 815-833.
- [35] A. Pawlak and M. Mucha and K. Aoi, “*Retrogradation of Ethylenebisformamide and Sorbitol*”. *Starch*, 58 (2006) 580 -586
- [36] Kenji fuse, Tadao bomba and Shiro Hosoda “*Effects of pectin on fatty acid and glucose absorption and on thickness of unstirred water layer in rat and human intestine*” *Digestive diseases and sciences*, 38 (1989) 1109-1116,
- [37] สุวีรยา สังก้าวแวงอาแซ, แวหามะวีริยะ, ทองเรือง และณัฐณี โล่ห์พัฒนานนท์. ผลของปริมาณเส้นใยต่อสมบัติของคอมโพสิทที่ย่อยสลายทางชีวภาพระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเส้นใยป่านศรนารายณ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี, 2551.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก

ตารางแสดงอัตราส่วนของน้ำ แปะก๊วย กลิเซอรอลและสารละลายเพกติน ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากแปะก๊วย

แปะก๊วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลายเพกติน		ลักษณะทางกายภาพ
			(กรัม)	(%)	
3.00	0.67	60	0.00	0	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียว มีสีน้ำตาลเข้มที่สุด
2.70	0.54	54	0.30	10	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
2.40	0.48	48	0.60	20	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
2.10	0.42	42	0.90	30	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
1.80	0.36	36	0.12	40	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
1.50	0.30	30	0.15	50	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้นมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงอัตราส่วนของน้ำ แป้งกล้วย กลิเซอรอล สารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย ที่ใช้ในการ  
เตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วย

แป้งกล้วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลาย เพกติน (กรัม)	เส้นใย ฝ้าย (กรัม)	กาวกัม (กรัม)	ลักษณะทางกายภาพ
3.00	0.67	60	0	0.030	0.0030	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น เรียบ มีความเหนียว มีสี น้ำตาลเข้มที่สุด
2.70	0.54	54	0.3	0.027	0.0027	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น เรียบ มีความเหนียว เพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาล อ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
2.40	0.48	48	0.6	0.024	0.0024	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น เรียบ มีความเหนียว เพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
2.10	0.42	42	0.9	0.021	0.0021	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น เรียบ มีความเหนียว เพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
1.80	0.36	36	0.12	0.180	0.0180	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น เรียบ มีความเหนียว เพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาล อ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
1.50	0.30	30	0.15	0.015	0.0015	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่น เรียบ มีความเหนียว เพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้นมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงอัตราส่วนของน้ำ แป้งกล้วย กลิเซอรอล สารละลายเพกตินและเส้นใยฝ้าย ที่ใช้ในการ  
เตรียมฟิล์มจากแป้งกล้วย

แป้งกล้วย (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)	น้ำ (กรัม)	สารละลาย เพกติน (กรัม)	เส้นใย ฝ้าย (กรัม)	กัวกัม (กรัม)	ลักษณะทางกายภาพ
3.00	0.67	60	0	0.030	0.0030	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียว มีสีน้ำตาลเข้มที่สุด
2.70	0.54	54	0.3	0.027	0.0027	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
2.40	0.48	48	0.6	0.024	0.0024	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
2.10	0.42	42	0.9	0.021	0.0021	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น
1.80	0.36	36	0.12	0.180	0.0180	ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีสีน้ำตาลอ่อนลง มีความใสเพิ่มขึ้น

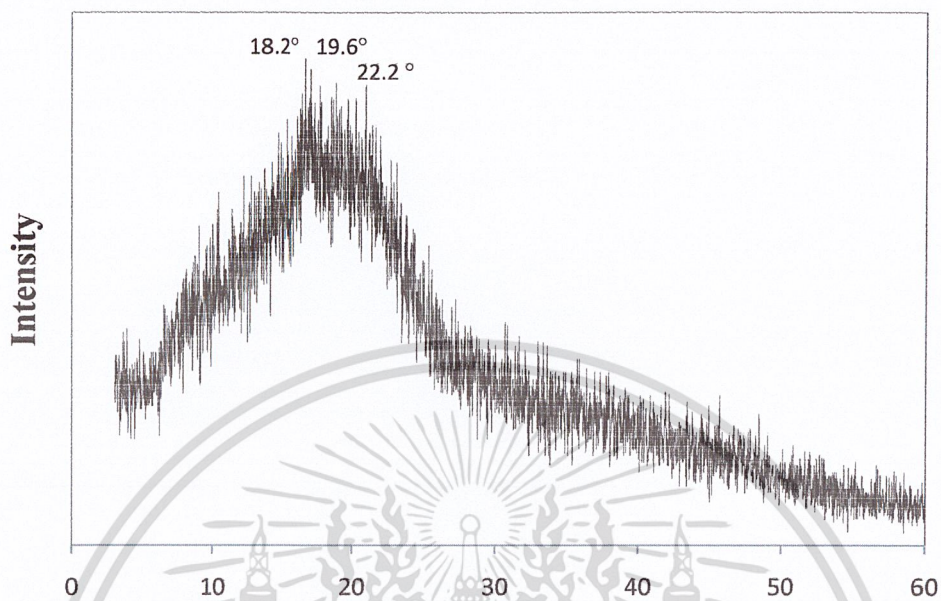
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.50	0.30	30	0.15	0.015	0.0015	<p>ชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีสีน้ำตาลอ่อนลง</p> <p>มีความใสเพิ่มขึ้นมากที่สุด</p>
------	------	----	------	-------	--------	--

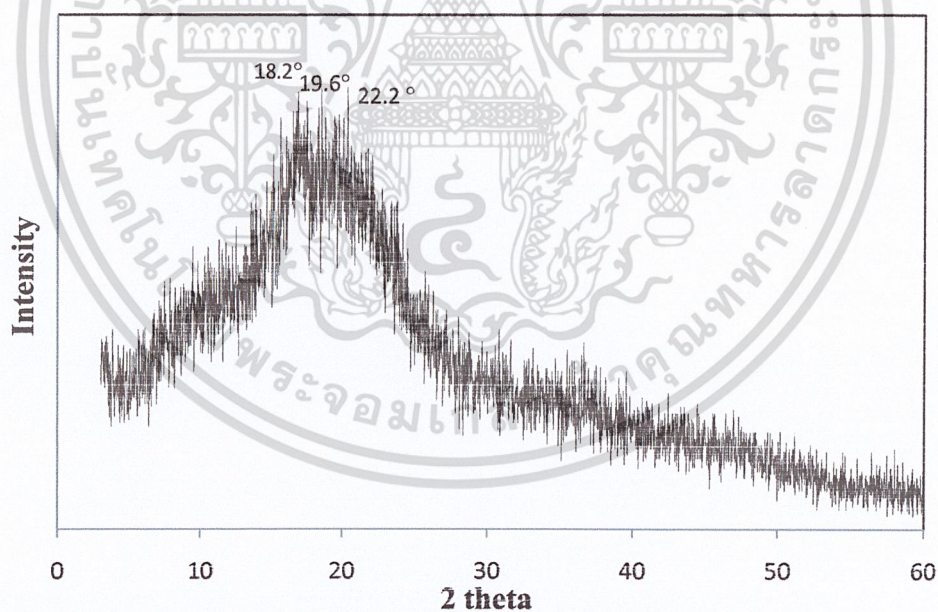


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

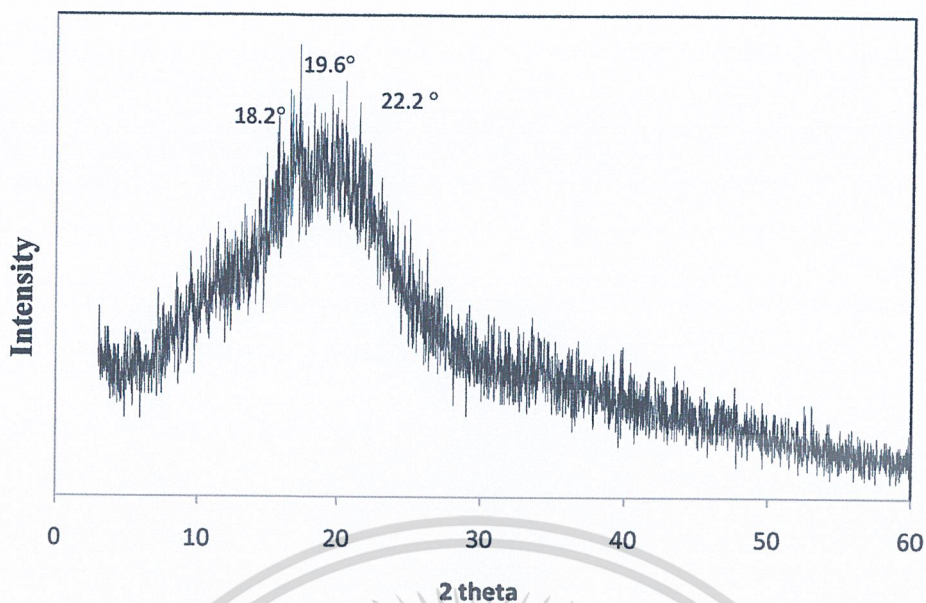


รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย

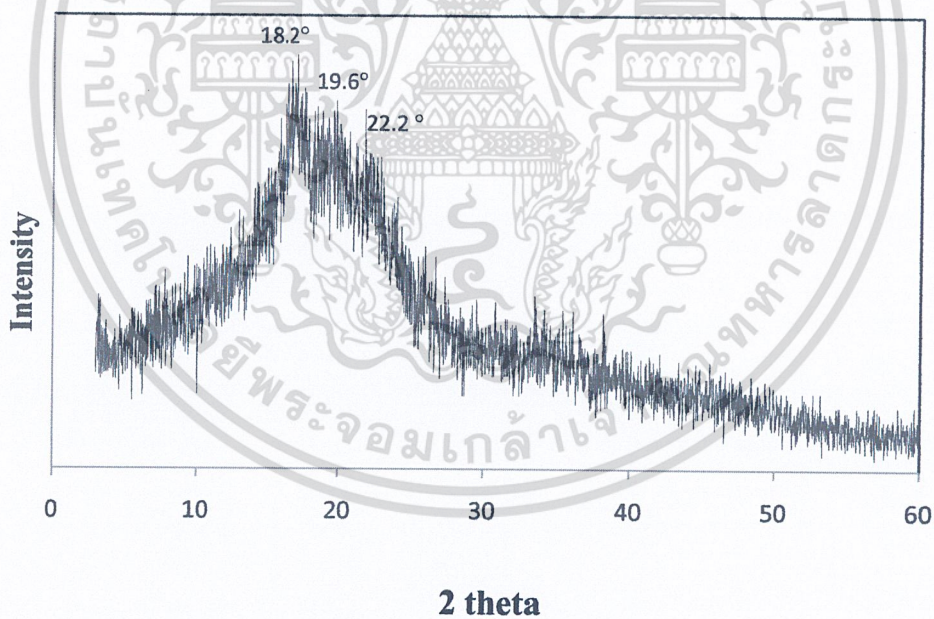


รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติ  
ด้วยสารละลายเพคติน 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

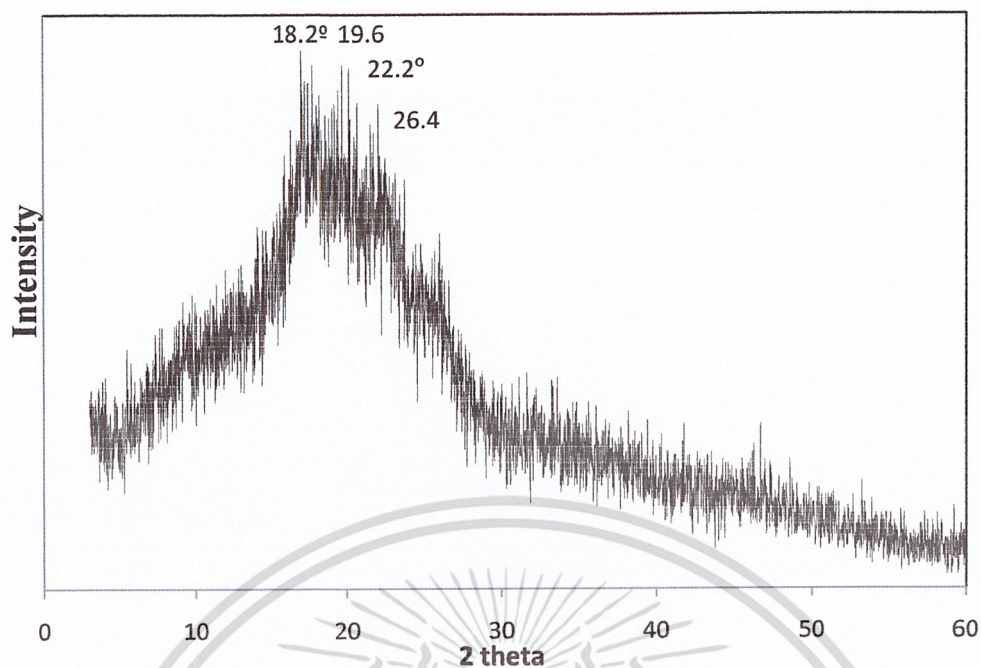


รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติ  
ด้วยสารละลายเพกติน 30%

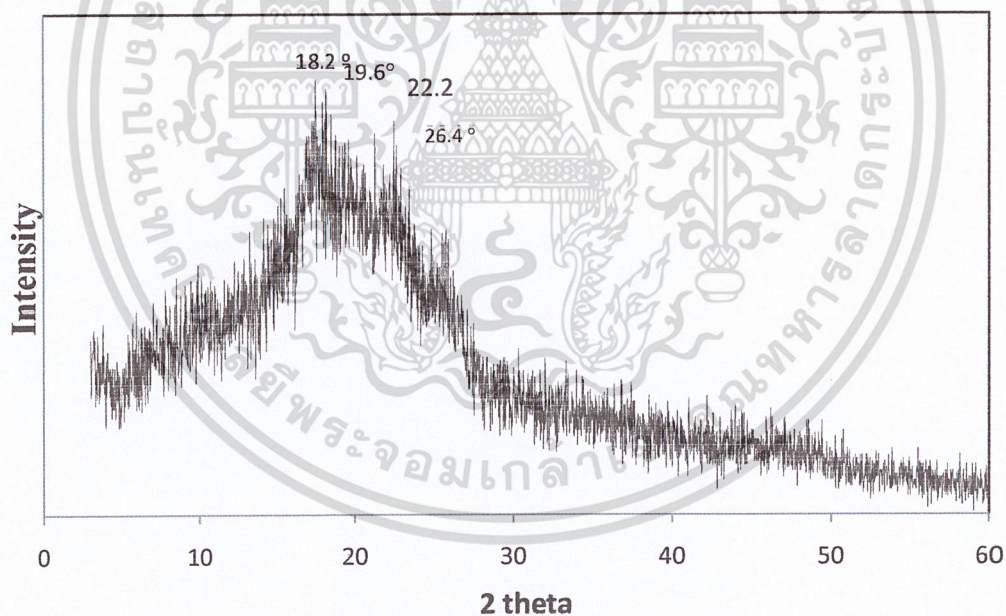


รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติ  
ด้วยสารละลายเพกติน 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

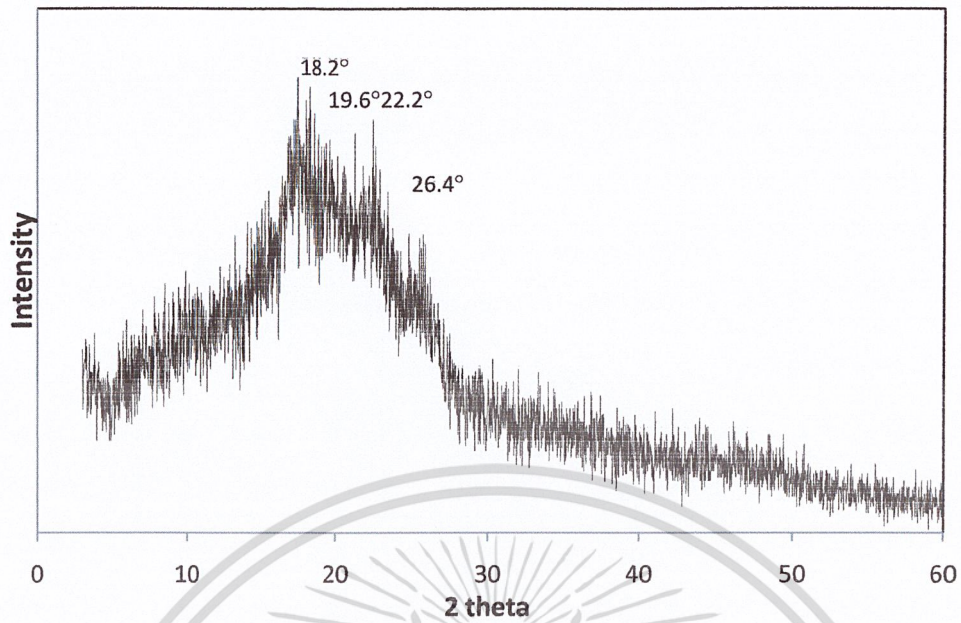


รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10 %

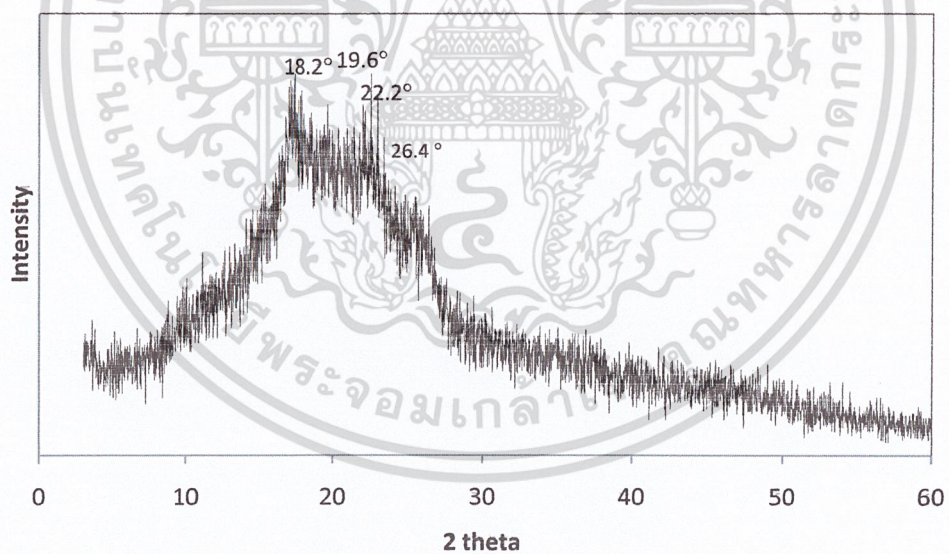


รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย  
สารละลายเพกติน 10% และเส้นใยฝ้าย 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย  
สารละลายเพกติน 30% และเส้นใยฝ้าย 10 %



รูปแสดงดิฟแฟรคโตแกรมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วย

สารละลายเพกติน 50% และเส้นใยฝ้าย 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางแสดง เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์แคลเซียมคลอไรด์ 50% RH ของฟิล์ม  
ย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆและเส้นใยฝ้าย 10 %

วันที่	Pure	10%	30%	50%	Pure + cotton	10% + cotton	30% + cotton	50% + cotton
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	11.93	11.18	11.23	12.71	11.21	11.48	10.92	11.55
2	12.27	11.46	11.92	13.71	11.49	11.81	11.67	12.76
3	12.56	11.59	12.61	14.39	11.63	12.15	12.14	13.46
4	12.56	11.59	13.14	14.39	11.72	12.19	12.22	13.64
5	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.36	12.22	13.64
6	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
7	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
8	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
9	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
10	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
11	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
12	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
13	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
14	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
15	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
16	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
17	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
18	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
19	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
20	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64

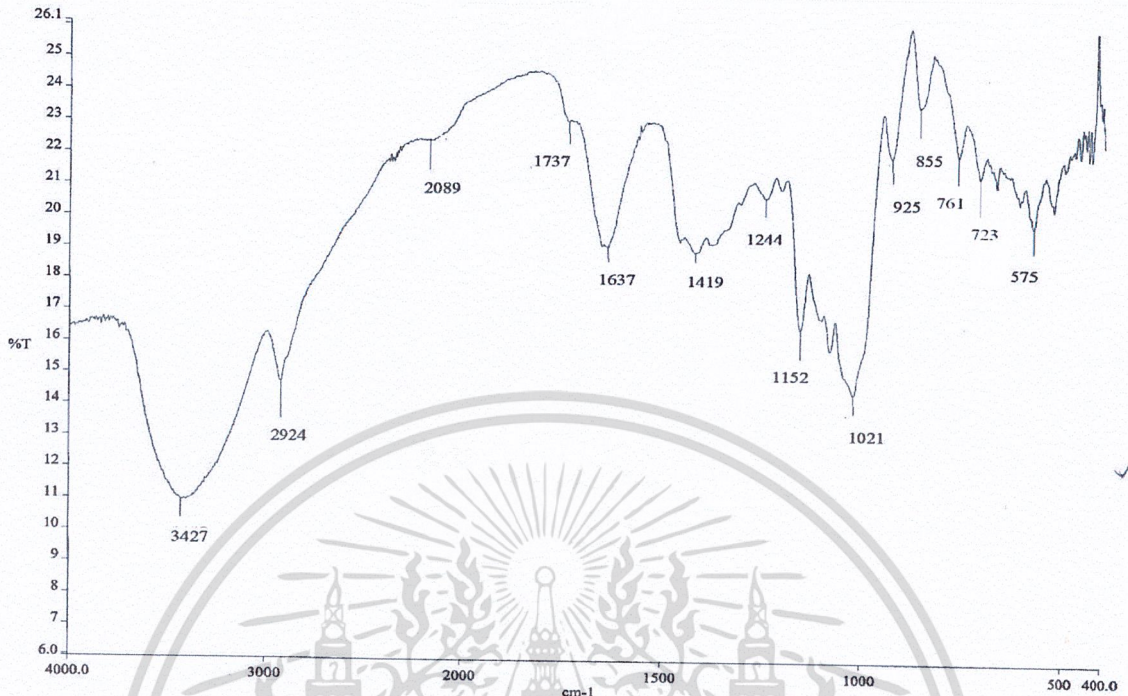
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
22	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
23	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
24	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
25	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
26	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
27	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64
28	12.56	11.59	13.23	14.39	11.86	12.43	12.22	13.64

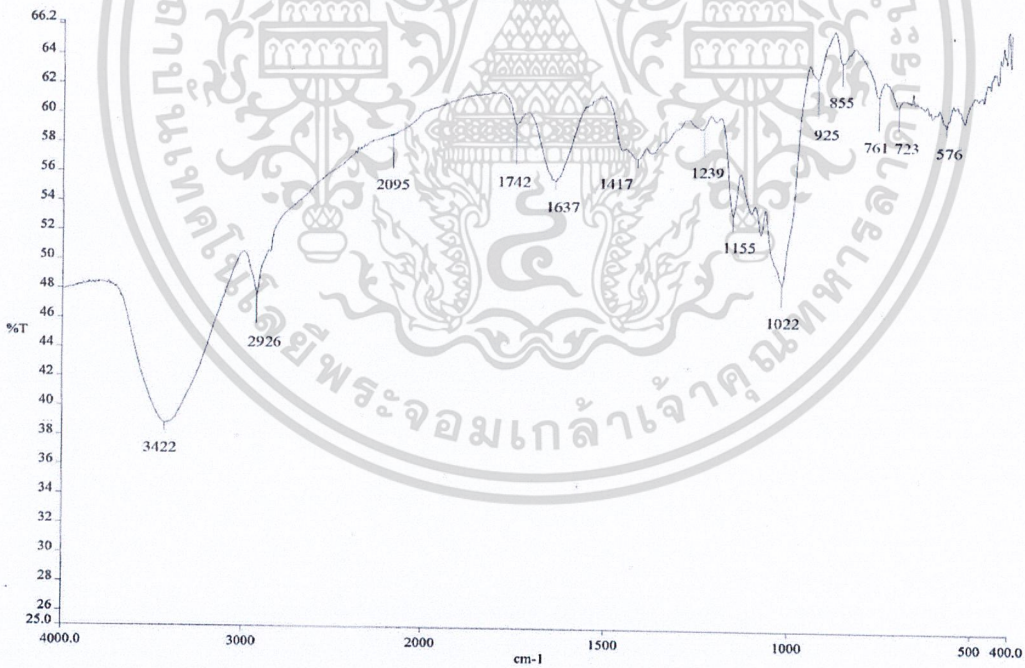


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

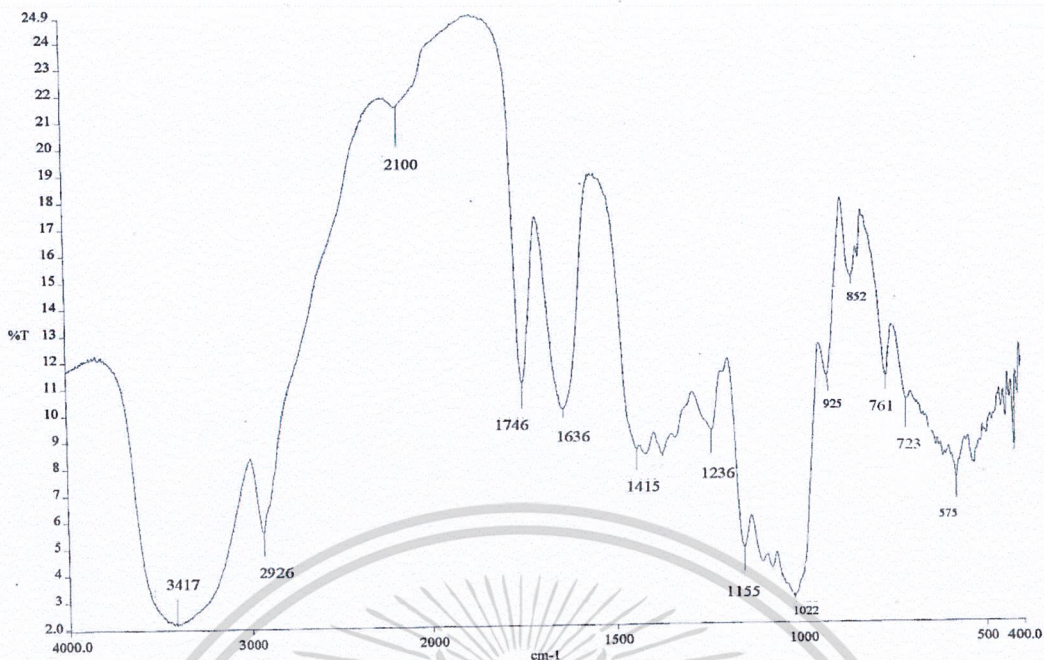


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย

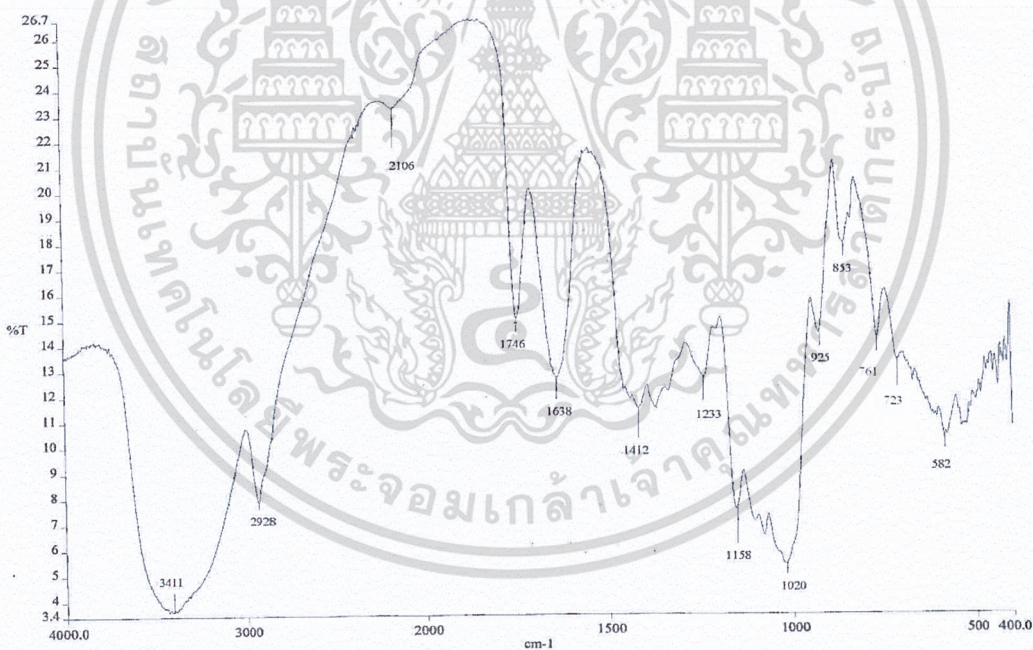


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยปริมาณสารละลายเพคติน 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

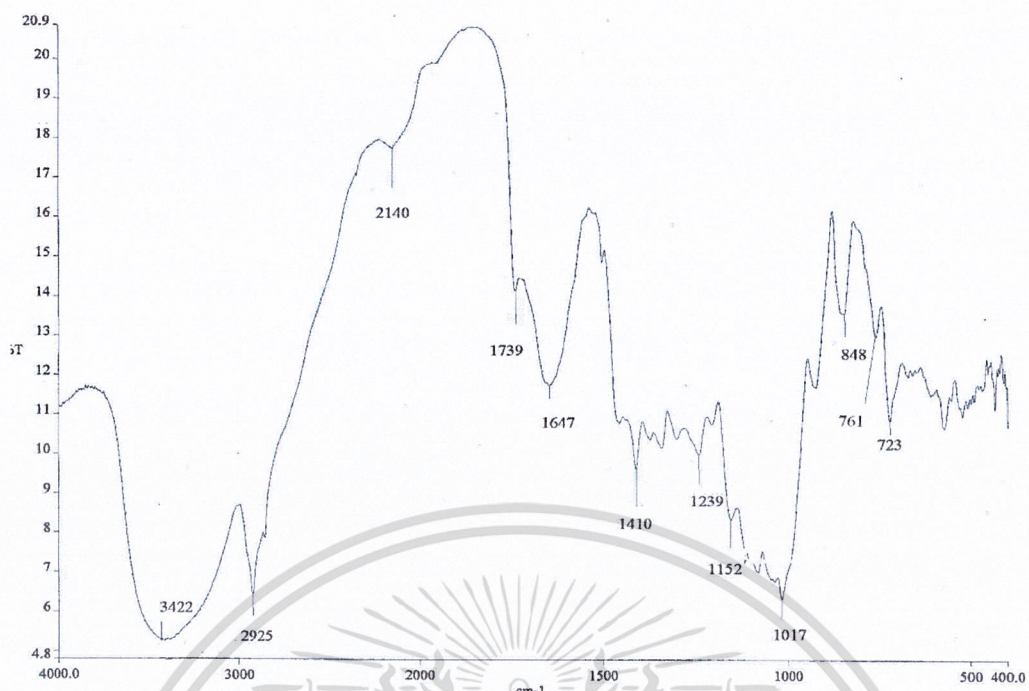


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยปริมาณสารละลายเพคติน30 %

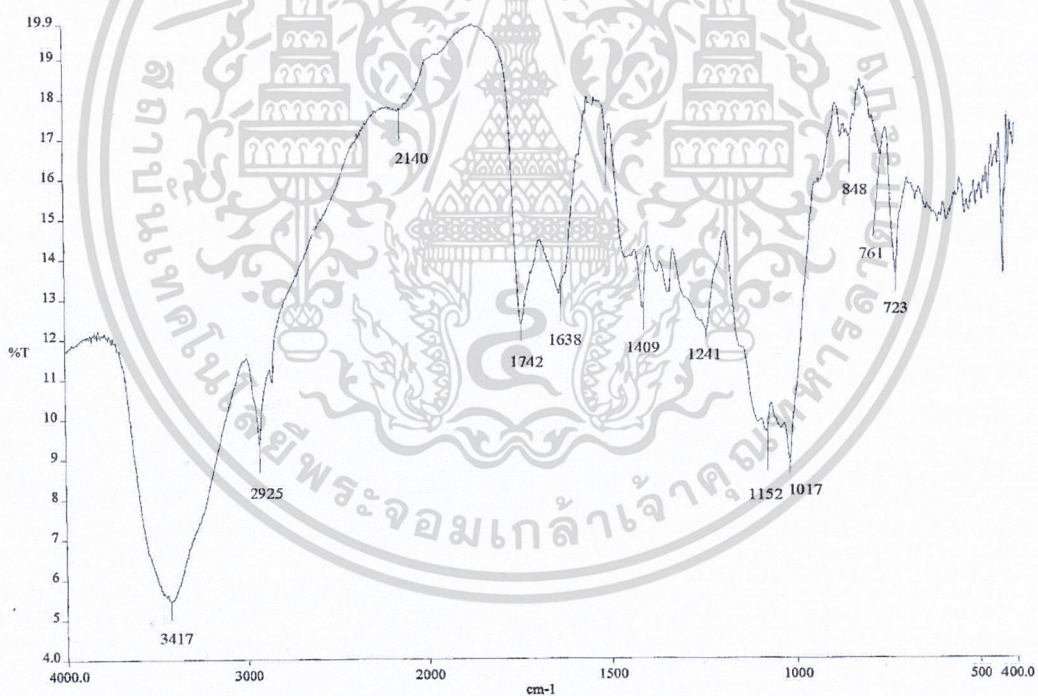


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยปริมาณสารละลายเพคติน50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

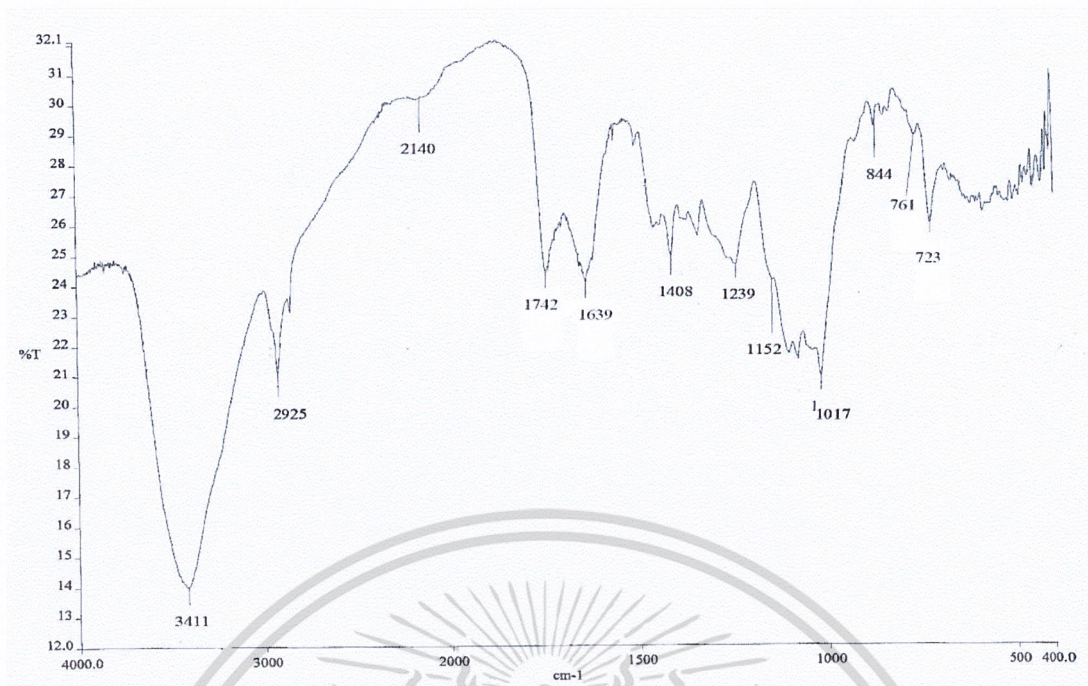


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงเส้นใยฝ้าย 10 %

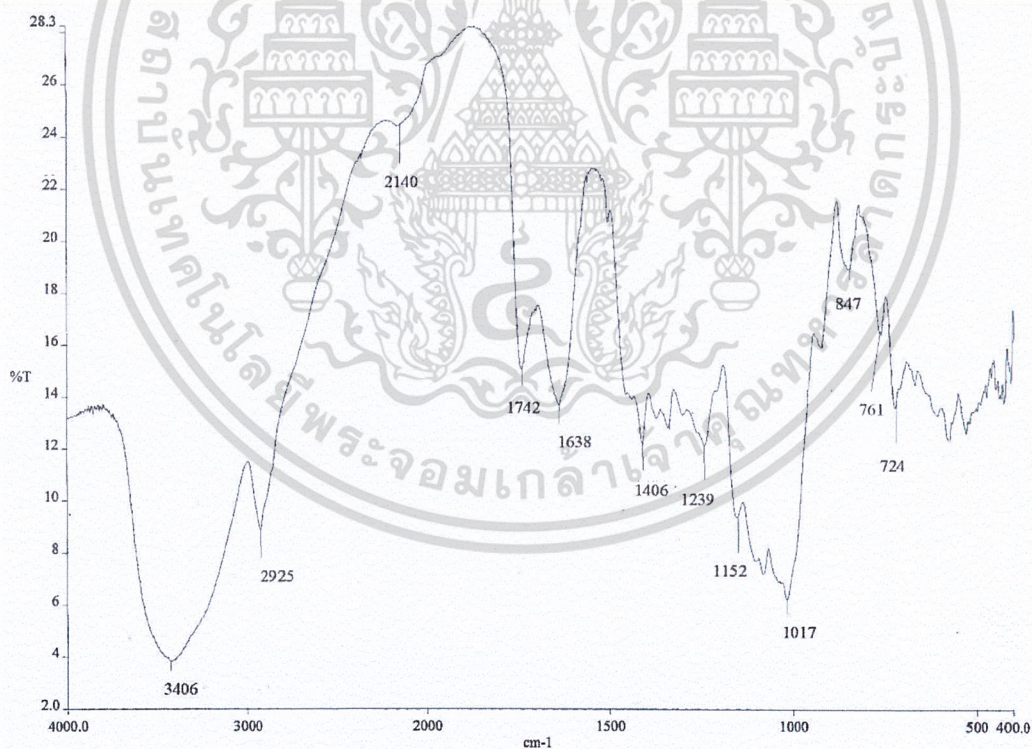


อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพคติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 30 % และ  
เส้นใยฝ้าย 10 %



อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเพกติน 50 % และ  
เส้นใยฝ้าย 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆ

### แรงดึง

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Max load (N)
0 %	26.24 ± 3.62
10%	27.71 ± 1.02
20%	22.24 ± 2.3
30%	20.20 ± 0.66
40%	20.50 ± 2.00
50%	20.70 ± 1.42

### ความแข็งแรงดึง

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Stress at max load (MPa)
0 %	26.24 ± 0.50
10%	27.71 ± 1.4
20%	22.24 ± 1.00
30%	20.20 ± 0.21
40%	20.50 ± 0.67
50%	20.70 ± 0.50

### มอดูลัส

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Young ' Modulus (MPa)
0 %	184.17 ± 46.93
10%	375.5 ± 16.24
20%	224.13 ± 32.93
30%	226.13 ± 33.38
40%	204.69 ± 4.06
50%	207.23 ± 8.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การดึงยืด

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Extension at max load (mm)
0 %	2.53±0.24
10%	3.00±0.38
20%	3.28±0.16
30%	5.70±0.17
40%	6.41±0.3
50%	3.96±0.15

## เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Strain at max load (%)
0 %	5.06±0.65
10%	6.34±0.67
20%	7.83±0.54
30%	12.14±0.70
40%	12.56±0.90
50%	6.52±0.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยผสมสารละลายเพกตินในปริมาณต่างๆ  
และเส้นใยฝ้าย 10 %

**แรงดึง**

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Max load (N)
0 %	34.56± 3.00
10%	38.05± 2.45
20%	23.02 ± 21.54
30%	23.58 ± 3.31
40%	23.69 ± 1.37
50%	23.47 ± 0.81

**ความแข็งแรงดึง**

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Stress at max load (MPa)
0 %	13.14±1.59
10%	15.54± 1.23
20%	10.78±0.53
30%	10.21 ±1.49
40%	10.92± 0.24
50%	10.19±0.56

**มอดุลัส**

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Young ' Modulus (MPa)
0 %	317.24±40.06
10%	381.11±35.17
20%	228.88±15.16
30%	227.68±31.09
40%	210.01±4.21
50%	209.2±13.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การดึงยืด

ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Extension at max load (mm)
0 %	1.75±0.33
10%	2.54±0.34
20%	2.73±0.20
30%	2.95±0.17
40%	3.73±0.34
50%	4.36±0.27

## เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

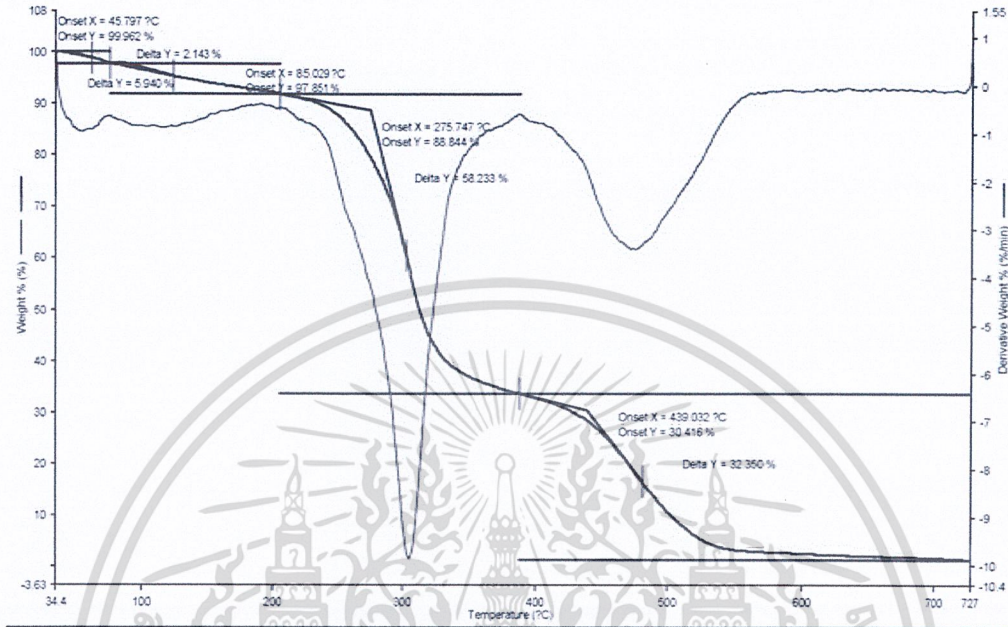
ปริมาณสารละลายเพกติน (%)	Strain at max load (%)
0 %	3.51±0.49
10%	4.73±0.77
20%	4.93±0.33
30%	5.54±0.36
40%	5.89±0.61
50%	7.47±0.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

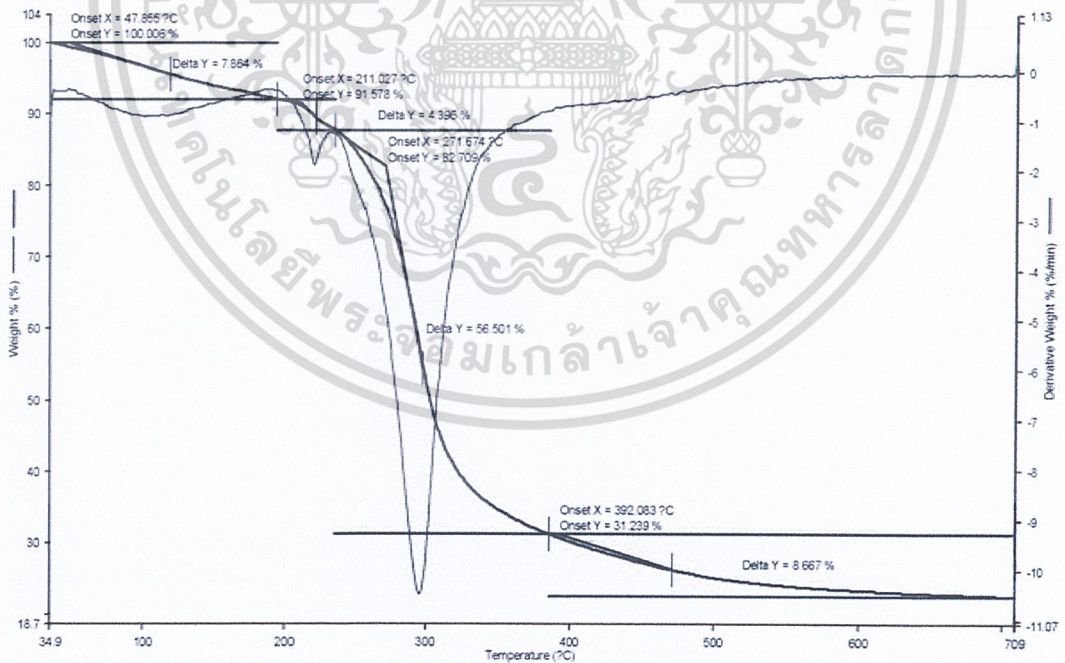
## ภาคผนวก น

### สมบัติการสลายตัวทางความร้อน

กราฟแสดงเทอร์โมแกรมด้วยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA)

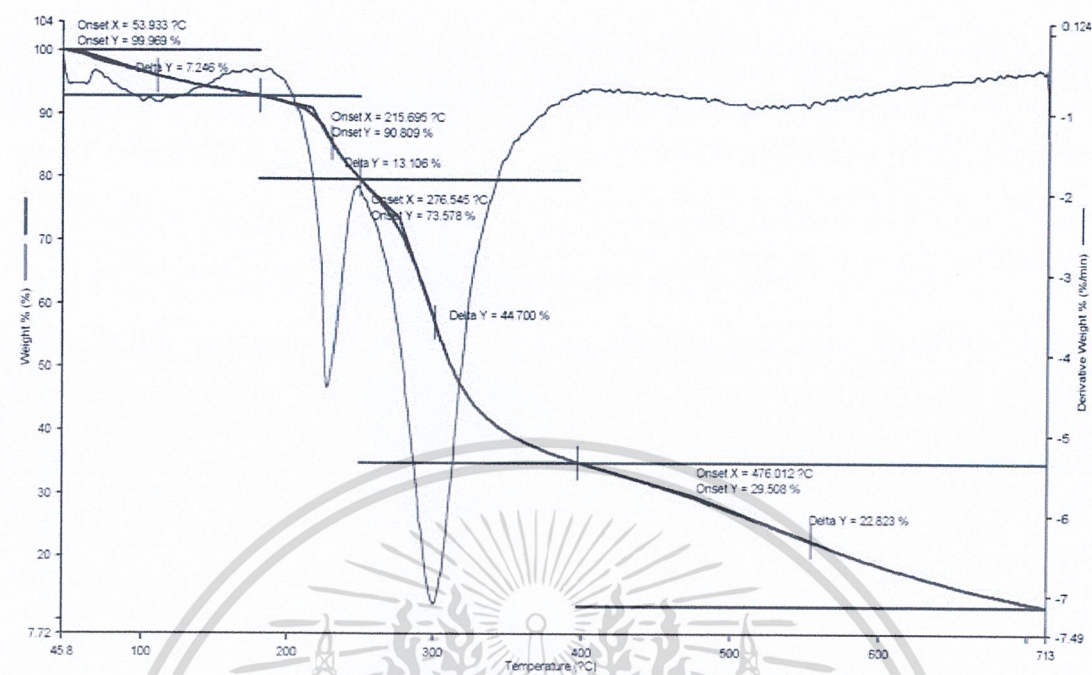


ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วย

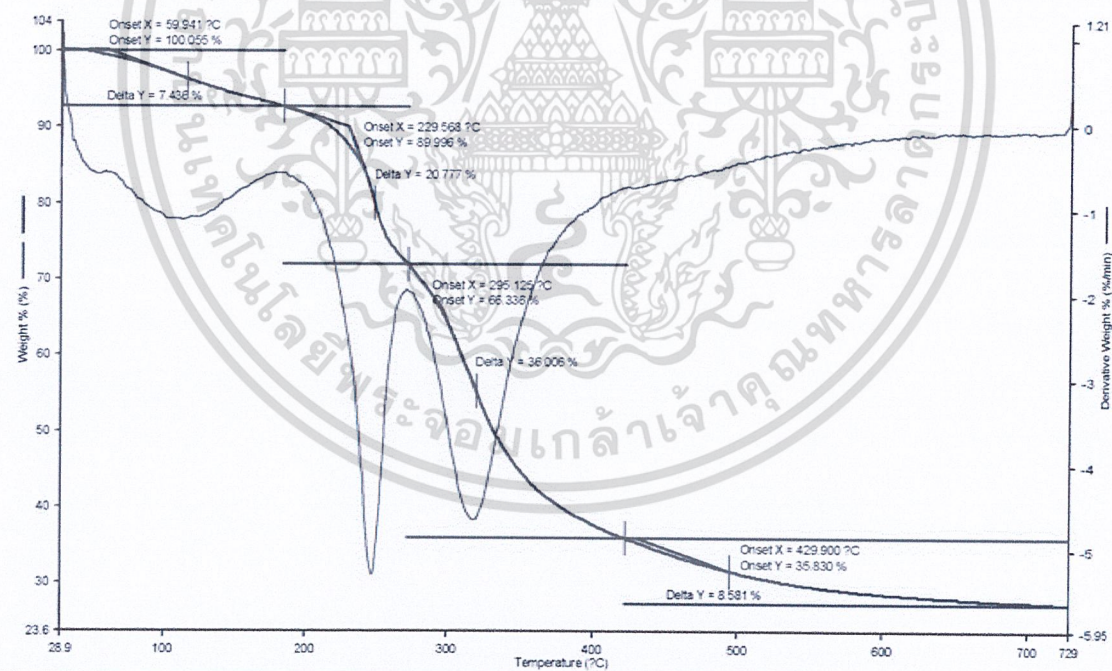


ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

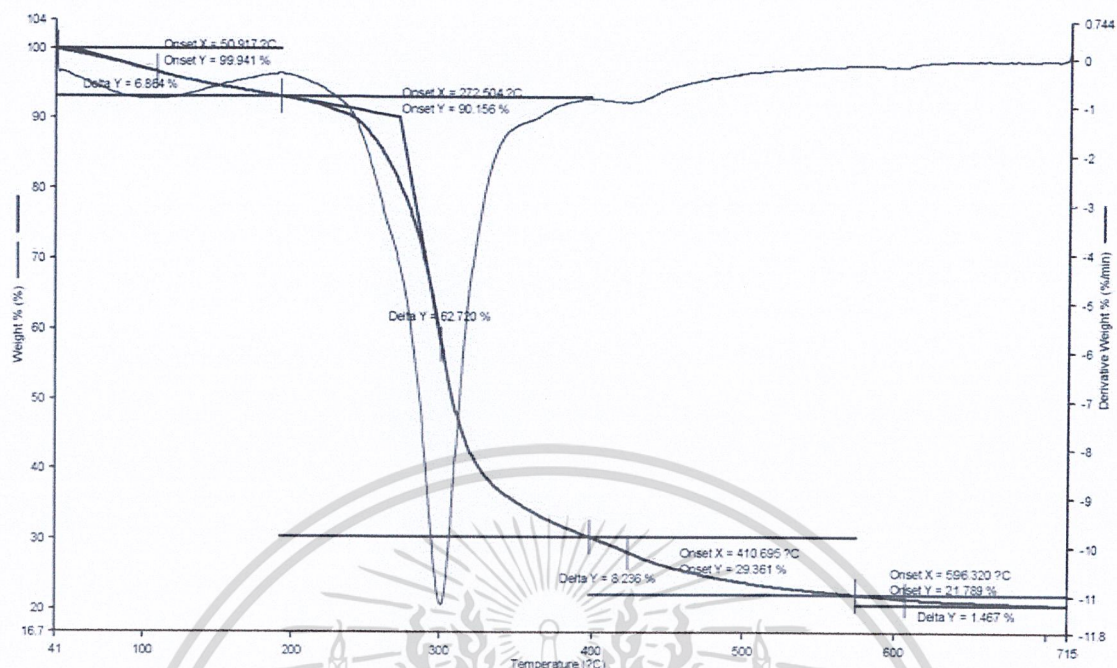


ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 30 %

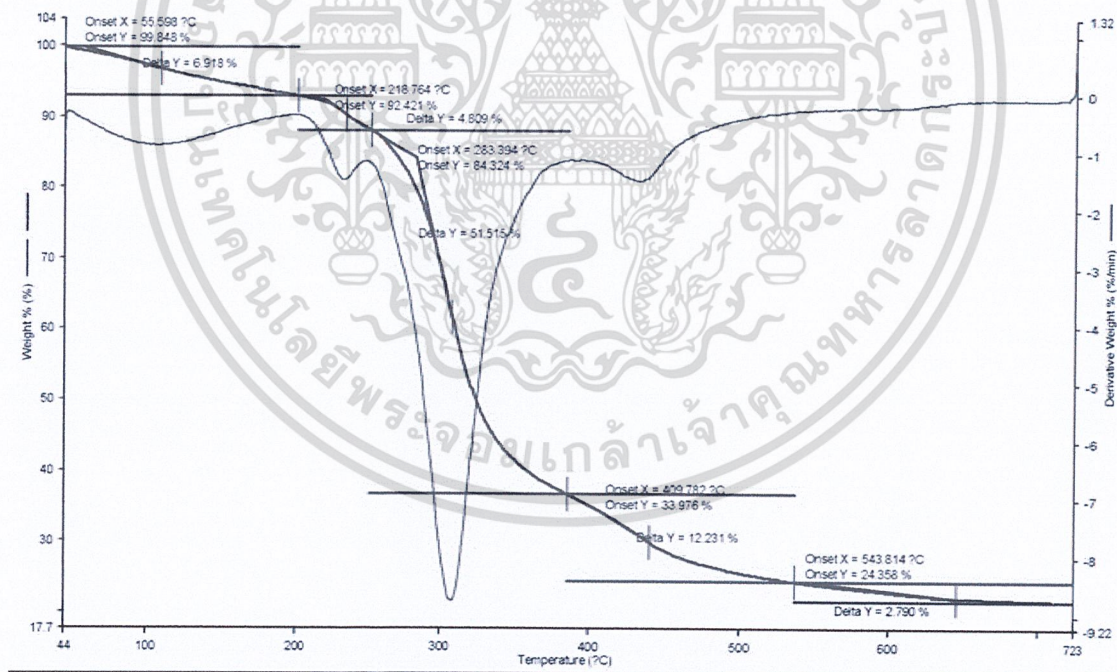


ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

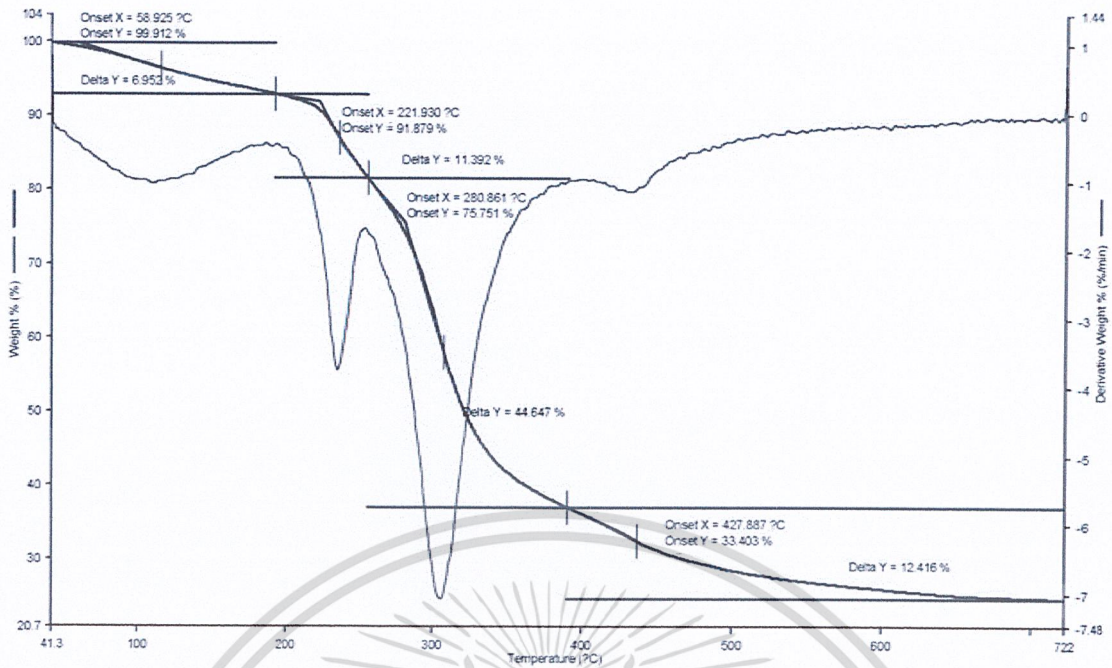


ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10 %

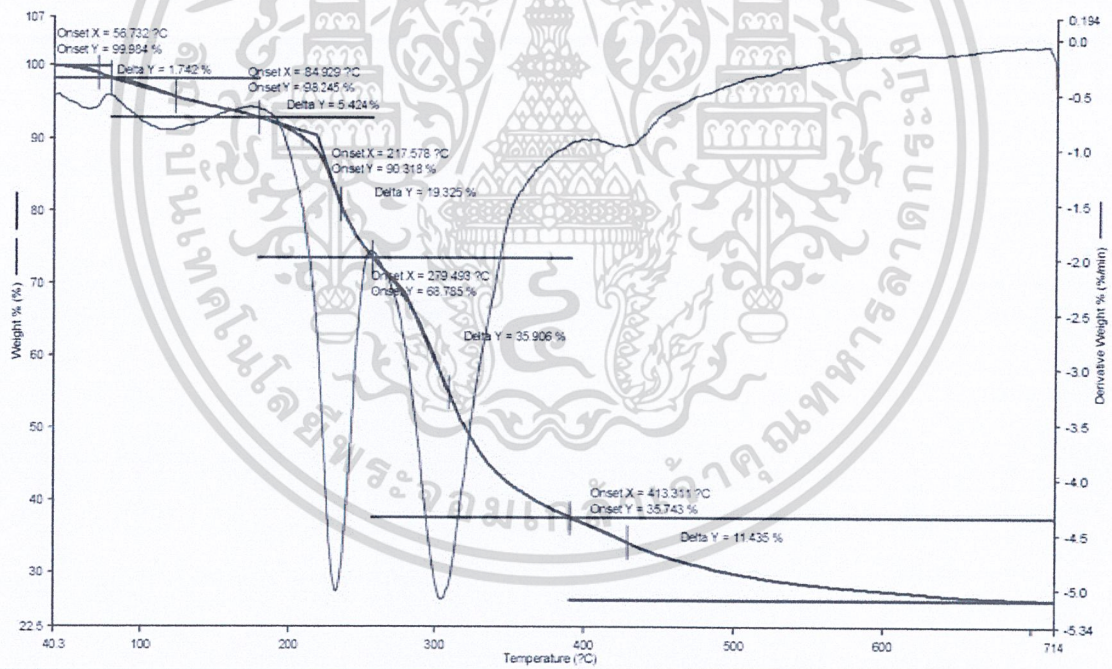


ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 10 % และเส้นใยฝ้าย 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 30 % และเส้นใยฝ้าย 10 %



ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งกล้วยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเพกติน 50 % และเส้นใยฝ้าย 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้