

การสืบค้นตัวแปรอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับสารผสมแป้งและเพคติน

Investigation of electrospinning parameters on starch and  
pectin blend



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-014-044

การสืบค้นตัวแปรอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับสารผสมแป้งและเพคติน

Investigation of electrospinning parameters on starch and pectin blend



T147956



รณกฤต ไชยสุวรรณ์  
RONNAKIT CHAISUWAN

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
พ.ศ. เดือน ปี.....

147956

b. 1286500x  
l. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-SC-M-014-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION OF ELECTROSPINNING PARAMETERS ON STARCH  
AND PECTIN BLEND



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-SC-M-014-044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การสืบค้นตัวแปรอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับสารผสมแป้งและเพคติน”  
“INVESTIGATION OF ELECTROSPINNING PARAMETERS ON STARCH AND PECTIN BLEND”  
ชื่อนักศึกษา นายรณกฤต ไชยสุวรรณ  
รหัสประจำตัว 57605127  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์)  
ภาควิชา เคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม -

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธุ์ ประธานกรรมการ	
รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง)	
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ	
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ พงศสุภดิที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ.2560 เวลา 13.00-16.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 502 อาคารจุฬารามณ์วิทยาลัยลักษณ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุขณิ ธนะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
วันที่..... 24 เดือน..... 70..... พ.ศ..... 60.....

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสืบค้นตัวแปรอิเล็กทรอนิกส์ป็นนิงสำหรับสารผสมแ่งและเพคติน
นักศึกษา	นายรณกฤต ไชยสุวรรณ
รหัสประจำตัว	57605127
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการสืบค้นตัวแปรในการเตรียมเส้นใยจากแ่งข้าวโพดผสมกับเพคตินด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ป็นนิง โดยตัวแปรที่ทำการศึกษได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใย และอัตราการป้อนสารละลาย ทั้งนี้อาศัยการทดสอบสมบัติต่างๆดังนี้ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ความหนืดของสารละลาย สมบัติทางความร้อน การดูดซับ ความชื้น และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบว่าความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ที่ 12 kV และระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใยที่เหมาะสมอยู่ที่ 12 เซนติเมตร โดยเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใยจะทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้การดูดซับความชื้นเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของอัตราการป้อนสารละลายที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 ml/h โดยพบว่าเมื่ออัตราการป้อนสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดบิดบนเส้นใย สมบัติการดูดซับความชื้นลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเพคตินลงในเส้นใยแ่งข้าวโพด มีผลทำให้ขนาดของเส้นใยใหญ่ขึ้น สมบัติทางความร้อนเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับความชื้นลดลง และหมู่ฟังก์ชันมีความสอดคล้องกับเส้นใยข้าวโพด

**คำสำคัญ :** อิเล็กทรอนิกส์ป็นนิง แ่งข้าวโพด เพคติน เส้นใย

<b>Title</b>	Investigation of electrospinning parameters on starch and pectin blend
<b>Student Name</b>	Ronnakit Chaisuwan
<b>Student ID</b>	57605127
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Polymer Technology
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Somsak Woramongkolchai

### Abstract

This research has been investigated parameters on fiber preparation from corn starch mixed with pectin by electrospinning technique. The target parameters were solution concentration, electric potential, distance between needle and fiber support material and feed rate. The testing techniques were viscosity of solution, thermal properties, moisture absorption and functional group analysis. It was found that the optimum solution concentration was at 15%w/w. The higher the concentration has effect to more viscous of solution and loading to larger size of fiber diameter but has no effect to thermal properties. The electric potential and distance between needle and fiber support material were at 12 kV and 12 cm, respectively. The higher electric potential and distance between needle and fiber support material had leading to smaller size diameter but more moisture absorption. The 3 ml/h of feed rate was the optimum condition leading to larger diameter and more bead of fiber and lower moisture absorption. Moreover, the addition of pectin into corn starch, caused more viscosity, larger size of fiber diameter, increasing thermal properties but lower in moisture absorption and this was matching to functional group corn starch fiber.

**Keywords:** electrospinning, corn starch, pectin, fiber

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำเกี่ยวกับ  
โครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มาลินี ชัยศุภกิจสินธ์ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ และ ศ.ดร.ศิริพร  
ดำรงศักดิ์กุล ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษตลอดจนกรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ  
และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.มนตรี ทองคำ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับ การออกแบบการทดลอง ทำ  
ให้งานวิจัยนี้มีแนวทางที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือตลอดการ  
ดำเนินงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา เพื่อน บุคคลท่านอื่น ๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่ง  
ผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายรณกฤต ไชยสุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 เส้นใยนาโน .....	4
2.1.1 กระบวนการเตรียมเส้นใยนาโน .....	4
2.1.2 หลักการเกิดเส้นใยโดยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง .....	9
2.1.3 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยในกระบวนการ อิเล็กโตรสปินนิง .....	13
2.1.3.1 พารามิเตอร์เชิงสารละลายพอลิเมอร์ .....	13
2.1.3.2 พารามิเตอร์เชิงกระบวนการ .....	16
2.1.3.3 พารามิเตอร์เชิงสิ่งแวดล้อม .....	19
2.2 แป้ง (Starch) .....	19
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง .....	19
2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง .....	23
2.2.3 สมบัติของแป้ง .....	26
2.3 เพคติน (Pectin) .....	30
2.3.1 โครงสร้างของเพคติน .....	30
2.3.2 ชนิดของเพคติน .....	31
2.3.3 ค่าการเกิดเอสเทอร์ไฟด์ .....	33
2.3.4 ประโยชน์ของเพคติน .....	34
2.4 การออกแบบการทดลอง .....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง .....	35
2.4.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง .....	36
2.4.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง .....	37
2.4.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล .....	38
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	40
<b>บทที่ 3</b> วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีที่ใช้ .....	47
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	47
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	48
3.3.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง .....	48
3.3.2 การสืบค้นตัวแปรในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับแบ่ง .....	50
3.3.2.1 การสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลาย .....	50
3.3.2.2 การสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้า .....	51
3.3.2.3 การสืบค้นตัวแปรระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย .....	51
3.3.2.4 การสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสาร .....	52
3.3.3 การสืบค้นตัวแปรอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสารผสมแบ่งและเพคติน ..	52
3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization) .....	53
3.4.1 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....	53
3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดย FTIR .....	53
3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน .....	53
3.4.4 ปริมาณการดูดซับความชื้น .....	53
3.4.5 การทดสอบความหนืด .....	54
<b>บทที่ 4</b> ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	
4.1 การออกแบบการทดลอง .....	55
4.2 การสืบค้นตัวแปรในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับแบ่ง .....	58
4.2.1 การสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลาย .....	66
4.2.1.1 ความหนืดของสารละลาย .....	66
4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....	66
4.2.1.3 การดูดซับความชื้น .....	68
4.2.1.4 สมบัติทางความร้อน .....	68

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1.5 การวิเคราะห์หมูฟังก์ชัน .....	69
4.2.2 การสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้า .....	70
4.2.2.1 ความหนืดของสารละลาย .....	71
4.2.2.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยา .....	71
4.2.2.3 การดูดซับความชื้น .....	73
4.2.2.4 สมบัติทางความร้อน .....	73
4.2.2.5 การวิเคราะห์หมูฟังก์ชัน .....	73
4.2.3 การสืบค้นตัวแปรระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย .....	73
4.2.3.1 ความหนืดของสารละลาย .....	73
4.2.3.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยา .....	74
4.2.3.3 การดูดซับความชื้น .....	75
4.2.3.4 สมบัติทางความร้อน .....	76
4.2.3.5 การวิเคราะห์หมูฟังก์ชัน .....	76
4.2.4 การสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสาร .....	76
4.2.4.1 ความหนืดของสารละลาย .....	76
4.2.4.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยา .....	76
4.2.4.3 การดูดซับความชื้น .....	78
4.2.4.4 สมบัติทางความร้อน .....	78
4.2.4.5 การวิเคราะห์หมูฟังก์ชัน .....	78
4.3 การสืบค้นตัวแปรอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสารผสมแป้งและเพคติน .....	78
4.3.1 ความหนืดของสารละลาย .....	79
4.3.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยา .....	79
4.3.3 สมบัติทางความร้อน .....	81
4.3.4 วิเคราะห์หมูฟังก์ชัน .....	81
4.3.5 การดูดซับความชื้น .....	82
<b>บทที่ 5</b> สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	83
5.1.1 การออกแบบการทดลอง .....	83
5.1.2 การสืบค้นตัวแปรในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับแป้ง .....	83
5.1.2.1 การสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลาย .....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.2.2 การสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้า .....	83
5.1.2.3 การสืบค้นตัวแปรระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย	83
5.1.2.4 การสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสาร .....	84
5.1.3 การสืบค้นตัวแปรอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับสารผสมแป้งและเพคติน ..	84
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	84
เอกสารอ้างอิง .....	85
ภาคผนวก .....	88



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อมูลเชิงกระบวนการของกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนแบบต่างๆ .....	9
ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนแบบต่างๆ .....	9
ตารางที่ 2.3 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน .....	20
ตารางที่ 2.4 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ .....	21
ตารางที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด .....	25
ตารางที่ 2.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย PVA ผสม MWCNT ในปริมาณต่างๆ .....	41
ตารางที่ 2.7 ภาพเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จาก SEM สำหรับสารละลาย 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ ไฟฟ้าที่ 12 16 และ 20 กิโลโวลต์ แท่งสเกลใต้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร .....	42
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเข็มและแผ่นรองรับที่ใช้และลักษณะของเส้นใยทั้ง 4 ตัวอย่าง .....	44
ตารางที่ 3.1 ปัจจัยแต่ละตัวแปรในการทดลอง .....	49
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของแป้งต่อโคมิติลซัลฟอกไซด์ในแต่ละสูตร .....	50
ตารางที่ 3.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละสูตร .....	51
ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยในแต่ละสูตร .....	51
ตารางที่ 3.5 อัตราการป้อนสารในแต่ละสูตร .....	52
ตารางที่ 3.6 สัดส่วนของแป้งต่อเพคตินในแต่ละสูตร .....	52
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง .....	55
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลขนาดของเส้นใย และระดับปัจจัยของแต่ละขั้นตอน .....	60
ตารางที่ 4.3 ผลคูณของขนาดเส้นใยกับระดับปัจจัยในแต่ละขั้นตอน .....	61
ตารางที่ 4.4 ค่าการวิเคราะห์ทางสถิติของแต่ละปัจจัย .....	63
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยต่างๆกับค่ามาตรฐาน $2^k$ .....	64
ตารางที่ ก.1 ค่าความหนืดของสารละลายแป้งที่ความเข้มข้นต่างๆ .....	88
ตารางที่ ก.2 ค่าความหนืดของสารละลายผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วนต่างๆ .....	88
ตารางที่ ข.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแป้งที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ .....	89
ตารางที่ ข.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแป้งที่ระยะห่างต่างๆ .....	89
ตารางที่ ข.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแป้งที่อัตราการป้อนสารต่างๆ .....	89
ตารางที่ ข.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วนต่างๆ .....	89
ตารางที่ จ.1 การดูดซับความชื้นของเส้นใยที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ .....	96

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ใดเห็นการใช้ประโยชน์จากเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยฯ ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ จ.2 การดูดซับความชื้นของเส้นใยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ .....	96
ตารางที่ จ.3 การดูดซับความชื้นของเส้นใยที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัตถุรองรับต่างๆ	97
ตารางที่ จ.4 การดูดซับความชื้นของเส้นใยที่อัตราการป้อนสารต่างๆ .....	97
ตารางที่ จ.5 การดูดซับความชื้นของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วนต่างๆ .....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการตั้งยี่ด .....	5
รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแผ่นแบบ .....	6
รูปที่ 2.3 กระบวนการแยกแก้วภาค .....	7
รูปที่ 2.4 กระบวนการจัดเรียงตัวตัวเอง .....	7
รูปที่ 2.5 กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปinning .....	8
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ด้วยแรงทางไฟฟ้า (a) การเกิดหยดของเหลว (pendant drop) (b) การยืดของหยดสารละลาย (strength droplet) และ (c) การเกิดกรวยเทเลอร์ .....	10
รูปที่ 2.7 การเกิดกรวยเทเลอร์ด้วยแรงไฟฟ้า .....	11
รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายการเกิดกระแสพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนออกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโมเลกุล 9 20 กิโลกรัมต่อโมล) ละลายในน้ำ (a) อัตราการป้อนสารละลาย 0.02 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.282 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (b) อัตราการป้อนสารละลาย 0.01 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.344 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (c) อัตราการป้อนสารละลาย 0.50 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.533 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (d) อัตราการป้อนสารละลาย 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.716 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร .....	11
รูปที่ 2.9 การเกิดกระบวนการปั่น .....	12
รูปที่ 2.10 การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย .....	12
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกราดตรวจของเส้นใยพอลิสไตรีนที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ตัวทำละลายต่างกัน (a) เตตระไฮโดรฟูแรน (b) คลอโรฟอร์ม และ (c) ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ .....	14
รูปที่ 2.12 ลักษณะของอนุภาคหรือเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายพอลิอะครีโลไนไตรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน (a) 3 (b) 6 และ (c) 12 เปอร์เซ็นต์ .....	15
รูปที่ 2.13 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อลักษณะเส้นใย .....	15
รูปที่ 2.14 ลักษณะของรูปร่างที่ได้ของการเตรียมพอลิเมอร์ในรูปแบบสารละลายพอลิไพโรลิโดนที่น้ำหนักโมเลกุลต่างกันและความเข้มข้นต่างกัน .....	16
รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดรูปรวยสามเหลี่ยมเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า .....	17
รูปที่ 2.16 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของเส้นใยโคโคซานโดยปรับความต่างศักย์ (a) 14 (b) 16 และ (c) 17 กิโลโวลต์ .....	17

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของเส้นใยไคโตซานที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย (a) 14 (b) 15 และ (c) 16 เซนติเมตร .....	18
รูปที่ 2.18 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของเส้นใยพอลิคาร์โพรแลกโตน โดยการปรับอัตราการปั่นสารละลาย (a) 0.5 และ (b) 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง .....	18
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของอะไมโลส .....	20
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน .....	21
รูปที่ 2.21 แผนภาพโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคตินตามที่เสนอโดย (1) Haworth, (2) Staudinger, (3) Meyer and (4) Meyer redrawn .....	22
รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดแป้งตามแผนผัง Donald et al. (1997) (A) ส่วนของ microcrystalline lamellae แยกจากกันโดยวงของการเจริญเติบโตของสัณฐาน (B) มุมมองขยายของส่วนสัณฐานและผลึก (C) โครงสร้างขดคู่ที่เกิดขึ้นจากโซ่ติดกันของ amylopectin ก่อให้เกิดผลึก ส่วนกิ่งเป็นบริเวณอสัณฐาน	23
รูปที่ 2.23 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A- type and B-type ของอะมิโลส .....	24
รูปที่ 2.24 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน .....	25
รูปที่ 2.25 การพองตัวของเม็ดแป้ง .....	26
รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน .....	27
รูปที่ 2.27 การคืนตัวของแป้ง .....	28
รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน .....	29
รูปที่ 2.29 โครงสร้างของเพคตินที่มีโมเลกุลซับซ้อน .....	30
รูปที่ 2.30 โครงสร้างของเพคตินที่มีกรดกาแลคทูโรนิกเป็นองค์ประกอบหลัก .....	30
รูปที่ 2.31 โครงสร้างของเพคตินชนิดละลายน้ำได้ .....	31
รูปที่ 2.32 โครงสร้างของเพคตินที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ .....	31
รูปที่ 2.33 โครงสร้างของเพคตินที่ไม่สามารถเกิดเจลได้ .....	32
รูปที่ 2.34 การถูกเอสเทอร์ไฟต์ของหมู่คาร์บอกซิล .....	33
รูปที่ 2.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE กับปริมาณเมทอกซิล .....	34
รูปที่ 2.36 โครงสร้างของเส้นใย PVA /MWCNT ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก). สูตร MWCNT-0 ข). สูตร MWCNT-2 ค). สูตร MWCNT-5 ง). สูตร MWCNT-10 .....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.37 กราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายที่ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่า 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ คือ 10 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์ .....	43
รูปที่ 2.38 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเส้นใย (ก) PS 30 % w/w (ข) PS/PANi 30/3 % w/w (ค) PS/PANi 30/5 % w/w (ง) PS/PANi 30/7 % w/w .....	45
รูปที่ 2.39 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิเอสไตรีน/ พอลิอะนิลีนที่ความเข้มข้น 30/5 % w/w .....	45
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทำงานวิจัย .....	48
รูปที่ 3.2 แผนภาพการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการเตรียมเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง	50
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมเส้นใยแบ่งด้วยวิธี อิเล็กโทรสปินนิง .....	65
รูปที่ 4.2 ความหนืดของสารละลายแบ่งที่ความเข้มข้น 8 10 12 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	66
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบ่งที่ ความเข้มข้นของสารละลายที่ความเข้มข้น (A) 8 (B) 10 (C) 12 และ (D) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	67
รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยแบ่งที่ความเข้มข้นสารละลาย 10 12 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	68
รูปที่ 4.5 กราฟ DSC ของเส้นใยแบ่งที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ความเข้มข้น (A) 8 (B) 10 (C) 12 และ (D) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก .....	69
รูปที่ 4.6 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของแบ่ง .....	70
รูปที่ 4.7 กราฟ FTIR ของเส้นใยแบ่ง .....	70
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบ่งที่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (A) 5 (B) 7 (C) 10 และ (D) 12 กิโลโวลต์ .....	71
รูปที่ 4.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบ่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 5 7 10 และ 12 กิโลโวลต์ .....	72
รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยแบ่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 5 7 10 และ 12 กิโลโวลต์ .....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบ่งที่ ระยะห่าง (A) 5 (B) 7 (C) 10 และ (D) 12 เซนติเมตร .....	74
รูปที่ 4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบ่งที่ระยะห่าง 5 7 10 และ 12 เซนติเมตร .	75
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยแบ่งที่ระยะห่าง 5 7 10 และ 12 เซนติเมตร ..	75
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบ่งที่ อัตราการบ่อนสารละลาย (A) 3 (B) 4 (C) 5 และ (D) 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง .....	77
รูปที่ 4.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบ่งที่อัตราการบ่อนสารละลาย 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง .....	77
รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยแบ่งที่อัตราการบ่อนสารละลาย 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง .....	78
รูปที่ 4.17 ความหนืดของสารละลายผสมแบ่งและเพคตินที่สัดส่วน 100/0 90/10 85/15 80/20 และ 0/100 .....	79
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยจากสาร ผสมแบ่งและเพคตินที่สัดส่วน (A) 100/0 (B) 90/10 (C) 85/15 และ 80/20 .....	80
รูปที่ 4.19 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากสารผสมแบ่งและเพคตินที่สัดส่วน 100/0 90/10 85/15 และ 80/20 .....	80
รูปที่ 4.20 กราฟ DSC ของเส้นใยจากสารผสมแบ่งและเพคตินที่สัดส่วน (A) 100/0 (B) 90/10 (C) 85/15 (D) 80/20 และ (E) 0/100 .....	81
รูปที่ 4.21 กราฟ FTIR ของเส้นใยจากสารผสมแบ่งและเพคตินที่สัดส่วน (A) 100/0 (B) 90/10 (C) 85/15 (D) 80/20 และ (E) 0/100 .....	82
รูปที่ 4.22 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยจากสารผสมแบ่งและเพคตินที่สัดส่วน 100/0 90/10 85/15 และ 80/20 .....	82
รูปที่ ค.1 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแบ่งและเพคตินในสัดส่วน 100/0 .....	90
รูปที่ ค.2 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแบ่งและเพคตินในสัดส่วน 90/10 .....	90
รูปที่ ค.3 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแบ่งและเพคตินในสัดส่วน 85/15 .....	91
รูปที่ ค.4 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแบ่งและเพคตินในสัดส่วน 80/20 .....	91
รูปที่ ค.5 กราฟ DSC ของสารผสมแบ่งและเพคตินในสัดส่วน 0/100 .....	92
รูปที่ ง.1 กราฟ FTIR ของเส้นใยแบ่ง .....	93
รูปที่ ง.2 กราฟ FTIR ของเส้นใยผสมแบ่งและเพคตินในอัตราส่วน 90/10 .....	93
รูปที่ ง.3 กราฟ FTIR ของเส้นใยผสมแบ่งและเพคตินในอัตราส่วน 85/15 .....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อสู้อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ง.4 กราฟ FTIR ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในอัตราส่วน 80/20 .....	94
รูปที่ ง.5 กราฟ FTIR ของสารผสมแป้งและเพคตินในอัตราส่วน 80/20 .....	95



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันได้มีการนำเส้นใยมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากขึ้นเช่นอุตสาหกรรมสิ่งทอ และ อุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยมีหลากหลายชนิดทั้งชนิดที่เป็นเส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ ทำให้มีสมบัติที่แตกต่างกันเช่น สมบัติทางกายภาพ (ความแข็งแรง ความเหนียว ความยืดหยุ่นและอื่นๆ) สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางเคมี (ทนกรด ต่าง และสารเคมีอื่นๆ) โดยเส้นใยธรรมชาตินั้นเป็นเส้นใยที่ได้จากพืชที่นิยมใช้เพราะว่าหาได้ง่าย เช่น ฝ้าย ลินิน ป่าน ปอ ไผ่ นอกจากนี้ยังมีเส้นใยที่ได้จากสัตว์ในบางชนิดเช่น ไหมจากหนอนไหม ในต่างประเทศก็ได้จากขนแกะ แต่เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีข้อเสียหลัก คือคุณภาพไม่คงที่ ทำให้มีการคิดค้นเส้นใยสังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ถึงอย่างไรก็ตามเส้นใยสังเคราะห์ก็ยังคงมีปัญหาเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเตรียมได้จากจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ล้วนแต่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมา

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีงานวิจัยมากมายพยายามคิด ทดลอง และพัฒนาเส้นใยสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อเป็นการลดปัญหามลพิษ แป้ง (Starch) เป็นวัตถุดิบสำคัญที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกได้ อีกทั้งยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายในประเทศไทย และยังสามารถปลูกทดแทนได้ แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ และแหล่งเก็บอาหารของพืช เช่น เมล็ด หัว และราก โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีสูตรเคมีทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  องค์ประกอบที่สำคัญของแป้งประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิดได้แก่ อะไมโลส (amylose) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบอัลฟา 1,4-ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1,4-glycosidic linkage) โดยวงแหวนเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 ส่วนอะไมโลเพกติน (amylopectin) มีโครงสร้างเป็นสายโซ่กิ่งที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมแบบอัลฟา 1,4-ไกลโคซิดิก โดยวงแหวนเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และ ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 6 โดยความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช แต่ข้อดีอย่างประการสำคัญของแป้งนั้นคือ มีสมบัติเชิงกลต่ำ ดูดความชื้นสูง และไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง

เพคตินเป็นสารจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก และมีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิก (D-galacturonic acid) ที่ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1-4 ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1,4 glycosidic) การผสมเพคตินลงในแป้งนั้นจะช่วยให้การก่อกำเนิดลักษณะเจลให้ความข้นหนืด ให้ลักษณะเนื้อสัมผัส ก่อให้เกิดอิมัลชัน และเสริมความคงตัว ทำให้สมบัติที่ได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเตรียมเส้นใยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดึงยืด (drawing) การสังเคราะห์ด้วยแผ่นแบบ (template synthesis) การแยกวัฏภาค (phase separation) และการจัดเรียงตัวที่เกิดขึ้นเอง (self-assembly) เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีข้างต้นเป็นวิธีซึ่งให้เส้นใยที่ไม่ต่อเนื่อง ขึ้นตอนยุ่งยาก ได้ผลผลิตน้อย และมีราคาแพง งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะเตรียมเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning) จัดเป็นการทำให้เกิดเส้นใยโดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงไปที่ปลายเข็มทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวพอลิเมอร์เหลว เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจนทำให้แรงผลักมีมากกว่าแรงดึงดูดของพอลิเมอร์ ส่งผลให้สารละลายพอลิเมอร์ยืดยาวออกอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งไปสะสมที่วัสดุรองรับเส้นใย อิเล็กโตรสปินนิงจึงสามารถแก้ปัญหาข้างต้นได้ นอกจากนี้แล้วยังเป็นวิธีที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน และมีความสะดวกในการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ควบคุมการเกิดเส้นใยลักษณะต่างๆกันได้

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพกตินด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงและศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการปั่นสารละลาย ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย โดยการนำสารผสมแป้งและเพกตินมาเตรียมเส้นใยแล้วทำการทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับน้ำ สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาบทบาทของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมสารผสมแป้งและเพกตินด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เตรียมเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพกตินด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

1.3.2 ศึกษาพารามิเตอร์ดังนี้

1.3.2.1 อัตราส่วนของแป้งต่อตัวทำละลาย

1.3.2.1 อัตราส่วนของเพกตินต่อตัวทำละลาย

1.3.2.1 อัตราส่วนของสารผสมต่อตัวทำละลาย

1.3.2.2 อัตราเร็วในการฉีด

1.3.2.3 ศักย์ไฟฟ้า

1.3.2.4 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย

1.3.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิค SEM

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพกตินด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงได้
- 1.4.2 สามารถนำเส้นใยที่เตรียมได้ไปใช้ทดแทนเส้นใยธรรมชาติได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เส้นใยนาโน (nano fiber) [1,2]

เส้นใยนาโนเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เส้นใยนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวตามความยาวของเส้นใยต่อปริมาตร เป็น 1,000 เท่าของเส้นผม นอกจากนี้แผ่นเส้นใยนาโนจะมีขนาดของรูพรุนที่เล็ก จึงส่งผลให้มีสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพ ที่ดีมากเหมาะสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งต้องการความได้เปรียบของขนาดที่เล็กตัวอย่างเช่น เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีความเหนียวสูง สามารถรับน้ำหนักเกือบครึ่งตัน ซึ่งท่อคาร์บอนนาโนเป็นวัสดุที่มีสมบัติแข็งแรงกว่าเหล็กหลายเท่า แต่มีน้ำหนักเบามาก และกำลังมีการพัฒนาเส้นลวดนาโนเพื่อใช้ทำลิฟต์อวกาศส่งสัมภาระให้กับสถานีอวกาศ แทนการลำเลียงด้วยกระสวยอวกาศ อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเส้นใยด้วยนาโนเทคโนโลยียังมีมูลค่าสูง เมื่อเทียบเท่ากับวัสดุที่ทำจากเหล็ก จำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีและราคาถูกลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีและสารที่นำมาใช้ประดิษฐ์ ซึ่งปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนในด้านต่างๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ มีความเป็นพิษต่ำ และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ วัสดุปิดแผล ระบบนำส่งยา และระบบการกรองอย่างละเอียด (Ultrafine filtration) เป็นต้น

#### 2.1.1 กระบวนการเตรียมเส้นใยนาโน

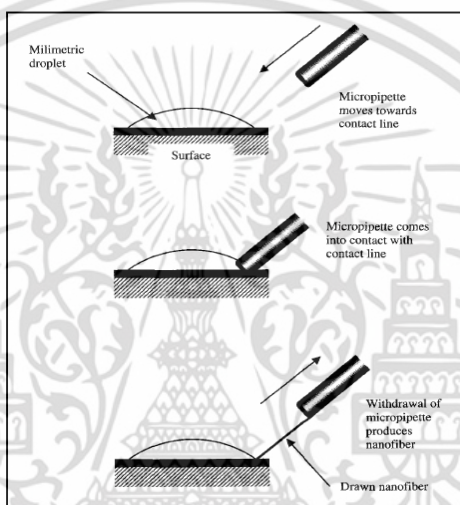
กระบวนการที่นำมาใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีการต่างมีข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกันไป ในการเตรียมเส้นใยนาโนสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การดึงยืด (drawing)
2. การสังเคราะห์ด้วยแม่แบบ (template synthesis)
3. การแยกวัฏภาค (phase separation)
4. การจัดเรียงตัวตัวเอง (self-assembly)
5. อิเล็กโตรสปินนิง (electrospinning)

#### การดึงยืด (drawing) [3]

เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่ค้นพบโดย Ondarcuhu และ Joachim ในปี ค.ศ.1998 กระบวนการดึงยืดต้องใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) การที่วัสดุมีสมบัติทั้งหนืด (viscous) และยืดหยุ่น (elastic) ในเวลาเดียวกัน ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประโยชน์ในการขึ้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของชิ้นงานจากพอลิเมอร์ด้วยการทำเส้นใยที่จำเป็นต้องอาศัยสมบัติความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เวลาถูกหลอมเพื่อให้เพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปร่างระหว่างการดึงยึดออกเป็นเส้นใย ตัวอย่างวิธีการเตรียมเส้นใยนาโนด้วยวิธีการดึงยึด คือ หยดสารละลายของโซเดียมซิเตรต (sodium citrate) ในสารละลายกรดคลอโรอริก (chloroauric acid) ขนาดไมโครเมตรโดยใช้ไมโครปิเปตจุ่มลงในหยดของสารใกล้กับเส้นโค้งสัมผัส (contact line) จากนั้นดึงไมโครปิเปตออกอย่างรวดเร็วด้วยความเร็วประมาณ  $1 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที เส้นใยนาโนจะถูกดึงออกมาพร้อมกับการระเหยไปของตัวทำละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กระบวนการนี้จะต้องมีการทำซ้ำหลายครั้งจึงได้เส้นใยนาโนในปริมาณที่มากพอต่อการนำไปใช้ และไม่สามารถผลิตเส้นใยได้อย่างต่อเนื่องทำให้วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

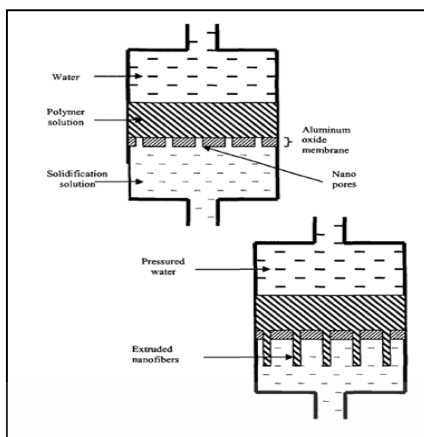


รูปที่ 2.1 กระบวนการดึงยึด [3]

#### การสังเคราะห์ด้วยแผ่นแบบ [3, 4]

การสังเคราะห์ด้วยแผ่นแบบเป็นกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนด้วยแรงกลผ่านแผ่นแบบที่ประกอบด้วยรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร มีการรายงานการศึกษาของ Feng และคณะ ในปีค.ศ. 2002 เตรียมเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรด์ (polyacrylonitrile) ในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (dimethylformamide, DMF) นำมาผ่านแผ่นแบบที่ประกอบด้วยรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ด้วยแรงดันน้ำสูงเพื่อบีบอัดพอลิเมอร์ในรูปแบบสารละลายให้ไหลผ่านรูออกมาเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตรเข้าสู่การทำให้สารละลายแข็งตัว (solidifying solution) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังมีการเตรียมเส้นใยคาร์บอนนาโนด้วยกระบวนการนี้ ซึ่งเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นรูปท่อหรือหลอด ที่มีความยาวไม่ต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



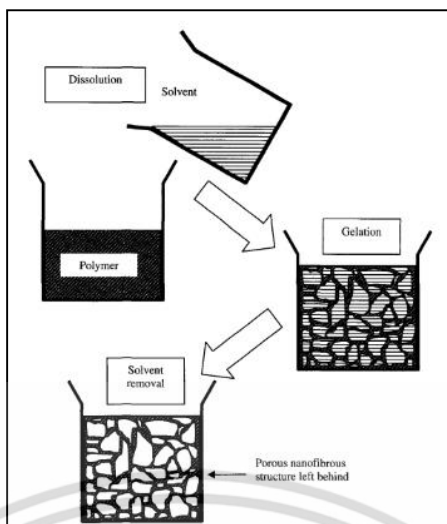
รูปที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแผ่นแบบ [3]

### การแยกวัสดุภาค [3]

หลักการของกระบวนการนี้ คือ การทำให้พอลิเมอร์เกิดการแยกวัสดุภาคออกจากตัวทำละลาย โดยเตรียมเส้นใยด้วยการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายที่ดีก่อน หลังจากนั้นจึงเร่งให้เกิดการแยกวัสดุภาคออกโดยการเติมตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ไม่ดีลงไป ในปี ค.ศ.1999 Ma และ Zhang ได้ทำการศึกษาการเตรียมเส้นใยจากกรดพอลิแอลแลกติก โดยใช้กระบวนการที่ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้ [3]

1. ทำการละลายพอลิเมอร์ (polymer dissolution) ของกรดพอลิแอลแลกติกในตัวทำละลายเทตราไฮโดรฟูแรน ปั่นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ทำให้เกิดเจล (gelation) ด้วยการเทสารละลาย 2 มิลลิลิตร ลงในขวดเทฟลอน (teflon vial) ที่ 50 องศาเซลเซียส ย้ายไปเก็บที่อุณหภูมิ -18 ถึง -45 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้เกิดเป็นเจล
3. สกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) นำเจลแช่ในน้ำกลั่น ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วัน เพื่อทำให้เกิดการแยกวัสดุภาค
4. ทำแห้งแบบเยือกแข็ง (freezing) นำเจลออกจากน้ำแล้วกดลงบนกระดาษกรองให้แห้ง จากนั้นนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. ทำแห้งโดยนำเจลไปทำแห้ง ที่อุณหภูมิ -55 องศาเซลเซียส ในตู้สุญญากาศ (vacuum) เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ จะเกิดโครงสร้างเส้นใยนาโนเป็นจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กระบวนการแยกตัวออก [3]

#### การจัดเรียงตัวตัวเอง [3]

กระบวนการผลิตเส้นใยนาโนที่เกิดขึ้นได้เองในสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้โมเลกุลขนาดเล็กเป็นพื้นฐานในการสร้างเส้นใยนาโน เมื่อมีโมเลกุลมากขึ้นทำให้เกิดแรงเหนี่ยวนำระหว่างกันส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวเอง ในปี ค.ศ. 1991 Zhang และคณะ ได้ศึกษาเกี่ยวกับสายเปปไทด์ที่สามารถจัดเรียงตัวเองได้ (peptide self assembling) โดยพบว่าเมื่อสายเปปไทด์อยู่ในสารละลายน้ำเกลือจะเกิดการจับกันเป็นโครงร่างโดยมีอัตราส่วนของโครงร่าง ที่ประกอบด้วยน้ำ 99 และอีก 1 เปอร์เซ็นต์เป็นสายเปปไทด์ ซึ่งสายเปปไทด์นี้ประกอบด้วยกรดอะมิโน 3 ชนิดคือ อาร์จินิน (argenine) อะลานิน (alanine) และกรดกลูตามิก (glutamic acid) จำนวน 16 โมเลกุลเรียงเข้าไปมาและมีโครงร่างแบบแผ่นปี่ดำ ( $\beta$  - sheet)

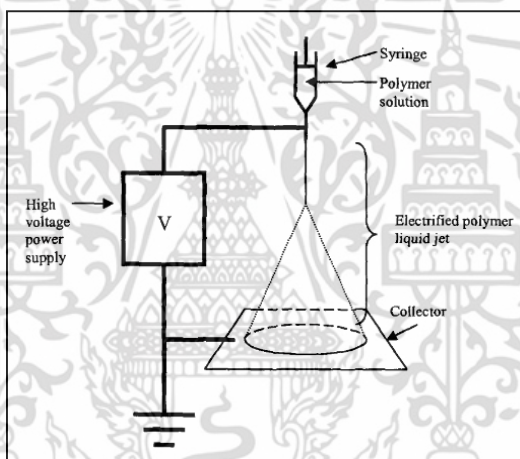


รูปที่ 2.4 กระบวนการจัดเรียงตัวตัวเอง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อิเล็กทรอนิกส์พินนิง [3]

การเกิดเส้นใยด้วยกระบวนการนี้จะอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่ปลายเข็มทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวพอลิเมอร์เหลว เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นจนทำให้แรงผลักมีมากกว่าแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ ทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์ยืดยาวออกอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งไปสะสมที่วัสดุรองรับเส้นใย โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) ซึ่งจัดว่าเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน อุปกรณ์หาได้ง่ายและราคาถูก สามารถประดิษฐ์เส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึงมากกว่า 1 ไมโครเมตร ควบคุมขนาด และปริมาณการเกิดเส้นใยได้อย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 2.5 ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ มีความไม่แน่นอนของกระบวนการสำหรับข้อมูลอื่นรวมถึงข้อดี-ข้อเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.5 กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์พินนิง [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อมูลเชิงกระบวนการของกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนแบบต่างๆ [3]

กระบวนการ	ข้อจำกัด กระบวนการ	การขยาย ขนาด (scale up)	สถานะทำซ้ำได้ (repeatability)	การควบคุม ขนาดเส้นใย (control dimension)
การดึงยัด	ห้องปฏิบัติการ	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้
การสังเคราะห์ด้วย แผ่นแบบ	ห้องปฏิบัติการ	ไม่ได้	ได้	ได้
การแยกวัฏภาค	ห้องปฏิบัติการ	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้
การจัดเรียงตัวตัวเอง	ห้องปฏิบัติการ	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้
อิเล็กโทรสปินนิง	ห้องปฏิบัติการ และ อุตสาหกรรม	ได้	ได้	ได้

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตเส้นใยนาโนแบบต่างๆ [3]

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การดึงยัด	ใช้เครื่องมือน้อย	กระบวนการไม่ต่อเนื่อง
การสังเคราะห์ด้วยแผ่นแบบ	ได้เส้นใยที่มีหลายขนาด โดยการเปลี่ยน แผ่นแบบ	กระบวนการไม่ต่อเนื่อง
การแยกวัฏภาค	ใช้เครื่องมือน้อย ได้เส้นใยนาโนเมตริก (nanofiber matrix)	มีข้อจำกัดของพอลิเมอร์ ที่ใช้
การจัดเรียงตัวตัวเอง	ได้เส้นใยนาโนที่มีขนาดเล็ก	กระบวนการซับซ้อน
อิเล็กโทรสปินนิง	ต้นทุนต่ำ ได้เส้นใยที่มีลักษณะต่อเนื่อง	มีความไม่แน่นอนของ กระบวนการ

### 2.1.2 หลักการเกิดเส้นใยโดยวิธีอิเล็กโทรสปินนิง

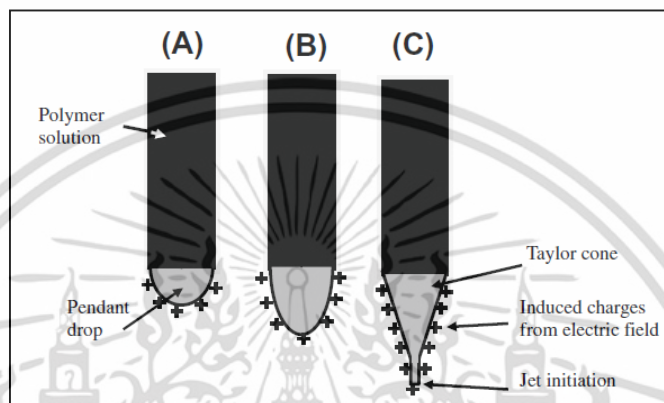
กระบวนการเกิดเส้นใยมีขั้นตอนที่สำคัญ 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเกิดหยดของเหลว (droplet generation)
2. การเกิดกรวยเทย์เลอร์ (Taylor's cone formation)
3. การรัศตัวของลำของเหลวที่พุ่งออกมา (slender thinning jet)
4. กระบวนการปั่นแบบไม่เสถียร (whipping instability region)
5. การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย (solidification into nanofibers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเกิดหยดของเหลว [5]

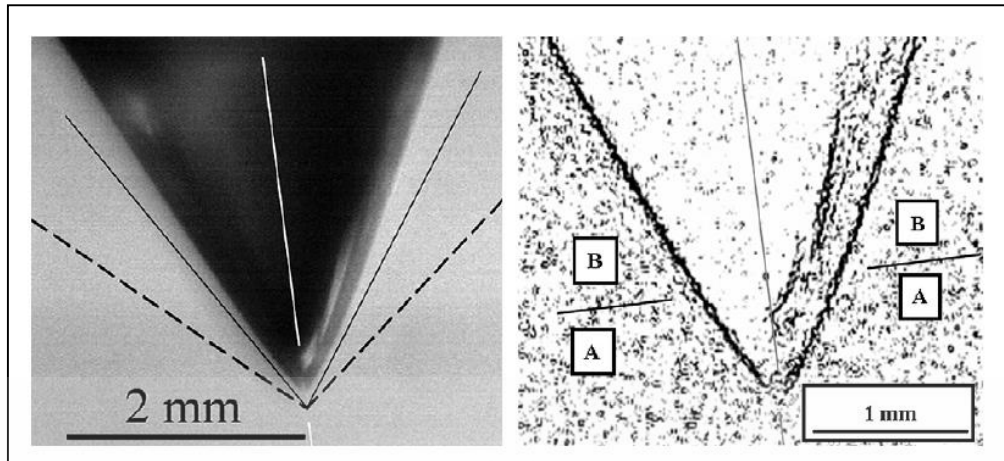
เริ่มจากการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์โดยเพิ่มความต่างศักย์ขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้เกิดหยดของสารละลายพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายช่องเปิดของหลอดบรรจุ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกลม การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิวที่พยายามยึดผิวของเหลวไว้ แรงตึงผิวจะชานกับผิวของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบของวัตถุ ทำให้เกิดรูปร่างทรงกลมของหยดซึ่งจะทำให้เกิดการรักษาสสมดุลของแรงต่างๆ ด้วยแรงโน้มถ่วง



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์ด้วยแรงทางไฟฟ้า (a) การเกิดหยดของเหลว (pendant drop) (b) การยึดของหยดสารละลาย (strengthen droplet) และ (c) การเกิดกรวยเทเลอร์ [5]

### การเกิดกรวยเทเลอร์ [5]

การเตรียมพอลิเมอร์ในรูปแบบสารละลาย ในหลอดบรรจุสารนั้นจะอยู่ในสถานะของไหล เมื่อพิจารณาหยดของสารละลายพอลิเมอร์ที่บริเวณปลายเข็มขณะที่ต่อขั้วไฟฟ้ากับปลายเข็มฉีดยา ไอออนของสารละลายพอลิเมอร์จะมีลักษณะเดียวกับขั้วไฟฟ้าที่ต่อ จึงเกิดแรงกระทำขึ้นที่บริเวณผิวของของไหลซึ่งแรงตึงผิวมีค่าเท่ากับแรงทางไฟฟ้าส่งผลให้ของไหลยืดยาวขึ้นจนมีลักษณะเป็นรูปกรวยแบบเทเลอร์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการผลัดกันของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.7 การเกิดกรวยแท่งเลอร์ด้วยแรงไฟฟ้า [5]

#### การรัดตัวของลำของเหลวที่พุ่งออกมา [6]

การเพิ่มสนามไฟฟ้ามากขึ้นทำให้แรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) มากขึ้นจนสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลว และประจุจะหลุดออกจากผิวหน้าของไหล พุ่งไปยังวัสดุรองรับ เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าขึ้นไปอีกส่วนยอดโค่นจะเกิดการสะสมของประจุเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงผลักรันของประจุที่เพิ่มขึ้นนี้มากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดการรัดตัวของลำของเหลวแล้วพุ่งออกมา โดยแนวทางการเคลื่อนที่จะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกโดยระยะเป็นเส้นตรงนี้จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างศักย์ไฟฟ้าต่อระยะห่างจากปลายช่องเปิดถึงวัสดุรองรับ

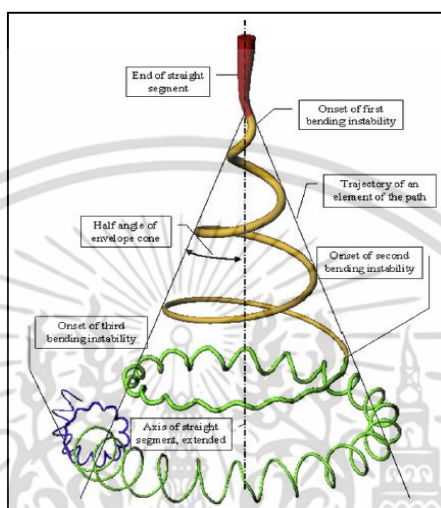


รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายการเกิดกระแสพอลิเมอร์ของพอลิเอทิลีนออกไซด์ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักโมเลกุล 20 กิโลกรัมต่อโมล) ละลายในน้ำ (a) อัตราการป้อนสารละลาย 0.02 มิลลิลิตรต่อวินาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.282 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร; (b) อัตราการป้อนสารละลาย 0.01 มิลลิลิตรต่อวินาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.344 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร; (c) อัตราการป้อนสารละลาย 0.50 มิลลิลิตรต่อวินาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.533 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร; (d) อัตราการป้อนสารละลาย 1.00 มิลลิลิตรต่อวินาที, ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.716 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กระบวนการปั่นแบบไม่เสถียร [5]

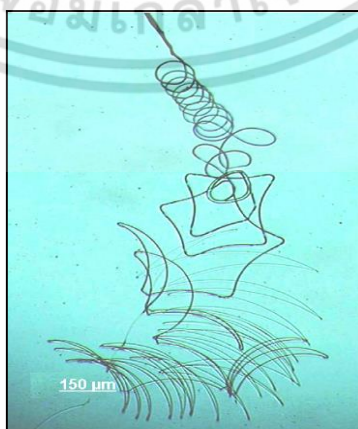
เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แรงกระทำระหว่างประจุไฟฟ้าทำให้การเคลื่อนที่ของลำของสารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาเริ่มไม่เป็นเส้นตรงซึ่งถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่แบบไม่เสถียร และจะมีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (whipping motion) ด้วยสนามไฟฟ้าที่มากขึ้น



รูปที่ 2.9 การเกิดกระบวนการปั่น [5]

### การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย [5]

ในกระบวนการปั่นเส้นใยสารละลายที่ผ่านกระบวนการยึดด้วยแรงทางไฟฟ้าเกิดการระเหยของตัวทำละลายกลายเป็นไอ ทำให้สารละลายกลายเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งเกิดขึ้นในลักษณะเส้นใยที่พันกัน หรือเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวแบบในรูปแบบอื่นซึ่งสะสมบริเวณวัสดุรองรับตามชนิดของอิเล็กโทรสปินนิงที่ใช้



รูปที่ 2.10 การแข็งตัวของกระแสพอลิเมอร์เป็นเส้นใย [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดเส้นใยที่สำคัญมี 3 พารามิเตอร์ ได้แก่

1. พารามิเตอร์เชิงสารละลายพอลิเมอร์ (polymer solution parameters)
2. พารามิเตอร์เชิงกระบวนการ (processing parameters)
3. พารามิเตอร์เชิงสิ่งแวดล้อม (ambient parameters)

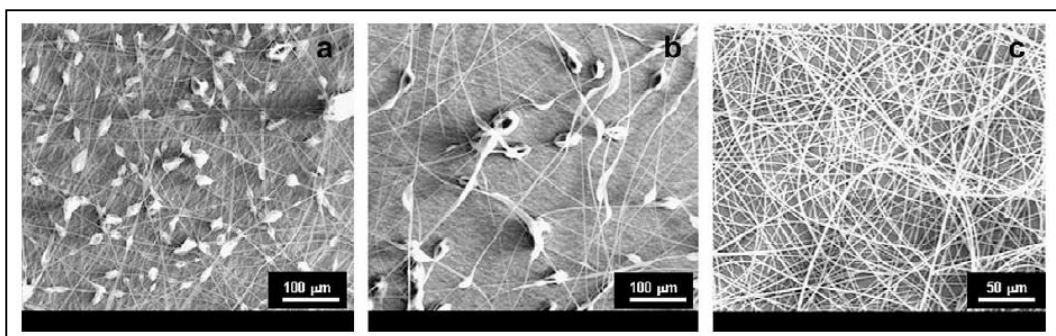
#### 2.1.3.1 พารามิเตอร์เชิงสารละลายพอลิเมอร์ [7-10]

เป็นพารามิเตอร์ที่เกิดจากสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์ที่ส่งผลต่อลักษณะเส้นใย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย ได้แก่

##### ตัวทำละลาย (Solvent)

การเตรียมเส้นใยนาโนให้ได้เส้นใยที่เรียบต้องเลือกใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเช่น สามารถละลายพอลิเมอร์ได้ดี และระเหยได้ง่าย มีรายงานการศึกษาพอลิสไตรีน (polystyrene) ในตัวทำละลายต่างชนิด เช่นเตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran, THF) คลอโรฟอร์ม (chloroform, CHCl<sub>3</sub>) คาร์บอนไดซัลไฟด์ (carbon disulfide, CS<sub>2</sub>) 1-เมทิล-2-ไพโรลิโดน (1-methyl-2-pyrrolidinone, NMP) และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (N,N-dimethylformamide, DMF) พบว่า DMF เป็นตัวทำละลายที่สามารถใช้เตรียมเส้นใยของพอลิสไตรีนได้ ในขณะที่สารละลายชนิดอื่นเกิดเป็นลักษณะปิดบนเส้นใย และอนุภาคทรงกลมที่มีความเข้มข้นเดียวกัน เนื่องจากไดเมทิลฟอร์มาไมด์สามารถละลายพอลิเมอร์ได้ดีและระเหยได้รวดเร็วกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ

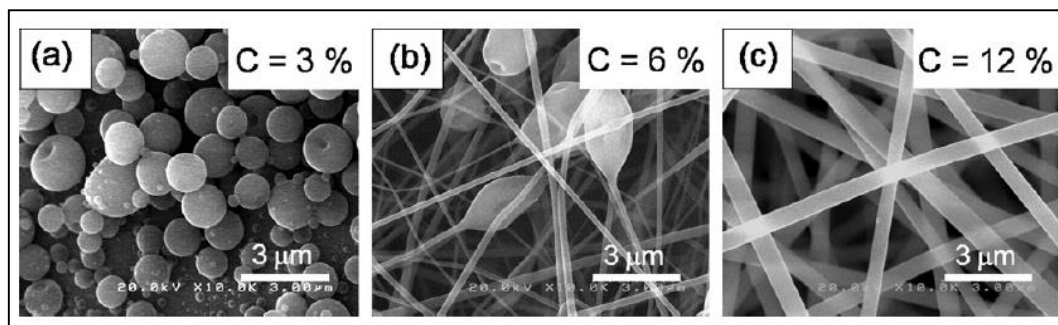
นอกจากนี้ยังมีรายงานการศึกษาความสามารถในการระเหยของสารละลายพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) ในตัวทำละลาย เตตระไฮโดรฟูแรน ซึ่งมีความสามารถในการระเหยที่ต่ำ และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ซึ่งมีความสามารถในการระเหยดี ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้เตตระไฮโดรฟูแรน 100 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้เกิดเส้นใยปิด ส่วนเมื่อใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ 100 เปอร์เซ็นต์ ได้เส้นใยที่มีลักษณะผิวเรียบ (smooth fiber)



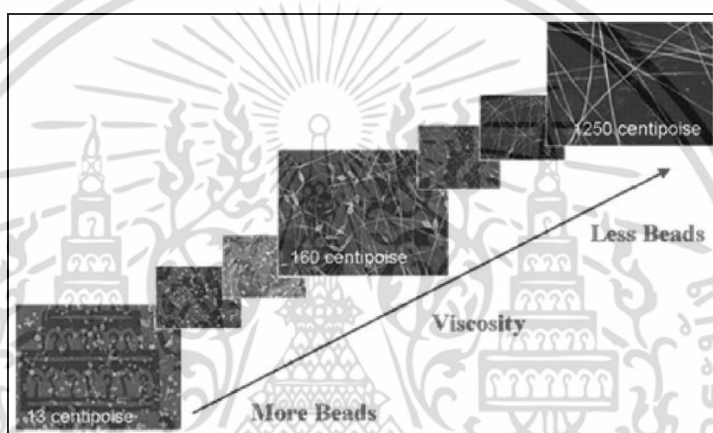
รูปที่ 2.11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดกราดตรวจของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรีนที่เตรียมจากสารละลายความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ตัวทำละลายต่างกัน (a) เตตระไฮโดรฟูแรน (b) คลอโรฟอร์ม และ (c) ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ [10]

### ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ (Concentration of polymer) [11-16]

มีรายงานการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ต่อการเกิดเส้นใย โดยใช้พอลิเมอร์กับตัวทำละลายหลายชนิด เช่นพอลิไพโรล (Polypyrrole, PPY) ในน้ำพอลิเอทิลีนออกไซด์ ในน้ำ แอลกอฮอล์ในน้ำ พอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinylacetate, PVAC) ในเอทานอล (Ethanol, EtOH) ซินดีโอแทกติก1,2-พอลิบิวทาไดอิน (Syndiotactic1,2-polybutadiene, S1,2-PB) ในไดคลอโรมีเทน (dichloromethane, DCM) และพอลิอะคริโลไนไตรด์ (Polyacrylonitrile, PAN) ละลายในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (N,N-dimethylformamide, DMF) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) ในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พูลูลาน (Pullulan) ในน้ำ และกรดพอลิแลคติก (Poly D,L-lactic acid, PLA) ละลายในไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พบว่าความหนืดมีผลโดยตรงต่อการเกิดเส้นใย เมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น ทำให้สารละลายสามารถยืดยาวออกเป็นเส้นใยได้โดยไม่ขาดออกจากกันจนกว่าจะไปถึงวัสดุรองรับเส้นใย และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นทำให้เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นด้วย ในขณะที่ความเข้มข้นพอลิเมอร์น้อยจะมีแรงตึงผิวต่ำทำให้แรงผลักทางไฟฟ้าเอาชนะแรงตึงผิวได้ง่าย ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำทำให้สารละลายแตกเป็นละอองฝอย เกิดเป็นอนุภาคทรงกลมเกิดขึ้น รูปที่ 2.13 แสดงผลของความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ที่ส่งผลต่อความหนืดและแรงตึงผิวของสารละลาย



รูปที่ 2.12 ลักษณะของอนุภาคหรือเส้นใยที่เตรียมจากสารละลายพอลิเอpsilon-ครีโกลไนด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน (a) 3 (b) 6 และ (c) 12 เปอร์เซ็นต์ [14]

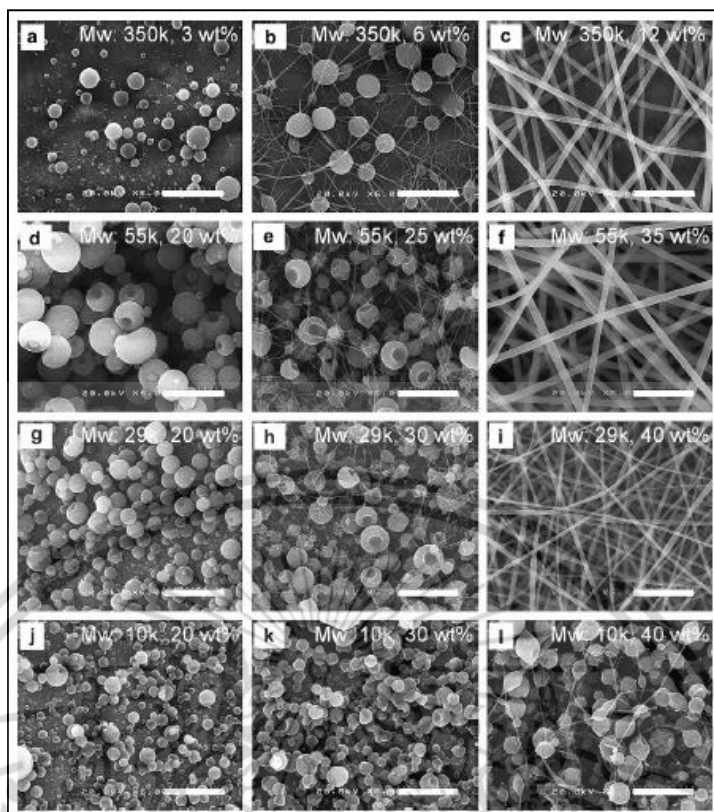


รูปที่ 2.13 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อลักษณะเส้นใย [16]

### น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, MW) [17-19]

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติของสารละลายที่เตรียมได้ เช่น ความหนืด (viscosity) แรงตึงผิว (surface tension) และค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันแต่น้ำหนักโมเลกุลมากกว่าเมื่อละลายในตัวทำละลายเดียวกันจะให้ความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า ดังนั้นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความหนืดสูงทำให้ป้อนสารละลายผ่านปั๊มได้ยาก สารละลายที่สามารถเตรียมเป็นเส้นใยได้ควรมีน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ชนิดของตัวทำละลาย และค่าแรงตึงผิวที่เหมาะสม มีรายงานการศึกษาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่มีผลต่อการเตรียมเส้นใย พบว่า การเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล โดยเพิ่มจาก 10 เป็น 350 กิโลดัลตัน มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้นและเมื่อระดับความเข้มข้นต่างกัน ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างเป็นเส้นใยที่ต่างกันด้วยดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



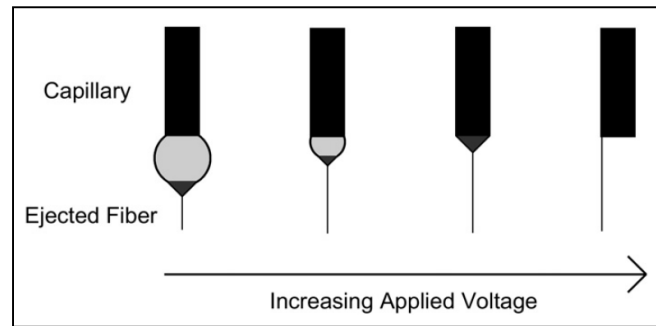
รูปที่ 2.14 ลักษณะของรูปร่างที่ได้ของการเตรียมพอลิเมอร์ในรูปแบบสารละลาย พอลิเอทิลีนออกไซด์ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างกันและความเข้มข้นต่างกัน [18]

### 2.1.3.2 พารามิเตอร์เชิงกระบวนการ

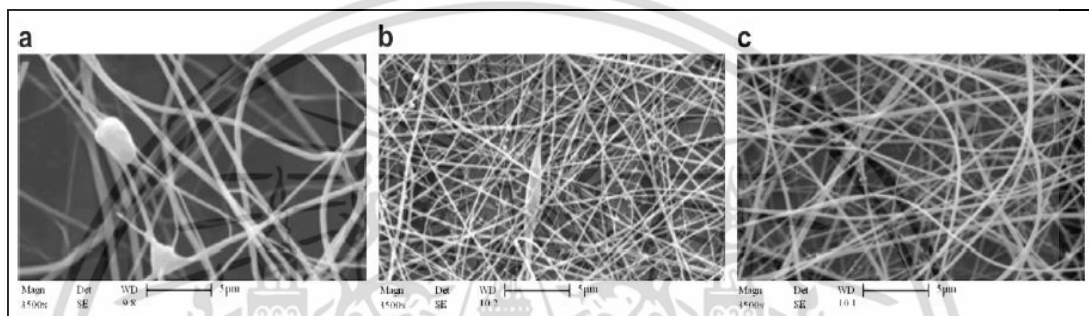
#### ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric field) [8, 20]

การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการเตรียมเส้นใยของพอลิเอทิลีนออกไซด์ (polyethylene oxide, PEO) พบว่า เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงแต่มีแนวโน้มเกิดปัดบนเส้นใยมาก ดังนั้นการเตรียมเส้นใยจึงจำเป็นต้องเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเหมาะสม โดยทั่วไปเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายมีค่ามากส่งผลให้ขนาดของเส้นใยเล็กลง นอกจากนี้การศึกษาของ Deitzel et al. 2010 ใช้พอลิเอทิลีนออกไซด์ในตัวทำละลายน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้น จะทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง ทั้งนี้เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลต่อการเกิดรูปกรวยเทย์เลอร์ดังรูปที่ 2.15 และการพ่นเส้นใย (fiber jet) จึงจำเป็นต้องเลือกความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเหมาะสม จากการศึกษาของ Homayoni et al. 2009 โดยใช้โคโธซานที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ละลายในตัวทำละลายกรดอะซิติก 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ลักษณะการเกิดรูปกรวยสามเหลี่ยมเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า [20]

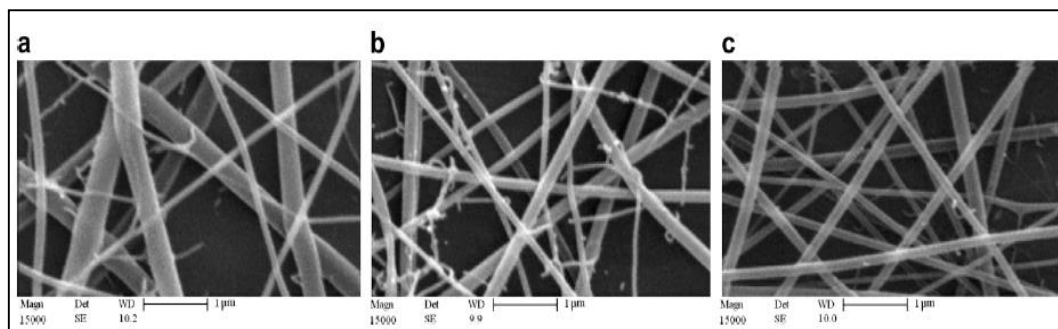


รูปที่ 2.16 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของเส้นใยโคโตนานโดยปรับความต่างศักย์ (a) 14 (b) 16 และ (c) 17 กิโลโวลต์ [8]

#### ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย [8, 21]

จากการเตรียมเส้นใยพอลิเอทิลีนออกไซด์ และเจลาติน พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง และถ้ามีระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยน้อยเกินไปมีแนวโน้มทำให้เกิดปัดมากขึ้น การเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มฉีดยากับวัสดุรองรับเส้นใยวัสดุรองรับเส้นใยส่งผลทำให้เกิดการระเหยของตัวทำละลายได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ได้เส้นใยที่มีแนวโน้มการเกิดปัดลดลงด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Homayoni et al. 2009 ใช้โคโตนานที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ ด้วยกรดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ละลายในตัวทำละลายกรดอะซิติก 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างเข็มและวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากมีระยะเวลาพอในการเกิดการยึดและทำให้การระเหยของตัวทำละลายเกิดได้อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการปั่นดังรูปที่ 2.17

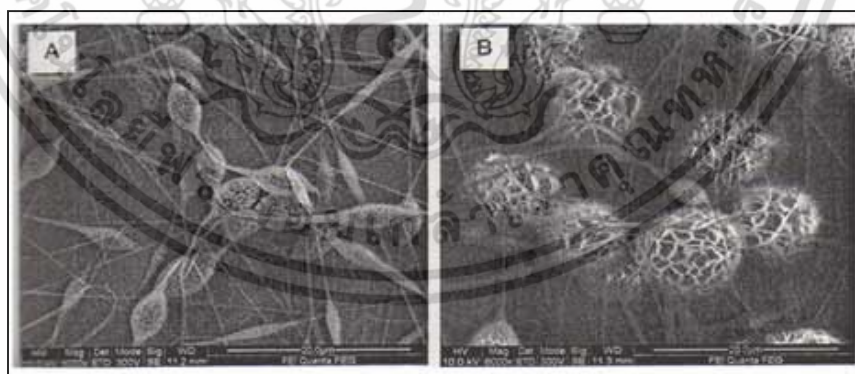
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของเส้นใยไคโตซานที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับเส้นใย (a) 14 (b) 15 และ(c) 16 เซนติเมตร [8]

### อัตราการป้อนสารละลาย (Feed rate) [22]

อัตราการป้อนสารละลายต้องมีความเหมาะสมไม่เร็วจนเกินไป เนื่องจากส่งผลต่อการระเหยของตัวทำละลายและการเกิดปัด โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดโตขึ้นและมีแนวโน้มเกิดปัดเป็นจำนวนมากบนเส้นใย ทั้งนี้เนื่องจากการไหลของพอลิเมอร์ที่เร็วเกินไป ความต่างศักย์ไฟฟ้าอาจไม่มากเพียงพอที่จะทำให้หยดของสารละลายพอลิเมอร์แตกและยึดออกเป็นเส้นใยในระหว่างการเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับเส้นใย ทำให้การระเหยของตัวทำละลายเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการเตรียมเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ของพอลิคาร์โบรแลกโตน พบว่าเมื่ออัตราการป้อนสารละลายจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ขนาดของปัดใหญ่ขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเกิดปัดบนเส้นใยสูงขึ้นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดของเส้นใยพอลิคาร์โบรแลกโตนโดยการปรับอัตราการป้อนสารละลาย (a) 0.5 และ (b) 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.3 พารามิเตอร์เชิงสิ่งแวดล้อม

เกิดจากสภาวะสิ่งแวดล้อมในระหว่างการเตรียมเส้นใย ได้แก่

#### ความชื้น (Humidity)

ความชื้นในการเตรียมเส้นใยมีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะของเส้นใยเปลี่ยนไป จากรายงานการศึกษาพบว่าระบบที่มีความชื้นที่ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้เส้นใยที่ได้มีพื้นผิวเรียบ ในขณะที่ความชื้นสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยมากขึ้น

## 2.2 แป้ง (starch) [23]

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้ง ชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งนั้นๆ

### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง [23]

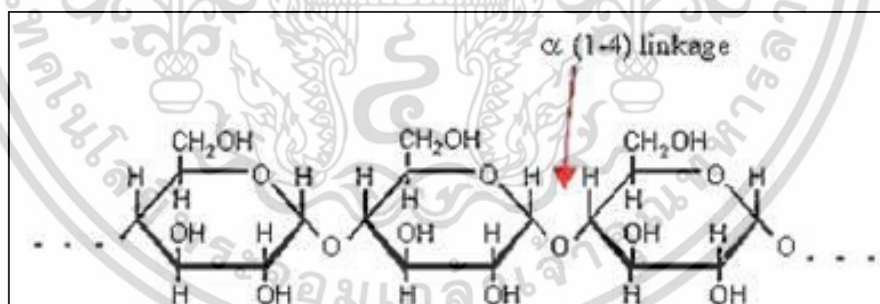
แป้งเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขา มาก มาย (รายละเอียดอยู่ในหัวข้อถัดไป) นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “intermediate material” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [23]

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

### อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4 –glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.19 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



รูปที่ 2.19 โครงสร้างของอะไมโลส [23]

โดยทั่วไปแบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकुจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

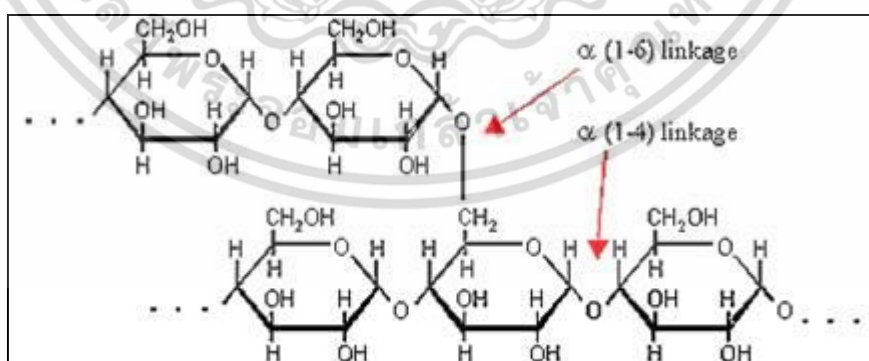
ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลงปริมาณและสมบัติของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณของอะไมโลสในแป้งชนิดต่างๆ [24]

แป้ง	ปริมาณอะไมโลส (% น้ำหนักแห้ง) Apparent	ปริมาณอะไมโลส (% น้ำหนักแห้ง) Absolute
ข้าวสาลี	28.8	25.8
ข้าวโพด	29.4	22.5
ข้าวเจ้า	25.0	20.5
ข้าวบาร์เลย์	25.5	23.6
มันฝรั่ง	36.0	16.9
มันสำปะหลัง	23.5	17.8
พุทธรักษา	43.2	22.7
ถั่วเขียว	37.9	30.7

### อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4- glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 6-glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [23]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ  $\alpha$ -1, 6 glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สคือ ประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

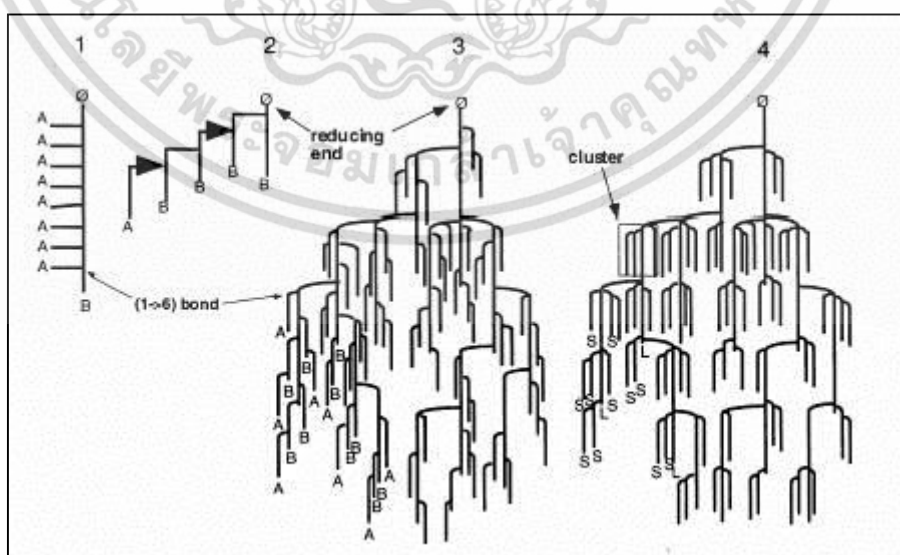
ในปี 1940 Meyer และคณะ (1940) เสนอโมเดลโครงสร้างของอะไมโลเพคติน ว่าเป็นแบบการแตกกิ่งแบบสุ่ม (random branching) ดังรูปที่ 2.21 หลังจากนั้น Nikuni (1978) เสนอ clustered branching model เป็นต้นแบบของโมเดลที่ยอมรับกันในปัจจุบันซึ่งเสนอโดย Hizukuri (1986) ลักษณะที่สำคัญของโมเดลนี้ก็คือ จะมีการแบ่งสายโซ่กิ่งเป็นกลุ่มๆ ตามขนาดความยาว ของสายโซ่ที่มีช่วงที่แน่นอน (certain periodicity) อะไมโลเพคตินประกอบด้วยสายโซ่ (chain) 3 ชนิดคือ

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 ซึ่งมีความยาวคร่อมหนึ่ง สอง สามและสี่คลัสเตอร์ (cluster) ตามลำดับ

3) สาย C (C-chain) แบบสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคติน แต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

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

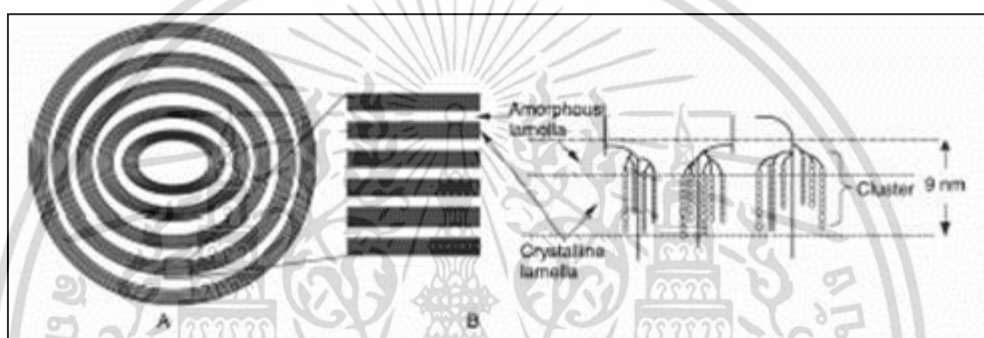


รูปที่ 2.21 แผนภาพโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคตินตามที่เสนอโดย (1) Haworth, (2) Staudinger, (3) Meyer and (4) Meyer redrawn [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

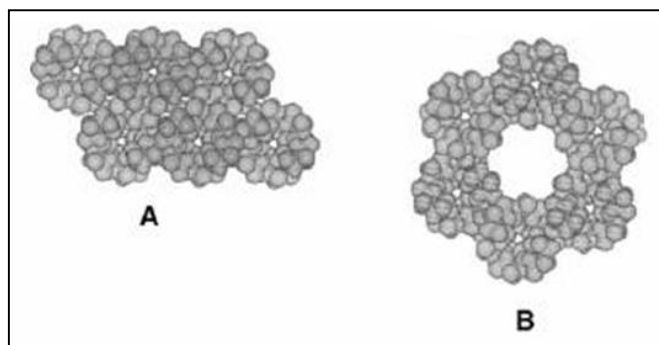
## 2.2.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง [24]

ความรู้ที่ได้จากลักษณะของ growth ring สมบัติ birefringence cross ของเม็ดแป้ง และการใช้เทคนิค X-ray scattering ในการวิเคราะห์เม็ดแป้ง นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า เม็ดแป้งมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยลักษณะความเป็นผลึก เป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่ในโมเลกุลของอะไมโลเพคตินในแนวรัศมีเป็นชั้นๆ ในรูปของคลัสเตอร์ (series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์ ประกอบด้วยบริเวณที่เป็นส่วนรวมของจุดที่แตกกิ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกว่า amorphous lamellar และบริเวณที่มีสายโซ่กิ่งของอะไมโลเพคตินที่จัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ ที่มีการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า crystalline lamellar ดังรูปที่ 2.22 หนึ่งคลัสเตอร์มีขนาด 9 nm



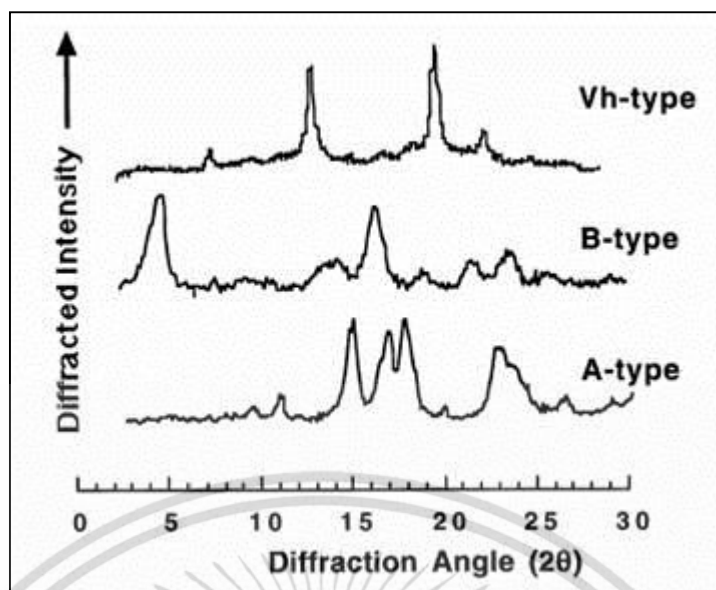
รูปที่ 2.22 การแสดงโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดแป้งตามแผนผัง Donald et al. (1997) (A) ส่วนของ microcrystalline lamellae แยกจากกันโดยวงของการเจริญเติบโตต่อสัณฐาน (B) มุมมองขยายของส่วนสัณฐานและผลึก (C) โครงสร้างขดคู่ที่เกิดขึ้นจากโซ่ติดกันของ amylopectin ก่อให้เกิดผลึก ส่วนกิ่งเป็นบริเวณอสัณฐาน[24]

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.23 ถ้ามีการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) สารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้วมีรูปแบบผลึกเป็นแบบ V



รูปที่ 2.23 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A- type and B-type ของอะมิโลส [24]

โครงสร้างของผลึกที่ต่างกันทำให้ลักษณะการกระจายตัวของแสงต่างกัน ซึ่งสามารถตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งได้โดยเทคนิค wide angle x-ray diffraction (WAXS) แป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันให้รูปแบบของ x-ray diffraction ต่างกันดังรูปที่ 2.24 แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A ให้พีคที่ 17 และ 18 และพีคเดี่ยวที่ 23 แต่ไม่มีพีคที่ 5.6 แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวเจ้า มีลักษณะผลึกแบบ A แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B ให้พีคที่ 5.6 และ 17 แต่ไม่มีพีคที่ 18 และมีพีคคู่ (doublet) ที่ 22 และ 24 ซึ่งได้แก่ แป้งจากพืชหัวและแป้งที่มีอะมิโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น แป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ C ให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B กล่าวคือ มีพีคที่ 5.6 และ 17 ตัวอย่างเช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้นและแป้งผลไม้บางชนิด แป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะของผลึกได้มากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลังซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับ การปฏิบัติ (treatment) ต่อเม็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งชั้นที่ถูกต้มไวนานที่อุณหภูมิสูง (110°C, 30 นาที : heat moisture treatment) มีชนิดของผลึกเปลี่ยนจากเดิมที่เป็นชนิด B ไปเป็นชนิด A ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.24 X-ray diffraction ของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน [24]

ตารางที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [24]

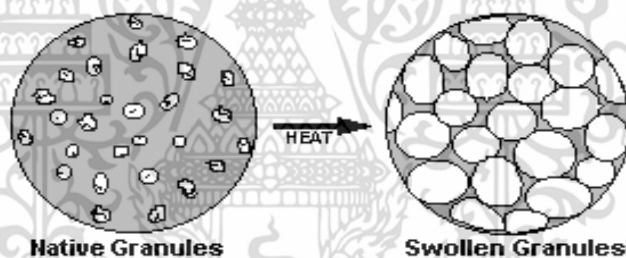
ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	อุณหภูมิการเกิดเจลลาตินในเซชัน (°C)	ปริมาณอะไมโลส (%)
<b>โครงสร้าง A</b>			
ข้าวโอ๊ต	33	60.7	23
ข้าวสาลี	36	63.5	23
ข้าวเหนียว	37	64.5	-
ข้าวฟ่าง	37	72.2	25
ข้าวเจ้า	38	70.0	17
ข้าวโพด	40	71.3	27
<b>โครงสร้าง B</b>			
Amylomaize	15 – 22	86.0	55 – 75
สาคุ	26	70.5	28
มันฝรั่ง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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 สมบัติของแป้ง [24]

#### การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60°C ขึ้นไป ส่วน amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วน crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.25) โมเลกุลในส่วน crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารถละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.25 การพองตัวของเม็ดแป้ง [24]

#### การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

##### กลไกการเกิดเจลาตินในเซชัน

เมื่อนำแป้งใสในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก Collison [1968] สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาลิในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็น crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75°C หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60°C แก่แป้งสาลิจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน crystallite ลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน crystallite ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาตินไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินไนซ์ที่ห่างกันถึง 8-10°C โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาตินไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็ก แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน แป้งอาจเกิด gelatinized ได้ที่อุณหภูมิ 25°C โดยการละลายใน Solvent เช่น alkali, liquid ammonia, DMSO, aq. CaCl<sub>2</sub>



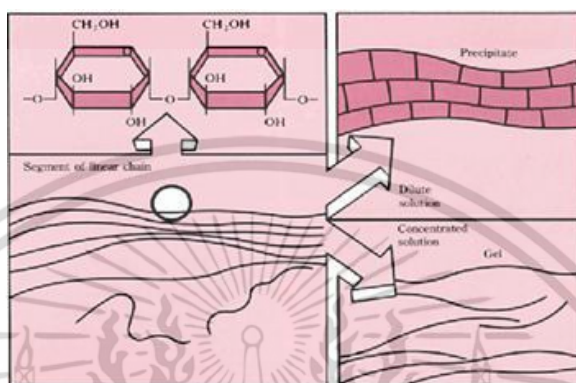
รูปที่ 2.26 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [24]

ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน Amorphous การพองตัวจะทำให้เกิด tension ต่อ crystallites ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหายการให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ double helical region เกิด break up ของโครงสร้างผลึก side chain ของอะไมโลเพคตินที่แยกตัวออกมาจะถูก hydrate และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิด stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่ การเกิด hydration ต่อไปจะเพิ่ม mobility ของโมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุลโมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจาก swollen granule

#### การคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation)

การคืนตัวของแป้งสุกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิต่ำลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (ดังรูปที่ 2.27) ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาเป็นส่วนที่เป็น crystallite ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ X-ray diffraction ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7% โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มามีการจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และในที่สุดเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม

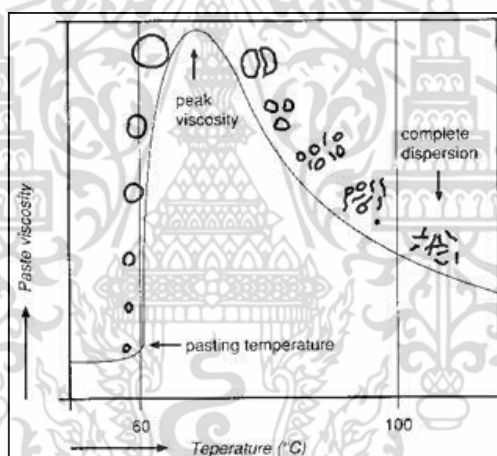


รูปที่ 2.27 การคืนตัวของแป้ง [24]

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก หัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก/หัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกช้าลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกะกะ ยากที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสุกน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน

## ความหนืด (Viscosity)

เป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีความหนืดมากขึ้น (รูปที่ 2.29) พฤติกรรมความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง เมื่อเม็ดแป้งซึ่งแขวนลอยในน้ำได้รับความร้อนจนถึงระดับหนึ่งจะพองตัวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงสุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้งและการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง



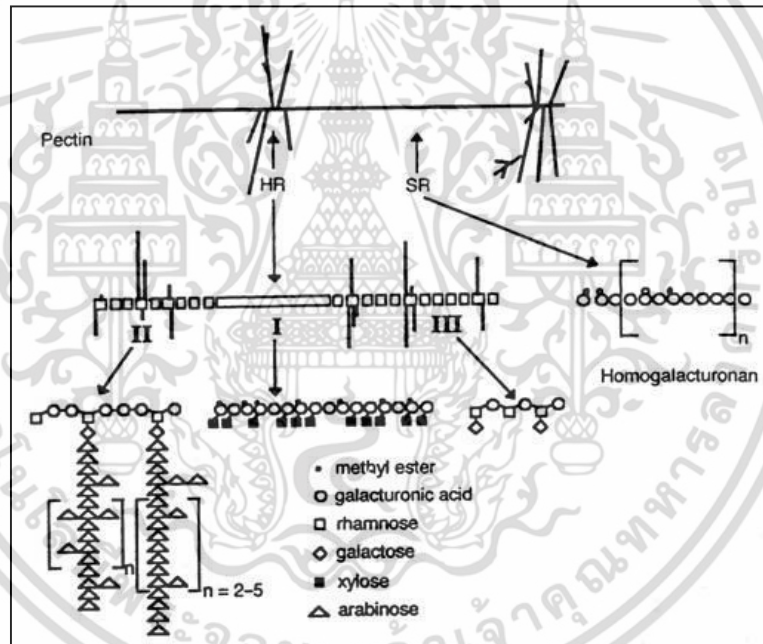
รูปที่ 2.28 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [24]

เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน อุณหภูมิ shear rate ฯลฯ แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ชนิดของแป้ง

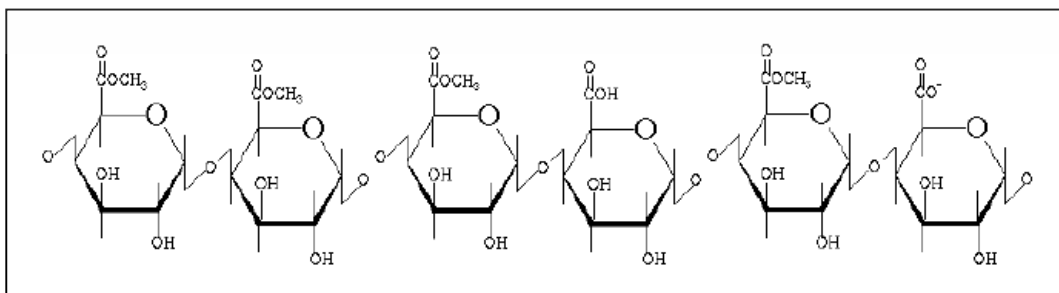
## 2.3 เพคติน (pectin) [26]

### 2.3.1 โครงสร้างของเพคติน

เพคตินเป็นสารจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก และมีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิก (D-galacturonic acid) ที่ต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1-4 ไกลโคซิดิก ( $\alpha$ -1,4 glycosidic) ดังรูปที่ 2.30 สารประกอบเพคตินพบมากบริเวณระหว่างผนังเซลล์ของพืชทั่ว ๆ ไป ในส่วนของ Extracellular matrix โดยเฉพาะผลไม้จำพวกตระกูลส้ม เช่น ส้มโอ ส้มเขียวหวาน นอกจากนี้ยังพบในพืชชนิดอื่นๆ อีก เช่น แอปเปิ้ล หัวบีท (sugar beet) มะม่วงฝรั่ง เป็นต้นอุตสาหกรรมการผลิตเพคติน ส่วนใหญ่สกัดจากเปลือกด้านใน (albedo) ของผลไม้ตระกูลส้ม ซึ่งมีปริมาณเพคตินถึง 25% ต่อน้ำหนักแห้ง และกากแอปเปิ้ลซึ่งมีปริมาณเพคตินประมาณ 15-18% ต่อน้ำหนักแห้ง เพคตินที่สกัดได้จากเนื้อเยื่อพืชเหล่านี้มีสมบัติในการเกิดเจลได้เมื่อเติมกรดและน้ำตาลในปริมาณที่เหมาะสม



รูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างของเพคตินที่มีโมเลกุลซับซ้อน [26]



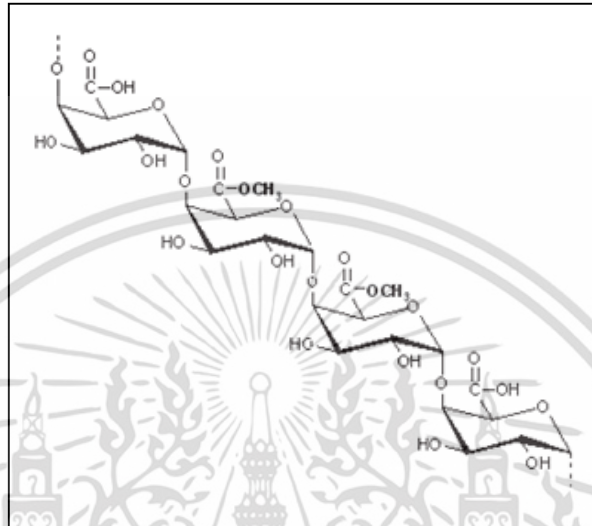
รูปที่ 2.30 โครงสร้างของเพคตินที่มีกรดกาแลคทูโรนิกเป็นองค์ประกอบหลัก [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 ชนิดของเพคติน

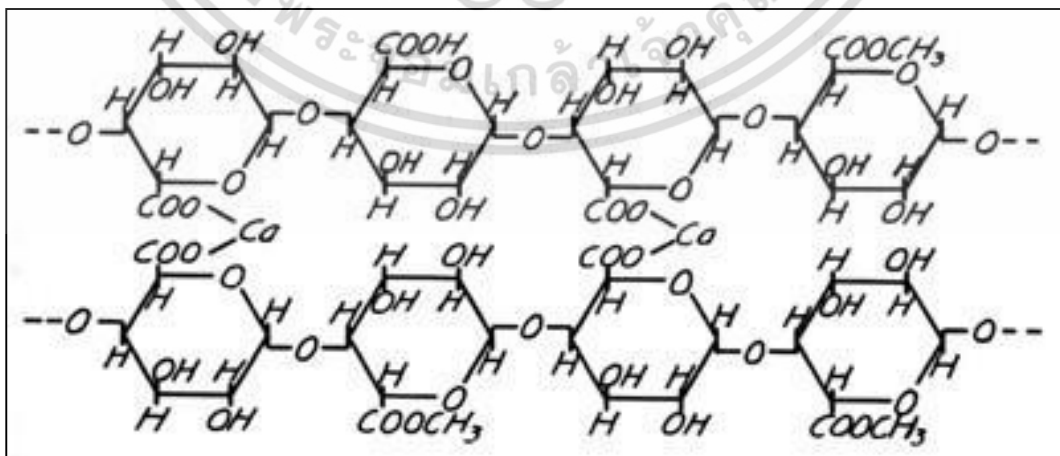
สารประกอบเพคตินแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1 เพคตินที่ละลายน้ำได้ จะมีโครงสร้างเป็นกรดกาแลคทูโรนิกที่มีหมู่เมทอกซิลอยู่ในโครงสร้าง (COOCH<sub>3</sub>) ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของเพคตินชนิดละลายน้ำได้ [26]

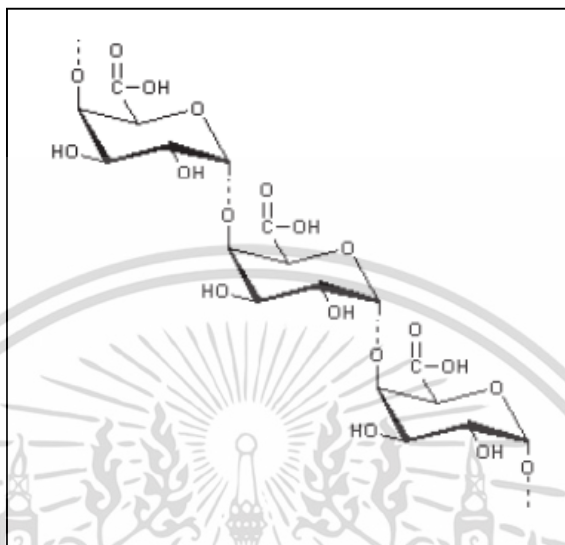
2. เพคตินที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เป็นเพคตินที่มีหมู่แคลเซียมหรือแมกนีเซียมดังรูปที่ 2.32 เมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับกรด จะสามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากไฮโดรเจนจากกรดจะเข้าไปแทนที่แคลเซียมหรือแมกนีเซียม ทำให้เกิดเป็นกรดเพคตินิกที่สามารถละลายน้ำได้ หรือใช้เอนไซม์ทำให้กลายเป็นกรดเพคตินิก เรียกเพคตินชนิดนี้ว่า โปรโตเพคติน



รูปที่ 2.32 โครงสร้างของเพคตินที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพคตินที่มีสูตรโครงสร้างเป็นกรดกาแลคทูโรนิกที่ไม่มีหมู่เมทอกซิลในโครงสร้างดังรูปที่ 2.33 จะประกอบด้วยหน่วยของกรดกาแลคทูโรนิกที่เชื่อมต่อกันอย่างเดี่ยว เพคตินชนิดนี้จะไม่สามารถเกิดเจลได้ทุกสภาวะ



รูปที่ 2.33 โครงสร้างของเพคตินที่ไม่สามารถเกิดเจลได้ [26]

นอกจากนั้นเพคตินชนิดที่ 1 ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามปริมาณเมทอกซิลที่เป็นองค์ประกอบ

ประเภทที่ 1 High Methoxyl Pectins (HMP) เป็นเพคตินที่มีปริมาณเมทอกซิลตั้งแต่ 8.16% ขึ้นไป เพคตินชนิดนี้สามารถเกิดเจลได้ในสภาวะที่มีน้ำตาลและกรดในปริมาณที่เหมาะสม โดยใช้น้ำตาลในการเกิดเจล ประมาณ 60–65 %

ประเภทที่ 2 Low Methoxyl Pectins (LMP) เป็นเพคตินที่มีปริมาณเมทอกซิลน้อยกว่า 8.16 % เพคตินชนิดนี้เกิดเจลได้เมื่อมีไอออนของโลหะอยู่ด้วย เช่น แคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออน

เพคตินแต่ละชนิดจะมีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ของกรดกาแลคทูโรนิกที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ (esterified) ด้วยหมู่เมทิลได้ต่างกัน อัตราส่วนของหมู่เมทิลที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์จะแสดงในรูปของระดับการเกิดเอสเทอร์ไฟเคชัน (degree of esterification) หรือเรียกย่อๆ ว่า ค่า DE ซึ่งจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของกรดกาแลคทูโรนิกที่ถูกเอสเทอร์ไฟด์ต่อจำนวนกรดกาแลคทูโรนิกทั้งหมด ค่า DE เป็นสมบัติเฉพาะของเพคติน มีผลต่อการเกิดเจลและการละลายน้ำของเพคติน

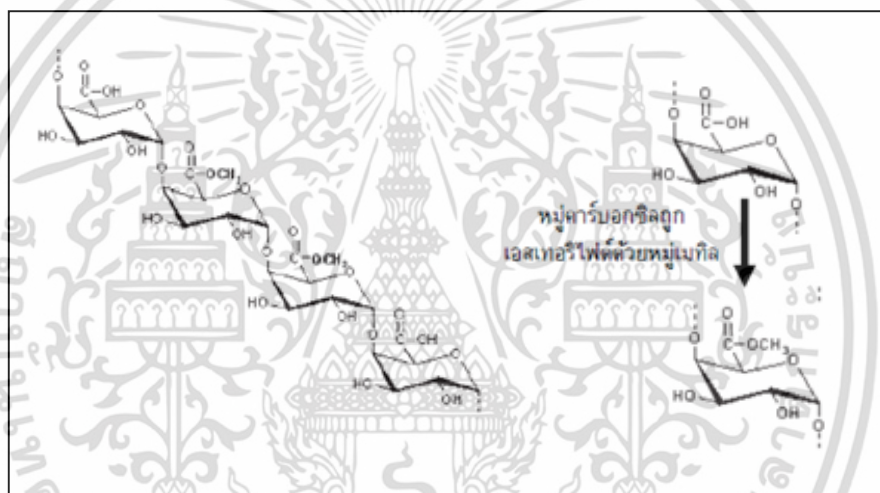
เพคตินพบในบริเวณผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง ทำหน้าที่เชื่อมเซลล์ต่างๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้มีความแข็งแรงขึ้นเพียงใดขึ้นกับปริมาณและธรรมชาติของสารประกอบเพคตินในพืช โดยพบมาก

ในชั้นมิดเดิลลามลลา (middle lamella) และผนังเซลล์ชั้นแรก พืชที่ใช้สกัดเพคตินในระดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุตสาหกรรมไม้กึ่งชนิด เนื่องจากความสามารถในการเกิดเจลของเพคตินที่มาจากพืชแต่ละชนิด แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลและระดับของการเกิดเอสเทอร์ แหล่งของเพคตินที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตเพคตินคือ กากของผลแอปเปิ้ล และเปลือกของพีชตระกูลส้ม ซึ่งเป็นเศษเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ พืชชนิดอื่นๆ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดเพคติน ได้แก่ หัวบีท และดอกทานตะวัน

### 2.3.3 ค่าการเกิดเอสเทอร์ไฟต์ (Degree of esterification ;DE)

เป็นค่าร้อยละของกรดกาแลคทูโรนิกที่ถูกเอสเทอร์ไฟต์โดยหมู่เมทิล ต่อจำนวนกรดกาแลคทูโรนิกทั้งหมดดังรูปที่ 2.34 เมื่อหมู่คาร์บอกซิลถูกเอสเทอร์ไฟต์โดยหมู่เมทิลจะเกิดหมู่เมทอกซิลในโครงสร้างของเพคติน ค่า DE จึงสัมพันธ์กับปริมาณเมทอกซิลที่มีอยู่ในเพคตินดังรูปที่ 2.35

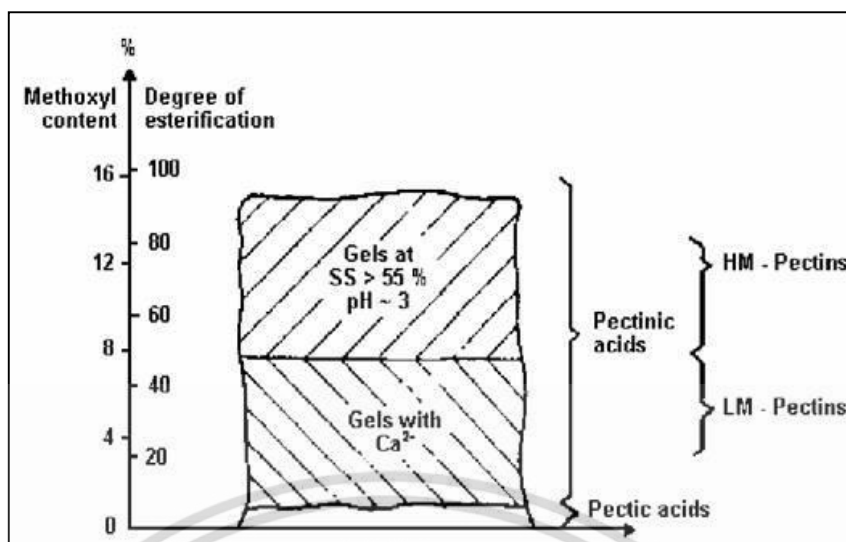


รูปที่ 2.34 แสดงการถูกเอสเทอร์ไฟต์ของหมู่คาร์บอกซิล [26]

ค่า DE ตั้งแต่ 50% ขึ้นไปหรือมีปริมาณเมทอกซิลตั้งแต่ 8.16% ขึ้นไปจัดเป็นเพคตินชนิด HMP ส่วนค่า DE ต่ำกว่า 50% หรือมีปริมาณเมทอกซิลต่ำกว่า 8.16% จัดเป็นเพคตินชนิด LMP ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการของ Beda M. Yapo. (2008).

$$\text{Methoxyl content (g/100g)} = (\text{DEx31} \times (\text{anhydrogalacturonic acid content g/100g})) / (176 \times 100)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE กับปริมาณเมทอกซิล [26]

เพคตินชนิด LMP จะมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มกว่า จึงสามารถทำให้อาหารมีลักษณะเนื้อผิวที่ดีขึ้น ใช้เติมลงในโยเกิร์ต นมรสช็อกโกแลต ส่วนเพคตินชนิด HMP จะมีความคงตัว ความหนืดสูง ทำให้เกิดรูปทรง จึงเติมในอาหารจำพวกแยม เยลลี่ ผลไม้กวน

#### 2.3.4 ประโยชน์ของเพคติน

เพคตินเป็นสารธรรมชาติที่มีการนำมาใช้ในอาหารอย่างแพร่หลาย และได้รับอนุญาตให้ใช้ทั่วโลก คณะกรรมาธิการ Joint FAO / WHO Expert Committee on Food Additive (JFECFA) ได้จัดให้เพคตินเป็นวัตถุเติมแต่งอาหารที่ปลอดภัยและไม่จำกัดปริมาณการได้รับของร่างกายต่อวัน ได้มีการนำเพคตินมาใช้เพื่อทำหน้าที่ต่างๆ ในอาหาร เช่น ใช้เป็นสารก่อให้เกิดลักษณะเจล สารให้ความข้นหนืด สารให้ลักษณะเนื้อสัมผัส สารที่ก่อให้เกิดอิมัลชัน และสารเสริมความคงตัว และยังมีการนำเพคตินมาใช้เป็นสารทดแทนไขมันและน้ำตาลในอาหารแคลอรีต่ำ การที่เพคตินสามารถใช้ได้หลากหลายหน้าที่ เนื่องจากโมเลกุลของเพคตินมีทั้งส่วนที่มีขี้ และส่วนที่ไม่มีขี้ ซึ่งเข้าได้กับอาหารที่มีระบบแตกต่างกัน สิ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ว่าเพคตินจะใช้ในหน้าที่ใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ระดับการเกิดเอสเทอร์ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของเพคตินในอุตสาหกรรมการใช้ประโยชน์ของเพคตินอาจพบในรูปของผลิตภัณฑ์ แยม เยลลี่ ซึ่งอุตสาหกรรมแยมถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีการนำเพคตินมาใช้เป็นจำนวนมาก โดยจะเติมลงไปเพื่อทำให้แยมเกิดเจล เนื่องจากผลไม้ที่ทำแมนั้นมีปริมาณเพคตินไม่เพียงพอ โดยจะเกิดเจลเมื่อผสมน้ำตาลในปริมาณที่เหมาะสม และมีสภาพเป็นกรดที่เหมาะสม นอกจากนั้นแยมและเยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำตาลสูง จึงสามารถใช้เพคตินเป็นส่วนผสมเพื่อทดแทนน้ำตาลในแยมและเยลลี่เพื่อให้มีปริมาณแคลอรีต่ำ ได้อีก ทั้งยังเป็นส่วนผสมในผลไม้กวน ใช้เคลือบลูกกวาด ใช้ในอาหารแช่แข็งเพื่อลดการสูญเสียน้ำ ใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำ ให้รูปทรงของผลิตภัณฑ์ขึ้น ใช้ป้องกันการลอยตัวและการกระจายของชั้นผลไม้ในโยเกิร์ต ชนิดที่มีการกวน เป็นต้น

ประเทศไทยต้องนำเข้าเพคติน จากต่างประเทศคิดเป็นมูลค่ากว่า 200 ล้านบาทต่อปี เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา เพคตินเป็นสารที่สกัดได้จากเปลือกผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล พีชตระกูล ส้มและมะนาว จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดหนึ่ง ซึ่งเอนไซม์ที่ลำไส้เล็กไม่สามารถย่อยสลายได้ เพคติน มีประโยชน์คือเป็นใยอาหาร (Dietary Fiber) ที่มีสมบัติในการละลายน้ำได้ (Water Soluble Fiber) เพคตินที่สกัดได้จากพีชจะมีปริมาณและคุณภาพแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพีชชนิดของ เนื้อเยื่อ พันธุ์ และอายุ พีชที่มีปริมาณเพคตินสูงและมักนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการสกัดเพคตินได้แก่ แอปเปิ้ล และผลไม้ตระกูลส้ม ซึ่งมีเพคตินในปริมาณมากและมีคุณภาพดี และเนื้อเยื่อที่เป็น องค์ประกอบในส่วนต่างๆ ของพีชชนิดเดียวกันจะมีปริมาณเพคตินที่แตกต่างกันออกไป

## 2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) [27]

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment ; DOE) เป็นเทคนิคทาง สถิติขั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบ ลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละ ค่า (One-Factor-at-a-Time, OFAT) จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่ต้องการได้ช้ามากและ สิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับ กระบวนการที่มีอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยตนเอง

### 2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การใช้หลักการสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ผู้ทำการ ทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา ซึ่งขั้นตอนของการ ออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 1. การนิยามปัญหา (Statement of the Problem)

เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการ นิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

#### 2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factors, Levels, and Ranges)

เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎี และประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่ น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรจะมีช่วงในการทดลองอย่างไร (Range) การ กำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

- แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้

แน่นอนโดยผู้ทดลองกำหนดเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัยมิได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง

- แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่มรวมกัน

### 3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable)

ในการเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้วิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้อง ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

### 4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design)

เมื่อกำหนดทรีทเมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) แล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลองข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

### 5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment)

ในระหว่างการดำเนินการทดลองผู้วิจัยจะต้องศึกษาดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลอง คือ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งจะมีเทคนิคแตกต่างกันไปในแต่ละสาขาวิจัย

### 6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data)

ในการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผลรวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผล (Effect) เท่าใดแน่นอน แต่เป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ช่วงของความเชื่อมั่นในการสรุปผล

### 7. การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations)

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูป กราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น เมื่อสรุปผลแล้วควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

## 2.4.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง

1. วิธีปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือ สิ่งหรือวิธีที่ผู้ดำเนินการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่งๆ ที่คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้ กลุ่มของทรีทเมนต์ทั้งหลายที่มีความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวข้องกัน (A Particular Class of Related Treatment) อาจใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ โดยปัจจัยสามารถแบ่งออกได้เป็น

2.1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนด ค่าของปัจจัยนั้นได้ในการดำเนินการทดลอง ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่คิดว่ามีผลตอบสนองที่สนใจ

2.2. ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อาจจะเนื่องมาจากมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุน ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ แบ่งออกเป็น

2.2.1 ตัวแปรรบกวน (Noise Variable หรือ Background Variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) ในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เรากำลังทำการศึกษ ส่วนใหญ่มักได้แก่ เวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์ เป็นต้น

2.2.2 Nuisance Variable คือ ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อนสามารถกำจัดอิทธิพลของ Nuisance Variable ได้โดยการสุ่ม

3. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง ในการทดลองหนึ่งๆ อาจวัดค่าตัวแปรตามมากกว่า 1 ก็ได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงของตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่า ค่าสังเกตที่ได้จากทริทเมนต์หนึ่งๆ ควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณ ซึ่งข้อสมมติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูล (Transformation) ค่าสังเกตที่มีการแจกแจงไม่ปกติเป็นแบบปกติได้

### 2.4.3 หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง

1. การทดลองซ้ำ (Replication) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลอง และลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้ วัตถุประสงค์ของการสุ่มมีดังนี้

1. เพื่อขจัดอคติ หรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง และเพื่อให้แน่ใจได้ว่าทริทเมนต์ต่างๆ จะไม่ได้เปรียบและเสียเปรียบกันในเรื่องที่เกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นใน การทดลอง

2. การวิเคราะห์และทดสอบทางสถิติ นั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อน (Error) จะต้องเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตามข้อกำหนดเหล่านี้ ทั้งนี้การสุ่มจะช่วยขจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้ให้เกิดขึ้นกับหน่วยทดลองด้วยโอกาสเท่าๆ กันการทำแบบสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- การทำแบบสุ่มแบบสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization)

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลองบล็อก อันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

#### 2.4.4. การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการจะศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัย (Factor) พร้อมกัน คำว่าแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้งหรือแต่ละซ้ำของการทดลองนั้น กล่าวคือ มีการใช้ระดับของปัจจัยต่างๆ ร่วมกันจึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ได้พร้อมกัน เช่น ถ้าปัจจัย A มีปัจจัย B มี b ระดับ แต่ละซ้ำจะมี AB รูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
2. อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

##### 2.4.4.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ได้แก่

1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด จะเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองร่วมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ  $a \times b$  การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนเรพลีเคตทั้งหมด n ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย  $k$  ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่ง ๆ ใน 1 การทำซ้ำที่บริสุทธิ์สำหรับการออกแบบ เช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น  $2^k$  ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ โดยปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย “-”

3 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล แบบ 2 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองสามารถละเอียดอันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวได้ เนื่องจากถ้าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  แบบเต็มมีจำนวนปัจจัยมาก จำนวนการทดลองอาจจะเพิ่มขึ้นมากเกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง  $k$  ชนิดได้อย่างครบถ้วน การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจึงถูกนำมาใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ กล่าวคือ ในการทดลองหนึ่งอาจจะมีปัจจัยมากมายที่กำลังอยู่ในความสนใจของผู้ทดลอง จึงใช้การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่ามีปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบ การทดลองเพื่อกรองปัจจัยนี้ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นการทดลองเนื่องจากโดยมากแล้ว ในขณะนั้นจะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หรือการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล  $3^k$  หมายถึงการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลางและสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข -1, 0 และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบที่สนใจ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้ การออกแบบ  $3^k$  จะเหมาะสม เมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้งแต่การออกแบบนี้ไม่ได้เป็นการออกแบบที่เหมาะสมที่สุดใน การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์แบบ พหุนามกำลังสอง โดยการออกแบบการทดลองที่เป็นทางเลือกที่ดีกว่า คือ การออกแบบพื้นผิวผลตอบ

การทดลองชนิดแฟกทอเรียลมีข้อดีและข้อเสีย ดังนี้

#### ข้อดี

1. เป็นการใช้น้อยทดลองทั้งหมด เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของทริทเมนต์หลายทริทเมนต์พร้อมกันได้

จึงเป็นการประหยัดและเสียเวลาน้อยลงกว่าการทดสอบครั้งละ 1 ปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

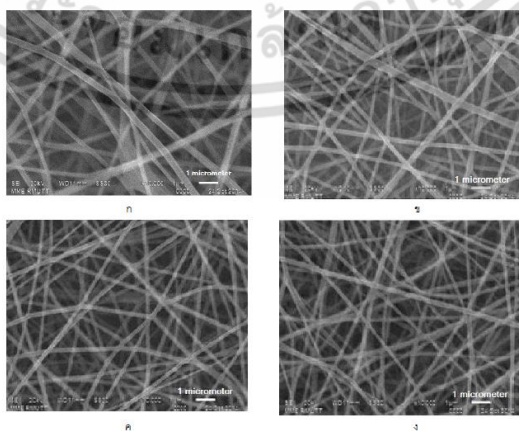
2. ทำให้สามารถตรวจสอบอิทธิพลของกิรยาร่วมระหว่างปัจจัยได้ จึงช่วยในการสรุปผลได้กว้างขวางกว่าการทดลองครั้งละ 1 ปัจจัย

### ข้อเสีย

1. เนื่องจากมีรูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) จึงต้องใช้หน่วยทดลองมากขึ้น จึงอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนหน่วยทดลอง
2. ในกรณีที่มีกิรยาร่วมเกิดขึ้น อาจทำให้การสรุปผลเป็นภาษาที่เข้าใจง่ายได้ยาก
3. ถ้าจำนวนปัจจัยมีมากขนาดของการทดลองก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นการเสียค่าใช้จ่ายสูง และการหาวัตถุทดลองที่มีความสม่ำเสมอจำนวนมากก็เป็นไปได้ยาก

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เจษฎา วงษ์อ่อน และคณะ [28] ได้ศึกษาการเตรียมเส้นใยขนาดนาโนจากวัสดุผสมระหว่าง PVA/MWCNT ด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง จากการทดลองพบว่าทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวใน PVA นั้นค่อนข้างยาก เนื่องจากการจับตัวกันเองของท่อนาโนคาร์บอน (Aggregation) ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากแรงแรงแวนเดอร์วาลส์ที่เกิดระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกันเอง ทำให้สมบัติของวัสดุผสมที่ได้จึงมีแนวโน้มต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ในงานวิจัยนี้จึงใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Tritron X 100 และกระบวนการอัลตราโซนิคช่วยในการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อสารละลายผ่านกระบวนการอัลตราโซนิค ท่อนาโนคาร์บอนจะแตกตัวออกจากกัน สารลดแรงตึงผิวจะเข้าจับตัวกับท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนไม่สามารถกลับเข้ามารวมตัวกันใหม่ได้ เนื่องจากโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปแทรกระหว่างท่อนาโนคาร์บอน ทำให้เมื่อเติมสารละลาย PVA สามารถเข้าแทรกตัวในช่องของท่อนาโนคาร์บอนได้ดี จากการขึ้นรูปด้วยอิเล็กโตรสปินนิงพบว่าได้เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดระหว่าง 200-300 นาโนเมตร โดยขนาดของเส้นใยจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนดังรูปที่ 2.36 และตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.36 แสดงโครงสร้างของเส้นใย PVA / MWCNT ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ก). สูตร MWCNT-0 ข). สูตร MWCNT-2 ค). สูตร MWCNT-5 ง). สูตร MWCNT-10 [28]

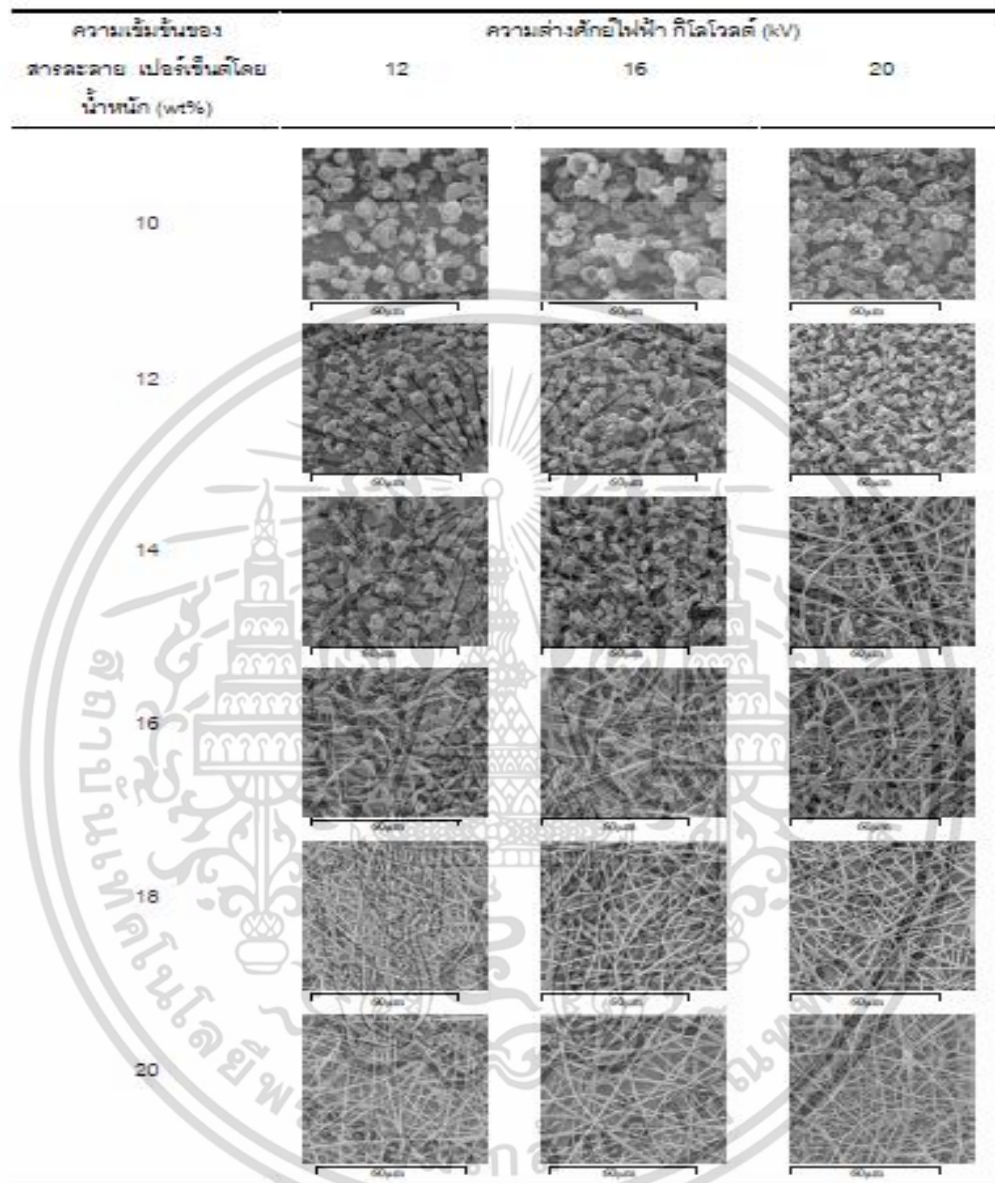
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย PVA ผสม MWCNT ในปริมาณต่างๆ [28]

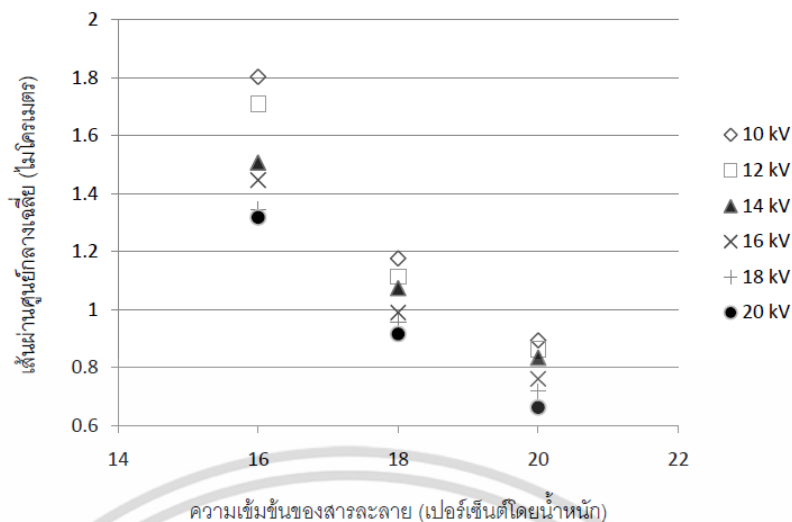
ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย (nm)
MWCNT-0	295 ± 6
MWCNT-2	220 ± 10
MWCNT-5	208 ± 5
MWCNT-10	201 ± 3

ศุภวัธย์ โตเกียรติวงศ์ชัย [29] ได้ศึกษาเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนที่ได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก สารละลายโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงถูกเตรียมในตัวทำละลายผสมระหว่างเตตระไฮโดรฟอรันและไดเมทิลฟอร์มาไมด์ในอัตราส่วน 75:25 ที่ความเข้มข้น 10 12 14 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตคือ 10 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์ จากการวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าลักษณะของเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดปิดและมีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งลักษณะที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียบสม่ำเสมอและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.37

ตาราง 2.7 แสดงภาพเปรียบเทียบผลวิเคราะห์จาก SEM สำหรับสารละลาย 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 12 16 และ 20 กิโลโวลต์ แสงสเกลได้ภาพยาว 60 ไมโครเมตร [29]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 แสดงกราฟระหว่างค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยที่ผลิตจากสารละลายที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นมีค่า 16 18 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ คือ 10 12 14 16 18 และ 20 กิโลโวลต์ [29]

ในประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิไทรอินเป็นวัสดุเนื้อหลัก ได้เลือกปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลงบนแผ่นฟิล์มพอลิไทรอินที่ใช้เป็นตัวรองรับเส้นใย แล้วนำแผ่นฟิล์มนี้มาตัด ซ้อนทับกัน และนำไปอบ (Anneal) ด้วยเครื่องอัดร้อน (Compression molding machine) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่ได้กับแผ่นฟิล์มที่เป็นพอลิไทรอินล้วนที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่ ผลการทดสอบพบว่าแผ่นฟิล์มพอลิไทรอินที่ผลิตเป็นวัสดุเชิงประกอบมีความเหนียวและมีความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักมากกว่าแผ่นฟิล์มพอลิไทรอินที่ไม่มีเส้นใยผสมอยู่

สุณิสสา ปานบุญ [30] ได้ศึกษาการเตรียมเส้นใยขนาดเล็กของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) กับไคโตซานด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยแบบไฟฟ้าสถิต ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยการผลิต และ สมบัติของสารละลาย ได้แก่ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานที่ใช้ผสม อัตราส่วนการผสมสารละลาย PVA กับสารละลายไคโตซาน ศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับฉากรับ ที่มีต่อการเตรียมเส้นใย ตลอดจนขนาดและสัญญาณวิทยาของเส้นใยที่ได้จากการวิเคราะห์เส้นใยผสมที่เตรียมได้ด้วย Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) พบว่ามีองค์ประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไคโตซานผสมกันอยู่จริง เมื่อทำการศึกษาสัญญาณวิทยาของเส้นใยผสมที่เตรียมได้ในสถานะต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า การเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับฉากรับมีแนวโน้มที่จะทำให้ขนาดของเส้นใยลดลงบ้างแต่ไม่มากนัก ในขณะที่การเพิ่มปริมาณไคโตซานในสารละลายผสม ทำให้ได้เส้นใยขนาดเล็กลงอันเป็นผลมาจากการลดลงของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

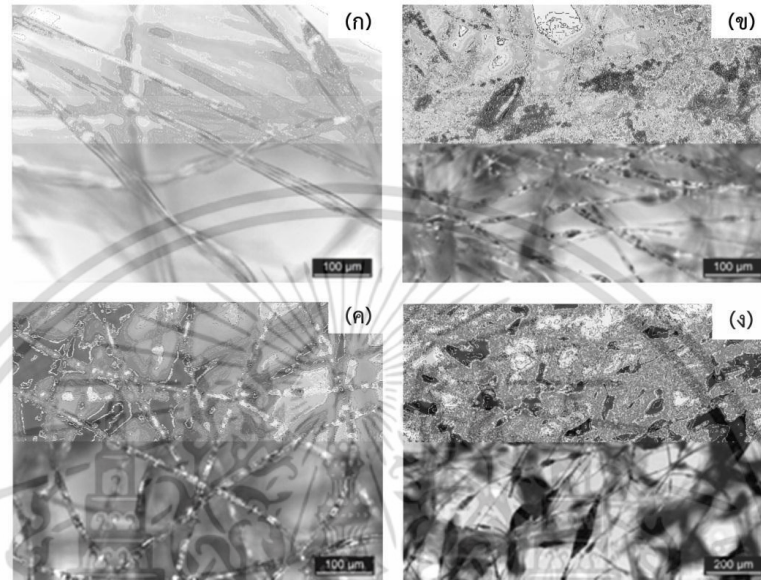
หนืด และการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของสารละลายผสม และการใช้ความเข้มข้นของโคโตซาน 3% โดยน้ำหนักในการผสมกับ PVA จะทำให้ขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ผลของการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (E.coli) โดยใช้วุ้นเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อ และสังเกตการเติบโตของเชื้อจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เส้นใย PVA ต่อโคโตซานในสัดส่วนการผสมเป็น 60/40 และ 50/50 มีผลในการยับยั้งการเจริญของเชื้อ E.coli ได้ค่อนข้างดีจึงมีแนวโน้มในการนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เป็นวัสดุปิดแผลต่อไปได้

กรชูลี พนาพิทักษ์กุล และคณะ [31] ได้การศึกษากระบวนการผลิตเส้นใยระดับนาโนโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของพอลิสไตรีน (PS) และพอลิสไตรีน/พอลิอะนิลีน (PS/PANI) ในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน (THF) ที่ความเข้มข้นของพอลิสไตรีน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (% w/w) และพอลิสไตรีน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผสมด้วยพอลิอะนิลีน 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มและแผ่นรองรับ 20-25 เซนติเมตร อัตราเร็วในการปล่อยสาร 1-2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง นำเส้นใยที่ผลิตได้นี้ไปสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ระยะห่างระหว่างเข็มกับแผ่นรองรับนั้นจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย ลักษณะของเส้นใยในแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกัน โดยแสดงรายละเอียดและการเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.8

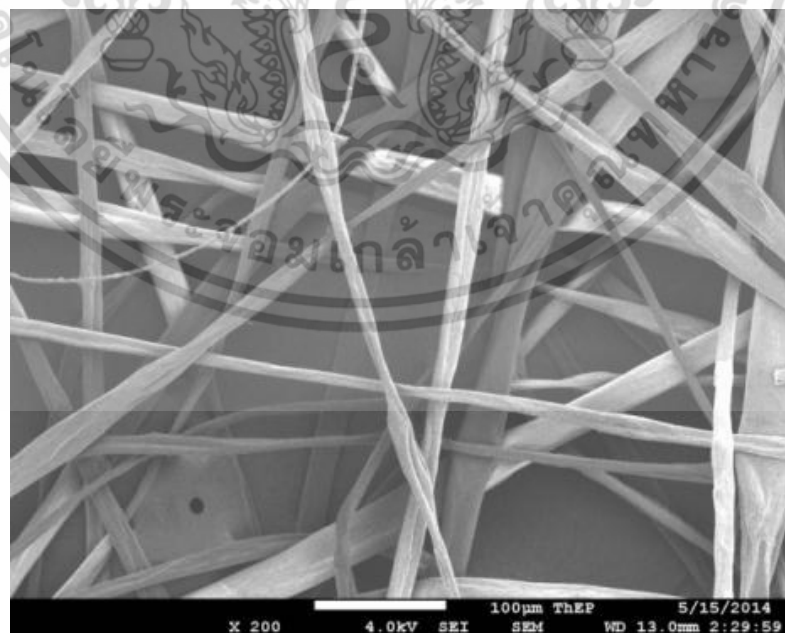
ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างเข็มและแผ่นรองรับที่ใช้และลักษณะของเส้นใยทั้ง 4 ตัวอย่าง [31]

สารละลาย	ระยะห่างระหว่างเข็มและแผ่นรองรับ (cm)	ขนาดของเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )	ลักษณะของเส้นใย
ตัวอย่างที่ 1	25	10-20	เส้นเล็ก เรียวยาว เรียบแบน เกิดปมบนเส้นใยเล็กน้อย
ตัวอย่างที่ 2	20	5-10	เส้นใยเล็ก ขาดง่ายกว่าเส้นใยตัวอย่างที่ 1 เกิดปมบนเส้นใยจำนวนมาก ที่แผ่นรองรับ พบว่ามีฝุ่นผงสีน้ำเงินเข้มกระจายอยู่เล็กน้อย
ตัวอย่างที่ 3	20	10-20	เส้นใยเล็ก ขาดง่ายกว่าเส้นใยตัวอย่างที่ 1 เกิดปมบนเส้นใยเล็กน้อย เกือบไม่มีฝุ่นผงสีน้ำเงินเข้ม
ตัวอย่างที่ 4	20	5-10	เส้นใยเล็ก ขาดง่ายมากที่สุด เกิดปมบนเส้นใยมากที่สุด มีฝุ่นผงสีน้ำเงินเข้มจำนวนมาก

เมื่อนำเส้นใยไปตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่าเส้นใยพอลิไสตรีนมีลักษณะเรียวยาว ใสสม่ำเสมอ (รูปที่ 2.39ก) ส่วนเส้นใยพอลิไสตรีนที่มีพอลิ อะนิลีนผสมมีลักษณะเป็นปมสลับกับยาวเรียวยาวโดยปริมาณของปมเพิ่มขึ้นตามความเปอร์เซ็นต์ของพอลิอะนิลีนที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.39ข และ 2.39ง)



รูปที่ 2.38 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของเส้นใย (ก) PS 30 % w/w (ข) PS/PANi 30/30 % w/w (ค) PS/PANi 30/50 % w/w (ง) PS/PANi 30/70 % w/w [31]



รูปที่ 2.39 ภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิไสตรีน/พอลิ

อะนิลีนที่ความเข้มข้น 30/50 % w/w [31]  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.39 แสดงภาพของเส้นใยพอลิโอสไตรีน/พอลิอะนิลีน ความเข้มข้น 30/5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ใช้เวลาในการละลายพอลิอะนิลีน 5 วัน พบว่าเส้นใยมีขนาดประมาณ 10-20 ไมโครเมตร มีความเรียบมากขึ้น มีปมที่เกิดจากพอลิอะนิลีนเล็กน้อย อาจเนื่องจากตัวอย่างสารละลายนี้ใช้เวลาละลายพอลิ อะนิลีนในเตตระไฮโดรฟูรานมากกว่าสารละลายตัวอย่างอื่น ๆ ทำให้ผงพอลิอะนิลีนกระจายตัวได้มากกว่าและไม่เกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ ดังนั้น เส้นใยที่ผลิตได้จึงมีความต่อเนื่องและไม่เป็นปม

Nuanchan Choktaweessap [32] ได้นำเจลาตินมาผลิตเส้นใยนาโนโดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยการเตรียมสารละลายเจลาตินในระบบตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายผสมที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนที่จะปั่นเส้นใยนาโนเจลาตินด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ตัวทำละลายเดี่ยวที่ใช้คือ กรดแอสติค และตัวทำละลายผสมที่ใช้ได้แก่ กรดแอสติค/ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ กรดแอสติค/เอทิลีนไกลคอล กรดแอสติค/ฟอร์มัลไมด์ และกรดแอสติค/ไตรฟลูออโรเอทานอล จากนั้นจึงศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสารละลายเจลาติน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเจลาติน ชนิดของตัวทำละลาย และสมบัติของสารละลาย (ความหนืด แรงตึงผิวและความนำไฟฟ้า) ซึ่งส่งผลต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเจลาติน จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ในระบบตัวทำละลายเดี่ยว โดยอาศัยเทคนิคการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเจลาตินในกรดแอสติคเพิ่มขึ้นจาก 15 ถึง 29 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถผลิตเส้นใยเจลาตินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นจาก 214 นาโนเมตร เป็น 840 นาโนเมตร ในขณะที่ในระบบตัวทำละลายผสมพบว่าสมบัติของตัวทำละลายมีผลอย่างมากต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตได้โดยเฉพาะเส้นใยเจลาตินที่เตรียมจากสารละลายผสมระหว่างกรดแอสติค/ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างกรดแอสติคต่อไดเมทิลซัลฟอกไซด์เป็น 97:3 ถึง 91:9 จะทำให้เส้นใยเจลาตินที่เตรียมได้มีความเรียบ ปราศจากปม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไดเมทิลซัลฟอกไซด์ในตัวทำละลายผสมเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้

3.1.1 แป้งข้าวโพด เกรดอาหาร ตรา คนอร์

3.1.2 เพกติน (Pectin) เกรดอาหาร บริษัท Multi Wealth Ltd.,Part

3.1.3 ไดมethylซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide : DMSO) เกรดการค้า บริษัท Carlo Erba

Reagent

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 ชุดเครื่องแก้ว

3.2.2 ชุดปั่นกวน

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนัก : Mettler Toledo Co., Ltd รุ่น ML3002

3.2.4 ตู้อบ (Oven)

3.2.5 เข็มฉีดยา

3.2.6 กระจกฉีดยา

3.2.7 เครื่องควบคุมอัตราการป้อนสารละลาย

3.2.8 เครื่องควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้า

3.2.9 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter : DSC) : Mettler-Toledo รุ่น DSC822 และ (Thermogravimetric Analyzer : TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris1

3.2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) : รุ่น LEO 1455 VP : LEO Ltd.

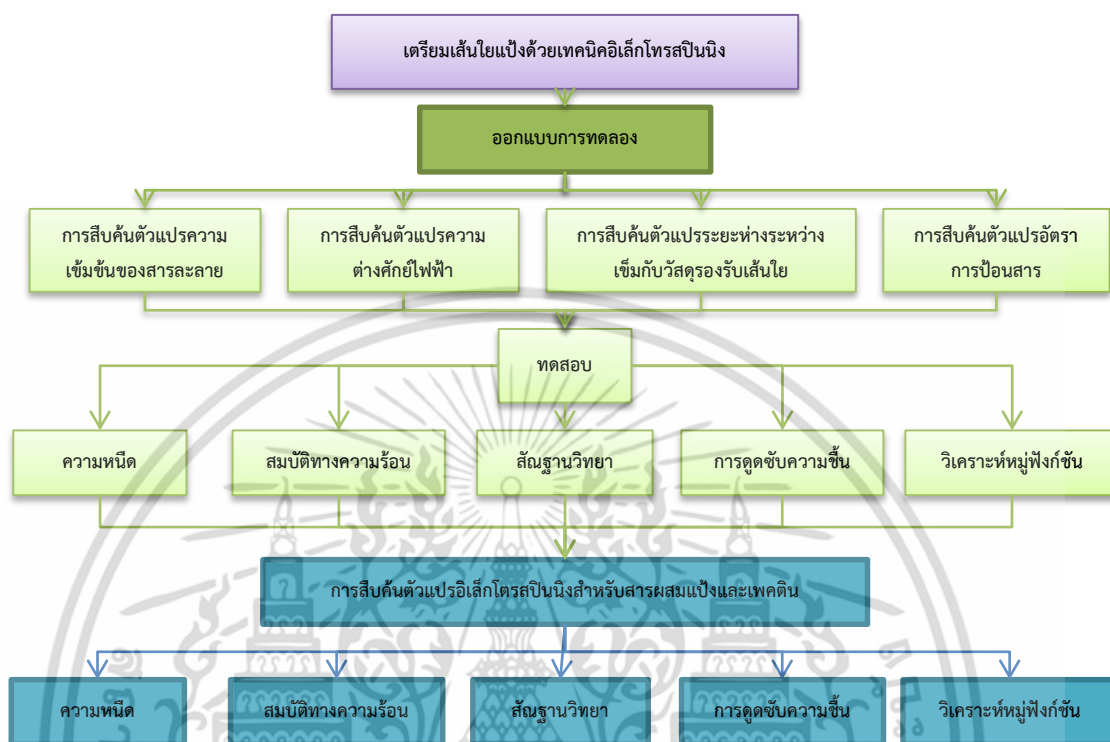
3.2.11 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : Lloyd Instrument Ltd. รุ่น LR 5 K

3.2.12 เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) รุ่น SPECTRUM GX, Perkin Elmer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการทำงานวิจัย

#### 3.3.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE)

##### 3.3.1.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนการออกแบบการทดลองนั้น ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  โดยมีปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ปัจจัยความเข้มข้นของสารละลาย ปัจจัยความต่างศักย์ไฟฟ้า ปัจจัยระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย และปัจจัยอัตราการป้อนสารละลาย จากนั้นทำการกำหนดระดับของปัจจัยต่ำและสูงของแต่ละปัจจัยดังนี้

กำหนดให้	A	คือ	ปัจจัยความเข้มข้นของสารละลาย ค่าระดับต่ำ 8 %w/w ค่าระดับสูง 15 %w/w
	B	คือ	ปัจจัยความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่าระดับต่ำ 5 kV ค่าระดับสูง 10 kV
	C	คือ	ปัจจัยระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

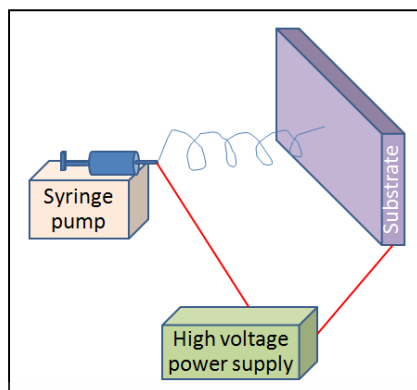
		ค่าระดับต่ำ 5 cm
		ค่าระดับสูง 10 cm
D	คือ	ปัจจัยอัตราการป้อนสารละลาย
		ค่าระดับต่ำ 3 ml/h
		ค่าระดับสูง 5 ml/h
1	คือ	ปัจจัยระดับสูง
-1	คือ	ปัจจัยระดับต่ำ

เมื่อทำการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยเรียบร้อยแล้วจึงทำการออกแบบการทดลองได้ ขั้นตอนการทดลองทั้งหมด 16 ขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนใช้ค่าระดับของปัจจัยที่แตกต่างกันดัง ตารางที่ 3.1 หลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้ค่าของแต่ละปัจจัย ในส่วนการทดลองนั้นทำโดยผสม แป้งและไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide) ในอัตราส่วนต่างๆ ทำการให้ความร้อนผ่านอ่าง น้ำร้อนและทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นรอให้สารละลายเย็นตัวจนถึง 35 องศาเซลเซียส แล้วฉีดเส้นใยโดยใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลองโดยกำหนดระดับปัจจัยแต่ละตัวแปรที่แตกต่างกัน

Run No	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพการจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการเตรียมเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้ว นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง บันทึกผล ทำการวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) โดยการวิเคราะห์ข้อมูล จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์ และสรุปผลเพื่อหาความสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของเส้นใย หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมเพื่อดูว่าผลดังกล่าวมีผลอย่างไรต่อเส้นใย

### 3.3.2 การสืบค้นตัวแปรในกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับแป้ง

#### 3.3.2.1 การสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลาย

ซึ่งแป้งข้าวโพด นำมาผสมกับไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide) ในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 ทำการให้ความร้อนผ่านอ่างน้ำร้อนและทำการปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นรอให้สารละลายเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แล้วฉีดเส้นใยโดยใช้เครื่องอิเล็กโตรสปิน ด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 10kV ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย 7 เซนติเมตร อัตราการป้อนสารละลาย 3ml/h

ตารางที่ 3.2 ค่าความเข้มข้นของสารละลายแป้งแต่ละสูตร

สูตร	ค่าความเข้มข้นของสารละลายแป้ง (%w/w)
1	8
2	10
3	12
4	15
5	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับ ความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

### 3.3.2.2 การสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้า

เตรียมแบ็งความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขั้นตอนที่ 3.3.2.1) นำมาการฉีดเส้นใย ด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ด้วยระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย 7 เซนติเมตร อัตราการป้อนสารละลาย 3 ml/h โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความต่างศักย์ไฟฟ้าในแต่ละสูตร

สูตร	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)
1	5
2	7
3	10
4	12

นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับ ความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

### 3.3.2.3 การสืบค้นตัวแปรระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย

เตรียมแบ็งความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขั้นตอนที่ 3.3.2.1) นำมาการฉีดเส้นใย ด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 12 kV (ขั้นตอนที่ 3.3.2.2) อัตราการป้อนสารละลาย 3 ml/h โดยที่ใช้ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยในแต่ละสูตร

สูตร	ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย (เซนติเมตร)
1	5
2	7
3	10
4	12

นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับ ความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.4 การสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสาร

ทำการเตรียมแป้งความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขั้นตอนที่ 3.3.2.1) นำมากรีดเส้นใยด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 12 kV (ขั้นตอนที่ 3.3.2.2) ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใย 12 เซนติเมตร (ขั้นตอนที่ 3.3.2.3) โดยที่ใช้อัตราการป้อนสารละลายดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อัตราการป้อนสารในแต่ละสูตร

สูตร	อัตราการป้อนสาร (ml/h)
1	3
2	4
3	5
4	6

นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบความเหนียวของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับขึ้นสมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

### 3.3.3 การสืบค้นตัวแปรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสารผสมแป้งและเพคติน

นำแป้งข้าวโพด และเพคตินมาผสมกันในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.6 แล้วนำไปผสมกับไดเมทิลซัลโฟลไซด์ หลังจากนั้นนำไปฉีดเส้นใยด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้สภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับ และอัตราการป้อนสารละลายเช่นเดียวกับการสืบค้นในแป้งข้าวโพด

ตารางที่ 3.6 สัดส่วนโดยน้ำหนักของแป้งต่อเพคตินในแต่ละสูตร

สูตร	สัดส่วนโดยน้ำหนักของแป้งต่อเพคติน
1	100/0
2	90/10
3	85/15
4	80/20
5	0/100

นำเส้นใยที่ได้ไปทดสอบความเหนียวของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับขึ้นสมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การตรวจสอบเอกลักษณ์ (Characterization)

#### 3.4.1 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

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

#### 3.4.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดย FTIR

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) นำตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2 – 0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^{-4}$  kg/cm<sup>2</sup> เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำแผ่นฟิล์มที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ และนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

#### 3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

นำชิ้นงานตัวอย่างมาศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก ( $T_m$ ) ด้วยเครื่อง DSC โดยทำการชั่งน้ำหนักสารประมาณ 10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 300 °C

#### 3.4.4 ปริมาณการดูดซับความชื้น

ตัดชิ้นงานเป็นแผ่นขนาด 2x2 เซนติเมตร นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปวางไว้ในบรรยากาศห้อง โดยอุณหภูมิประมาณ 28 ถึง 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน โดยจดบันทึกน้ำหนักทุก 2 วัน ซึ่งปริมาณการดูดซับความชื้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

เมื่อ	$M_a$	คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ เวลาใดๆ
	$W_e$	คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังดูดซับ
	$W_0$	คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 การทดสอบความหนืด

เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer) ใช้ในการวัดความหนืด โดยนำแป้งข้าวโพด และเพคติน ละลายในน้ำ จากนั้นนำไปให้ความร้อนและปั่นกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที บันทึกค่าความหนืดที่ได้จากเครื่อง โดยใช้ความเร็วรอบ 30 rpm และใช้เข็มเบอร์ 2 ในการวัด ภายใต้บรรยากาศห้อง อุณหภูมิประมาณ 28 ถึง 35 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

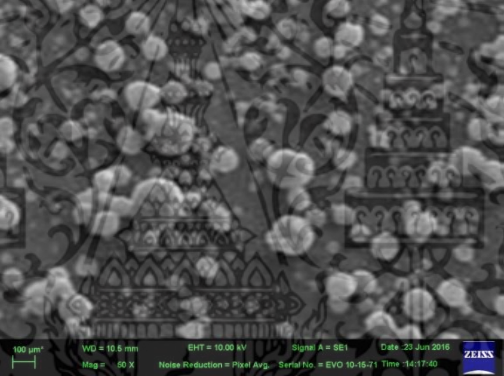
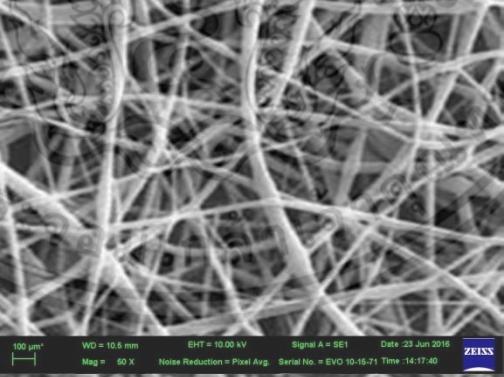
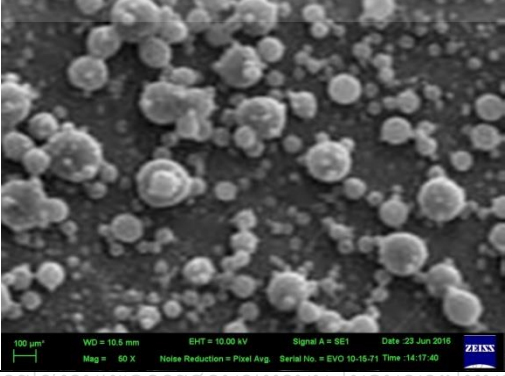
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

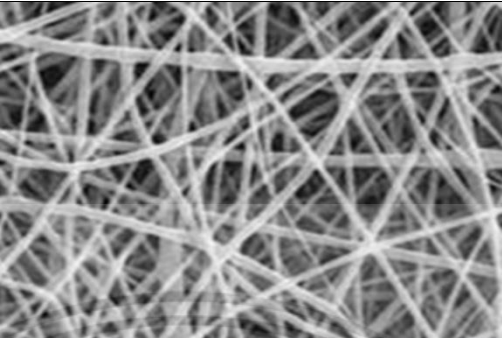
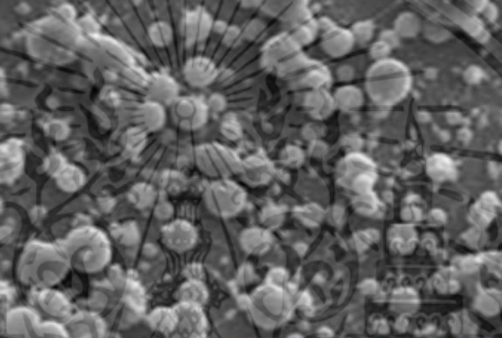
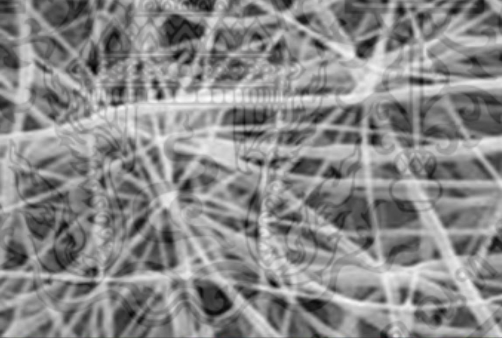
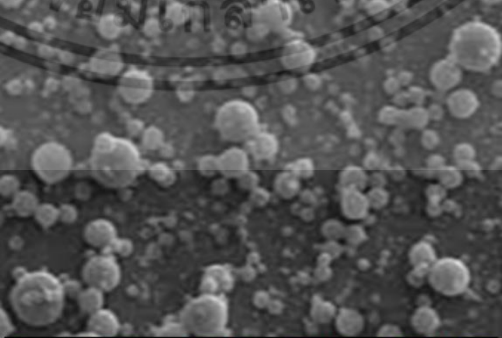
#### 4.1 การออกแบบการทดลอง

จากทดลองตามขั้นตอนการทดลองทั้ง 16 ขั้นตอนดังตารางที่ 3.1 นำเส้นใยที่ได้ในแต่ละขั้นตอนไปทดสอบสัณฐานวิทยา หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ขนาดดังตารางที่ 4.1

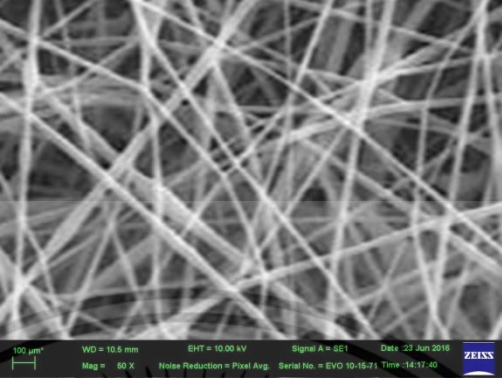
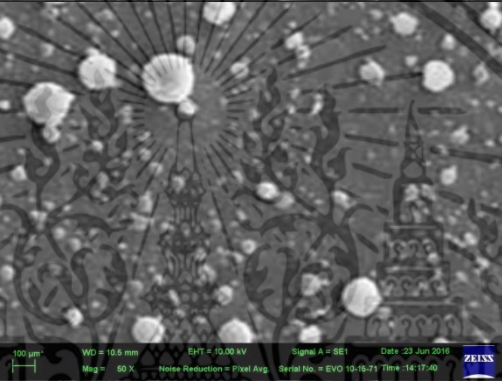
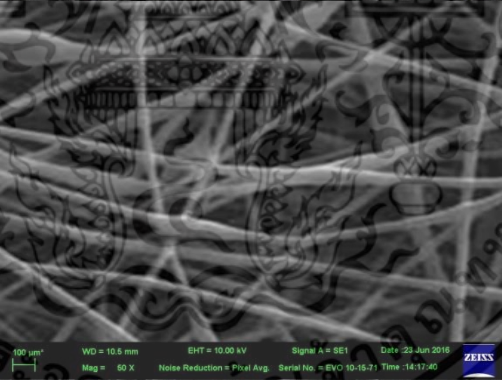
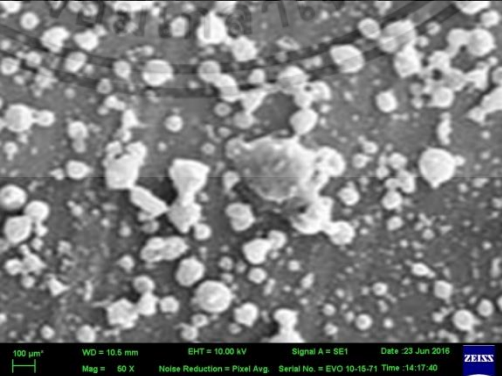
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในแต่ละขั้นตอนของการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอน	ปัจจัย	ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
1	-1		0
2	a		132.12
3	b		0

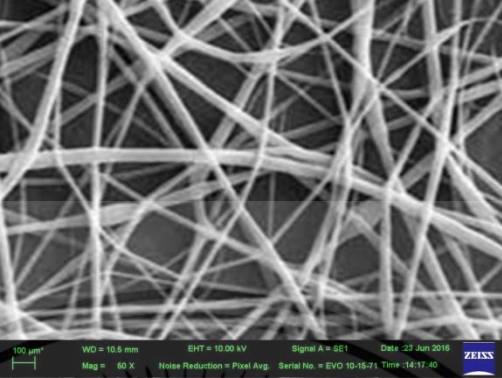
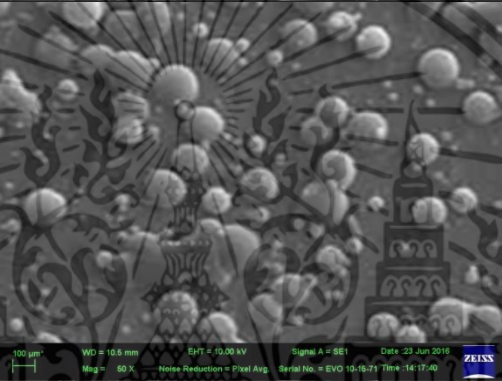
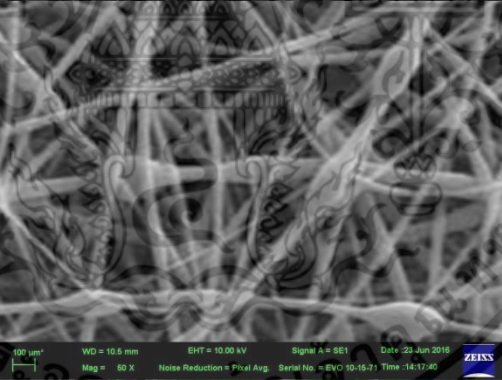
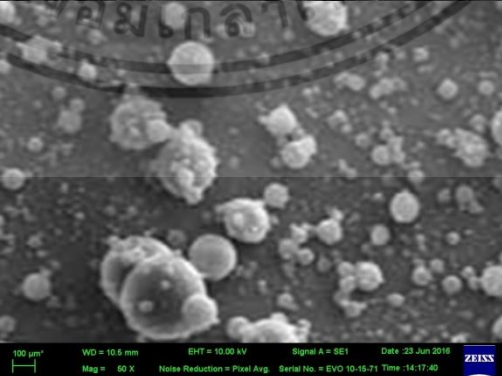
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน	ปัจจัย	ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
4	ab		129.51
5	c		0
6	ac		86.28
7	bc		0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน	ปัจจัย	ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
8	abc		89.28
9	d		0
10	ad		173.63
11	bd		0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน	ปัจจัย	ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
12	abd		164.79
13	cd		0
14	acd		166.32
15	bcd		0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอน	ปัจจัย	ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
16	abcd	 <p>100 <math>\mu\text{m}</math> WD = 10.5 mm EHT = 10.00 kV Signal A = SE1 Date: 23 Jun 2016 Mag = 50 X Noise Reduction = Pixel Avg. Serial No. = EVO 10-16-21 Time: 14:17:40 ZEISS</p>	159.12



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบขนาดของเส้นใยแป้งข้าวโพดที่ได้จากการทดลองในแต่ละขั้นตอนแล้ว ต่อจากนั้น นำขนาดที่วัดได้ไปคูณกับระดับของแต่ละปัจจัยในแต่ละขั้นตอนการทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลขนาดของเส้นใย และระดับปัจจัยของแต่ละขั้นตอน

Run No	Source	ขนาดเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )	A	B	A B	C	A C	B C	A B C	D	A D	B D	A B D	C D	A C D	B C D	A B C D
1	-1	0	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
2	a	132.12	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
3	b	0	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
4	ab	129.51	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	c	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
6	ac	86.28	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
7	bc	0	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
8	abc	89.28	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	d	0	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	ad	173.63	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
11	bd	0	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
12	abd	164.79	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
13	cd	0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	acd	166.32	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
15	bcd	0	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
16	abcd	159.12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบขนาดเส้นใยในแต่ละขั้นตอนการทดลองนำมาคูณกับระดับปัจจัยในแต่ละขั้นตอนการทดลองได้ค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลคูณของขนาดเส้นใยกับระดับปัจจัยในแต่ละขั้นตอน

Run No	Source	ขนาดเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D
1	-1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	a	132.12	132.13	-132.13	-132.13	-132.13	-132.13	132.13	132.13	-132.13
3	b	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	ab	129.51	129.51	129.51	129.51	-129.51	-129.51	-129.51	-129.51	-129.51
5	c	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	ac	86.28	86.29	-86.29	-86.29	86.29	86.29	-86.29	-86.29	-86.29
7	bc	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	abc	89.28	89.29	89.29	89.29	89.29	89.29	89.29	89.29	-89.29
9	d	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	ad	173.63	173.64	-173.64	-173.64	-173.64	-173.64	173.64	173.64	173.64
11	bd	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	abd	164.79	164.79	164.79	164.79	-164.79	-164.79	-164.79	-164.79	164.79
13	cd	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	acd	166.32	166.33	-166.33	-166.33	166.33	166.33	-166.33	-166.33	166.33
15	bcd	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	abcd	159.12	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13
	รวม	1101.10	1101.10	-15.66	-15.66	-99.05	-99.05	7.26	7.26	226.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Run No	Source	ขนาดเส้นใย ( $\mu\text{m}$ )	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
1	-1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	A	132.12	-132.13	132.13	132.13	132.13	132.13	-132.13	-132.13
3	B	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	Ab	129.51	-129.51	-129.51	-129.51	129.51	129.51	129.51	129.51
5	C	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	Ac	86.28	-86.29	86.29	86.29	-86.29	-86.29	86.29	86.29
7	Bc	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Abc	89.28	-89.29	-89.29	-89.29	-89.29	-89.29	-89.29	-89.29
9	D	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	Ad	173.63	173.64	-173.64	-173.64	-173.64	-173.64	173.64	173.64
11	Bd	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Abd	164.79	164.79	164.79	164.79	-164.79	-164.79	-164.79	-164.79
13	Cd	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	Accd	166.32	166.33	-166.33	-166.33	166.33	166.33	-166.33	-166.33
15	Bcd	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	Abcd	159.12	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13	159.13
	รวม	1101.10	226.67	-16.43	-16.43	73.08	73.08	-3.97	-3.97

จากนั้นนำผลรวมของตัวแปรแต่ละตัวแปรมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้แบบจำลอง  $2^k$  แฟกทอเรียลได้เป็นผลของปัจจัยต่างๆ ดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่าการวิเคราะห์ทางสถิติของแต่ละปัจจัย

A	137.6379625
B	-12.3808875
AB	-1.9577375
C	-12.3808875
AC	-1.9577375
BC	0.9074125
ABC	0.9074125
D	28.3334125
AD	28.3334125
BD	-2.0538375
ABD	-2.0538375
CD	9.1355625
ACD	9.1355625
BCD	-0.4964875
ABCD	-0.4964875

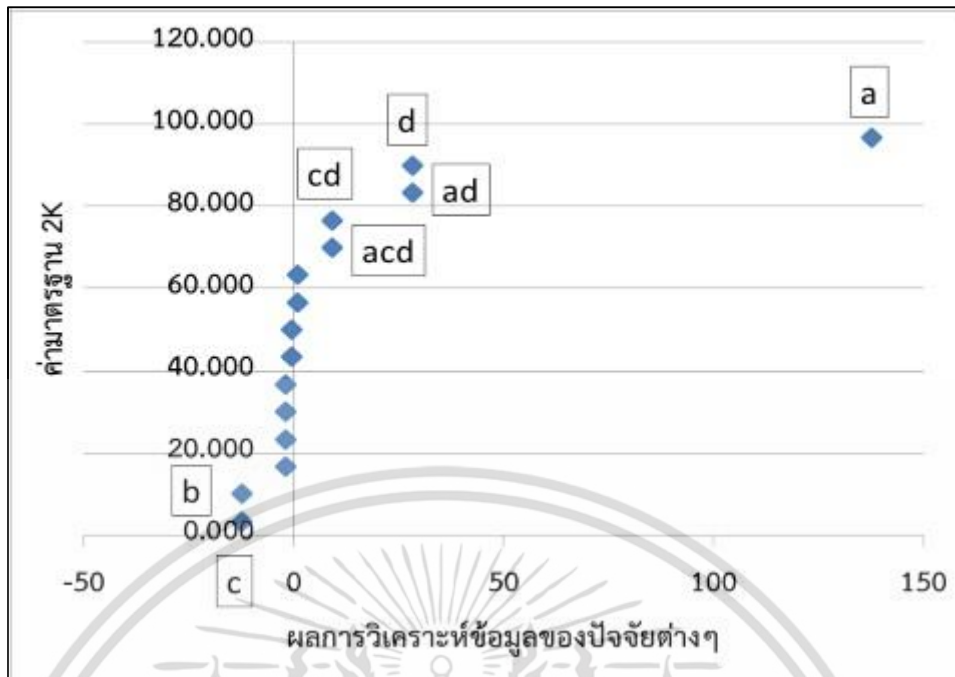
นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.4 มาเรียงลำดับข้อมูลจากน้อยไปหามาก ดังตารางที่ 4.5 แล้วมา  
 นำหาความสัมพันธ์การกระจายตัวของปัจจัยต่างๆ ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของปัจจัยต่างๆกับค่ามาตรฐาน  $2^k$ 

j	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ของปัจจัยต่างๆ	ค่ามาตรฐาน $2^k$
1	137.638	3.333
2	-12.3809	10.000
3	-12.3809	16.667
4	-2.05384	23.333
5	-2.05384	30.000
6	-1.95774	36.667
7	-1.95774	43.333
8	-0.49649	50.000
9	-0.49649	56.667
10	0.907413	63.333
11	0.907413	70.000
12	9.135563	76.667
13	9.135563	83.333
14	28.33341	90.000
15	28.33341	96.667

หมายเหตุ ค่ามาตรฐาน  $2^k = (j-0.5)*100/15$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเตรียมเส้นใยแ่งด้วยวิธีเล็กโทรสปินนิง

จากรูปที่ 4.1 พบว่ากลุ่มข้อมูลส่วนใหญ่มีการเกาะกลุ่มกันแต่มีข้อมูลในชั้นตอน a b c d ad cd และ acd มีการกระจายตัวออกจากกลุ่ม หมายความว่ากลุ่มข้อมูลดังกล่าวส่งผลต่อขนาดของเส้นใยที่เตรียมด้วยวิธีเล็กโทรสปินนิง และเมื่อสังเกตข้อมูลในชั้น a ซึ่งกำหนดให้ปัจจัย A เป็นปัจจัยสูง ส่วนปัจจัย B C และ D เป็นปัจจัยต่ำ นั้นหมายความว่าปัจจัย A มีผลต่อขนาดของเส้นใย ข้อมูลในชั้น b ซึ่งกำหนดให้ปัจจัย B เป็นปัจจัยสูง ส่วนปัจจัย A C และ D เป็นปัจจัยต่ำ นั้นหมายความว่าปัจจัย B มีผลต่อขนาดของเส้นใย ข้อมูลในชั้น c ซึ่งกำหนดให้ปัจจัย C เป็นปัจจัยสูง ส่วนปัจจัย A B และ D เป็นปัจจัยต่ำ นั้นหมายความว่าปัจจัย C มีผลต่อขนาดของเส้นใย ข้อมูลในชั้น d ซึ่งกำหนดให้ปัจจัย D เป็นปัจจัยสูง ส่วนปัจจัย A B และ C เป็นปัจจัยต่ำ นั้นหมายความว่าปัจจัย D มีผลต่อขนาดของเส้นใย

จากผลการวิเคราะห์กล่าวได้ว่าปัจจัย A B C และ D มีผลต่อขนาดของเส้นใยที่เตรียมด้วยวิธีเล็กโทรสปินนิง ซึ่งปัจจัย A คือ ปัจจัยความเข้มข้นของสารละลาย ปัจจัย B คือ ปัจจัยความต่างศักย์ไฟฟ้า ปัจจัย C คือ ปัจจัยระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใย ปัจจัย D คือ ปัจจัยอัตราการป้อนสารละลาย จึงสรุปได้ว่า ปัจจัยความเข้มข้นของสารละลาย ปัจจัยความต่างศักย์ไฟฟ้า ปัจจัยระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใย และปัจจัยอัตราการป้อนสารละลายมีผลต่อขนาดของเส้นใยที่เตรียมด้วยวิธีเล็กโทรสปินนิง จึงต้องทำการศึกษปัจจัยดังกล่าวเพิ่มเติมเพื่อดูถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยดังกล่าวว่ามีผลต่อเส้นใยอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

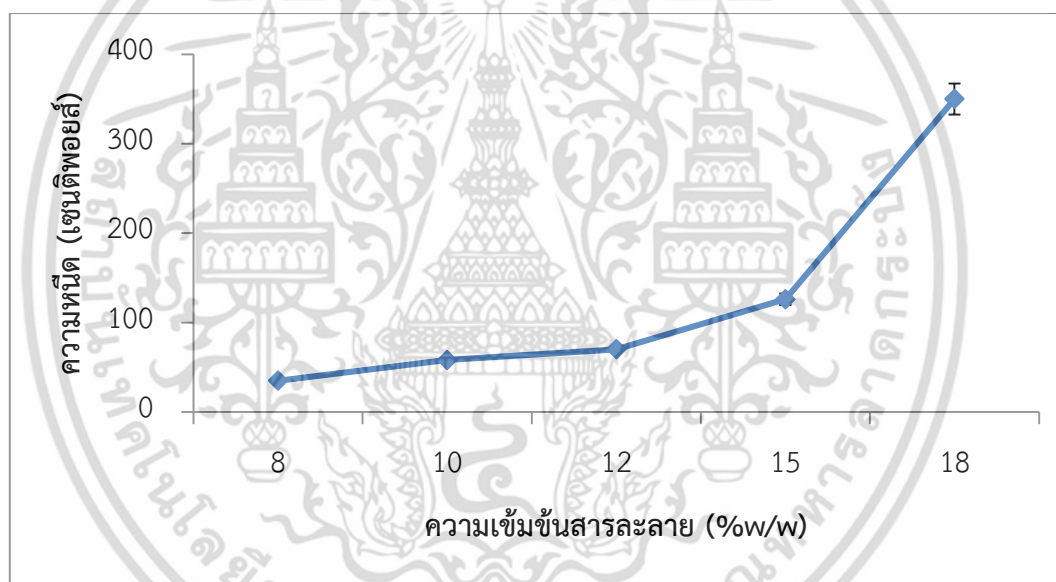
## 4.2 การสืบค้นตัวแปรในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับแป้ง

### 4.2.1 การสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลาย

ในการสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลายทำโดยเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นต่างกันดังนี้ 8 10 12 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วผ่านเข้าเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งได้เส้นใยเพื่อนำไปทดสอบความเหนียวของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันได้ผลดังนี้

#### 4.2.1.1 ความเหนียวของสารละลาย

เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแป้งข้าวโพดจากความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นความเข้มข้น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดมีผลทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มจาก 35 เซนติพอยส์ เป็น 350 เซนติพอยส์ ดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ ก.1



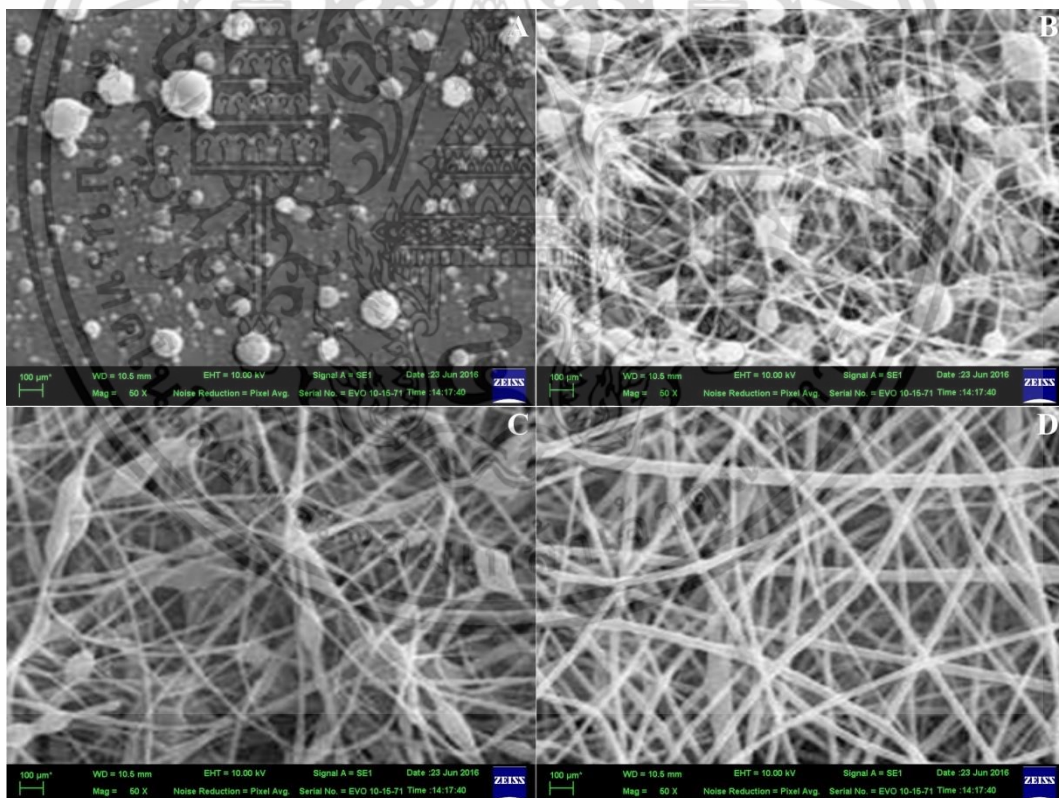
รูปที่ 4.2 ความเหนียวของสารละลายแป้งที่ความเข้มข้น 8 10 12 15 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

#### 4.2.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากภาพการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราดดังรูปที่ 4.3 แสดงภาพลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.3A) ภาพที่ได้พบเพียงเม็ด ไม่พบเส้นใย เนื่องจากความเข้มข้นพอลิเมอร์น้อยจะมีแรงดึงดูดต่ำทำให้แรงผลัทางไฟฟ้าเอาชนะแรงดึงดูดได้ง่าย ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำทำให้สารละลายแตกเป็นละอองฝอยเกิดเป็นอนุภาคทรงกลม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็น 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่ามีเส้นใยเกิดขึ้นแต่มีปิดแทรกอยู่บนเส้นใย เป็นผลจากความหนืดที่เพิ่มขึ้น ทำให้สารละลายแตกเป็นละอองได้น้อยลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าไม่ปรากฏปิดบนเส้นใย เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น ทำให้สารละลายสามารถยืดยาวออกเป็นเส้นใยได้โดยไม่ขาดออกจากกัน จนกว่าจะไปถึงวัสดุรองรับเส้นใย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็น 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าไม่สามารถทำการฉีดเป็นเส้นใยได้ เนื่องจากความหนืดที่มากเกินไปทำให้สารละลายไม่สามารถไหลออกมาได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ<sup>[16]</sup> ที่ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของพอลิเอทิลีนออกไซด์ความเข้มข้น 1- 4.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้นโดยเพิ่มจาก 13 เซนติพอยส์ เป็น 120 เซนติพอยส์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจาก 1 เป็น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักสามารถเตรียมเส้นใยโดยไม่พบปิด และความหนืดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์น้อยลงความหนืดจะลดลงด้วย ทำให้เกิดปิดบนเส้นใย

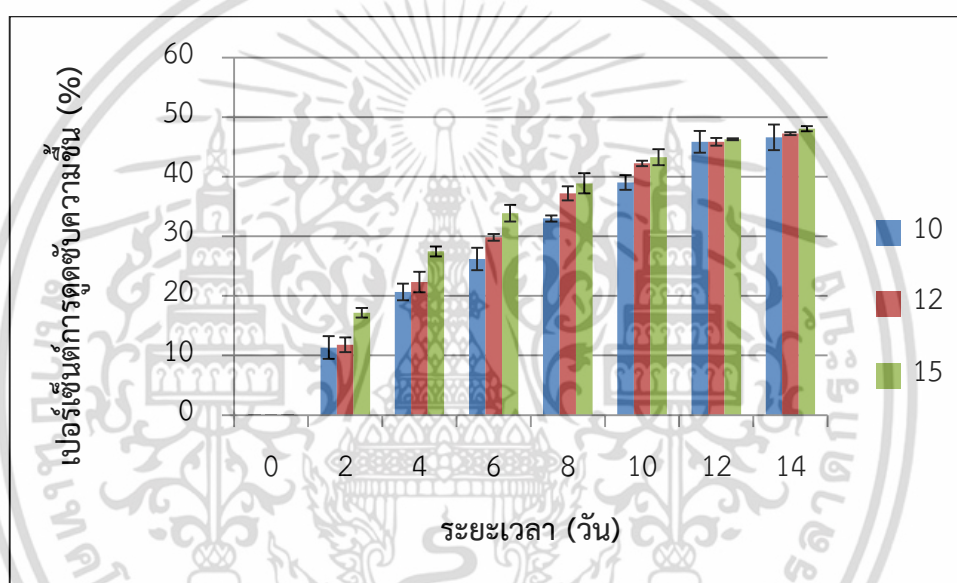


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยแบ่งที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ความเข้มข้น (A) 8 (B) 10 (C) 12 และ (D) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1.3 การดูดซับความชื้น

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายส่งผลให้การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.4 และ ตารางที่ จ.1 เป็นผลมาจากลักษณะของเส้นใย โดยที่ความเข้มข้นของสารละลาย 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนั้นเส้นใยที่เกิดมีปิตแทรกอยู่บนเส้นใย ทำให้ความชื้นสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในโครงสร้างได้น้อยลงเนื่องจากการมีปิตแทรกอยู่นั้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับความชื้นมีน้อยลง แต่ที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่พบปิตจึงสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในโครงสร้างได้มากกว่าเพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เยอะกว่า และที่ความเข้มข้นของสารละลาย 8 และ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถหาค่าการดูดซับได้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าวไม่สามารถเตรียมเป็นเส้นใยได้

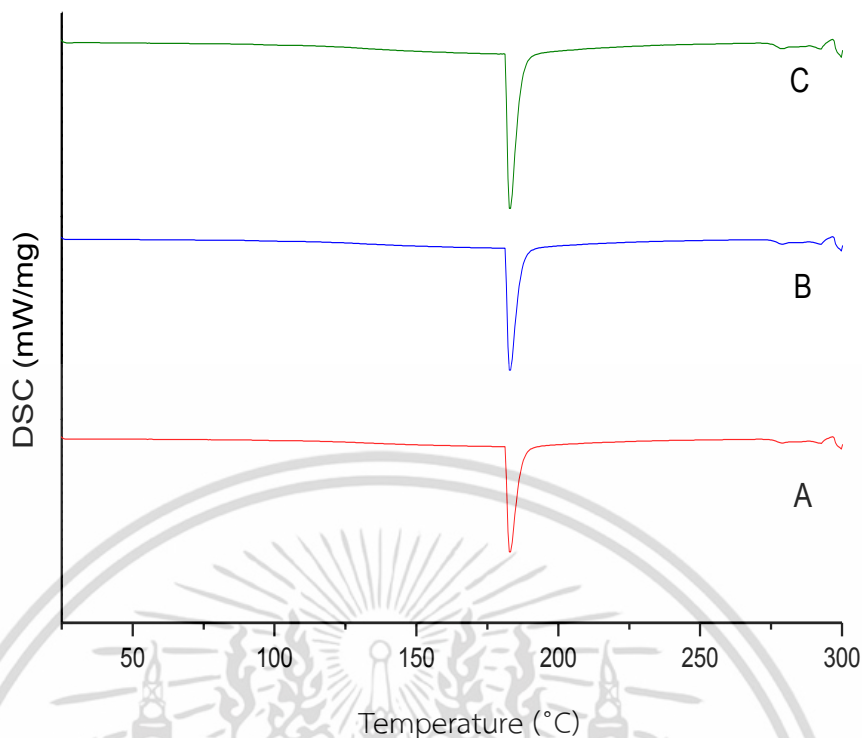


รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเส้นใยแบ่งข้าวโพดที่ความเข้มข้นสารละลาย 10 12 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.2.1.4 สมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ 10 °C/min จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 300 °C พบว่าปรากฏพีคเพียงตำแหน่งเดียวอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.5 (A) โดยพีคดังกล่าวเป็นช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของแป้ง และเมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟ DSC ของแต่ละความเข้มข้น พบว่าพีคที่ปรากฏอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.6 จึงกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายแป้งนั้นไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของเส้นใย

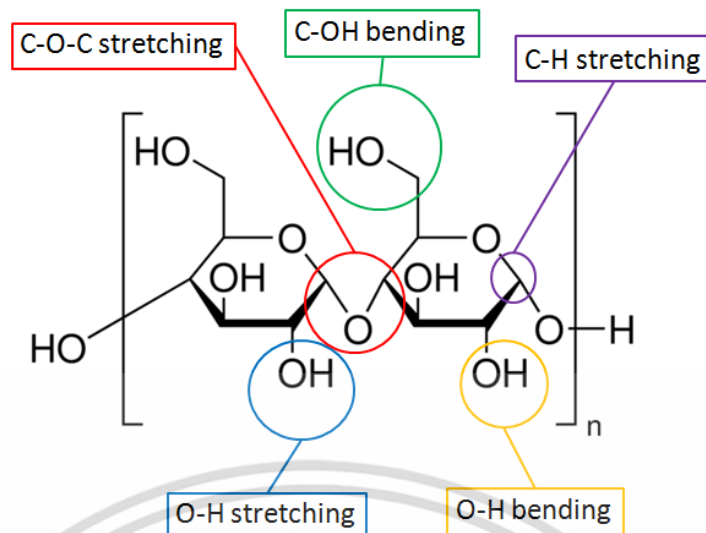
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



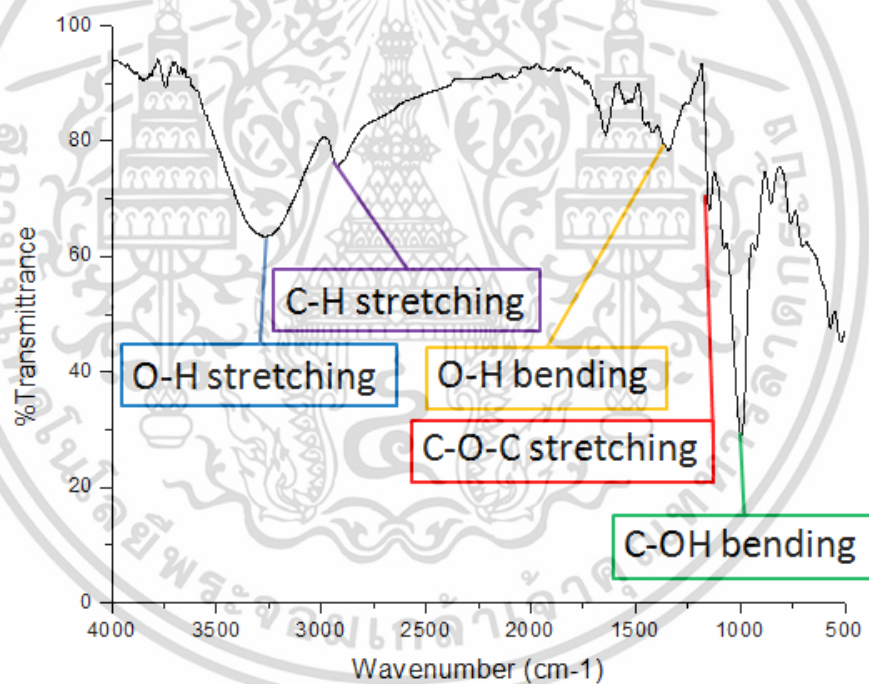
รูปที่ 4.5 กราฟ DSC ของเส้นใยแป่งที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ความเข้มข้น (A) 10 (B) 12 และ (C) 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.2.1.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

เมื่อนำเส้นใยแป่งที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ได้กราฟดังรูปที่ 4.7 โดยพบพีกที่ตำแหน่งต่างๆดังนี้ พีกในช่วง  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป่ง พีกในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  และ  $\text{CH}_3$  ของแป่ง ที่ตำแหน่ง  $1600\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของแป่ง ที่ถูกออกซิไดซ์โดยไดเมทิลซัลฟอกไซด์เกิดเป็นหมู่อาร์บอนิล พีกในช่วง  $1445-1485\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะของการสั่นแบบ O-H bending พีกช่วง  $1000-1400\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-O-C stretching และพีกช่วง  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-OH bending ของแป่ง



รูปที่ 4.6 โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของแป้ง



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันเส้นใยแป้งข้าวโพด

#### 4.2.2 การสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้า

ในการสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย 7 เซนติเมตร อัตราการป้อนสารละลาย 3ml/h มีการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 5 7 10 และ 12 กิโลโวลต์ เพื่อนำไปทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันได้ผลดังนี้

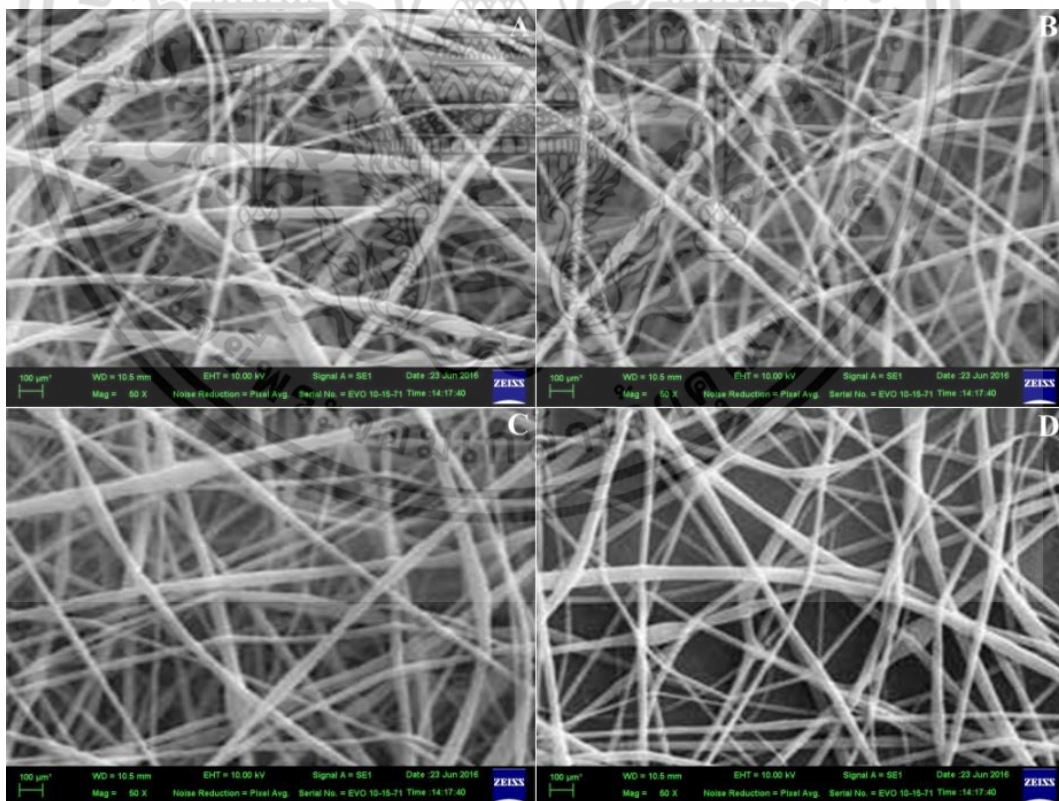
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.1 ความหนืดของสารละลาย

เนื่องด้วยในขั้นตอนนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพียงความเข้มข้นเดียว โดยมีความหนืดเท่ากับ 126 เซนติพอยส์ จึงไม่มีผลต่อตัวแปร

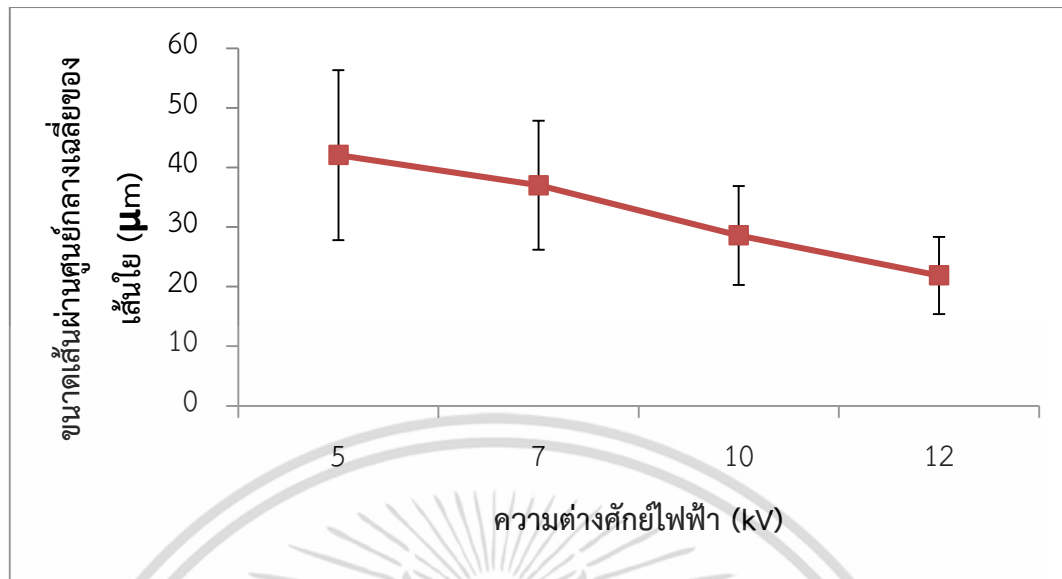
#### 4.2.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากผลการศึกษาพบว่า ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยโดยรวมไม่แตกต่างกัน กล่าวคือ มีรูปร่างเป็นเส้นใยตรง ผิวเรียบไม่ปรากฏบิดบนเส้นใยดังรูปที่ 4.8 เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ส่งผลให้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยมีค่าเท่ากับ  $42 \pm 14$   $37 \pm 10$   $28 \pm 8$  และ  $21 \pm 6$  ไมโครเมตร ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5 7 10 และ 12 กิโลโวลต์ ตามลำดับดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ ข.1 เห็นได้ว่าเมื่อค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลทำให้ประจุที่อยู่ในลำของสารละลายเกิดการผลักกันมากขึ้น ส่งผลให้ลำของสารละลายยืดออกมากขึ้น เมื่อลำสารละลายยืดออกไปมากขนาดของเส้นใยจึงมีขนาดลดลง สอดคล้องกับศึกษาของ Homayoni และคณะ<sup>[8]</sup> โดยใช้โคโตนานที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ด้วยกรดเป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ละลายในตัวทำละลายกรดอะซิติก 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่า เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบ่งที่ความต่าง

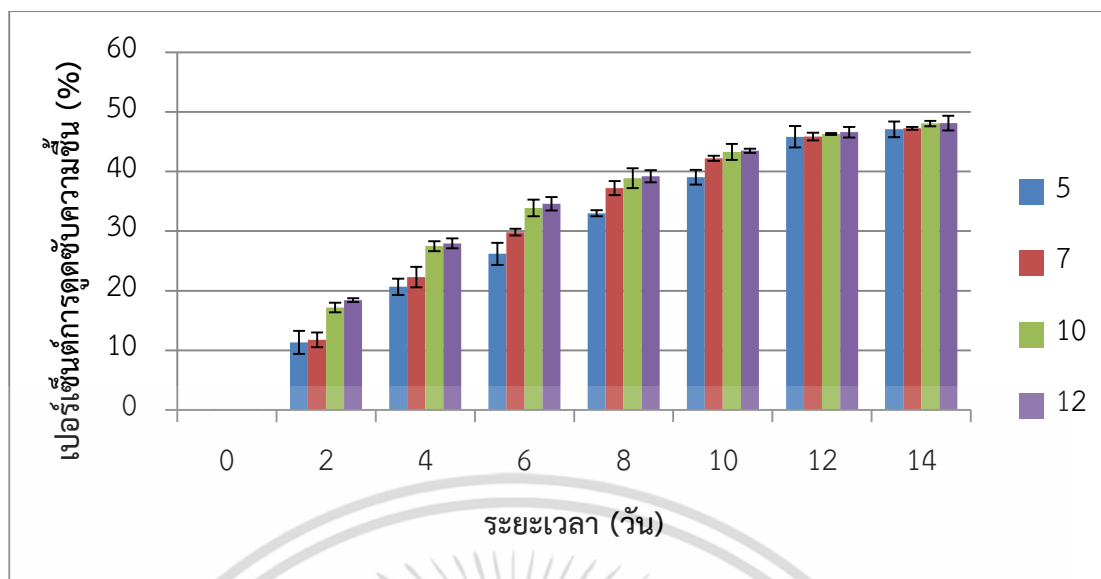
ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (A) 5 (B) 7 (C) 10 และ (D) 12 กิโลโวลต์  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยแบ่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 5 7 10 และ 12 กิโลโวลต์

#### 4.2.2.3 สมบัติการดูดซับความชื้น

จากการทดสอบพบว่าเส้นใยเกิดการดูดซับความชื้นดังรูปที่ 4.10 และตารางที่ จ.2 โดยในระยะแรกมีการดูดความชื้นในปริมาณที่มาก และค่อยๆ น้อยลงเมื่อเวลาผ่านไป ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยแบ่งมีหมู่ฟังก์ชัน ไฮดรอกซิลที่สามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่อิ่มตัว น้ำหนักของชิ้นงานจึงคงที่ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันในแต่ละความต่างศักย์ พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ ค่าการดูดซับความชื้นจะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เป็นผลมาจากขนาดของเส้นใยที่เล็กลง ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยกับความชื้นมากขึ้น ส่งผลให้น้ำสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยแบ่งได้มากขึ้น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเส้นใยแบ่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 5 7 10 และ 12 กิโลโวลต์

#### 4.2.2.4 สมบัติทางความร้อน

ในส่วนของสมบัติความร้อนนั้น เนื่องจากสารละลายที่ใช้คือแบ่งเพียงชนิดเดียว สมบัติทางความร้อนของเส้นใยจึงมีลักษณะเหมือนกับขั้นตอนที่ 4.2.1.4 โดยมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของแบ่งอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนั้น เนื่องจากในขั้นตอนนี้ได้ใช้สารละลายแบ่งในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยจึงมีหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับขั้นตอน 4.2.1.5

#### 4.2.3 การสืบค้นตัวแปรระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย

การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยต่อลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ โดยใช้ระยะห่าง 5 7 10 และ 12 เซนติเมตร ความเข้มข้นสารละลาย 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ศักย์ไฟฟ้า 12 กิโลโวลต์ อัตราการป้อนสารละลาย 3ml/h เพื่อนำไปทดสอบความเหนียวของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันได้ผลดังนี้

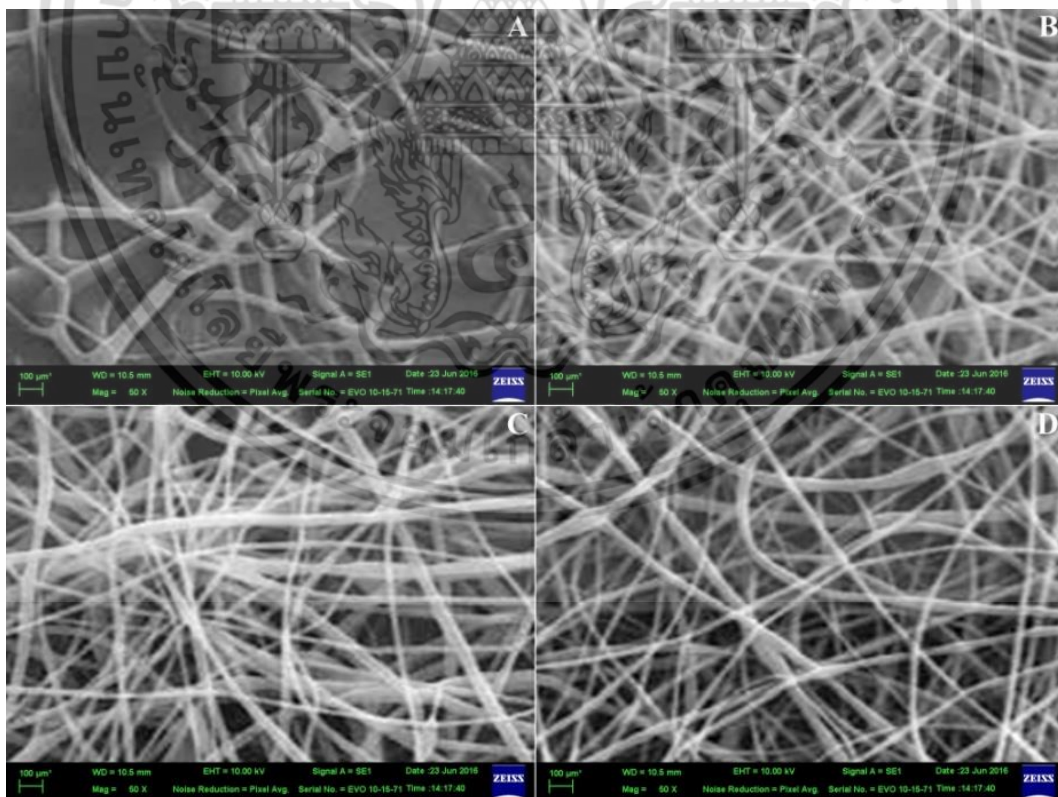
##### 4.2.3.1 ความเหนียวของสารละลาย

เนื่องจากสารละลายที่ใช้คือ สารละลายแบ่งที่ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพียงอย่างเดียว โดยมีความเหนียวเท่ากับ 126 เซนติพอยส์ จึงไม่มีผลต่อตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

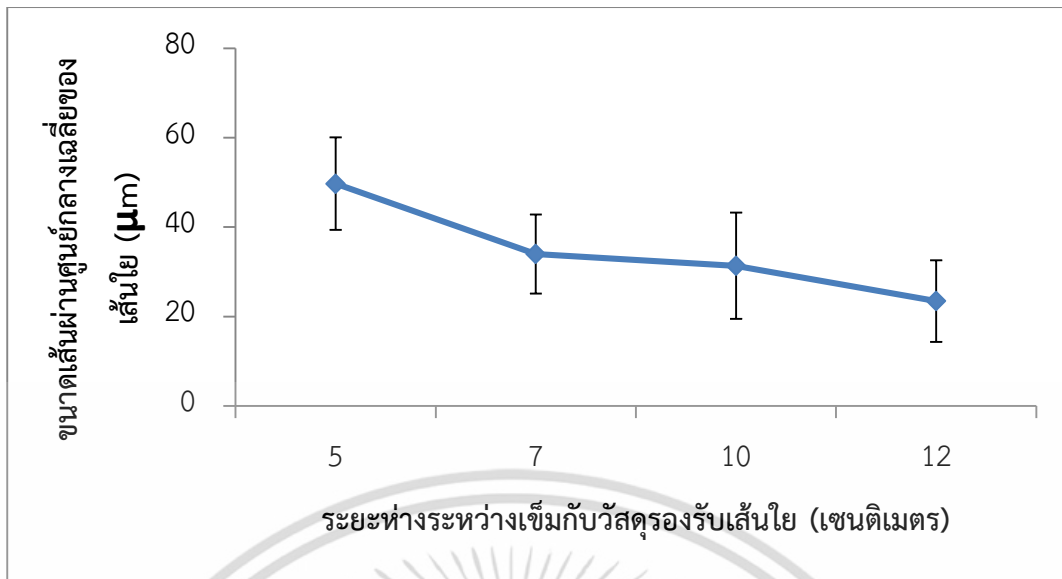
ผลการทดสอบพบว่าระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยที่ 5 เซนติเมตร เป็นระยะทางที่สั้นเกินไปจนทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากปลายเข็มไปจนถึงวัสดุรองรับเส้นใยไม่มากเพียงพอที่จะทำให้สารละลายเกิดการระเหยแล้วแห้งได้ มีผลทำให้เส้นใยเปียกอยู่ในขณะที่สัมผัสกับวัสดุรองรับ เมื่อพิจารณาระยะห่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 เซนติเมตร โดยสังเกตจากเส้นใยที่แห้งสนิท และมีความเรียบสม่ำเสมอดังรูปที่ 4.11 นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเล็กน้อย โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอยู่ที่  $49 \pm 10$   $33 \pm 8$   $31 \pm 11$  และ  $23 \pm 9$  ไมโครเมตร สำหรับระยะห่างระหว่างเข็มฉีดกับวัสดุรองรับเส้นใยอยู่ที่ 7 10 และ 12 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ ข.2 เนื่องจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใยทำให้เส้นใยมีเวลาในการยึดมาก และเกิดการระเหยของสารละลายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Homayoni และคณะ<sup>[8]</sup> โดยใช้ โคโตะซาน ที่ผ่านการไฮโดรไลซ์ ด้วยกรดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ละลายในตัวทำละลายกรด อะซิติก 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างเข็มและวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากมีระยะเวลาการเกิดและการยึดและทำให้การระเหยของตัวทำละลายเกิดได้อย่างสมบูรณ์ในกระบวนการปั่น



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบ่งที่ระยะห่าง (A)

5 (B) 7 (C) 10 และ (D) 12 เซนติเมตร

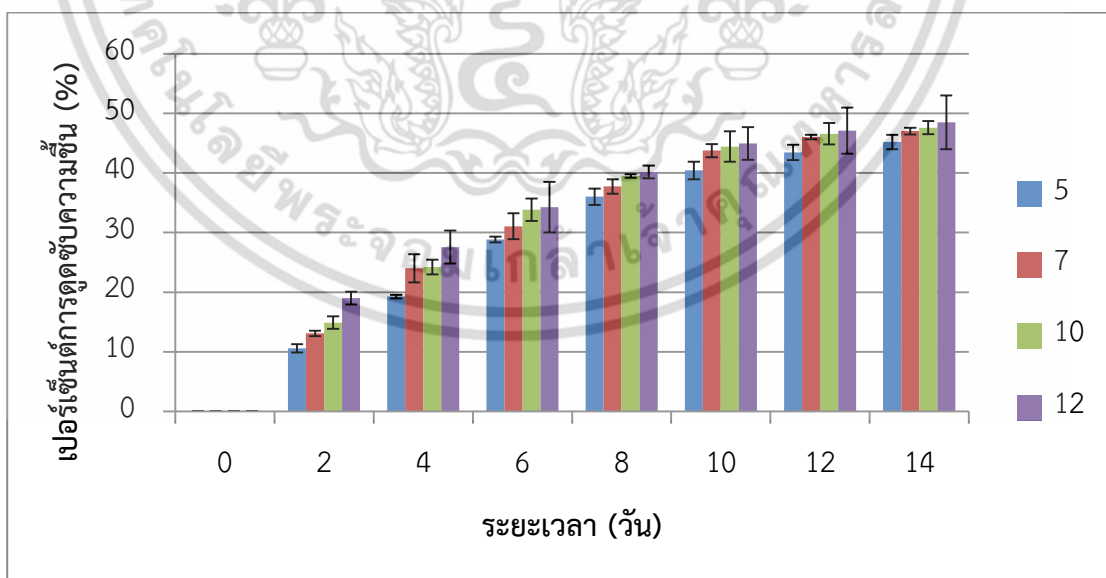
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยแบ่งที่ระยะห่าง 5 7 10 และ 12 เซนติเมตร

#### 4.2.3.3 สมบัติการดูดซับความชื้น

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับส่งผลให้การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ จ.3 เป็นผลมาจากขนาดของเส้นใยที่เล็กลง ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับความชื้นมากขึ้น ทำให้ความชื้นสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซีที่อยู่โนโครงสร้างได้มากขึ้น การดูดซับความชื้นจึงมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.13 เปอร์เซนต์การดูดซับความชื้นของเส้นใยแบ่งที่ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย 5 7 10 และ 12 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.4 สมบัติทางความร้อน

เนื่องจากสารละลายที่ใช้คือแป้งเพียงชนิดเดียว สมบัติทางความร้อนของเส้นใยจึงมีลักษณะเหมือนกับขั้นตอนที่ 4.2.1.4 โดยมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของแป้งอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส

#### 4.2.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนั้น เนื่องจากในขั้นตอนนี้ได้ใช้สารละลายแป้งในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยจึงมีหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับขั้นตอน 4.2.1.5

### 4.2.4 การสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสาร

ในการสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสารโดยอัตราการป้อนสารละลายที่ต่างกัน โดยทำการปรับอัตราการป้อนสารละลายในช่วง 3 ถึง 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ความเข้มข้นสารละลาย 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย 12 เซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 12 กิโลโวลต์ เพื่อนำไปทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติทางความร้อน และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันได้ผลดังนี้

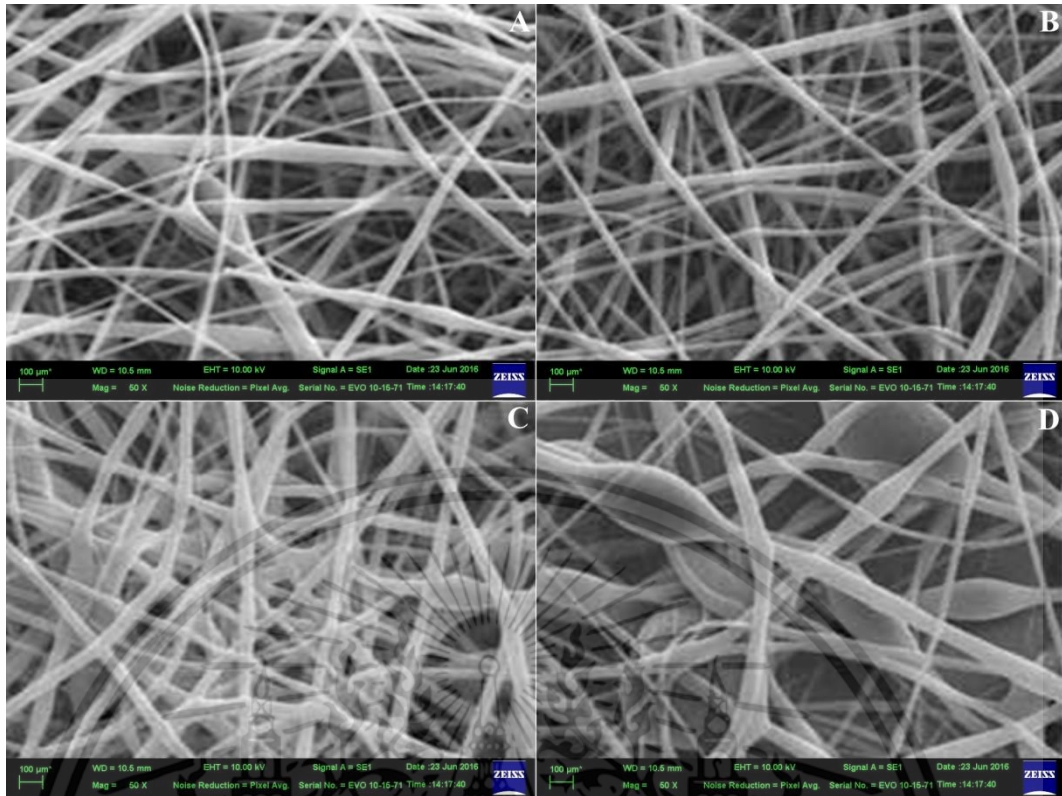
#### 4.2.4.1 ความหนืดของสารละลาย

เนื่องด้วยในขั้นตอนนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพียงความเข้มข้นเดียว โดยมีความหนืดเท่ากับ 126 เซนติพอยส์ จึงไม่มีผลต่อตัวแปร

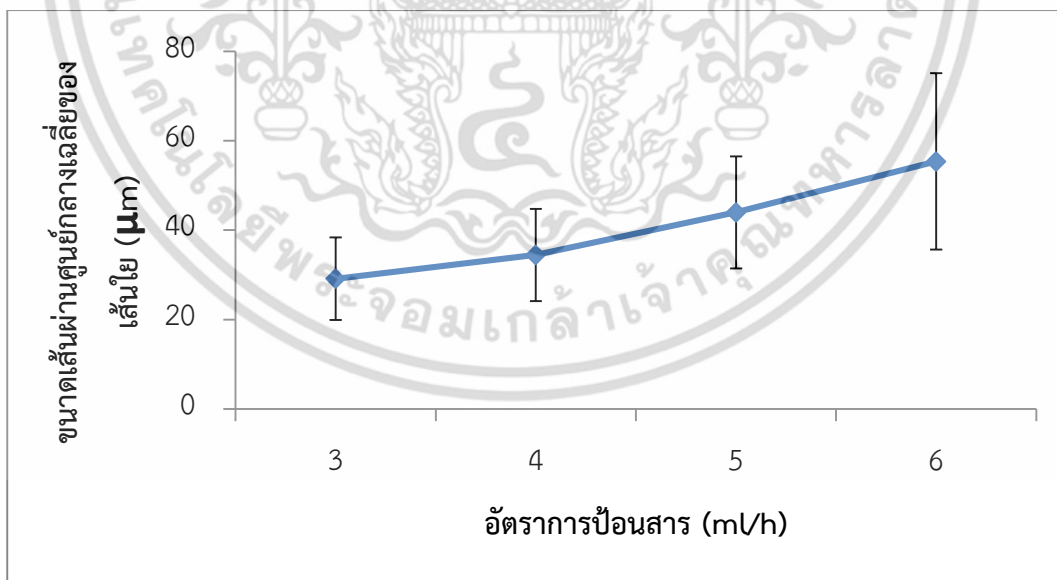
#### 4.2.4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลการศึกษาพบว่า เส้นใยที่ได้มีลักษณะผิวเรียบ และมีบิดปนกัน ดังรูปที่ 4.14 การเพิ่มของอัตราการป้อนสารละลายส่งผลให้ขนาดของเส้นใยมีแนวโน้มใหญ่ขึ้น และมีบิดบนเส้นใยมากขึ้น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยคือ  $29 \pm 9$   $34 \pm 10$   $43 \pm 12$  และ  $55 \pm 19$  ไมโครเมตร เมื่ออัตราการป้อนสารละลายต่างๆเท่ากับ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ ข.3 โดยพบว่าอัตราการป้อนสารละลาย 3 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ แต่ขนาดเส้นใยมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารจนถึง 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารทำให้สารละลายไหลออกไปมากขึ้น ลำของสารละลายจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดการระเหยซ้ำจึงมีโอกาสเกิดบิดบนเส้นใย สอดคล้องกับการศึกษาของ Casper และคณะ<sup>[22]</sup> โดยทำการเตรียมเส้นใยนาโนจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ของพอลิคาร์โพรแลกโตน พบว่าเมื่ออัตราการป้อนสารละลายจะทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ขนาดของบิดใหญ่ขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเกิดบิดบนเส้นใยสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยแบงที่อัตราการป้อนสารละลาย (A) 3 (B) 4 (C) 5 และ (D) 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

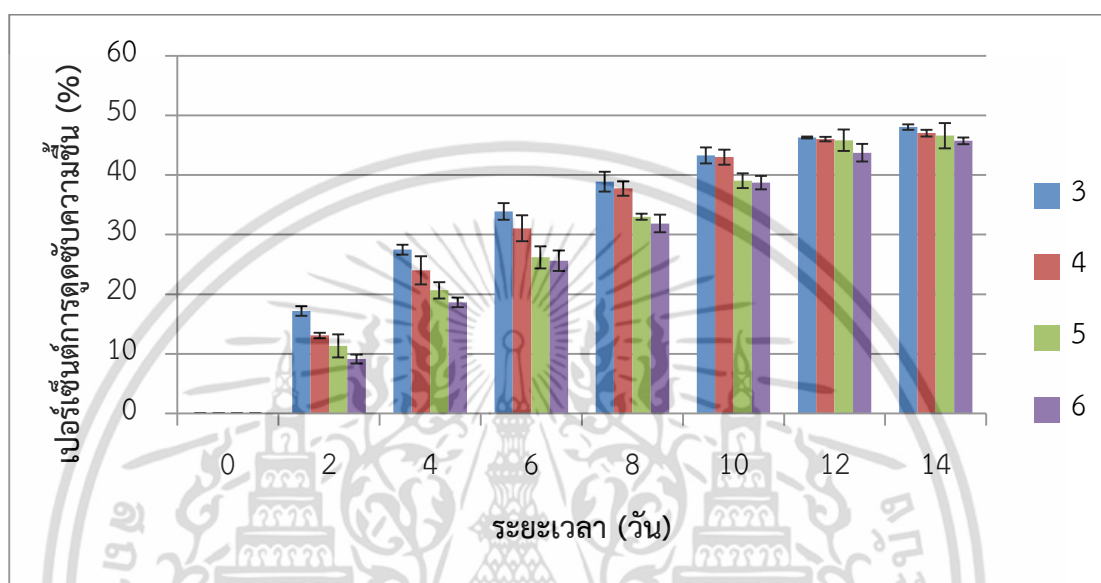


รูปที่ 4.15 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบงที่อัตราการป้อนสารละลาย 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4.3 สมบัติการดูดซับความชื้น

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายส่งผลให้สมบัติการดูดซับความชื้นลดลง ดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ จ.4 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารละลายทำให้ขนาดของเส้นใยที่ใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสของความชื้นกับเส้นใยลดลง การเกิดพันธะระหว่างน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในเส้นใยแบ่งสามารถเกิดขึ้นได้น้อย การดูดซับความชื้นจึงลดลง



รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยแบ่งที่อัตราการป้อนสารละลาย 3 4 5 และ 6 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

#### 4.2.4.4 สมบัติทางความร้อน

เนื่องจากสารละลายที่ใช้คือแป้งเพียงชนิดเดียว สมบัติทางความร้อนของเส้นใยจึงมีลักษณะเหมือนกับขั้นตอนที่ 4.2.1.4 โดยมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของแป้งอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส

#### 4.2.4.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนั้น เนื่องจากในขั้นตอนนี้ได้ใช้สารละลายแป้งในการขึ้นรูปเป็นเส้นใยจึงมีหมู่ฟังก์ชันเช่นเดียวกับขั้นตอน 4.2.1.5

### 4.3 การสืบค้นตัวแปรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับสารผสมแป้งและเพคติน

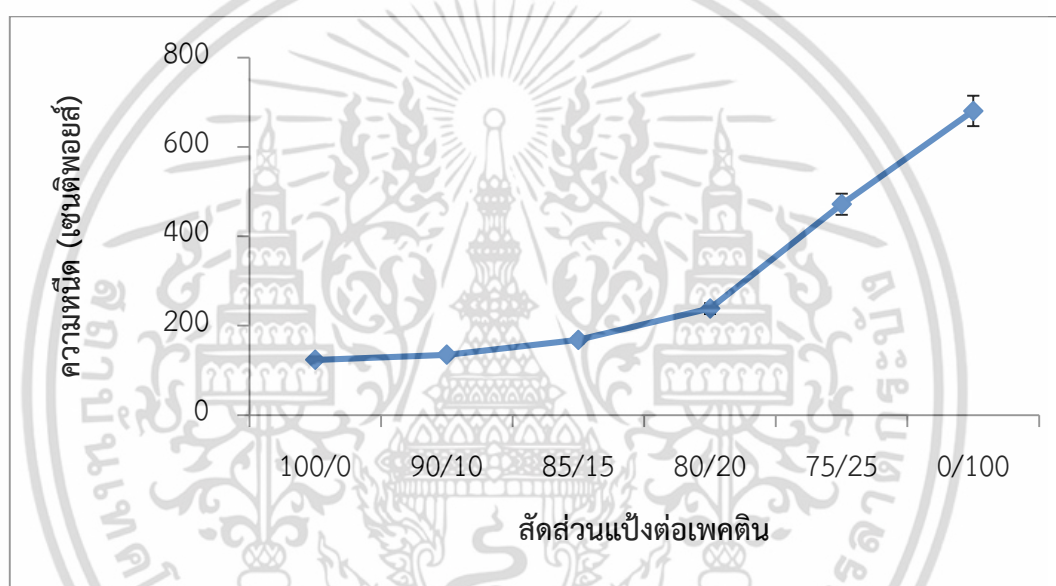
จากการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแป้งและเพคติน โดยใช้สัดส่วน 100/0 90/10 85/15 และ 80/20 โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัสดุรองรับเส้นใย 12 เซนติเมตร ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 12 กิโลโวลต์ และอัตราการป้อนสาร 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิลลิลิตรต่อชั่วโมง แล้วนำไปทดสอบความหนืดของสารละลาย ลักษณะทางสัญญาณวิทยา สมบัติทาง ความร้อน วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน และสมบัติการดูดซับความชื้น ได้ผลดังนี้

#### 4.3.1 ความหนืดของสารละลาย

เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเพคตินจาก 0 เป็น 20 พบว่าความหนืดของสารละลายผสมระหว่างแป้ง และเพคตินเพิ่มขึ้นจาก 126 เซนติพอยส์ เป็น 465 เซนติพอยส์ ในขณะที่ความหนืดของสารละลายเพ คตินอยู่ที่ 680 เซนติพอยส์ ดังรูปที่ 4.17 และตารางที่ ก.2 แสดงให้เห็นว่าเพคตินมีส่วนเพิ่มความ หนืดให้กับสารละลายแป้ง เนื่องจากในเพคตินมีมวลโมเลกุลที่มากกว่าแป้ง ความหนืดเพคตินจึงมีค่า มากกว่าแป้ง เมื่อเติมเพคตินลงไปในสารละลายแป้ง ทำให้สารละลายมีมวลโมเลกุลที่มากขึ้น ความ หนืดของสารละลายจึงมีค่ามากขึ้น



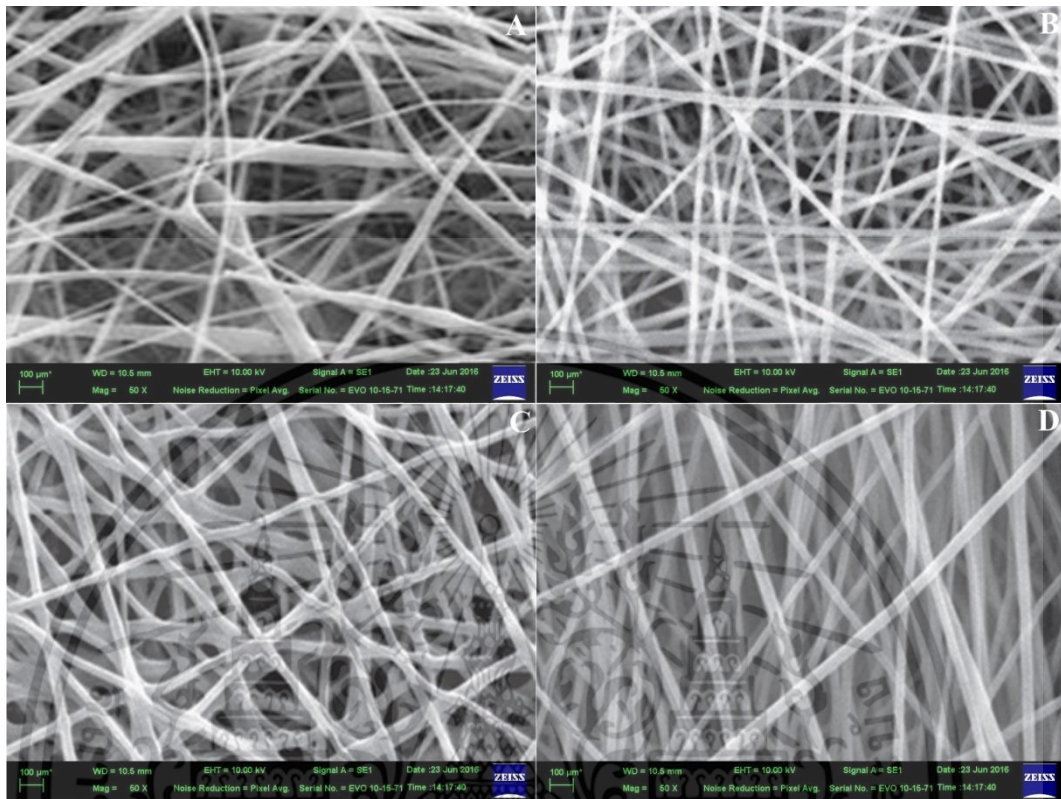
รูปที่ 4.17 ความหนืดของสารละลายผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วน 100/0 90/10 85/15 80/20 และ 0/100

#### 4.3.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยา

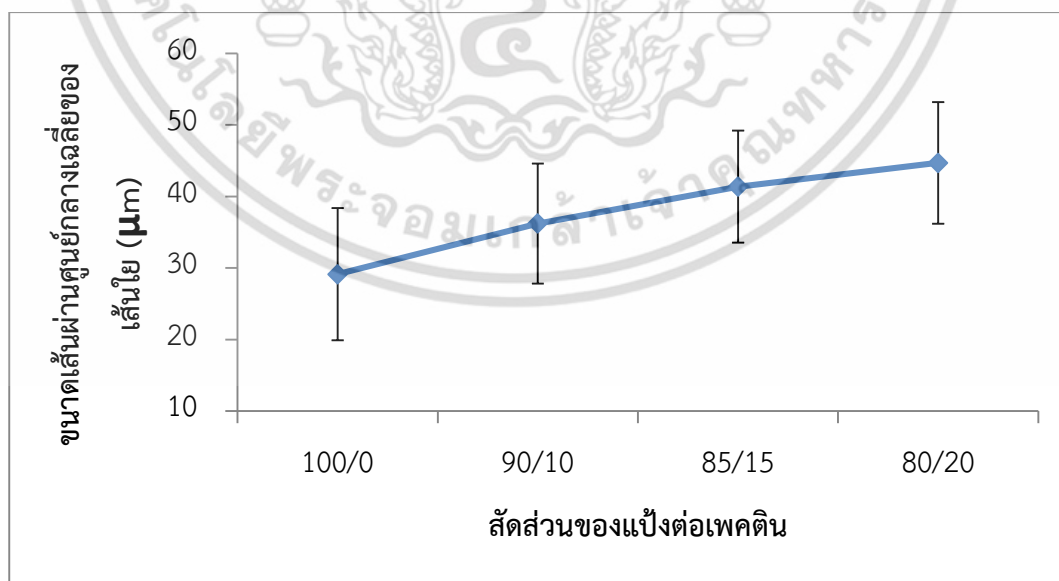
พบว่าลักษณะของเส้นใยไม่แตกต่างกัน คือมีลักษณะพื้นผิวเรียบ และไม่พบบิดเกิดขึ้นบนเส้น ใย ดังรูปที่ 4.18 แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนเพคตินเป็น 75/25 พบว่าไม่สามารถฉีดเป็นเส้นใยได้ เนื่องจาก ความหนืดที่เพิ่มขึ้นทำให้สารละลายไม่สามารถไหลออกจากปลายเข็มได้ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยของเส้นใยคือ  $29 \pm 9$   $36 \pm 8$   $41 \pm 7$  และ  $44 \pm 8$  ไมโครเมตร สำหรับสัดส่วน 100/0 90/10 85/15 และ 80/20 ตามลำดับดังรูปที่ 4.19 และตารางที่ ข.4 กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณเพคตินทำให้ขนาด ของเส้นใยใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเพคตินทำให้ความหนืดของเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ สารละลายสามารถยืดยาวออกเป็นเส้นใยได้โดยไม่ขาดออกจากกันจนกว่าจะไปถึงหัวสตุรรองรับเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของสารละลายที่มีปริมาณเพคติน 100 เปอร์เซ็นต์นั้น ไม่สามารถเตรียมเป็นเส้นใยได้เนื่องจากความหนืดที่มากเกินไปทำให้สารละลายไม่สามารถไหลออกจากปลายเข็มได้



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตรวจของเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วน (A) 100/0 (B) 90/10 (C) 85/15 และ 80/20

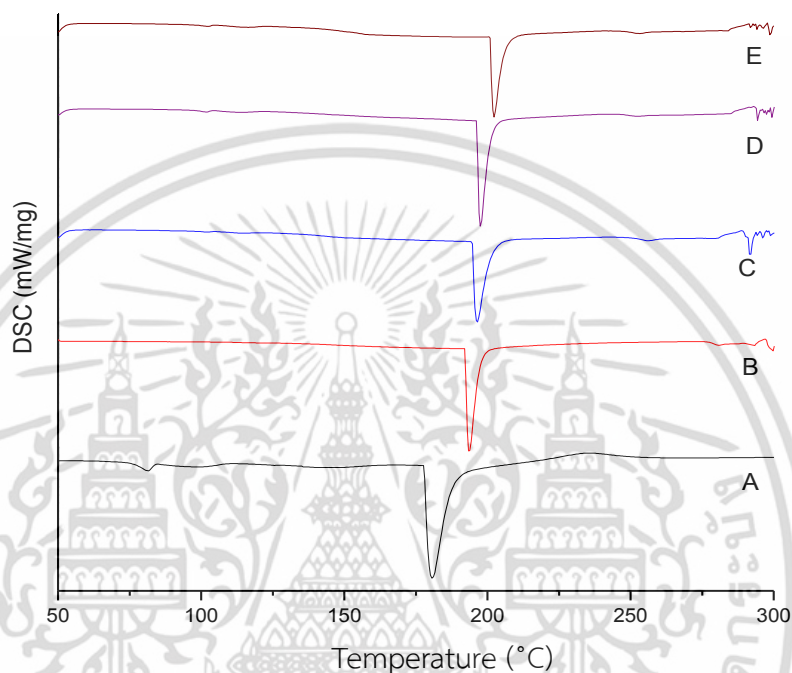


รูปที่ 4.19 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วน 100/0 90/10 85/15 และ 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 สมบัติทางความร้อน

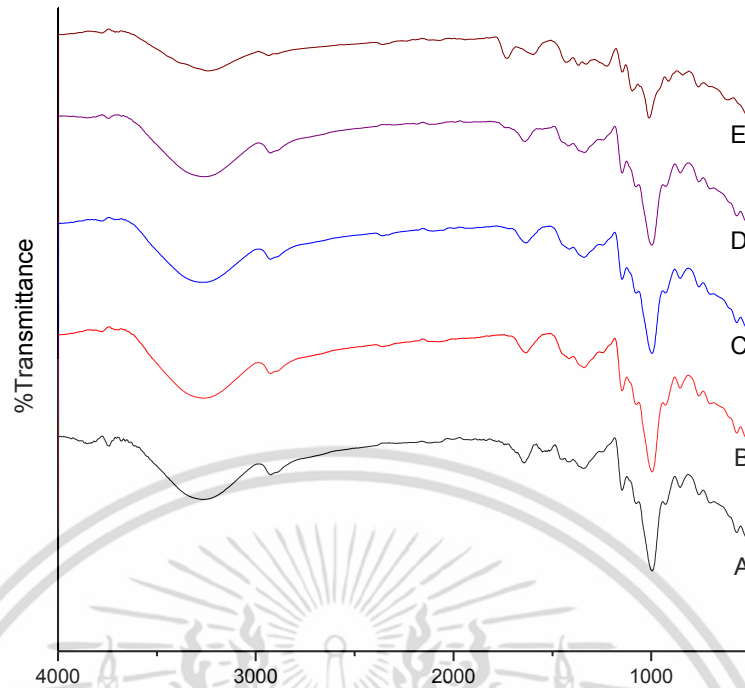
เมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟทางความร้อนของเส้นใยผสมแป้งและเพคติน ดังรูปที่ 4.20(B) (C) (D) และ (E) และรูปที่ ค.2-ค.5 พบว่ามีพีคปรากฏเพียงพีคเดียวเช่นเดียวกับเส้นใยจากแป้ง ดังรูป 4.20(A) และรูปที่ ค.1 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของแป้งและเพคตินมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก แตกต่างตรงที่เพคตินมีมวลโมเลกุลสูงกว่าแป้งส่งผลให้สมบัติทางความร้อนสูงขึ้น



รูปที่ 4.20 กราฟ DSC ของเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วน (A) 100/0 (B) 90/10 (C) 85/15 (D) 80/20 และ (E) 0/100

### 4.3.4 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

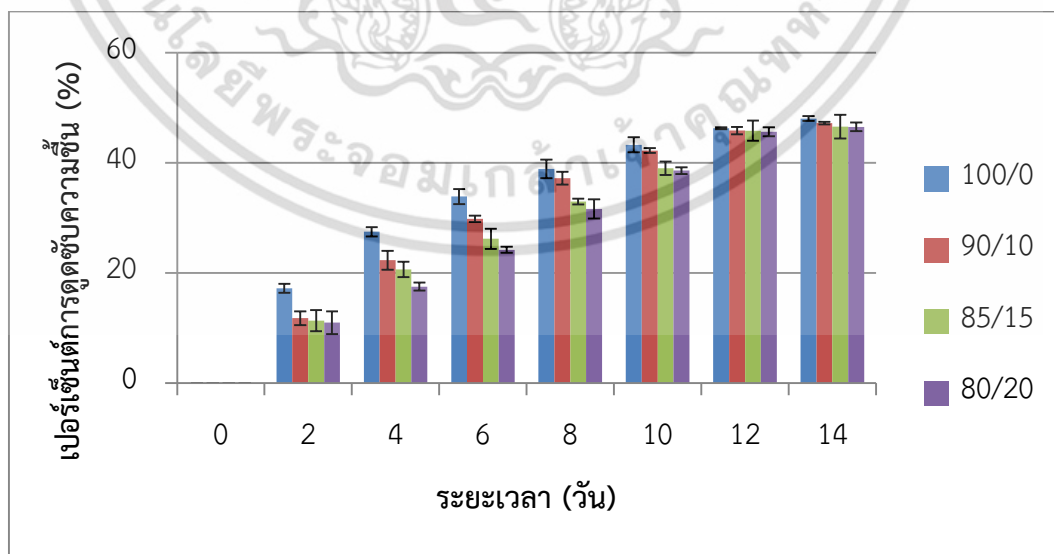
เมื่อนำเส้นใยในแต่ละสัดส่วนมาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน แล้วนำมาเปรียบเทียบ พบว่าลักษณะของกราฟ FTIR ที่ปรากฏมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันคือ พีคในช่วง  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching ของแป้งและเพคติน พีคในช่วง  $3000-2800\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของ  $\text{CH}_2$  และ  $\text{CH}_3$  ของแป้งและเพคติน ที่ตำแหน่ง  $1600\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของแป้งที่ถูกออกซิไดซ์โดยไดเมทิลซัลฟอกไซด์เกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล พีคในช่วง  $1445-1485\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะของการสั่นแบบ O-H bending และพีคช่วง  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-OH bending ของแป้งและเพคติน แต่เมื่อสังเกตที่ตำแหน่ง  $1642\text{ cm}^{-1}$  พบว่าเมื่อเติมเพคตินลงไปในการละลายแป้ง เส้นใยที่ได้จะปรากฏพีคที่ตำแหน่งดังกล่าวขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะการสั่นแบบ C=O stretching ของหมู่คาร์บอกซิลที่อยู่ในเพคติน ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ ง.1-ง.5



รูปที่ 4.21 กราฟ FTIR ของเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วน (A) 100/0 (B) 90/10 (C) 85/15 (D) 80/20 และ (E) 0/100

#### 4.3.5 การดูดซับความชื้น

จากการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มส่วนของเพคตินเข้าไปส่งผลให้สมบัติการดูดซับความชื้นลดลง ดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ จ.5 เนื่องจากเมื่อเพิ่มเพคตินเข้าไปทำให้ขนาดของเส้นใยใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับเส้นใยลดน้อยลง ทำให้การดูดซับความชื้นลดลง



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเส้นใยจากสารผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วน

100/0 90/10 85/15 และ 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยได้ทำการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง โดยทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อเส้นใยได้ผลสรุปดังนี้

#### 5.1.1 การออกแบบการทดลอง

ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ได้กำหนดปัจจัยในการทดลองไว้ 4 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัตถุรองรับ และ อัตราส่วนการปั่นสาร โดยแต่ละปัจจัยมีระดับการทดลองสูง และระดับการทดลองต่ำ ทำให้ได้ขั้นตอนการทดลองที่แตกต่างกัน 16 ขั้นตอน เมื่อทำการทดลองเตรียมเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งโดยใช้ข้อมูลสถานะของปัจจัยในขั้นตอนต่างๆ นำเส้นใยจากการทดลองในแต่ละขั้นตอนไปวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อหาขนาดของเส้นใย และเก็บรวบรวมข้อมูล จากนั้นนำขนาดของเส้นใยที่วัดได้มาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกระบวนการทางสถิติ และหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ สรุปได้ว่าปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย มีผลต่อลักษณะของเส้นใย

#### 5.1.2 การสืบค้นตัวแปรในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งสำหรับแป้ง

##### 5.1.2.1 การสืบค้นตัวแปรความเข้มข้นของสารละลาย

ที่ความเข้มข้นของสารละลายแป้ง 15 %w/w เหมาะสมที่จะใช้ในการเตรียมเส้นใยจากแป้งข้าวโพดด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งมากที่สุด เพราะลักษณะของเส้นใยที่ได้มีผิวเรียบ ไม่ปรากฏปิดบนเส้นใย เมื่อความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของสารละลายไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของเส้นใยแป้งที่เตรียมด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง

##### 5.1.2.2 การสืบค้นตัวแปรความต่างศักย์ไฟฟ้า

ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยโดยรวมไม่แตกต่างกัน เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า นอกจากนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดเล็กลงเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า แต่ทำให้สมบัติการดูดซับความชื้นของเส้นใยแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2.3 การสืบค้นตัวแปรระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใย

ระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเส้นใยที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7 ถึง 12 เซนติเมตร แต่เมื่อระยะห่างระหว่างเข็มกับวัตถุรองรับเพิ่มขึ้นทำให้เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเล็กน้อย แต่ทำให้สมบัติการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น

### 5.1.2.4 การสืบค้นตัวแปรอัตราการป้อนสาร

การเพิ่มของอัตราการป้อนสารละลายส่งผลให้ขนาดของเส้นใยมีแนวโน้มใหญ่ขึ้น และมีปิดบนเส้นใยมากขึ้น แต่สมบัติการดูดซับความชื้นลดลง

### 5.1.3 การสืบค้นตัวแปรอิเล็กโตรสปินนิ่งสำหรับสารผสมแป้งและเพคติน

ลักษณะของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในแต่ละสัดส่วนของแป้งและเพคตินไม่แตกต่างกันและไม่พบปิดเกิดขึ้นบนเส้นใย เมื่อเพิ่มสัดส่วนเพคตินทำให้ขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนเพคตินเกิน 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะไม่สามารถฉีดเป็นเส้นใยได้ นอกจากนี้สมบัติทางความร้อนของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนเพคติน สำหรับสมบัติการดูดซับความชื้นลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเพคติน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเพื่อใช้ในการฉีดเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิ่ง
2. ศึกษาบทบาทของสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ขณะทำการทดลอง
3. ศึกษาบทบาทของสารเติมแต่งที่ใช้ในการลดความหนืดของสารละลาย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Frank K. K. and H. Y. 2008. **Functional Nanofibre:Enabling Material for The Next Generations Smart Textiles.** Journal of Fiber Bioengineering and Informatics 1: 1-12.
- [2] Gogotsi, Y. 2006. **Nanotubes and nanofibers.** USA : CRC Taylor & Francis.1-98.
- [3] Ramakrishna S. Fujihara K. Teo W.E. Lim T.C. and Ma Z. 2005. **An Introduction to Electrospinning and Nanofiber.** Singapore: World Scientific Publishing, 1-100.
- [4] Hulteen J.C. Chen H.X. Chambliss C.K. and Martin C.R. 1997. **Template synthesis of carbon nanotubule and nanofiber arrays.** Nanostructured Materials 9: 133-136.
- [5] Reneker D.H. Yarin A.L. Zussman E. and Xu H. 2007. **Electrospinning of Nanofibers from Polymer Solutions and Melts.** Advances in Applied Mechanics, 41: 345-346.
- [6] Rutledge G. C. and Fridrikh S. V. 2007. **Formation of fibers by electrospinning.** Advanced Drug Delivery Reviews 59: 1384-1391.
- [7] Eda, G. Liu, J. and Shivkumar, S. 2007. **Solvent effects on jet evolution during electrospinning of semi-dilute polystyrene solutions.** European Polymer Journal 43 : 1154-1167.
- [8] Homayoni, H. Abdolkarim, S. and Valizadeh, M. 2009. **Electrospinning of chitosan nanofibers: Processing optimization.** Carbohydrate Polymers 77: 656-661.
- [9] Luo, C. J. Nangrejo, M and Edirisinghe, M. 2010. **A novel method of selecting solvents for polymer electrospinning.** Polymer 51: 1654-1662.
- [10] Uyar, T. and F. Besenbacher. 2008. **Electrospinning of uniform polystyrene fibers: The effect of solvent conductivity.** Polymer 49: 5336-5343.
- [11] Fong, H. Chun, I and Reneke, D.H. 1999 **Beaded nanofibers formed during electrospinning.** Polymer 40: 4585-4592.
- [12] Park, J. Y. Lee, I.H. and Bea, G.N. 2008. **Optimization of the electrospinning conditions for preparation of nanofibers from polyvinylacetate (PVAc) in ethanol solvent.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14: 707-713.
- [13] Hao, X. and X. Zhang. 2007. **Syndiotactic 1,2-polybutadiene fibers produced by electrospinning.** Materials Letters 61: 1319-1322.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] Yun, K. M. Suryamas, A.B. Iskandar, F. Bao, L. Niinuma, H. and Okuyama, K. 2010. **Morphology optimization of polymer nanofiber for applications in aerosol particle filtration.** Separation and Purification Technology 75: 340-345.
- [15] Wang, C. Chien, H.S. Yan, K.W. Hung, C.L. Hung, K.L. Tsai, S.J. and Jhang, H.J. 2009. **Correlation between processing parameters and microstructure of electrospun poly(D,L-lactic acid) nanofibers.** Polymer 50: 6100-6110.
- [16] Huang, Z.-M. Zhang, Y.-Z. Kotaki, M. and Ramakrishna, S. 2003. **A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites.** Composites Science and Technology 63: 2223-2253.
- [17] Bhardwaj, N. and Kundu, S. C. 2010. **Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique.** Biotechnology Advances 28: 325-347.
- [18] Munir, M. M. Suryamas, A.B. Iskandar, F. and Okuyama, K. 2009. **Scaling law on particle-to-fiber formation during electrospinning.** Polymer 50: 4935-4943.
- [19] Shenoy, S. L. Bates, W.D. Frisch, H.L. and Wnek, G.E. 2005. **Role of chain entanglements on fiber formation during electrospinning of polymer solutions: good solvent, non-specific polymer-polymer interaction limit.** Polymer 46: 3372-3384.
- [20] Sill, T. J. and H. A. von Recum. 2008. **Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering.** Biomaterials 29: 1989-2006.
- [21] Ki, C. S. Baek, D.H. Gang, K.D. Lee, K.H. and Park, Y.H. 2005. **Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution.** Polymer 46: 5094-5102.
- [22] Casper, C. L. Stephens, J.S. Tassi, N.G. Chase, D.B. and Rabolt, J.F. 2003. **Controlling Surface Morphology of Electrospun Polystyrene Fibers: Effect of Humidity and Molecular Weight in the Electrospinning Process.** Macromolecules 37: 573-578.
- [23] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง.** พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [24] Tester, R. F., J. Karkalas, and X. Qi. 2004. **Starch-composition, fine structure and architecture.** Journal of Cereal Science 39, 2: 151-165.
- [25] ดุษฎี อุตภาพ. 2554. **ส่วนประกอบของแป้งแป้ง.** เข้าถึงเมื่อ 4 มีนาคม. เข้าได้จาก [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/Chap2/chapter2\\_3.html](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/Chap2/chapter2_3.html)

- {26} งามอง เต็ดตวง. 2553. การเปรียบเทียบเพคตินสกัดจากฝรั่งสามชนิดกับเพคตินมาตรฐาน สารนิพนธ์ กศ.ม.(เคมี). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [28] เจษฎา วงษ์อ่อน, สุภาภรณ์ ทุมสอน, สุเนตร มูลทา, เกียรติชัย อ่าคลองธรรม และ พิทักษ์ พนาวัน 2015.การเตรียมเส้นใยขนาดนาโนของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับท่อนาโนคาร์บอน Proceedings The 7th National Science Research Conference. 30-31 March 2015. Naresuan University.
- [29] ศุภวัลย์ โตเกียรติวงศ์ชัย. 2553. การปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซพรีน-สไตรีนด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก. ปรินญาณีพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [31] กรชฎี พนาพิทักษ์กุล, กัลยา เอี้ยประเสริฐศักดิ์ และมนู เฟื่องฟูง 2557 การเตรียมและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย พอลิสไตรีน/พอลิอะนิลีนโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 22 ฉบับที่ 6 (ฉบับพิเศษ)
- [32] Nuanchan Choktaweessap Kunawan Arayanarakul Duangdao Aht-ong and Pitt Supaphol. 2007. Electrospun Gelatin Fibers: Effect of Solvent System on Morphology and Fiber Diameters. Polymer Journal, Vol. 39, No. 6, 622–631

## ภาคผนวก ก

ตารางแสดงค่าความหนืดของสารละลายต่างๆ

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าความหนืดของสารละลายแป้งที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลาย (%w/w)	ค่าความหนืด (เซนติพอยส์)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
8	35	2.516611
10	58	3.511885
12	70	5.131601
15	126	3.605551
18	350	3.605551

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าความหนืดของสารละลายผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วนต่างๆ

ความเข้มข้นสารละลาย (%w/w)	ค่าความหนืด (เซนติพอยส์)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100/0	126	3.05
90/10	135	5
85/15	168	3.51
80/20	235	5.77
75/25	465	7.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวแปรต่าง

ตารางที่ ข.1 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบ่งที่ศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	42.07465	14.26949
7	37.01555	10.81844
10	28.59245	8.296382
12	21.8716	6.489123

ตารางที่ ข.2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบ่งที่ระยะห่างต่างๆ

ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มกับวัตถุรองรับ (cm)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
5	49.72985	10.36897
7	33.991	8.868346
10	31.352	11.90291
12	23.45795	9.121184

ตารางที่ ข.3 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแบ่งที่อัตราการป้อนสารต่างๆ

อัตราการป้อนสาร (ml/h)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
3	29.1248	9.23644
4	34.47545	10.32074
5	43.9781	12.5293
6	55.3949	19.72298

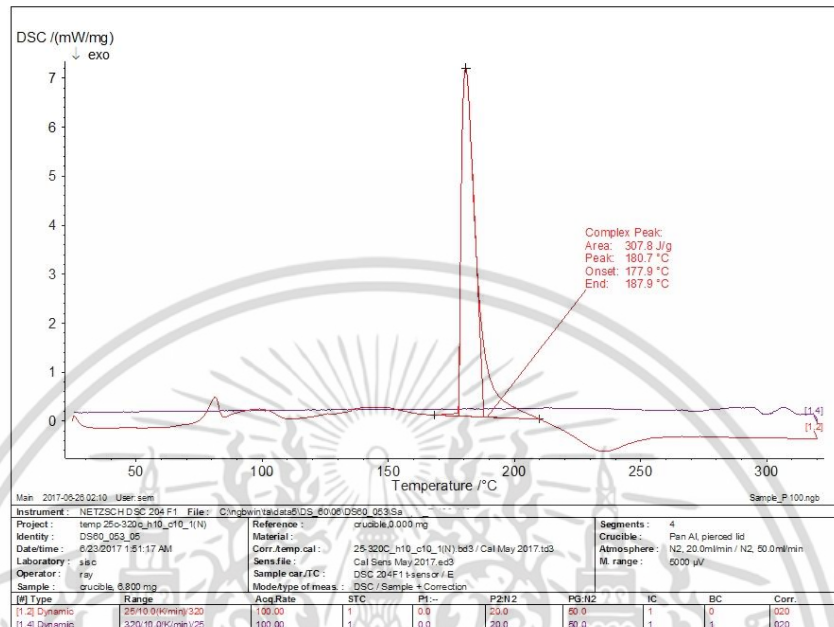
ตารางที่ ข.4 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยผสมแบ่งและเพศดินที่สัดส่วนต่างๆ

สัดส่วนแบ่งต่อเพศดิน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
100/0	29.1248	9.23644
90/10	36.2106	8.393298
85/15	41.36495	7.836569
80/20	44.699	8.492672

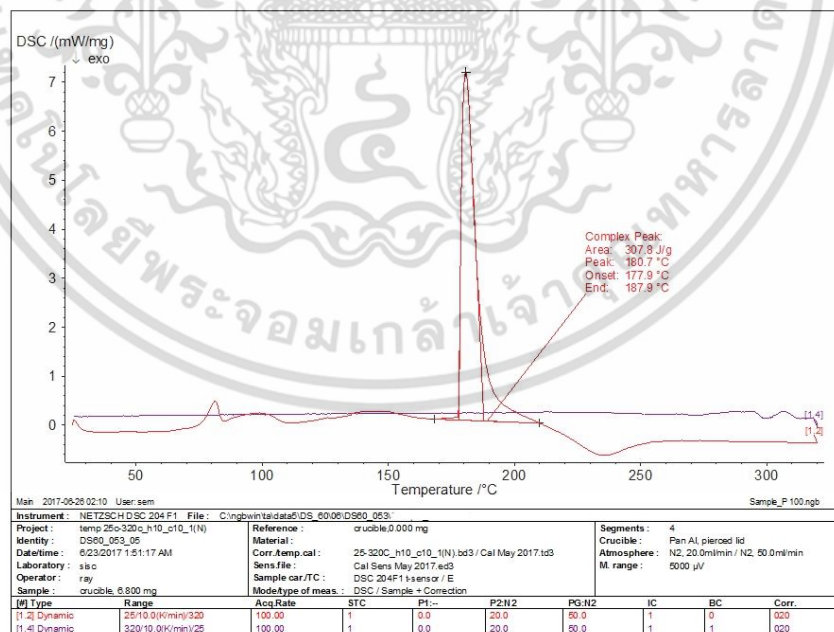
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินที่อัตราส่วนต่างๆ

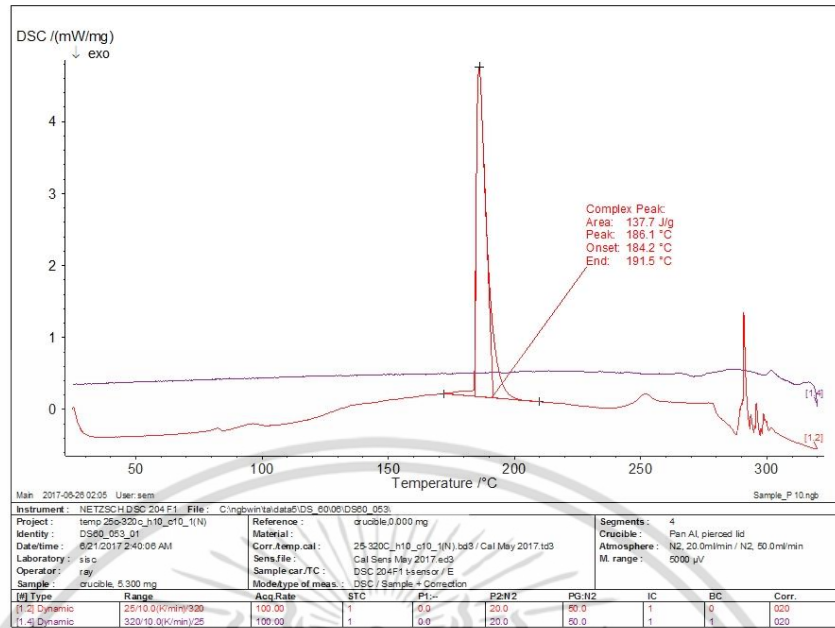


รูปที่ ค.1 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในสัดส่วน 100/0

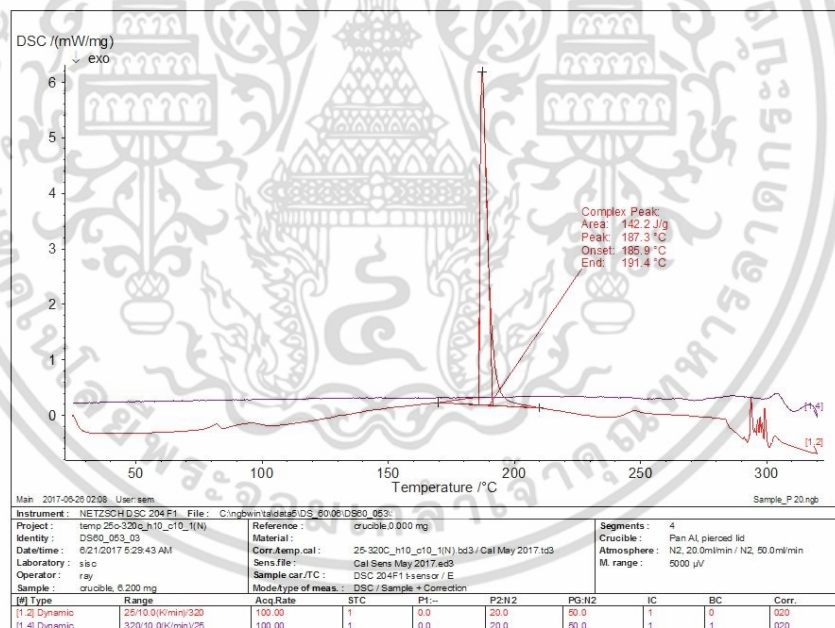


รูปที่ ค.2 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในสัดส่วน 90/10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

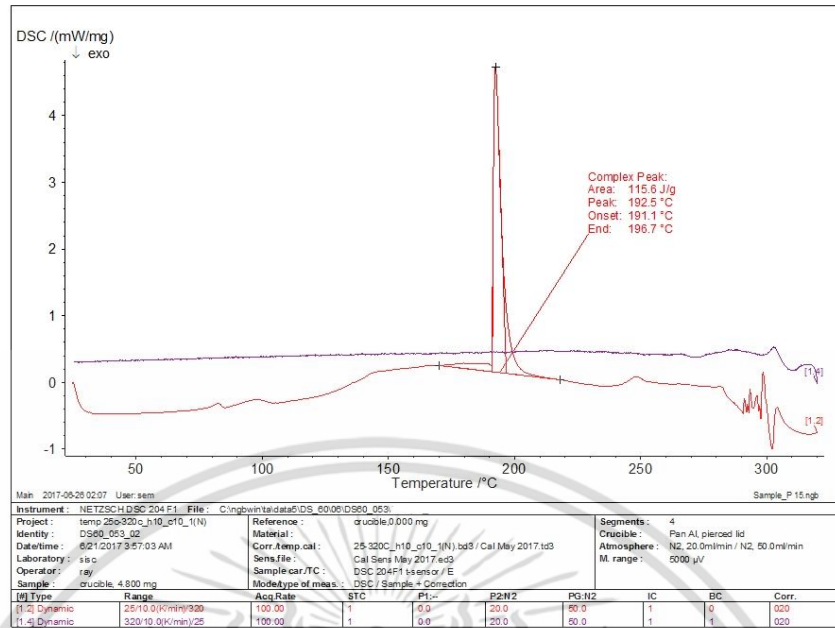


รูปที่ ค.3 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในสัดส่วน 85/15



รูปที่ ค.4 กราฟ DSC ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในสัดส่วน 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวชนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

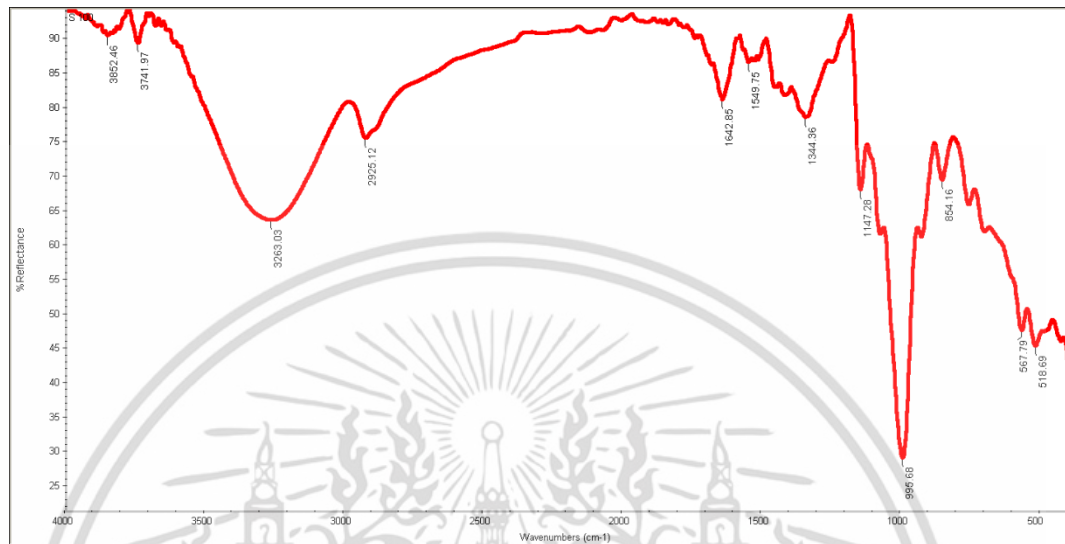


รูปที่ ค.5 กราฟ DSC ของสารผสมแป้งและเพคตินในสัดส่วน 0/100

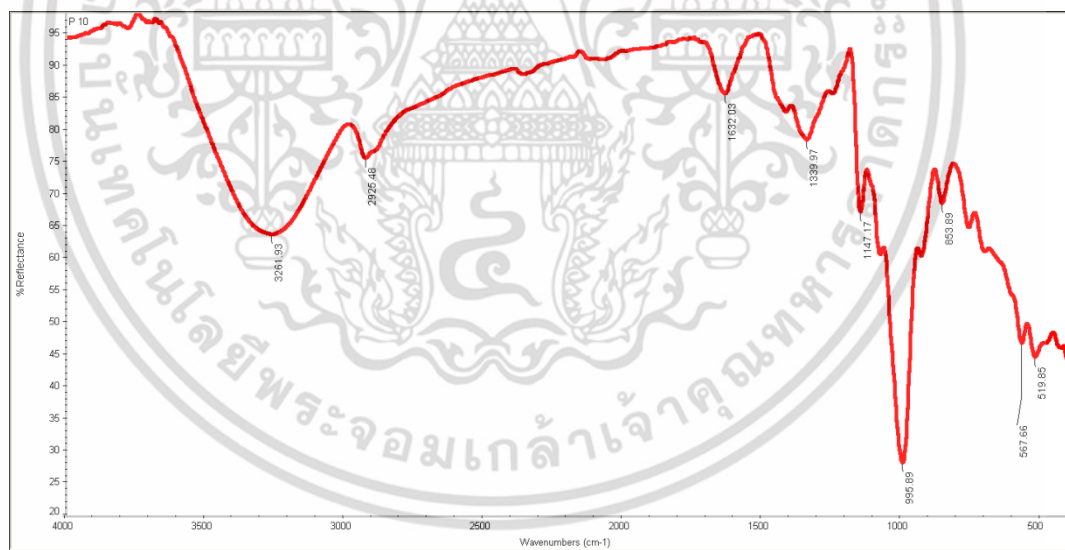
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

กราฟผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยผสมแป้งและเพคติน

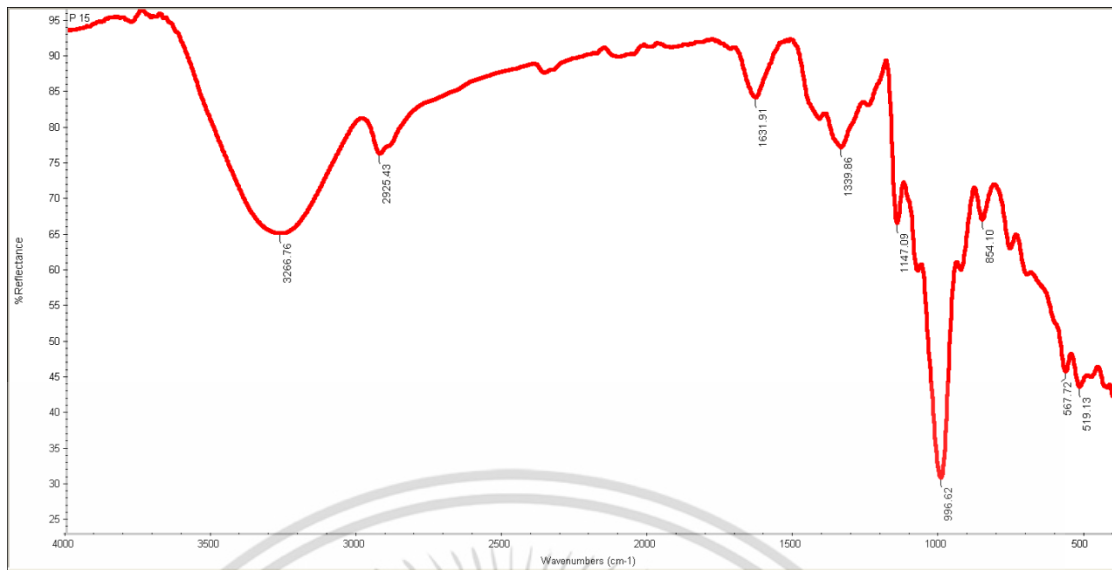


รูปที่ ง.1 กราฟ FTIR ของเส้นใยแป้ง

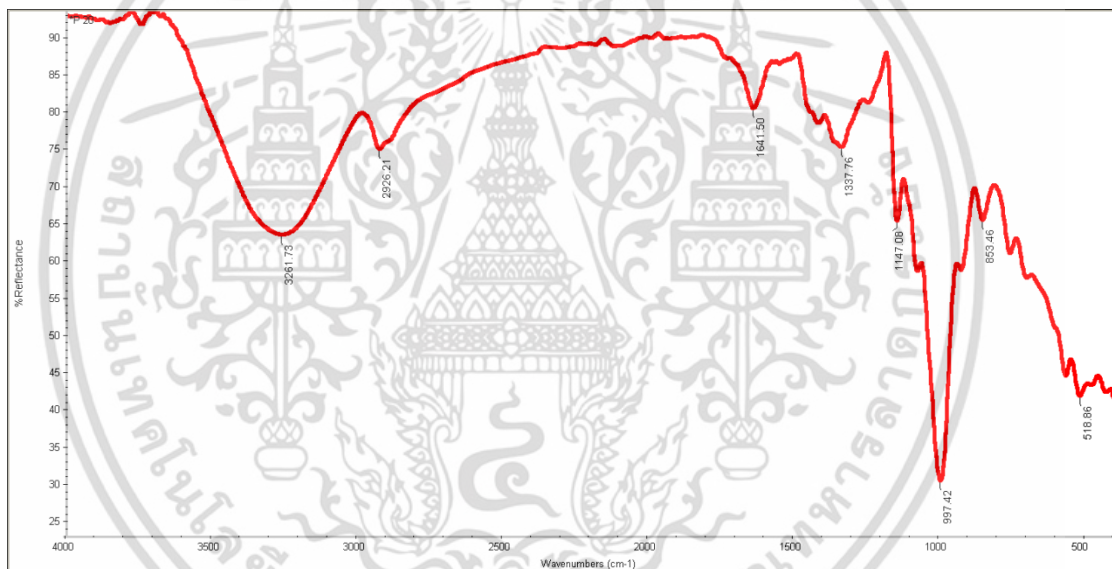


รูปที่ ง.2 แสดงกราฟ FTIR ของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินในอัตราส่วน 90/10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

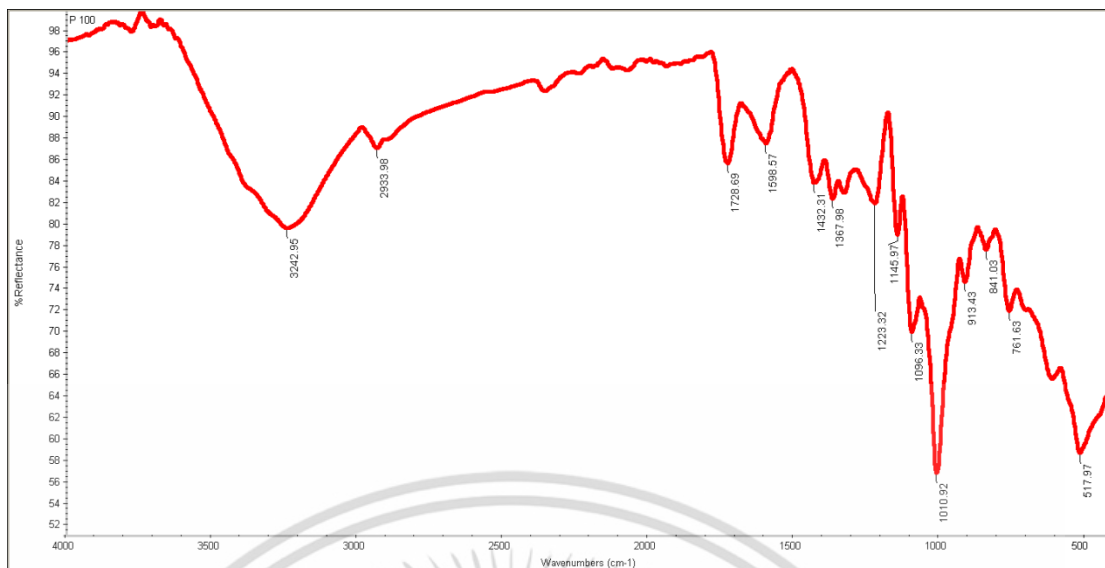


รูปที่ ง.3 กราฟ FTIR ของเส้นใยผสมแข็งและเพคตินในอัตราส่วน 85/15



รูปที่ ง.4 กราฟ FTIR ของเส้นใยผสมแข็งและเพคตินในอัตราส่วน 80/20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 กราฟ FTIR ของสารผสมแป้งและเพคตินในอัตราส่วน 0/100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

การดูดซับความชื้น

ตารางที่ จ.1 การดูดซับความชื้นของเส้นใยที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเฉลี่ย					
	ความเข้มข้นของสารละลาย (%w/w)					
	10	SD	12	SD	15	SD
0	0	0	0	0	0	0
2	11.33	1.92	11.77	1.23	17.18	0.80
4	20.65	1.38	22.30	1.71	27.47	0.83
6	26.19	1.85	29.82	0.57	33.87	1.38
8	32.99	0.52	37.21	1.18	38.89	1.67
10	39.04	1.22	42.23	0.43	43.28	1.35
12	45.84	1.81	45.86	0.65	46.29	0.15
14	46.59	2.14	47.24	0.23	48.05	0.44

ตารางที่ จ.2 การดูดซับความชื้นของเส้นใยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเฉลี่ย							
	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)							
	5	SD	7	SD	10	SD	12	SD
1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	11.33	1.92	11.77	1.23	17.18	0.81	18.42	0.32
5	20.65	1.38	22.31	1.71	27.47	0.83	27.94	0.82
7	26.19	1.85	29.82	0.57	33.87	1.38	34.58	1.14
9	32.99	0.52	37.21	1.18	38.89	1.67	39.22	1.01
11	39.04	1.22	42.23	0.43	43.28	1.35	43.48	0.33
13	45.84	1.81	45.86	0.65	46.29	0.15	46.61	0.88
15	47.10	1.31	47.24	0.23	48.05	0.44	48.12	1.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3 การดูระดับความชื้นของเส้นใยที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัตถุรองรับต่างๆ

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูระดับความชื้นเฉลี่ย							
	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัตถุรองรับ (cm)							
	5	SD	7	SD	10	SD	12	SD
1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	10.57	0.67	13.08	0.44	14.89	1.03	19.01	1.06
5	19.26	0.31	24.02	2.37	24.24	1.24	27.58	2.77
7	28.84	0.48	31.06	2.15	33.83	1.86	34.25	4.23
9	36.02	1.37	37.73	1.18	39.52	0.3	40.17	1.09
11	40.42	1.46	43.77	1.11	44.44	2.54	44.96	2.74
13	43.45	1.31	46.03	0.36	46.59	1.8	47.1	3.85
15	45.21	1.21	47.04	0.55	47.6	1.1	48.48	4.5

ตารางที่ จ.4 การดูระดับความชื้นของเส้นใยที่อัตราการป้อนสารต่างๆ

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูระดับความชื้นเฉลี่ย							
	อัตราการป้อนสาร (mL/h)							
	3	SD	4	SD	5	SD	6	SD
1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	17.18	0.81	13.08	0.44	11.33	1.92	9.12	0.77
5	27.47	0.83	24.02	2.37	20.65	1.38	18.62	0.81
7	33.87	1.38	31.06	2.15	26.19	1.85	25.62	1.73
9	38.89	1.67	37.73	1.18	32.99	0.52	31.87	1.49
11	43.28	1.35	43.01	1.25	39.04	1.22	38.75	1.12
13	46.29	0.15	46.03	0.36	45.84	1.81	43.75	1.48
15	48.05	0.44	47.04	0.55	46.59	2.14	45.75	0.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.5 การดูระดับความชื้นของเส้นใยผสมแป้งและเพคตินที่สัดส่วนต่างๆ

วัน	เปอร์เซ็นต์การดูระดับความชื้นเฉลี่ย							
	สัดส่วนของแป้งต่อเพคติน							
	100/0	SD	90/10	SD	85/15	SD	80/20	SD
1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	17.18	0.81	11.77	1.23	11.33	1.92	10.97	2.06
5	27.47	0.83	22.31	1.71	20.65	1.38	17.52	0.69
7	33.87	1.38	29.82	0.57	26.19	1.85	24.21	0.55
9	38.89	1.67	37.21	1.18	32.99	0.52	31.65	1.75
11	43.28	1.35	42.23	0.43	39.04	1.22	38.58	0.59
13	46.29	0.15	45.86	0.65	45.84	1.81	45.64	0.79
15	48.05	0.44	47.24	0.23	46.59	2.14	46.53	0.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้ทำการวิจัย

ชื่อ	รณกฤต ไชยสุวรรณ
วันเกิด	11 พฤษภาคม 2535
ภูมิลำเนา	สงขลา
ที่อยู่	25 หมู่ที่ 10 ถนนกาญจนวนิช 59 ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000
การศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลสงขลา ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมหาวชิราวุธ ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระดับปริญญาโท (วท.ม. เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้