



การสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์

โดยใช้เส้นใยเรซอซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจลเป็นแม่แบบ

FABRICATION OF TITANIUM DIOXIDE HOLLOW FIBERS ASSISTED  
BY ELECTROSPUN RESORCINOL-FORMALDEHYDE GEL  
FIBERS AS A TEMPLATE

นายธนธิป	เป็ยงเป็ย	รหัส 52365015
นางสาวศลิษา	สังข์ยก	รหัส 53364888
นางสาวอังคมาลี	กัมปนาท	รหัส 53364970

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจนเรศวร

ปีการศึกษา 2556

ห้องสมุด	คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ	20 ก.ค. 2558
เลขทะเบียน	16897617
เลขเรียกหนังสือ	25
มหาวิทยาลัยจนเรศวร	๒ 24 39 2556



## ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การสังเคราะห์เส้นใยกลางของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เส้นใย  
เรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลเป็นแม่แบบ

ผู้ดำเนินโครงการ นายธนธิป เปียงเปี้ย รหัส 52365015  
นางสาวศลิษา สังข์ยก รหัส 53364888  
นางสาวอังศุมาลี กัมปนาท รหัส 53364970

ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)

.....กรรมการ  
(ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

.....กรรมการ  
(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)

.....กรรมการ  
(ดร.นิคม กลมเกลี้ยง)

.....กรรมการ  
(อาจารย์อากาศภรณ์ จันทรปรีกษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้เส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลเป็นแม่แบบ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายธนาริพ	เปียงเปี้ย	รหัส 52365015
	นางสาวศลิษา	สังข์ยก	รหัส 53364888
	นางสาวอังศุมาลี	กัมปนาท	รหัส 53364970
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ภมรรัตน์	จันธรรม	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2556		

#### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก สารละลาย Polyvinil Alcohol (PVA) ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ พบว่าการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าและการเพิ่มระยะห่างจากปลายเข็มถึงตัวรองรับมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดลดลง การเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบ คือ ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่างจากปลายเข็มถึงตัวรองรับ 7 เซนติเมตร หลังจากนั้นได้ศึกษาการเตรียมเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel ที่สภาวะดังกล่าว พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้จึงนำ RF Gel มาผสมกับ PVA โดยมีการควบคุมการบ่มและอัตราส่วนของ RF Gel/PVA พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่แบบคือ 1:9 เส้นใยแม่แบบที่ได้มีขนาด 105.2 นาโนเมตร การเคลือบเส้นใยแม่แบบด้วยไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ แช่ในสารละลาย TTIP เป็นเวลา 30 ชั่วโมง และศึกษาการทำแห้งของเส้นใยที่ได้ พบว่าการทำแห้งแบบระเหิดแห้งสามารถรักษาความเป็นเส้นใยให้คงรูปได้ดีกว่าการทำแห้งแบบอบลมร้อน การเผาเส้นใยแม่แบบที่เคลือบด้วย TTIP ในบรรยากาศ พบว่าเกิดการแตกหักของเส้นใย อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นเส้นใย

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ดร.ภมรรัตน์ จันทรธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ไขปัญหารวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอดและขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้วิชาความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาโทฉบับนี้

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปใช้สถานที่และเครื่องมือ สำหรับการสังเคราะห์ชิ้นงานเพื่อไปใช้ในการทำปริญญาโทฉบับนี้ เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงการ

นายธนาธิป

เปียงเปี้ย

นางสาวศลิษา

สังข์ยก

นางสาวอังศุมาลี

กัมปนาท

พฤศจิกายน 2556

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	22
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	23
3.3 แผนภาพการทดลอง.....	24
3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	26
4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA.....	26
4.2 การขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel.....	37
4.3 การขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel/PVA.....	39
4.4 การขึ้นรูปเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแม่แบบ.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	56



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตและการนำไปใช้.....	9
2.2 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของ RF.....	13
2.3 ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของ RF Gel.....	14
2.4 ผลกระทบของการไฟโลไรซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จาก RF Gel.....	15
4.1 แสดงขนาดเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่สภาวะต่างๆ.....	36



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การปั้นขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตของพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลาย.....	6
2.2 การปั้นขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว.....	7
2.3 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	10
2.4 แสดงกลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิด RF Gel.....	11
2.5 การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์ของเรซอซินอล ฟอर्मัลดีไฮด์.....	12
2.6 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำในการทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freezing Curve)....	16
2.7 กราฟการเปลี่ยนสถานะในระหว่างการตกผลึกของสารผสมสองชนิด.....	16
2.8 กราฟการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram) ของการตกผลึก.....	17
2.9 กราฟสมดุลสถานะของน้ำ (Phase Diagram).....	18
3.1 ตัวอย่างการทดลอง.....	22
3.2 แผนภาพกระบวนการทดลอง.....	24
4.1 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 12 เซนติเมตร.....	27
4.2 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 12 เซนติเมตร.....	28
4.3 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 12 เซนติเมตร.....	29
4.4 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร.....	30
4.5 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร.....	31
4.6 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร.....	32
4.7 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์.....	33
4.8 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์.....	34
4.9 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์.....	35
4.10 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 7 เซนติเมตร.....	37



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ลักษณะที่ไม่เป็นเส้นใยจากการบ่ม RF Gel 30 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร.....	38
4.12 สารละลาย RF Gel เมื่อบ่ม 30 ชั่วโมง.....	38
4.13 กราฟแสดงความหนืดของ RF Gel.....	38
4.14 สารละลาย RF Ge/PVA ที่ทำการบ่ม RF Gel.....	39
4.15 แสดงการแยกชั้นสารละลาย RF Ge/PVA.....	40
4.16 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่ไม่มีการบ่ม.....	40
4.17 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่บ่ม RF-Gel 5 ชั่วโมง.....	41
4.18 สารละลาย RF Ge/PVA ที่บ่ม RF Gel พร้อมกับ PVA.....	42
4.19 แสดงการแยกชั้นสารละลาย RF Ge/PVA บ่ม RF Gel พร้อม PVA 15 ชั่วโมง.....	42
4.20 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่บ่ม RF Ge/PVA 5 ชั่วโมง.....	43
4.21 ลักษณะที่ไม่เป็นเส้นใยของ RF Ge/PVA.....	44
4.22 ลักษณะที่เป็นเส้นใยของ RF Ge/PVA ที่อัตราส่วน 1:3.....	44
4.23 แสดงลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 7 เซนติเมตร.....	46
4.24 ความเข้ากันของสารละลายแม่แบบ.....	46
4.25 ความเสถียรภาพทางความร้อนของสารละลายแม่แบบ.....	47
4.26 แสดงลักษณะชิ้นงานหลังจากบ่ม TTIP 15 ชั่วโมง.....	48
4.27 แสดงลักษณะชิ้นงานหลังจากบ่ม TTIP 30 ชั่วโมง.....	48
4.28 ลักษณะเส้นใย TiO <sub>2</sub> ที่ได้จากการทำแห้งแบบอบลมร้อน.....	49
4.29 ลักษณะเส้นใย TiO <sub>2</sub> ที่ได้จากการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง.....	49
4.30 ลักษณะเส้นใยแม่แบบ PVA ที่ผ่านการเผา.....	50
4.31 ลักษณะเส้นใยแม่แบบ RF Ge/PVA ที่ผ่านการเผา.....	50

## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

RF gel =	เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล
PVA =	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinil Alcohol)
mL/hr =	มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
kV =	กิโลโวลต์
cm =	เซนติเมตร
hr =	ชั่วโมง
min =	นาที
nm =	นาโนเมตร



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันนี้นาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีความสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น ได้มีการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น ทางการแพทย์ วิศวกรรม เกษตรกรรม และเทคโนโลยีชีวภาพ วัสดุนาโนนี้ คือ วัสดุที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีนาโน โดยโครงสร้างที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นมีหลายรูปแบบ เช่น อนุภาคนาโน (Nanoparticles) ท่อนาโน (Nanotubes) เส้นใยนาโน (Nanofibers) และแท่งนาโน (Nanorods) เป็นต้น

เส้นใยนาโน (Nanofibers) ถูกนำมาศึกษาและให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยทั่วไปจะผลิตขึ้นจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ รวมไปถึงการมีคุณสมบัติที่โดดเด่น คือ มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง มีความพรุนที่สูง และค่าแรงต้านทานแรงดึงตามความยาวที่สูง ด้วยลักษณะและคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำเส้นใยนาโนไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น เป็นวัสดุในการกรองสาร วัสดุวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ตัวนำไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และใช้เป็นส่วนประกอบของเสื้อผ้า เป็นต้น การผลิตเส้นใยนาโนมีหลายกระบวนการซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะและการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งในโครงการนี้จะนำกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrosprinning Process) มาใช้ในการผลิตเส้นใยนาโนเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตเป็นเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้แรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมากกว่า 60 ปี แล้วและได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างจริงจังเมื่อไม่กี่ 10 ปี ที่ผ่านมานี้ ซึ่งเส้นใยที่ได้มาจากการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตนั้น จะมีขนาดเล็กมาก (ระดับนาโนเมตร) ในขณะที่การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยทั่วไปนั้น จะใช้แรงทางกลในการอัดรีดพอลิเมอร์ไหลผ่านหัวตายที่มีรูขนาดเล็กเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ ปัจจุบันเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตเส้นใยขนาดตั้งแต่ 10 จนถึง 1,000 นาโนเมตร อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงถึง 1,000 เท่า เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ผลิตด้วยเทคนิคทั่วไป รวมไปถึงเส้นใยระดับนาโนเมตรนี้มีน้ำหนักที่เบาและมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูงด้วย

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide,  $TiO_2$ ) เป็นหนึ่งในบรรดาวัสดุที่สามารถสังเคราะห์ให้มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร โดยเฉพาะการนำมาสังเคราะห์เป็นเส้นใยนาโน (Nanofibers) วัสดุกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนที่สูง ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มีการพัฒนาให้อนุภาคมีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร

จึงมีคุณสมบัติในการป้องกันแสงแดดและเมื่อพัฒนาให้ขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร ทำให้มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ย่อยสลายแบคทีเรีย กระจายสารอินทรีย์เมื่อได้รับการกระตุ้น จากแสงอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ จากสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่หลากหลายและมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากนั้น ในโครงการนี้จึงได้มีการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และเปรียบเทียบการสังเคราะห์ตามเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีประสิทธิภาพที่สูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โครงการนี้จะศึกษาการสังเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร โดยมีการเปรียบเทียบสารที่ใช้เป็นแม่แบบ ซึ่งสารที่ใช้เป็นแม่แบบในโครงการนี้ คือ เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล (RF Gel) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยขึ้นรูปสารแม่แบบด้วยการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตและการสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการขึ้นรูปแม่แบบด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบชนิดของแม่แบบที่มีผลต่อพื้นที่ผิวเส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์

1.2.3 เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวของเส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต

## 1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งกำหนดขอบเขตงานวิจัยไว้ดังนี้

### 1.3.1 ตัวแปรต้น

1.3.1.1 ศักย์ไฟฟ้า 15-25 กิโลโวลต์

1.3.1.2 อัตราการไหลของสารแม่แบบ 0.8–1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

1.3.1.3 ระยะห่างของปลายเข็มกับตัวรองรับ 7-12 เซนติเมตร

1.3.1.4 ระยะเวลาในการบ่มแม่แบบ ในสารละลายของสารตั้งต้นโลหะ 15-30 ชั่วโมง

1.3.1.5 เทคนิคการทำแห้ง โดยการทำให้แห้งแบบอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการทำให้แห้งแบบระเหิดแห้ง

### 1.3.2 ตัวแปรตาม

#### 1.3.2.1 สมบัติทางกายภาพของเส้นใยที่ได้

### 1.3.3 ตัวแปรควบคุม

#### 1.3.3.1 ชนิดและความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นแม่แบบ

## 1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2556 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2556

## 1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ (Gantt Chart)

ในการดำเนินงานโครงการการสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์โดยใช้เส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลเป็นแม่แบบ ซึ่งได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานเป็น 5 ขั้นตอน โดยระยะเวลาในการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

	การดำเนินโครงการ	ช่วงเวลา						
		มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.6.1	ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	←		→				
1.6.2	วางแผนและดำเนินการทดลอง			←		→		
1.6.3	เก็บและทดสอบตัวอย่าง				←	→		
1.6.4	วิเคราะห์ผล					←	→	
1.6.5	สรุปผลและเขียนเล่มรายงาน					←	→	→

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี หมายถึง เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง การสังเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักร หรือผลิตภัณฑ์ซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตรเทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่อยู่ในระดับที่เล็กมากหรือการเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ทำให้โครงสร้างของวัสดุหรือสสารมีคุณสมบัติพิเศษ ไม่ว่าจะทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ

นาโนเทคโนโลยีมีจุดเริ่มต้นโดย อัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) เป็นผู้ศึกษาขนาดและการเคลื่อนไหวของโมเลกุลน้ำตาล ซึ่งถือว่าเป็นหลักเกณฑ์ที่สำคัญมากของการศึกษาอนุภาคระดับนาโนเมตรในเวลาต่อมา หลังจากนั้นได้มีการศึกษาวิจัยนวัตกรรมทางด้านนาโนเทคโนโลยีขึ้นมากมาย [1]

ในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีได้เข้ามามีความสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น ได้มีการนำวัสดุนาโนมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น การแพทย์ วิศวกรรม เกษตรกรรม เทคโนโลยีชีวภาพ เคมีคลินิก และทางเคมี วัสดุนาโนนี้ คือ วัสดุที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 1-100 นาโนเมตร ที่สังเคราะห์ด้วยเทคโนโลยีนาโนนั่นเอง

##### 2.1.2 เส้นใยนาโน (Nanofibers)

เส้นใยนาโน หมายถึง เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยทั่วไปเส้นใยนาโนจะกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 100 นาโนเมตร โดยทั่วไปจะผลิตขึ้นจากพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ คุณสมบัติที่โดดเด่นของเส้นใยนาโนมีดังนี้

ก. มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

ข. มีความพรุนสูง

ค. มีค่าแรงต้านทานแรงดึงตามยาวสูง ตัวอย่าง เช่น คาร์บอนนาโนไฟเบอร์

ด้วยลักษณะและคุณสมบัติดังกล่าวจึงมีการนำเส้นใยนาโนไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น เป็นวัสดุในการกรองสาร วัสดุวิศวกรรมเนื้อเยื่อ วัสดุควบคุมการนำส่งยาและเครื่องสำอางค์ สิ่งตกแต่งแผล วัสดุเสริมความแข็งแรง ตัวนำไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ใช้เป็นส่วนประกอบของเสื้อผ้า ใช้ควบคุมการปลดปล่อยยาฆ่าแมลงในเกษตรกรรม เป็นต้น [2]

การผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรมีด้วยกันหลายกระบวนการ ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ สามารถแบ่งกระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรได้ ดังนี้

Drawing เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรโดยหยดสารละลายพอลิเมอร์ในขนาดไมโครเมตร ใช้ไมโครปิเปตจุ่มลงในหยดของสารใกล้กับ Contact Line จากนั้นดึงไมโครปิเปตออกอย่างรวดเร็ว เส้นใยขนาดนาโนเมตรจะถูกดึงออกมาพร้อมๆ กับการระเหยไปของตัวทำละลาย

Template Synthesis เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรที่ใช้แม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยรูที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร นำสารละลายพอลิเมอร์มาผ่านแม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร ภายใต้แรงดันน้ำ สารละลายพอลิเมอร์จะออกมาเป็นเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร

Phase Separation ในกระบวนการนี้มีหลักการ คือ พอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ดีก่อนและจึงเปลี่ยนตัวทำละลายที่พอลิเมอร์นั้นละลายได้ไม่ดีลงไปทำให้เกิดเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตรขึ้น

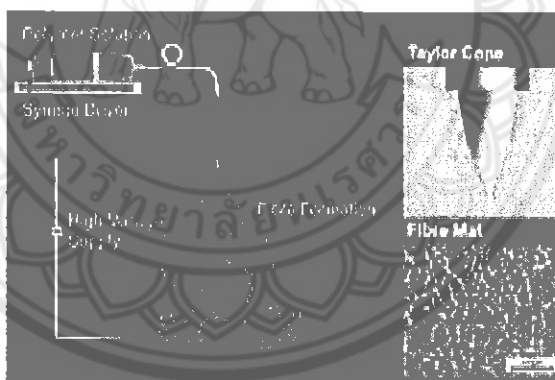
Self-Assembly กระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรที่เกิดขึ้นได้เองจากสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้โมเลกุลขนาดเล็กเป็นพื้นฐานในการสร้างเส้นใยขนาดนาโนเมตร เมื่อมีโมเลกุลมากขึ้นทำให้เกิดแรงระหว่างกัน เกิดการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะของเส้นใยขนาดนาโนเมตร

Electrospinning กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นมา 60 ปี แล้วแต่เพิ่งได้รับความสนใจศึกษากันอย่างจริงจังเมื่อไม่กี่ 10 ปี ที่ผ่านมา ในปี ค.ศ. 1934 Formhals ได้จดสิทธิบัตรกระบวนการและเครื่องมือที่ใช้แรงทางไฟฟ้าในการสังเคราะห์เส้นใย ในปี ค.ศ. 1969 Taylor ได้ตีพิมพ์ผลงานที่อธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ในขณะที่สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกจากเข็มโลหะที่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ว่ามีการเปลี่ยนรูปร่างของสารละลายจากทรงกลมเป็นลักษณะของสามเหลี่ยมคล้ายโคน เมื่อแรงสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งต่อมามีการเรียกลักษณะนี้ว่า Taylor Cone โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็น Taylor Cone จะขึ้นกับความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ ปี ค.ศ. 1971 Baumgarten เริ่มทำการศึกษาค้นคว้าผลของการเปลี่ยนแปลงสารละลายพอลิเมอร์และปัจจัยที่มีผลกระทบในกระบวนการ ทำให้รู้ได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่างๆ มีผลต่อสมรรถนะของเส้นใยนาโนที่ได้ ปี ค.ศ. 1995 Reneker ได้ทำการศึกษาย่างเป็นระบบมากขึ้น ทำให้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจจากนักวิจัยต่างๆ ทั่วโลก เห็นได้จากจำนวนผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตเพิ่มจากประมาณปีละไม่ถึง 10 เรื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 ถึงปี ค.ศ. 2000 เป็น 40 เรื่องในปี ค.ศ. 2001 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [2]

### 2.1.3 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrospinning Process)

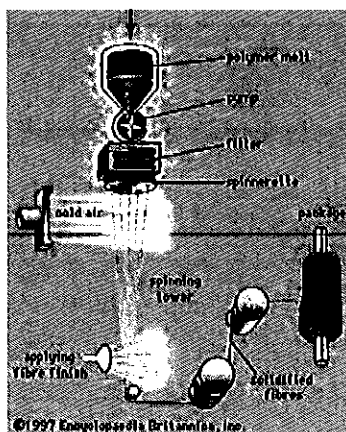
กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Spinning) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า Electrospinning เป็นเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ โดยใช้แรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตจะมีขนาดเล็กมาก (ระดับนาโนเมตร) ในขณะที่การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยทั่วไปใช้แรงทางกลในการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมผ่านหัวดายที่มีรูขนาดเล็ก (Spinneret) เส้นใยที่ได้จะมีขนาดใหญ่กว่าแบบแรกโดยมีขนาดอยู่ในช่วงไมโครเมตร

ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต สามารถใช้พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 หรืออยู่ในสถานะหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยการนำพอลิเมอร์ลงในภาชนะที่มีรูขนาดเล็ก จากนั้นให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตรงบริเวณปลายรูขนาดเล็กของภาชนะบรรจุและวัสดุรองรับเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าถึงจุดที่แรงทางไฟฟ้าสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ได้ พอลิเมอร์จะดีดออกจากปลายภาชนะบรรจุไปที่วัสดุรองรับเกิดเส้นใยในระดับนาโนเมตร ปัจจุบันเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถผลิตเส้นใยขนาดตั้งแต่ 10 จนถึง 1,000 นาโนเมตร อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface Area to Volume Ratio) สูงถึง 1,000 เท่า เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ผลิตด้วยเทคนิคทั่วไป เส้นใยระดับนาโนเมตรมีน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง [4]



รูปที่ 2.1 การปั่นขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตของพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลาย [4]





รูปที่ 2.2 การปั่นขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว [4]

การทำงานของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High Voltage DC Supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with Metal Needle) และวัสดุรองรับ (Collector) การทำงานของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต เริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวผ่านเข็มโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ทำให้แรงผลักทางไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จากการหยุดสารละลายรูปทรงกลมบนปลายเข็มจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปโคนเมื่อแรงผลักทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ และเมื่อแรงผลักทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์สารละลายจะพุ่งออกจากปลายของโคนไปยังวัสดุรองรับซึ่งต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ สารละลายจะพุ่งเป็นแนวตรงในระยะหนึ่งและจะผ่านเข้าไปในส่วนของ Whipping Instability ซึ่งจะเกิดการระเหยของตัวทำละลาย เส้นใยของของแข็งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะตกซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่ทอ (Non-Woven) ในส่วนของเข็มฉีดยาที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ จะต้องมีการควบคุมให้มีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอโดยวิธีต่างๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational Force) ปัม (Syringe Pump) และแรงดันก๊าซ (Pressure Gas) เป็นต้น ในส่วนของวัสดุรองรับก็มีหลายชนิด เช่น เพลท (Stationary Plate) และดรัม (Rotating Drum) และการใช้สารละลาย เช่น น้ำ เป็นต้น จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต จะเห็นได้ว่ามีขั้นตอนต่างๆ ซึ่งแต่ละขั้นตอนก็มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและคุณสมบัติของเส้นใยนาโนที่ได้ [2]

### 2.1.3.1 ชนิดของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ในปัจจุบันมีนักวิจัยพยายามดัดแปลงกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตไปในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะที่ตรงกับการนำไปใช้งาน ชนิดของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตจำแนกได้ตามชนิดของเข็มที่ใช้และชนิดของสารละลายพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ ถ้าแบ่งตามการเรียงตัวของส่วน Capillary และเข็มโลหะ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. Single Configuration ใช้ Capillary ขึ้นเดียวและเข็มโลหะอันเดียวซึ่งเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ใช้สารละลายพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวหรืออาจจะเป็นพอลิเมอร์หลายชนิดแต่ละลายในตัวทำละลายชนิดเดียว

ข. Side by Side Configuration เป็นการเรียงตัวด้านข้าง โดยใช้ Capillary 2 ชิ้นที่มีสารละลายพอลิเมอร์ 2 ชนิด เทคนิคนี้ใช้สำหรับต้องการเส้นใยที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์ 2 ชนิด แต่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด มีการละลายที่แตกต่างกันจึงต้องแยกละลายพอลิเมอร์ทั้ง 2 ออกจากกันโดยการใช้เทคนิคนี้จะต้องคำนึงถึงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายทั้ง 2 ให้มีค่าใกล้เคียงกัน

ค. Coaxial Configuration เป็นเทคนิคใหม่ที่ทำให้เส้นใยขนาดนาโนมีลักษณะเป็น Core-Shell โดยลักษณะของ Capillary จะประกอบด้วย Capillary อันใหญ่ที่มี Capillary อันเล็กอยู่ด้านใน ภายใน Capillary จะบรรจุสารละลายพอลิเมอร์สองชนิดที่ละลายเข้ากันไม่ได้ โดยพอลิเมอร์ที่ต้องการให้เป็น Core จะบรรจุอยู่ในหลอดด้านใน นอกจากนั้นยังสามารถแบ่งชนิดของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต ตามชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. Polymer Solution สารละลายพอลิเมอร์ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้กันมากที่สุด โดยนำพอลิเมอร์ที่ต้องการทำให้เป็นเส้นใยนาโนมาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม

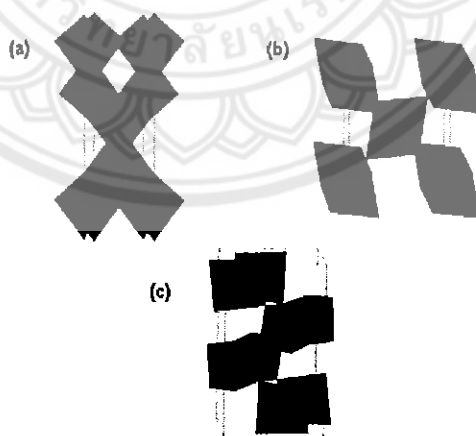
ข. Polymer Melt พอลิเมอร์หลอมเหลว เทคนิคนี้เป็นกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้อุณหภูมิที่สูงจนพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งหลอมเป็นของเหลว ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ เช่น Polyethylene และ Polypropylene เป็นต้น [5]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตและการนำไปใช้ [2]

Polymer	Solvent	Concentration	Perspective Application
Nylon6,6, PA-6,6	Formic Acid	10 wt.%	Protective Clothing
Polyurethanes, PU	Dimethyl Formamide	10 wt.%	Electric, Filter
Collagen-PEO	Hydrochloric Acid	1–2 wt.%	Wound Healing, Tissue Engineering
Polyaniline (PANI)/PEO	Chloroform	2–4 wt.%	Conductive Fiber
Polyvinylcarbazole	Dichlormethane	7.5 wt.%	Sensor, Filter
Cellulose Acetate, CA	Acetone, Acetic Acid, Dimethylacetamide	12.5–20 wt.%	Membrane
PLGA PLGA(PLA/PGA) = (85/15)	Tetrahydrofuran: Dimethylformamide (1:1)	1 g/20 ml	Scaffold for Tissue Engineering
Polyvinil Alcohol, PVA	Distilled Water	8–16 wt.%	Drug Delivery System
Polylactic Acid, PLA	Dichloromethane	14 wt.%	Drug Delivery System
Polyethylene Oxide, PEO	Distilled Water	7–10 wt.%	Electret Filter, Blend other Polymer
Polyacrylic Acidpolypyrrene Methanol, PAA-PM	Dimethyl Formamide	-	Optical Sensor
Polyvinyl Phenol, PVP	Tetrahydrofuran	20, 60% (wt./vol.)	Antimicrobial Agent
Polycaprolactone, PCL	Chloroform: Methanol (3:1)	-	Biomedical Application

### 2.1.4 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide, $TiO_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีสูตรโมเลกุล คือ  $TiO_2$  หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไทเทเนีย (Titania) ซึ่งถูกจัดเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียมซึ่งอยู่ในกลุ่มของโลหะทรานซิชัน ไทเทเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-Type Semiconductor) ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์จึงได้รับความสนใจในการใช้งานด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรต่อสารเคมี ไม่มีความเป็นพิษสูง ราคาไม่แพงมาก และมีคุณสมบัติพิเศษที่เป็นประโยชน์อีกมากมายหลายอย่าง และไทเทเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปอื่น เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) และเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสง (Photocatalysis) เป็นต้น และเนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์มีค่าดัชนีการหักเหสูงจึงถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนและในอุปกรณ์ทางการมองเห็นชนิดแผ่นบาง (Thin Film Optical Devices) หลายชนิด ไทเทเนียมไดออกไซด์ยังใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (Gas Sensor) เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบของก๊าซที่สภาวะบรรยากาศ เช่น สามารถใช้ตรวจสอบก๊าซออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน เป็นต้น และการประยุกต์ใช้ส่วนของ Anti-Microbial เป็นการใช้อนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ซิลเวอร์ หรือเคลย์ Montmorillonite เคลือบบนสิ่งทอทำให้มีคุณสมบัติต่อต้านเชื้อโรค ระวังกลิ่น เหมาะสำหรับเสื้อผ้าทั่วไป ชุดกีฬา สิ่งทอที่ใช้ในโรงพยาบาลหรือสถานที่ปลอดเชื้อ เป็นต้น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่พบมีด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ บรูไคท์ (Brookite) รูไทล์ (Rutile) และอนาเทส (Anatase) [6] และมีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.3

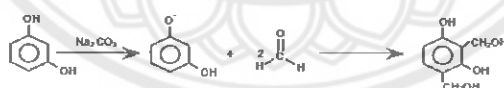


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไทเทเนียมไดออกไซด์ a) อนาเทส (Anatase) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) b) รูไทล์ (Rutile) มีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) c) บรูไคท์ (Brookite) มีโครงสร้างแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)

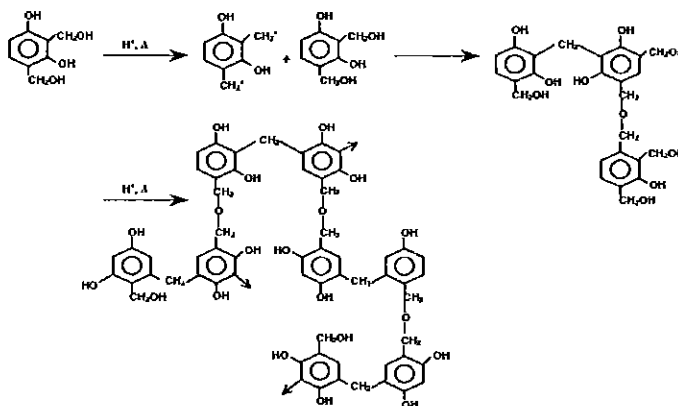
### 2.1.5 เรซอซินอล ฟอर्मัลดีไฮด์เจล (RF Gel)

เรซอซินอล ฟอर्मัลดีไฮด์เจลหรืออาร์เอฟ เจล (RF Gel) สามารถเตรียมได้โดยการนำสารเรซอซินอลผสมกับฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยให้เกิดสภาพเจล ปฏิกิริยาการเกิดเจลเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การบ่มเจลจึงต้องทำในภาชนะที่ควบคุมด้วยอุณหภูมิเพื่อให้มีเวลาเพียงพอในการเกิดโครงข่ายเจล ปัจจัยหลักในขั้นตอนที่เกิดเจล คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเกิดเจล คือ Polycondensation เกิดขึ้นในสารตั้งต้นที่ถูกควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นที่เป็น Aquagel หรือ Alcolgel คือ สารตั้งต้นเมื่อใช้น้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย ตามลำดับ โดยโครงสร้างและคุณสมบัติส่วนมากของ RF Gel ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยานี้และสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว นอกจากนั้นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติสุดท้ายของเจลได้ถูกอธิบายไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ปฏิกิริยาที่สำคัญระหว่างเรซอซินอลและฟอर्मัลดีไฮด์จะมีการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบอนุพันธ์ Hydroxymethyl (-CH<sub>2</sub>-OH) และเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุพันธ์ Hydroxymethyl อยู่ในรูปแบบของพันธะเมทิลีน (-CH<sub>2</sub>-) และพันธะเมทิลีนอีเธอร์ (-CH<sub>2</sub>-OCH<sub>2</sub>) [14-16] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 โดยมีอัลคาไลน์เป็นสิ่งสำคัญซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวเริ่มต้นของเรซอซินอลเป็นประจุลบ (Resoseinol Anion) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟอर्मัลดีไฮด์ในปฏิกิริยาการเพิ่ม (Addition Reaction) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น 2, 4 Methylol Resorcinol ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเพิ่มจะทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นที่จะทำปฏิกิริยาการควบแน่นตามมาและทำปฏิกิริยาเป็นลักษณะการควบแน่นแบบต่อเนื่อง จะได้โครงข่ายที่มีขนาดเจลที่ใหญ่ขึ้น (7-10 นาโนเมตรในเส้นผ่านศูนย์กลาง) สามารถสังเกตได้จากความหนืดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [17]

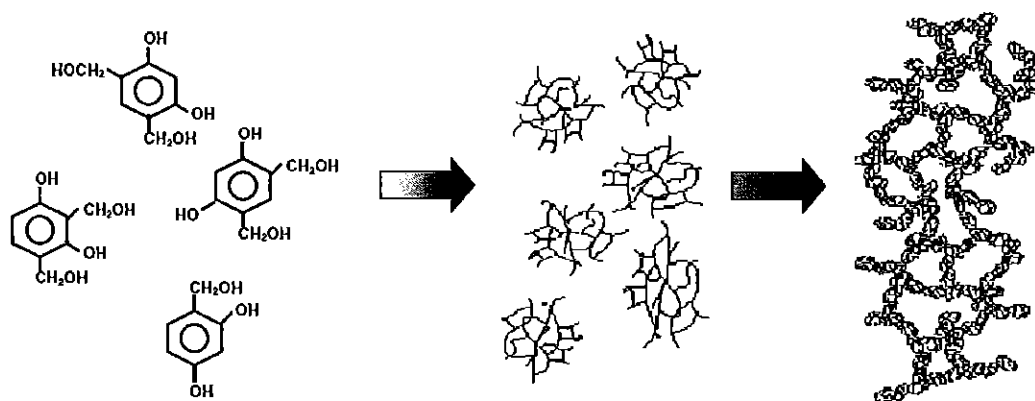
#### 1. Addition Reaction



#### 2. Condensation Reaction



รูปที่ 2.4 แสดงกลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิด RF Gel [14]



รูปที่ 2.5 การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์ของเรซอร์ซินอล ฟอรัลดีไฮด์ [18]

หลังจากนั้นทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายอบแห้งและเผาในสภาวะแก๊สเฉื่อยเพื่อให้เกิดการคาร์บอนในเซชันให้เป็นคาร์บอน ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งมีหลายเทคนิค เช่น อบแห้งในสภาวะจุดเหนือวิกฤตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า RF Aerogel อบแห้งในบรรยากาศลมร้อนปกติเจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า RF Xerogel เป็นต้น หลังจากนั้นนำเจลแห้งไปทำการคาร์บอนในเซชันเพื่อให้ได้คาร์บอน พบว่าคาร์บอนที่ได้จาก RF Gel นั้นมีพื้นที่ผิวและสภาพความเป็นรูพรุนที่สูง โดยที่ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติดังกล่าวถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2 ถึง 2.4

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของ RF Gel [19]

ปัจจัย	ผลกระทบ
ลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น (การลด R/F R/W หรืออัตราส่วน R/C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อนุภาคขนาดเล็กและขนาดรูพรุนที่ได้มีขนาดเล็ก</li> <li>- เพิ่มพื้นที่ผิวของ Xerogels</li> <li>- มีการลดหรือเพิ่มปริมาณของรูพรุน Xerogels ขึ้นอยู่กับค่า pH</li> </ul>
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ RF Gel ที่ได้มีขนาดเล็กผิวเรียบและมีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่กว้าง</li> <li>- ในที่ระดับความเข้มข้นสูง RF Gel ที่ได้มีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่แคบมากและอาจลดเวลาในการเกิดเจล</li> </ul>
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ที่ระดับความเข้มข้นสูง RF Gel ที่ได้มีลักษณะเป็นโพลีเมอร์สูง (อนุภาคพอลิเมอร์ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันด้วยคอขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสูง จุดแข็งทางกลสูง) ลดเวลาในการเกิดเจล</li> <li>- ในที่ระดับความเข้มข้นต่ำ RF Gel ที่ได้จะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (อนุภาคขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันด้วยคอแคบ พื้นที่ผิวดำ จุดแข็งทางกลต่ำ)</li> </ul>
pH เจลที่เพิ่มขึ้น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของคาร์บอน Aerogels</li> <li>- ไม่มีนัยสำคัญการเพิ่มพื้นที่ผิวของคาร์บอน Xerogels</li> <li>- เพิ่มปริมาณรูพรุนของคาร์บอน Xerogels ที่มีความเข้มข้นของสารตั้งต้น</li> </ul>
การบ่มเจล	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยให้มีเวลาในการเกิดโครงร่างตาข่ายของเจลมากขึ้น</li> </ul>

### ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของ RF Gel [19]

ปัจจัย	ผลกระทบ
ตัวทำละลายแลกเปลี่ยน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จำเป็นสำหรับการทำแห้งในระบบ Supercritical CO<sub>2</sub> หรือทำแห้งแบบระเหิดแห้ง</li> <li>- ช่วยให้การระเหยแห้งเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น</li> <li>- การลดลงของความตึงเครียดที่บนพื้นผิวการระเหยในระบบ Subcritical</li> </ul>
การทำแห้งในบรรยากาศปกติ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า Xerogels ซึ่งมีการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้รูพรุนเล็กลงและปริมาณรูพรุนลดลง แต่ความแข็งแรงทางกลของเจลแห้งจะเพิ่มขึ้น</li> </ul>
การทำแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า Aerogels</li> <li>- เจลที่ได้ไม่มีนัยสำคัญของการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้พื้นที่ผิวสูงปริมาณรูพรุนมาก</li> </ul>
การทำแห้งในบรรยากาศปกติด้วยอะซิโตน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เช่นเดียวกับการทำแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO<sub>2</sub> แต่ด้วยความดันที่ลดลงจำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย</li> <li>- ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเปลี่ยนอะซิโตนเป็นสภาพวิกฤตอาจทำให้เจลแห้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนบางส่วน</li> </ul>
การทำแห้งแบบระเหิดแห้ง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า Cryogels</li> <li>- การระเหิดของตัวทำละลายแช่แข็งพบว่ารูพรุนที่ได้ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเมโซพอร์ความหนาแน่นของตัวทำละลายจะต้องคงที่ด้วยการแช่แข็ง</li> </ul>



## ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของการไฟโลไรซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จาก RF Gel [19]

ปัจจัย	ผลกระทบ
เพิ่มอุณหภูมิไฟโลไรซิส	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ลดปริมาณออกซิเจน</li> <li>- ลดพื้นที่ผิวของคาร์บอน Aerogels และ Xerogels</li> <li>- ลดปริมาณรูพรุนของคาร์บอน Aerogels และ Xerogels</li> <li>- เพิ่มการกระจายขนาดของ Macropore</li> <li>- เพิ่มการกระจายขนาดของ Microporen เมื่อใช้อัตราส่วน R/C ที่ต่ำมาก</li> </ul>
เพิ่มเวลาในการไฟโลไรซิส	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มความกว้างของรูพรุน ปริมาณ และพื้นที่ผิว</li> </ul>

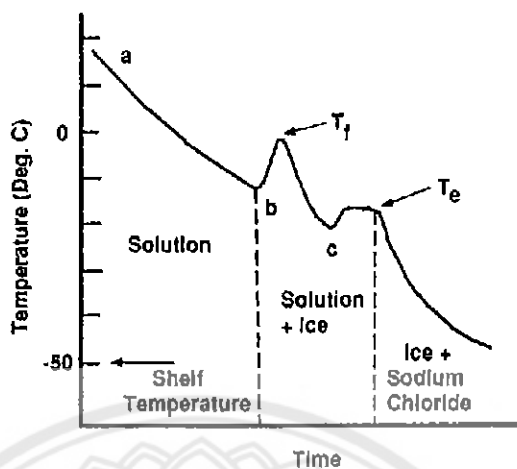
### 2.1.6 การทำแห้งแบบระเหิดแห้ง (Freeze Drying)

วิธีการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง (Freeze Drying หรือ Lyophilization) เป็นเทคนิคการทำให้สารมีความเข้มข้นและทำให้อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายในลักษณะผงแห้ง โดยอาศัยหลักการแช่แข็ง (Freezing) เพื่อเปลี่ยนสถานะของตัวอย่างจากสถานะของเหลวมาเป็นของแข็ง จากนั้นจึงกระตุ้นให้เกิดการระเหิดของน้ำกลายเป็นไอโดยตรง โดยอาศัยหลักการปรับความดันไอของน้ำให้มีค่าลดต่ำกว่าจุดสมดุลสามสถานะหรือจุดร่วมสาม (Triple Point) ของน้ำ จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถลดปริมาณน้ำในตัวอย่างลงได้จนกระทั่งอยู่ในระดับที่สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานโดยที่มิเกิดการเสื่อมคุณภาพน้อยที่สุด

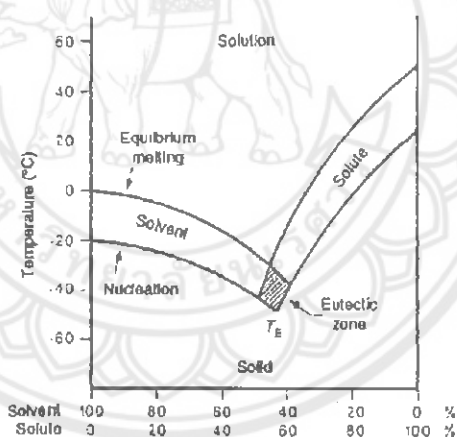
หลักการของการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง ซึ่งโดยน้ำในตัวอย่างนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองรูปแบบด้วยกัน คือ น้ำอิสระ (Free Water) และน้ำที่ถูกยึดจับไว้ในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต (Bounded Water) โดยทั่วไปพบน้ำทั้งสองในอัตราส่วนร้อยละ 80 ต่อ 20 ดังนั้นหลักการทำแห้งโดยวิธีนี้จึงแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ การไล่น้ำอิสระ เกิดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของสารตัวอย่างไม่มากนัก ส่วนขั้นตอนที่สอง คือ การไล่น้ำในส่วนที่ถูกจับยึดไว้ในส่วนโครงสร้างของสาร ถูกไล่ออกไปได้ยากต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวในปริมาณที่สูง ขั้นตอนในการทำแห้งแบบระเหิดแห้งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ก. การแช่แข็ง (Freezing) เป็นการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากสถานะของเหลวให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยเริ่มจากการลดอุณหภูมิของน้ำจากอุณหภูมิห้องลงมาเป็นศูนย์องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งบางส่วน เรียกน้ำที่แข็งตัวนี้ว่า Nucleation Ice ส่วนของแข็งที่ละลายน้ำอยู่นั้นมีความเข้มข้นสูงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำนั้นเปรียบเสมือนตัวทำละลายมีปริมาณลดลง ทำให้สารตัวอย่างเข้มข้นมากขึ้นจนถึงขั้นของการตกผลึก เรียกจุดนี้ว่า Eutectic ณ อุณหภูมิที่ทั้งน้ำและตัวถูกละลายเกิดการตกผลึกควบคู่กันเรียกว่า Eutectic

Temperature (TE) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำและสารละลายตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.6 และ 2.7

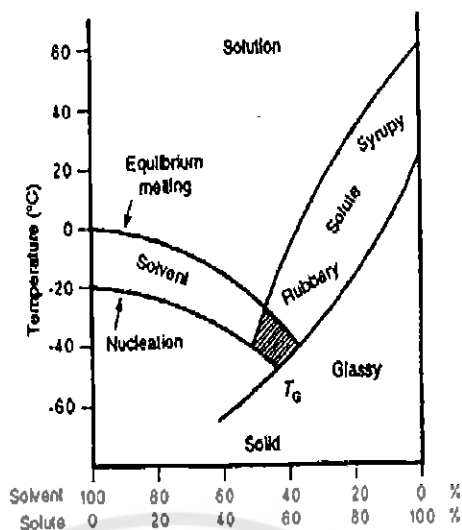


รูปที่ 2.6 กราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำในการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง (Freezing Curve)



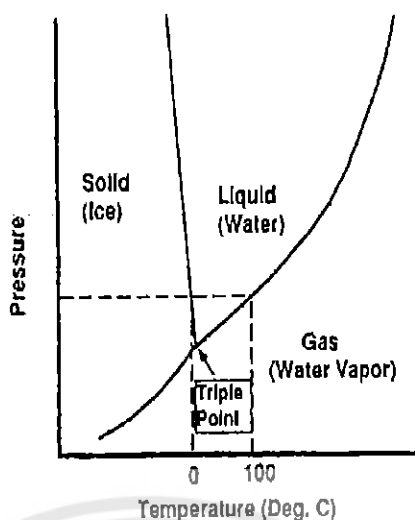
รูปที่ 2.7 กราฟการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram) ในระหว่างการตกผลึกของสารผสมสองชนิด

แต่ในทางปฏิบัติตัวถูกละลายไม่เกิดการตกผลึกอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการเพิ่มขึ้นของความหนืดโดยเริ่มจากสภาพคล้ายน้ำเชื่อม (Syrupy) เข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นลักษณะยางเหนียว (Rubbery) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ท้ายที่สุดเมื่อปริมาณน้ำอิสระลดลงจนต่ำที่สุด (เกิดการแข็งตัวหมด) จึงเกิดการตกผลึกลงมาเป็นผลึกที่มีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอน (Amorphous Glass) ที่มีน้ำยึดอยู่ในโครงสร้างของผลึกอยู่ (Bounded Water) เรียกอุณหภูมิ ณ จุดที่สารตัวอย่างเกิดการตกผลึกว่า Glass Transition Temperature (TG) และเรียกอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการไล่น้ำออกไปได้ในปริมาณสูงสุดว่า Collapse Temperature (TC)



รูปที่ 2.8 กราฟการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram) ของการตกผลึก

ข. การระเหิด (Sublimation หรือ Primary Drying) หลังจากการแช่แข็งจนกระทั่งได้ลักษณะตัวอย่างเป็นผลึกน้ำแข็งแล้ว ในสถานะของแข็งนี้ พบว่าค่าความดันไอของน้ำมีค่าลดลงจนกระทั่งต่ำกว่าจุดสมดุลสามสถานะหรือจุดร่วมสาม (Triple Point) ทำให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงบนเส้นสมดุลสถานะเกิดขึ้นได้เพียงสองสถานะ คือ จากสถานะของแข็งสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำได้โดยตรงโดยไม่ต้องเกิดการหลอมตัวเป็นของเหลวก่อน เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า การระเหิด แสดงกราฟสมดุลสถานะของน้ำ ดังรูปที่ 2.9 การระเหิดนี้ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกสูงถึง 2800 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ของน้ำโดยพลังงานดังกล่าวเป็นตัวพา (Convection) ความร้อนเข้าสู่ชั้นของสารแช่แข็งเพื่อระเหิดน้ำในรูปไอระเหยออกมาจากโครงสร้างผลึกสารตัวอย่าง จากแหล่งพลังงานข้างต้นสามารถกระทำได้โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศเป็นตัวกำเนิดพลังงาน โดยอาศัยผลต่างของความดันในสารตัวอย่างภายในเครื่องมือเป็นตัวพาไอน้ำออกมา ความแตกต่างของความดันดังกล่าวต้องสูงกว่า 10-2 มิลลิบาร์ หรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อทำการปรับสภาพความดันไอของน้ำให้ต่ำกว่า 6 มิลลิบาร์ (4.6 มิลลิเมตรปรอท) ทำให้น้ำเข้าสู่จุดสมดุลสามสถานะหรือจุดร่วมสาม (Triple Point) จึงทำให้เกิดการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว อย่างไรก็ตามในสภาวะสุญญากาศการระเหิดสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าความดันไอน้ำลดต่ำลง จึงสามารถขจัดน้ำไอระเหยออกจากสารตัวอย่างได้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นการช่วยรักษาความเสถียรของโปรตีนที่สลายตัวด้วยความร้อนได้ง่ายไว้ในขั้นตอนการระเหิดนี้สามารถลดปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ให้เหลือต่ำกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแห้งได้ในขณะที่ยังคงปริมาตรรวมของโครงสร้างสารเท่ากับขั้นตอนในการแช่แข็ง



รูปที่ 2.9 กราฟสมดุลสถานะของน้ำ (Phase Diagram)

ค. การไล่น้ำในส่ว Bounded form Desorption ซึ่งเกิดจากการให้ความร้อนภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยพบว่า การให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส สามารถระเหยน้ำที่เหลืออยู่ในโครงสร้างของโปรตีนออกมาได้ เป็นการระเหยของน้ำโดยอาศัยผลต่างของอุณหภูมิตั้งระหว่างภายในตัวอย่างและพื้นผิวของตัวทำความร้อนที่ให้เข้าไป ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะดังนี้

- ทำให้สารเสียหายหรือสูญเสียค่ากิจกรรมการทำงานน้อยที่สุด
- ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักแห้ง
- ลักษณะเป็นผงแห้งมีรูพรุนเนื่องจากส่ว Bounded Water ถูกดึงออกไป
- เมื่อนำมาละลายน้ำใหม่ โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุน

ของสารที่เป็นส่วของ Bounded Water เดิม ทำให้สารนั้นกลับมาอยู่ในสภาพปกติพร้อมที่ใช้งานได้ดั้งเดิม (Rehydration)

- ให้ความน่าเชื่อถือในด้านความสะอาด เนื่องจากสามารถทำในสภาพปลอดเชื้อได้
- อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีข้อเสียบางประการ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบทั่วไปดังนี้
- ต้นทุนสูงใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง (ประมาณ 3 เท่าของการทำแห้งแบบทั่วไป)
  - ใช้พลังงานสูง 2-3 เท่า
  - ใช้เวลาในการทำแห้งแต่ละรอบนาน 24-48 ชั่วโมง
  - มีโอกาสทำลายโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพพีเอชและความเข้มข้นของสารละลายเกลือในระหว่างที่สารเกิดการระเหิดแล้วมีความเข้มข้นสูงขึ้นได้ [6]

## 2.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

### 2.1.7.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีหลักการทำงานที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser Lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective Lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย [8]

### 2.1.7.2 X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

X-ray Diffraction Spectroscopy (XRD) เรียกสั้นๆ ว่าเทคนิค XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัว Detector เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่างได้ [9]

### 2.1.7.3 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ ตัวอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือการระเหยของน้ำ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสหรือการแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) การทำงานของเครื่องมือนี้ คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่าและเมื่อให้ความร้อนเครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่

ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อนที่วัสดุดูดหรือคาย เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลา และการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ [10]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2007 J.Supapol ศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยขนาดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าสามารถเตรียมได้จากวิธีโซลเจลผสมกับการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตโดยใช้สารละลายไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ พอลิไวนิลไพโรลิโดนและเอทานอลในการปั่นเส้นใยคอมโพสิตระหว่างไทเทเนียมไดออกไซด์ และพอลิไวนิลไพโรลิโดน ภายใต้ความต่างศักย์ 16 กิโลโวลต์ การเผาเส้นใยที่ 500 องศาเซลเซียส ทำให้เส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจากอสัณฐานไปเป็นเฟสผสมที่ประกอบด้วยอนาเทสและรูไทล์ พร้อมกับการสลายตัวของพอลิเมอร์ออกจากเส้นใย การเปลี่ยนแปลงตัวรองรับในกระบวนการปั่นเส้นใยจากตัวรองรับในแบบราบเป็นตัวรองรับทรงกลมแบบหมุนได้ส่งผลให้เส้นใยเกิดการจัดเรียงในทิศทางเดียวกันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยก่อนเผา 220 นาโนเมตร และหลังเผา 120 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาผลของการบ่มสภาวะเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์และการเติมกรดอะซิติกในสารละลายตั้งต้น ต่อลักษณะทางสัณฐานและการเปลี่ยนแปลงเฟสของเส้นใยภายหลังการเผา ซึ่งผลจากการศึกษา พบว่าการบ่มสภาวะเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้ความชื้นสูงสามารถลดสัดส่วนรูไทล์ในเส้นใยหลังการเผาได้ หากแต่การบ่มสภาวะเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้ความชื้นสูงนั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ ความหนาของชั้นเส้นใยเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการบ่มเส้นใย การเติมกรดลงในสารละลายสำหรับการปั่นเส้นใยนั้น สามารถลดอุณหภูมิการตกผลึกอนาเทสให้มีความต่ำลงได้ และพบว่าขนาดผลึกเฉลี่ยของเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์ มีขนาดเล็กลงในสภาวะที่มีกรดอะซิติก รวมทั้งสามารถลดการกระจายตัวของเส้นใยที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณการเติมกรดอะซิติกมากขึ้น [7]

ในปี ค.ศ. 2008 Guo-Dong Fu และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนพอลิเมอร์จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต ซึ่งกระบวนการดังกล่าวได้รับการยอมรับว่าเป็นกระบวนการที่เป็นไปได้สำหรับการผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างต่อเนื่องในระดับไมโครเมตรถึงในระดับนาโนเมตร พบว่าการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตเมื่อรวมกับการปั่นแบบมีแกนร่วมหรือเมื่อรวมกับเทคนิคอื่นๆ นั้นสามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ได้ นอกจากนี้สามารถนำมาใช้ในการเน้นการทำงานและการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนพอลิเมอร์ในด้านต่างๆ ได้อีกด้วย [12]

ในปี ค.ศ. 2010 M.Thovicha ได้ศึกษาเกี่ยวกับการผสมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือไทเทเนียมเข้าไปในอาร์เอฟเจล ซึ่งเตรียมด้วยเทคนิคโซลเจล โพลีคอนเดนเซชันของเรซอซินอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยใช้กรดอะซิติกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ (TTIP) ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์กับสารละลายอาร์เอฟเจลนั้นเกิดก่อนข้างรุนแรงและคายความร้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นไทเทเนียมไดออกไซด์โซลจึงถูก

เตรียมขึ้นต่างหากเพื่อชะลอการเกิดปฏิกิริยาเมื่อเติมลงไปในสารละลายอาร์เอฟ ไทเทเนียมไดออกไซด์โซลถูกเตรียมด้วยวิธีโซลเจลของ TTIP ที่เวลาบ่มต่างๆ และถูกเติมลงในสารละลายอาร์เอฟ ซึ่งบ่มที่เวลาต่างๆ ด้วย หลังจากนั้นสารผสมจะถูกบ่มไว้อีก 36 ชั่วโมง ก่อนที่นำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดโครงสร้างอาร์เอฟออก จากการทดลองพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์โซลทำปฏิกิริยากับสารละลายอาร์เอฟที่เกิดเป็นกลุ่มก้อนอาร์เอฟ โดยดูได้จากสัญญาณของพันธะไทเทเนียมต่อกับออกซิเจนและคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนแบบเมโซพอร์จากการใช้อาร์เอฟเจล อย่างไรก็ตามอัตราส่วนโดยโมลของเราของซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์และอัตราส่วนโดยโมลของเราของซินอลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าสูงจะส่งผลต่อปฏิกิริยาระหว่างอาร์เอฟเจลและไทเทเนียมไดออกไซด์โซล ทำให้ได้พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่มาก ส่วนปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์โซลที่ใช้มีผลต่อการเกิดพื้นที่ผิวอย่างมากและทำให้ผลิตภัณฑ์มีความเป็นรูพรุนแบบเมโซพอร์ ระยะเวลาในการบ่มของอาร์เอฟเจลและไทเทเนียมไดออกไซด์โซล ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายและการเกิดโครงสร้างตาข่ายนี้ทำให้ปฏิกิริยาของสารละลายอาร์เอฟกับไทเทเนียมไดออกไซด์โซลเกิดอย่างไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาของอาร์เอฟกับไทเทเนียมไดออกไซด์จะเกิดขึ้นโดยที่อาร์เอฟเจลและไทเทเนียมไดออกไซด์โซลเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายเชื่อมขวางกันและเกิดโครงสร้างตาข่ายของไทเทเนียมไดออกไซด์พร้อมกันด้วย ซึ่งเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวและรูพรุนของผลิตภัณฑ์ [13]

ในปี ค.ศ. 2011 Shinuke Nagamine และคณะ ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์เส้นใยนาโนของ Carbon-Core/TiO<sub>2</sub> Sheath โดยใช้กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต ร่วมกับปฏิกิริยาโซลเจล โดยเส้นใยนาโน Carbon-Core/TiO<sub>2</sub> Sheath สังเคราะห์มาจากการปั่นเส้นใย PVA โดยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอออกไซด์ (TTIP) โดยมีเฮปแทนเป็นตัวทำละลาย เส้นใยนาโนคอมโพสิต PVA/TiO<sub>2</sub> จะถูกเปลี่ยนเป็นเส้นใยนาโน Carbon/TiO<sub>2</sub> โดยการเผาในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และพบว่าเส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับร้อยนาโนเมตร และนอกจากนั้น พบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นผลึกแบบอนาเทสเคลือบอยู่ที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งผลึกไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวมีความหนาในระดับสิบนานาเมตร [11]

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA และ RF GeI/PVA โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลาย และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ แล้วนำมาสังเคราะห์เป็นเส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1.1 เรซอร์ซินอล (Resorcinol)
- 3.1.1.2 ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)
- 3.1.1.3 Sodium Carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- 3.1.1.4 Titanium Isopropoxide (TTIP)
- 3.1.1.5 Heptane
- 3.1.1.6 Polyvinyl Alcohol (PVA)

##### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.2.1 เครื่องปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต
- 3.1.2.2 ตู้อบแห้งด้วยความร้อน
- 3.1.2.3 ตู้อบแห้งแบบแช่แข็ง
- 3.1.2.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 3.1.2.5 Syringe Pump
- 3.1.2.6 กระจกนาฬิกา
- 3.1.2.7 ปีกเกอร์



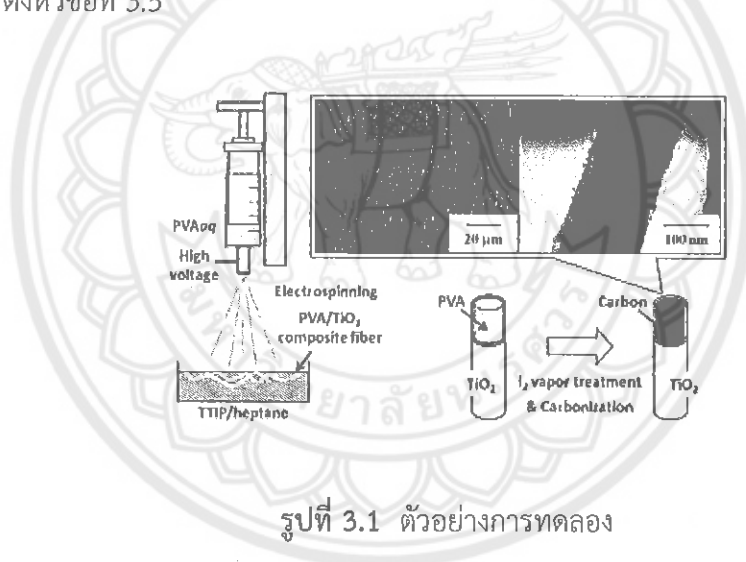
## 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

### 3.2.1 การเตรียมสารละลายของสารตั้งต้นโลหะ

การเตรียมซึ่งจะเตรียมได้จากการนำ Titanium Isopropoxide (TTIP) ละลายใน Heptane ที่ความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร

### 3.2.2 การเตรียมเส้นใยที่ใช้เป็นแม่แบบจากพอลิเมอร์

ในการเตรียมนั้นจะมีพอลิเมอร์ 2 ชนิดที่จะใช้เป็นเส้นใยแม่แบบ คือ RF Gel มีอัตราส่วนโดยโมล คือ R/F เท่ากับ 0.5 R/W เท่ากับ 0.15 และ C/W เท่ากับ 10 โมลต่อลูกบาศก์เมตร (R: Resorcinol, F: Formaldehyde, W: Distilled Water และ C: Sodium Carbonate) และ PVA ที่น้ำหนักโมเลกุล 65000 (PVA 10 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร) ซึ่งจะเตรียมด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นสารตั้งต้นเพื่อศึกษาหาค่าศักย์ไฟฟ้าและอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเส้นใยขนาดนาโนเมตร โดยรายละเอียดในการขึ้นรูปแสดงในแผนภาพ ดังหัวข้อที่ 3.5



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการทดลอง

### 3.2.3 การสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

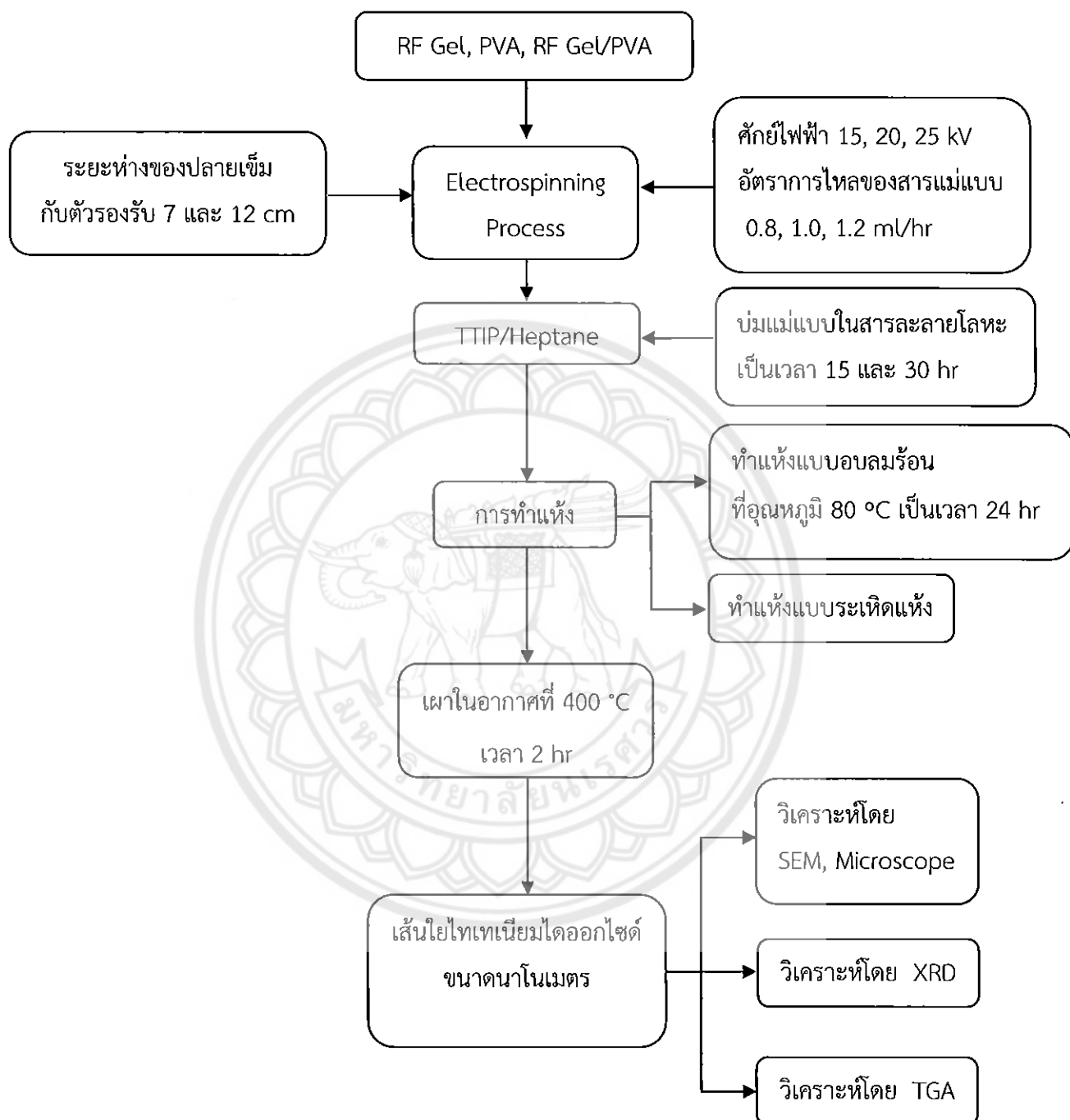
3.2.3.1 กำหนดให้ตัวรองรับวางห่างจากปลายเข็มเป็นระยะทางซึ่งอยู่ในช่วงที่ศึกษา

3.2.3.2 บ่มเส้นใยแม่แบบในสารละลายของสารตั้งต้นโลหะในอุณหภูมิห้องเป็นเวลาซึ่งอยู่ในช่วงที่ศึกษา

3.2.3.3 การทำแห้งโดยวิธีการทำแห้งแบบอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง

3.2.3.4 เผาในบรรยากาศอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อไล่สารแม่แบบและเพื่อเปลี่ยนโลหะไทเทเนียมให้เป็นเส้นใยกลวงของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตร

## 3.3 แผนภาพการทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนภาพกระบวนการทดลอง

### 3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

#### 3.4.1 การวิเคราะห์ขนาดและลักษณะของเส้นใยที่ได้โดย SEM และ Microscope

การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของเส้นใยนาโนจะตรวจสอบโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (รุ่น HITASHI S3400) โดยใช้ Accelerating Voltage 15 กิโลโวลต์ และทำการบันทึกภาพที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,00 เท่า และตรวจสอบโดยกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 100 เท่า ส่วนการศึกษาขนาดของเส้นใยจะทำการวิเคราะห์โดยทำการวัดขนาดเส้นใยจากภาพถ่าย SEM และ Microscope ด้วยโปรแกรม Semafore v.5.0 ซึ่งในการวิเคราะห์ขนาดจะทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 50 ตัวอย่าง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นใย

#### 3.4.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์โดย XRD

การวิเคราะห์ความเป็นผลึกจะตรวจสอบโดยใช้เทคนิค X-ray Diffractometer โดยวัดค่ามุมเลี้ยวเบนจากรังสี Cu K $\alpha$  ที่มีค่าการเลี้ยวเบนอยู่ในช่วง  $2\theta$  คือ 20-80

#### 3.4.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนโดย TGA

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนจะตรวจสอบโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis ภายใต้สภาวะของไนโตรเจน จากอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการขึ้นของอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบเพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF GeL/PVA ส่วนที่สองศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel เนื่องจาก RF Gel ที่ขึ้นรูปแล้วไม่มีลักษณะเป็นเส้นใย ดังนั้นในส่วนที่สามจึงได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF GeL/PVA และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบ และในส่วนที่สี่เป็นการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยโทเพเนียมไดออกไซด์โดยกระบวนการดูดซับบนเส้นใยแม่แบบ RF GeL/PVA และ PVA

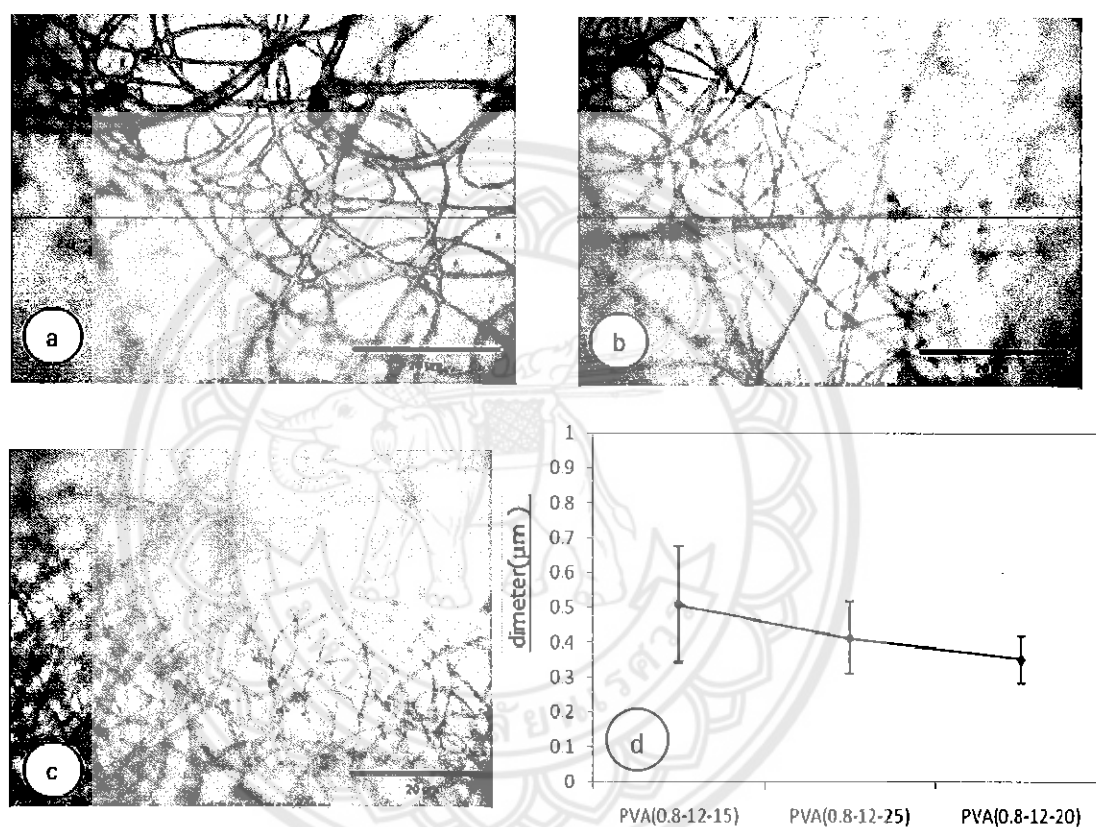
#### 4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 65000) ที่ความเข้มข้นของ PVA 10 %wt (ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบดังกล่าว คือ ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารแม่แบบ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ โดยผลกระทบจากการทดลอง พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการเกิดเส้นใย ขนาดของเส้นใย และลักษณะของเส้นใยแม่แบบ เป็นดังนี้

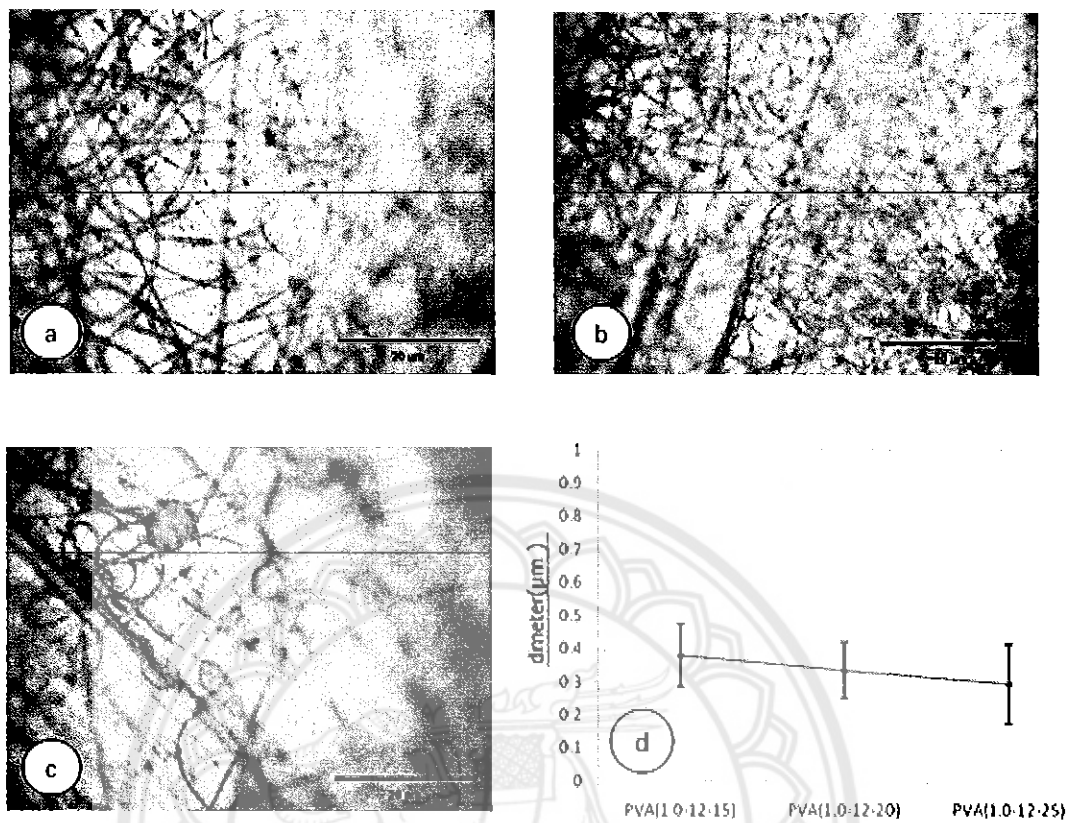
##### 4.1.1 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA

จากการทดลองผลของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบ จากการใช้สารละลาย PVA ที่ความเข้มข้น 10 %wt ผลิตเป็นเส้นใยแม่แบบ โดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 15-25 กิโลโวลต์ จากการศึกษา พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทุกค่าสามารถทำให้เกิดเส้นใยได้แต่เส้นใยที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่แตกต่างกันมาก คือ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.3 ทั้งนี้เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้เป็น ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ 12 เซนติเมตร และอัตราการไหลของสารแม่แบบ 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 508.2 413.2 และ 351.6 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหลของสารแม่แบบ 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 379.6 334.2 และ 293.6 นาโนเมตร ตามลำดับ และอัตราการไหลของสารแม่แบบ 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 357.8 358.8 และ 309.6 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าส่งผลให้ขนาดของเส้นใยแม่แบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [22, 23] เนื่องจากการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับจะทำให้มีแรงทางไฟฟ้าผลักสารแม่แบบออกมาจากปลาย

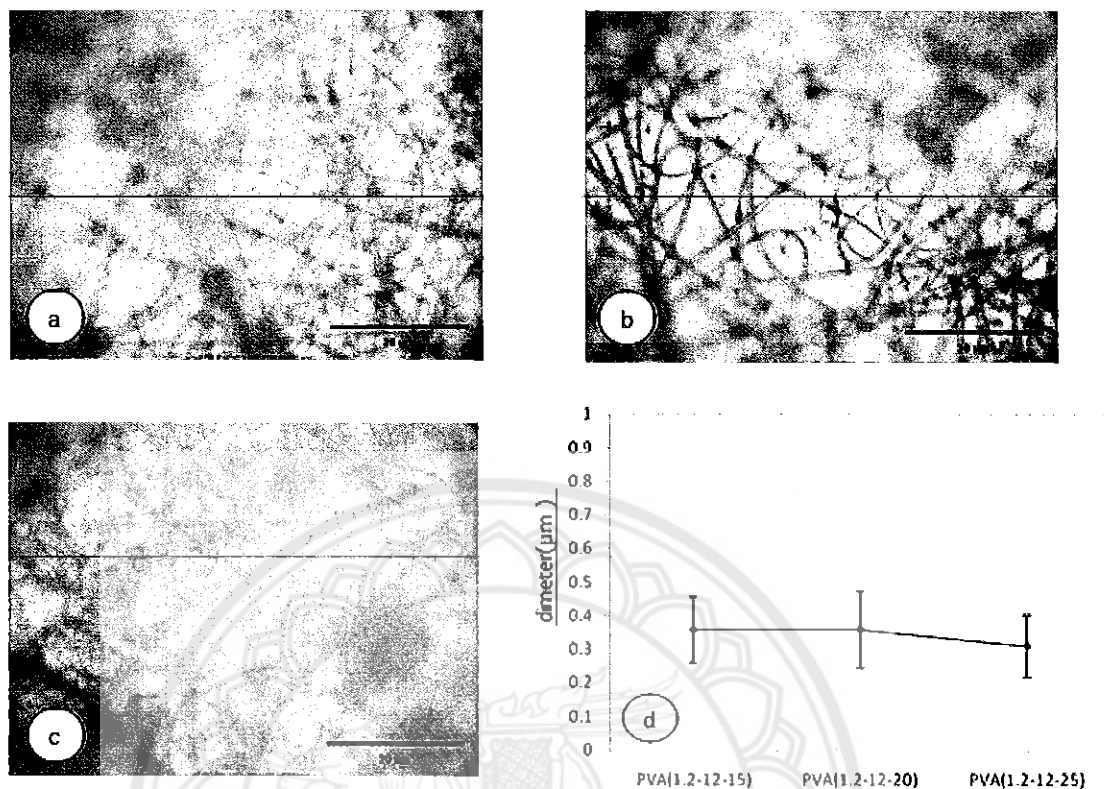
เข็มเพิ่มชั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ มีการยึดของสารแม่แบบมากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยแม่แบบที่ได้มีขนาดเล็กลง ในส่วนการกระจายขนาดของเส้นใยนั้นมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าน้อย (15 กิโลโวลต์) ทำให้มีแรงดึงสารแม่แบบออกมาจากปลายเข็มไม่มากพอเพราะในการดึงสารแม่แบบออกมาเป็นเส้นใยแรงทางไฟฟ้าจะต้องมีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารแม่แบบ [3] ส่งผลให้มีแรงในการยึดสารแม่แบบได้ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ขนาดเส้นใยมีการกระจายขนาดมากกว่าการขึ้นรูปโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่มีมากขึ้น (20 และ 25 กิโลโวลต์ ตามลำดับ)



รูปที่ 4.1 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 12 เซนติเมตร a) ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ b) ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ c) ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ d) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA



รูปที่ 4.2 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 12 เซนติเมตร a) ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ b) ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ c) ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ d) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA

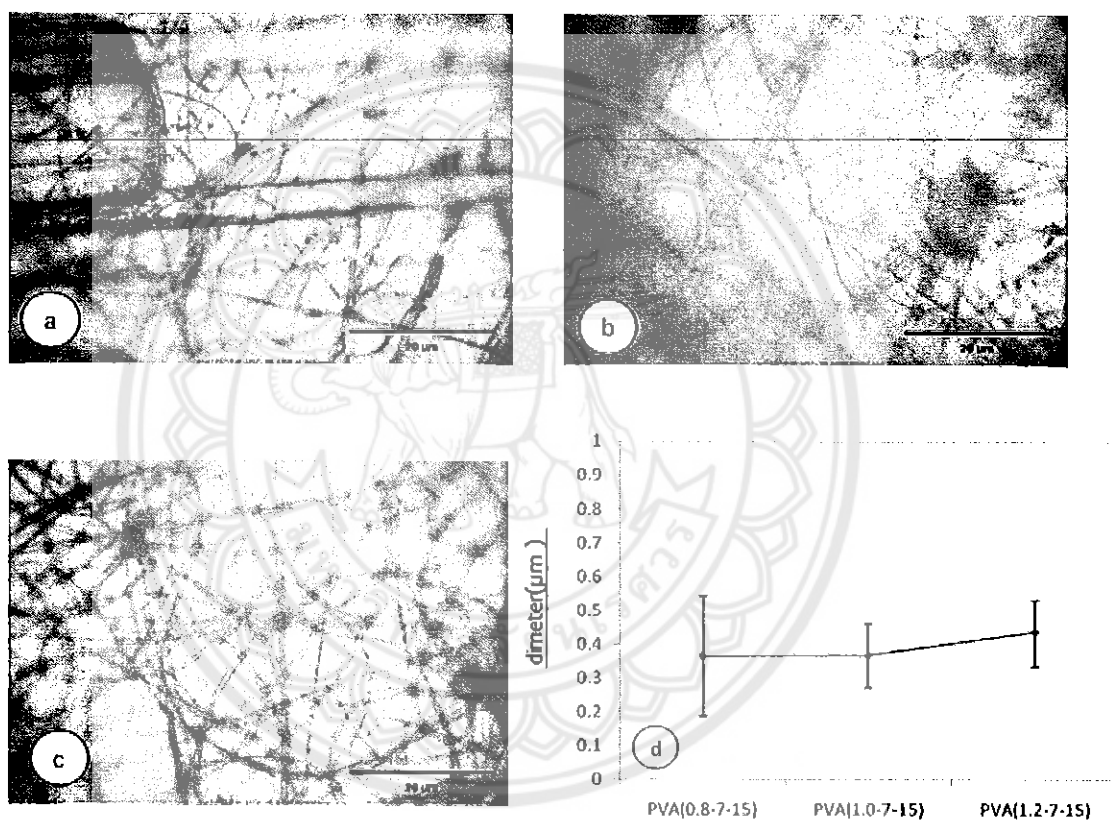


รูปที่ 4.3 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 12 เซนติเมตร a) ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ b) ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ c) ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ d) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA

#### 4.1.2 ผลกระทบของอัตราการไหลต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA

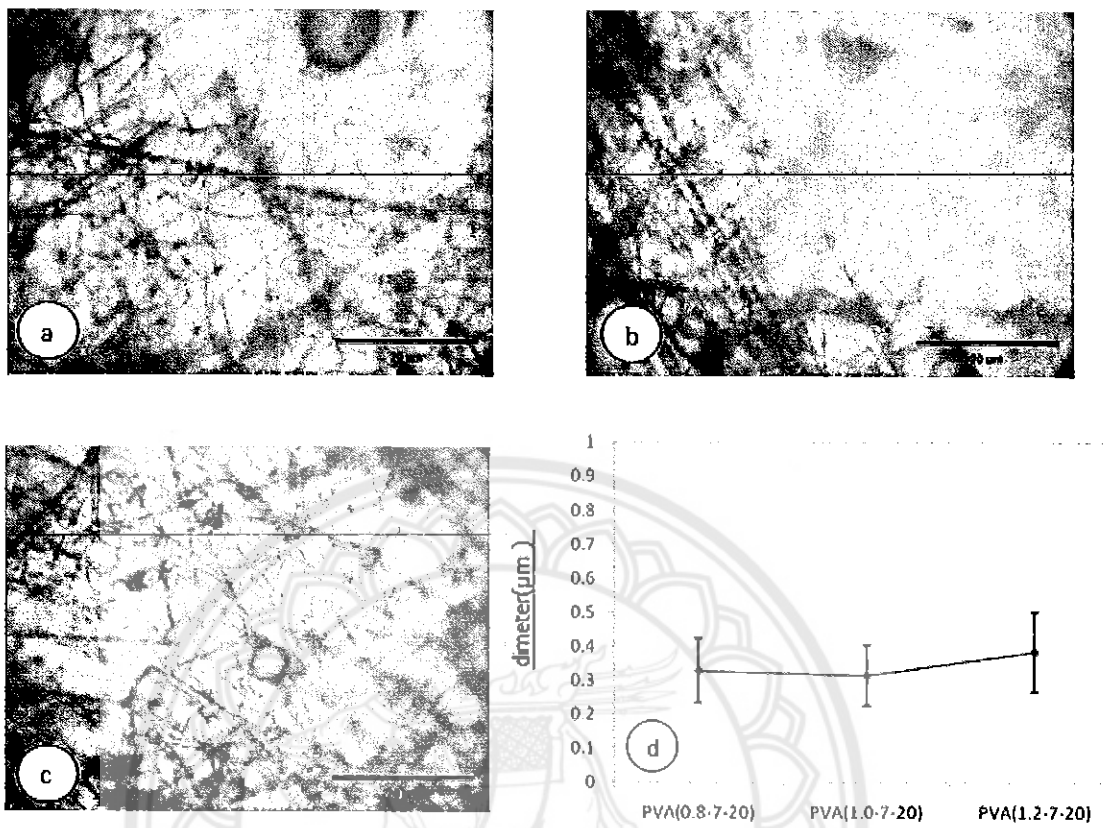
จากการทดลองผลของอัตราการไหลต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA โดยทำการปรับอัตราการไหลของสารแม่แบบที่ 0.8-1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากผลการศึกษา พบว่าในทุกสภาวะสามารถผลิตเป็นเส้นใยได้ โดยเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.4-4.6 และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายแม่แบบเป็น 0.8 1.0 และ 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้ คือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ 7 เซนติเมตร และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 365.2 367.2 และ 437.2 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 328.6 315.2 และ 383.8 นาโนเมตร ตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 335 313 และ 365.2 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองการเพิ่มอัตราการไหลของสารแม่แบบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารแม่แบบส่งผลให้ขนาดของเส้นใยแม่แบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารแม่แบบยังส่งผลให้เกิดเม็ดปิดสบนเส้นใยมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [22, 23] ทั้งนี้เนื่องจากสารแม่แบบที่ออกมา

จากปลายเข็มมีอัตราการไหลมากขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ มีปริมาณสารแม่แบบออกมามากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นและการที่อัตราการไหลของสารแม่แบบมากขึ้นยังทำให้การระเหยของตัวทำละลายในสารละลายแม่แบบมีไม่มากพอจึงทำให้เกิดหยดของสารละลายหรือเกิดเม็ดปืดส์ขึ้น ในส่วนการกระจายขนาดของเส้นใยนั้นมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่ออัตราการไหลของสารแม่แบบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่าอัตราการไหลของสารแม่แบบที่มีค่าน้อยทำให้สารแม่แบบที่ออกมาจากปลายเข็มยังมีปริมาณที่ไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ขนาดเส้นใยมีการกระจายขนาดที่มากกว่าค่าอัตราการไหลที่มากขึ้น

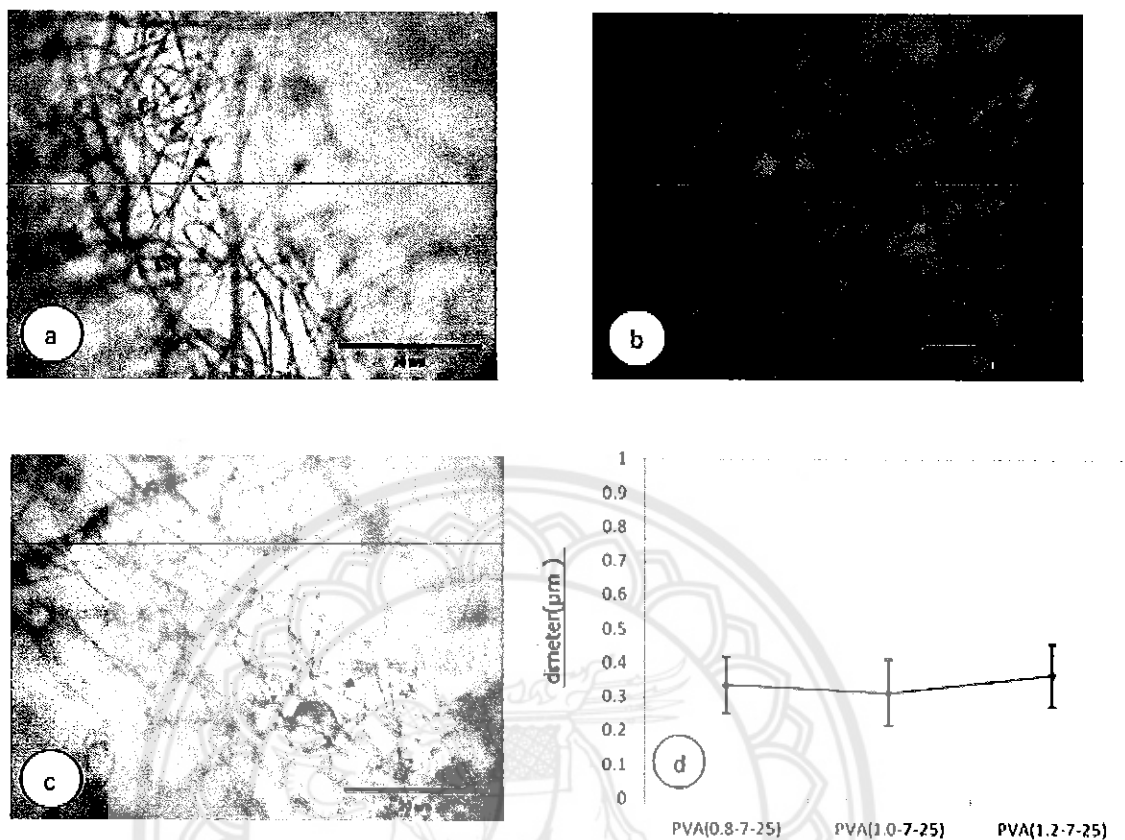


รูปที่ 4.4 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร a) อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง b) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง c) อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง d) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA





รูปที่ 4.5 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร a) อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง b) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง c) อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง d) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA

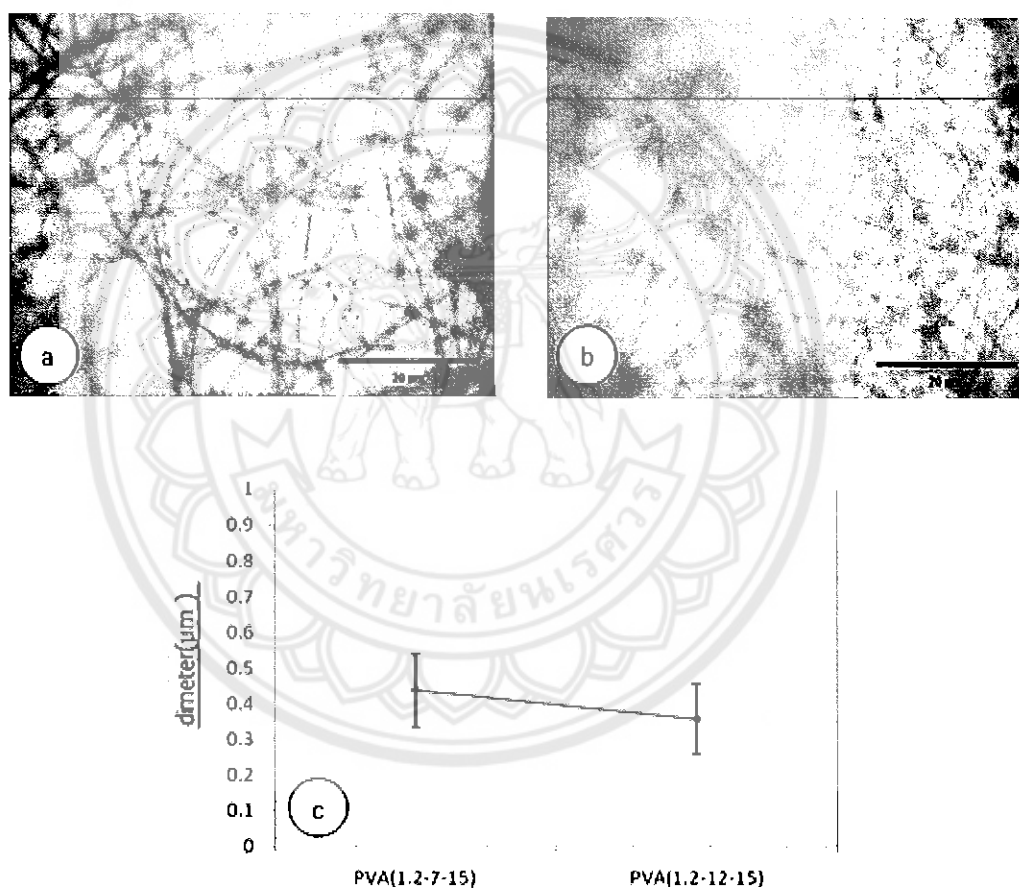


รูปที่ 4.6 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร a) อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง b) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง c) อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง d) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA

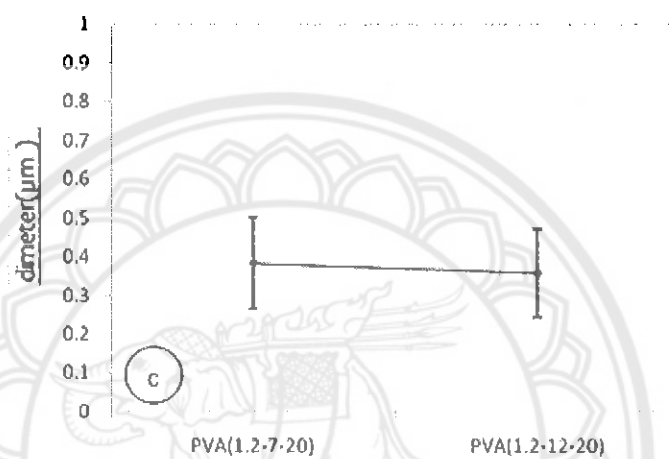
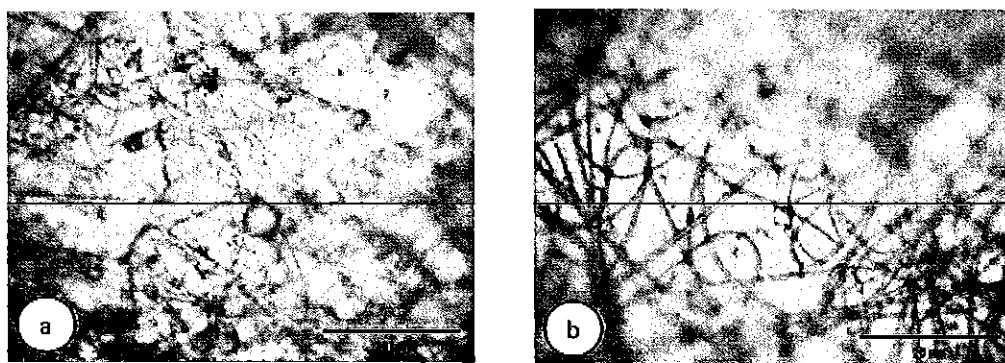
#### 4.1.3 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัววัสดุรองรับต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA

จากการทดลองผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA โดยทำการปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับที่ 7-12 เซนติเมตร จากผลการศึกษา พบว่าในทุกสภาวะสามารถผลิตเป็นเส้นใยได้ โดยเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.7-4.9 และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับเป็น 7 และ 12 เซนติเมตร โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้เป็น อัตราการไหลของสารละลายแม่แบบ 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 437.2 และ 357.8 นาโนเมตร ตามลำดับ สำหรับศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 383.8 และ 358.8 นาโนเมตร ตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้ คือ 365.2 และ 309.6 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับแสดงให้เห็นว่า

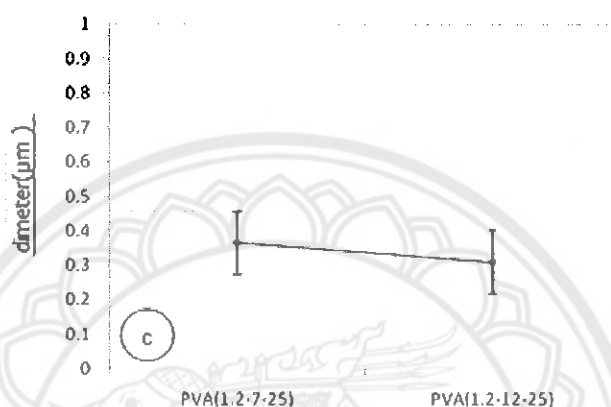
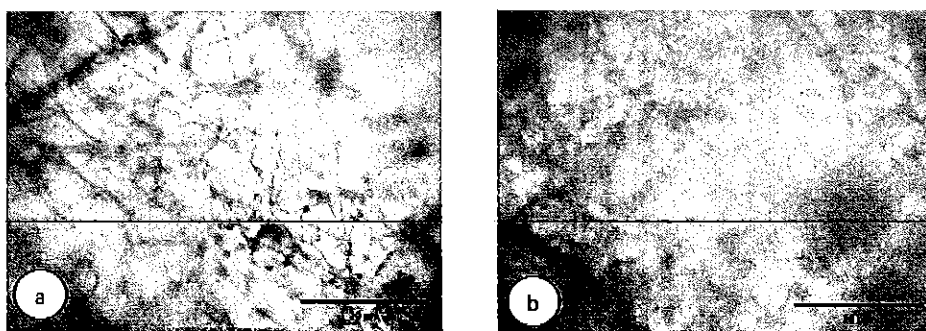
การเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับส่งผลให้ขนาดของเส้นใยแม่แบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับยังส่งผลให้เกิดเม็ดปิดสลับเส้นใยน้อยลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [22] ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ตัวทำละลายในสารแม่แบบสามารถระเหยได้อย่างสมบูรณ์หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ มีเวลาให้ตัวทำละลายในสารแม่แบบสามารถระเหยได้มากขึ้นส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลงและแนวโน้มที่เม็ดปิดสลับลดลง ในส่วนการกระจายขนาดของเส้นใย่นั้นมีแนวโน้มที่ต่างกันไม่มากเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ a) ระยะห่าง 7 เซนติเมตร b) ระยะห่าง 12 เซนติเมตร c) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA



รูปที่ 4.8 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ a) ระยะห่าง 7 เซนติเมตร b) ระยะห่าง 12 เซนติเมตร c) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA

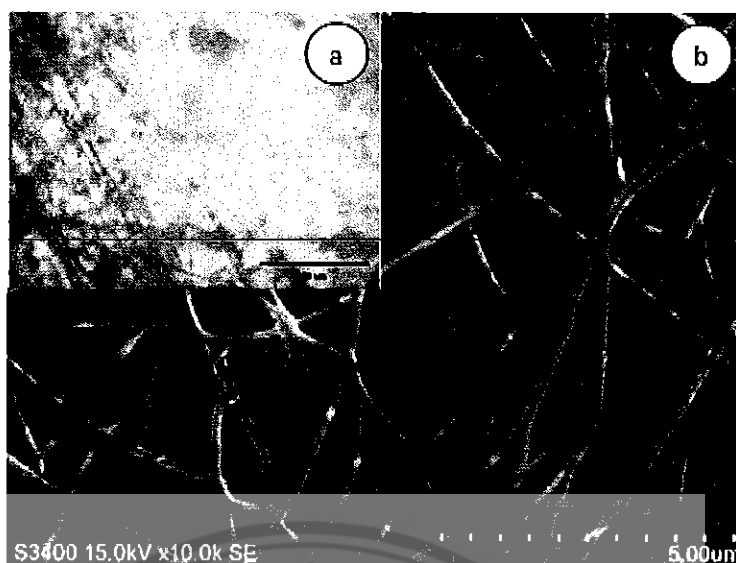


รูปที่ 4.9 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่อัตราการไหล 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ a) ระยะห่าง 7 เซนติเมตร b) ระยะห่าง 12 เซนติเมตร c) แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบ PVA

จากผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดของเส้นใยแม่แบบได้ถูกรวบรวม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าในขอบเขตการทดลองนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดเส้นใยแม่แบบมากที่สุด คือ ศักย์ไฟฟ้าและอัตราการไหลของสารแม่แบบ ส่วนระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับแทบจะไม่ผลต่อขนาดเส้นใย จากปัจจัยดังกล่าวได้ทำการเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจาก PVA โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต คือ ที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของสารละลาย PVA ที่ 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับเท่ากับ 7 เซนติเมตร ซึ่งจะทำให้ได้เส้นใยยาวต่อเนื่อง ดังรูปที่ 4.10 โดยได้ศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าขนาดที่ได้ คือ 112.8 นาโนเมตร และมีขนาด 315.2 นาโนเมตร ที่ได้จากการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (Microscope) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบเส้นใยแม่แบบจากสภาวะเดียวกันโดยการศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา พบว่าได้ขนาดเส้นใยที่ต่างกันมาก เนื่องจากความแม่นยำของเครื่องมือซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะให้ความแม่นยำมากกว่า

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่สภาวะต่างๆ

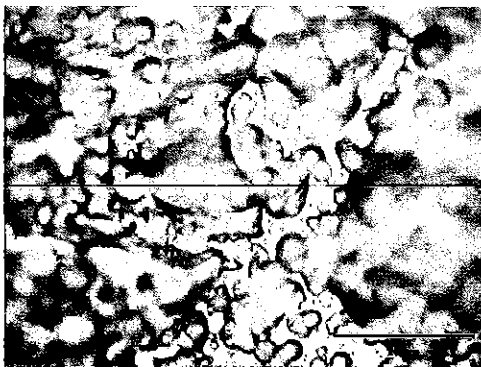
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	ระยะห่างของปลายเข็ม (เซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (นาโนเมตร)
0.8	7	15	365.2
		20	328.6
		25	335.0
	12	15	508.2
		20	351.6
		25	413.2
1.0	7	15	367.2
		20	315.2
		25	313.0
	12	15	379.6
		20	334.2
		25	293.6
1.2	7	15	437.2
		20	383.8
		25	365.2
	12	15	357.8
		20	358.8
		25	309.6



รูปที่ 4.10 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตร และระยะห่าง 7 เซนติเมตร โดยศึกษาจาก a) SEM และ b) Microscope

#### 4.2 การขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel

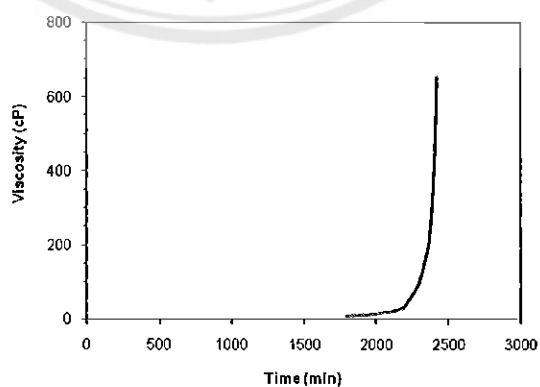
จากการทดลองการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel (RF Gel มีอัตราส่วนโดยโมล คือ R/F เท่ากับ 0.5 R/W เท่ากับ 0.15 และ C/W เท่ากับ 10 โมลต่อลูกบาศก์เมตร) โดยทำการบ่ม RF Gel ไว้ที่เวลา 0 5 10 15 20 25 และ 30 ชั่วโมง และขึ้นรูปโดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้า (15-22 กิโลโวลต์) อัตราการไหลของสารแม่แบบ (0.8-1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง) และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ (7 เซนติเมตร) พบว่าในทุกสภาวะสามารถขึ้นรูปได้แต่มีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.11 อาจเนื่องมาจากการฟอร์มตัวของโครงข่าย RF Gel มีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง [17] เช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนระหว่างเรซอซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อเรซอซินอล เป็นต้น ซึ่งในโครงสร้างนี้ไม่ได้กล่าวถึงปัจจัยดังกล่าว อย่างไรก็ตามได้ศึกษาถึงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเรซอซินอล ฟอร์มัลดีไฮด์ พอลิคอนเดนเซชันในช่วง 0-30 ชั่วโมง ซึ่งจากการสังเกตจากลักษณะของเจล พบว่าเจลจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งผลการวิเคราะห์ความหนืดของ RF Gel กับเวลาในการเกิดโครงข่ายเจล คือ ประมาณ 2,195 นาที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ที่ได้มีงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานไว้ [25] และพบว่าเมื่อเจลมีความหนืดเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 30 หลังจากนั้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งแตกต่างจากพอลิเมอร์โดยทั่วไป โดยพอลิเมอร์ทั่วไปเมื่อละลายในตัวทำละลายค่าความหนืดต่อเวลาจะเปลี่ยนแปลงช้ากว่า RF Gel มาก ส่งผลให้ RF Gel ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้โดยในช่วง 0-20 ชั่วโมง ความหนืดน้อยมากจึงทำให้เกิดการหยุดและที่เวลา 25-30 ชั่วโมง ความหนืดก็เพิ่มขึ้นรวดเร็วเกินไปและยังไม่เหมาะสมกับการเกิดเส้นใยด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.11 ลักษณะที่ไม่เป็นเส้นใยจากการบ่ม RF Gel 30 ชั่วโมง ที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตร



รูปที่ 4.12 ลักษณะสารละลาย RF Gel เมื่อบ่ม 30 ชั่วโมง



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความหนืดของ RF Gel [25]

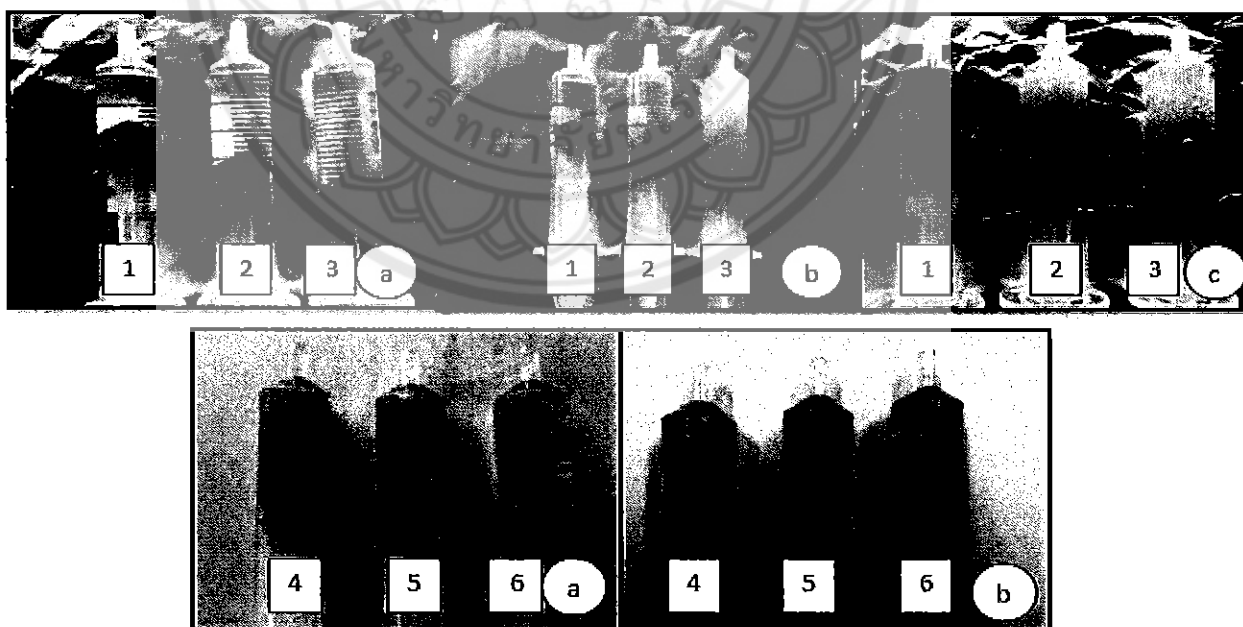


### 4.3 การขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA

จากการศึกษาการทดลองการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel ในทุกสภาวะการขึ้นรูป และทุกสภาวะการเตรียมนั้นไม่สามารถเป็นเส้นใยได้ จึงได้ทำการทดลองโดยนำ RF Gel มาผสมกับ PVA เพื่อให้ PVA ช่วยในการขึ้นรูปเส้นใย โดยวิธีการนำ RF Gel มาผสมนั้นมี 2 แบบ คือ ได้ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่บ่ม RF Gel ในช่วงเวลาที่ต่างกันก่อนนำมาผสมกับ PVA 10%wt ในอัตราส่วนต่างๆ และอีกวิธีหนึ่ง คือ นำ RF Gel มาผสมกับ PVA ในอัตราส่วนต่างๆ แล้วบ่มทิ้งไว้ในช่วงเวลาที่ต่างกัน โดยผลการทดลองเป็นดังนี้

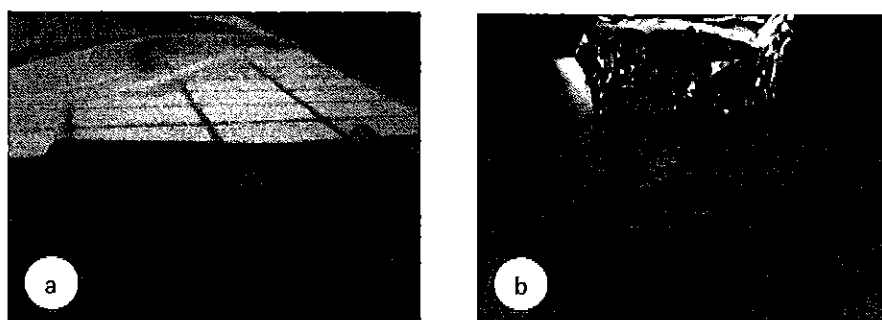
#### 4.3.1 ผลกระทบของการบ่ม RF Gel ต่อการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA

จากการทดลองหาสภาวะในการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA โดยทำการบ่ม RF Gel ก่อนนำมาผสมกับ PVA โดยบ่ม RF Gel ในระยะเวลา 0 5 10 และ 15 ชั่วโมง พบว่าสามารถขึ้นรูปได้บางสภาวะ โดย RF Gel ที่บ่มในระยะเวลา 0 5 และ 10 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อย่างไรก็ตามจากรูปดังกล่าวจะพบว่าที่อัตราส่วน RF Ge/PVA เท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:1.5 ไม่พบผลที่เป็นเส้นใย ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของ PVA น้อยเกินไป นอกจากนั้นเมื่อนำ RF Gel ที่ทำการบ่มมากกว่า 10 ชั่วโมง มาผสมกับ PVA พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากเมื่อบ่ม RF Gel นานจะทำให้ตอนที่นำ PVA มาผสม จะเกิดการแยกชั้นเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



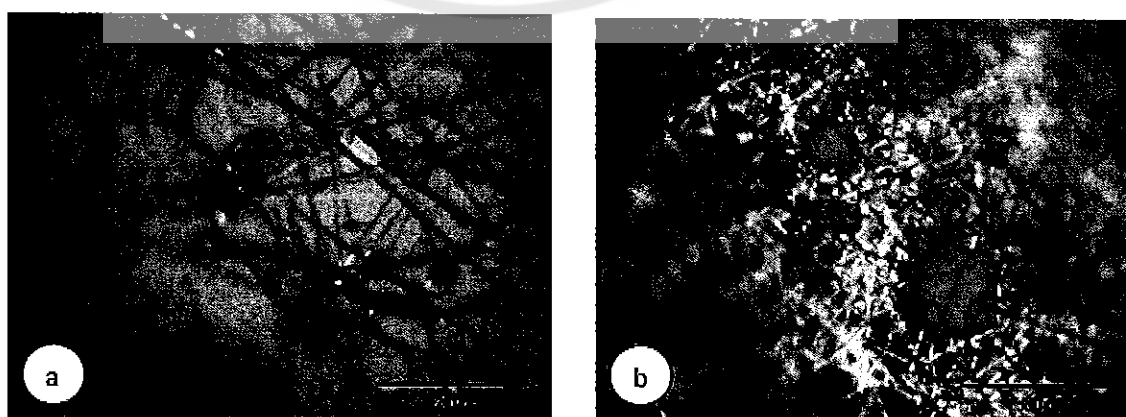
รูปที่ 4.14 สารละลาย RF Ge/PVA ที่ทำการบ่ม RF Gel a) บ่ม 0 ชั่วโมง b) บ่ม 5 ชั่วโมง c) บ่ม 10 ชั่วโมง

หมายเหตุ: 1 = อัตราส่วน 1:0.5 2 = อัตราส่วน 1:1 3 = อัตราส่วน 1:1.5  
4 = อัตราส่วน 1:3 5 = อัตราส่วน 1:6 6 = อัตราส่วน 1:9

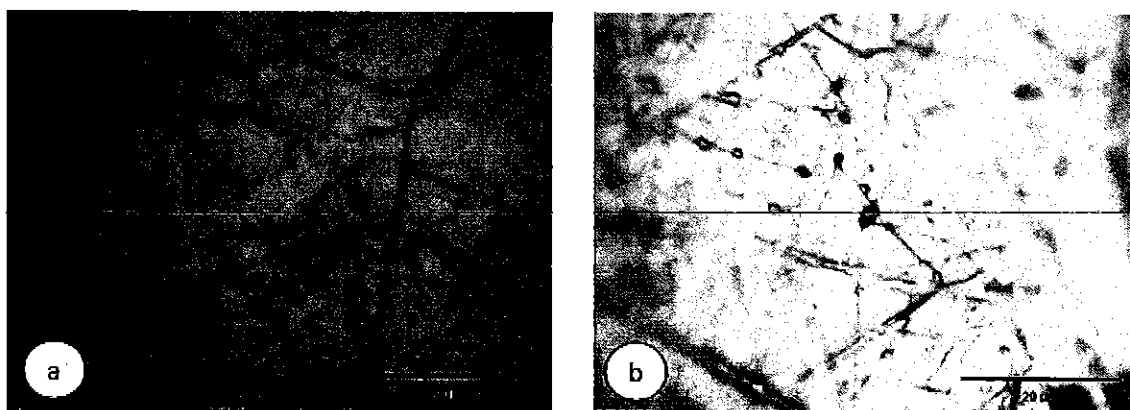


รูปที่ 4.15 แสดงการแยกชั้นสารละลาย RF Ge/PVA a) บ่ม RF Gel 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5  
b) บ่ม RF Gel 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1

เนื่องจากการศึกษาหาระยะเวลาในการบ่ม RF Gel ที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA ในอัตราส่วน RF Ge/PVA เท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:1.5 นั้นไม่สามารถได้ผลเป็นเส้นใย จึงทำการเพิ่มอัตราส่วน RF Ge/PVA เป็น 1:3 1:6 และ 1:9 เพื่อศึกษาถึงระยะเวลาในการบ่ม RF Gel ต่อลักษณะเส้นใยแม่แบบ พบว่าในสภาวะที่ไม่มีการบ่ม RF Gel สามารถขึ้นรูปได้ทุกอัตราส่วนสำหรับอัตราส่วนที่ 1:6 และ 1:9 สามารถขึ้นรูปแล้วมีลักษณะเป็นเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยมีขนาดเส้นใยเท่ากับ 406.2 และ 267.2 นาโนเมตร ตามลำดับ และผลของการบ่ม RF Gel 5 ชั่วโมงต่อเส้นใย RF Ge/PVA ลักษณะเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยพบว่าสภาวะที่บ่ม RF Gel 5 ชั่วโมง ในอัตราส่วน RF Ge/PVA เท่ากับ 1:6 นั้นมีลักษณะความเป็นเส้นใยลดลง ในขณะที่อัตราส่วน 1:9 ยังคงเป็นเส้นใยแต่พบเม็ดปิดสั่มากขึ้น โดยเส้นใยที่ได้มีขนาด 364.2 นาโนเมตร ดังนั้นเมื่อบ่ม RF Gel ก่อนผสมกับ PVA พบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นขนาดเส้นใยที่ได้จะใหญ่ขึ้นและมีเม็ดปิดสับนเส้นใยมากขึ้น



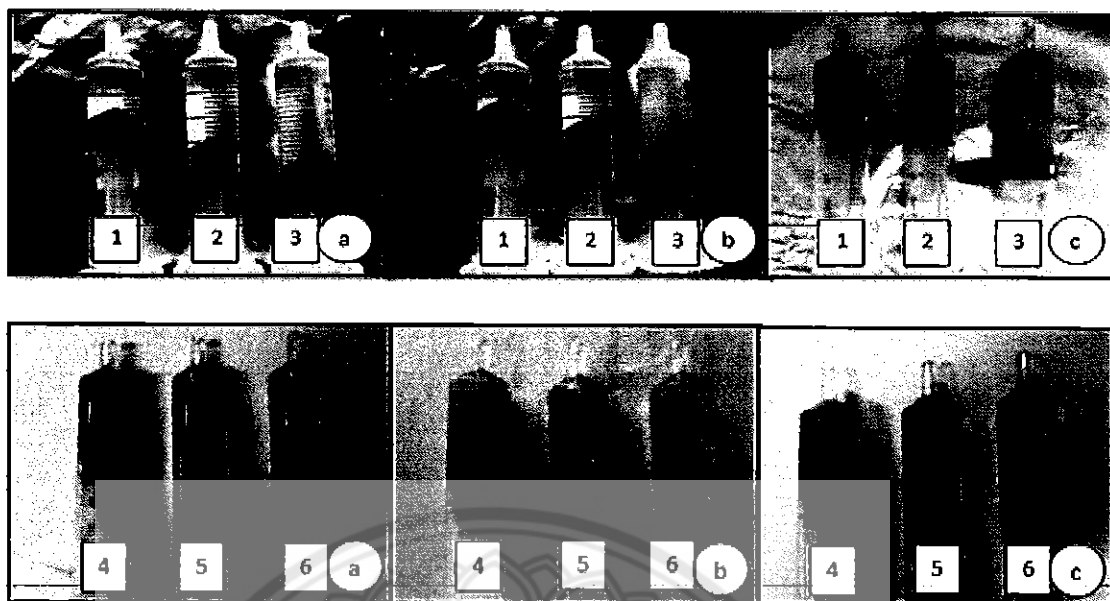
รูปที่ 4.16 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่ไม่มีการบ่ม a) ที่อัตราส่วน 1:6  
b) ที่อัตราส่วน 1:9



รูปที่ 4.17 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่บ่ม RF Gel 5 ชั่วโมง  
a) ที่อัตราส่วน 1:6 b) ที่อัตราส่วน 1:9

#### 4.3.2 ผลกระทบของการบ่ม RF Ge/PVA ต่อการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA

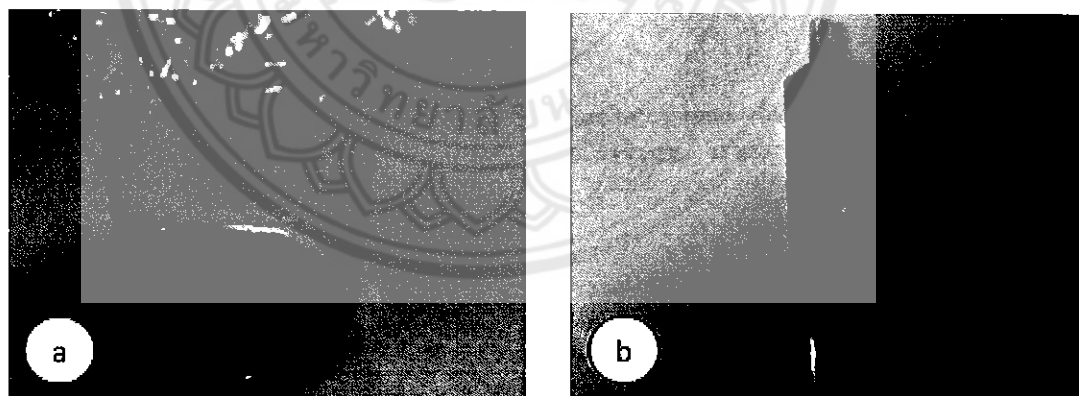
จากการทดลองหาสภาวะในการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA โดยทำการบ่ม RF Ge/PVA ในระยะเวลา 0 5 10 และ 15 ชั่วโมง พบว่าสามารถขึ้นรูปได้บางสภาวะ โดย RF Ge/PVA ที่บ่มในระยะเวลา 0 5 10 และ 10 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.18 อย่างไรก็ตามจากรูปดังกล่าว พบว่าที่อัตราส่วน RF Ge/PVA เท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:1.5 ไม่พบผลที่เป็นเส้นใย ทั้งนี้เนื่องมาจากความเข้มข้นของ PVA น้อยเกินไป นอกจากนี้เมื่อนำ RF Ge/PVA ที่บ่มมากกว่า 15 ชั่วโมง มาขึ้นรูปพบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากการบ่ม RF Ge/PVA นานเกินไปจะทำให้เกิดการแยกชั้นเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 สารละลาย RF Ge/PVA ที่บ่ม RF Gel พร้อมกับ PVA a) บ่ม 0 ชั่วโมง b) บ่ม 5 ชั่วโมง c) บ่ม 10 ชั่วโมง

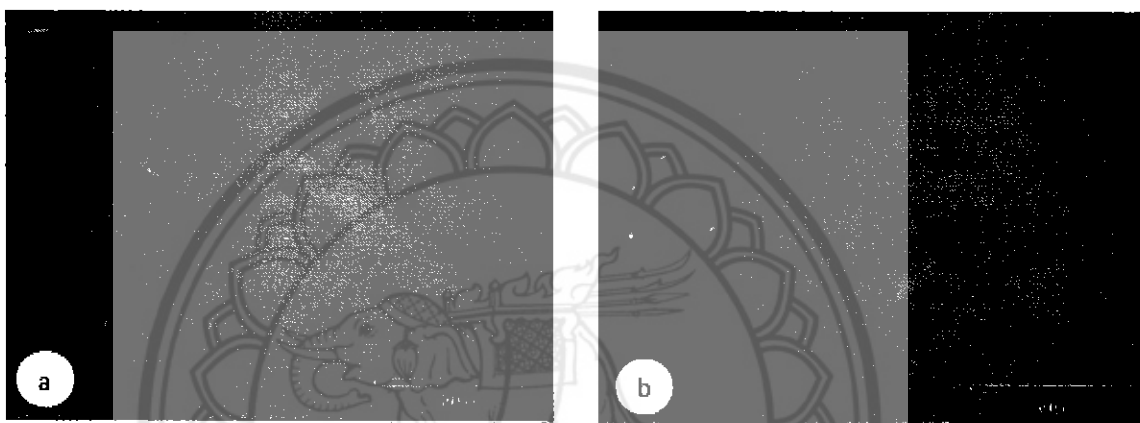
หมายเหตุ: 1 = อัตราส่วน 1:0.5 2 = อัตราส่วน 1:1 3 = อัตราส่วน 1:1.5

4 = อัตราส่วน 1:3 5 = อัตราส่วน 1:6 6 = อัตราส่วน 1:9



รูปที่ 4.19 แสดงการแยกชั้นสารละลาย RF Ge/PVA บ่ม RF Gel พร้อม PVA 15 ชั่วโมง a) อัตราส่วน 1:1.5 b) อัตราส่วน 1:3

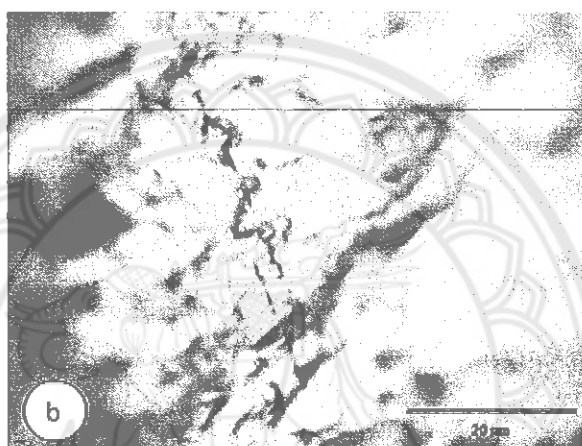
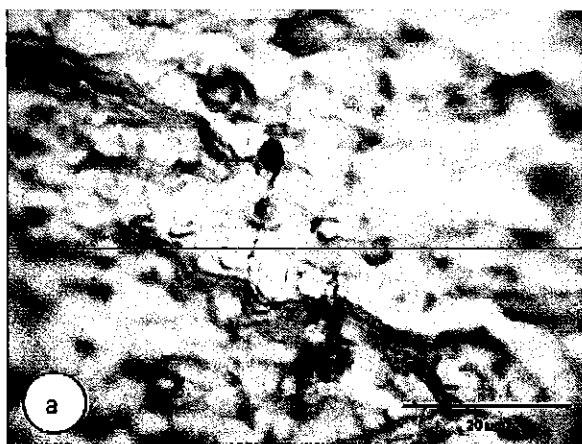
เนื่องจากการศึกษาหาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม RF Ge/PVA ที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA พบว่าในสถานะที่ไม่มีการบ่ม RF Ge/PVA สำหรับอัตราส่วนที่ 1:6 และ 1:9 สามารถขึ้นรูปแล้วมีลักษณะเป็นเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และเมื่อบ่ม RF Gel พร้อมกับ PVA เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ในอัตราส่วน RF Ge/PVA เท่ากับ 1:6 และ 1:9 พบว่าลักษณะเส้นใยที่ได้มีขนาด 362.4 และ 264 นาโนเมตร ตามลำดับ และนอกจากนั้นยังพบเม็ดปิดสับบนเส้นใยอีกด้วย ดังนั้นผลกระทบของการบ่ม RF Ge/PVA คือ เมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นยังคงสามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ และเส้นใยจะมีขนาดเล็กลงและยังพบเม็ดปิดสับบนเส้นใยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20



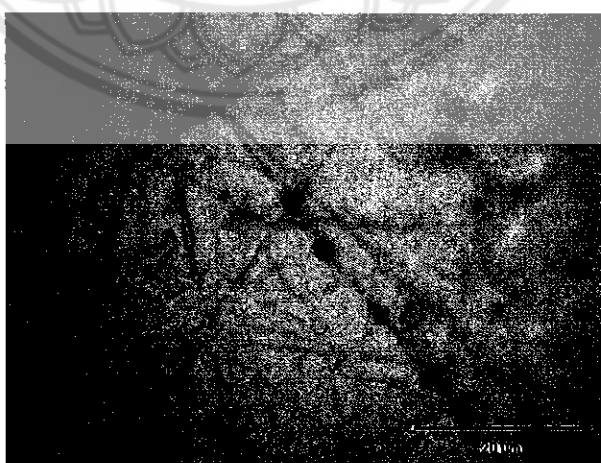
รูปที่ 4.20 ลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่บ่ม RF Ge/PVA 5 ชั่วโมง  
a) ที่อัตราส่วน 1:6 b) ที่อัตราส่วน 1:9

#### 4.3.3 ผลกระทบของอัตราส่วน RF Ge/PVA ต่อการขึ้นรูปเส้นใย RF Gel

จากการทดลองหาผลกระทบของอัตราส่วนของ RF Ge/PVA ส่งผลต่อการขึ้นรูปเส้นใย RF Ge/PVA โดยได้ทำการทดลองศึกษาที่ในอัตราส่วน RF Ge/PVA เท่ากับ 1:0.5 1:1 และ 1:1.5 พบว่าในทุกอัตราส่วนดังกล่าวสามารถขึ้นรูปได้ทุกอัตราส่วน แต่มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จึงได้ทำการเพิ่มอัตราส่วน 1:3 1:6 และ 1:9 เพื่อศึกษาผลกระทบดังกล่าว พบว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อยและเกิดเม็ดปิดสับโดยเส้นใยที่ได้มีขนาด 452 นาโนเมตร และที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:6 และ 1:9 มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องและเกิดเม็ดปิดสับ โดยขนาดเส้นใยที่ได้ คือ 406.2 และ 267.2 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.16 ตามลำดับ

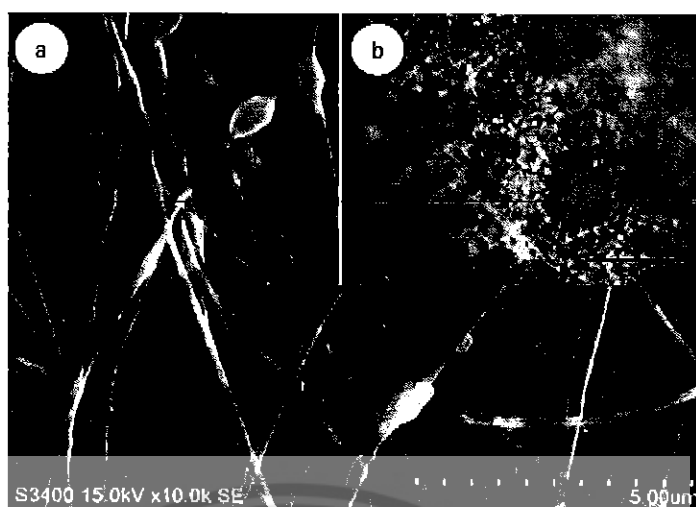


รูปที่ 4.21 ลักษณะที่ไม่เป็นเส้นใยของ RF Ge/PVA a) อัตราส่วน 1:0.5 b) อัตราส่วน 1:1.5

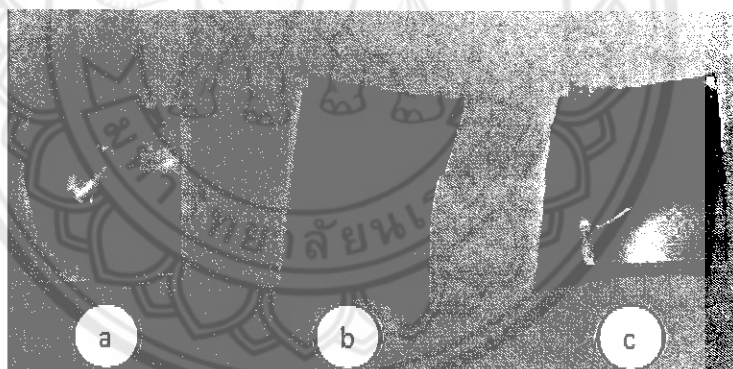


รูปที่ 4.22 ลักษณะที่เป็นเส้นใยของ RF Ge/PVA ที่อัตราส่วน 1:3

จากการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการบ่ม RF Gel ผลกระทบของการบ่ม RF Gel/PVA ผลกระทบของอัตราส่วนของ RF Gel/PVA ต่อขนาด และลักษณะของเส้นใยแม่แบบ RF Gel/PVA พบว่าที่สภาวะที่ไม่การบ่ม RF Gel และ RF Gel/PVA ที่อัตราส่วน RF Gel/PVA เท่ากับ 1:9 เหมาะสมที่สุดในการนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่แบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของสารละลาย RF Gel/PVA ที่ 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับเท่ากับ 7 เซนติเมตร ทำให้ได้เส้นใยยาวต่อเนื่องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้วิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งมีค่าประมาณ 110.6 นาโนเมตร และเกิดเม็ดบีดส์เล็กน้อย อย่างไรก็ตามคุณสมบัติที่ต้องการของเส้นใยแม่แบบ คือ ต้องการให้ได้เส้นใยที่มีความพรุนสูงจึงได้ทำการบ่ม RF Gel/PVA ที่อัตราส่วน 1:9 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อยืดระยะเวลาในการเกิดโครงข่ายของ RF gel ในสารละลายแม่แบบหลังจากนั้นนำมาทำแห้งแบบระเหิดแห้ง พบว่าชิ้นงานที่เกิดจากสารละลายแม่แบบดังกล่าวเกิดการแยกชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อบ่ม RF Gel/PVA ที่ 10 ชั่วโมง จะเกิดฟิล์มสีใสและสีขุ่นในชิ้นงานเดียวกัน หลังจากนั้นได้นำมาวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนหรือวิเคราะห์ด้วย TGA โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง PVA RF Gel/PVA 0 ชั่วโมง และ RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 จากกราฟพบว่าการวิเคราะห์โดย TGA มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งผลจากการทดสอบ พบว่าเมื่อน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารละลาย PVA ลดลง ทำให้น้ำหนักและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจากน้ำหนักร้อยละ 90.717 ลดลงเป็นร้อยละ 37.172 และจากที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นเป็น 287 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักหรือที่อุณหภูมิต่ำอาจเกิดจากการระเหยของน้ำหรือตัวทำละลายและที่อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ พบว่าเกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ และเมื่อพิจารณาสารละลาย RF Gel/PVA จะเห็นได้ว่าที่สารละลาย RF Gel/PVA 0 ชั่วโมง และ RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง (ขุ่น) จะเกิดการเสียน้ำหนักและอุณหภูมิใกล้เคียงกันในช่วงร้อยละ 37.267 และ 437.821 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง (ใส) เนื่องจาก RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง (ใส) มีความแข็งแรงกว่าและเกิดการแยกตัวของสารละลายระหว่าง RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง (ขุ่น) และ RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง (ใส) จึงทำให้สารละลาย RF Gel/PVA 10 ชั่วโมง (ขุ่น) มีน้ำหนักที่ต่ำและอุณหภูมิที่สูงซึ่งเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ใกล้เคียงกับ RF Gel/PVA 0 ชั่วโมง ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเลือกสารละลายแม่แบบที่ RF Gel/PVA อัตราส่วน 1:9 และไม่บ่มสารละลายแม่แบบ

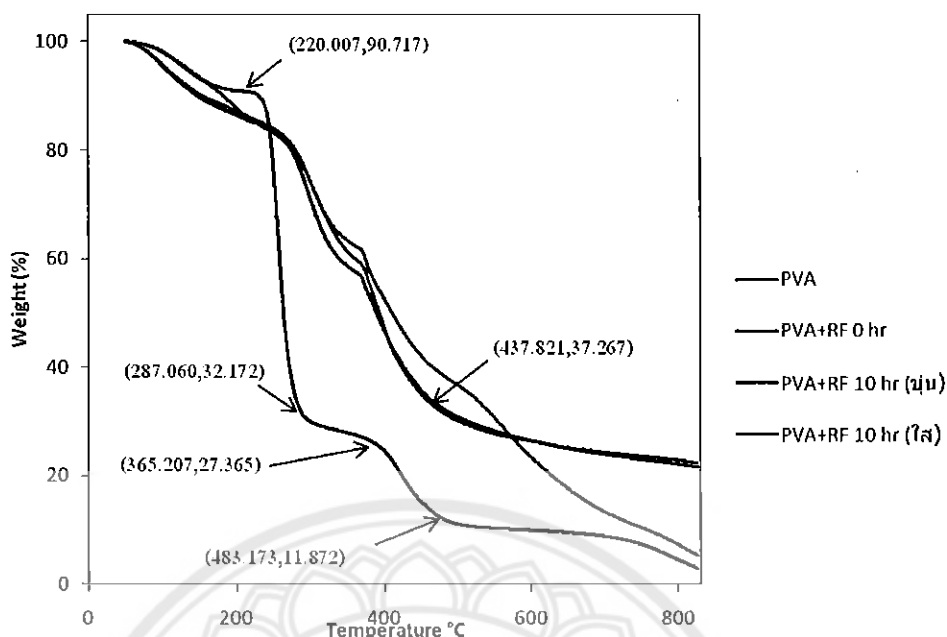


รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Ge/PVA ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่าง 7 เซนติเมตร โดยศึกษาจาก a) SEM และ b) Microscope



รูปที่ 4.24 ความเข้ากันของสารละลายแม่แบบ a) PVA b) RF Ge/PVA ที่บ่ม 0 ชั่วโมง c) RF Ge/PVA ที่บ่ม 10 ชั่วโมง





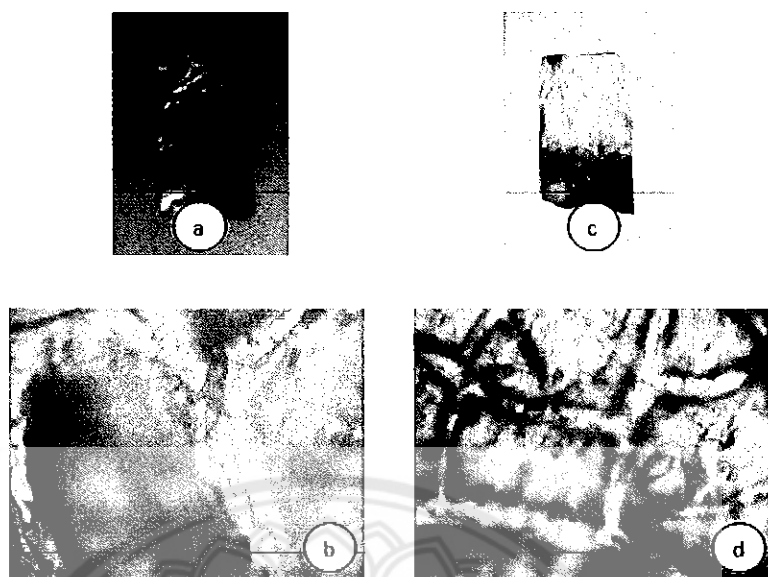
รูปที่ 4.25 ความเสถียรภาพทางความร้อนของสารละลายแม่แบบ

#### 4.4 การขึ้นรูปเส้นใยไทเทเนียมไดออกไซด์บนเส้นใยแม่แบบ

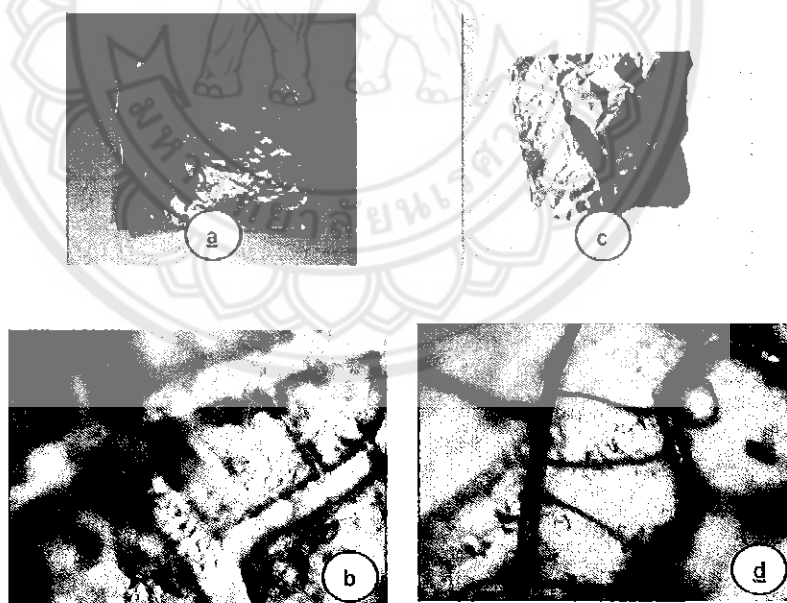
จากการทดลองการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบในสถานะที่ได้เลือกมา คือ อัตราส่วนของ RF Gel/PVA เท่ากับ 1:9 และไม่มีการบ่มสารละลายแม่แบบดังกล่าว หลังจากนั้นเส้นใยแม่แบบที่ได้นำไปขึ้นรูปเส้นใย  $\text{TiO}_2$  ซึ่งในการขึ้นรูปเส้นใย  $\text{TiO}_2$  บนเส้นใยแม่แบบจะมีขั้นตอนการดำเนินงาน 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก คือ การนำเส้นใยแม่แบบไปบ่มในสารละลาย TTIP ในช่วงเวลาที่กำหนด แล้วทำให้แห้งในอากาศ ขั้นตอนที่สอง คือ การทำแห้งเส้นใย ซึ่งในการทำแห้งเส้นใยจะมีสองวิธี คือ การทำแห้งแบบอบลมร้อนและการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง

##### 4.4.1 ผลกระทบของระยะเวลาในการขึ้นรูปบ่มเส้นใยแม่แบบในสารละลาย TTIP ต่อการขึ้นรูปเส้นใย $\text{TiO}_2$

จากการทดลองการบ่มเส้นใยแม่แบบในสารละลาย TTIP ที่เวลาต่างกัน คือ 15 และ 30 ชั่วโมง พบว่ายังมีลักษณะเป็นเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการเกาะตัวของสารละลาย TTIP ปกคลุมเส้นใย ซึ่งพบทั้งในการทำแห้งทั้งสองแบบ อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านการบ่มแม่แบบในสารละลาย TTIP และทำให้แห้งแล้วผลที่ได้ยังคงมีลักษณะเป็นเส้นใยในทั้งสองเวลาของการบ่ม แต่เนื่องจากเครื่องที่ใช้ทำการวิเคราะห์มีขีดจำกัดจึงไม่สามารถระบุขนาดเส้นใยได้



รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะชิ้นงานหลังจากบ่ม TTIP 15 ชั่วโมง a), b) การทำแห้งแบบอบลมร้อน c), d) การแห้งแบบระเหิดแห้ง



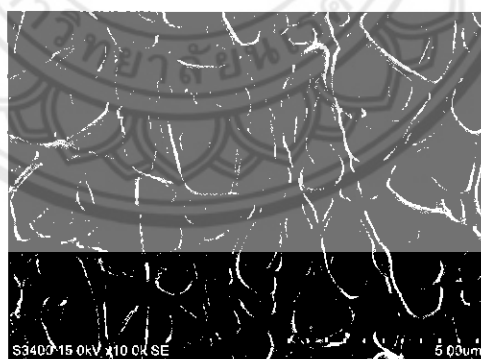
รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะชิ้นงานหลังจากบ่ม TTIP 30 ชั่วโมง a), b) การทำแห้งแบบอบลมร้อน c), d) การแห้งแบบระเหิดแห้ง

#### 4.4.2 ผลกระทบของวิธีการทำแห้งเส้นใยแม่แบบต่อการขึ้นรูปเส้นใย $\text{TiO}_2$

จากการทดลองการทำแห้งเส้นใยแม่แบบ 2 วิธี คือ การทำแห้งแบบอบลมร้อนและการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง พบว่าการทำแห้งของเส้นใยแม่แบบด้วยวิธีการทำแห้งแบบอบลมร้อนทำให้ลักษณะเส้นใยที่ได้เกิดการแตกหักและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 168.6 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.28 และการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบระเหิดแห้งทำให้เส้นใยแม่แบบที่ได้ยังคงเป็นเส้นใยอยู่ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 154 นาโนเมตร และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของเส้นใยแม่แบบที่ไม่ผ่านการเคลือบด้วย TTIP กับขนาดของเส้นใยแม่แบบที่เคลือบด้วย TTIP จะเห็นว่าเส้นใยมีขนาดใหญ่มิฉะนั้นนั้นอาจจะแสดงถึงการเกาะของ TTIP บนเส้นใยแม่แบบนี้เอง แสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 ลักษณะเส้นใย  $\text{TiO}_2$  ที่ได้จากการทำแห้งแบบอบลมร้อน

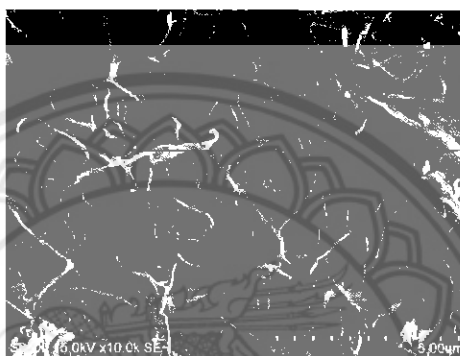


รูปที่ 4.29 ลักษณะเส้นใย  $\text{TiO}_2$  ที่ได้จากการทำแห้งแบบระเหิดแห้ง

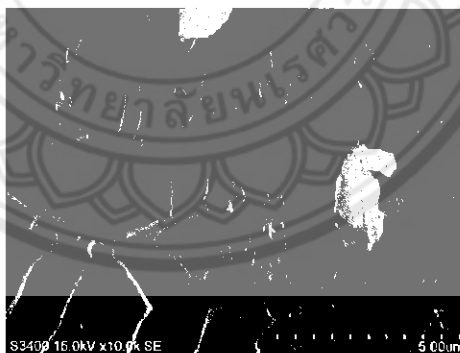
จากการทดลอง พบว่าการทำแห้งเส้นใยแม่แบบด้วยวิธีการทำแห้งแบบระเหิดแห้งดีกว่าการทำแห้งเส้นใยแม่แบบด้วยวิธีการทำแห้งแบบอบลมร้อน เพราะว่าเส้นใยที่ได้จากการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งแบบระเหิดแห้งจะยังคงรักษาสภาพความเป็นเส้นใยซึ่งมีการแตกหักน้อยกว่าการทำแห้งแบบอบลมร้อน เนื่องจากวิธีการทำแห้งแบบระเหิดแห้งนี้เป็นวิธีที่ระเหยตัวทำลายจากสถานะของแข็งไปเป็นแก๊สภายใต้อุณหภูมิต่ำ ส่วนการทำแห้งแบบอบลมร้อนเป็นการระเหยตัวทำลาย

โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งการระเหยเกิดจากสถานะของเหลวไปเป็นของแข็งจึงทำให้เกิดแรงคาปิลารีซึ่งแรงคาปิลารีนี้จะไปทำลายโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงของรูพรุน [26]

การศึกษาขั้นตอนนี้เป็นการสังเคราะห์เส้นใยกลางของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยการนำเส้นใยแม่แบบไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ามีลักษณะของเส้นใยหลงเหลืออยู่เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแม่แบบ PVA ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และการเผาเส้นใยแม่แบบ RF Ge/PVA ดังแสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งพบเส้นใยน้อยมากและเส้นใยที่พบนั้นเป็นเส้นใยที่ขาด



รูปที่ 4.30 ลักษณะเส้นใยแม่แบบ PVA ที่ผ่านการเผา



รูปที่ 4.31 ลักษณะเส้นใยแม่แบบ RF ge/PVA ที่ผ่านการเผา

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาครั้งนี้สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยการควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารแม่แบบ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ ซึ่งโดยพบว่าการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าและการเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดลดลง สำหรับการเพิ่มอัตราการไหลของสารแม่แบบมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้นและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA คือ ที่ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของสารแม่แบบ 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ 7 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 112.8 นาโนเมตร สำหรับการศึกษารูปการเตรียมเส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ทุกสภาวะ จึงได้นำ RF Gel มาผสมกับ PVA โดยมีการควบคุมการบ่ม RF Gel และการบ่ม RF Gel/PVA พบว่าสภาวะที่ไม่มีการบ่มทั้ง RF Gel และ RF Gel/PVA สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่แบบได้เหมาะสม คือ ที่อัตราส่วน 1:9 ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของสารแม่แบบ 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ 7 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 110.6 นาโนเมตร และทำการศึกษารูปการทำแห้งเส้นใยซึ่ง พบว่าการทำแห้งแบบระเหิดแห้งสามารถรักษาความเป็นเส้นใยให้คงรูปได้ดีกว่าการทำแห้งแบบอบลมร้อน นอกจากนี้ยังศึกษาเส้นใยที่ได้หลังจากผ่านการเผาในบรรยากาศ พบว่าเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้เส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก RF Gel/PVA มีลักษณะที่เป็นเส้นใยเล็กน้อยและเกิดการแตกหักของเส้นใย แต่เส้นใยแม่แบบที่ผลิตจาก PVA มีลักษณะที่เป็นเส้นใยอยู่บ้าง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 105.2 นาโนเมตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยแม่แบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ความพรุนของเส้นใยด้วยวิธี  $N_2$  Adsorption Isotherm

5.2.2 ในการศึกษาต่อจากงานวิจัยนี้ควรมีการทดลองหาอัตราส่วนระหว่าง RF Ge/PVA เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ลักษณะของเส้นใยที่มีขนาดเล็กและไม่เกิดเม็ดบีดส์

5.2.3 ควรมีการล้างเส้นใยหลังจากที่จะทำการบ่มด้วยสารละลาย TTIP ด้วย Heptane เพื่อล้างสารละลาย TTIP ที่เคลือบเส้นใยมากเกินไปออก

5.2.4 ควรมีการวัดค่าความหนืดของสารแม่แบบ เนื่องจากการนำสารแม่แบบมาผสมให้เข้ากัน จะต้องมีความหนืดที่ใกล้เคียงกันสารแม่แบบจึงจะเข้ากันได้ดี



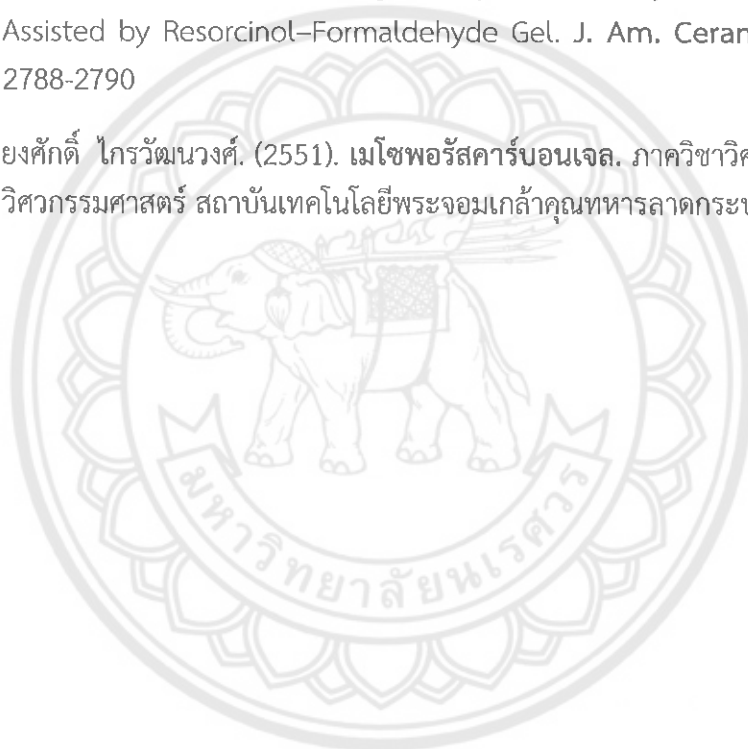
## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชลดา อีร์การูณวงศ์. (2555). วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การสังเคราะห์โครงสร้างการประยุกต์ใช้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [2] Huang ZM, Zhang YZ, Kotaki M. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*. Vol. 63, pp. 2223-2253.
- [3] Ramakrishna S, Fujihara K, Teo WE. (2005). *An Introduction to Electrospinning and Nanofiber*. World Scientific Publishing. pp. 1-42.
- [4] ปรัชญา นิยมไทย. เทคนิคการปั่นเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อประโยชน์ด้านการแพทย์. SCG Performance chemicals Co. Ltdv.
- [5] Sill TJ, Von Recum HA. (2008). Electrospinning: Application in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*. Vol. 29, pp. 1989-2006.
- [6] ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธุ์, สุลาวัลย์ ชาวผ่อง. (2555). การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมหรือไทเทเนียมไดออกไซด์วิธีโพลีโพลีเมอร์. มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่.
- [7] ปณิตธา ภัทรสถาพรกุล. (2547). หลักการทำแห้งแบบแช่แข็ง. ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูป, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล.
- [8] จตุรนต์ ศุภผล. (2550). การศึกษาในรายละเอียดของการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมหรือไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน ด้วยเทคโนโลยีโซล เจล ผสานกับการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต. สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] ชวิศกร กรัณยเมธากุล. (2549). การปรับแต่งผิวหน้าของไทเทเนียมไดออกไซด์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [10] ชวัลลักษณ์ คาจุมพล. (2555). การย่อยสลายสี้อมรีแอกทีฟ (สีแดง เบอร์ 3) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกแบบใช้แสงร่วม บนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-RH-MCM-41 โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD). ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

- [11] Shinsuke N, Shingo I, Kentaro T, and Masahiro O. (2011). Fabrication of carbon-core/TiO<sub>2</sub>-sheath nanofibers by carbonization of poly(vinyl alcohol)/TiO<sub>2</sub> composite nanofibers prepared via electrospinning and an interfacial sol-gel reaction. *Materials Letters*. Vol. 65, pp. 3027–3029.
- [12] Hai-Sheng Wang, Guo-Dong Fu, Xin-Song Li. (2009). Functional Polymeric Nanofibers from Electrospinning. *Recent Patents on Nanotechnology*. Vol. 3, pp. 21-31.
- [13] มณัญญา โทวิชา. (2553). การสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีรูพรุนโดยใช้เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลช่วย. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] C. Lin, J. A. Ritter. (1997). *Carbon*. Vol. 35, pp. 1271.
- [15] R.W. Pekala, C. T. Alviso, J. D. Lemay, (1992). in *Chemical Processing of Advanced Materials* (Eds: L. L. Hench, J. K. West), John Wiley and Sons, New York, pp. 671.
- [16] R.W. Pekala, C. T. Alviso, F. M. Kong, S. S. Hulsey, J. Non-Cryst. (1992). *Solids*, Vol. 90, pp. 145.
- [17] R.W. Pekala, J. C. Farmer, C. T. Alviso, T. D. Tran, S. T. Mayer, J. M. Miller, B. Dunn, J. Non-Cryst. (1998). *Solids*, Vol. 74, pp. 225.
- [18] R. C. Cook, S. A. Letts, G. E. Overturf, III, S. M. Lambert, G. Wilemski, D. Schroen-Carey, (1997). Final Report UCRL-LR-105821-97-1, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- [19] R.W. Pekala, (1989). *US Patent 4873218*.
- [20] ยัวร์ตัน ประมีศนาภรณ์. (2554). การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมียม. การจัดการทรัพยากรชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [21] ปรีนทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตองและไม้หมาจู้. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



- [22] ธนโชติ ธรรมชาติ. (2553). การเตรียมและการประเมินผลเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่นเซลล์ที่บรรจุสารจุลชีพ. สาขาวิทยาศาสตร์ทางการเกษตรบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [23] พัชรภรณ์ ไชยศรี. ผลของบางปัจจัยต่อลักษณะเส้นใยโพลีคาโพรแลคโตนอิเล็กทรอนิกส์ปั่นที่ผลิตด้วยเครื่อง KKU drum electrospinning unit.
- [24] เจนจิรา เมืองบาล. (2554). การผลิตเส้นใยนาโนทั้งสแตนออกไซด์ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ปั่นนิ่ง. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [25] Pamornrat Chantam and Varong Pavarajarn. (2012). Synthesis of Porous Alumina Assisted by Resorcinol-Formaldehyde Gel. *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 95, pp. 2788-2790
- [26] เกียรติศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์. (2551). เมโซพอร์สคาร์บอนเจล. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.





ตารางที่ 1 ตารางแสดงอัตราส่วนที่ใช้ในขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจาก PVA และ RF Gel/PVA

อัตราส่วน	การขึ้นรูป		ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
	ได้	ไม่ได้		
PVA	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ขนาดเล็กบนเส้นใยเล็กน้อย เส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ	นำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่แบบ
RF Gel		✓	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel(1.0):PVA (0.5)		✓	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel(1.0):PVA (1.0)		✓	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel(1.0):PVA (1.5)		✓	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel(1.0):PVA (3.0)	✓		แทบจะไม่มีลักษณะเป็นเส้นใย เส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ	
RF Gel(1.0):PVA (6.0)	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์บนเส้นใยเล็กน้อย เส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ	
RF Gel(1.0):PVA (9.0)	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่อง แทบจะไม่พบเม็ดบีดส์บนเส้นใย เส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ	นำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่แบบ

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจาก PVA

สารละลายพอลิเมอร์	อัตราการไหล (mL/hr)	ระยะห่าง (cm)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
PVA	0.8	7	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง แต่ขนาดไม่สม่ำเสมอ	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			25	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
		12	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			25	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ขนาดเล็กบนเส้นใยเล็กน้อย	
	1.0	7	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	**
			25	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
		12	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			25	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง และเกิดหยดของสารละลาย	
	1.2	7	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง และเกิดหยดของสารละลาย	
			25	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง และเกิดหยดของสารละลาย	
		12	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ขนาดเล็กบนเส้นใยเล็กน้อย	
			25	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	

หมายเหตุ \*\* คือ นำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่ใช้เป็นแม่แบบ

ตารางที่ 3 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel  
(RF Gel 30=RF Gel ที่บ่มไว้ 30 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	อัตราการไหล (mL/hr)	ระยะห่าง (cm)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 30	0.8	7	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
	1.0		15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
	1.2		15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 4 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับ  
สารละลาย PVA (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 4 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับสารละลาย PVA (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kv)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใย พบเม็ดปิดส์เล็กน้อย	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
RF Gel 0:PVA ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง พบเม็ดปิดส์เล็กน้อย	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง พบเม็ดปิดส์เล็กน้อย	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง พบเม็ดปิดส์เล็กน้อย	

ตารางที่ 4 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับสารละลาย PVA (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mV/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA ที่อัตราส่วน 1:6 (ต่อ)	7	1.0	20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ เล็กน้อย	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ เล็กน้อย	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ เล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ เล็กน้อย	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
RF Gel 0 : PVA ที่อัตราส่วน 1 : 9	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง และพบเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง พบเม็ดบีดส์ เล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	**
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง และพบเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
			22	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	

หมายเหตุ \*\* คือ นำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยที่ใช้เป็นแม่แบบ

ตารางที่ 5 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	



ตารางที่ 5 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3 (ต่อ)	7	1.0	20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.2	15		
			20		
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใย เกิดเม็ดปิดส์	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใย เกิดเม็ดปิดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใย เกิดเม็ดปิดส์	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:9	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดปิดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดปิดส์	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดปิดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดปิดส์	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดปิดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใย ยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดปิดส์	

ตารางที่ 6 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 6 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 0 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (RF Gel 0=RF Gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3 (ต่อ)	7	1.2	20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:9	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 7 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF gel 0 ผสมกับ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 15 ชั่วโมง (RF gel 0=RF gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kv)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 7 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF gel 0 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 15 ชั่วโมง (RF gel 0=RF gel ที่ไม่ได้ทำบ่ม)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.0	15		
			20		
		1.2	15		
			20		
RF Gel 0:PVA บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:9	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยาวต่อเนื่อง เกิดเม็ดบีดส์	

ตารางที่ 8 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 8 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:1.5 (ต่อ)	7	1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดปัดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดปัดส์	
RF Gel 5:PVA ที่อัตราส่วน 1:9	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดปัดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดปัดส์	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดปัดส์	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง เกิดเม็ดปัดส์	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ต่อเนื่อง	

ตารางที่ 9 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	



ตารางที่ 9 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:9	7	0.8	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.0	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย	
		1.2	15	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	
			20	มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง	

ตารางที่ 10 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	

ตารางที่ 10 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ	
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
	1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
		20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
		22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
	RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:3	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
				20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
20				ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
1.2		15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
		20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			

ตารางที่ 10 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 5 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (RF Gel 5=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ		
RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:6	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
		1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้			
		RF Gel 5:PVA บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:9	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
					20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
1.0	15			มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย			
	20			มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย			
1.2	15			มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย			
	20			มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย			

ตารางที่ 11 แสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 10 ผสมกับ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (RF Gel 10=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (ml/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 10	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 10:PVA ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 10:PVA ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 11 (ต่อ) แสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 10 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (RF Gel 10=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 10:PVA ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
		1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
	1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย		
		20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย		
		22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย		

ตารางที่ 12 แสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 10 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (RF Gel 10=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 10:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
	1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
		20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
		22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
RF Gel 10:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
	1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
		20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		
		22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้		

ตารางที่ 12 (ต่อ) แสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 10 ผสม  
กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง  
(RF Gel 10=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 10:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1 (ต่อ)	7	1.2	22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
RF Gel 10:PVA บ่มทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
	7	1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
	7	1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	

ตารางที่ 13 ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 15 ผสม  
กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (RF Gel 15=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mL/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 15	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
	7	1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
	7	1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 15:PVA ที่อัตราส่วน 1:0.5	7	0.8	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
	7	1.0	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	

ตารางที่ 13 (ต่อ) ตารางแสดงความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยแม่แบบจากสารละลาย RF Gel 15 ผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (RF Gel 15=RF Gel ที่บ่มทิ้งไว้ 15 ชั่วโมง)

สารละลายพอลิเมอร์	ระยะห่าง (cm)	อัตราการไหล (mV/hr)	ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะเส้นใย	หมายเหตุ
RF Gel 15:PVA ที่อัตราส่วน 1:0.5 (ต่อ)	7	1.2	15	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			20	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
			22	มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย	
RF Gel 15:PVA ที่อัตราส่วน 1:1	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
RF Gel 15:PVA ที่อัตราส่วน 1:1.5	7	0.8	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.0	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
		1.2	15	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			20	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	
			22	ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้	



## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นายธนาธิป เปียงเปี้ย  
ภูมิลำเนา 635/15 หมู่ 1 ต. วังทอง อ. วังทอง  
จ. พิชณุโลก

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิชณุโลกพิทยาคม จ. พิชณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 5 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: baby\_merry2@hotmail.com



ชื่อ นางสาวศลิษา สังข์ยก  
ภูมิลำเนา 62 หมู่ 14 ต. ป่าพุทรา อ. ขามเฒ่าลักษ์บุรี  
จ. กำแพงเพชร

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนขามเฒ่าวิทยา จ. กำแพงเพชร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Nunn\_salisa.S@hotmail.com

## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ(ต่อ)



ชื่อ นางสาวอังศุมาลี กัมปนาท  
ภูมิลำเนา 55 หมู่ 1 ต. ลานกระบือ อ. ลานกระบือ  
จ. กำแพงเพชร

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนลานกระบือวิทยา จ. กำแพงเพชร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Angsumalee\_K@hotmail.com

