



การขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล ฟอर्मัลดีไฮด์
โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต
FORMATION OF RESORSINOL-FORMALDEHYDE FIBER
BY ELECTROSPINNING TECHNIQUE.

นางสาวปวรวีร์ นกคล้าย รหัส 54360445
นายอนุชิต ต้อเชียง รหัส 54360544

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2557




ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ การขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล ฟอर्मัลดีไฮด์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปเส้นใย
ด้วยระบบไฟฟ้าสถิต

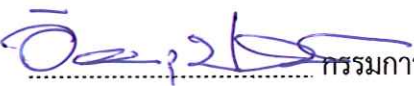
ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวปวรวิร์ นกคล้าย รหัส 54360445
นายอนุชิต ตี๋เซียง รหัส 54360544

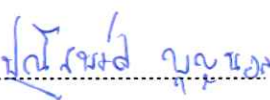
ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2557

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี


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


..... กรรมการ
(ดร.นพวรรณ ไม้ทอง)


..... กรรมการ
(ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์)


..... กรรมการ
(ดร.ปณัฐพงศ์ บุญवाल)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวปวรวีร์ นกคล้าย	รหัส	54360445
	นายอนุชิต ตื้อเชียง	รหัส	54360544
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2557		

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป โดยการปรับและควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ ความต่างศักย์ อัตราการไหล ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ และชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับ การศึกษาสภาวะเหล่านี้จะเน้นศึกษาปัจจัยที่จำเป็นต่อการขึ้นรูปเส้นใย โดยทำการตรวจสอบเส้นใยด้วยการบันทึกภาพผ่านกล้องจุลทรรศน์ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับเส้นใย จากนั้นเลือกสภาวะที่เหมาะสมไปทำการเผาแบบไพโรไลซิส และทำการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและพื้นที่ผิวของเส้นใยคาร์บอนที่ได้ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต ศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง มีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดลดลง สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ และอัตราการไหลมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปเส้นใย คือ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 0.8 มิลลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง 12 เซนติเมตร ซึ่งจะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุดเท่ากับ 1.2 ± 0.3 ไมโครเมตร และเมื่อนำไปเผาแบบไพโรไลซิส พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 0.9 ± 0.3 ไมโครเมตร

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา วิธีแก้ไขปัญหารวมถึง ข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ติดตามการดำเนินโครงการมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ และความอนุเคราะห์ในการเข้าไปใช้สถานที่และเครื่องมือ สำหรับการสังเคราะห์ชิ้นงาน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ อาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าไปใช้ สถานที่และเครื่องมือสำหรับการทดสอบชิ้นงานเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดลองในการทำปริญญา นิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินโครงการใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรม สั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดการดำเนินโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวปวรวีร์ นกคล้าย
นายอนุชิต ต้อเชียง

พฤษภาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	16
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	16
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	16
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	16
3.4 แผนภาพการทดลอง.....	17
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์.....	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	19
4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของสารที่ใช้เตรียมRF.....	19
4.2 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะRF fiber	28
4.3 ผลกระทบของอัตราการไหลต่อลักษณะRF fiber.....	29
4.4 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับต่อ RF fiber.....	30
4.5 ผลกระทบของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับต่อRF fiber.....	32
4.6 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนที่ได้จาก RF fiber.....	34
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	37
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	37
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก.....	42

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต.....	8
2.2	ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของ RF gel.....	20
2.3	ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของ RF gel	11
2.4	ผลกระทบของการไฟโลไรซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จาก RF gel.....	12



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การปั่นขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตของพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลาย.....	5
2.2 การปั่นขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว.....	5
2.3 แสดงกลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิด RF gel.....	8
2.4 การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์ของโมโนเมอร์RF gel.....	9
3.1 แผนภาพการทดลอง.....	17
4.1 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ a) 0.25 b) 0.5 c) 1 และ d) ขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	21
4.2 ลักษณะการเกิดเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ a). 0.25 และ b). 0.5.....	22
4.3 แบบจำลองการเพิ่มและลดปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ ในการขึ้นรูปเส้นใยจากเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจลา a) ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป b) ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์น้อยเกินไป และ c) ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ที่พอดี.....	23
4.4 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต a). 500 b).1000 c).2000 และ d). ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	25
4.5 แบบจำลองของลักษณะการเกิดเจลของ RF gel ที่ขึ้นรูปแบบอนุภาค อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต a). น้อย และ b). มาก	25
4.6 แบบจำลองการบรรจุอนุภาคในหนึ่งพื้นที่หน้าตัดของเข็มฉีดยา a) อนุภาคขนาดเล็ก และ b) อนุภาคขนาดใหญ่.....	26
4.7 แบบจำลองลักษณะการเกิดเจลของเรซอซินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจลาที่ขึ้นรูปแบบเส้นใย ก่อนการหัดตัวที่ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต a). มาก b). น้อย.....	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราการไหล0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงระยะห่าง 12 เซนติเมตรศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ a)0.5 b) 1c)2 และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	27
4.9 ภาพแสดงลักษณะเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูป RF gel ต่อเวลาบ่มเจล.....	28
4.10 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 ระยะห่าง 12 เซนติเมตรอัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้าa) 15 กิโลโวลต์b)20 กิโลโวลต์ c)25 กิโลโวลต์และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	29
4.11 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 ระยะห่าง 12 เซนติเมตรศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์อัตราการไหล a) 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงb) 1.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงc) 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงและ d). ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	30
4.12 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงศักย์ไฟฟ้า15กิโลโวลต์ และระยะห่าง a). 7 เซนติเมตร b). 12 เซนติเมตร c). 15 เซนติเมตร และ d). ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	31
4.13 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงศักย์ไฟฟ้า15กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตรบนฐานรองรับแบบ a) แผ่น b) ลูกกลิ้ง และc) ภาพแสดงขนาด และการกระจายตัวของเส้นใย.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากRF gel ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงศักย์ไฟฟ้า15กิโลโวลต์ และระยะห่าง 7 เซนติเมตรบนฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง a) SEM ก่อนเผา b) SEMหลังเผา และc) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย.....	34
4.15 ภาพถ่ายFE-SEM ลักษณะพื้นผิวของ RF fiber ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงศักย์ไฟฟ้า 15กิโลโวลต์ระยะห่าง 7 เซนติเมตร a) ไม่ได้เติมน้ำและb) อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5.....	35
4.16 เทอร์โมแกรมของ RF fiberซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA (N ₂ Flow).....	36



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันนักวัสดุศาสตร์ให้ความสนใจเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยีเป็นจำนวนมากเนื่องจากเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ ที่ยังไม่มีเคยมีมาก่อนเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาดและผู้บริโภค โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้าง สังกะสี ควบคู่ และใช้ประโยชน์จากวัสดุหรือโครงสร้างที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่อยู่ในระดับที่เล็กมากหรือการจัดเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง ทำให้โครงสร้างของวัสดุหรือสสารมีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพส่งผลให้นำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [1]

เส้นใยนาโนคาร์บอนถือเป็นอีกหนึ่งความภาคภูมิใจของการศึกษาวัสดุระดับนาโน เนื่องจากเส้นใยนาโนคาร์บอนเป็นเส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกประกอบด้วยชั้นของแกรไฟีนที่จัดเรียงตัวเหมือนกรวยเรียงทับซ้อนกันอยู่เป็นถ้วยหรือแผ่น โดยเส้นใยนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีคือ มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงสูง สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการผลิตอาวุธและเครื่องบินไปจนถึงอุตสาหกรรมเคมีขนาดใหญ่ เพราะเส้นใยนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติเด่นหลายอย่างแต่ที่โดดเด่นมากที่สุดคือการเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูงมาก นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีต่างๆ ดังนั้นจึงไม่ใช่เรื่องน่าแปลกที่อุตสาหกรรมต่างๆ พยายามนำเส้นใยนาโนคาร์บอนมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายซึ่งส่วนใหญ่จะสามารถผลิตเส้นใยนาโนคาร์บอนได้จากพอลิเมอร์ [2]

เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับที่จะนำไปขึ้นรูปเส้นใยนาโนคาร์บอน เนื่องจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูง ทนน้ำ ทนสภาพอากาศ และที่สำคัญมีพื้นที่ผิวมาก เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์สามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการโซลเจล มีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจการขึ้นรูปวัสดุคาร์บอนจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ เช่น การปรับสัดส่วนของสารตั้งต้น [3-5] ตัวเร่งปฏิกิริยา [5] และค่าความเป็นกรดต่าง [5-6] เป็นต้น จากงานวิจัยเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความคล่องตัวในการสังเคราะห์เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ให้เหมาะสำหรับการใช้งานในแต่ละประเภท ต่อมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์จึงเริ่มมีการศึกษาการขึ้นรูปใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลให้อยู่ในรูปของเส้นใยแต่พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้

หรือสามารถขึ้นรูปได้แต่เป็นในสถานะที่ยากต่อการทำซ้ำและนำไปใช้งาน [7] ล่าสุดในปี พ.ศ 2556 นายธนธิป เปียงเปีย และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ แต่พบว่าก็ยังไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ [8] ดังนั้นทางในงานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ในสถานะที่ง่ายต่อการทำซ้ำและนำไปใช้งาน โดยหลังจากได้เส้นใยแล้วจะนำเส้นใยที่ขึ้นรูปได้ไปตรวจสอบหาขนาดและค่าพื้นที่ผิวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ (RF fiber) ขนาดนาโนเมตรโดยขึ้นรูปด้วยการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

งานวิจัยนี้เป็นงานในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งกำหนดขอบเขตงานวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 ตัวแปรต้น

- 1) ศักย์ไฟฟ้า 15 - 25 กิโลโวลต์
- 2) ระยะห่างของปลายเข็มกับฐานรองรับ 7 - 15 เซนติเมตร
- 3) อัตราการไหลของสาร 0.8 - 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
- 4) ระยะเวลาในการบ่มเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล ก่อนการขึ้นรูป 0 - 50 ชั่วโมง
- 5) อุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง และแบบแผ่น
- 6) เปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ (R/F molar ratio)

อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต (R/C molar ratio) และอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ (R/W molar ratio)

อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.25 0.5 1

อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 500 1000 2000

อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 1 2

1.3.2 ตัวแปรตาม

- 1) ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่ได้
- 2) พื้นที่ผิวได้จากเส้นใย

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

- 1) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาเส้นใยในสถานะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 750 องศาเซลเซียส (Pyrolysis)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) หมายถึงเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้าง การวิเคราะห์ การสังเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ซึ่งมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1-100 นาโนเมตร) เทียบเท่ากับระดับอนุภาคของโมเลกุลหรืออะตอม รวมถึงการออกแบบหรือการใช้เครื่องมือสร้างวัสดุที่อยู่ในระดับที่เล็กมากๆ หรือการเรียงอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุ อุปกรณ์ หรือสารมีคุณสมบัติพิเศษขึ้นไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้ได้ [1]

บุคคลที่ได้รับการยกย่องให้เป็นบิดาของนาโนเทคโนโลยีได้แก่ Richard Feynman (นักฟิสิกส์ ผู้ได้รับรางวัลโนเบลในปี 1965) ซึ่งเป็นผู้เปิดความคิดเกี่ยวกับความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ โดยเขาได้กล่าวไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 ว่า “ ในอนาคตข้างหน้ามนุษย์จะสามารถสร้างสิ่งต่างๆ ได้ด้วยการจัดเรียงอะตอมในระดับที่แม่นยำ ซึ่ง ณ วันนี้ยังไม่มีกฎฟิสิกส์ใดๆ หรือรวมถึงกฎแห่งความไม่แน่นอนใดๆ มาขัดขวางความเป็นไปได้ ” จากนั้นจนถึงปัจจุบันจึงมีการพัฒนาอย่างสืบเนื่องเป็นลำดับ [9]

2.1.2 เส้นใยนาโน

เส้นใยนาโน (nanofiber) หมายถึงเส้นที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นผิวต่อปริมาตรสูงซึ่งอาจแบ่งเป็นแบบ แท่งนาโน (nanorod) หมายถึงเส้นใยนาโนที่ไม่กลวง ลวดนาโน (nanowire) หมายถึงเส้นใยนาโนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือเป็นสารกึ่งตัวนำ ท่อนาโน (nanotube) คือโมเลกุลรูปร่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร แต่ศักยภาพของมันที่จะนำไปสู่เทคโนโลยีใหม่ๆ นั้นมากมายมหาศาล คุณสมบัติของท่อนาโนที่สำคัญคือความแข็งแรงเป็นพิเศษต่อการยืดและดัดงอ ความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี และความสามารถในการเปล่งแสงเมื่อมีแสงตกกระทบ เพราะคุณสมบัติสำคัญเหล่านี้จึงนำท่อนาโนไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ได้มากมายนับตั้งแต่นำไปทำจอแสดงผล หรือจอตอร์ทัศน์แบบจอแบน ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) หรือไปใช้สร้างวัสดุต่างๆ กระบวนการผลิตนาโนไฟเบอร์มีหลายวิธี [10] ได้แก่

1) **Drawing** เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตร โดยหยดสารละลายพอลิเมอร์ในขนาดไมโครเมตร ใช้ไมโครปิเปตจุ่มลงในหยดของสารใกล้กับคอนแทคไลน์จากนั้นดึงไมโครปิเปตออกอย่างรวดเร็ว เส้นใยขนาดนาโนเมตรจะถูกดึงออกมาพร้อมๆ กับการระเหยไปของตัวทำละลาย

2) **Template synthesis** เป็นกระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรที่ใช้แม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยรูที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร นำสารละลายพอลิเมอร์มาผ่านแม่พิมพ์เส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตรภายใต้แรงดันน้ำ สารละลายพอลิเมอร์จะออกมาเป็นเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร

3) **Phase separation** ในกระบวนการนี้มีหลักการคือ พอลิเมอร์จะละลายในตัวทำละลายที่ละลายพอลิเมอร์ได้ดีก่อน และจึงเปลี่ยนตัวทำละลายที่พอลิเมอร์นั้นละลายได้ไม่ดีลงไปทำให้เกิดเป็นเส้นใยขนาดนาโนเมตรขึ้น

4) **Self-assembly** กระบวนการผลิตเส้นใยขนาดนาโนเมตรที่เกิดขึ้นได้เองจากสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้โมเลกุลขนาดเล็กเป็นพื้นฐานในการสร้างเส้นใยขนาดนาโนเมตรเมื่อมีโมเลกุลมากขึ้นทำให้เกิดแรงระหว่างกัน เกิดการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะของเส้นใยขนาดนาโนเมตร

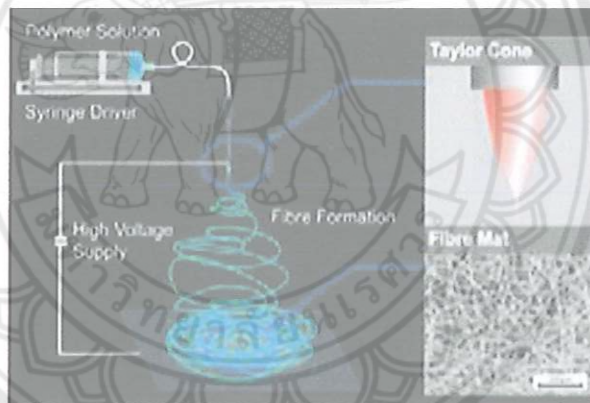
5) **Electrospinning** การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นทางเลือกใหม่ที่สามารถใช้เตรียมเส้นใยนาโนของวัสดุพอลิเมอร์ และสารอนินทรีย์ออกไซด์หลากหลายชนิดสำหรับประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เกษษกรรม วิศวกรรม การทหาร และอื่นๆ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีขึ้นรูปเส้นใยนาโนที่ได้รับความสนใจและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันสามารถขึ้นรูปเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึงมากกว่า 1 ไมโครเมตร โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง สำหรับระบบพื้นฐานของการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเพียง 3 ส่วนคือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage power supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (metal collector) จัดเป็นระบบที่ไม่มีความซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย และใช้งานได้สะดวก ทั้งนี้ในระบบที่พัฒนาให้ดีขึ้นสามารถเพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย (syringe pump) และทำให้การขึ้นรูปเส้นใยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น กล่าวคือสามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น [10]

2.1.3 กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต(Electrospinning process)

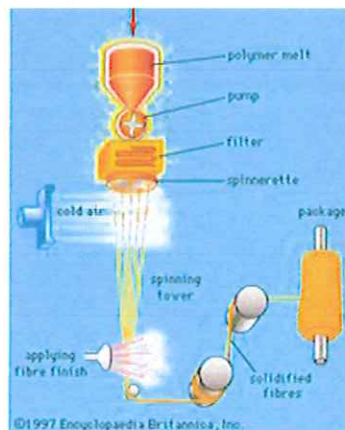
กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Spinning) หรือที่เรียกย่อๆว่า อิเล็กโตรสปินนิ่ง เป็นเทคนิคการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยใช้แรงที่เกิดจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้า เส้นใยที่ได้จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตจะมีขนาดเล็กมาก (ระดับนาโนเมตร) ในขณะที่การขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์โดยทั่วไปใช้แรงกลทำการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมผ่านหัวดายที่มี

รูขนาดเล็ก (Spinneret) เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดใหญ่กว่าแบบการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตโดยมีขนาดอยู่ในช่วงไมโครเมตร

ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตสามารถใช้พอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปของสารละลาย (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) หรืออยู่ในสภาวะหลอมเหลว (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) โดยนำพอลิเมอร์บรรจุในภาชนะที่มีรูขนาดเล็กจากนั้นให้พลังงานทางไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความต่างศักย์ตรงบริเวณปลายรูขนาดเล็กของภาชนะบรรจุและฉากรองรับ เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าถึงจุดที่แรงทางไฟฟ้าสามารถเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์ได้ พอลิเมอร์จะดีดออกจากปลายภาชนะบรรจุไปที่ฉากรองรับเกิดเส้นใยในระดับนาโนเมตร ปัจจุบันเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถผลิตเส้นใยขนาดตั้งแต่ 10 - 1,000 นาโนเมตร อัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface Area to Volume Ratio) สูงถึง 1,000 เท่า เมื่อเทียบกับเส้นใยที่ผลิตด้วยเทคนิคทั่วไป โดยเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตในระดับนาโนเมตรมีน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง



รูปที่ 2.1 การปั่นขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตของพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปสารละลาย



รูปที่ 2.2 การปั่นขึ้นรูปเส้นใยของพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลว

การทำงานของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (high voltage DC supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (syringe with metal needle) และวัสดุรองรับ (collector) การทำงานของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต เริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวผ่านเข็มโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ทำให้แรงผลักทางไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากหยดสารละลายรูปทรงกลมบนปลายเข็มจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปโคนเมื่อแรงผลักทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ และเมื่อแรงผลักทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ สารละลายจะพุ่งจากปลายของโคนไปยังวัสดุรองรับซึ่งต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าต่ำ ทำให้เกิดเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ สารละลายจะพุ่งเป็นแนวตรงในระยะหนึ่ง และจะผ่านเข้าไปในส่วนของ whipping instability ซึ่งจะเกิดการระเหยของตัวทำละลาย เส้นใยของของแข็งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะตกซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่ได้ทอ (Non-woven) ในส่วนของเข็มฉีดที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ จะต้องมีการควบคุมให้มีอัตราการไหลที่สม่ำเสมอโดยวิธีต่างๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational force) ปั๊ม (syringe pump) แรงดันก๊าซ (pressure gas) เป็นต้น ในส่วนของวัสดุรองรับก็มีหลายชนิดเช่น เพลท (stationary plate) ทรัม (rotating drum) เป็นต้น จากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตจะเห็นได้ว่ามีหลายขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนก็มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา และคุณสมบัติของเส้นใยนาโนที่ได้ [10]

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ในปัจจุบันมีนักวิจัยพยายามดัดแปลงกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตไปในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะที่ตรงกับการนำไปใช้งาน ชนิดของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตจำแนกได้ตามชนิดของเข็มที่ใช้และชนิดของสารละลายพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ถ้าแบ่งตามการเรียงตัวของส่วนหลอด ซึ่งเข็มโลหะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) Single configuration ใช้หลอดขึ้นเดียวและเข็มโลหะอันเดียวเป็นแบบที่ง่ายที่สุดใช้สารละลายพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวหรืออาจจะเป็นพอลิเมอร์หลายชนิดแต่ละลายในตัวทำละลายชนิดเดียว

2) Side by side configuration เป็นการเรียงตัวด้านข้างโดยใช้หลอด 2 ชั้นที่มีสารละลายพอลิเมอร์ 2 ชนิดเทคนิคนี้ใช้สำหรับต้องการเส้นใยที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์ 2 ชนิดแต่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีการละลายที่แตกต่างกันจึงต้องแยกละลายพอลิเมอร์ทั้ง 2 ออกจากกันโดยการใช้เทคนิคนี้จะต้องคำนึงถึงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายทั้ง 2 ให้มีค่าใกล้เคียงกัน

3) Coaxial configuration เป็นเทคนิคใหม่ที่ทำให้เส้นใยขนาดนาโน มีลักษณะเป็นโครงสร้างแกนเปลือก (core-shell) โดยลักษณะของหลอดจะประกอบด้วย หลอดอันใหญ่ที่มี

หลอดอันเล็กอยู่ด้านใน ภายในหลอดจะบรรจุสารละลายพอลิเมอร์สองชนิดที่ละลายเข้ากันไม่ได้ โดยพอลิเมอร์ที่ต้องการให้เป็นแกนจะบรรจุอยู่ในหลอดด้านใน

หากแบ่งชนิดของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตตามชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1) สารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solution) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้กันมากที่สุดโดยนำพอลิเมอร์ที่ต้องการทำให้เป็นเส้นใยนาโนมาละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม

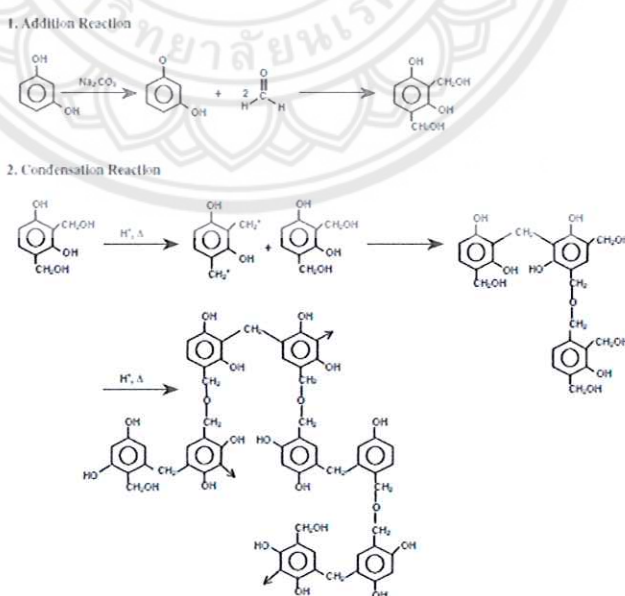
2) พอลิเมอร์หลอมเหลว (Polymer melt) เทคนิคนี้เป็นกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยใช้อุณหภูมิที่สูงจนพอลิเมอร์ที่เป็นของแข็งหลอมเป็นของเหลวตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่ใช้ เช่น พอลิเอทิลีน และ พอลิโพรพิลีน เป็นต้น [10]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต [11]

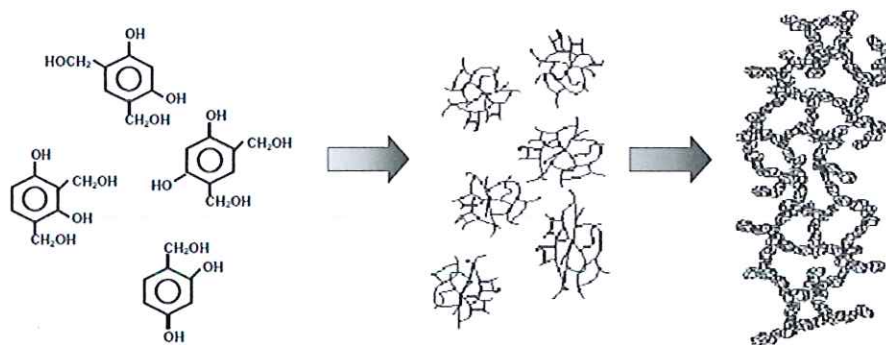
Polymer	Solvent	Concentration	Perspective Application
Nylon6,6, PA-6,6	Formic acid	10 wt.เปอร์เซ็นต์	Protective clothing
Polyurethanes, PU	Dimethyl formamide	10 wt.เปอร์เซ็นต์	Electric, filter
Collagen-PEO	Hydrochloric acid	1-2 wt.เปอร์เซ็นต์	Wound healing, tissue Engineering
Polyaniline (PANI) /PEO	Chloroform	2-4 wt.เปอร์เซ็นต์	Conductive fiber
Polyvinylcarbazole	Dichloromethane	7.5 wt.เปอร์เซ็นต์	Sensor, filter
Cellulose acetate, CA	Acetone, acetic acid, Dimethylacetamide	12.5-20เปอร์เซ็นต์	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. เปอร์เซ็นต์	Drug delivery system
Polylactic acid, PLA	Dichloromethane	14 wt.เปอร์เซ็นต์	Drug delivery system
Polyethylene oxide, PEO	Distilled water	7-10 wt. เปอร์เซ็นต์	Electret filter, blend other Polymer
polyacrylicacidpolypyr ene methanol, PAA-PM	Dimethyl formamide	-	Optical sensor
poly vinyl phenol, PVP	Tetrahydrofuran	20, 60เปอร์เซ็นต์ (wt./vol.)	Antimicrobial agent
Polycaprolactone, PCL	Chloroform:methanol (3:1)	-	Biomedical application

2.1.4 เรซอซินอล ฟอรัมัลดีไฮด์เจล (RF gel)

เรซอซินอล ฟอรัมัลดีไฮด์เจล หรืออาร์เอฟเจล (RF gel) สามารถเตรียมได้โดยการนำสารเรซอซินอล (R) ผสมกับฟอรัมัลดีไฮด์ (F) ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยให้เกิดสภาพเจล ปฏิกิริยาการเกิดเจลเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนการบ่มเจลจึงต้องทำในภาชนะที่ควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้มีเวลาเพียงพอในการเกิดโครงข่ายเจล ปัจจัยหลักในขั้นตอนที่เกิดเจลคือตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเกิดเจลคือ การควบแน่นอย่างต่อเนื่อง (Polycondensation) เกิดขึ้นในสารตั้งต้นที่ถูกควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย โครงสร้างและคุณสมบัติส่วนมากของเรซอซินอล ฟอรัมัลดีไฮด์เจลขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาและสถานะที่เกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่สำคัญระหว่างเรซอซินอล และฟอรัมัลดีไฮด์จะมีการเกิดปฏิกิริยาในรูปแบบอนุพันธ์ไฮดรอกซีเมทิล ($-\text{CH}_2\text{-OH}$) และเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุพันธ์ไฮดรอกซีเมทิล ในรูปแบบพันธะเมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) และพันธะเมทิลีนอีเธอร์ ($-\text{CH}_2\text{-OCH}_2-$) [14 - 16] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 โดยมีอัลคาไลน์เป็นสิ่งสำคัญที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการก่อตัวของเรซอซินอลประจุลบ (resoseinol anion) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับฟอรัมัลดีไฮด์ในปฏิกิริยาการเพิ่ม (addition- reaction) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น 2,4 methylol resorcinol ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเพิ่มหรือโ และทำปฏิกิริยาเป็นลักษณะการควบแน่นแบบต่อเนื่องจะได้โครงข่ายที่มีขนาดเจลใหญ่ขึ้น (เส้นผ่านศูนย์กลาง 7 – 10 นาโนเมตร) สามารถสังเกตได้จากความหนืดที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [12]



รูปที่ 2.3 แสดงกลไกระดับโมเลกุลของปฏิกิริยาการเกิดเรซอซินอล ฟอรัมัลดีไฮด์เจล [6]



รูปที่ 2.4 การเจริญเติบโตของคลัสเตอร์โมโนเมอร์เรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ [6]

หลังจากนั้นก็ทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายอบแห้งและเผาในสภาวะแก๊สเฉื่อยเพื่อให้เกิดการคาร์บอนไนเซชันให้เป็นคาร์บอนตามลำดับ โดยการอบแห้งมีหลายเทคนิค เช่น อบแห้งในสภาวะจุดเหนือวิกฤตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าเรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ แอโรเจล (RF aerogel) อบแห้งในบรรยากาศลมร้อนปกติเจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า เรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ซีโรเจล (RF xerogel) เป็นต้น หลังจากนั้นนำเจลแห้งไปทำการคาร์บอนไนเซชันเพื่อให้ได้คาร์บอนซึ่งคาร์บอนที่ได้จากเรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์เจลนั้นมีพื้นที่ผิวและสภาพความเป็นรูพรุนสูง โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติดังกล่าวถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2 - 2.4

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของ เรซอซินอลฟอรั่มลดีไฮด์ เจล [13]

ปัจจัย	ผลกระทบ
ลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น (การลดอัตราส่วน R/F, R/W, R/C)	อนุภาคและขนาดรูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็ก
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีขนาดเล็ก ผิวเรียบ และมีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่กว้าง แต่ที่ระดับความเข้มข้นสูง เรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีการกระจายตัวของขนาดของรูพรุนที่แคบมาก และอาจลดเวลาในการเกิดเจล
ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นด่าง	ที่ระดับความเข้มข้นสูง เรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สูง(อนุภาคพอลิเมอร์ขนาดเล็กที่เชื่อมต่อกันด้วยคอขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวสูง จุดแข็งทางกลสูง) และลดเวลาในการเกิดเจล แต่ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เรซอซินอล ฟอรั่มลดีไฮด์ เจล ที่ได้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (อนุภาคขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันด้วยคอแคบ พื้นที่ผิวดำ จุดแข็งทางกลต่ำ)

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบของการเตรียมเจลและการบ่มเจลต่อคุณสมบัติของเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล [13] (ต่อ)

ปัจจัย	ผลกระทบ
pH เจลที่เพิ่มขึ้น	เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของคาร์บอนแอโรเจล แต่ไม่เพิ่มพื้นที่ผิวของคาร์บอนซีโรเจล
การบ่มเจล	ช่วยให้มีเวลาในการเกิดโครงร่างตาข่ายของเจลมากขึ้น

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของตัวทำละลายแลกเปลี่ยนและการอบแห้งต่อคุณสมบัติของเรซอินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล [13]

ปัจจัย	ผลกระทบ
ตัวทำละลายแลกเปลี่ยน	จำเป็นสำหรับการอบแห้งในระบบ อบแห้งในสภาวะจุดเหนือวิกฤตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแช่แข็งอบแห้ง ช่วยให้การระเหยแห้งเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นการลดลงของความตึงเครียดบนพื้นผิวการระเหยในระบบ subcritical
การอบแห้งในบรรยากาศปกติ	เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าซีโรเจลซึ่งมีการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้รูพรุนเล็กลงและปริมาณรูพรุนลดลง แต่ความแข็งแรงทางกลของเจลแห้งจะเพิ่มขึ้น
การอบแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO ₂	เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่าแอโรเจล โดยแอโรเจลที่ได้ไม่มีนัยสำคัญของการหดตัวของรูพรุนส่งผลให้พื้นที่ผิวสูงปริมาณรูพรุนมาก
การอบแห้งในบรรยากาศปกติ	เช่นเดียวกับการอบแห้งในบรรยากาศปกติด้วย CO ₂ แต่ด้วยความดันที่ลดลงจำเป็นต้องมีการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย ต้องให้อุณหภูมิเจลแห้งเกิดการสลายตัวทางความร้อนบางส่วนมีสูงในการเปลี่ยนเป็นสภาพวิกฤติ
การอบแห้งแบบแช่แข็ง	เจลแห้งที่ได้จะถูกเรียกว่า ไครโอเจล(cryogels) การระเหิดของตัวทำละลายแช่แข็ง พบว่ารูพรุนที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นรูพรุนขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับ เมโซพอร์ความหนาแน่นของตัวทำละลายจะต้องคงที่ด้วยการแช่แข็ง

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของการไฟโโรไลซิสต่อคุณสมบัติของคาร์บอนที่ได้จากของเหลืออินอล พอร์มัล ดีไฮด์เจล [13]

ปัจจัย	ผลกระทบ
เพิ่มอุณหภูมิไฟโโรไลซิส	ลดปริมาณออกซิเจน ลดพื้นที่ผิวของคาร์บอนแอเรเจล และซีโรเจล ลดปริมาณรูพรุนของคาร์บอนแอเรเจล และซีโรเจล เพิ่มการกระจายขนาดของแมโครพอร์ เพิ่มการกระจายขนาดของไมโครพอร์ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเรโซซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตที่ต่ำมาก
เพิ่มเวลาในการไฟโโรไลซิส	เพิ่มความกว้างของรูพรุน และปริมาณพื้นที่ผิว

2.1.5 เซรามิกรูพรุน (Porous Ceramics)

เซรามิกรูพรุน คือ วัสดุเซรามิกที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนสามารถจำแนกได้ตามขนาดได้แก่

- 1) รูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) มีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
- 2) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) มีขนาดรูพรุนอยู่ระหว่าง 2 - 50 นาโนเมตร
- 3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) มีขนาดรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร

ในปัจจุบันเซรามิกรูพรุนเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งในทางเคมีประยุกต์และเทคโนโลยีสาขาอื่นเนื่องจากมีสมบัติที่ดีเช่น เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากทนต่อสารเคมีประเภทกรด-ด่างได้เป็นอย่างดี ทนความร้อนสูง น้ำหนักเบา สัมประสิทธิ์ขยายตัวเนื่องด้วยความร้อนต่ำ จากสมบัติที่กล่าวมานี้เซรามิกรูพรุนสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ เช่น ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวตรวจจับแก๊ส ตัวกรองประสิทธิภาพสูง ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุปลูกถ่ายทางการแพทย์ เป็นต้น คาร์บอนในรูปแบบของของแข็งที่มีความหนาแน่นของรูพรุนมากจะสามารถใช้งานได้หลากหลาย โดยสามารถเพิ่มรูพรุนของคาร์บอนจากการไฟโโรไลซิสคาร์บอนเหล่านี้สามารถใช้สำหรับการดูดซับการกระจายกว้างของโมเลกุลจากก๊าซให้เป็นของเหลว การดูดซับโมเลกุลภายในพื้นที่ผิวที่เกิดจากชั้นเดียว หรือการสะสมโมเลกุลในหลายๆชั้นที่ผนังของพื้นที่ผิวและด้วยเหตุนี้ทำให้ประเภทของการดูดซับของแต่ละคาร์บอนไม่เท่ากัน ความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนสามารถพัฒนาได้โดยไฟโโรไลซิส โดยควบคุมการกระตุ้นทางกายภาพของคาร์บอน อสัณฐานเส้นใยและเส้นใยคาร์บอนที่ใช้งานให้มีลักษณะโครงสร้าง รูพรุน และพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนไป [14]

2.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy) ที่มีหลักการทำงานประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กหลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาหลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกและแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ แล้วจึงจะถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์โดยที่สามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตีพิมพ์ได้เลย [15-16]

2) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis (TGA)) เป็นการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุตัวอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือการระเหยของน้ำซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงหรือการแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) โดยการทำงานของเครื่องมือคือเครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่ความละเอียดมากๆ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง เมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่าและเมื่อให้ความร้อนเครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจากกราฟที่ได้วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาและการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ [15]

3) เทคนิคในการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface Area and Porosity Analyzer (BET)) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจนเมื่อวัดอุณหภูมิพื้นที่มากขึ้นความสามารถในการดูดซับก๊าซของมันเป็นมากขึ้น จากผลวิเคราะห์ของเครื่องมือนี้ช่วยให้ค้นคว้าพบพื้นที่ผิวหรือขนาดของรูพรุนของพื้นผิวของสารตัวอย่างไม่ว่าจะเป็นยาและถ่านกัมมันต์ โดยวัดจากการดูดซับก๊าซของสารตัวอย่าง โดยจะอยู่ในห้องที่ปิดสนิทและทำความสะอาดด้วยความร้อนสูญญากาศ และเมื่อก๊าซเฉื่อยไหลผ่านพื้นผิว โมเลกุลจะดูดซับก๊าซเข้ามาในพื้นที่ผิวปรับความดันได้ถึง 1,000 Torr

อุณหภูมิไม่เกิน 425 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวคือ อาร์กอนคาร์บอนไดออกไซด์ ผสมฮีเลียม และไนโตรเจน [17]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์เส้นใยเรซอลซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล พบบางงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ในปี พ.ศ. 2540 Lin, C. และ Ritter, J.A. ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของค่าความเป็นกรด-เบสต่อพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายของพื้นที่ผิว และโครงสร้างขนาดนาโนของ เรซอลซินอล พอร์มัลดีไฮด์ พบว่าเมื่อค่า pH ต่ำ จะมีพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายของพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น โดยมีค่าพื้นที่ผิวสูงสุดอยู่ที่ 620 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีรัศมีรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-6 นาโนเมตร จากการส่องด้วยเทคนิค XRD พบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณรูพรุนบนพื้นผิวประกอบไปด้วยอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตร และมีโครงสร้างแบบผลึกนาโน (Nanocrystalline) ที่มีส่วนผสมระหว่างแกรไฟต์ และ ถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA จะเกิด การคายความร้อนอย่างรุนแรงเมื่อสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ [6]

ในปี พ.ศ. 2541 Tamon H. และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของเรซอลซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ ต่อน้ำ และต่อโซเดียมคาร์บอเนต โดยที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการโซล-เจล พอลิคอนเดนเซชัน (Sol gel polycondensation) แล้วนำไปอบแห้งด้วยเทคนิคอบแห้งในสภาวะจุดเหนือวิกฤตของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเผาในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย พบว่าเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของเรซอลซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต และอัตราส่วนของเรซอลซินอลต่อน้ำให้เจือจางลง พบว่าในช่วงเวลาที่ไฟโรไลซิส ขนาดของแอโรเจลหดตัว 1- 4นาโนเมตร และมีการกระจายขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2 - 6.1 นาโนเมตร และในขณะที่อุณหภูมิไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้นรัศมีก็ยังคงเท่าเดิม แม้ว่า ปริมาณ รูพรุนลดลงเนื่องจากการหดตัวของแอโรเจล [18]

ในปี พ.ศ. 2546 Zheng Ming Huang ได้ศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการสังเคราะห์เส้นใยพอลิเมอร์ และนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาสังเคราะห์ โดยลักษณะการทำงานของเครื่องอิเล็กโตรสปินนิงคือ เริ่มจากให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ สารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดที่บริเวณปลายเข็มเนื่องมาจากผลของแรงตึงผิวแต่เมื่อให้ความต่างศักย์กำลังสูงจะทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิวจะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวย และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้

สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยึดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตรแล้วตกลงบนฐานรองรับ [11]

ในปี พ.ศ. 2549 Quynh P. และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการปั่นขึ้นรูปเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตว่าสามารถผลิตวัสดุในระดับนาโนสเกลได้หรือไม่ ซึ่งหลังจากนำวัสดุที่ได้จากเทคนิคนี้ไปตรวจสอบโครงสร้างพบว่าเทคนิคนี้สามารถขึ้นรูปเส้นใยที่ระดับนาโนเมตรได้และตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะเส้นใยและขนาดวัสดุก็คือ สมบัติของสารละลาย ความหนืด ค่าการนำไฟฟ้า แรงตึงผิว มวลโมเลกุล และความมีขี้ว ซึ่งหากปรับคุณสมบัติของสารละลายคงเป็นไปได้อย่าง จึงเลือกที่จะปรับอัตราการไหล ค่าศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับ และรวมไปถึงอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลอง โดยพบว่าเมื่อเพิ่มความหนืดและความเข้มข้นของพอลิเมอร์จะส่งผลให้เกิดเม็ดบีดส์ลดลงได้ แต่เส้นใยจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และถ้าเพิ่มความเข้มข้นและความหนืดมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อแรงตึงผิวจนไม่สามารถฉีดออกเป็นเส้นใยจากปลายเชื่อมได้ เนื่องจากเกิดหยดแห้งก่อนออกจากปลายเชื่อม พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงจะเกิดเม็ดบีดส์น้อย และให้ขนาดเส้นใยที่เล็กกว่าพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ อัตราการไหลสูงส่งผลให้รูพรุนและขนาดเส้นใยใหญ่ขึ้น ศักย์ไฟฟ้าสูงส่งผลให้จำนวนเม็ดบีดส์เยอะตามไปด้วย ระยะห่างมีผลต่อการระเหยของสารละลายถ้าใกล้เกินไปจะทำให้สารละลายระเหยออกไปไม่หมดและเกิดเม็ดบีดส์จำนวนมาก ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะทำให้ความหนืดต่ำลงส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง และถ้าเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จะส่งผลต่อลักษณะของรูพรุนบนพื้นผิวเส้นใย [19]

ในปี พ.ศ. 2551 เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ นำเรซอซินอลทำปฏิกิริยากับเฟอฟูรอลโดยใช้สารละลายเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน แล้วจึงนำสารที่ได้มาผสมกับบิวทานอลในขั้นตอนการเกิดเจล แล้วนำไปปั่นที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำให้แห้งแบบแช่แข็ง และเผาในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยตามลำดับ เพื่อให้ได้เรซอซินอล เฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างไอโซเทอร์มของเรซอซินอล เฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลได้ และปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซพอร์ที่ตัดแปลงนี้มีค่า 0.28 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งมากกว่าปริมาตรรูพรุนขนาดเมโซพอร์ของเรซอซินอล เฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลที่เตรียมโดยวิธีปกติ (0.11 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่าสามารถควบคุมโครงสร้างของรูพรุนเรซอซินอล เฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจลโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมี [20]

ในปี พ.ศ. 2555 พณิตนาฏ อุบลเลิศ ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยและอนุภาคทรงกลมคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเมโซ สามารถเตรียมได้จากวิธีโซล-เจลและขึ้นรูปจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบเมโซสามารถควบคุมขนาดรูพรุนได้โดยผ่านการเผาแบบไพโรไลซิสของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล โดยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลนั้นเตรียมได้จากปฏิกิริยาโซล-เจลคอนเดนเซชัน จากเรซอซินอลและพอร์มัลดีไฮด์โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่า ลักษณะรูปร่างและการกระจายตัวของเส้นใยและอนุภาคเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ สามารถควบคุมได้จากสภาวะการบ่ม ระยะเวลาในการบ่ม การเตรียมเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล และตัวแปรอื่นๆในกระบวนการปั่นเส้นใย พบว่าเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วย ไฟฟ้าสถิตเมื่อใช้การเตรียมเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่แตกต่างกัน แต่ทำการบ่มในสภาวะแวดล้อม ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 8 เปอร์เซ็นต์ จะเป็นเส้นใยที่มีขนาดในระดับไมครอน โดยมีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยอยู่ในช่วง 1 - 5 ไมโครเมตร เมื่อนำเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลบ่มใน สภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง (ความชื้นสัมพัทธ์ 45 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์) ผลิตภัณฑ์ ที่ได้ส่วนมากจะเป็นอนุภาคทรงกลมอยู่บนแผ่นรองรับ [7]

ในปี พ.ศ. 2556 ธนาธิป เปียงเปี้ย และคณะ จากการศึกษาการเตรียมเส้นใยแม่แบบที่ผลิต จาก เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าที่อัตราส่วน 1:0.5 1:1 และ 1:1.5 นั้น ไม่สามารถได้ผลเป็นเส้นใย จึงทำการเพิ่มอัตราส่วนเป็น 1:3 1:6 และ 1:9 พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็น เส้นใยได้ และเมื่อทำการบ่มเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าสภาวะที่ไม่มี การบ่มสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยแม่แบบได้คือ ที่อัตราส่วน 1:9 ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อัตราการไหล 1 มิลลิตรต่อชั่วโมง และระยะห่างปลายเข็ม 7 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 110.6 นาโนเมตร [8]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยที่ผลิตจากเรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์ เจลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยจากเรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์ เจล ดังกล่าวคือ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอรั่มัลดีไฮด์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสาร ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ และอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับ

3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 เรซอซินอล (Resorcinol)
- 3.1.2 ฟอรั่มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)
- 3.1.3 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)
- 3.2.2 ตู้อบแห้งด้วยความร้อน
- 3.2.3 เตาเผาอุณหภูมิสูง
- 3.2.4 ป้อน (Syringe pump)
- 3.2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา
- 3.2.6 กระจก
- 3.2.7 ปีกเกอร์

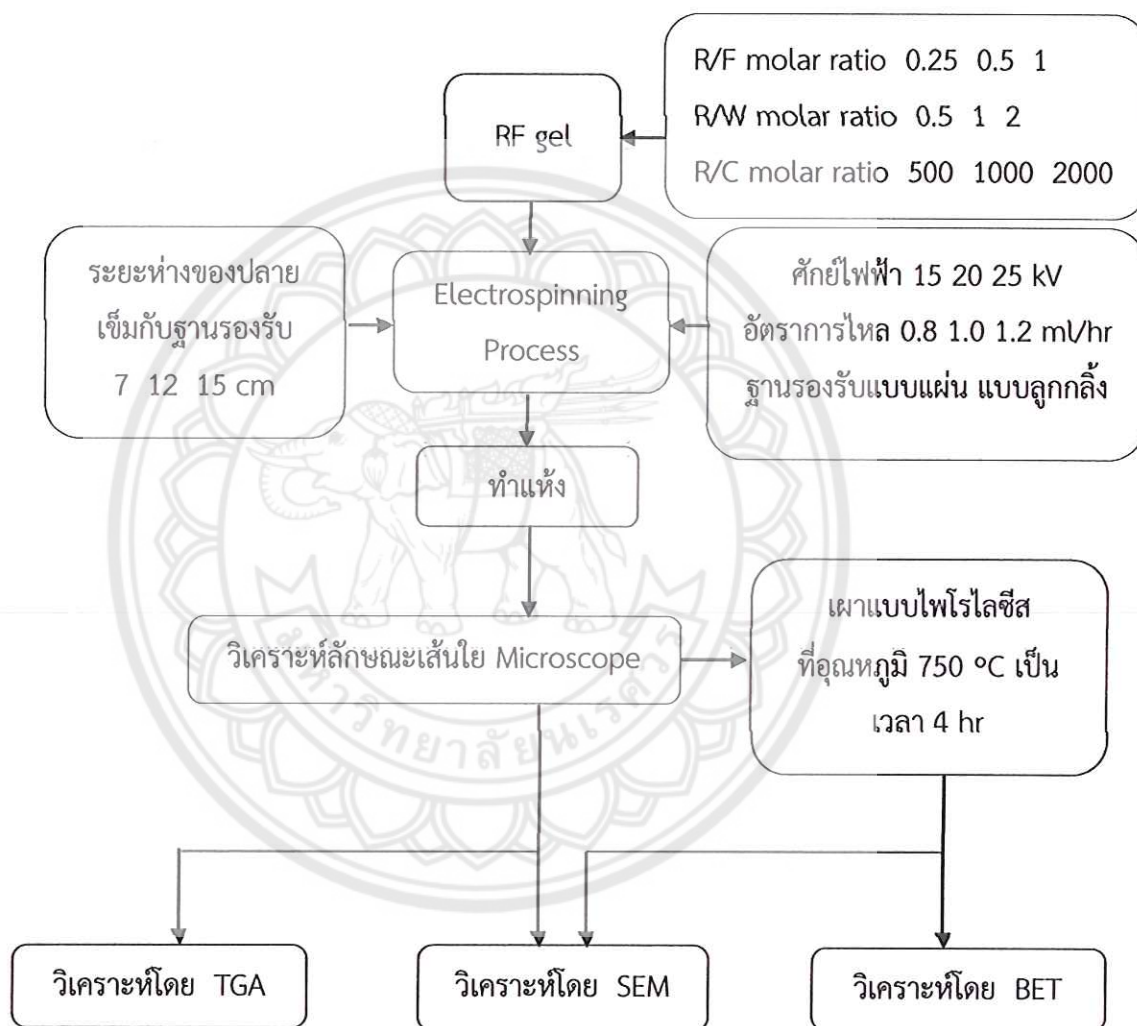
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยที่ผลิตจากเรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์ เจล

ในการเตรียมเส้นใยเรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์ เจลจะใช้สารเคมี 3 ชนิดคือ เรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์ และโซเดียมคาร์บอเนต โดยเตรียมสารที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อ ฟอรั่มัลดีไฮด์เท่ากับ 0.5 อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำเท่ากับ 0.5 และอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต เท่ากับ 2000 ซึ่งจะเตรียมด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์ดังกล่าวเป็นสารตั้งต้น แล้วศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้า อัตราการ

ไหลของสาร ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ และอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับ ที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเส้นใยขนาดนาโนเมตร

3.4 แผนภาพการทดลอง



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

3.5.1 การวิเคราะห์ขนาดและลักษณะของเส้นใยที่ได้โดย SEM และ Microscope

การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของเส้นใยนาโน จะตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้า (Accelerating Voltage) 15 กิโลโวลต์ และทำการบันทึกภาพที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า โดยตรวจสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า ส่วนการศึกษาขนาดของเส้นใยจะทำการวิเคราะห์โดยทำการวัดขนาดเส้นใยจากภาพถ่ายจากจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) ด้วยโปรแกรม SemAfore v.5.21 ซึ่งในการวิเคราะห์ขนาดจะทำการวัดขนาดเส้นจากภาพถ่าย 30 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นใย

3.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีโดยใช้เทคนิค TGA

การวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุตัวอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อน วิธีนี้เหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับก๊าซหรือการระเหยของน้ำซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเฟสหรือการแตกตัวของวัสดุ (Decomposition) การทำงานของเครื่องมือนี้คือ เครื่องมือนี้จะมีตาชั่งที่มีความละเอียดมากๆ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูงเมื่อใส่สารลงไปจะมีการบันทึกค่าและเมื่อให้ความร้อนเครื่องจะบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักอย่างต่อเนื่อง สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นจากกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อนที่วัสดุดูดหรือคายเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาและการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุ

3.5.3 การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน เมื่อวัดอุณหภูมิที่มากขึ้นความสามารถในการดูดซับก๊าซของมันจะมากขึ้น ก๊าซที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวคือ อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ ผสมฮีเลียม และไนโตรเจน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

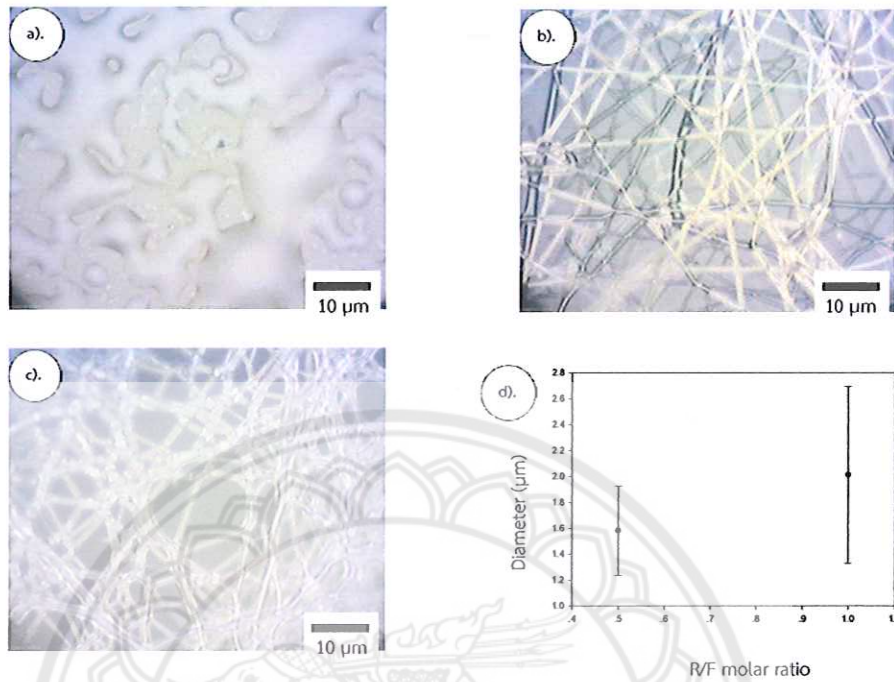
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยที่ผลิตจากเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์ เจลเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใย โดยปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยคือ อัตราส่วน โดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อโซเดียม อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำ ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสาร ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับ ฐานรองรับ และอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับ โดยผลจากการทดลองพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการ ขึ้นรูป ขนาด และลักษณะของเส้นใยเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์ดังนี้

4.1 ผลกระทบของอัตราส่วนของสารที่ใช้เตรียมเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์ เจลต่อลักษณะเส้นใย เรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์ เจล











4.1.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ที่ 0.25 0.5 และ 1

จากการทดลองผลอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ โดยทำการเปรียบเทียบ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ที่ 0.25 0.5 และ 1 โดยกำหนดอัตราส่วนโดย โมลของเรซอินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และไม่มีการเติมน้ำ พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอล ต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.25 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ทุกช่วงเวลาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของเรซอินอลต่อ พอร์มัลดีไฮด์เป็นแบบ 1:2 คือ เรซอินอล 1 โมลจะทำปฏิกิริยาพอดีกับพอร์มัลดีไฮด์ 2 โมลจึงทำให้ที่ อัตราส่วนโดยโมล 0.25 มีปริมาณของพอร์มัลดีไฮด์ที่มากเกินไปจึงไม่สามารถที่จะขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ โดยได้ทำการขึ้นรูปครอบคลุมตลอดช่วงเวลาการบ่มเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์ เจลจนถึงเวลาที่เจลเหน็ด เกินไปจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ คือ 79 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 4.1 a) อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอล ต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 สามารถขึ้นรูปให้เกิดเส้นใยได้ในช่วง 32 - 33 ชั่วโมงดังแสดงในรูป 4.1 b) พบว่าเส้นใยอ่อนหับและมีการรวมกันอาจเนื่องมาจากการระเหยของตัวทำละลายที่ไม่สมบูรณ์ และที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 1 สามารถทำให้เกิดเส้นใยได้ในช่วง 19 - 20 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 4.1 c) สังเกตพบว่าลักษณะของเส้นใยอ่อนหับและมีการรวมกันมากกว่าที่อัตราส่วน โดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 เนื่องจากที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อ พอร์มัลดีไฮด์ 1 มีปริมาณของพอร์มัลดีไฮด์ที่น้อยเกินไปเส้นใยจึงมีลักษณะไม่สวยงาม ซึ่งจากการ เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์แสดงให้เห็นว่าพอร์มัลดีไฮด์มีผลต่อการ เกิดเส้นใยและระยะเวลาของการบ่มสาร โดยที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์มาก

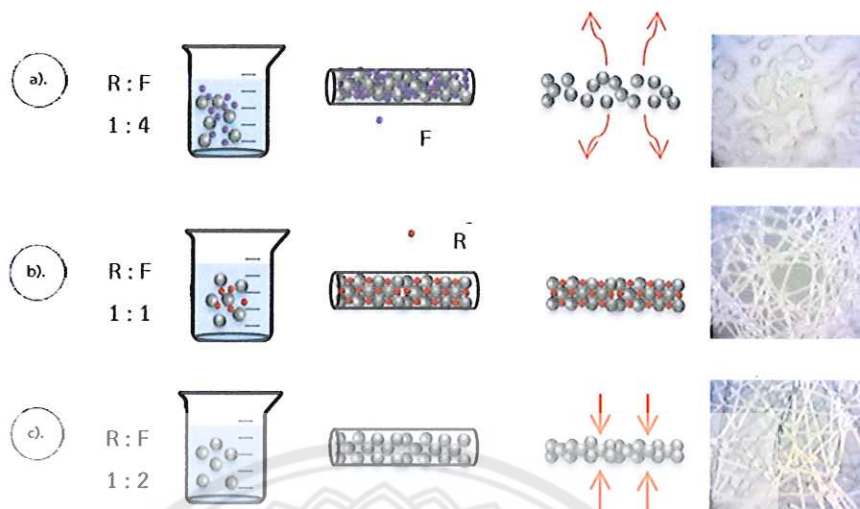
จะมีช่วงเวลาที่สูงกว่าอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์น้อย เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์มาก ปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใส่ลงไปมีปริมาณน้อยส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างเรซอซินอลและฟอร์มาลดีไฮด์ได้เร็วขึ้น จึงทำให้เวลาที่ใช้ก่อนที่จะสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้นั้นเร็วกว่าอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีค่าน้อยซึ่งมีปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์มาก (ดังแสดงในรูป 4.2) จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] และในส่วนของลักษณะเส้นใยที่เกิดขึ้นนั้นจะเห็นว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.25 ไม่สามารถทำให้เกิดเส้นใยได้เนื่องจากปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ที่มากเกินไปส่งผลให้มีปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเป็นปริมาณมาก ซึ่งฟอร์มาลดีไฮด์ส่วนเกินนี้จะไปแทรกตัวระหว่างเส้นใยทำให้เมื่อนำไปขึ้นรูปฟอร์มาลดีไฮด์จะระเหยออกสู่อากาศทำให้เรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลที่ออกมาไม่สามารถรักษาสภาพความเป็นเส้นใยได้โดยสามารถแสดงแบบจำลองได้ดังรูปที่ 4.3 a) จึงทำให้อัตราส่วนโดยโมลนี้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ ต่อมาที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5 และ 1 สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ โดยเส้นใยมีขนาด 1.5 ± 0.3 ไมโครเมตร และ 2.0 ± 0.68 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ายิ่งเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์เส้นใยที่ได้จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และหากเปรียบเทียบลักษณะของเส้นใยทั้งสองอัตราส่วนนั้นพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5 มีลักษณะเส้นที่เล็ก ยาว และต่อเนื่องมากกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 1 เนื่องจากจากที่อัตราส่วนโดยโมล 1 มีปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์น้อยเกินไปทำให้มีปริมาณของเรซอซินอลไอออนเหลืออยู่ในระบบเป็นปริมาณมาก โดยเรซอซินอลไอออนนี้เป็นอนุภาคคอลลอยด์ขนาดเล็ก จะแทรกตัวอยู่ในภายในเรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์เจล เมื่อนำไปขึ้นรูปเรซอซินอลไอออนไม่สามารถระเหยออกสู่อากาศได้ เรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์เจลจึงไม่สามารถหดตัวได้อย่างเต็มที่เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 b) แต่ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5 เป็นอัตราส่วนที่เรซอซินอลทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ได้พอดีจึงทำให้ไม่มีปริมาณของเรซอซินอลไอออน และฟอร์มาลดีไฮด์ส่วนเกินเหลืออยู่ เมื่อนำไปขึ้นรูปเรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์เจลจึงสามารถหดตัวได้อย่างเต็มที่เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็กกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 c)



รูปที่ 4.1 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่อัตราส่วนโดยโมลของ เรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ a) 0.25 b) 0.5 c) 1 และ d) ขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px; display: inline-block;"> a). </div> เวลาใน การบ่ม			ลักษณะที่ไม่เกิดเส้นใย	<div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px; display: inline-block;"> b). </div> เวลาใน การบ่ม			ลักษณะการเกิดเส้นใย
hr	min	Hr		min			
78	1		28	25			
78	40		30	45			
78	50		31	30			
79	5		32	22			
79	35		32	48			

รูปที่ 4.2 ลักษณะการเกิดเส้นใยที่ผลิตจากเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ a) 0.25 และ b) 0.5



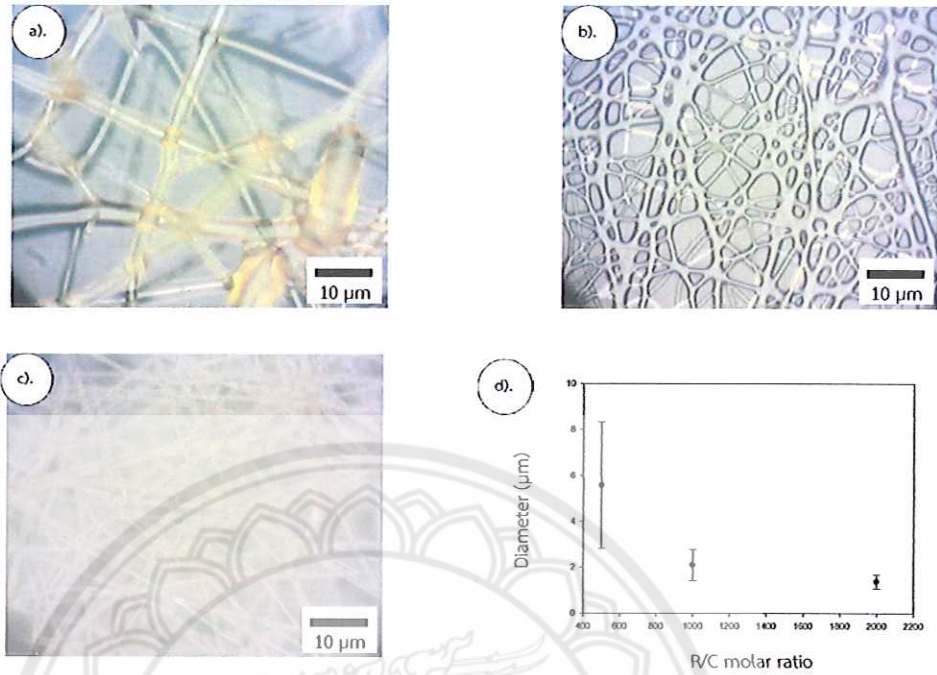
รูปที่ 4.3 แบบจำลองการเพิ่มและลดปริมาณพอร์มัลดีไฮด์ ในการขึ้นรูปเส้นใย จากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล a) ปริมาณพอร์มัลดีไฮด์มากเกินไป b) ปริมาณพอร์มัลดีไฮด์น้อยเกินไป และ c) ปริมาณพอร์มัลดีไฮด์ที่พอดี

4.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตที่ 500 1000 และ 2000

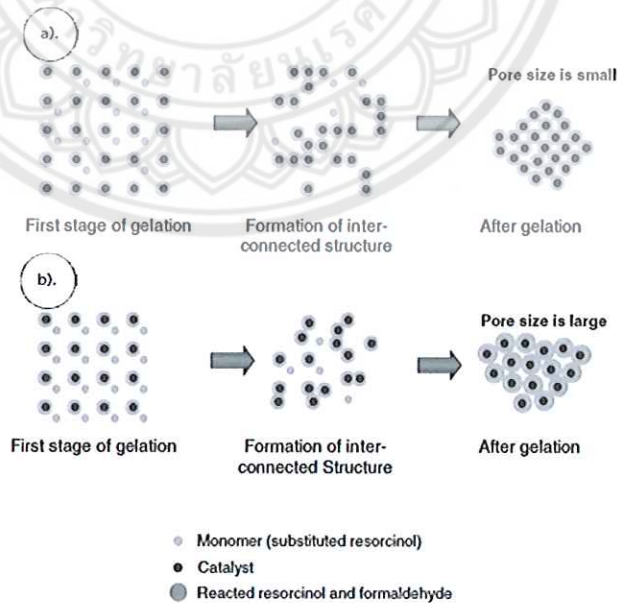
จากการทดลองเพื่อศึกษาผลอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต (R/C molar ratio) ที่ส่งผลต่อลักษณะเส้นใย โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตที่ 500 1000 และ 2000 โดยควบคุมปัจจัยดังต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ไม่มีการเติมน้ำ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ 12 เซนติเมตร และอัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 500 สามารถขึ้นรูปได้ในช่วงเวลา 27 ชั่วโมง 15 นาที โดยมีเวลาในการขึ้นรูป 30 นาที ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 สามารถขึ้นรูปได้ที่เวลา 32 ชั่วโมง 20 นาที มีเวลาในการขึ้นรูป 40 นาที และอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 สามารถขึ้นรูปได้ที่เวลา 40 ชั่วโมง 20 นาที มีเวลาในการขึ้นรูป 1 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตช่วงเวลามาก่อนการขึ้นรูปและช่วงเวลาที่สามารถขึ้นรูปได้จะนานมากขึ้น เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโซเดียมคาร์บอเนตจะเข้าไปกระตุ้นให้เรซอซินอลเกิดการแตกตัวกลายเป็นเรซอซินอลไอออนซึ่งจะสามารถทำปฏิกิริยากับพอร์มัลดีไฮด์ได้มากกว่าโมเลกุลของเรซอซินอลปกติ เมื่อเรซอซินอลแตกตัวทำปฏิกิริยากับพอร์มัลดีไฮด์จะเกิดพันธะเมทิลบริดจ์ และเมทิลอีเทอร์บริดจ์กลายเป็นคลัสเตอร์ (RF Cluster) ซึ่งคลัสเตอร์จะเกิดการควบแน่น

อย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล [5, 7] และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตจะมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตลดลงซึ่งจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าๆ

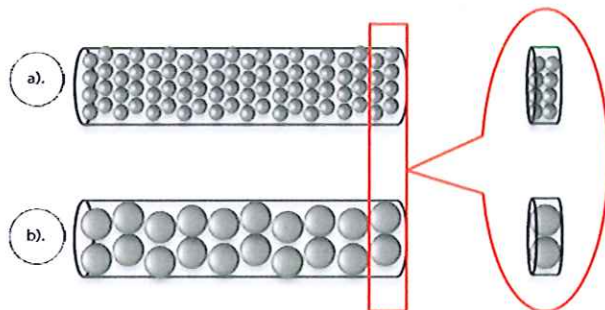
จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตทุกค่าสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ แต่เส้นใยที่ได้จะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.4 ทั้งนี้เมื่อทำการปรับอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 500 1000 และ 2000 พบว่าเส้นใยที่ได้จากอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 500 มีขนาด 5.6 ± 2.7 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่และคล้ายตาข่ายแสดงในรูปที่ 4.4 a) ส่วนเส้นใยที่ได้จากอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 1000 พบว่าเส้นใยมีขนาด 1.7 ± 0.4 ไมโครเมตร สังเกตพบว่าบริเวณเส้นใยซ้อนทับกันจะมีการรวมตัวของเส้นใยมีลักษณะคล้ายตาข่ายกระจายโดยทั่วดังแสดงในรูป 4.4 b) ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนตมากเส้นใยที่ได้จะมีขนาดที่เล็กลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [5] ที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับแผนภาพจำลองแนวคิดเกี่ยวกับการเพิ่มและลดปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตที่การขึ้นรูปแบบผงอนุภาค โดยค้นพบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตมากอนุภาคจะที่มีปริมาณเยอะและขนาดเล็กดังแสดงในรูป 4.5 a) แต่ในทางตรงกันข้ามที่ปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตน้อยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณน้อยแต่ขนาดใหญ่ดังแสดงในรูป 4.5 b) หากนำอนุภาคเหล่านี้มาขึ้นรูปเส้นใยโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตจะต้องบรรจุอนุภาคใส่ภายในเข็มฉีดยา พบว่าที่อนุภาคขนาดเล็กจะมีการจัดเรียงตัวแบบอัดแน่นมากกว่าที่อนุภาคขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทำให้เวลาที่อนุภาคฉีดตัวออกจากปลายเข็ม อนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ให้เรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลหดตัวเพียงเล็กน้อยเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ แต่ในทางกลับกันที่อนุภาคขนาดใหญ่จะมีการเรียงตัวแบบหลวมดังแสดงในรูป 4.7 b) ทำให้เมื่อนำไปขึ้นรูปเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลมีพื้นที่ในการหดตัวมากเส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็ก



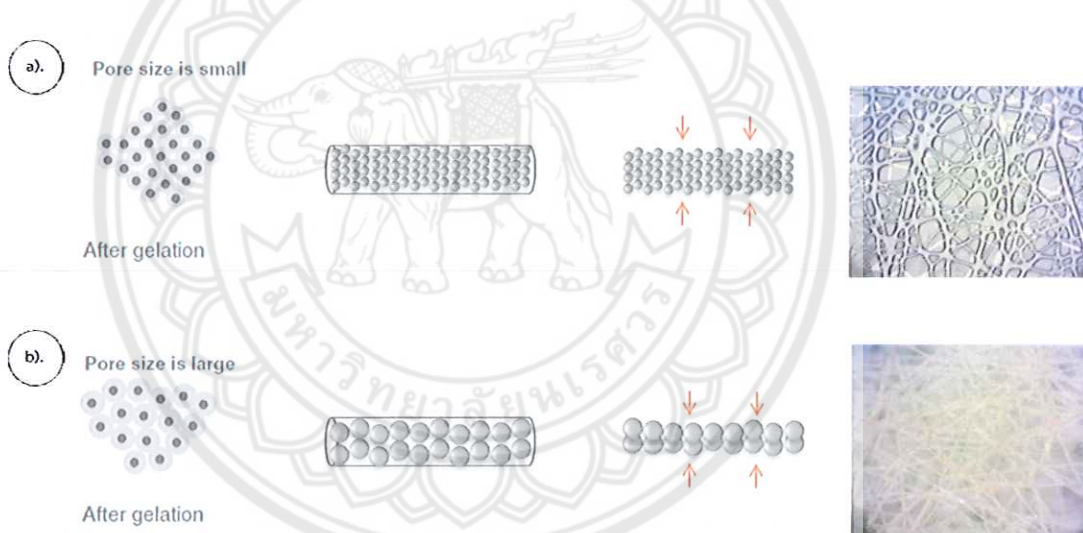
รูปที่ 4.4 ลักษณะเส้นใยเรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอรั่มัลดีไฮด์ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต a) 500 b) 1000 c) 2000 และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย



รูปที่ 4.5 แบบจำลองของลักษณะการเกิดเจลของเรซอซินอลฟอรั่มัลดีไฮด์เจลที่ขึ้นรูปแบบอนุภาค a) ปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตมาก b) ปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตน้อย [5]



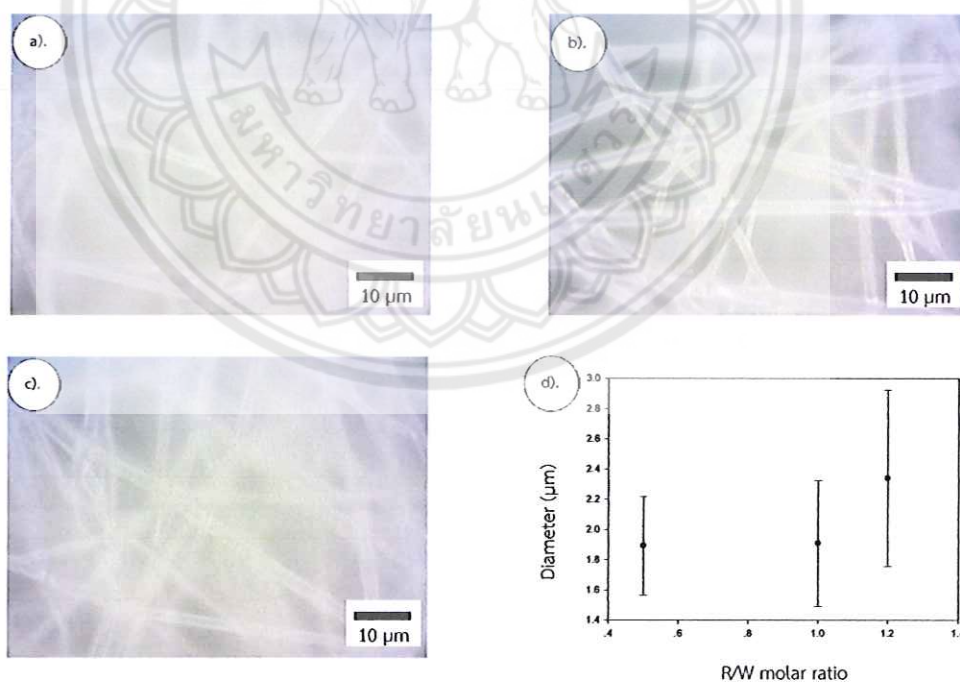
รูปที่ 4.6 แบบจำลองการบรรจุอนุภาคในหนึ่งพื้นที่หน้าตัดของเข้มีดียวา a) อนุภาคขนาดเล็ก และ b) อนุภาคขนาดใหญ่



รูปที่ 4.7 แบบจำลองลักษณะการเกิดเจลของเรซอซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์เจลที่ขึ้นรูปแบบเส้นใย ก่อนการหดตัวที่ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนต a) มาก b) น้อย

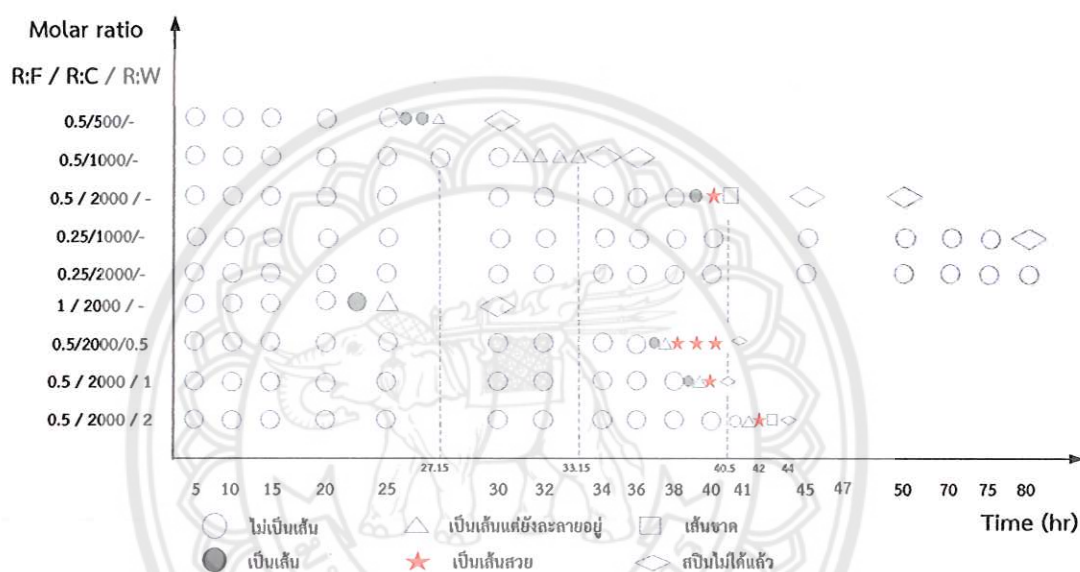
4.1.3 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำที่ 0.5 1 และ 2

จากการทดลองผลของอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำ โดยทำการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำที่ 0.5 1 และ 2 โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้คือ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์ 0.5 อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ทั้ง 3 อัตราส่วนโดยใช้เวลาในการขึ้นรูปและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับเส้นใยที่สามารถขึ้นรูปได้มีขนาด 1.8 ± 0.3 ไมโครเมตร 1.9 ± 0.4 ไมโครเมตร และ 2.3 ± 0.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำส่งผลให้ขนาดเส้นใยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำที่มีค่าน้อยจะมีปริมาณน้ำมาก น้ำจะเข้าไปแทรกตัวและขัดขวางการเกิดโครงข่ายของเรซอินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจลส่งผลให้โครงข่ายสามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่อกันได้น้อย เมื่อนำไปขึ้นรูปน้ำที่แทรกตัวอยู่ระหว่างเรซอินอลฟอร์มัลดีไฮด์ระเหยออกสู่อากาศทำให้เส้นใยสามารถหดตัวได้อย่างเต็มที่ส่งผลให้เส้นใยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำมากซึ่งจะมีปริมาณน้ำน้อยดังแสดงในรูป 4.8 ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7]



รูปที่ 4.8 ลักษณะเส้นใยเรซอินอลฟอร์มัลดีไฮด์เจลที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และอัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อน้ำ a) 0.5 b) 1 c) 2 และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

จากผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนที่ใช้เตรียมเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจลต่อเวลาที่ใช้ในการบ่ม ได้ถูกรวบรวมไว้ในรูปที่ 4.9 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์คือที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5 อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 ซึ่งมีช่วงเวลาในการบ่มอยู่ที่ 38 ชั่วโมง และเวลาในการขึ้นรูป 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะไม่สามารถขึ้นรูปได้

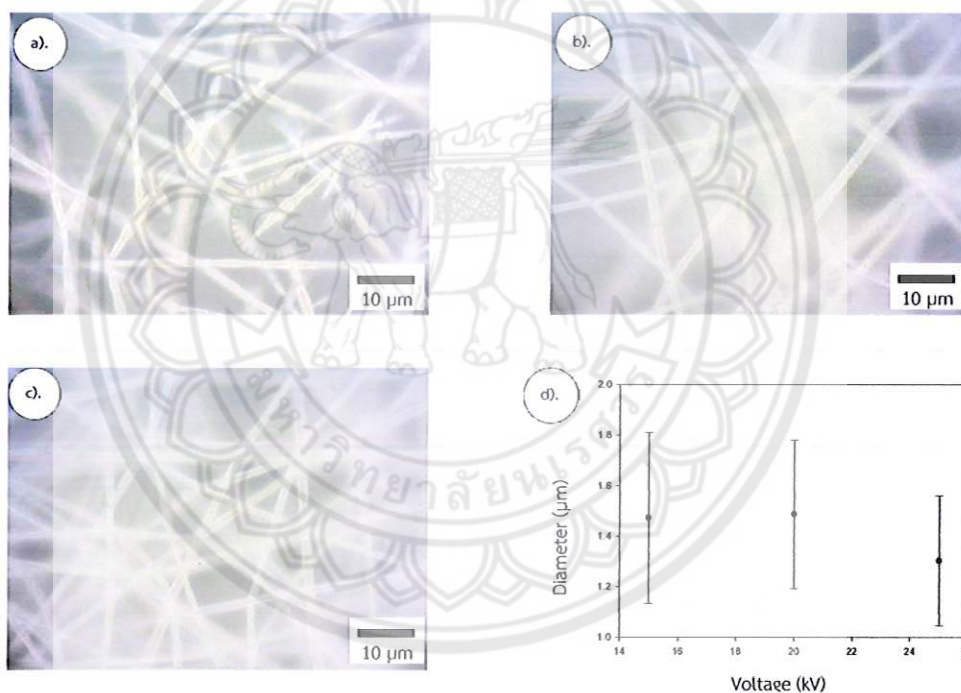


รูปที่ 4.9 ภาพแสดงลักษณะเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปเรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์เจลต่อเวลาบ่มเจล

4.2 ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากจากเรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์เจล

จากการทดลองผลกระทบของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอลฟอร์มาลดีไฮด์เจล โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อฟอร์มาลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ 12 เซนติเมตร และอัตราการไหลของ 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ทำการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ จากการศึกษาพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทุกค่าสามารถทำให้เกิดเส้นใยได้และเส้นใยที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่แตกต่างกันมากคือ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 15 20 และ 25 กิโลโวลต์ ขนาดของเส้นใยที่ได้คือ 1.4 ± 0.3 1.4 ± 0.2 และ 1.3 ± 0.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ รูปที่ 4.8 a) ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ พบว่าเส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ เป็นปัดอง ขาด ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าที่ให้ไปอาจไม่เพียงพอที่จะเอาชนะความหนืดของเรซอซินอล ฟอร์มาลดีไฮด์เจลได้จึงทำให้เส้นใยหลุดจากปลายเข็มได้อย่างไม่ต่อเนื่อง สำหรับที่

ศักย์ไฟฟ้า 20 และ 25 กิโลโวลต์ ลักษณะเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยวไม่แตกต่างกันมากนักคือ ฝิวเรียบ ไม่มีเม็ดปิดสบนเส้นใย ซึ่งที่ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าที่ 20 กิโลโวลต์ เล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7, 8, 10, 19] เนื่องจากเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับจะทำให้มีแรงทางไฟฟ้าผลักระบายออกมาจากปลายเข็มเพิ่มขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีการยึดของสารละลายมากขึ้นส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง ในส่วนการกระจายขนาดของเส้นใยนั้นมีความโน้มถ่วงลดลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยทำให้สารที่ออกมาจากปลายเข็มมีแรงในการยึดตัวของสารที่ไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้เส้นใยมีการกระจายขนาดได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [8, 19, 21-23]

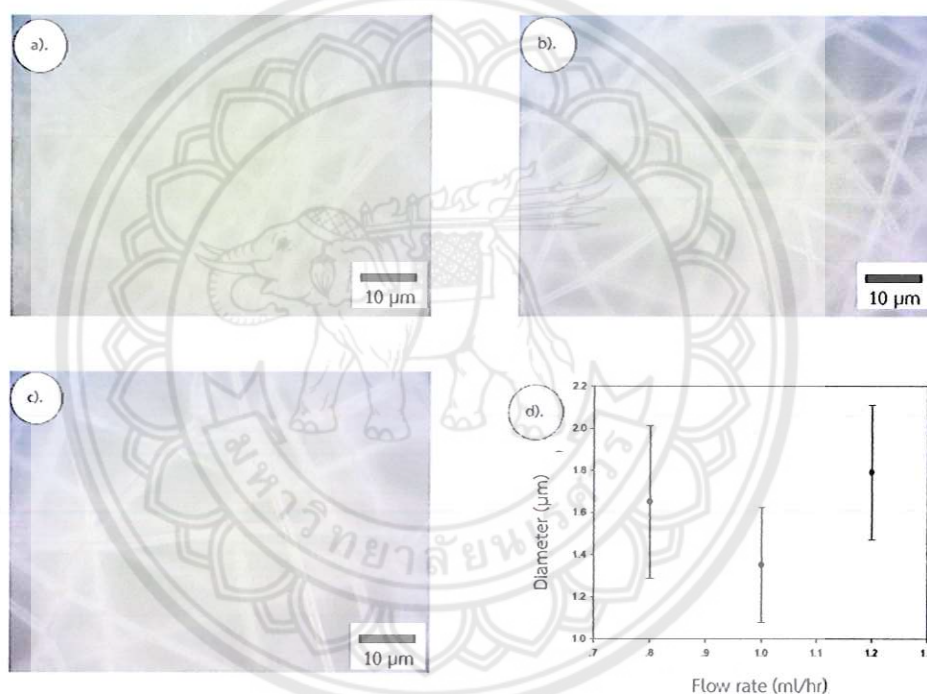


รูปที่ 4.10 ลักษณะเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่าง 12 เซนติเมตร และศักย์ไฟฟ้า a) 15 กิโลโวลต์ b) 20 กิโลโวลต์ c) 25 กิโลโวลต์ และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

4.3 ผลกระทบของอัตราการไหลต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล

จากการทดลองผลของอัตราการไหล ต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล โดยทำการปรับอัตราการไหลของที่ 0.8 1.0 และ 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยควบคุมปัจจัยดังต่อไปนี้ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000

ต่อน้ำ 0.5 ระยะห่าง 12 เซนติเมตร และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ จากผลการทดลองพบว่าในทุกสภาวะสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ โดยเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.11 และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารเป็น 0.8 1.0 และ 1.2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้คือ 1.6 ± 0.3 1.3 ± 0.2 และ 1.7 ± 0.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลให้ขนาดของขนาดเส้นใยใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากสารที่ออกมาจากปลายเข็มที่มีอัตราการไหลมากจะมีปริมาณสารออกมาเยอะส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นและการที่อัตราการไหลของสารมากขึ้นยังทำให้การระเหยของตัวทำละลายในเจลมีไม่มากพอจึงทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [7, 8, 19, 22-23]

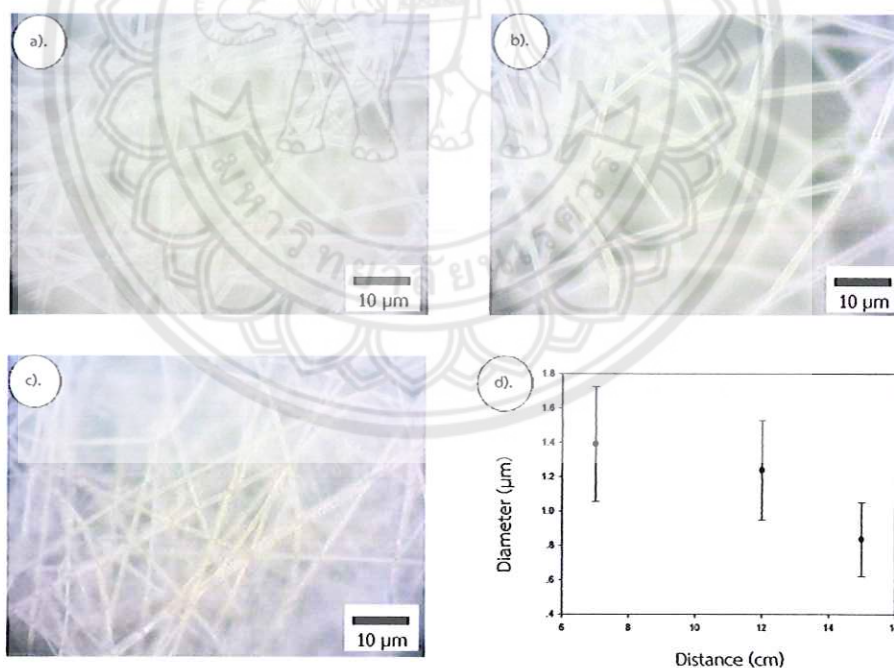


รูปที่ 4.11 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และอัตราการไหล a) 0.8 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง b) 1.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง c) 1.2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

4.4 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล

จากการทดลองผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้ คืออัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อ

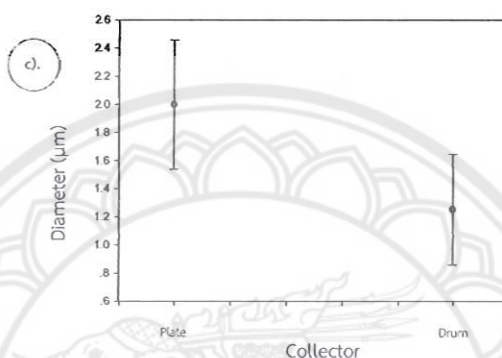
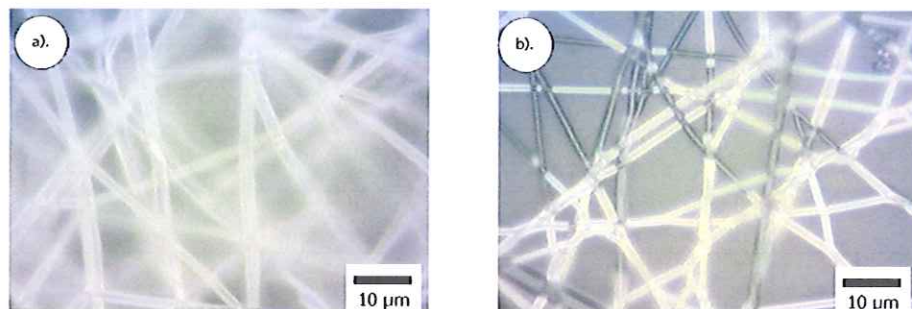
ชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยทำการปรับระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับตัวรองรับที่ 7 12 และ 15 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่าในทุกสภาวะสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ โดยเส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นเดี่ยวและเส้นใยยาวต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.12 และพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับที่ 7 12 และ 15 เซนติเมตร ขนาดของเส้นใยที่ได้คือ 1.3 ± 0.3 1.2 ± 0.2 และ 0.8 ± 0.2 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มระยะห่างจาก 7 เซนติเมตร เป็น 12 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างจาก 12 เซนติเมตร เป็น 15 เซนติเมตร เส้นใยที่ได้เล็กลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเดิมแสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับส่งผลต่อขนาดเส้นใยอย่างมาก นอกจากนี้พบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับยังส่งผลให้การเกิดเม็ดปิดสับบนเส้นใยน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [7, 8, 22] ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับฐานรองรับที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ตัวทำละลายสามารถระเหยได้อย่างสมบูรณ์หรือ มีเวลาให้ตัวทำละลายในเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลสามารถระเหยได้มากขึ้น



รูปที่ 4.12 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และระยะห่าง a) 7 เซนติเมตร b) 12 เซนติเมตร c) 15 เซนติเมตร และ d) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

4.5 ผลกระทบของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับต่อลักษณะเส้นใยเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล

จากการทดลองผลของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับต่อลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอินอล พอร์มัลดีไฮด์ โดยควบคุมปัจจัยต่อไปนี้คือ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 ระยะห่าง 12 เซนติเมตร อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยเปรียบเทียบระหว่างฐานรองรับแบบแผ่นและแบบลูกกลิ้ง จากผลการทดลองพบว่าฐานรองรับทั้งสองชนิดสามารถรองรับให้เส้นใยตกลงบนฐานรองรับได้ และลักษณะทางกายภาพของเส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องเหมือนกัน แต่ที่ต่างกันคือลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยบนฐานรองรับดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าขนาดของเส้นใยที่ได้บนลูกกลิ้งคือ 1.2 ± 0.3 ไมโครเมตร และขนาดเส้นใยที่ได้บนฐานแบบแผ่นคือ 1.9 ± 0.4 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นใยที่ขึ้นรูปบนฐานรองรับแบบลูกกลิ้งมีขนาดเล็กกว่าและมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าเส้นใยที่ขึ้นรูปบนฐานรองรับแบบแผ่น เนื่องจากฐานรองรับแบบลูกกลิ้งมีการเคลื่อนไหวของฐานอยู่ตลอดเวลาทำให้สารที่ตกลงบนฐานรองรับสามารถระเหยได้มากกว่าเมื่อเทียบกับฐานรองรับแบบแผ่นซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [24]



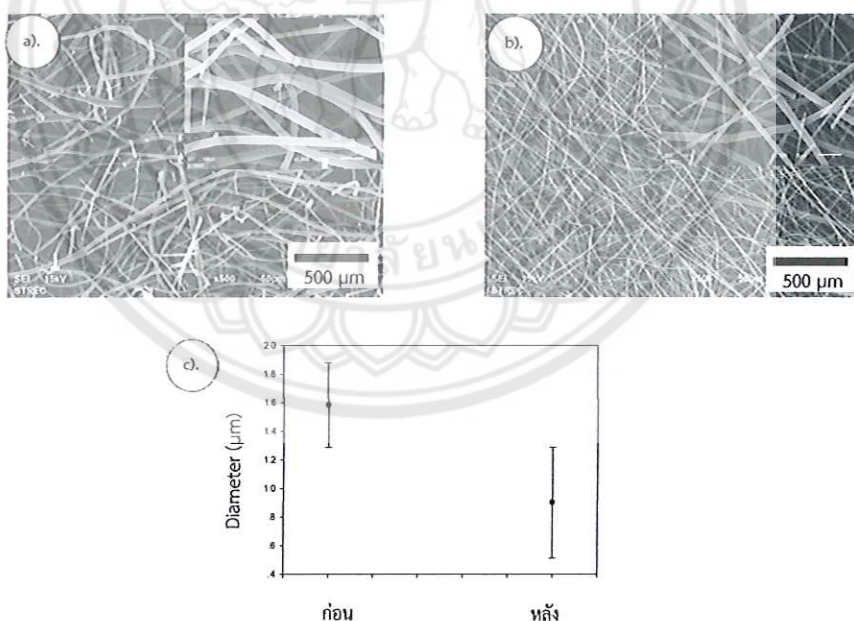
รูปที่ 4.13 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อไซเตียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 12 เซนติเมตร และฐานรองรับแบบ a) แผ่น b) ลูกกลิ้ง และ c) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การขึ้นรูปเส้นใยจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเส้นใยมากที่สุดคืออัตราส่วนโดยโมลของสาร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องจึงทำให้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยาโดยตรงมีผลกระทบมากกว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะภายนอกคือ ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหล ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ และอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับ ซึ่งส่งผลให้ขนาดเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลมีค่าใกล้เคียงกัน และยังมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่บ้าง เนื่องจากกล่องที่เราใช้เป็นกล่องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งยังมีความละเอียดไม่มากเท่ากับกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และในแต่ละปัจจัยยังคงมีข้อจำกัดซึ่งเป็นช่วงการทดลองที่ไม่ได้อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้ เช่นเรื่องของระยะห่าง ถ้าระยะห่างที่มากเกินไปก็อาจจะทำให้เส้นใยที่ขึ้นรูปขาดและไม่สามารถเป็นเส้นใยที่ยาวต่อเนื่องได้ซึ่งในงานวิจัยนี้ทดลองระยะห่างอยู่ในช่วง 7-15 เซนติเมตรซึ่งยังไม่เห็นข้อจำกัดของตัวแปรนี้

4.6 คุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล

4.6.1 ผลจากการเผาแบบไพโรไลซิส

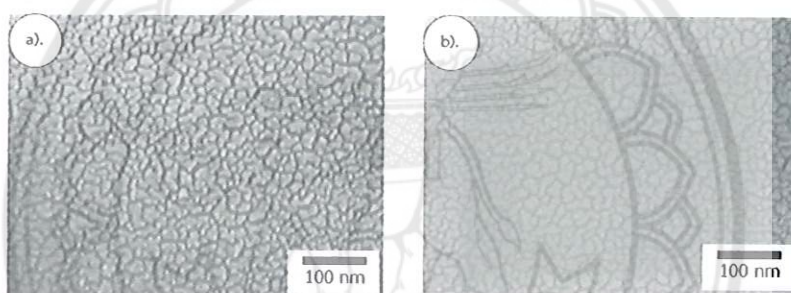
ก่อนการเผาแบบไพโรไลซิสขนาดเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 12 เซนติเมตร บนฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง มีขนาด 1.5 ± 0.2 ไมโครเมตร หลังจากเผาแบบไพโรไลซิสภายใต้แก๊สไนโตรเจน 750 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 135 มิลลิลิตรต่อนาที มีขนาด 0.9 ± 0.3 ไมโครเมตร ซึ่งจะเห็นว่าหลังจากเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลผ่านการเผาแบบไพโรไลซิส เส้นใยจะมีขนาดเล็กกลงดังแสดงในรูปที่ 4.14 เนื่องจากเมื่อเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้จากความร้อนที่ป้อนไนโตรเจน 750 องศาเซลเซียสเข้าสู่ระบบ สารเคมีทุกตัวจะเกิดการเผาไหม้กลายเป็นก๊าซทั้งหมดมีเพียงแค่อะตอมที่สามารถทนความร้อนของก๊าซไนโตรเจนได้ จึงกลายเป็นเส้นใยคาร์บอนที่อะตอมขยับตัวเข้ามาชิดกันแทนที่สารที่ถูกเผาออกไป [20] ทำให้เส้นใยคาร์บอนที่ได้มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล



รูปที่ 4.14 ลักษณะเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 12 เซนติเมตร บนฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง a) SEM ก่อนเผา b) SEM หลังเผา และ c) ภาพแสดงขนาดและการกระจายตัวของเส้นใย

4.6.2 ผลจากเครื่องมือการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว โดยใช้เทคนิค BET

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (BET) โดยจะทำการเปรียบเทียบเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลที่มีการเติมน้ำและไม่เติมน้ำ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ใช้ฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส พบว่าผลของเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมโดยมีการเติมน้ำ จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าที่ไม่มีการเติมน้ำ โดยมีรูปจาก FE-SEM สนับสนุนซึ่งแสดงความแตกต่างของช่องว่างดังแสดงในรูป 4.15 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมน้ำเข้าไปในเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล ทำให้น้ำเข้าไปแทรกตัวระหว่างการเกิดปฏิกิริยาของเรซอซินอลและพอร์มัลดีไฮด์ จึงทำให้เกิดช่องว่างและเกิดรูพรุนที่มากกว่า [7] โดยพบว่าพื้นที่ผิวที่ได้สูงถึง 644.4 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับ [7, 25]

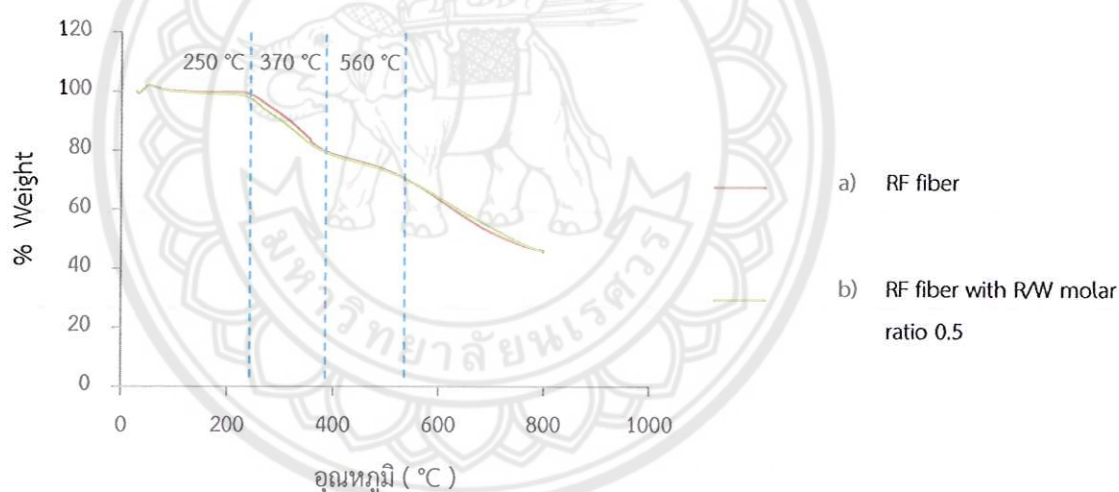


รูปที่ 4.15 ภาพ FE-SEM ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 อัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 12 เซนติเมตร a) อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 และ b) ไม่ได้เติมน้ำ

4.6.3 ผลจากเครื่องมือการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีโดยใช้เทคนิค TGA

จากผลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA (Thermo gravimetric Analysis) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลในรูปแบบของเส้นใยต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ 0.5 และไม่ได้เติมน้ำ โดยกำหนดให้อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ระยะห่าง 12 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และใช้ฐานรองรับแบบลูกกลิ้ง ดังแสดงในรูป 4.13 a) และ b) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมน้ำจะเห็นได้จากกราฟเส้นสีแดงกับเส้นสีเขียว นั่นคือลักษณะของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ในรูปแบบของเส้นใย ซึ่งลักษณะแนวโน้มของกราฟนั้นมีลักษณะการหายไปของน้ำหนักที่ใกล้เคียงกันมาก โดยผลของ

เส้นกราฟเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ในแบบผงก็มีลักษณะที่เหมือนกันนั้นแสดงว่าการเติมน้ำลงไปไม่ส่งผลในการวิเคราะห์น้ำหนัก เนื่องจากน้ำหนักที่เติมลงไปนั้นมีปริมาณน้อยจึงทำให้เกิดการระเหยในระหว่างกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์จะค่อยๆ เริ่มลดลงซึ่งจะมีการลดลงเป็น 3 ช่วงหลักๆ คือ ที่อุณหภูมิ 250 370 และ 560 องศาเซลเซียส ซึ่งแต่ละช่วงสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนตรงตำแหน่งกลุ่มไฮดรอกซีเมทิล (hydroxymethyl group) ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนตรงตำแหน่งพันธะเมทิลีน (methylene bridge) และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 560 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนตรงตำแหน่งของพันธะ OH ของกลุ่มฟีนอล [24] หลังจากนั้นก็จะลดลงเพียงเล็กน้อยโดยมีร้อยละของคาร์บอนที่เหลืออยู่ 45.93เปอร์เซ็นต์ หลังจากไฟโรไลซิส 800 องศาเซลเซียส โดยกลไกการสลายตัวทางความร้อนของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 เทอร์โมแกรมของเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต โดยทำการศึกษาและควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อน้ำ ศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของสารละลายระหว่างปลายเข็มกับฐานรองรับ และอุปกรณ์ที่ใช้เป็นฐานรองรับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อโซเดียมคาร์บอเนต ศักย์ไฟฟ้า และการเพิ่มระยะห่าง มีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดลดลง สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ต่อน้ำ และอัตราการไหลมีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้น ส่วนสภาวะที่ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กที่สุดสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลคือ อัตราส่วนโดยโมลของเรซอซินอลต่อพอร์มัลดีไฮด์ 0.5 ต่อโซเดียมคาร์บอเนต 2000 ต่อน้ำ 0.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 12 เซนติเมตร และอัตราการไหล 0.8 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่ผ่านการเผาแบบไพโรไลซิส พบว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.9 ± 0.3 ไมโครเมตร นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจลด้วยผ่านการเผาแบบไพโรไลซิส และการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET พบว่าเมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ทำให้เส้นใยที่ขึ้นรูปจากเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง และเส้นใยเกิดการแตกหักเล็กน้อย แล้วเมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวโดยใช้เทคนิค BET พบว่าพื้นที่ผิวของเส้นใย สูงถึง 644.4 ตารางเมตรต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการวัดขนาดของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เนื่องจากกล้องที่เราใช้เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยังมีความละเอียดไม่มากเท่ากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

5.2.2 ควรมีการวัดค่าความหนืดของเรซอซินอล พอร์มัลไฮด์เจลในสภาวะที่สามารถขึ้นรูปได้ เพื่อที่จะได้รู้แน่ชัดว่าช่วงของการขึ้นรูปมีค่าความหนืดอยู่ที่เท่าไร

5.2.3 ในการศึกษาต่อจากงานวิจัยนี้ควรมีการทดลองหาอัตราส่วนของสารตั้งต้นเพิ่มเติม เพื่อให้ได้ลักษณะของเส้นใยที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวแบบเมโซพอร์

5.2.4 ควรนำเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากการไพโรไลซิส ไปทำการแอคติเวตคาร์บอนด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับให้มากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

- [1] นาโนเทคโนโลยี :The next small thing. วารสาร CORPORATE THAILAND ธันวาคม 2544, 84-86.
- [2] ผศ. มาณพ ปานะโปย และคณะ. (2548). การพัฒนาผลิตภัณฑ์สิ่งทอนำความร้อนจากเส้นใยนาโนคาร์บอน. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, จังหวัดนครปฐม.
- [3] Hae Joon Lee, Jae Hwa Song, Jung Hyun Kim. (2540). Synthesis of resorcinol/formaldehyde gel particles by the sol-emulsion-gel technique. *Materials letters*(37), 197-200
- [4] Toshihide Horikawa, Jun'ichi Hayashi, Katsuhiko Muroyama. (2548). Size control and characterization of spherical carbon aerogel particles from resorcinol-formaldehyde resin. *Carbon*(42), 169-175.
- [5] Shaheen A. Al-Muhtaseb and Jame A. Ritter. (2546). Preparation and Properties of ResorcinolFormaldehyde Organic and Carbon Gels. *Advanced Materials*, vol. 15, 101-114.
- [6] C. Lin and J.A Ritter. (2540). Effect of synthesis pH on the structure of carbon xerogels. *Carbon* Vol. 35, No.9, 1271-1278.
- [7] พนิดนาฏ อุบลเลิศ. (2554). การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์ เจลเปล่าและที่เติมอะลูมิเนียม .คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
- [8] ธนาธิป เปียงเปี้ย , ศลิษา สังข์ยก , อังศุมาลี กัมปนาท (2556). การสังเคราะห์เส้นใยกลวงของไททานเนียมไดออกไซด์โดยเส้นใยเรซอซินอลพอร์มัลดีไฮด์เจลเป็นแม่แบบ. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, จังหวัดพิษณุโลก.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. (2553). ภาพรวมของนาโนเทคโนโลยีในปัจจุบันและอนาคต. ในสารานุกรมไทย สำหรับเยาวชน, (เล่มที่ 32). สำนักพิมพ์ สำนักงานกลาง หอรัษฎการพิพัฒน์ ในพระบรมมหาราชวัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
- [10] ภก. ญัฐธัญ เจริญศรีวิไลลักษณ์. การประยุกต์ใช้โอเล็กโตรสปินนิงพอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์. ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรมคณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, จังหวัดนครปฐม.
- [11] Zheng Ming Huang, Y. Z. Zhang and M. Kotaki, S.Ramakrishna. (2546). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites science and technology*(63), 2223-2253.
- [12] R.W. Pekala. (2541). *Non-Cryst. Solids*, Vol. 74, pp. 225.
- [13] R.W. Pekala. (2532) . US Patent 4873218.
- [14] อัจฉราพร ศรีอ่อน. (2553). การเตรียมเซรามิกอะลูมินาพอรุนเพื่อใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, จังหวัดเชียงใหม่.
- [15] นางนงภัส โฆษวิทิตกุล. (2555). คู่มือข้อมูลเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง. ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา.
- [16] จตุรนต์ ศุภผล. (2550). การศึกษาในรายละเอียดของการสังเคราะห์เส้นใยไทเทเนียมหรือไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดนาโน ด้วยเทคโนโลยีโซล เจล ผสานกับการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิต. สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จังหวัดกรุงเทพมหานคร.
- [17] ชวัลลักษณ์ คาจุมพล. (2555). การย่อยสลายสีย้อมรีแอกทีฟ (สีแดง เบอร์ 3) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบเปียกแบบใช้แสงร่วม บนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-RH-MCM-41 โดยการใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design (BBD). ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [18] H. Tamon, H. Ishizaka, H. Araki, T. Okazaki, M. Okazaki. (2541). Control of mesoporous structure of organic and carbon aerogels. *Carbon*(36), No. 9, 1257-1262.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [19] Quynh P. Pham, Upma Sharma, Ph.D. and Antonios G. Mikos. (2549). Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review. *Tissue engineering*(12), No.5, 1197-1211.
- [20] เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์. (2551). การดัดแปลงในขั้นตอนการทำเจลสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติความพรุนเมโซพอร์ของรีซอซินอลเฟอฟูรอลคาร์บอนไครโอเจล. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. ปีที่ 25 (ฉบับที่ 3 กันยายน 2551), 30-35.
- [21] Katarzyna Z. Gaca, Jan Sefcik (2556). Mechanism and kinetics of nanostructure evolution during early stages of resorcinol–formaldehyde polymerization. Department of Chemical and Process Engineering, University of Strathclyde.
- [22] ธนโชติ ธรรมชาติ. (2553). การเตรียมและการประเมินผลเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ที่บรรจุสารจุลชีพ. สาขาวิทยาศาสตร์ทางการเกษตรบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [23] พิชราภรณ์ ไชยศรี. ผลของบางปัจจัยต่อลักษณะเส้นใยโพลีคาโพรแลคโตนอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตด้วยเครื่อง KKU drum electrospinning unit. *วารสารวิจัย มข*. ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 เมษายน 2554.
- [24] Qihui Zhou, Min Bao, Huihua Yuan, Shifang Zhao , Wen Dong , Yanzhong Zhang. (2556). Implication of stable jet length in electrospinning for collecting wellaligned ultrafine PLLA fibers. College of Chemistry, Chemical Engineering and Biotechnology, Donghua University.
- [25] สุพะไชย์ จินดาวุฒิกุล . การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* ปีที่ 60 ฉบับที่ 189



ภาคผนวก ผลการขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล

ตารางที่ 1 ตารางแสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล

molar ratio			การขึ้นรูป		ลักษณะเส้นใยเรซอซินอล พอร์มัลดีไฮด์เจล	หมายเหตุ
R/F	R/C	R/W	ได้	ไม่ได้		
0.5	2000	0.5	✓		ลักษณะเส้นใยมีขนาดเล็ก เส้นเดี่ยว และยาวต่อเนื่อง	สภาวะที่เหมาะสมที่สุด
		1	✓		ลักษณะเส้นใยมีขนาดเล็ก ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-
		2	✓		ลักษณะเส้นใยมีขนาดเล็ก ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-
0.5	1000	0.5		✓	ไม่เป็นเส้นใย	-
		1		✓	ไม่เป็นเส้นใย	-
		2		✓	ไม่เป็นเส้นใย	-
0.5	500		✓		ลักษณะเส้นใยใหญ่ ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-
	1000	∞	✓		ลักษณะเส้นใยมีขนาดเล็ก ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-
	2000		✓		ลักษณะเส้นใยมีขนาดเล็ก เส้นเดี่ยว และยาวต่อเนื่อง	-
1	1000	∞	✓		ลักษณะเส้นใยใหญ่ ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-
0.25				✓	ไม่เป็นเส้นใย	-
1	2000	∞	✓		ลักษณะเส้นใยใหญ่ ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-
0.25			✓		ลักษณะเส้นใยใหญ่ ซ้อนและรวมกันคล้ายตาข่าย	-

ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวปวรวีร์ นกคล้าย
ภูมิลำเนา 227 หมู่ 3 ตำบลคลองแม่ลาย อำเภอเมือง
จังหวัดกำแพงเพชร

ประวัติการศึกษา

- จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ในราชูปถัมภ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี จังหวัดกำแพงเพชร
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail pavorravee_n@hotmail.co.th



ชื่อ นายอนุชิต ต้อเชียง
ภูมิลำเนา 679 ถนนแม่กุ ตำบลแม่กุ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเทศบาลวัดมณีไพโรสถ์ จังหวัดตาก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับชั้นปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail Lnw_ichigo@outlook.co.th