

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เส้นใยเจลาตินจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง :

ผลของสภาวะการปั่นที่มีต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นใยเฉลี่ย

**Electrospun Gelatin Fibers at High Temperatures : Effects of
Spinning Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter**



T117356



ชวลีภรณ์ ประวันโต

ณชนันท์ จันทเพชร

เลขที่.....
เลขทะเบียน...117356
ในเดือนปี 20 0 0 2554

19226131
๒.....
.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Electrospun Gelatin Fibers at High Temperatures : Effects of
Spinning Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter**



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the

Degree of Bachelor of Science (Industrial Chemistry)

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เส้นใยเจลาตินจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง : ผลของสภาวะการปั่นที่มีต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นใยเฉลี่ย

Electrospun Gelatin Fibers at High Temperatures : Effects of Spinning Conditions on Morphology and Average Fiber Diameters

ชื่อนักศึกษา นางสาวชุตีภรณ์ ประวันโต รหัส 50050307

นางสาวณัชนันท์ จันทเพชร รหัส 50050311

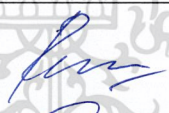
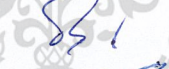

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศ.ดร.พิชญ์ ศุภผล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปทุมมา ศิริพันธ์ โนน	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ	เส้นใยเจลลาตินจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง : ผลของสภาวะการปั่นที่มีต่อสัมฐานวิทยาและขนาดเส้นใยเฉลี่ย		
นักศึกษา	นางสาวชวลีภรณ์	ประวันโต	รหัส 50050307
	นางสาวณัชนันท์	จันทเพชร	รหัส 50050311
คณะ	วิทยาศาสตร์		
ภาควิชา	เคมี		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2553		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศ.ดร.พิชญ์	ศุภผล	

บทคัดย่อ

เจลลาตินเป็นไบโอพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหารและวัสดุทางการแพทย์ในรูปแบบต่างๆ เช่น วัสดุปิดบาดแผล โครงการพิเศษนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมเส้นใยเจลลาตินขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวสูงด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง จากสารละลายเจลลาตินแบบใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นอันตรายเพื่อนำมาใช้งานทางการแพทย์ โดยเน้นศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเตรียมเส้นใย ได้แก่ ผลของความเข้มข้น (25-45%w/v) อุณหภูมิ (40-60°C) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (10-15 kV) ที่มีต่อความสามารถในการปั่นเส้นใยและลักษณะของเส้นใยที่ได้ โดยทำการศึกษาความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย ที่มีความสัมพันธ์กับสัมฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่ศึกษา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) จากการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายคงที่แม้ความเข้มข้นสารละลายและอุณหภูมิการปั่นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าความหนืดของสารละลายลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความเข้มข้นของสารละลาย จากการศึกษาสัมฐานวิทยาด้วย SEM พบว่าเส้นใยที่เตรียมได้มีบีคหรือเม็ดลูกปัด (Beads) ถ้าใช้สภาวะการเตรียมเส้นใยที่ไม่เหมาะสม สารละลายเจลลาตินที่ความเข้มข้น 35 และ 40%w/v ให้เส้นใยที่เรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Electrospun Gelatin Fibers at High Temperatures : Effects of Spinning Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter	
Students	Miss Chuliporn Prawanto	ID No. 50050307
	Miss Natchanan Juntapetch	ID No. 50050311
Degree	Bachelor of Science	
Program	Industrial Chemistry	
Academic Year	2010	
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud	
Co-advisor	Prof.Dr. Pitt Supaphol	

Abstract

Gelatin is one of the most important biopolymers that can be used in several applications, such as, wound dressing and medical applications. In this research work, feasibility study of high temperature electrospun gelatin ultra-fine fibers was carried out. In order to avoid dangerous organic solvent, water was used as the solvent. Factors affecting the fiber spinnability and fiber properties were studied, i.e., gelatin concentrations (25-45%w/v), spinning temperatures (40-60°C), and applied voltages (10-15 kV). Solution viscosity and conductivity of prepared solutions were measured. Morphology of electrospun samples was then characterized by SEM. It was found that conductivity of gelatin solution was constant when concentration and temperature of the gelatin solution were increased. Also, viscosity of gelatin solution was decreased as the temperature increased and the concentration decreased. From morphological studied by SEM, it was found that bead defects were found when the spinning conditions (i.e. concentration, temperature, and applied voltage) were not optimized. Gelatin concentration of 35%w/v and 40%w/v yielded smooth fibers. Average diameters of electrospun fibers were decreased when the gelatin concentration was increased.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่ให้ความกรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและความดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ศ.ดร. พิษณุ สุภผล อาจารย์ประจำวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาเสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่โครงการพิเศษฉบับนี้ รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน และ ผศ.ดร. ภัทรารุช มนต์วิเศษ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่กรุณาอนุเคราะห์การวิเคราะห์หลักฐานวิทยาศาสตร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ขอขอบคุณ คุณผกากรอง สังข์เสนาะ นักศึกษาปริญญาเอกวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณวัฒนา คล้ายรัศมี นักศึกษาปริญญาเอกสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้การดูแล เสียสละให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง และครอบครัว สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจอันเป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษฉบับนี้

ชุลีภรณ์ ประวันโต

ณัชนันท์ จันทเพชร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 เส้นใยนาโน.....	5
2.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	6
2.2.1 การทำงานของระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	6
2.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	7
2.2.2.1 ตัวแปรด้านสารละลาย.....	7
2.2.2.2 ตัวแปรในระบบ.....	8
2.2.2.3 สภาพแวดล้อม.....	10
2.3 ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตขั้นสูง.....	11
2.3.1 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coxial-Electrospinning).....	11
2.3.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning).....	12
2.3.3 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning).....	13
2.3.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning).....	13
2.4 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	14
2.4.1 ด้านการแพทย์และสุขภาพ.....	14
2.4.2 ด้านวัสดุศาสตร์.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ.....	15
2.4.4 ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน.....	15
2.5 ไบโพลิเมอร์ (Biopolymer).....	16
2.5.1 กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid).....	16
2.5.2 โปรตีน (Proteins).....	16
2.5.3 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) หรือ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide).....	16
2.6 กรดอะมิโน (Amino acid) และ โปรตีน (Proteins).....	17
2.6.1 โครงสร้างของกรดอะมิโนและโปรตีน.....	17
2.6.2 พันธะที่เชื่อมโยงกรดอะมิโนในโปรตีน.....	18
2.7 เจลาติน (Gelatin).....	18
2.8 การใช้วัสดุปิดบาดแผล.....	20
2.8.1 หลักการเลือกใช้วัสดุปิดบาดแผลในบาดแผลลักษณะต่างๆ.....	20
2.8.2 ลักษณะของวัสดุปิดแผลจากเจลาติน.....	20
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 สารเคมี.....	27
3.2 อุปกรณ์.....	27
3.3 เครื่องมือ.....	28
3.4 วิธีการทดลอง.....	28
3.4.1 การเตรียมสารละลายเจลาตินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสำหรับการปั่นเส้นใย ด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง.....	28
3.4.2 การเตรียมอุปกรณ์ สภาวะ และการขึ้นรูปเส้นใยเจลาตินที่ใช้น้ำเป็น ตัวทำละลายในการขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง.....	29
3.4.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology).....	32
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	33
4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของ สารละลายเจลาติน.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตราเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่มีผลต่อค่าความหนืดของ สารละลายเจลาติน.....	36
4.3 ผลการศึกษาสภาวะในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีผลต่อเส้นใยเจลาติน.....	37
4.3.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	37
4.3.2 ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	51
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	57
5.1 การศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่มีผลต่อค่านำไฟฟ้าของ สารละลายเจลาติน.....	57
5.2 การศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่มีผลต่อค่าความหนืดของ สารละลายเจลาติน.....	57
5.3 การศึกษาสภาวะในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีต่อเส้นใยเจลาติน.....	57
5.3.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	57
5.3.2 ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	58
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	58
เอกสารอ้างอิง	59
ภาคผนวก ก. การวัดค่าการนำไฟฟ้า	64
ภาคผนวก ข. การวัดค่าความหนืด	65
ภาคผนวก ค. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย	66
ประวัติผู้เขียน	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต.....	12
3.1 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 สมบัติบางประการของเจลาตินเกรด Fluka®	26
3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.4 รายการเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	28
3.5 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป.....	30
3.6 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยขนาดเล็กของเจลาติน โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย.....	30
4.1 อักษรย่อแทนสภาวะต่างๆในการทดลอง.....	34
4.2 ลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	50



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 กระบวนการผลิตเส้นใย (Fiber Manufacturing).....	1
2.1 เปรียบเทียบขนาดของเส้นผมกับเส้นใยนาโน.....	5
2.2 ส่วนประกอบของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง แก่ระบบจนกระทั่งเกิดเส้นใยนาโน.....	7
2.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เส้นใยนาโนของพอลิอะคริโลไนไตรด์ (Polyacrylonitrile, PAN)/ ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide, DMF) (ก) ความเข้มข้น 5 %w/v (ข) 7 %w/v.....	10
2.4 ขนาดของเส้นใยที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายพอลิเมอร์ PAN/DMF เมื่อใช้ ความต่างศักย์ 5, 10 และ 15 kV.....	10
2.5 หัวฉีดสำหรับปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน.....	11
2.6 แผนภาพแสดงเทคนิคปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้เคียง.....	13
2.7 การเลี้ยงเซลล์บนแผ่นเส้นใยนาโน PCL (ก) ก่อนเลี้ยง และ (ข) หลังเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งพบการเจริญของเซลล์บนเส้นใย.....	14
2.8 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก.....	15
2.9 การเคลือบเส้นใยนาโนบนเครื่องแต่งกายทหารเพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ.....	15
2.10 โครงสร้างของกรดอะมิโน (Amino acid) ชนิดต่างๆ.....	17
2.11 พันธะเปปไทด์ (Peptide bond) ในสายโพรตีน.....	18
2.12 โครงสร้างโมเลกุลของเจลาติน.....	19
2.13 โครงสร้างทริปเปอเลกซ์ของคอลลาเจน.....	19
2.14 วัสดุปิดแผลไฮโดรคอลลอยด์จากเจลาติน.....	21
2.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเจลาตินที่ได้จาก การเตรียมด้วยสารละลายเจลาตินใน 2,2,2-trifluoroethanol ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (ก) ความเข้มข้น 2.5 %w/v (ข) ความเข้มข้น 5.0 %w/v และ (ค) ความเข้มข้น 10.0 %w/v.....	21
2.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเจลาตินที่ได้จาก การเตรียมด้วยสารละลายเจลาตินในกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (ก) ความเข้มข้น 15 %w/v (ข) ความเข้มข้น 19 %w/v และ (ค) ความเข้มข้น 27 %w/v.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเจลลาติน (ก) จากการเตรียมกรดอะซิติก/2,2,2-Trifluoroethanol อัตราส่วน 90:1 (ข) กรดอะซิติก/Dimethyl suloxide อัตราส่วน 91:9.....	23
2.18 จุดกึ่งเจล (Gel point) ของสารละลายเจลลาตินที่แตกต่างกันในตัวทำละลายแต่ละชนิด.....	23
2.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) แสดงให้เห็นอนุภาคระดับนาโนของเงินที่แทรกอยู่ในเส้นใยเจลลาติน.....	24
2.21 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ.....	25
3.1 สารละลายเจลลาตินที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหลัก.....	29
3.2 การจัดอุปกรณ์สำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง.....	30
3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM).....	32
4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลลาตินที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย.....	36
4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสารละลายเจลลาตินที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย.....	37
4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสถานะ (ก) C25-T40-10.0K (ข) C25-T40-12.5K (ค) C25-T40-15.0K.....	38
4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสถานะ (ก) C25-T50-10.0K (ข) C25-T50-12.5K (ค) C25-T50-15.0K.....	39
4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสถานะ (ก) C25-T60-10.0K (ข) C25-T60-12.5K (ค) C25-T60-15.0K.....	40
4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสถานะ (ก) C30-T40-10.0K (ข) C30-T40-12.5K (ค) C30-T40-15.0K.....	41
4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสถานะ (ก) C30-T50-10.0K (ข) C30-T50-12.5K (ค) C30-T50-15.0K.....	42
4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสถานะ (ก) C30-T60-10.0K (ข) C30-T60-12.5K (ค) C30-T60-15.0K.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C35-T40-10.0K (ข) C35-T40-12.5K (ค) C35-T40-15.0K.....	44
4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C35-T50-10.0K (ข) C35-T50-12.5K (ค) C35-T50-15.0K.....	45
4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C35-T60-10.0K (ข) C35-T60-12.5K (ค) C35-T60-15.0K.....	46
4.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C40-T40-10.0K (ข) C40-T40-12.5K (ค) C40-T40-15.0K.....	47
4.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C40-T50-10.0K (ข) C40-T50-12.5K (ค) C40-T50-15.0K.....	48
4.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C40-T60-10.0K (ข) C40-T60-12.5K (ค) C40-T60-15.0K.....	49
4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C45-T60-10.0K (ข) C45-T60-12.5K (ค) C45-T60-15.0K.....	50
4.16 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm) ของแต่ละสภาวะในการทดลอง.....	53
4.17 ผลของความเข้มข้นที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	54
4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	55
4.19 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

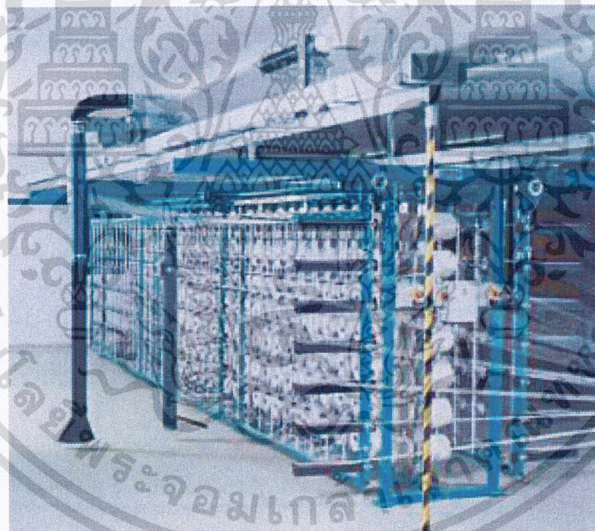
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในชีวิตประจำวันมนุษย์ใช้ประโยชน์จากเส้นใยมากมายทั้งในการทำเป็นเครื่องนุ่งห่ม เชือก ด้าย ฯลฯ เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเล็กแต่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น เส้นใยจากรังไหมมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผมประมาณ 100 ไมโครเมตร [1]

เส้นใยที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนมากถูกผลิตขึ้นมาโดยใช้กระบวนการทางกลชนิดพอลิเมอร์เหลว ออกจากขนาดเล็กก่อนจะผ่านขั้นตอนอื่นต่อไป เส้นใยที่ได้มักมีขนาดอยู่ในช่วงหลายสิบล้าน ไมโครเมตร และในกรณีที่ต้องการให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลงอย่างมาก จำเป็นต้องมีการใช้อุปกรณ์และขั้นตอนพิเศษเข้ามาช่วย [2]



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตเส้นใย (Fiber Manufacturing) [3]

วิธีการผลิตเส้นใยขนาดเล็กวิธีหนึ่งคือ การผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต หรือที่เรียกกันว่า Electrospinning Process ซึ่งย่อมาจาก Electrostatic Spinning Process กระบวนการนี้ถูกพัฒนาขึ้นมากกว่า 60 ปีแล้วโดย Formalas ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคนี้กำลังได้รับความสนใจอย่างสูง

การผลิตเส้นใยโดยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตต่างจากวิธีผลิตเส้นใยอื่นคือ กระบวนการนี้จะใช้แรงทางไฟฟ้าแทนแรงทางกล โดยพอลิเมอร์เหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในรูขนาดเล็ก จะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยสนามไฟฟ้าความแรงสูง เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น แรงผลักรนี้เรียกว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repulsive Coulombic Force เมื่อมีมากพอถึงขั้นหนึ่งก็จะไปเอาชนะแรงดึงดูดของสารละลายพอลิเมอร์ หรือ พอลิเมอร์หลอมเหลวได้ ทำให้สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกฉีดออกมา และเปลี่ยนสภาพเป็นเส้นใยได้โดยการระเหยออกของตัวทำละลาย หรือโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผลิตเส้นใยแบบไฟฟ้าสถิตมีข้อดีหลายประการคือ เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กมาก โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนานโนเมตรจนถึงประมาณหนึ่งถึงสองไมโครเมตร เรียกว่า เส้นใยขนาดนาโน (Electrospun Nanofibers) และเนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กในระดับนาโนจึงมีพื้นที่ผิวมากในขณะที่มีน้ำหนักเบา ผ้าที่ได้จากเส้นใยนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของของเหลวหรือแก๊สได้ดี สามารถนำเส้นใยนาโนนี้ไปใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น การกรอง โมเลกุล การประดิษฐ์ชุดป้องกันอาวุธเคมีและอาวุธชีวภาพของทหาร นาโนคอมพอสิต เป็นวัสดุโครงสร้างในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ และเป็นวัสดุยึดติดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น [2]

และในปัจจุบันความตื่นตัวเกี่ยวกับปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมนี้มีแนวโน้มมากขึ้นสืบเนื่องมาจากการที่โลกกำลังเผชิญกับภาวะโลกร้อน พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) หรือพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymers) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะพลาสติก พลาสติกชีวภาพจะมีสมบัติต่างๆในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงเมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ เช่น การฝังกลบ จะมีอัตราการสลายตัวที่เร็วกว่าพลาสติกโดยทั่วไป [4]

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) สามารถผลิตได้จากแหล่งที่มา 2 แบบ คือ แหล่งที่มาที่สามารถสร้างขึ้นทดแทนได้ใหม่ (Renewable Resources) เช่น จากพืชและสัตว์ ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA), เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS), เซลลูโลส (Cellulose), ไคโตซาน (Chitosan) และเจลาติน (Gelatin) อีกแหล่งที่มาคือ แหล่งปิโตรเลียม เช่น น้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS), พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) และอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (Aliphatic polyester) [5]

เจลาติน (Gelatin) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งที่มาที่สร้างขึ้นทดแทนได้ใหม่ เจลาตินมีลักษณะเป็นผงสีขาว โปร่งแสง เปราะ และไม่มรสชาติ เจลาตินเป็นโปรตีนที่ได้จากการไฮโดรไลซ์คอลลาเจน (Collagen) ที่มีอยู่ในผิวหนัง กระดูก ลำไส้บางส่วน รวมทั้งเนื้อเยื่อเกี่ยวพันของสัตว์ เช่น โค กระบือ สุกร ม้า และเกล็ดปลา มีการใช้ความร้อนและกรดหรือด่างทำให้โครงสร้างคอลลาเจนถูกทำลายและเปลี่ยนแปลงเป็นเจลาติน เจลาตินจะหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวกลับเมื่อได้รับความเย็น เมื่อละลายเจลาตินในน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูง เจลาตินสามารถก่อเจลแบบกึ่งของแข็งร่วมกับน้ำทำให้เจลาตินเกิดการบวมตัวในน้ำ องค์ประกอบทางเคมีของเจลาตินแทบจะเหมือนคอลลาเจนเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเจลาตินเป็นโปรตีนที่แปรรูปจากคอลลาเจนทำให้เจลาตินมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต ไม่เป็นพิษ และต้านเชื้อแบคทีเรีย เจลาตินสามารถนำมาเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น เครื่องสำอาง ยา อาหาร และฟิล์มถ้ายูรูป โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรมอาหารซึ่งเป็นตลาดใหญ่ส่วนตลาดที่ใหญ่รองลงมาคือ อุตสาหกรรมการผลิตยาโดยใช้เจลาตินในการเคลือบเม็ดยาและผลิตเป็นแคปซูล [6]

การขึ้นรูปเส้นใยขนาดเล็กลงมาจากเจลาตินด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้นในหลายงานวิจัยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid), เฮกซะฟลูออโรไอโซโพรพานอล (Hexafluoroisopropanol, HFIP), ไตรฟลูออโรเอทานอล (Trifluoroethanol, TFE) และ กรดฟอร์มิก (Formic acid) ในระบบตัวทำละลายเดี่ยวและการขึ้นรูปเส้นใยเจลาตินในระบบของตัวทำละลายร่วม นอกจากนี้ยังมีการปั่นเส้นใยเจลาตินด้วยไฟฟ้าสถิตในรูปแบบอื่นๆ เช่น ขึ้นรูปเป็นคอมโพสิตกับพอลิเมอร์หรือวัสดุชนิดอื่นๆ [7-9] และการเชื่อมโยงเจลาติน [10-12] เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการของเจลาตินให้ดีขึ้น

เส้นใยจากเจลาตินถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟิล์ม [13] อนุภาคในระดับนาโนหรือไมโคร (Micro-or Nanoparticles) [14] และวัสดุปิดบาดแผล (Wound Dressing) [7-9,12,15] เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและมีความสามารถในการต้านการติดเชื้อแบคทีเรีย

เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเจลาตินสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นตัวทำละลายที่เป็นอันตราย หากตกค้างอยู่ในเส้นใยอาจปลดปล่อยสู่ภายนอกและก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานเมื่อนำไปทำเป็นวัสดุทางการแพทย์เพราะต้องสัมผัสกับร่างกายโดยตรง โครงการงานพิเศษนี้จึงศึกษาการเตรียมสารละลายเจลาตินสำหรับการขึ้นรูปเป็นผืนผ้าเส้นใยเรียงตัวแบบสุ่ม (Non-woven Fabrics) ด้วยกระบวนการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยการใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นวัดค่าความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่เตรียมได้ซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และศึกษาความเป็นไปได้ในการการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสารละลายเจลาตินที่อุณหภูมิสูงตามปัจจัยดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่สารละลายเจลาติน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความน่าจะเป็นในการเตรียมสารละลายเจลาตินที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยขนาดเล็กลงด้วยวิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
2. ศึกษาสภาวะในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นในการขึ้นรูปเส้นใยขนาดเล็กลงของเจลาตินที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายและความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วยวิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับโครงการพิเศษนี้
2. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยเจลลาตินจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูง
4. ศึกษาสภาวะของสารละลายที่มีผลต่อสมบัติของสารละลายเจลลาติน ได้แก่ ความหนืด (Viscosity) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
5. ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้นและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติต่างๆของเส้นใยเจลลาตินที่เตรียมได้ ได้แก่
 - ศึกษาสัณฐานวิทยา ลักษณะของเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเจลลาตินที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ประสบความสำเร็จในขึ้นรูปเส้นใยจากเจลลาตินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง
2. สามารถเตรียมสารละลายเจลลาติน โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมกับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
3. สามารถอิเล็กทรอนิกส์ปั่น (Electrospun) เส้นใยจากเจลลาตินในการประยุกต์ใช้งานด้านชีวการแพทย์ได้จริง
4. ความรู้และข้อมูลที่ได้จากโครงการพิเศษนี้สามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาอื่นๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

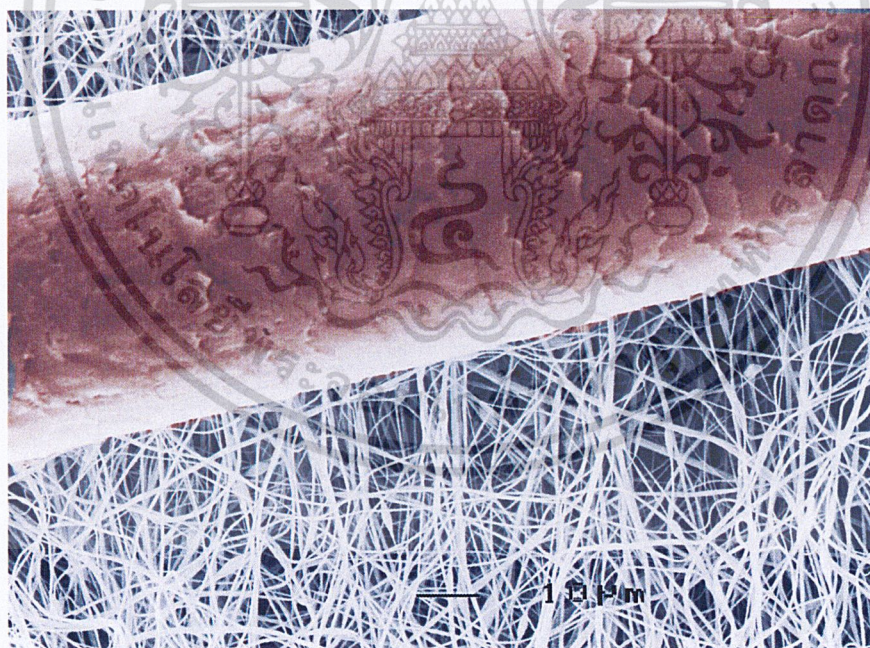
หลักการและทฤษฎี

2.1 เส้นใยนาโน (Nanofibers)

ในชีวิตประจำวันมนุษย์ใช้ประโยชน์จากเส้นใยมากมายทั้งในการทำเป็นเครื่องนุ่งห่ม เชือก ค้าย ฯลฯ เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเล็กแต่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น เส้นใยจากรังไหมมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผมประมาณ 100 ไมโครเมตร [1]

เส้นใยนาโนเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรถึงระดับ 100 นาโนเมตร มีข้อดีคือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Surface-to-volume ratio) สูง โดยเส้นใยนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร จะมีขนาดเล็กกว่าเส้นผมมากและมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเป็น 1,000 เท่าของเส้นผม

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนจากพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) ซึ่งไม่เป็นพิษและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับสิ่งมีชีวิตในด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ, วัสดุปิดบาดแผล และระบบนำส่งยา เป็นต้น



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบขนาดของเส้นผมกับเส้นใยนาโน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

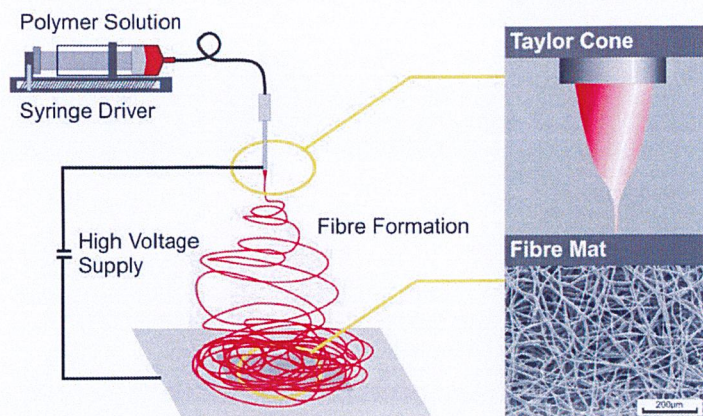
2.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)

เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต หรืออิเล็กโตรสปินนิงสามารถเตรียมเส้นใยขนาดเล็กในระดับนาโนจากพอลิเมอร์หลากหลายชนิดสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์, เกษษกรรม, วิศวกรรม, การทหารและอื่นๆ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถประดิษฐ์เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึงมากกว่า 1 ไมโครเมตร [17] โดยอาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง ในระบบพื้นฐานของการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High Voltage Power Supply) หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ (Syringe with needle) และวัสดุรองรับที่เป็น โลหะ (Metal Collector) [18]

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นระบบที่ไม่มี ความซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย และใช้งานได้ง่าย สะดวก ทั้งนี้ในระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่พัฒนาให้ดีขึ้นสามารถเพิ่มอุปกรณ์สำหรับควบคุมการไหลของสารละลาย (Syringe Pump) ซึ่งทำให้การประดิษฐ์เส้นใยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.2.1 การทำงานของระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

การทำงานของระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น เมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่ระบบ สารละลายจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะเนื่องจากแรงตึงผิว (Surface Tension) ของสารละลาย แต่เมื่อให้ความต่างศักย์กำลังสูงแก่ระบบ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลาย เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Repulsion) ในทิศตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลักมากกว่าแรงตึงผิวจะส่งผลให้รูปร่างครึ่งทรงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดยาวออกเป็นรูปร่างทรงกรวยที่เรียกว่า กรวยเทเลอร์ (Taylor's Cone) และเมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (Solution Jet) โดยลำของสารละลายนี้จะยืดยาวจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร แล้วตกลงบนวัสดุรองรับ



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง แก่ระบบจนกระทั่งเกิดเส้นใยนาโน [19]

2.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เส้นใยที่ประดิษฐ์ได้มีลักษณะหลายรูปแบบ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตลอดจนความต่อเนื่องของเส้นใยแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆซึ่งสามารถแบ่งตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อลักษณะเส้นใยได้เป็น 3 กลุ่ม [20] คือ

2.2.2.1 ตัวแปรด้านสารละลาย

สมบัติของสารละลายเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการประดิษฐ์เส้นใยนาโนอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดและรูปร่างของเส้นใย เช่น ความตึงผิวของสารละลายจะส่งผลกระทบต่อารเกิดปุ่มคล้ายลูกปัด (Beads) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนทรงกลมหรืออยู่บนเส้นใย หากความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงเกินไป จะมีผลทำให้ปริมาณปุ่มคล้ายลูกปัดลดลง

น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของสารละลาย

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นขึ้นกับความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยน้ำหนักโมเลกุลจะส่งผลอย่างมากต่อความหนืดของสารละลาย เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สายโซ่พอลิเมอร์จะยาวส่งผลทำให้มีส่วนเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ของสายโซ่พอลิเมอร์มาก ทำให้ในสารละลายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะเคลื่อนไหวสายโซ่ได้ยากทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์สูงขึ้น ความหนืดของสารละลายมีผลอย่างมากต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเช่นกัน สารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นสูง จะมีน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สูงขึ้น ความหนืดของสารละลายจะสูงขึ้นและส่งผลให้เม็ดลูกปัดของเส้นใยที่ได้จากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตลดลง เนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดมาก ส่วนเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์จะดึงรั้งการพุ่งออกของลำพอลิเมอร์ส่งผลให้บนเส้นใยมีเม็ดลูกปัดน้อย และได้เส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียบ (Smooth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fibers) ไม่มีเม็ดลูกปัด [21] โดยความหนืดต่ำที่สุดของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต คือความหนืดที่ไม่ทำให้เส้นใยที่ได้มีเม็ดลูกปัด [22-24]

แรงตึงผิว (Surface Tension)

เม็ดลูกปัดที่เกิดขึ้นบนเส้นใยที่ได้มาจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะขึ้นกับปัจจัยเรื่องแรงตึงผิวของสารละลายด้วย [25-26] เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง พื้นที่ผิวต่อหน่วยของของไหลมีมาก แรงตึงผิวของสารละลายจะสูง ส่งผลให้บริเวณปลายเข็มฉีดจะมีลักษณะเป็นหยดรูปครึ่งวงกลมของสารละลายเนื่องจากแรงตึงผิวของสารละลาย

อย่างไรก็ตามเราสามารถควบคุมแรงตึงผิวของสารละลายได้จากการเลือกตัวทำละลายด้วย เช่น การเลือกใช้เอทานอล (Ethanol) เป็นตัวทำละลายที่มีแรงตึงผิวต่ำ ส่งผลให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะเรียบไม่มีเม็ดลูกปัด

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Solution Conductivity)

การยืดออกของสารละลายพอลิเมอร์ได้มาเป็นเส้นใยจากการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะขึ้นกับประจุที่อยู่บนสารละลาย กล่าวคือเมื่อสารละลายมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะเกิดประจุในสารละลายพอลิเมอร์มาก ส่งผลให้ค่าของพอลิเมอร์ออกมาได้ง่ายขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น [27] และตัวทำละลายที่นำมาเตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์มีค่าการนำไฟฟ้าสูงจะทำให้ได้เส้นใยที่มีเม็ดลูกปัดน้อยกว่าสารละลายที่เตรียมจากตัวทำละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ

2.2.2.2 ตัวแปรในระบบ

ประกอบด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า, อัตราการไหลของสารละลาย, อุณหภูมิของสารละลาย, ชนิดของวัสดุรองรับ, ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ ตัวแปรเหล่านี้ล้วนมีผลต่อลักษณะของเส้นใย โดยเฉพาะความต่างศักย์ไฟฟ้าหากศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากจะส่งผลให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง

ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage)

โดยปกติความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตควรมากกว่า 6 kV เพื่อให้หยดของสารละลายบริเวณปลายเข็มฉีดขยายเปลี่ยนรูปร่างให้มีลักษณะเป็นกรวยเทเลอร์ [28] เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในปริมาณที่สูงแก่ระบบเราจะพบลักษณะของเม็ดลูกปัดบนเส้นใยของเรามากขึ้น [22,29-30] และในระบบที่มีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าปริมาณต่ำแก่ระบบ ความเร็วในการเปลี่ยนเป็นลำของพอลิเมอร์จะลดต่ำลงทำให้ไม่ได้ลักษณะเป็นเส้นใยของพอลิเมอร์บนวัสดุรองรับ

อัตราการไหลของสารละลาย (Feed Rate)

เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและขนาดของเม็ดลูกบิดเพิ่มมากขึ้น [31] ส่วนที่อัตราการไหลของสารละลายต่ำ ตัวทำละลายมีเวลามากพอในการระเหย ทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มมากขึ้น การปั่นสารละลายพอลิเมอร์ออกมาเป็นเส้นจะทำได้ยากขึ้น [32]

อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature of Solvent)

อุณหภูมิของสารละลายพอลิเมอร์ที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการระเหยของตัวทำละลายในสารละลายเพิ่มมากขึ้นและทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เส้นใยที่ได้จะมีปริมาณที่มากขึ้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยลดลง

ชนิดของวัสดุรองรับ (Type of Collector)

วัสดุรองรับอาจมีลักษณะเป็นแผ่นตั้งฉาก (Screen) หรือรูปทรงกระบอก (Drum) ส่วนมากจะทำจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า จึงใช้แผ่นอลูมิเนียมติดลงบนวัสดุรองรับเพื่อให้วัสดุรองรับสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยล้าของสารละลายพอลิเมอร์จะพุ่งออกจากปลายเข็มฉีดยามาตกลงแผ่นอลูมิเนียมที่ติดลงบนวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตามการใช้งานวัสดุรองรับแบบหมุนจะทำให้ได้เส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวของวัสดุรองรับซึ่งต่างจากการใช้วัสดุรองรับแบบฉากที่เส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม [33-34]

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับ

เมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดกับวัสดุรองรับลดลง ละของพอลิเมอร์จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับน้อยลง แต่ระยะทางที่สั้นลงทำให้เวลาในการระเหยออกของตัวทำละลายลดลง สารละลายตกลงบนวัสดุรองรับก่อนจะแห้งตัวได้ดีและอาจพบลักษณะของเม็ดลูกบิดบนเส้นใยได้ง่ายขึ้น

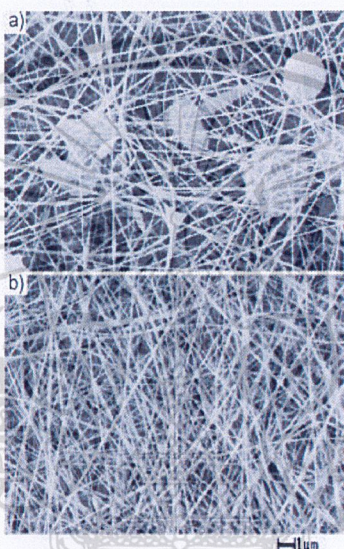
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มโลหะ

เข็มฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กจะเกิดปัญหาในการผลักให้สารละลายพอลิเมอร์ออกจากเข็มฉีดเนื่องจากเกิดการอุดตันของสารละลายพอลิเมอร์บริเวณเข็มโลหะได้ง่าย [35] แต่เส้นใยที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กเมื่อเทียบกับการใช้เข็มโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่

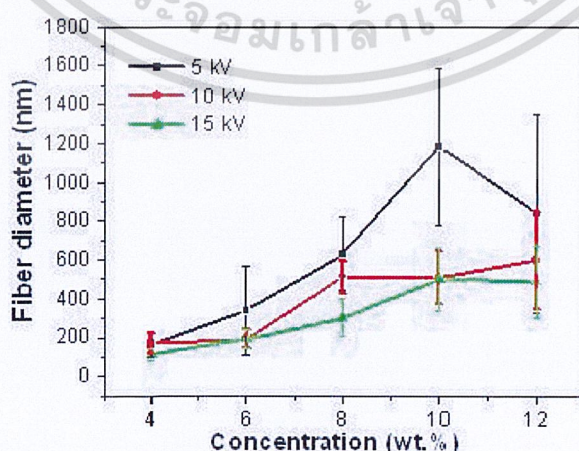
2.2.2.3 สภาพแวดล้อม

สภาพแวดล้อมมีผลต่อสารละลายและทำให้ลักษณะของเส้นใยเปลี่ยนไป เช่น ในกรณีที่มีความเข้มข้นในระบบสูงจะเกิดปรากฏการณ์คล้ายกับมีการควบแน่นเป็นหยดน้ำบนผิวของเส้นใย ทำให้เกิดรูพรุนบนเส้นใยในปริมาณมากขึ้น

ดังนั้นการนำวิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมาใช้ประดิษฐ์เส้นใยนาโนต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด เพื่อให้ได้เส้นใยที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งหากมีระบบที่ควบคุมปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ได้เป็นอย่างดีและแม่นยำจะส่งผลให้การประดิษฐ์เส้นใยมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 2.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เส้นใยนาโนของพอลิอะคริโลไนไตรด์ (Polyacrylonitrile, PAN)/ ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide, DMF) (ก) ความเข้มข้น 5 %w/v (ข) 7 %w/v [17]



รูปที่ 2.4 ขนาดของเส้นใยที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายพอลิเมอร์ PAN/DMF เมื่อใช้

ความต่างศักย์ 5, 10 และ 15 kV [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

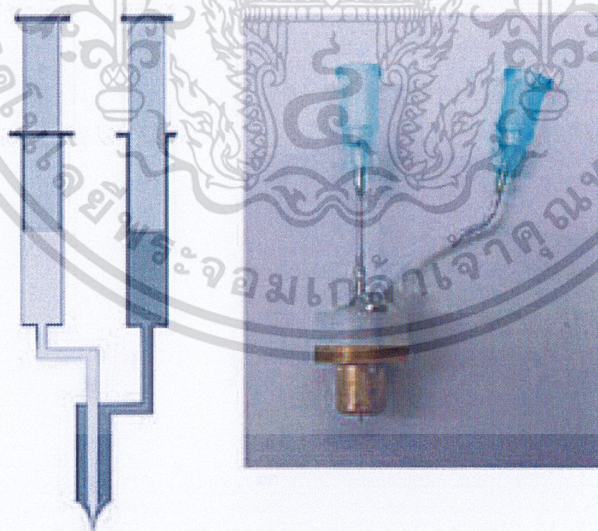
2.3 ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตขั้นสูง

ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตขั้นสูงนี้ ได้แก่ ปั่นการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning, Coax-ES), การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning, Melt-ES), การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Filed Electrospinning, NF-ES), และการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning, Magneto-ES)

2.3.1 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning)

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning) เป็นการรวมเอาโมเลกุล, สาร, วัตถุ หรือส่วนประกอบอื่นๆ เข้ากับเส้นใยนาโนซึ่งไม่สามารถทำโดยการใช้เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบพื้นฐานเนื่องจากมีปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ

1. ปัญหาความต้องการในการเก็บสารที่อยู่ร่วมกับเส้นใยนาโน เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์, โปรตีน, ยา, ไวรัส, และแบคทีเรีย ในสถานะแวดล้อมของเหลวให้สามารถคงสภาพหน้าที่หรือสมบัติเดิมของสารนั้นทำได้ยาก
2. ปัญหาเรื่องน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่จะใช้เป็นส่วนแกนในของเส้นใย (Core fiber) ซึ่งส่วนมากจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก



รูปที่ 2.5 หัวฉีดสำหรับปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน [36]

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนใช้หัวฉีด (Nozzle) ที่มีแกนขนานร่วมกันซ้อนกันอยู่ 2 อัน (รูปที่ 2.5) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับทั้งสองหัวฉีดมีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดการหลอมหยดของสารประกอบ ทำให้ลำของพอลิเมอร์ถูกขับพุ่งออกมาจากหัวฉีดและเกิดเป็นเส้นใยนาโนผสมแบบแกนใน-เปลือกนอก (Core-Shell Nanofiber)

2.3.2 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning)

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลายเป็นการประดิษฐ์เส้นใยนาโนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจากพอลิเมอร์ที่หลอมละลายโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย ข้อดีของการประดิษฐ์เส้นใยนาโนแบบหลอมละลายคือ เป็นกระบวนการเตรียมเส้นใยที่ง่าย กำลังการผลิตสูง ต้นทุนต่ำและช่วยลดความเสี่ยงจากการได้รับสารพิษจากตัวทำละลายเหมาะที่จะใช้ในการเตรียมเส้นใยนาโนสำหรับประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ตารางที่ 2.1 พอลิเมอร์และตัวทำละลายที่ใช้ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [37]

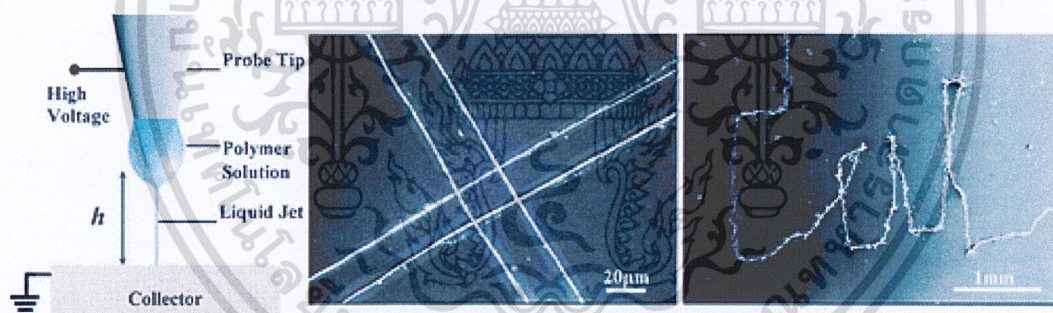
พอลิเมอร์	ตัวทำละลาย
เรยอน (Rayon)	อะซิโตน (Acetone) และแอลกอฮอล์ (Alcohol)
อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin)	ไดเมทิลฟอมาไมด์ (Dimethyl formamide, DMF)
พอลิเอทิลีน (PE)	หลอมละลาย (Melt)
เคพลา (Kevlar)	กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)
พอลิเอสเทอร์ (Polyester)	หลอมละลาย (Melt)
ดีเอ็นเอ (DNA)	70:30 น้ำ:เอทานอล (Ethanol)
สไตรีน-บิวตะไดอิน-สไตรีน ไตรบล็อก (Styrene-Butadiene-Styrene Triblock)	75:25 เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF)/ไดเมทิลฟอมาไมด์ (Dimethyl formamide, DMF)
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	-
พอลิอะคริโรไนไตรด์ (PAN)	ไดเมทิลฟอมาไมด์ (Dimethyl formamide, DMF)
พอลิอะคริโรไนไตรด์/พอลิเอทิลีนออกไซด์ (PAN/PEO)	คลอโรฟอร์ม (Chloroform)
พอลิสไตรีน (PS)	เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Field Electrospinning)

เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้สามารถประดิษฐ์เส้นใยนาโนที่เป็นเส้นตรงและเส้นใยที่มีความต่อเนื่อง รวมถึงสามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ เทคนิคนี้แตกต่างจากเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบมาตรฐานซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้เส้นใยนาโนเกิดขึ้นแบบสุ่มและไม่เป็นระเบียบ

ในกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ ปลายของเข็มถูกจุ่มลงไปในสารละลายพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดหยดของสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ที่ปลายของเข็มที่เชื่อมกับแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงที่ปลายของเข็มที่มีหยดของสารละลายพอลิเมอร์ติดอยู่ จะเกิดแรงขับเคลื่อนให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกมาเป็นลำ และจะยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร ตกลงบนวัสดุรองรับที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ได้เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง และสามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของเส้นใยนาโนได้อย่างแม่นยำ โดยแผ่นรองรับจะอยู่ใกล้ปลายเข็มมากจึงสามารถใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังต่ำขนาดประมาณ 600 V เท่านั้น ซึ่งต่างจากเทคนิคปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบดั้งเดิมที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงขนาด 10-50 kV ในกระบวนการประดิษฐ์เส้นใย



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงเทคนิคปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ [38]

2.3.4 การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning)

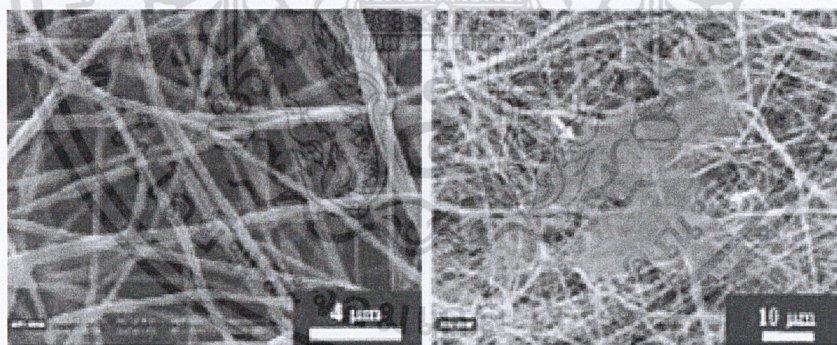
การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-electrospinning, Magneto-ES) เป็นการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ใช้ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กช่วยในการควบคุมกระบวนการเกิดเส้นใย แรงจากสนามแม่เหล็กนอกจากจะช่วยในการจัดเรียงตัวของเส้นใยในระดับนาโนทำได้ง่ายขึ้นแล้วยังจะช่วยลดขนาดและเพิ่มความสม่ำเสมอของเส้นใยได้

2.4 การประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เส้นใยนาโนที่เตรียมด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสามารถประยุกต์ใช้ในด้าน เช่น ด้านการแพทย์และสุขภาพ ด้านวัสดุศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ และด้านวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน เป็นต้น

2.4.1 ด้านการแพทย์และสุขภาพ

เส้นใยนาโนที่ประดิษฐ์ขึ้นจากพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน (Chitosan), ไหม (Silk), เจลาติน (Gelatin), คอลลาเจน (Collagen) รวมทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์บางประเภท เช่น พอลิแคปโรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL), กรดพอลิแลคติก (Polylactic acid, PLA) และกรดพอลิไกลคอลิก (Polyglycolic acid, PGA) เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับร่างกายของมนุษย์ได้ เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) นอกจากนี้เส้นใยจากพอลิเมอร์บางชนิดยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) ซึ่งทำให้เส้นใยเหล่านี้สามารถย่อยสลายตัวเองภายในร่างกายของเราได้เหมือนไหมเย็บแผลที่ใช้ในปัจจุบัน ดังนั้นเส้นใยนาโนเหล่านี้จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue engineering) เช่น หลอดเลือดเทียม เนื้อเยื่อเทียมสำหรับซ่อมแซมกระดูกอ่อนและเส้นประสาท และผ้าปิดแผล (Wound dressing) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อนำเส้นใยนาโนมาใช้เป็นระบบนำส่งยา (Drug delivery system) และเครื่องสำอางอีกด้วย



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.7 การเลี้ยงเซลล์บนแผ่นเส้นใยนาโน PCL (ก) ก่อนเลี้ยง และ (ข) หลังเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 3 วัน ซึ่งพบการเจริญของเซลล์บนเส้นใย [39]

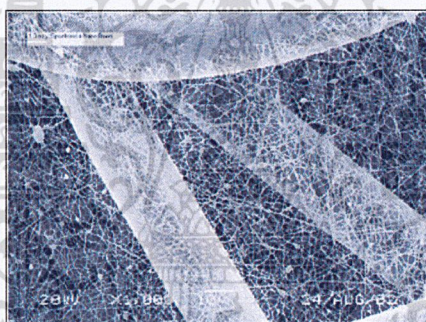
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ด้านวัสดุศาสตร์

เส้นใยนาโนบางชนิดสามารถนำไปเสริมกับวัสดุอื่นเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของเส้นใย เช่น เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon nanofibre) ซึ่งมีความอดุลัส (Young's modulus) และความแข็งแรง (Strength) สูง อีกทั้งค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ยังสูงกว่าเหล็กถึงประมาณ 3 เท่า ในขณะที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเหล็กประมาณ 6 เท่า ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมในวัสดุคอมโพสิต (Composite) ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

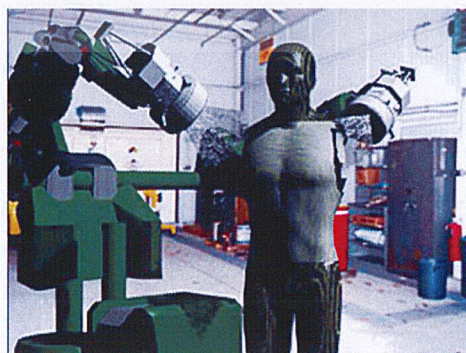
2.4.3 ด้านสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยีชีวภาพ

แผ่นเส้นใยที่ถักทอจากเส้นใยที่เล็กในระดับนาโนเมตรมีช่องว่างขนาดเล็กมากทำให้สามารถกรองอนุภาคได้จำนวนมากกว่าแผ่นเส้นใยที่มีช่องว่างขนาดใหญ่หลายเท่าตัว โดยแผ่นเส้นใยนาโนสามารถนำมาใช้สร้างระบบกรองที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดมลภาวะทั้งทางอากาศและทางน้ำ หรือพัฒนาเป็นระบบกรองน้ำจืดจากน้ำทะเลหรือแม้กระทั่งการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย



รูปที่ 2.8 ระบบกรองจากเส้นใยนาโนที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อกรองและจับอนุภาคขนาดเล็ก [40]

สำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพได้มีความพยายามนำเส้นใยนาโนมาเคลือบบนชุดเครื่องแบบทหาร เพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ, สารพิษทางเคมี หรือนิวเคลียร์อีกด้วย



รูปที่ 2.9 การเคลือบเส้นใยนาโนบนเครื่องแต่งกายทหารเพื่อป้องกันอาวุธทางชีวภาพ [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และพลังงาน

ในกรณีที่ใช้เส้นใยมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีหรือสมบัติของสารกึ่งตัวนำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะเทคโนโลยีด้านตัวตรวจจับต่างๆ เช่น ตัวตรวจจับก๊าซ (Gas Sensor) และตัวตรวจจับความร้อน (Thermal Sensor) เป็นต้น

2.5 ไบโพลิเมอร์ (Biopolymer)

ไบโพลิเมอร์ (Biopolymer) หรือ ไบโอแมโครโมเลกุล (Biomacromolecule) สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ คือ กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid), โปรตีน (Protein) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) หรือพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide)

2.5.1 กรดนิวคลีอิก (Nucleic acid)

เป็นโครงสร้างของสารภายในเซลล์ (Cell) โดยกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) ประกอบด้วยหน่วยของนิวคลีโอไทด์ (Nucleotides) ที่ต่อกันด้วยพันธะฟอสโฟไดเอสเทอร์ (Phosphodiester bond) โดยหมู่ของฟอสเฟตที่เป็นส่วนประกอบของพันธะ จะเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 5 ของนิวคลีโอไทด์โมเลกุลหนึ่งกับหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง 3 ในโมเลกุลถัดไป อาจจำแนกกรดนิวคลีอิกได้เป็น DNA และ RNA [42]

2.5.2 โปรตีน (Protein)

มีหน่วยย่อยคือ กรดอะมิโน (Amino acid) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide Bond) โปรตีนมีหน้าที่สำคัญต่อโครงสร้างและกิจกรรมภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด รวมถึงกรดอะมิโนบางชนิดร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เอง สามารถรับเข้าสู่ร่างกายทางการกินเท่านั้น [43]

2.5.3 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) หรือพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide)

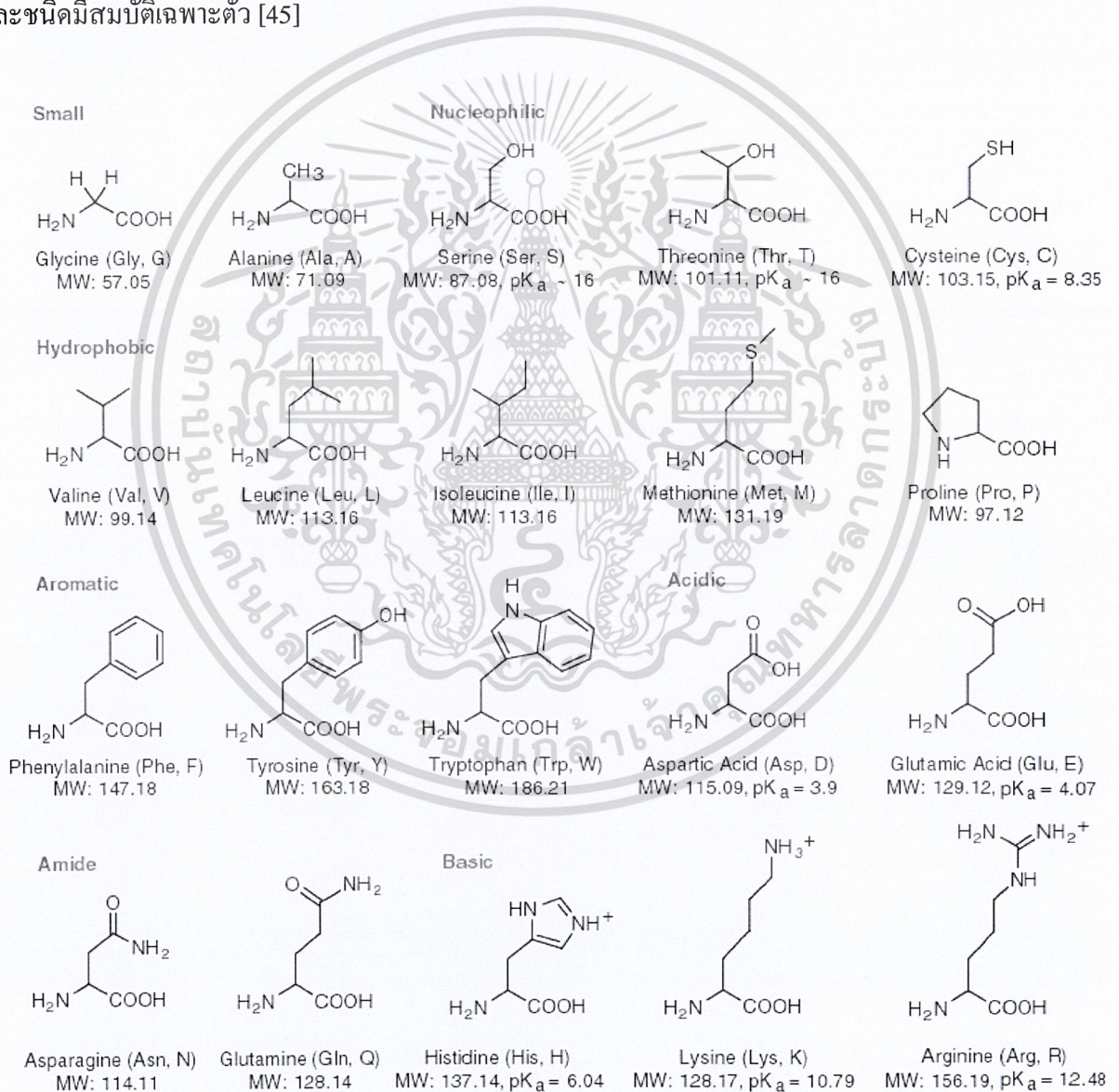
เป็นสารอินทรีย์ที่มีสูตรโครงสร้างอย่างง่าย (Empirical form) คือ $C_m(H_2O)_n$ โดยใน 1 อะตอมของคาร์บอนจะมีไฮโดรเจนและออกซิเจนเกาะอยู่ในอัตราส่วน 2:1 สามารถจำแนกคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ออกเป็น 4 กลุ่ม คือ โมโนแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide), ไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide), โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) และพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) [44]

2.6 กรดอะมิโน (Amino acid) และโปรตีน (Protien)

2.6.1 โครงสร้างของกรดอะมิโนและโปรตีน

โปรตีนเป็นแมโครโมเลกุล (Macromolecule) ที่พบมากที่สุดในสิ่งมีชีวิต โดยมากกว่าครึ่งหนึ่งของน้ำหนักแห้งของเซลล์ทั่วไปเป็นโปรตีนและเมื่อทำการสลายโปรตีนด้วยกรดจะได้กรดอะมิโน (Amino acid) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น NH_2-CH_R-COOH

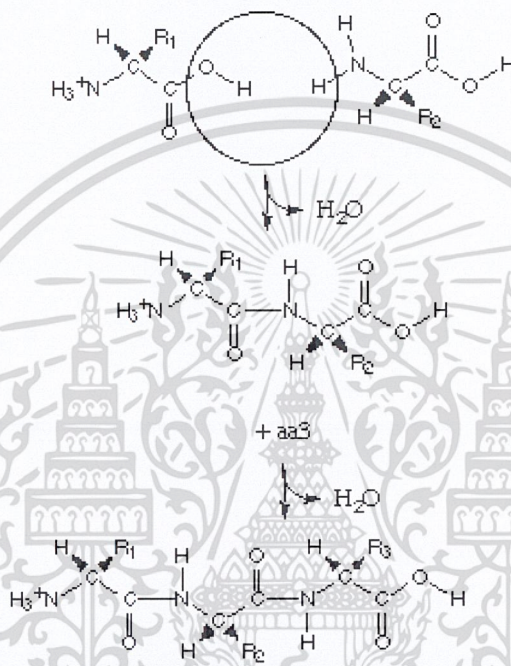
กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีอยู่ประมาณ 20 ชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 8 ประเภทคือ อะลิฟาติก (Aliphatic), อะโรมาติก (Aromatic), ซัลเฟอร์ (Sulphur), กรด (Acidic), เบส (Basic), เอไมด์ (Amide), ไฮดรอกซี (Hydroxy) และอิมิโน (Imino) กรดอะมิโนเหล่านี้แตกต่างกันที่หมู่ -R group โดยหมู่-R แต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัว [45]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกรดอะมิโน (Amino acid) ชนิดต่างๆ [46]

2.6.2 พันธะที่เชื่อมโยงกรดอะมิโนในโปรตีน

โปรตีนเป็นโมเลกุลที่ได้จากการเชื่อมโยงกรดอะมิโนด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide bond) กรดอะมิโนแต่ละตัวในสายโปรตีน เรียกว่า Amino acid residue พันธะเปปไทด์เกิดจากปฏิกิริยาการรวมตัวระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) กับหมู่อะมิโน (Amino) ซึ่งโครงสร้างของพันธะเปปไทด์จะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เรียกว่า เรโซแนนซ์ (Resonance) ทำให้พันธะเปปไทด์มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะเดี่ยวธรรมดา [45]

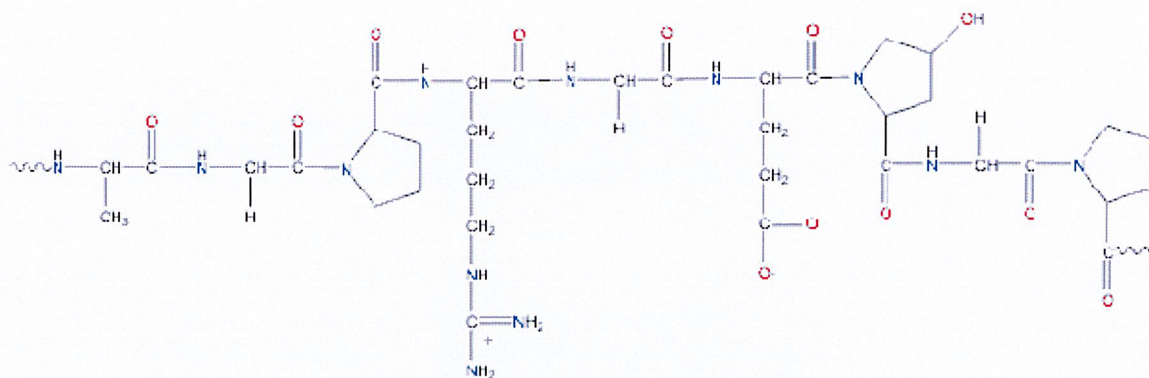


รูปที่ 2.11 พันธะเปปไทด์ (Peptide bond) ในสายโปรตีน [47]

2.7 เจลาติน (Gelatin)

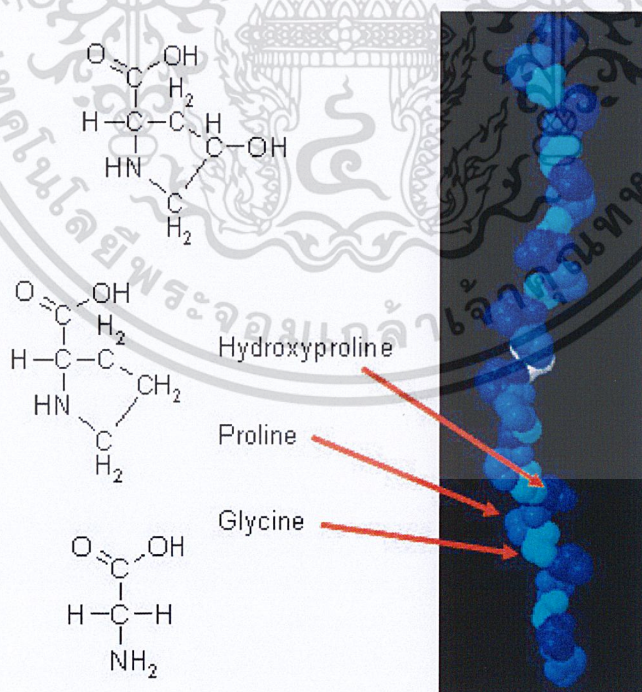
เจลาติน (Gelatin) หรือ Gelatine (ภาษาฝรั่งเศส) เป็นโพลีเปปไทด์ที่เตรียมได้จากการแปรรูปคอลลาเจนในกระบวนการทางความร้อนหรือการใช้กรดหรือเบสเจือจาง คอลลาเจนมีอยู่ในหนังและกระดูกของสัตว์ [4] เจลาตินมีลักษณะเป็นของแข็งโปร่งแสง ไม่มีสี เปราะ และแทบไม่มีรสชาติ เจลาตินหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวกลับเมื่อได้รับความเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C เจลาตินสามารถก่อเจลแบบกึ่งของแข็งร่วมกับน้ำ [5] โครงสร้างเจลาตินจะประกอบไปด้วยกรดอะมิโนต่อกันเป็นสายโซ่ยาว มีหน่วยของไกลซีน (Glycine) ซ้ำกันภายในสายโซ่ของเจลาตินถึง 1 ใน 3 และมีหน่วยของโพรลีน (Proline) และ 4-ไฮดรอกซีโพรลีน (4-Hydroxyproline) เป็นเป็นหน่วยซ้ำที่มีจำนวนรองลงมาตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีหน่วยของกรดอะมิโนอื่นๆแทรกตัวอยู่ด้วย โครงสร้างโดยทั่วไปของเจลาติน คือ -Ala-Gly-Pro-Arg-Gly-Glu-4Hyp-Gly-Pro- เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โครงสร้างโมเลกุลของเจลาติน [5]

เจลาตินจะมีลักษณะโครงสร้างแบบเกลียว (Helix) มีหน่วยซ้ำของกรดอะมิโนระหว่าง 300 – 4000 หน่วย โดยเจลาตินที่ได้จากการสกัดคอลลาเจนที่มีจากผิวหนังและกระดูกสัตว์จะมีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular mass) ประมาณ 95 kD ความกว้างของสายโซ่ประมาณ 1.5 นาโนเมตร และยาวประมาณ 0.3 มิลลิเมตร หน่วยซ้ำ (Repeating unit) ของเจลาตินต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ [4] เมื่อเจลาตินเกิดการบวมตัวเป็นเจล สายโซ่โมเลกุลของเจลาตินจะเกิดการบวมตัวออก สายโซ่แต่ละสายโซ่จะขยายออกจนเชื่อมต่อกันเรียกส่วนที่เชื่อมต่อกันว่า Junction zones ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเจลาตินกลับเป็นทริปเปิลเฮลิกซ์ (Triple helix) เหมือน โครงสร้างของคอลลาเจน [48]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทริปเปิลเฮลิกซ์ของคอลลาเจน [49]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการนำเจลาตินมาใช้ในการเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น เครื่องสำอาง ยา อาหาร และฟิล์มถ่ายรูป โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรมอาหารซึ่งเป็นตลาดที่ใหญ่ที่สุดของเจลาติน โดยเจลาตินส่วนนี้เรียกว่า เจลาตินชนิดรับประทานได้ (Edible gelatin) ซึ่งใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดต่างๆ เช่น ขนมหวาน ไอศกรีม โยเกิร์ต เป็นต้น ตลาดที่ใหญ่รองลงมาคืออุตสาหกรรม การผลิตยาโดยใช้เจลาตินในการเคลือบเม็ดยาและผลิตเป็นแคปซูล [6]

2.8 การใช้งานวัสดุปิดบาดแผล (Wound Dressing) [50]

ในการให้บริการดูแลรักษาผู้ป่วยทางศัลยกรรมแน่นอนว่าต้องเผชิญกับบาดแผลในรูปแบบ ต่างๆกันไปตามแต่ชนิดของบาดแผลของผู้ป่วยที่ให้การดูแลรักษา ไม่ว่าจะเป็นบาดแผลจากการผ่าตัด บาดแผลเบาหวาน บาดแผลหลอดเลือด บาดแผลอุบัติเหตุ และ ไฟไหม้น้ำร้อนลวก เป็นต้น

ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการรักษาบาดแผลแต่ละชนิด โดยเฉพาะวัสดุปิดแผลต่างๆมีการ พัฒนาและเจริญก้าวหน้าขึ้นอย่างมาก โดยมีการผสมผสานตัวยาอนุพันธ์แร่ธาตุเงิน (Silver Nanoparticles) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อนอกจากนั้นยังมีการพัฒนาวัสดุปิดแผลเพื่อให้เกิด คุณสมบัติในการสมานแผลหรือเร่งบาดแผลให้หายเร็วขึ้นด้วย โดยวัสดุเหล่านี้มีทั้งประเภทที่สำหรับ ใช้ปิดบาดแผลชั่วคราว โดยเร่งให้บาดแผลหายเร็ว หรือ อาจมีประเภทที่ปิดบาดแผลแบบถาวร เสริมสร้างการสร้างเนื้อเยื่อใหม่

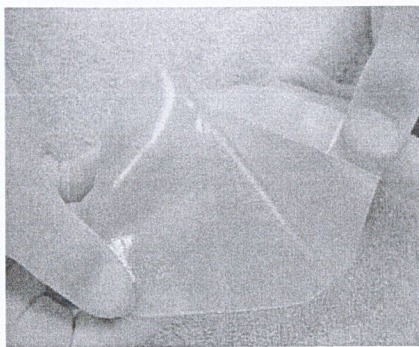
2.8.1 หลักการเลือกวัสดุปิดบาดแผลในบาดแผลลักษณะต่างๆ

- สารคัดหลั่งปริมาณมาก (High Exudate) เลือกวัสดุปิดบาดแผลชนิดที่สามารถดูดซับได้มาก เช่น Hydrofiber, Foam, Alginate dressing
- สารคัดหลั่งปริมาณน้อย (Low exudates) เลือกชนิดแผ่นบางเพียงแค่ดูดซับความชื้น ส่วนใหญ่ในท้องตลาดมักจะเป็นกลุ่มวัสดุปิดแผลชนิดแบบบาง
- แผลติดเชื้อ (Infected) ควรทำแผลบ่อยอาจเปลี่ยนวัสดุปิดบาดแผลทุกวันเพื่อดูแลแผลอย่าง ใกล้ชิด อาจใช้วัสดุปิดแผลที่มีการผสมผสานแร่ธาตุเงิน (Silver) หรือ ฉาบสารฆ่าเชื้อโรค (Antibiotic) ซึ่งมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อได้

2.8.2 ลักษณะของวัสดุปิดบาดแผลจากเจลาติน

วัสดุปิดบาดแผลที่ผลิตจากเจลาตินมักจะอยู่ในรูปของไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) เมื่อนำมาใช้ปิดแผลส่วนของพอลิเมอร์จะไปจับกับสารคัดหลั่งแล้วกลายเป็นก้อนคล้ายก้อนเจล ซึ่งจะช่วย นำเอาของเสียและน้ำหนองออกไปจากแผล นอกจากนี้ยังกักเก็บความชุ่มชื้นได้ดี เหมาะกับบาดแผลที่มีสารคัดหลั่งจำนวนไม่มาก

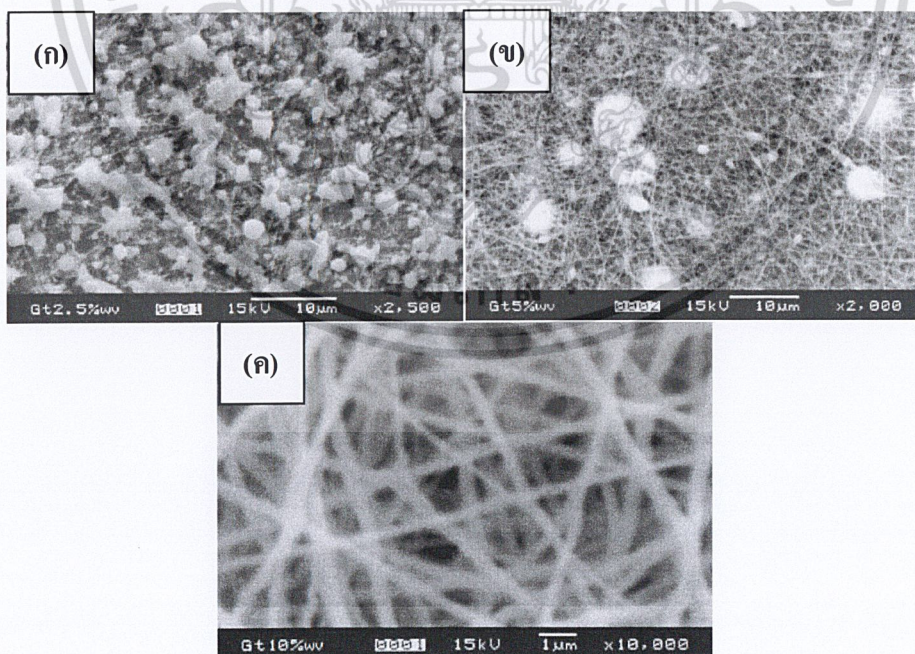
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 วัสดุพืดแผลไฮโดรคอลลอยด์จากเจลาติน

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2004 Z.-M. Huang, Y.Z. Zhang, S. Ramakrishna และ C.T. Lim [18] ได้ปั่นเส้นใยเจลาตินโดยใช้ 2,2,2-trifluoroethanol (TFE) เป็นตัวทำละลาย ซึ่งภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความเข้มข้น 2.5%w/v เจลาตินจะรวมกันเป็นหยด สามารถอิเล็กโตรสปินเป็นเส้นใยได้ค่อนข้างน้อย แต่เมื่อความเข้มข้นของเจลาตินเพิ่มสูงขึ้นสามารถอิเล็กโตรสปินออกมาเป็นเส้นใยได้มากขึ้นแต่ยังคงมีเม็ดลูกปัด (Beads) อยู่ และเมื่อความเข้มข้น 10%w/v ขึ้นไปเส้นใยจากเจลาตินจะไม่มีเม็ดลูกปัด



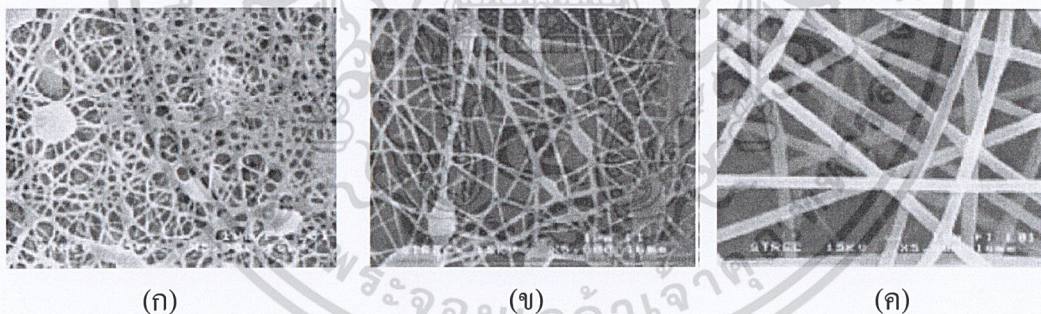
รูปที่ 2.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเจลาตินที่ได้จากการเตรียมด้วยสารละลายเจลาตินใน 2,2,2-trifluoroethanol ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

(ก) ความเข้มข้น 2.5%w/v (ข) ความเข้มข้น 5.0%w/v และ (ค) ความเข้มข้น 10.0%w/v [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต เจ้าของเอกสารขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และไม่รับผิดชอบต่อความเสียหายใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีถัดมา J. Li, A. He และคณะ [51] ได้ขึ้นรูปเส้นใยจากกรดไฮยาลูรอนิก (Hyaluronic acid, HA) และกรดไฮยาลูรอนิก/เจลาติน (HA/GE) ใช้ N,N-dimethylformamide (DMF)/น้ำ เป็นระบบตัวทำละลายผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ได้จาก HA คือ 200 nm และ HA/GE มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 190 – 500 nm ผลจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อบนเส้นใยทั้งสองชนิดนั้น เนื้อเยื่อสามารถเติบโตบนเส้นใยจาก HA/GE ได้ดีกว่าเนื่องจากเจลาตินเป็นสารจำพวกโปรตีนที่มีความเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิตดีกว่ากรดไฮยาลูรอนิก

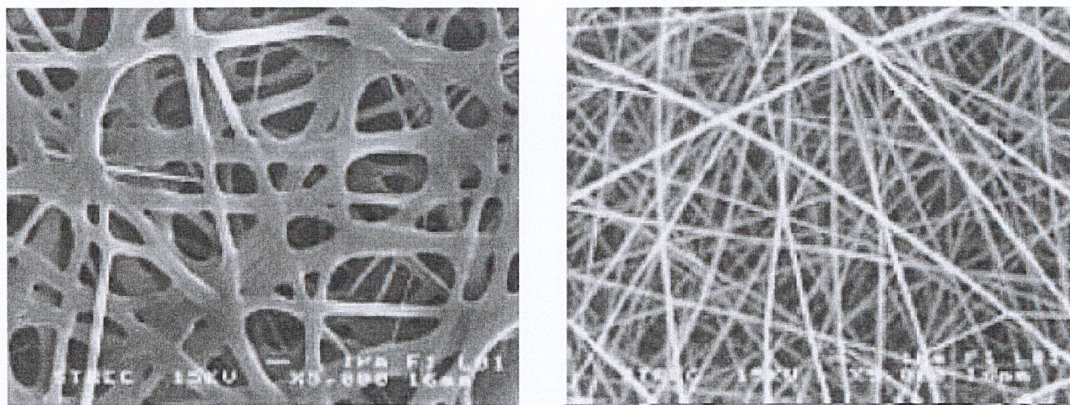
ในปี 2007 N. Choktaweessap, K. Arayanarakul และคณะ [52] ได้ศึกษากระบวนการทำละลายที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเจลาติน ในงานวิจัยได้เปรียบเทียบการใช้ระบบตัวทำละลายเดี่ยวโดยตัวทำละลายที่ใช้คือ กรดอะซิติก (Acetic acid) ระบบตัวทำละลายผสมใช้ 2,2,2-Trifluoroethanol (TFE) และกรดฟอร์มิก (Formic acid) ร่วมกับกรดอะซิติก รวมถึงการใช้สารละลายอื่นๆช่วยในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เช่น Dimethyl sulfoxide (DMSO), เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) และฟอร์มามาไมด์ (Formamide) โดยผลการวิจัยในระบบตัวทำละลายเดี่ยวใช้กรดอะซิติกเป็นตัวทำละลายเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเจลาตินที่พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นจะทำให้เม็ดลูกปัด ที่อยู่บนเส้นใยลดลง โดยพบลักษณะของเส้นใยเรียบ (Smooth Fiber) ที่ความเข้มข้น 21%w/v ขึ้นไป นอกจากนี้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.16 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเจลาตินที่ได้จากการเตรียมด้วยสารละลายเจลาตินในกรดอะซิติกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน
(ก) ความเข้มข้น 15%w/v (ข) ความเข้มข้น 19%w/v และ (ค) ความเข้มข้น 27%w/v [51]

สำหรับระบบตัวทำละลายผสมในบางอัตราส่วนของ กรดอะซิติก/ 2,2,2-Trifluoroethanol (TFE), กรดอะซิติก/เอทิลีนไกลคอลและกรดอะซิติก/ฟอร์มามาไมด์ เส้นใยจะมีการหลอมรวมกันในขณะที่ทุกอัตราส่วนของกรดอะซิติก/ Dimethyl sulfoxide มีลักษณะเป็นเส้นใยเรียบและไม่มีการหลอมรวมกันของเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

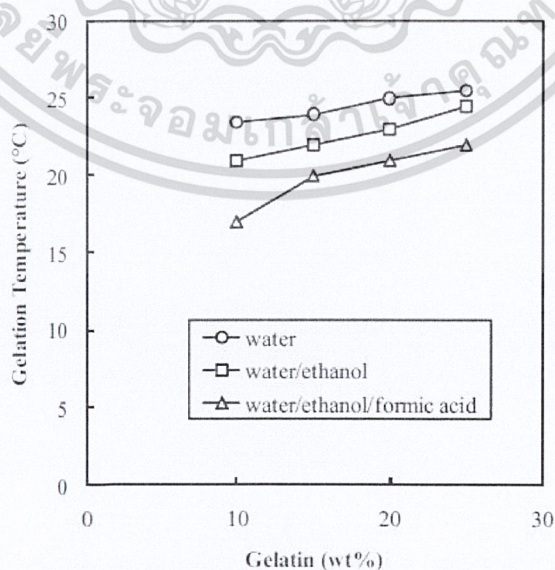
รูปที่ 2.17 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นใยเจลาติน

(ก) จากการเตรียมกรดอะซิติก/2,2,2-Trifluoroethanol อัตราส่วน 90:1

(ข) กรดอะซิติก/Dimethyl sulfoxide อัตราส่วน 91:9 [51]

ในปีเดียวกัน C.-M. Deng, L.-Z. He และคณะ [53] ศึกษาสมบัติทางชีวภาพของวัสดุปิดบาดแผลที่ทำจากไคโตซาน/เจลาติน เนื่องจากทั้งไคโตซานและเจลาตินประกอบไปด้วยหมู่อะมิโนทำให้สายโวกของทั้งเจลาตินและไคโตซานมีความเป็นประจุบวกและสามารถด้านเชื่อมขวางที่เรียกว่าได้

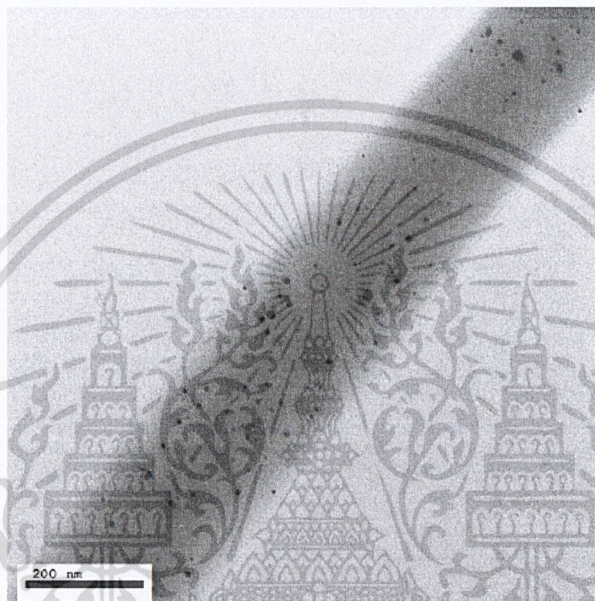
ต่อมาในปี 2008 H.-C. Chen, W.-C. Jao และคณะ [10] ศึกษากระบวนการทำละลายผสมระหว่างเอทานอล/กรดฟอร์มิก/น้ำ สำหรับการปั่นเส้นใยเจลาตินด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าการใช้ระบบตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอล/กรดฟอร์มิก/น้ำ สำหรับปั่นเส้นใยเจลาตินด้วยไฟฟ้าสถิตทำให้เส้นใยเจลาตินออกมาได้ง่ายและรวดเร็วถึงแม้จะปั่นเส้นใยที่อุณหภูมิห้องซึ่งต่ำกว่าจุดก่อเจล (Gel point) ของเจลาติน



รูปที่ 2.18 จุดก่อเจล (Gel point) ของสารละลายเจลาตินที่แตกต่างกันในตัวทำละลายแต่ละชนิด [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

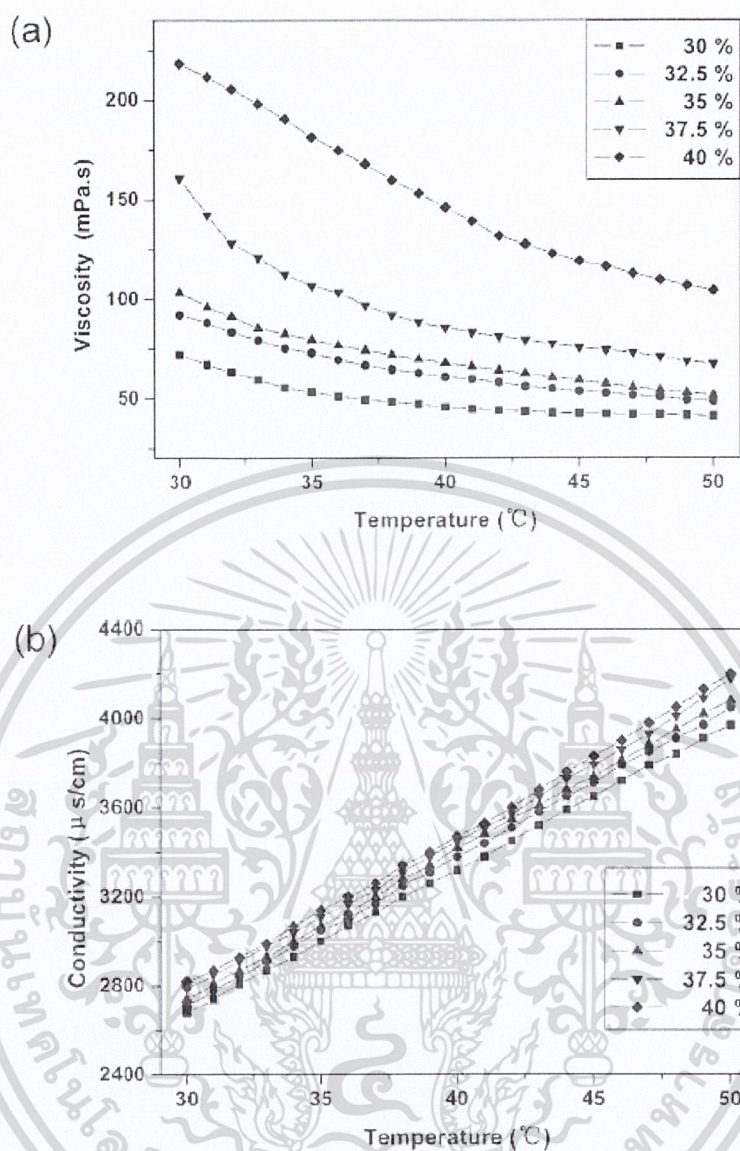
ในงานวิจัยของ P. Rujitanaroj, N. Pimpha และ P. Supapol [12] ได้ใช้เล็ทโรสปีนเจลลาติน สำหรับการนำไปใช้งานเป็นวัสดุปิดบาดแผล (Wound dressing) โดยบรรจุอนุภาคในระดับนาโนของเงิน (Silver nanoparticles) และศึกษาการป้องกันแบคทีเรียรวมถึงสมบัติอื่นๆของผืนผ้าที่เตรียมได้ พบว่าผืนผ้าเส้นใยเรียงตัวแบบสุ่ม (Non-woven fabric) ที่ได้จากการบรรจุอนุภาคของเงินลงในเส้นใย เจลาตินจะมีความสามารถในการป้องกันแบคทีเรียได้มากกว่าเส้นใยที่เตรียมได้จากเจลาติน โดยไม่บรรจุอนุภาคของเงินลงไป



รูปที่ 2.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) แสดงให้เห็นอนุภากระดับนาโนของเงินที่แทรกอยู่ภายในเส้นใยเจลาติน [12]

และเนื่องจากเจลาตินปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติดออกมาได้ยากเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเดี่ยว S. Zhang, Y. Huang และคณะ [11] จึงทดลองขึ้นรูปเจลาตินโดยการใช้ระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสติดด้วยการให้อุณหภูมิสูงและศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดของสารละลายจะลดลง แต่ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายมีแนวโน้มสูงขึ้น ที่ความเข้มข้นของสารละลายเจลาติน 35%w/w เมื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเจลาตินจะลดต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ

(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงการพิเศษจะขึ้นรูปเส้นใยเจลลาตินจากกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งงานที่ได้มีลักษณะเป็นผืนผ้าเส้นใยเรียงตัวแบบสุ่ม (Non-woven fabric) ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยเจลลาตินขนาดเล็กลงมาก และในการทดลองเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษ เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid), เฮกซะฟลูออโรไอโซโพรพานอล (Hexafluoroisopropanol, HFIP), ไตรฟลูออโรเอทานอล (Trifluoroethanol, TFE) และ กรดฟอร์มิก (Formic acid) จึงใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิห้องซึ่งต่ำกว่าจุดก่อก้อนของเจลลาตินนั้น เจลลาตินจะเกิดการบวมตัวเมื่อละลายในน้ำ ในโครงการพิเศษจึงศึกษาความเป็นไปได้ในการปั่นเส้นใยเจลลาตินด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูง

3.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 รายการสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสาร	เกรด	บริษัท
เจลลาตินจากผิวหนังสุกร (Fluka®)	วิเคราะห์	Sigma-Aldrich, Germany

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของเจลลาตินเกรด Fluka® 1

สมบัติ	
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.0 – 6.0
ความสามารถในการละลาย (Solubility, 50°C)	67 mg/mL H ₂ O
สี (Color)	น้ำตาลอมเหลืองสว่าง
ความแข็งแรงเจล (Gel Strength)	170 – 190 g Bloom

หมายเหตุ ¹ คือ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์

ตารางที่ 3.3 รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่อง	รุ่น	บริษัท
บริษัทเครื่องแก้ว	-	-
เครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง กำลังสูง (High Voltage DC Power Supply)	Model UC5-30P	Gamma High Voltage Research, USA
เครื่องรองรับทรงกระบอกแบบ หมุน (Rotating Cylinder Collector)	-	-
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)	FTS - 8000	Natto
ฐานตั้งพลาสติก	-	-
อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ (Oil Bath)	-	Heater AS group
หัวเข็มฉีดยาสแตนเลส (Stainless Steel Needle)	เบอร์ 18	Nipro
แผ่นอลูมิเนียม (Aluminium Foil)	-	-
กระบอกฉีดยาแก้วขนาด 50 mL (Glass Syringe)	-	-
แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร (Magnetic Bar)	-	-
นาฬิกาจับเวลา	-	-
เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด	-	-
ตะไบเหล็กและแท่นลับมีด	-	-
คีมเหล็ก	-	-
เทปใส	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือ

ตารางที่ 3.4 รายการเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่อง	รุ่น	บริษัท
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)	JEOL JSM-6400	JEOL
เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer)	DV - III	Brookfield
เครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductometer)	Metrohm Model 712	Metrohm, Switzerland

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมสารละลายเจลาตินที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง

โครงการานพิเศษนี้ศึกษาสารละลายเจลาตินความเข้มข้นความเข้มข้น 25, 30, 35, 40 และ 45 %w/v โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายซึ่งเตรียมได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. ตวงน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ขวดแก้วมีฝาปิด และให้ความร้อนโดยใช้อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ สำหรับอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 50°C
2. เมื่อน้ำกลั่นในขวดแก้วมีฝาปิดมีอุณหภูมิประมาณ 40 – 50°C จึงใส่เจลาตินที่ชั่งน้ำหนัก โดยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดที่เตรียมไว้ลงในน้ำกลั่น คนจนเจลาตินละลายเข้ากับน้ำกลั่น
3. ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสารลงในขวดแก้วมีฝาปิดที่บรรจุสารละลายที่ได้จากข้อ 2 ปิดฝาขวดแก้วให้สนิทเพื่อลดการระเหยออกของน้ำซึ่งทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลงและเปิดเครื่องปั่นกวน
4. ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายจากข้อ 3 โดยใช้อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิให้สารละลายมีอุณหภูมิประมาณ 40 – 50°C เป็นเวลา 20 นาที

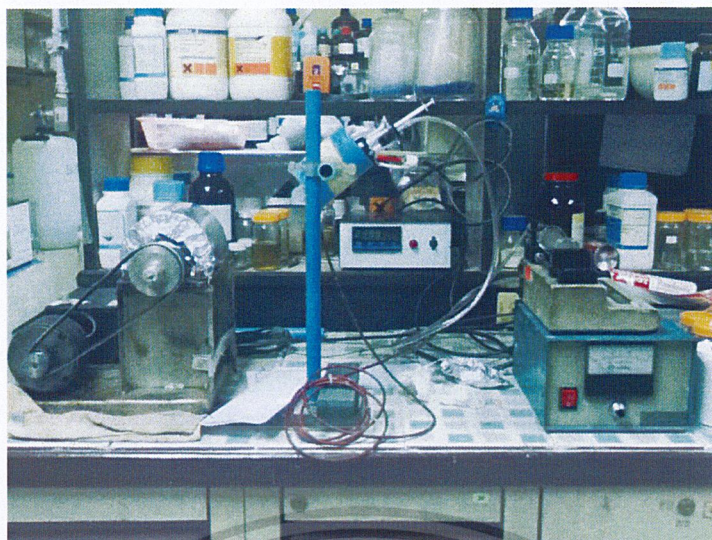


รูปที่ 3.1 สารละลายเจลาตินที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายหลัก

3.4.2 การเตรียมอุปกรณ์ สภาวะ และการขึ้นรูปเส้นใยจากเจลาตินที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ขึ้นรูปด้วยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง

1. ตัดแผ่นอลูมิเนียมให้มีขนาดกว้าง 17 cm ยาว 45 cm ติดแผ่นอลูมิเนียมบนเครื่องรองรับทรงกระบอกแบบหมุน รัศมีครึ่งวงไม่ให้เกิดรอยนิ้วมือและรอยยับบนแผ่นอลูมิเนียม
2. ตัดบริเวณปลายของหัวเข็มฉีดยาด้วยตะไบตัดเหล็ก โดยให้หัวเข็มฉีดยามีความยาวประมาณ 1.5 cm
3. ต่อหัวเข็มฉีดยาที่ตัดแล้วเข้ากับกระบอกฉีดยา ใส่สารละลายเจลาตินที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 ตามความเข้มข้นต่างๆลงในกระบอกฉีดยา ขยับหัวเข็มฉีดยาเพื่อไล่ฟองอากาศที่ค้างบริเวณปลายเข็มฉีดยาออก
4. จัดเครื่องรองรับทรงกระบอกแบบหมุนและฐานตั้งพลาสติกที่เจาะรูให้หัวเข็มฉีดยาทะลุผ่านได้ โดยให้มีระยะห่างและมุมระหว่างเครื่องรองรับกับปลายของหัวเข็มฉีดยาดังแสดงในตารางที่ 3.5
5. ต่อกระบอกฉีดยาเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิดังตารางที่ 3.6 จากนั้นใส่กระบอกฉีดยาลงในฐานตั้งพลาสติก บริเวณส่วนท้ายของกระบอกฉีดยาให้ปิดด้วยแผ่นอลูมิเนียมเพื่อลดการระเหยออกของน้ำ
6. ต่อขั้วบวกจากเครื่องให้ศักย์ไฟฟ้าเข้ากับปลายเข็มฉีดยาและสายดินต่อเข้ากับเครื่องรองรับทรงกระบอกแบบหมุน เปิดเครื่องให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบสำหรับแต่ละสภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์สำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูป

สภาวะ	
ระยะห่างระหว่างเครื่องรองรับทรงกระบอกแบบหมุนกับปลายเข็มฉีดยา	14 เซนติเมตร
มุมระหว่างหัวเข็มฉีดยากับเครื่องรองรับทรงกระบอกแบบหมุน	45°

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยขนาดเล็กของเจลาตินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย

ความเข้มข้น (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)
25	40	10.0
		12.5
		15.0
	50	10.0
		12.5
		15.0
	60	10.0
		12.5
		15.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

ความเข้มข้น (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)
30	40	10.0
		12.5
		15.0
	50	10.0
		12.5
		15.0
	60	10.0
		12.5
		15.0
35	40	10.0
		12.5
		15.0
	50	10.0
		12.5
		15.0
	60	10.0
		12.5
		15.0
40	40	10.0
		12.5
		15.0
	50	10.0
		12.5
		15.0
	60	10.0
		12.5
		15.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

ความเข้มข้น (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)
45	40	10.0
		12.5
		15.0
	50	10.0
		12.5
		15.0
	60	10.0
		12.5
		15.0

3.4.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) ของตัวอย่าง

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างแปะลงบนแท่นโลหะ (Stub) และเคลือบชิ้นงานด้วยทองโดยใช้เครื่อง Balzers Union SCD 040

- ศึกษาลักษณะของเส้นใยโดยดูจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย โดยใช้ภาพกำลังขยาย 5000 เท่า ใช้จำนวนเส้นใยที่แตกต่างกันจำนวน 100 เส้น ทำการประมวลผลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยโดยใช้โปรแกรม SemAfore[®] 5.0



รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นทูลเกล้าฯ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมและอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการขึ้นรูปเจลาตินด้วยวิธีปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สารละลายเจลาตินที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากการใช้น้ำเป็นตัวทำละลายเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่อาจเป็นพิษเมื่อใช้สัมผัสกับร่างกายในการใช้งานด้านชีวการแพทย์ นอกจากนี้เนื่องจากสารละลายเจลาตินจะเกิดการก่อเจลร่วมกับน้ำ ทำให้การปั่นเส้นใยเจลาตินโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นไปได้ยาก ในงานทดลองจึงศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเส้นใยเจลาติน โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่สภาวะต่างๆ ในการนำเสนอจึงใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนสภาวะในการทดลอง ดังนี้

ความเข้มข้นของสารละลายเจลาตินที่ศึกษา คือ 25, 30, 35, 40 และ 45%w/v โดยใช้อักษรย่อคือ C25, C30, C35, C40 และ C45 ในการแทนสภาวะความเข้มข้นของสารละลายเจลาตินที่ 25, 30, 35, 40 และ 45%w/v ตามลำดับ

อุณหภูมิของสารละลายเจลาตินที่ศึกษา คือ 40, 50 และ 60°C โดยใช้อักษรย่อคือ T40, T50 และ T60 ในการแทนสภาวะอุณหภูมิของสารละลายเจลาตินที่ 40, 50 และ 60°C ตามลำดับ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าของสารละลายเจลาตินที่ศึกษา คือ 10.0, 12.5 และ 15.0 kV โดยใช้อักษรย่อคือ 10.0K, 12.5K และ 15.0K ในการแทนสภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ 10.0, 12.5 และ 15.0 kV ตามลำดับ

ตัวอย่างการใช้อักษรย่อแทนสภาวะในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต เช่น C25-T40-10.0K คือ สภาวะในการขึ้นรูปที่ความเข้มข้นของสารละลายเจลาติน 25%w/v ควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 40°C และใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต 10.0 kV อักษรย่อสำหรับสภาวะอื่นๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสถานะต่างๆในการทดลอง

ความเข้มข้น (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	อักษรย่อ
25	40	10.0	C25-T40-10.0K
		12.5	C25-T40-12.5K
		15.0	C25-T40-15.0K
	50	10.0	C25-T50-10.0K
		12.5	C25-T50-12.5K
		15.0	C25-T50-15.0K
	60	10.0	C25-T60-10.0K
		12.5	C25-T60-12.5K
		15.0	C25-T60-15.0K
30	40	10.0	C30-T40-10.0K
		12.5	C30-T40-12.5K
		15.0	C30-T40-15.0K
	50	10.0	C30-T50-10.0K
		12.5	C30-T50-12.5K
		15.0	C30-T50-15.0K
	60	10.0	C30-T60-10.0K
		12.5	C30-T60-12.5K
		15.0	C30-T60-15.0K
35	40	10.0	C35-T40-10.0K
		12.5	C35-T40-12.5K
		15.0	C35-T40-15.0K
	50	10.0	C35-T50-10.0K
		12.5	C35-T50-12.5K
		15.0	C35-T50-15.0K
	60	10.0	C35-T60-10.0K
		12.5	C35-T60-12.5K
		15.0	C35-T60-15.0K

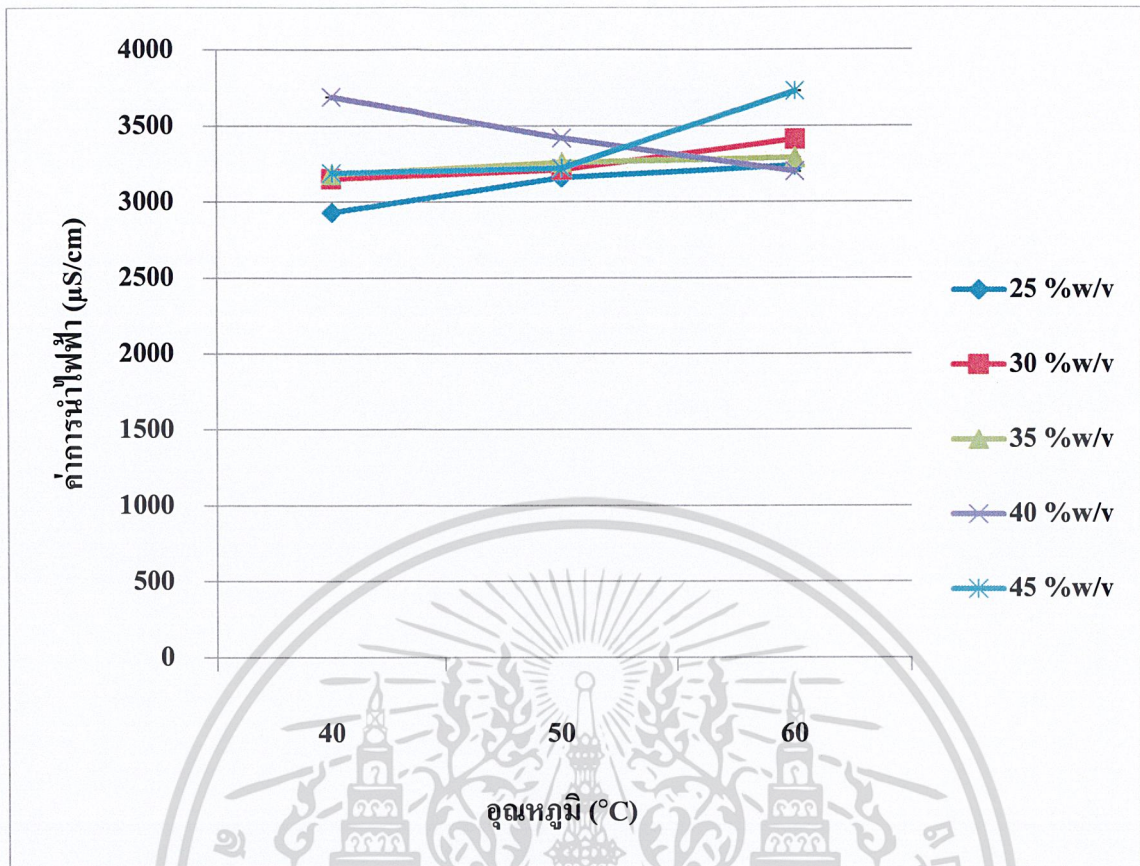
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ความเข้มข้น (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	อักษรย่อ
40	40	10.0	C40-T40-10.0K
		12.5	C40-T40-12.5K
		15.0	C40-T40-15.0K
	50	10.0	C40-T50-10.0K
		12.5	C40-T50-12.5K
		15.0	C40-T50-15.0K
	60	10.0	C40-T60-10.0K
		12.5	C40-T60-12.5K
		15.0	C40-T60-15.0K
45	40	10.0	C45-T60-10.0K
		12.5	C45-T40-12.5K
		15.0	C45-T40-15.0K
	50	10.0	C45-T50-10.0K
		12.5	C45-T50-12.5K
		15.0	C45-T50-15.0K
	60	10.0	C45-T60-10.0K
		12.5	C45-T60-12.5K
		15.0	C45-T60-15.0K

4.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลาติน

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลาตินคงที่แม้ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายเจลาตินเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารละลายและอุณหภูมิของสารละลายที่สูงขึ้น ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลาติน ทำให้ในการทดลองค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลาตินที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิในการปั่นที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์นำไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย



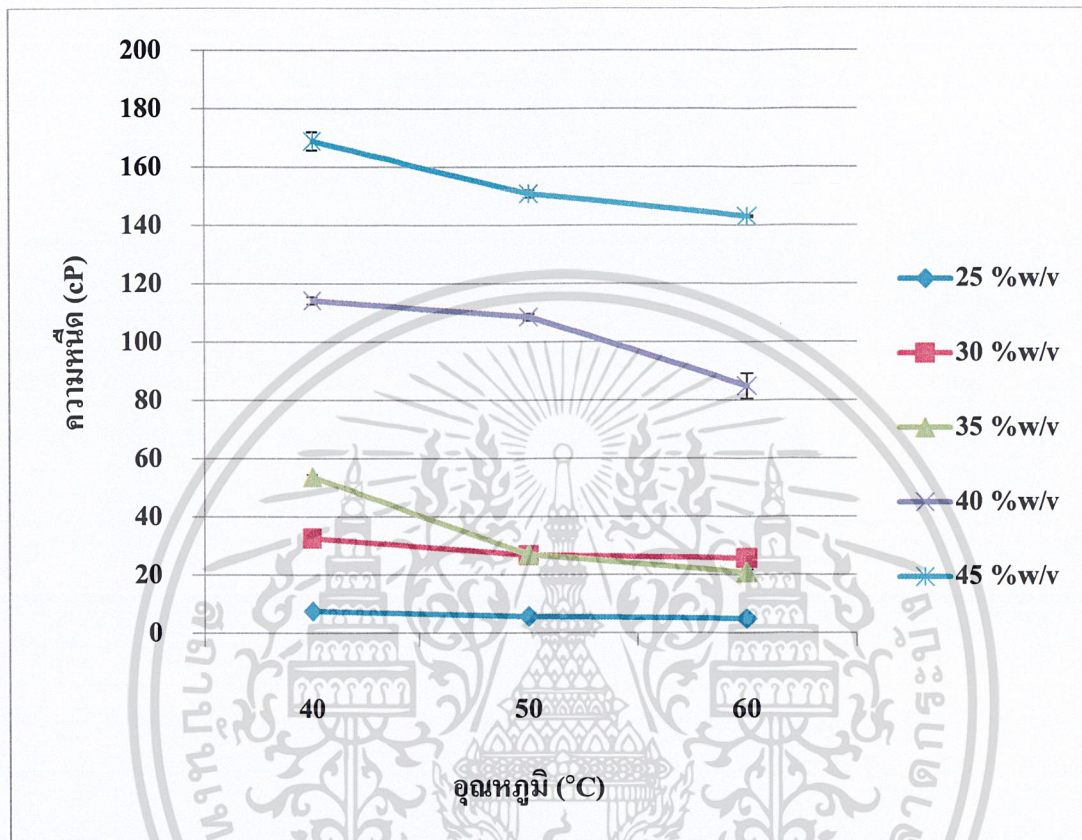
รูปที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลาตินที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย

4.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนืดของสารละลายเจลาติน

เจลาตินจัดเป็นพอลิเมอร์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature sensitive polymer) จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.2 เมื่อกำหนดอุณหภูมิของสารละลายให้คงที่พบว่า ความหนืดของสารละลายเจลาตินจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของสายโซ่เจลาตินในสารละลายมีมากขึ้นจุดเกี่ยวพัน (Entanglement) ของสายโซ่มีมาก สายโซ่เจลาตินเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อกำหนดความเข้มข้นของสารละลายให้คงที่พบว่า ค่าความหนืดของสารละลายเจลาตินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น เพราะ เจลาตินประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide bond) หรือ พันธะเอไมด์ (Amide bond) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างสายโซ่ของเจลาตินได้ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเจลาตินสูงขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของพันธะไฮโดรเจนในสารละลายเจลาตินลดต่ำลง รวมถึงอาจเกิดการเปลี่ยนโครงรูป (Conformation) ของเจลาตินจากแบบเกลียว (Helix) เป็นแบบสายโซ่เรียงตัวแบบสุ่ม (Random coils) สายโซ่เจลาตินสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์ได้รับพลังงานความร้อน จึงมีการเคลื่อนไหว

เอกลีน่าเป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การดูแลของศูนย์อนุรักษ์และส่งเสริมงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

เนื่องจากความร้อน (Thermal motions) เช่นการสั่น (Vibration) การหมุน (Rotation) และการเคลื่อนที่ (Translation) การเคลื่อนที่ของสายโซ่นี้ส่งผลให้มีระยะห่างระหว่างสายโซ่มากขึ้น สายโซ่จึงมีพื้นที่ในการเคลื่อนไหวมากขึ้น ความหนืดของสารละลายเจลาตินจึงลดลง



รูปที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสารละลายเจลาตินที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย

4.3 ผลการศึกษาสถานะในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีต่อเส้นใยเจลาติน

4.3.1 ผลการศึกษาสถานะพื้นฐานวิทยา

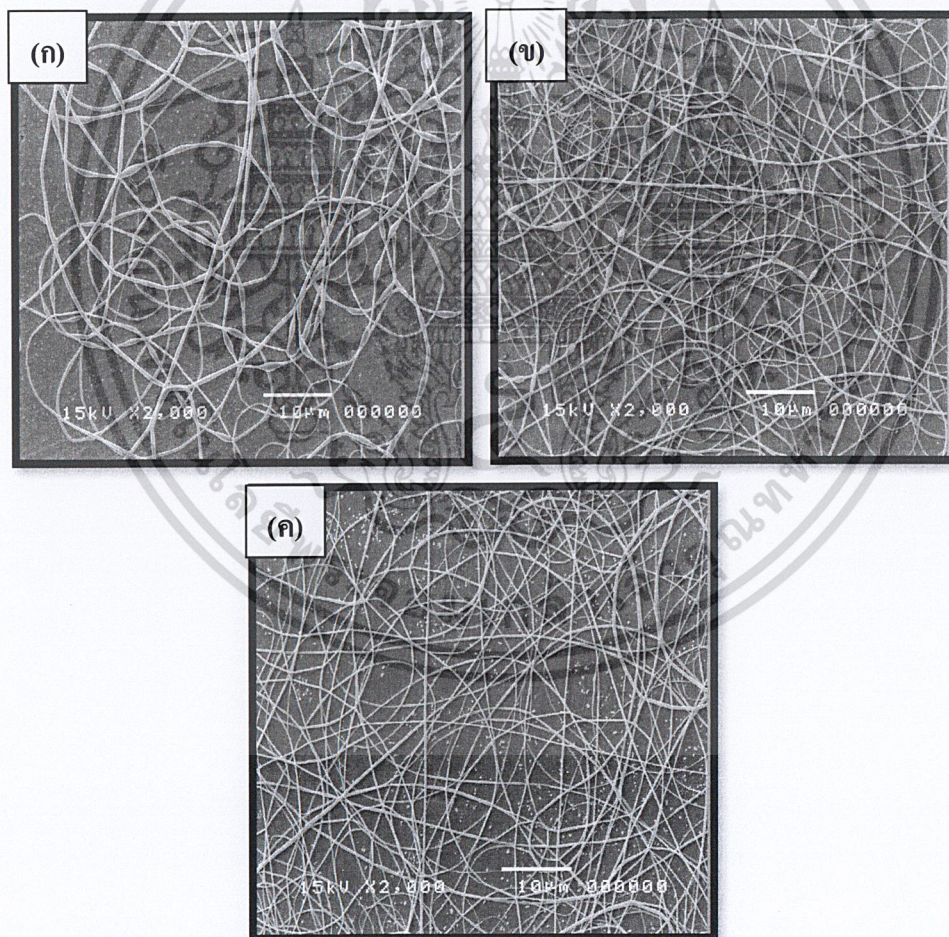
สารละลายเจลาตินความเข้มข้น 25% w/v

สำหรับสารละลายเจลาตินความเข้มข้น 25%w/v นั้นที่สถานะ C25-T40-10.0K พบลักษณะของเส้นใยที่มีเม็ดลูกปัดหรือปัด (Beads) บนเส้นใย และ C25-T40-12.5K ปริมาณของเส้นใยเรียบ (Smooth fibers) มากขึ้นแต่ยังคงพบเม็ดลูกปัดบนเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแต่ละเส้นต่างกัน สำหรับสถานะ C25-T40-15.0K พบเส้นใยเรียบไม่มีเม็ดลูกปัดบนเส้นใยเลย จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในการปั่นส่งผลให้เม็ดลูกปัดหายไป ทั้งนี้เนื่องจากที่สารละลายเจลาตินความเข้มข้น 25 %w/v ที่อุณหภูมิ 40°C การใช้ศักย์ไฟฟ้าที่น้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

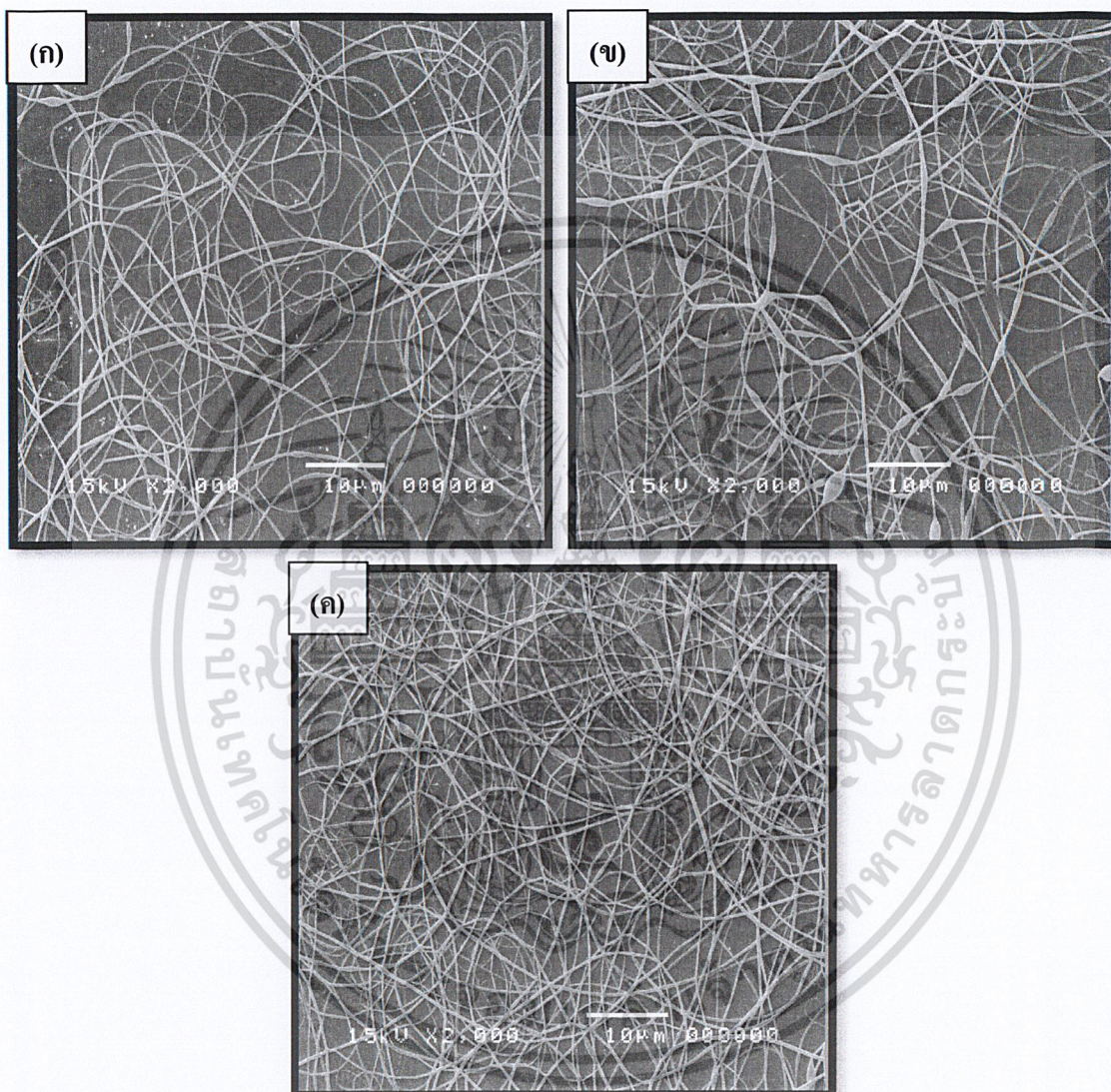
สภาวะ C25-T50-10.0K พบลักษณะของเส้นใยผสมเม็ดลูกปัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยค่อนข้างแตกต่างกัน ที่ C25-T50-12.5K พบเม็ดลูกปัดบนเส้นใยจำนวนมากรวมถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยค่อนข้างแตกต่างกัน สภาวะ C25-T50-15.0K เส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยเรียบ พบเม็ดลูกปัดจำนวนเล็กน้อยปะปนอยู่

สภาวะ C25-T60-10.0K เมื่อนำสารละลายมาขึ้นรูปโดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต สารละลายจะหยดลงบนพื้นก่อนจะเคลื่อนที่ถึงวัสดุรองรับ อาจเพราะความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะนี้น้อยเกินไปทำให้สารละลายเกิดประจุจำนวนไม่มากพอที่จะเกิดการยึดออกของลัมพอลิเมอร์ตกบนวัสดุรองรับ รวมถึงความหนืดของระบบก็ต่ำด้วย ทำให้ที่สภาวะ C25-T60-10.0K ไม่พบเส้นใยบนแผ่นอะลูมิเนียม สภาวะ C25-T60-12.5K พบเป็นกลุ่มของเส้นใยจำนวนเล็กน้อยและกระจุกตัวอยู่เป็นบริเวณๆบนแผ่นอะลูมิเนียม สภาวะ C25-T60-15.0K พบลักษณะของเส้นใยผสมเม็ดลูกปัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกระจายไม่สม่ำเสมอ และเส้นใยเกิดการหลอมติดกัน



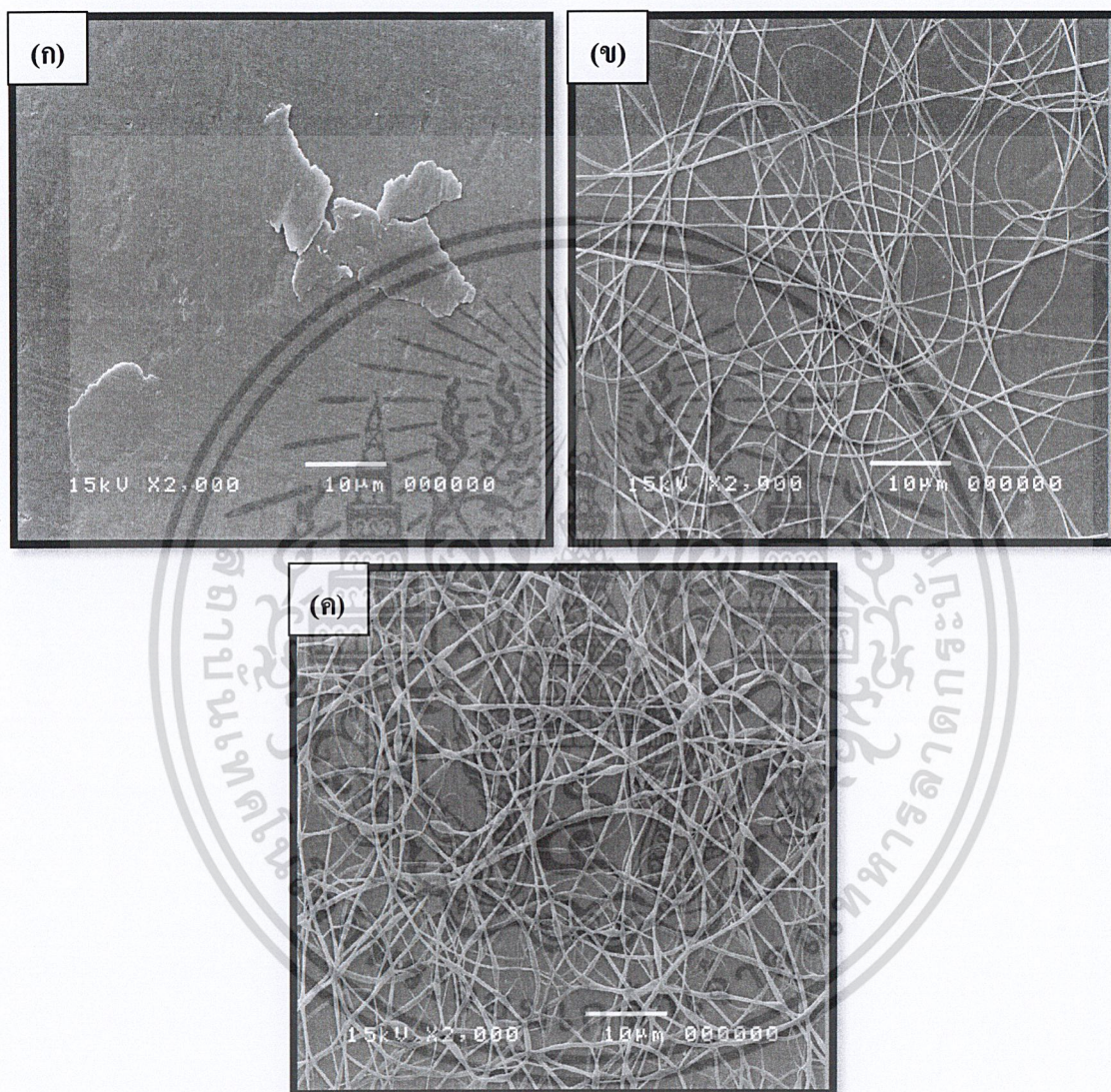
รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C25-T40-10.0K (ข) C25-T40-12.5K (ค) C25-T40-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C25-T50-10.0K (ข) C25-T50-12.5K (ค) C25-T50-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C25-T60-10.0K (ข) C25-T60-12.5K (ค) C25-T60-15.0K

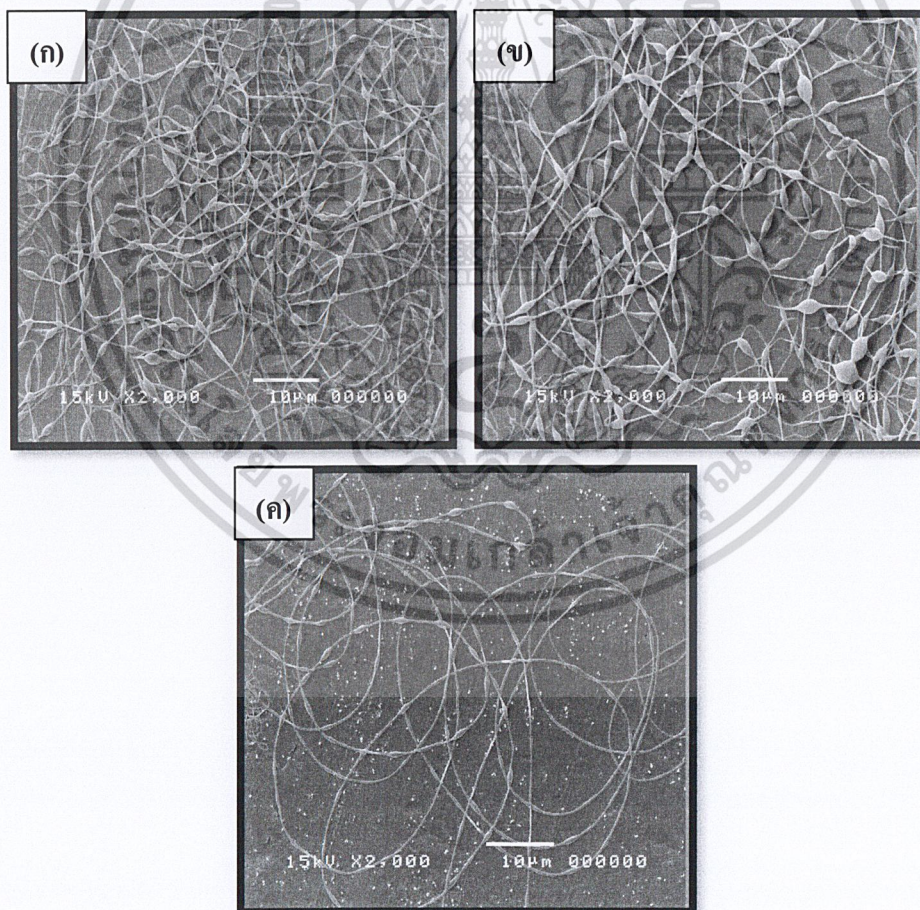
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเจลาตินความเข้มข้น 30% w/v

สภาวะ C30-T40-10.0K พบเส้นใยผสมเม็ดลูกปัดจำนวนมาก แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่สภาวะ C30-T40-12.5K ปริมาณของเม็ดลูกปัดที่พบบนเส้นใยลดน้อยลง แต่ที่สภาวะ C30-T40-15.0K จะพบลักษณะของกลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อยกระจุกตัวอยู่บางบริเวณเท่านั้น

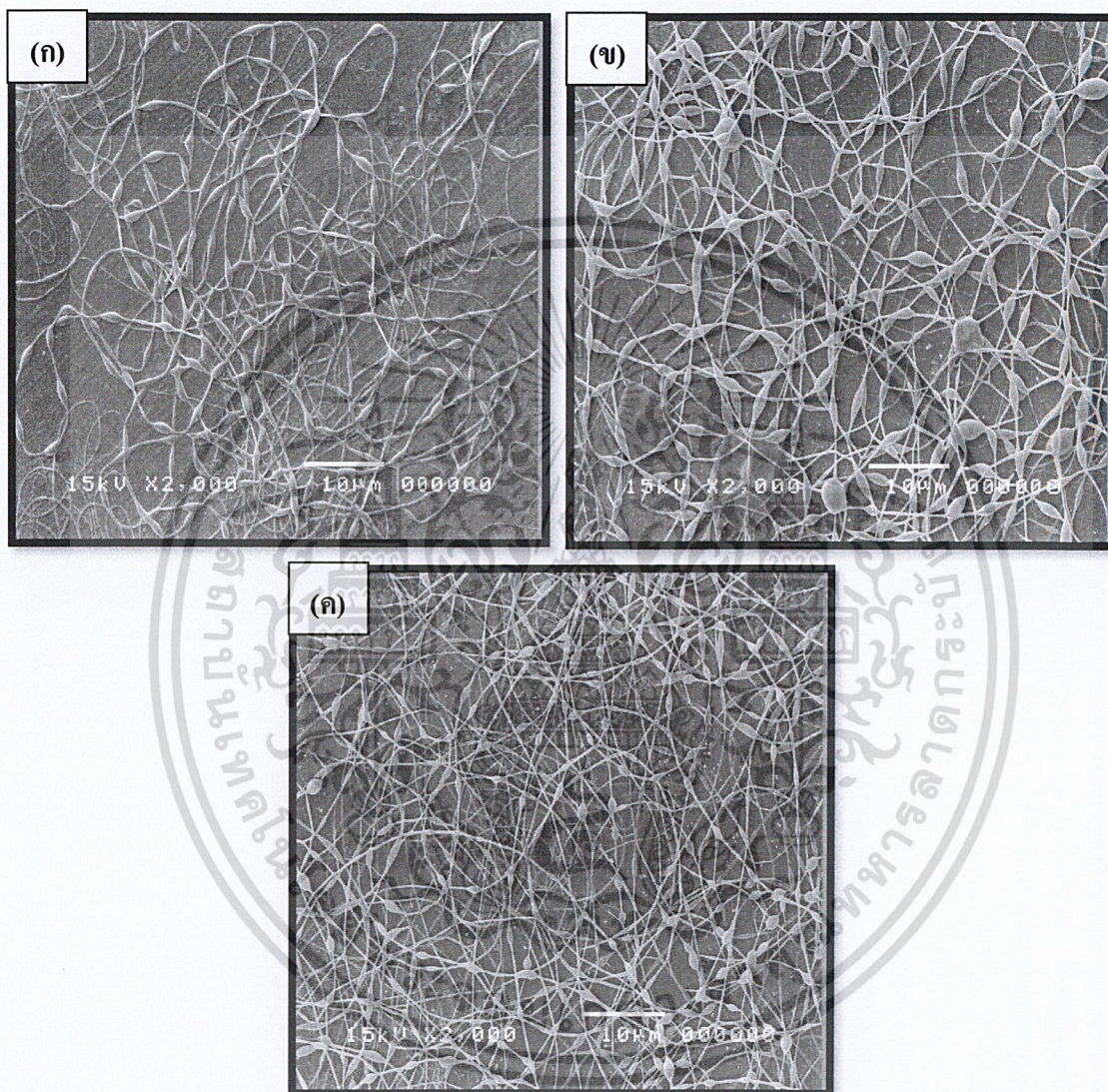
ในสภาวะ C30-T50-10.0K พบกลุ่มของเส้นใยจำนวนเล็กน้อย กลุ่มเส้นใยที่พบเป็นเส้นใยที่ปนเม็ดลูกปัดจำนวนมาก สภาวะ C30-T50-12.5K และ C30-T50-15.0K พบเส้นใยปนกับเม็ดลูกปัดจำนวนมาก โดยที่เมื่อศักย์ไฟฟ้าของระบบเพิ่มสูงขึ้นที่สภาวะ C30-T50-15.0K จำนวนเม็ดลูกปัดบนเส้นใยลดลงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเล็กลงด้วย

เมื่อให้อุณหภูมิสารละลายเพิ่มสูงขึ้นที่ 60°C สภาวะ C30-T60-10.0K พบกลุ่มของเส้นใยจำนวนเล็กน้อยกระจายอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมและมีเส้นใยผสมเม็ดลูกปัดปะปนอยู่บ้าง ที่สภาวะ C30-T60-12.5K พบเส้นใยผสมเม็ดลูกปัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยค่อนข้างต่างกันและที่สภาวะ C30-T60-15.0K พบลักษณะเส้นใยเรียบ และมีละอองของเจลาตินจำนวนมาก



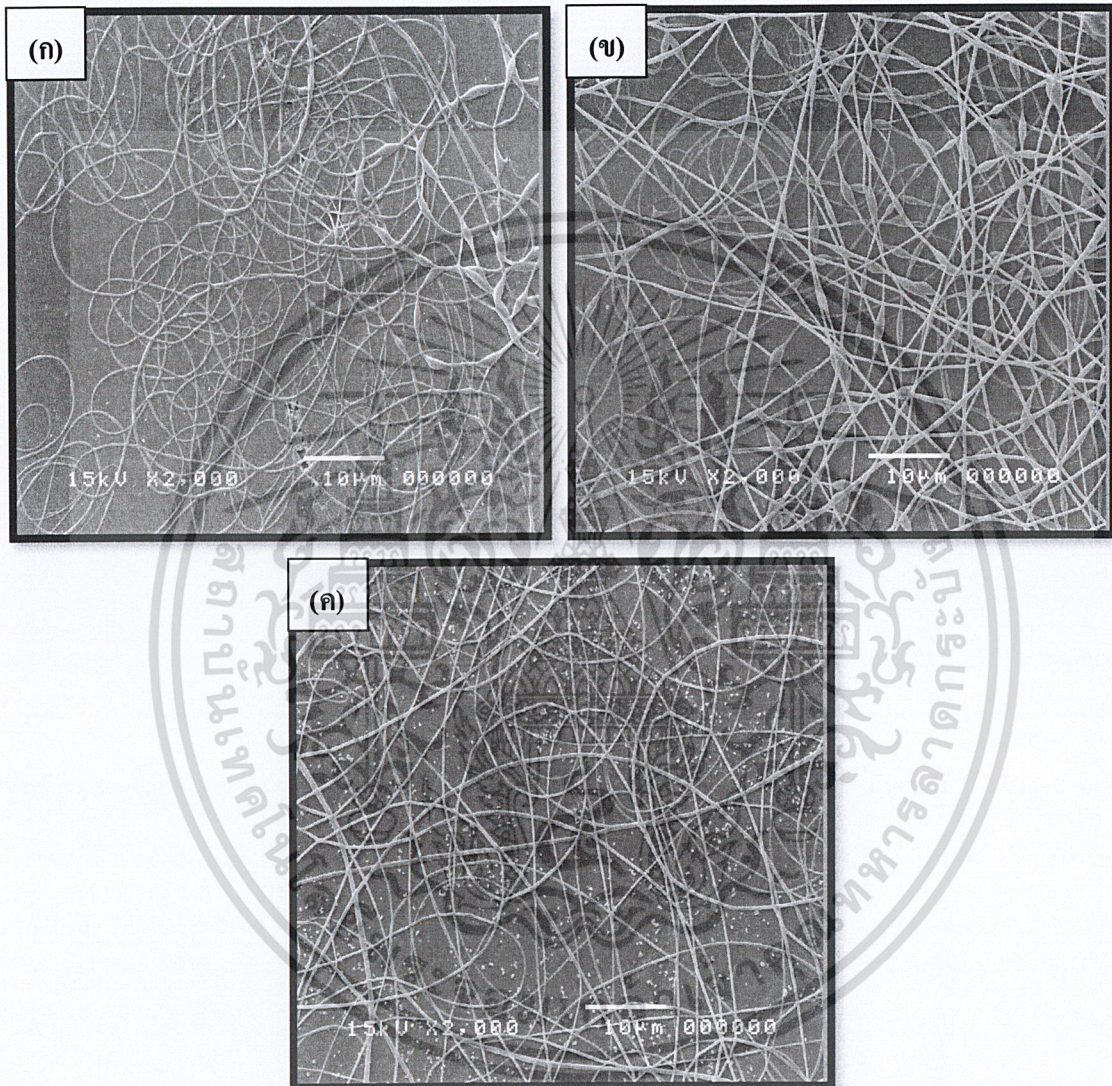
รูปที่ 4.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C30-T40-10.0K (ข) C30-T40-12.5K (ค) C30-T40-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C30-T50-10.0K (ข) C30-T50-12.5K (ค) C30-T50-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C30-T60-10.0K (ข) C30-T60-12.5K (ค) C30-T60-15.0K

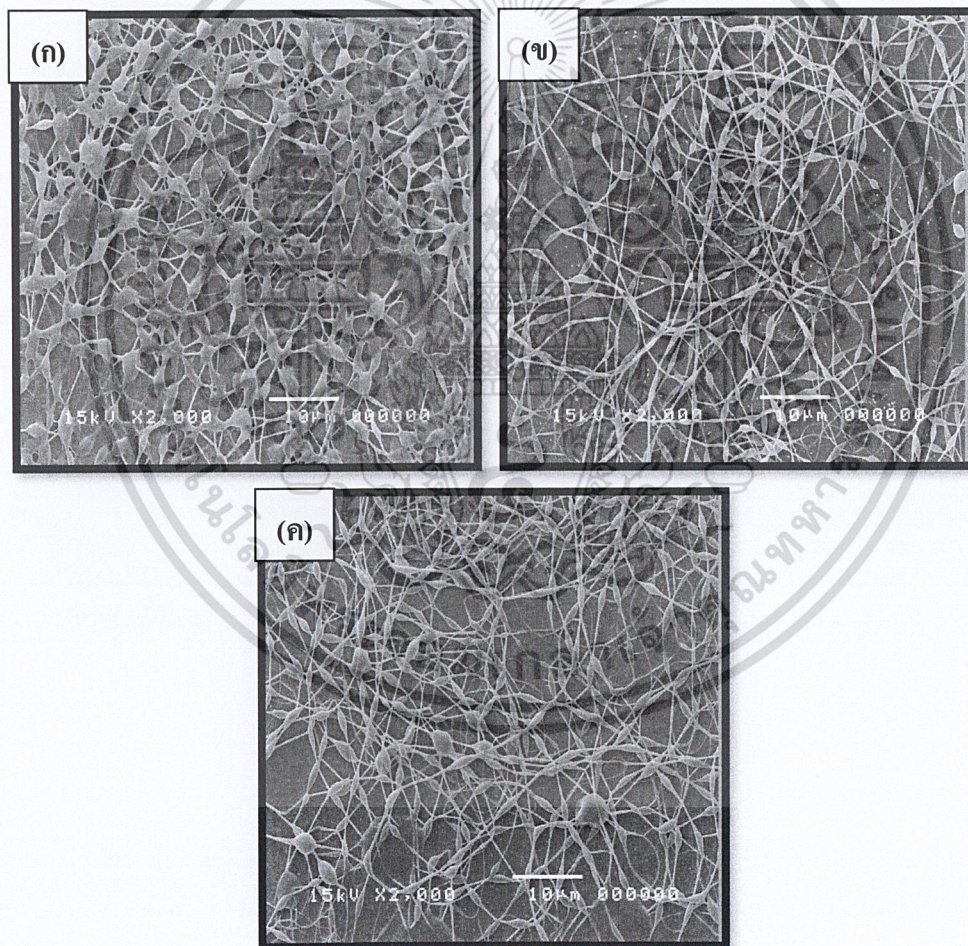
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเจลาตินความเข้มข้น 35% w/v

สภาวะ C35-T60-10.0K พบเส้นใยผสมเม็ดลูกปัดจำนวนมาก โดยเส้นใยแต่ละเส้นเกิดการหลอมรวมติดกัน ที่สภาวะ C35-T60-12.5K และ C35-T60-15.0K พบปริมาณของเม็ดลูกปัดบนเส้นใยลดลง แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแต่ละเส้นค่อนข้างแตกต่างกัน

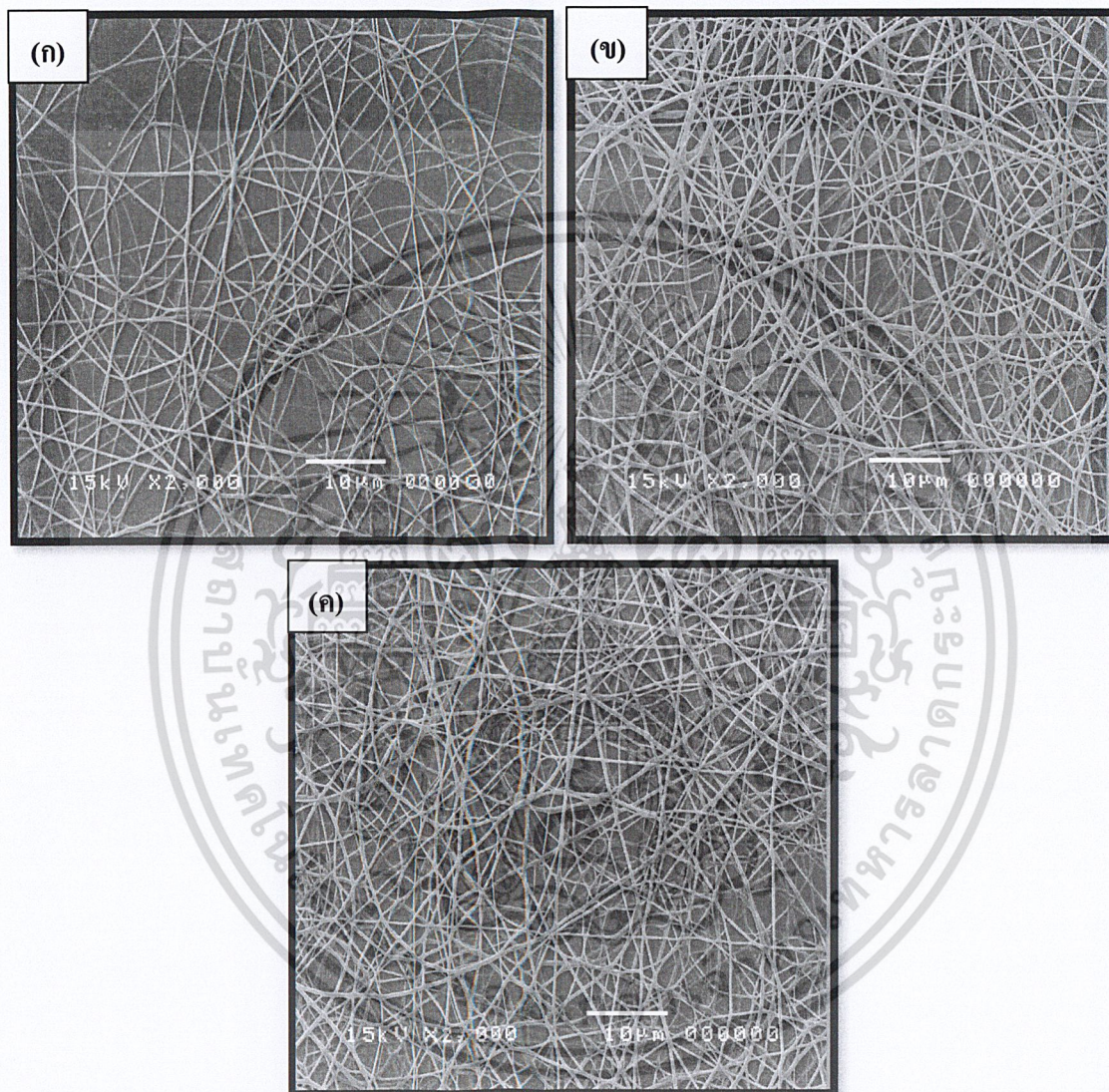
สภาวะ C35-T50-10.0K พบลักษณะเส้นใยเรียบ ความหนาแน่นของเส้นใยที่พบน้อยกว่าที่สภาวะ C30-T50-12.5K และ C35-T50-15.0K ในขณะที่สภาวะ C30-T50-12.5K และ C35-T50-15.0K พบเส้นใยเรียบ ปริมาณเส้นใยที่ได้ค่อนข้างมากและเส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ

สำหรับสภาวะ C35-T60-10.0K, C35-T60-12.5K และ C35-T60-15.0K เส้นใยที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยเรียบ และความหนาแน่นของเส้นใยที่พบบากขึ้นและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าสูงขึ้น



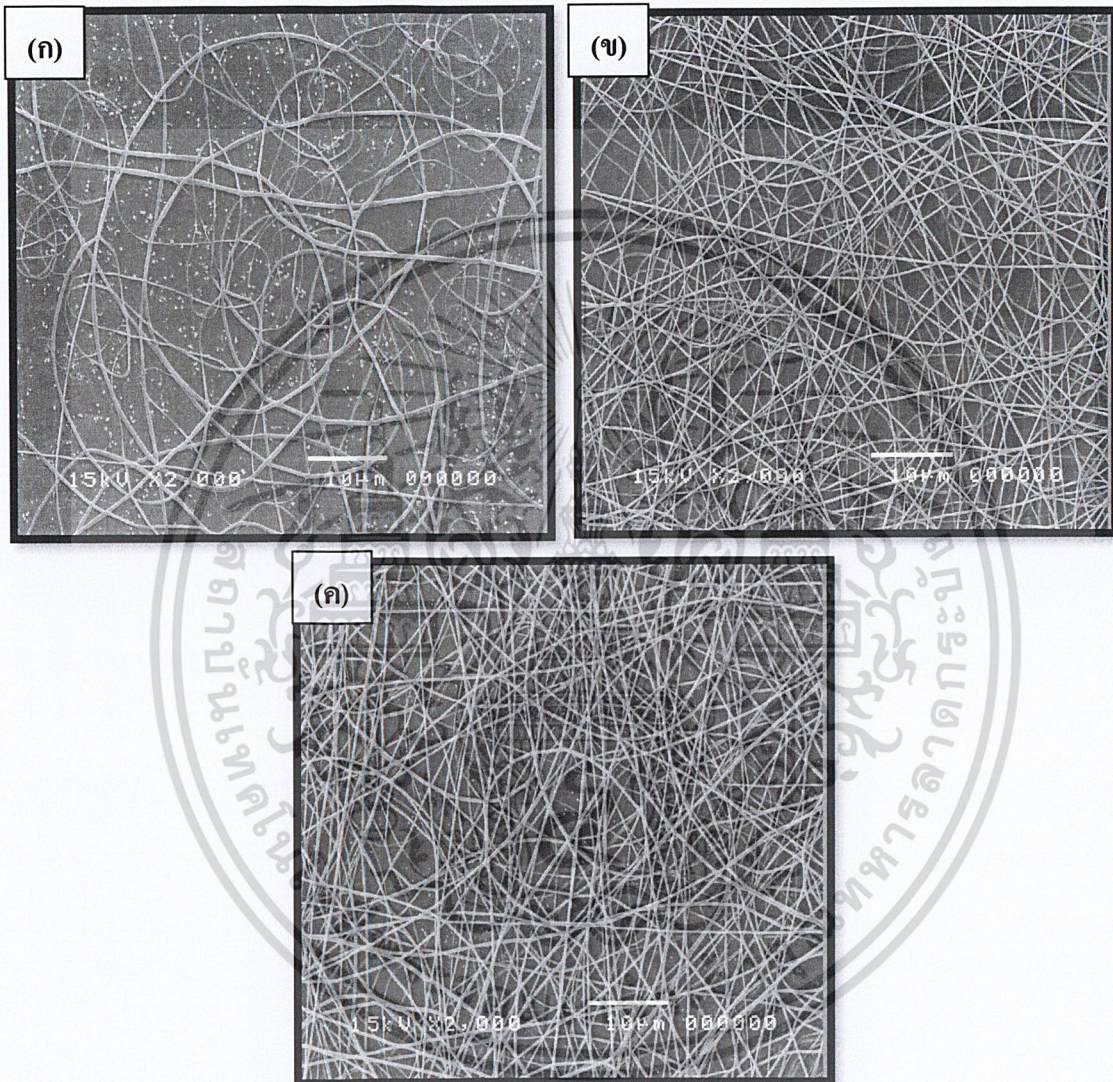
รูปที่ 4.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C35-T40-10.0K (ข) C35-T40-12.5K (ค) C35-T40-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C35-T50-10.0K (ข) C35-T50-12.5K (ค) C35-T50-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C35-T60-10.0K (ข) C35-T60-12.5K (ค) C35-T60-15.0K

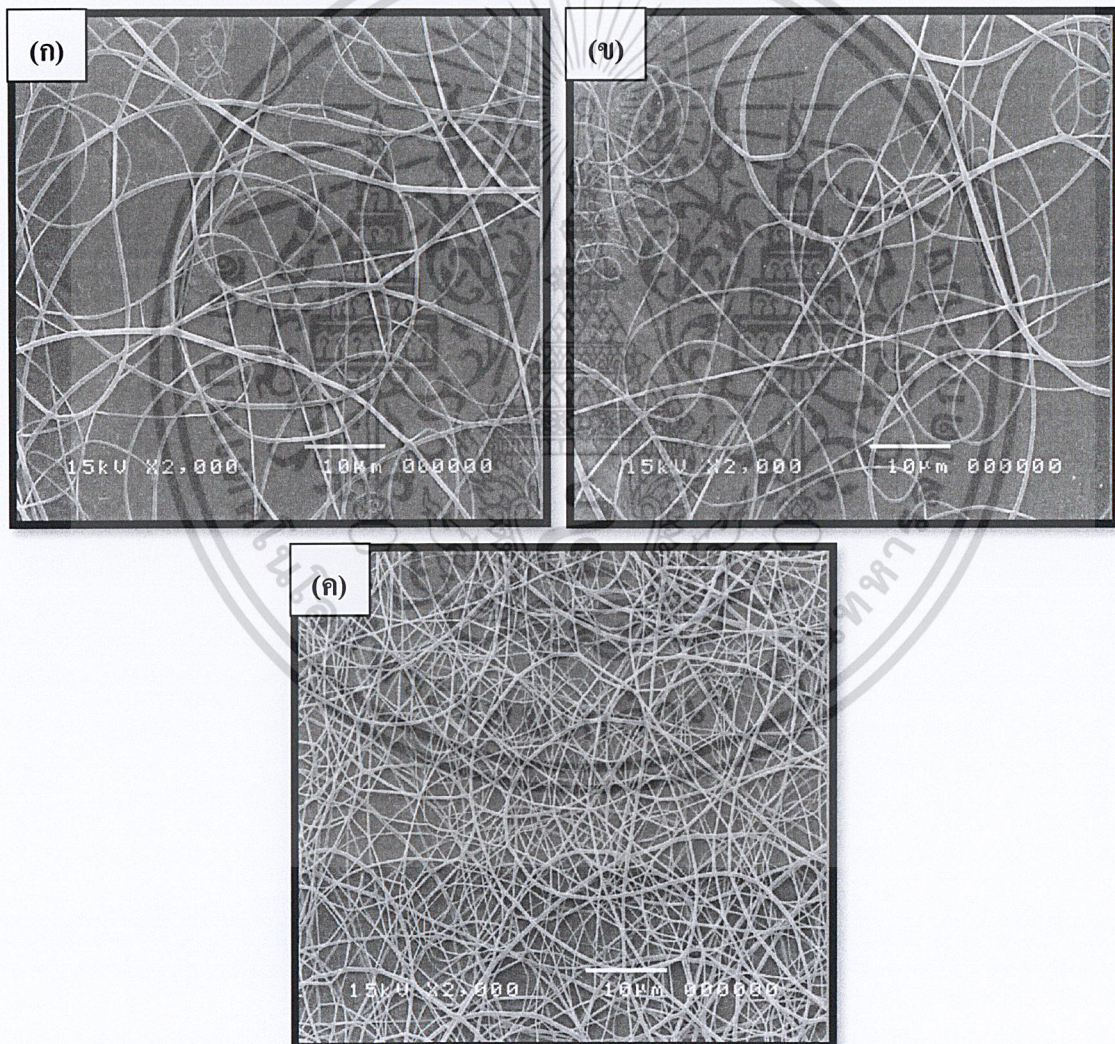
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเจลาตินความเข้มข้น 40% w/v

ที่สภาวะ C40-T40-10.0K และ C40-T40-12.5K เส้นใยที่ปั่นได้มีปริมาณค่อนข้างน้อยและกระจุกตัวอยู่เป็นกลุ่มกระจายอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม ในขณะที่เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นในสภาวะ C40-T40-15.0K จะได้เส้นใยที่มีลักษณะเรียบมากขึ้นและพบเม็ดลูกปัดเล็กน้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยค่อนข้างแตกต่างกัน

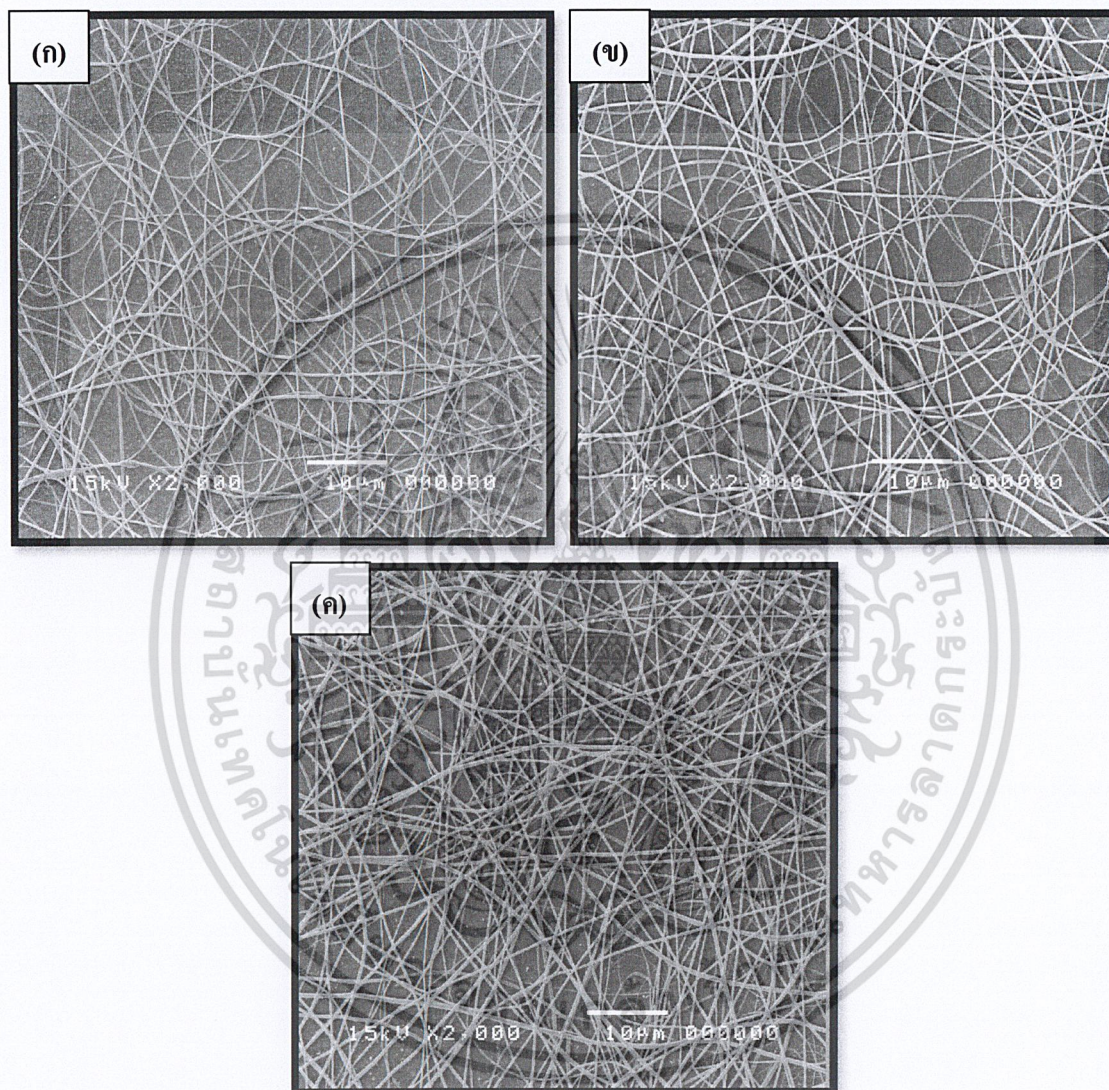
ที่อุณหภูมิ 50 °C ทุกสภาวะพบลักษณะเส้นใยเรียบ ความหนาแน่นของเส้นใยเพิ่มมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบเพิ่มมากขึ้น

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นที่สภาวะ C40-T60-10.0K, C40-T60-15.0K และ C40-T60-12.5K พบเพียงลักษณะของกลุ่มเส้นใยกระจุกตัวอยู่บางบริเวณเท่านั้น



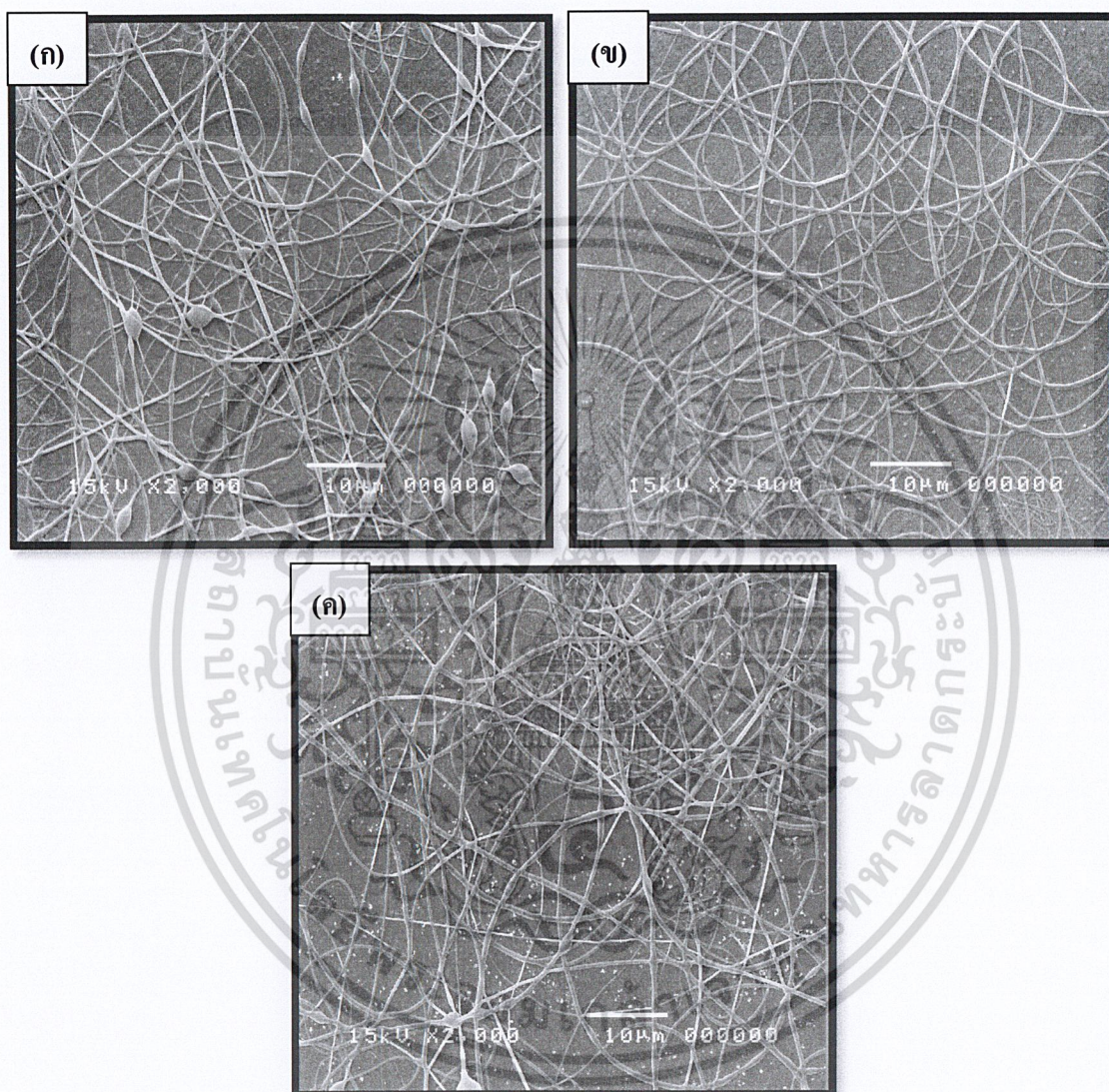
รูปที่ 4.12 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C40-T40-10.0K (ข) C40-T40-12.5K (ค) C40-T40-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C40-T50-10.0K (ข) C40-T50-12.5K (ค) C40-T50-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

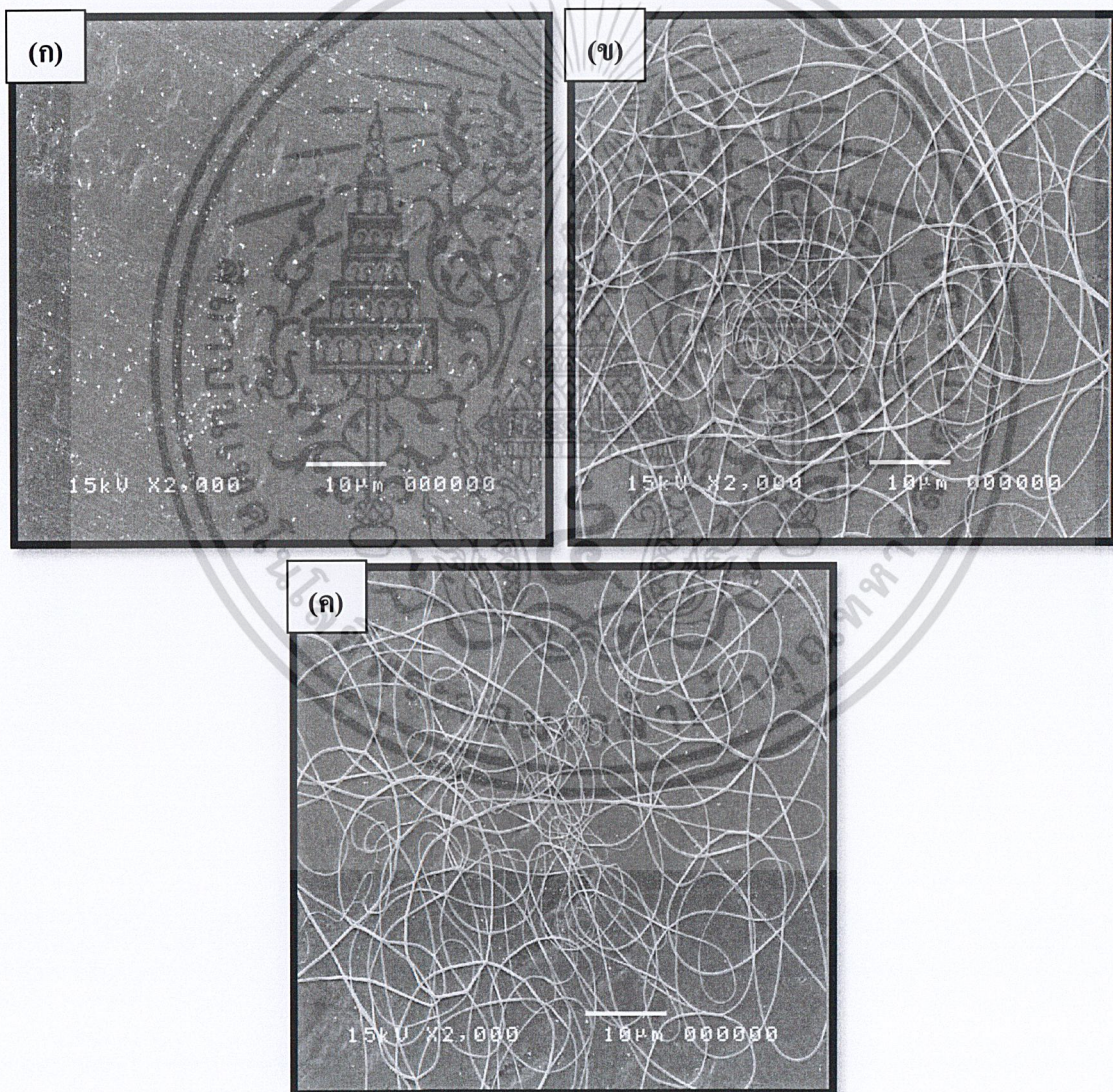


รูปที่ 4.14 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสภาวะ (ก) C40-T60-10.0K (ข) C40-T60-12.5K (ค) C40-T60-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายเจลาตินความเข้มข้น 45%w/v

ในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของสารละลายเจลาตินความเข้มข้น 45%w/v จากรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าสารละลายมีความหนืดที่สูง และเมื่อนำมาปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตสารละลายจะเกิดการอุดตันบริเวณปลายเข็มฉีดยาที่ค่อนข้างเร็ว ทำให้ปั่นเส้นใยออกมาได้ยาก ทำให้ในการทดลองสามารถปั่นเส้นใยออกมาได้เพียงที่อุณหภูมิ 60°C เท่านั้น โดยสารละลายเจลาตินที่อุณหภูมิ 60°C ยังคงมีความหนืดที่สูงอยู่และยังคงอุดตันปลายเข็มฉีดยาบ่อยครั้ง ที่สภาวะ C45-T60-10.0K ภาพจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะไม่พบลักษณะของเส้นใยบนแผ่นอลูมิเนียมเลย พบเพียงละอองของสารละลายเจลาตินจำนวนเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบเพิ่มขึ้นที่สภาวะ C45-T60-12.5K และ C45-T60-15.0K พบลักษณะของเส้นใยเป็นกลุ่มกระจายอยู่บนแผ่น



รูปที่ 4.15 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ของสภาวะ (ก) C45-T60-10.0K (ข) C45-T60-12.5K (ค) C45-T60-15.0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายที่ต่างกันจะให้เส้นใยที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยความเข้มข้นของสารละลายเจลาติน 35%w/v และ 40%w/v จะให้เส้นใยที่มีลักษณะเรียบและมีความหนาแน่นของเส้นใยที่มากกว่าความเข้มข้นอื่นๆ ทั้งนี้ลักษณะของเส้นใยยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นคือ อุณหภูมิและความต่างศักย์ไฟฟ้าด้วย

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40°C เป็น 50 และ 60°C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดเส้นใยที่มีลักษณะต่างกัน โดยเฉพาะการเกิดเม็ดลูกปัด การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ลดลง (พิจารณารูปที่ 4.2) ที่ความเข้มข้นน้อย การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไป (เช่น ที่อุณหภูมิ 60°C) ให้ความหนืดของสารละลายน้อยมากจนเป็นอุปสรรคการการปั่นเส้นใย

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีลักษณะที่เรียบมากขึ้น ปริมาณของเม็ดลูกปัดที่พบจะลดลง โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากพอจะทำให้เกิดการยึดออกของลำพอลิเมอร์ได้ดีกว่าการหดกลับของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลทำให้ปริมาณของเม็ดลูกปัดที่พบลดลง

4.3.2 ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่วัดได้จากโปรแกรม Semafore 5.0 ของภาพกำลังขยาย 5000 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

อักษรย่อ	ลักษณะเส้นใย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm)
C25-T40-10.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C25-T40-12.5K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C25-T40-15.0K	เส้นใยเรียบ	0.20 ± 0.04
C25-T50-10.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C25-T50-12.5K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C25-T50-15.0K	เส้นใยเรียบ	0.25 ± 0.06
C25-T60-10.0K	-	-
C25-T60-12.5K	เส้นใยเรียบ	0.37 ± 0.10
C25-T60-15.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C30-T40-10.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C30-T40-12.5K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C30-T40-15.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

อักษรย่อ	ลักษณะเส้นใย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของเส้นใย (μm)
C30-T50-10.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C30-T50-12.5K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C30-T50-15.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C30-T60-10.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C30-T60-12.5K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C30-T60-15.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C35-T40-10.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C35-T40-12.5K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C35-T40-15.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C35-T50-10.0K	เส้นใยเรียบ	0.28 ± 0.11
C35-T50-12.5K	เส้นใยเรียบ	0.28 ± 0.08
C35-T50-15.0K	เส้นใยผสมเม็ดลูกปัด	-
C35-T60-10.0K	เส้นใยเรียบ	0.26 ± 0.06
C35-T60-12.5K	เส้นใยเรียบ	0.20 ± 0.05
C35-T60-15.0K	เส้นใยเรียบ	0.26 ± 0.06
C40-T40-10.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C40-T40-12.5K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C40-T40-15.0K	เส้นใยเรียบ	0.23 ± 0.08
C40-T50-10.0K	เส้นใยเรียบ	0.25 ± 0.09
C40-T50-12.5K	เส้นใยเรียบ	0.27 ± 0.08
C40-T50-15.0K	เส้นใยเรียบ	0.25 ± 0.09
C40-T60-10.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C40-T60-12.5K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C40-T60-15.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C45-T60-10.0K*	-	-
C45-T40-12.5K*	-	-
C45-T40-15.0K*	-	-
C45-T50-10.0K*	-	-

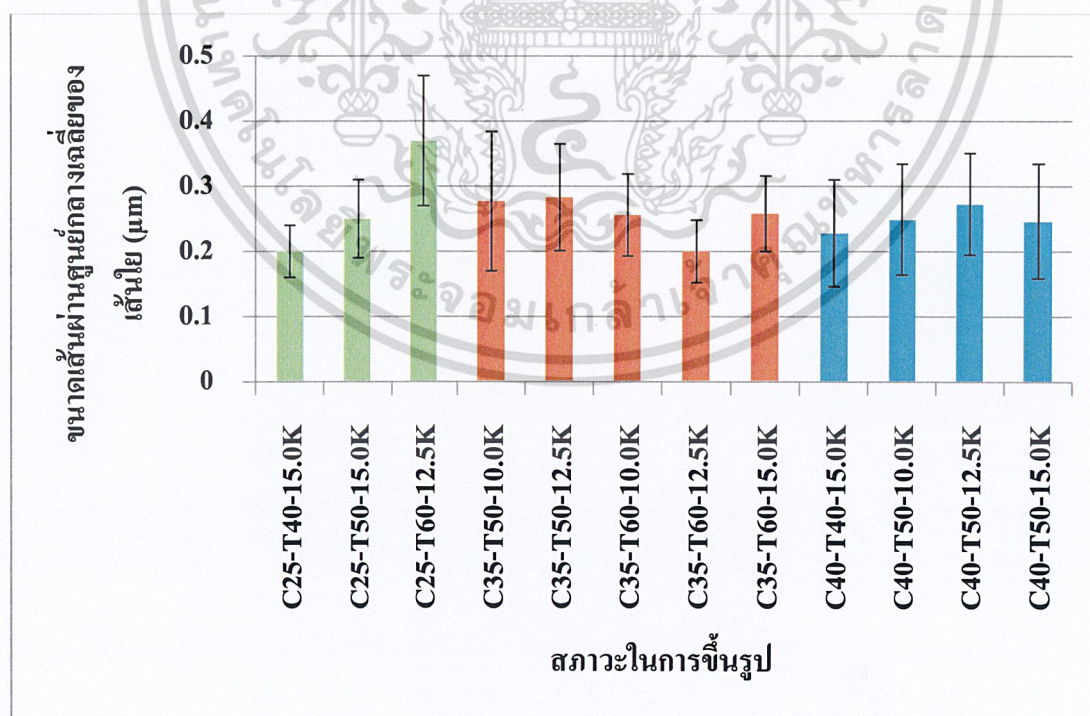
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

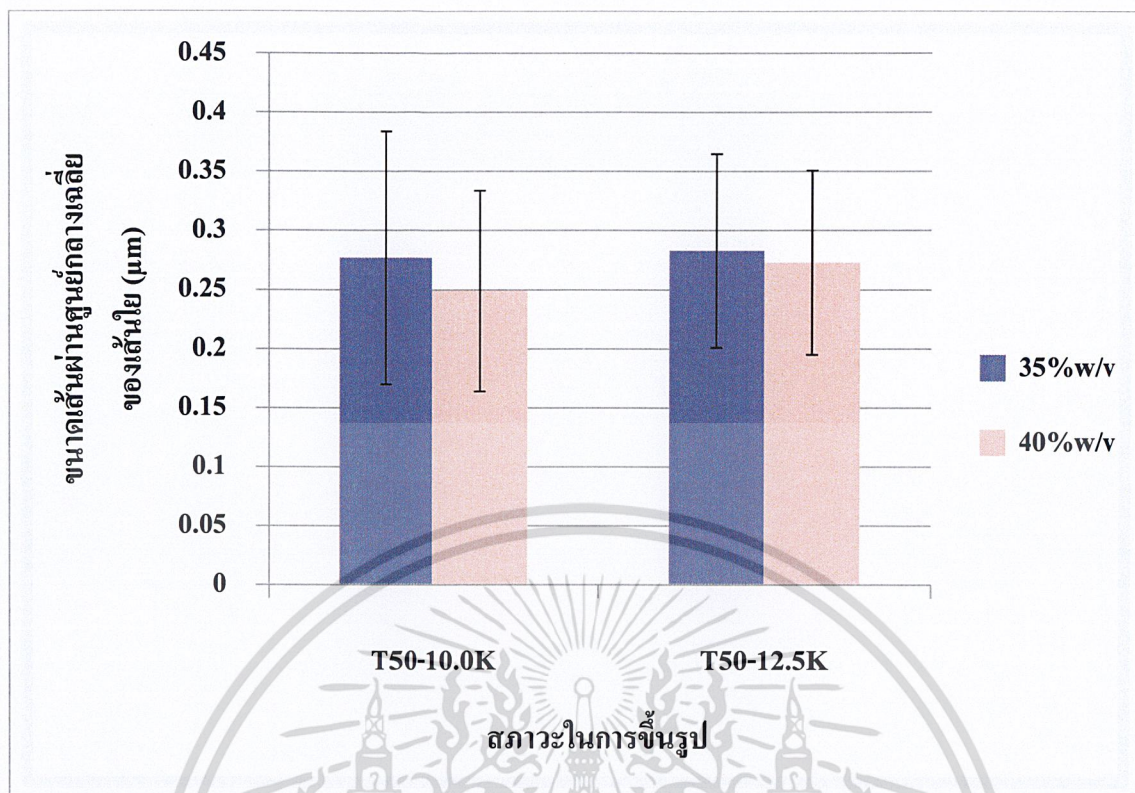
อักษรย่อ	ลักษณะเส้นใย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm)
C45-T50-12.5K*	-	-
C45-T50-15.0K*	-	-
C45-T60-10.0K*	-	-
C45-T60-12.5K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-
C45-T60-15.0K	กลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อย	-

หมายเหตุ * คือ สภาวะที่ไม่สามารถปั่นออกมาเป็นเส้นใยได้ รวมถึงลักษณะเส้นใยแบบกลุ่มเส้นใยจำนวนเล็กน้อยและเส้นใยผสมเม็ดลูกบิดไม่สามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยได้เนื่องจากมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างมาก

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $0.20 - 0.37 \mu\text{m}$ โดยที่สภาวะ C25-T40-15.0K และ C35-T60-12.5K ให้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยต่ำที่สุดและที่สภาวะ C25-T60-12.5K จะให้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยขนาดใหญ่ที่สุด

รูปที่ 4.16 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย (μm) ของแต่ละสภาวะในการทดลอง

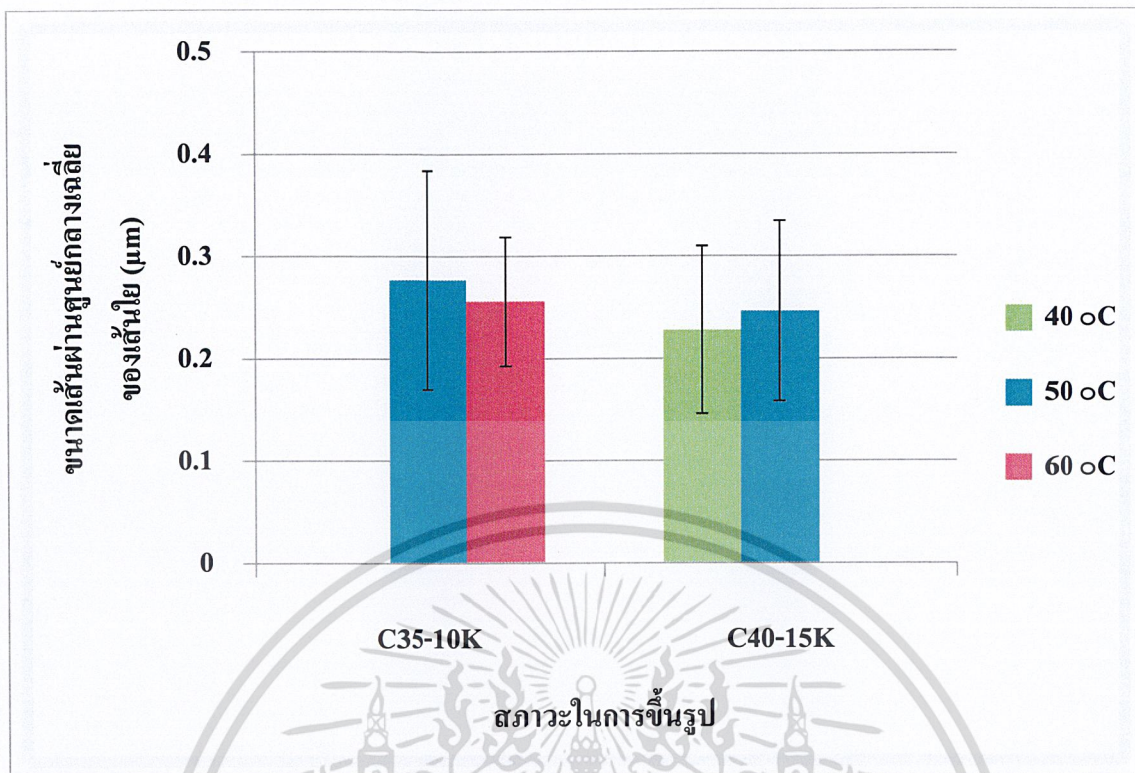
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



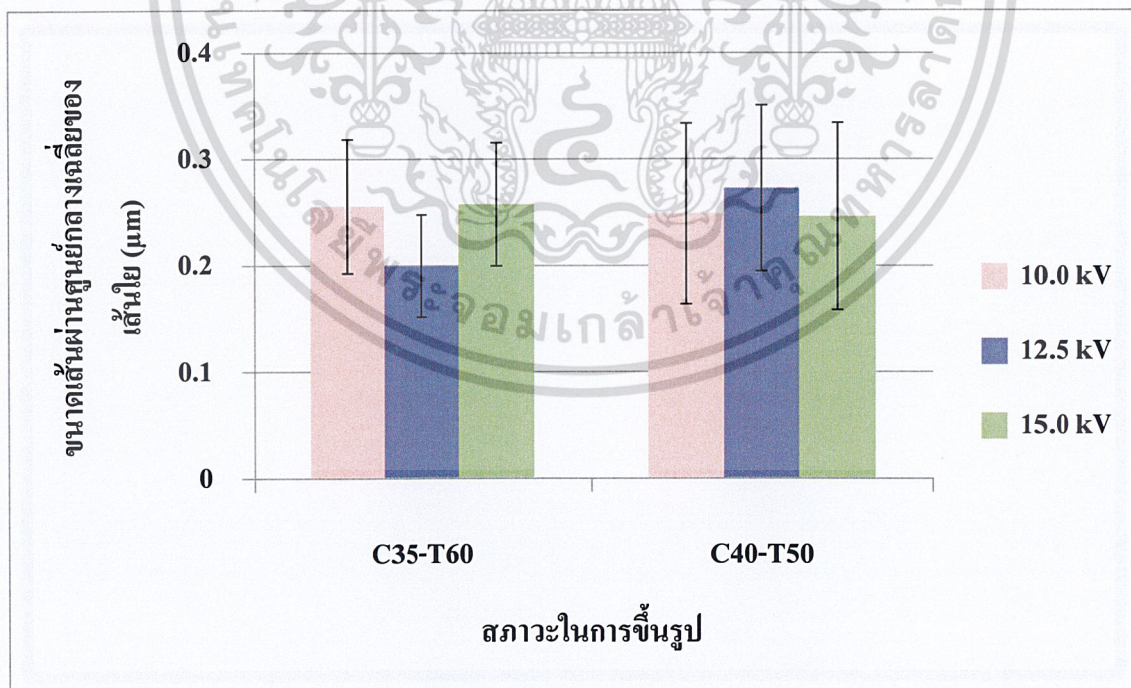
รูปที่ 4.17 ผลของความเข้มข้นที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

จากรูปที่ 4.17 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลาย 35%w/v กับ 40%w/v พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความหนืดของระบบที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลของสารละลายลดลง สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะมีจุดเกี่ยวพันกันของสายโซ่มาก ถ้าของพอลิเมอร์จะถูกดึงรั้งด้วยจุดเกี่ยวพัน ส่งผลทำให้มีการยืดออกของลำพอลิเมอร์มาก่อนตกลงบนวัสดุรองรับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของจึงเล็กกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ให้กับระบบแตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย ทั้งนี้การให้อุณหภูมิแก่ระบบเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ได้ปริมาณของเส้นใยที่มากขึ้นและพบลักษณะของเม็ดลูกปัดลดลง เนื่องจากความหนืดของระบบลดต่ำลงทำให้อัตราการไหลของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย



รูปที่ 4.19 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีผลของแรงกระทำที่กระทำต่อลำของสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งประกอบไปด้วยแรงทั้ง 6 ชนิด ได้แก่

- 1.) แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force)
- 2.) แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force)
- 3.) แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า (Coulombic force)
- 4.) แรงวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic force)
- 5.) แรงตึงผิว (Surface tension)
- 6.) แรงลากพา (Drag force)

ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยสามารถอธิบายได้จากแรงกระทำหลักสามแรงคือ แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า, แรงวิสโคอิลาสติก และแรงตึงผิวของสารละลาย [54] ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบต่ำแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้ามีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงตึงผิว ส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่ใหญ่และพบลักษณะของเม็ดลูกปัดบนเส้นใย เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบมากเพียงพอให้แรงทั้ง 3 สมดุลกันจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็ก และมีการกระจายของขนาดที่ต่ำ แต่เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากกว่าจุดสมดุลนั้น แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้ามีมากกว่าแรงวิสโคอิลาสติกของลำพอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดออกของลำพอลิเมอร์ ทำให้พบลักษณะของกลุ่มเส้นใยกระจุกตัวอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้มุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปเส้นใยเจลลาติน โดยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยใช้ น้ำ เป็นตัวทำละลายเพื่อหลีกเลี่ยงความเป็นพิษของการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการเตรียมสารละลายเจลลาติน สำหรับการใช้งานทางด้านชีวการแพทย์จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลลาติน

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเจลลาตินที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิในการปั่นเส้นใยที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อสัดส่วนวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

5.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นและอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่มีต่อค่าความหนืดของสารละลายเจลลาติน

ความเข้มข้นของสารละลายเจลลาตินที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้สารละลายเจลลาตินมีความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณของเจลลาตินในสารละลายมากขึ้น มีจุดเกี่ยวพันกันของสายโซ่มากขึ้น การเคลื่อนที่ของสายโซ่เจลลาตินจึงยากขึ้นตามไปด้วย และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลายเจลลาตินจะลดต่ำลง เพราะพันธะไฮโดรเจนที่ยึดระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง

5.3 ผลการศึกษาสภาวะในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่มีต่อเส้นใยเจลลาติน

5.3.1 ผลการศึกษาสัดส่วนวิทยา

ความเข้มข้นของสารละลายเจลลาติน 35%w/v และ 40%w/v จะให้เส้นใยที่มีลักษณะเรียบและมีความหนาแน่นของเส้นใยที่มากกว่าความเข้มข้นอื่นๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40°C เป็น 50 และ 60°C ที่ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดเส้นใยที่มีลักษณะต่างกัน โดยเฉพาะการเกิดเม็ดลูกปัด ส่วนความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เส้นใยที่ได้มีลักษณะที่เรียบมากขึ้น ปริมาณของเม็ดลูกปัดที่พบจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.2 ผลการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

เส้นใยที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.20 – 0.37 μm โดยที่สภาวะ C25-T40-15.0K และ C35-T60-12.5K ให้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยต่ำที่สุดและที่สภาวะ C25-T60-12.5K จะให้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยขนาดใหญ่ที่สุด เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลาย 35%w/v กับ 40%w/v พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงอุณหภูมิที่ให้กับระบบแตกต่างกันจะไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบที่เหมาะสมจะทำให้ได้เส้นใยที่เรียบและการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยน้อย

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเจลาตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในการทดลองจึงควรมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิครอบคลุมทั้งระบบการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมที่ต่างกันในแต่ละวันที่ทำการขึ้นรูปจะลดลง
2. อาจเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดการไหลอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
3. ใช้หัวเข็มฉีดยาขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อลดการอุดตันของสารละลายพอลิเมอร์ และควรมีการให้ความร้อนถึงบริเวณปลายเข็มฉีดยาเพื่อลดการอุดตันของสารละลายอีกทางหนึ่งด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Small & Strong Materials Group. “**สารน่ารู้: Electrospinning ตอนที่ 1**”. [Online] Available: http://physics.kku.ac.th/ssmg/wordpress/?page_id=503. (2008).
- [2] ดร. รัฐพล รังกุพันธ์. “**การผลิตเส้นใยขนาดเล็กด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิตย์**”. [Online] Available: <http://www.material.chula.ac.th/RADIO47/January/radio1-1.htm>. (2003).
- [3] Textile’s box. “**กระบวนการผลิตเส้นใย (Fiber manufacturing)**”. [Online] Available: <http://chartree.wordpress.com/2009/11/15/กระบวนการผลิตเส้นใย-fiber-manufacturing/>. (2009).
- [4] “**พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)**”. [Online] Available: <http://www.labreact.net/index.php/researchdesign/28-articleresearch/36--bioplastic-.html>. (2008).
- [5] S. Sinha Ray and M. Bousmina. “**Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world**”. Progress in Materials Science. 50 (2005) 962-1079.
- [6] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. “**เจลาติน**”. [Online] Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%80%E0%B8%88%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%99>
- [7] S.-Y. Gu, Z.-M. Wang, J. Ren and C.-Y. Zhang. “**Electrospinning of gelatin and gelatin/Poly(L-lactide) blend and its characteristics for wound dressing**”. Materials Science and engineering C 29 (2009) 1822-1828.
- [8] C.-M. Deng, L.-Z. He, M. Zhao, D. Yang and Y. Liu. “**Biological properties of the chitisan-gelatin sponge wound dressing**”. Carbohydrate Polymers 69 (2007) 583-589.
- [9] E.J. Chong, T.T. Phan, I.J. Lim, Y.Z. Zhang, B.H. Bay, S. Ramakrishna and C.T. Lim. “**Evaluation of electrospun PCL/gelatin nanofibrous scaffold for wound healing and layered dermal reconstitution**”. Acta Biomaterialia 3 (2007) 321-330.
- [10] H.-C. Chen, W.-C. Jao and M.-C. Yang. “**Characterization of gelatin nanofibers electrospun using ethanol/formic acid/water as a solvent**”. Polymers advanced technologies 20 (2009) 98-103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] S. Zhang, Y. Huang, X. Yang, F. Mei, Q. Ma, G. Chen, S. Ryu and X. Deng. **“Gelatin nanofibrous membrane fabricated by electrospinning of aqueous gelatin solution for guided tissue regeneration”**. Biomedical materials Research part A 90 (2008) 671-679
- [12] P. Rujitanaroj, N. Pimpha and P. Supaphol. **“Wound-dressing materials with antibacterial activity from electrospun gelatin fiber mats containing silver nanoparticles”**. Polymer 49 (2008) 4723-4732.
- [13] A. Jongjareonrak , S. Benjakul, W. Visessanguan, T. Prodpran and M. Tanaka. **“Characterization of edible films from skin gelatin of brownstripe red snapper and bigeye snapper”**. Food Hydrocolloids 20 (2006) 492–501.
- [14] J. Vandervoort and A. Ludwig. **“Preparation and evaluation of drug-loaded gelatin nanoparticles for topical ophthalmic use”**. Eur J Pharm Biopharm 57 (2004) 251–61.
- [15] Y. Tabata, S. Hijikata and Y. Ikada. **“Enhanced vascularization and tissue granulation by basic fibroblast growth factor impregnated in gelatin hydrogels”**. Controlled Release 31(1994) 189–99.
- [16] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนารเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. **“นาโนเทคโนโลยีจากระบบธรรมชาติสู่การสังเคราะห์”**. [Online] Available: http://www.epa.gov/ncercqa/events/news/2002/09_05_02a.html.
- [17] D. H. Reneker, A. L. Yarin, H. Fong and S. Koombhongse. **“Evolution of fiber morphologies during Poly (acrylonitrile) electrospinning”**. Macromolecular Symposia. 287 (2010) 155-161.
- [18] Z.-M. Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki and S. Ramakrishna. **“A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites”**. Composites Science and Technology 63 (2003) 2223–2253.
- [19] Julian H. George. **“Electrospinning and Tissue Engineering PhD. Thesis”**. [Online] Available: <http://www.centropede.com/UKSB2006/ePoster/images/background/ElectrospinFigure.jpg>. (2009).
- [20] S. Ramakrishna, K. Fujihara, W.-E. Teo, T.-C. Lim and Z. Ma. **“An introduction to electrospinning and nanofiber”**. World Scientific Publishing (2005).
- [21] S. L. Shenoy, W. D. Bates, H. L. Frisch, and G. E. Wnek. **“Role Of Chain Entanglements On Fiber Formation During Electrospinning Of Polymer Solutions: Good Solvent, Non-Specific Polymer-Polymer Interaction Limit”**. Polymer 46 (2005) 3372-3384.
- [22] S. Megelski, J. S. Stephens, D.B. Chase and J. F. Rabolt. **“Micro- And Nanostructured Surface Morphology On Electrospun Polymer Fibers”**. Macromolecules 35 (2002) 8456-8466.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] H. Fong, and D. H. Reneker. **“Elastomeric Nanofibers of Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer”**. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 37 (1999) 3488-3493.
- [24] H. Fong, I. Chun and D. H. Reneker. **“Beaded Nanofibers Formed During Electrospinning”**. Polymer 40 (1999) 4585-4592.
- [25] C. Mit-Uppatham, M. Nithitanakul and P. Supaphol. **“Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect Of Solution Conditions On Morphology And Average Fiber Diameter”**. Macromolecule Chemistry and Physic 205 (2004) 2327-2338.
- [26] P. K. Baumgarten. **“Electrostatic Spinning Of Acrylic Microfibers”**. Journal of Colloid and Interface Sciences 36 (1971) 75-79.
- [27] W. K. Son, J. H. Youk, T. S. Lee and W. H. Park. **“Electrospinning Of Ultrafine Cellulose Acetate Fibers: Studies Of A New Solvent System And Deacetylation Of Ultrafine Cellulose Acetate Fibers”**. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 42 (2004) 5-11.
- [28] G. Taylor. **“Disintegration Of Water Drops In An Electric Field”**. Mathematical and Physical Science 280 (1987) 383-397.
- [29] J. M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D. Harris and N. C. Beck Tan. **“The Effect Of Processing Variables On The Morphology Of Electrospun Nanofibers And Textiles”**. Polymer 42 (2001) 261-272.
- [30] X. H. Zhong, K. S. Kim, D. F. Fang, S. F. Ran, B. S. Hsiao and B. Chu. **“Structure And Process Relationship Of Electrospun Bioabsorbable Nanofibers Membranes”**. Polymer 43 (2002) 4403-4412.
- [31] G. C. Rutledge, Y. Li, S. Fridrikh, S. B. Warner, V. E. Kalayci and P. Patra. **“Electrostatic Spinning And Properties Of Ultrafine Fibers”**. National Textile Center. Annual Report (M98-D01). National Textile Center. (2000) 1-10.
- [32] X. Yuan, Y. Zhang, C. Dong and J. Sheng. **“Morphology Of Ultrafine Polysulfone Fibers Prepared By Electrospinning”**. Polymer International 53 (2004) 1704-1710.
- [33] R. Kessick, J. Fenn and G. Tepper, **“The Use Of AC; Potentials In Electro spraying And Electrospinning Processes”**. Polymer 45 (2004) 2981-2984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] H. Q. Liu and Y. L. Hiseh. **“Ultrafine Fibrous Cellulose Membranes From Electrospinning Of Cellulose Acetate”**. Journal of Polymer Science and Polymer Physics 40 (2002) 2119-2129.
- [35] X. M. Mo, C. Y. Xu, M. Kotaki and S. Ramakrishna. **“Electrospun P(LLA-CL) Nanofiber: A Biomimetic Extracellular Matrix For Smooth Muscle Cell And Endothelial Cell Proliferation”**. Biomaterials 25 (2004) 1883-1890.
- [36] A. Greiner, J. H. Wendorff, Angew. **“Angewandte Chemie International Edition”**. Chemistry International Edition 46 (2007) 5670–5703
- [37] J. Lyons and F. Ko. **“Melt electrospinning of polymers: a review”**. Drexel university (2005)
- [38] D. Sun, C. Chang, S. Li and L. Lin. **“Near-field electrospinning”**. Nano letters 6 (2006) 839-842.
- [39] S. Siri, W. Racharee, N. Kampa, and S. Meansiri. **“Electrospun Poly(caprolactone) nanofibers as wound healing scaffold”**. The 2nd International Conference on Science and Technology for Sustainable Development of the Greater Mekong Sub-region. (2008). Hanoi Agricultural University, Hanoi, Vietnam.
- [40] K. Graham, M. Gogins and H. Schreuder-Gibson. **“Incorporation of electrospun nanofibers into functional structures”**. International Nonwovens summer 13 (2004) 21-27
- [41] **“การเคลือบเส้นใยนาโนบนเครื่องแต่งการทหาร”**. [Online] Available: <http://physics.kku.ac.th/ssmg/wordpress/?p=551>.
- [42] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี **“Nucleic acid”**. [Online] Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Nucleic_acid.
- [43] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี **“โปรตีน”**. [Online] Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%82%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%95%E0%B8%B5%E0%B8%99>.
- [44] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี **“Carbohydrate”**. [Online] Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbohydrate>.
- [45] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี **“สารชีวโมเลกุล”**. [Online] Available : http://th.wikipedia.org/wiki/สาร_ชีวโมเลกุล.
- [46] **“Amino acid structures”**. [Online] Available: http://www.neb.com/nebecomm/tech_reference/general_data/amino_acid_structures.asp.
- [47] **“Peptide bond”**. [Online] Available: <http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/lecturesf04am/peptidebond.gif>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

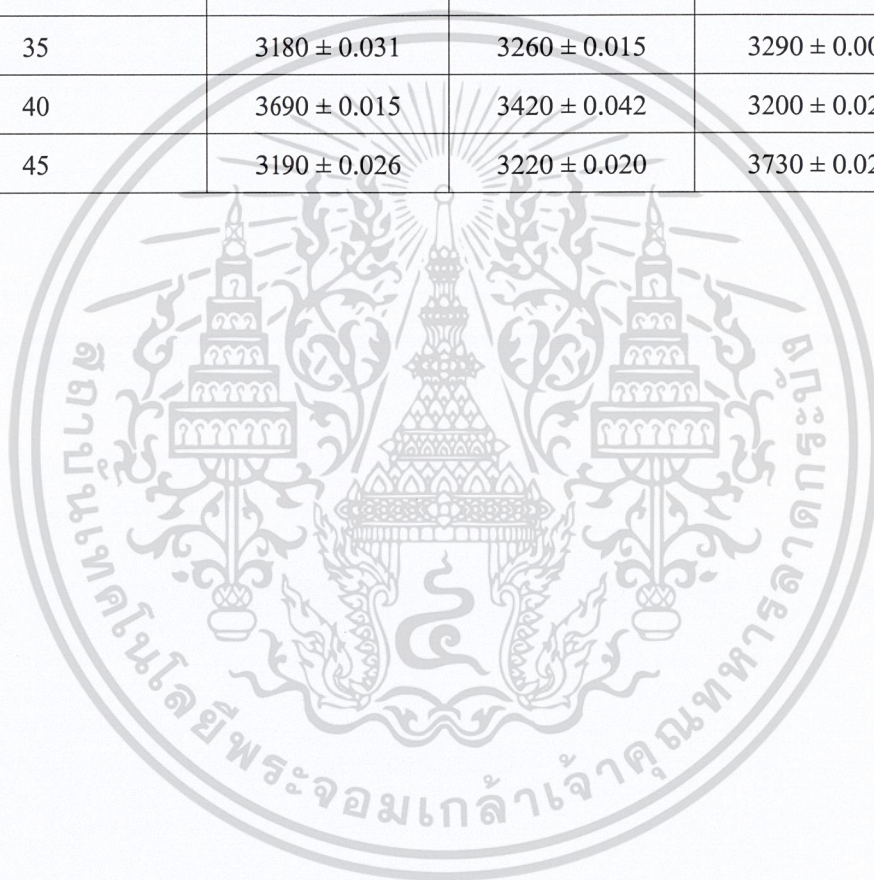
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] D. Okenfull and A. Scott. “**Gelatin gels in deuterium oxide**”. Food Hydrocolloids 17 (2003) 207-210.
- [49] Chempolymerproject. “**Collagen-B-rgam**”. [Online] Available: <https://chempolymerproject.wikispaces.com/Collagen+-+B-+rgam>. (2008).
- [50] รศ. นพ. พรพรหม เมืองแมน และ นพ. อรรถ นิติพล. “Advanced Surgical Wound Care Technology Dressing”. การประชุมวิชาการร่วมโรงพยาบาลกรุงเทพ (2010).
- [51] J. Li, A. He, C. C. Han, D. Fang, B. S. Hsiao, B. Chu. “**Electrospinning of Hyaluronic Acid (HA) and HA/Gelatin Blends**”. Macromolecular Rapid Communications 27 (2006) 114–120.
- [52] N. Choktaweessap, K. Arayanarakul, D. Aht-ong, C. Meechaisue and P. Supaphol. “**Electrospun gelatin fibers: effect of solvent system on morphology and fiber diameters**”. Polymer 39 (2007) 622-631.
- [53] C. M. Deng, L. Z. He, M. Zhao, D. Yang and Y. Liu. “**Biological properties of the chitosan–gelatin sponge wound dressing**”. Carbohydrate Polymer 69 (2007) 583–589.
- [54] L. Wannatong, A. Siriwat and P. Supaphol. “**Effects of solvents on electrospun polymeric fibers: preliminary study on polystyrene**”. Polymer International 53 (2004) 1851–1859.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การวัดค่าการนำไฟฟ้า

ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าการนำไฟฟ้า ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ที่อุณหภูมิ		
	40°C	50°C	60°C
25	2930 \pm 0.075	3160 \pm 0.026	3240 \pm 0.061
30	3150 \pm 0.035	3210 \pm 0.017	3410 \pm 0.021
35	3180 \pm 0.031	3260 \pm 0.015	3290 \pm 0.005
40	3690 \pm 0.015	3420 \pm 0.042	3200 \pm 0.020
45	3190 \pm 0.026	3220 \pm 0.020	3730 \pm 0.020



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
การวัดค่าความหนืด

ความเข้มข้น (%w/v)	ค่าความหนืด (cP) ที่อุณหภูมิ		
	40°C	50°C	60°C
25	7.67 ± 0.287	5.83 ± 1.041	5.00 ± 0.500
30	32.67 ± 0.289	26.83 ± 0.764	25.83 ± 1.041
35	53.83 ± 0.764	27.00 ± 0.866	20.83 ± 1.041
40	114.33 ± 1.258	108.67 ± 1.155	85.00 ± 4.330
45	169.00 ± 3.122	151.00 ± 1.323	143.17 ± 0.289



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
1	0.21	0.26	0.49	0.35
2	0.17	0.19	0.26	0.31
3	0.18	0.19	0.38	0.39
4	0.23	0.29	0.44	0.16
5	0.18	0.16	0.60	0.19
6	0.20	0.27	0.44	0.35
7	0.21	0.21	0.48	0.40
8	0.22	0.23	0.29	0.43
9	0.18	0.22	0.30	0.27
10	0.24	0.27	0.39	0.16
11	0.25	0.31	0.29	0.25
12	0.26	0.14	0.55	0.37
13	0.19	0.27	0.14	0.39
14	0.12	0.29	0.20	0.32
15	0.14	0.25	0.42	0.25
16	0.15	0.28	0.40	0.22
17	0.20	0.30	0.57	0.22
18	0.17	0.32	0.64	0.29
19	0.19	0.22	0.37	0.29
20	0.24	0.2	0.42	0.24
21	0.14	0.17	0.39	0.16
22	0.21	0.22	0.44	0.32
23	0.20	0.29	0.39	0.39
24	0.17	0.30	0.48	0.29
25	0.19	0.27	0.33	0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
26	0.24	0.29	0.44	0.32
27	0.12	0.15	0.42	0.32
28	0.15	0.25	0.40	0.21
29	0.17	0.30	0.25	0.33
30	0.18	0.31	0.25	0.24
31	0.14	0.29	0.44	0.27
32	0.12	0.34	0.40	0.16
33	0.25	0.21	0.39	0.39
34	0.25	0.21	0.37	0.22
35	0.22	0.17	0.44	0.33
36	0.17	0.30	0.45	0.40
37	0.12	0.22	0.34	0.22
38	0.21	0.28	0.37	0.17
39	0.23	0.26	0.56	0.18
40	0.17	0.27	0.31	0.31
41	0.23	0.15	0.49	0.27
42	0.14	0.21	0.42	0.31
43	0.29	0.17	0.44	0.30
44	0.22	0.19	0.40	0.26
45	0.19	0.23	0.40	0.35
46	0.18	0.19	0.40	0.17
47	0.22	0.29	0.35	0.41
48	0.14	0.19	0.51	0.21
49	0.26	0.20	0.56	0.23
50	0.18	0.32	0.44	0.24
51	0.2	0.28	0.2	0.17
52	0.17	0.11	0.42	0.31
53	0.21	0.14	0.25	0.24
54	0.22	0.17	0.49	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
55	0.26	0.18	0.22	0.25
56	0.22	0.16	0.6	0.41
57	0.17	0.24	0.44	0.22
58	0.21	0.31	0.44	0.39
59	0.25	0.26	0.36	0.28
60	0.23	0.26	0.59	0.34
61	0.22	0.28	0.38	0.34
62	0.12	0.18	0.25	0.38
63	0.12	0.25	0.38	0.19
64	0.12	0.20	0.49	0.26
65	0.21	0.23	0.60	0.22
66	0.17	0.16	0.44	0.22
67	0.13	0.47	0.5	0.39
68	0.26	0.33	0.44	0.38
69	0.19	0.30	0.37	0.28
70	0.27	0.34	0.25	0.24
71	0.16	0.29	0.35	0.17
72	0.18	0.28	0.49	0.24
73	0.22	0.31	0.48	0.36
74	0.16	0.31	0.31	0.27
75	0.15	0.28	0.40	0.25
76	0.16	0.24	0.26	0.31
77	0.22	0.28	0.3	0.46
78	0.24	0.28	0.33	0.12
79	0.16	0.19	0.24	0.23
80	0.23	0.21	0.30	0.24
81	0.18	0.20	0.21	0.17
82	0.17	0.23	0.35	0.21
83	0.18	0.20	0.38	0.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
84	0.2	0.26	0.20	0.32
85	0.21	0.17	0.22	0.13
86	0.25	0.26	0.26	0.22
87	0.25	0.28	0.31	0.26
88	0.26	0.36	0.35	0.26
89	0.25	0.37	0.39	0.59
90	0.22	0.26	0.38	0.19
91	0.16	0.23	0.18	0.24
92	0.26	0.2	0.15	0.24
93	0.23	0.16	0.20	0.32
94	0.20	0.10	0.31	0.16
95	0.21	0.15	0.25	0.35
96	0.2	0.16	0.24	0.44
97	0.14	0.16	0.34	0.21
98	0.2	0.16	0.28	0.26
99	0.17	0.29	0.34	0.39
100	0.17	0.22	0.34	0.2
101	0.14	0.23	0.36	0.42
102	0.23	0.17	0.25	0.17
103	0.29	0.22	0.28	0.22
104	0.23	0.23	0.39	0.24
105	0.16	0.25	0.57	0.21
106	0.26	0.15	0.48	0.39
107	0.17	0.22	0.44	0.23
108	0.25	0.22	0.39	0.16
109	0.17	0.26	0.42	0.26
110	0.19	0.19	0.36	0.23
111	0.21	0.23	0.37	0.21
112	0.24	0.24	0.34	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
113	0.25	0.35	0.44	0.34
114	0.16	0.28	0.29	0.22
115	0.21	0.32	0.31	0.23
116	0.21	0.21	0.42	0.26
117	0.19	0.32	0.34	0.29
118	0.25	0.32	0.55	0.30
119	0.14	0.30	0.39	0.24
120	0.17	0.24	0.35	0.19
121	0.21	0.27	0.24	0.26
122	0.29	0.25	0.24	0.31
123	0.32	0.26	0.46	0.26
124	0.3	0.29	0.39	0.29
125	0.10	0.27	0.35	0.21
126	0.17	0.25	0.35	0.53
127	0.27	0.28	0.29	0.47
128	0.28	0.31	0.38	0.27
129	0.21	0.24	0.44	0.27
130	0.21	0.25	0.35	0.24
131	0.17	0.29	0.40	0.31
132	0.24	0.34	0.50	0.36
133	0.24	0.39	0.45	0.46
134	0.23	0.39	0.31	0.49
135	0.23	0.24	0.30	0.36
136	0.23	0.21	0.54	0.31
137	0.22	0.25	0.52	0.31
138	0.18	0.21	0.36	0.23
139	0.27	0.12	0.44	0.17
140	0.23	0.44	0.39	0.27
141	0.23	0.27	0.44	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
59	0.27	0.30	0.11	0.23
60	0.28	0.39	0.26	0.26
61	0.19	0.22	0.17	0.22
62	0.22	0.20	0.17	0.21
63	0.29	0.27	0.2	0.19
64	0.20	0.16	0.29	0.29
65	0.20	0.19	0.31	0.23
66	0.19	0.18	0.22	0.29
67	0.24	0.21	0.23	0.31
68	0.25	0.28	0.16	0.22
69	0.27	0.20	0.22	0.25
70	0.27	0.23	0.23	0.15
71	0.3	0.28	0.31	0.23
72	0.19	0.35	0.29	0.20
73	0.22	0.27	0.22	0.26
74	0.22	0.26	0.25	0.25
75	0.45	0.35	0.29	0.17
76	0.26	0.28	0.29	0.17
77	0.22	0.23	0.17	0.26
78	0.24	0.31	0.26	0.20
79	0.29	0.19	0.15	0.21
80	0.43	0.23	0.27	0.3
81	0.22	0.20	0.16	0.35
82	0.25	0.34	0.18	0.22
83	0.38	0.17	0.11	0.19
84	0.27	0.34	0.14	0.36
85	0.51	0.24	0.13	0.16
86	0.38	0.25	0.20	0.28
87	0.32	0.36	0.17	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
142	0.19	0.31	0.34	0.24
143	0.12	0.33	0.37	0.37
144	0.25	0.33	0.31	0.15
145	0.22	0.31	0.39	0.15
146	0.25	0.19	0.42	0.33
147	0.26	0.27	0.29	0.15
148	0.23	0.29	0.37	0.17
149	0.21	0.29	0.53	0.18
150	0.25	0.41	0.42	0.22
151	0.24	0.39	0.56	0.26
152	0.29	0.33	0.41	0.3
153	0.19	0.24	0.44	0.21
154	0.21	0.19	0.44	0.16
155	0.18	0.21	0.25	0.22
156	0.23	0.31	0.36	0.14
157	0.18	0.17	0.44	0.18
158	0.14	0.16	0.29	0.21
159	0.25	0.22	0.31	0.22
160	0.17	0.26	0.29	0.21
161	0.18	0.15	0.49	0.21
162	0.24	0.32	0.28	0.19
163	0.19	0.22	0.31	0.21
164	0.29	0.25	0.56	0.22
165	0.28	0.25	0.38	0.3
166	0.21	0.21	0.42	0.31
167	0.24	0.17	0.49	0.24
168	0.23	0.22	0.45	0.41
169	0.14	0.26	0.25	0.25
170	0.16	0.29	0.35	0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
171	0.20	0.18	0.49	0.26
172	0.21	0.23	0.48	0.33
173	0.17	0.29	0.31	0.18
174	0.17	0.28	0.40	0.21
175	0.20	0.29	0.26	0.24
176	0.14	0.26	0.30	0.20
177	0.15	0.26	0.33	0.25
178	0.26	0.30	0.24	0.23
179	0.1	0.24	0.30	0.21
180	0.18	0.16	0.21	0.21
181	0.16	0.21	0.35	0.19
182	0.15	0.32	0.38	0.20
183	0.15	0.35	0.20	0.89
184	0.18	0.25	0.22	0.37
185	0.14	0.25	0.26	0.20
186	0.18	0.23	0.31	0.24
187	0.28	0.25	0.35	0.21
188	0.24	0.20	0.39	0.37
189	0.21	0.28	0.38	0.23
190	0.19	0.41	0.18	0.28
191	0.16	0.29	0.15	0.31
192	0.20	0.21	0.20	0.24
193	0.18	0.23	0.31	0.24
194	0.17	0.29	0.25	0.33
195	0.22	0.33	0.24	0.16
196	0.21	0.33	0.34	0.32
197	0.19	0.29	0.28	0.54
198	0.18	0.29	0.34	0.29
199	0.25	0.24	0.34	0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C25-T40-15.0K	C25-T50-15.0K	C25-T60-12.5K	C35-T50-10.0K
200	0.25	0.36	0.36	0.96
ค่าเฉลี่ย	0.20 \pm 0.04	0.25 \pm 0.06	0.37 \pm 0.10	0.28 \pm 0.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
1	0.26	0.30	0.15	0.22
2	0.48	0.30	0.25	0.21
3	0.41	0.15	0.24	0.23
4	0.39	0.21	0.22	0.22
5	0.48	0.29	0.18	0.17
6	0.4	0.30	0.24	0.42
7	0.46	0.35	0.11	0.24
8	0.45	0.32	0.23	0.28
9	0.35	0.34	0.28	0.28
10	0.23	0.31	0.12	0.17
11	0.21	0.21	0.19	0.25
12	0.5	0.28	0.22	0.28
13	0.29	0.14	0.25	0.36
14	0.34	0.29	0.23	0.30
15	0.26	0.29	0.21	0.29
16	0.29	0.18	0.24	0.24
17	0.12	0.15	0.23	0.16
18	0.24	0.25	0.2	0.24
19	0.22	0.21	0.32	0.20
20	0.32	0.3	0.23	0.23
21	0.31	0.2	0.23	0.27
22	0.19	0.27	0.14	0.25
23	0.17	0.29	0.14	0.28
24	0.28	0.35	0.26	0.30
25	0.34	0.24	0.21	0.26
26	0.28	0.27	0.22	0.36
27	0.24	0.17	0.22	0.22
28	0.26	0.24	0.12	0.21
29	0.35	0.23	0.24	0.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
30	0.22	0.20	0.24	0.26
31	0.32	0.23	0.12	0.26
32	0.34	0.23	0.20	0.21
33	0.36	0.19	0.27	0.34
34	0.28	0.25	0.24	0.23
35	0.26	0.25	0.16	0.23
36	0.40	0.26	0.21	0.29
37	0.48	0.29	0.15	0.24
38	0.04	0.34	0.12	0.23
39	0.25	0.40	0.22	0.17
40	0.15	0.23	0.15	0.29
41	0.17	0.30	0.19	0.26
42	0.24	0.29	0.14	0.34
43	0.29	0.29	0.22	0.45
44	0.24	0.19	0.24	0.32
45	0.29	0.31	0.13	0.39
46	0.31	0.29	0.18	0.24
47	0.33	0.23	0.16	0.3
48	0.29	0.16	0.21	0.15
49	0.39	0.19	0.08	0.25
50	0.23	0.18	0.15	0.32
51	0.17	0.14	0.19	0.33
52	0.27	0.18	0.12	0.34
53	0.13	0.20	0.2	0.26
54	0.20	0.21	0.14	0.25
55	0.26	0.19	0.33	0.34
56	0.29	0.23	0.17	0.24
57	0.19	0.12	0.22	0.32
58	0.20	0.25	0.20	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
88	0.38	0.26	0.21	0.18
89	0.39	0.39	0.20	0.25
90	0.21	0.33	0.19	0.25
91	0.27	0.35	0.19	0.31
92	0.45	0.39	0.22	0.20
93	0.49	0.30	0.21	0.20
94	0.30	0.37	0.18	0.33
95	0.17	0.23	0.19	0.45
96	0.26	0.25	0.28	0.29
97	0.17	0.41	0.17	0.19
98	0.22	0.28	0.25	0.19
99	0.30	0.18	0.12	0.22
100	0.23	0.30	0.24	0.23
101	0.15	0.29	0.23	0.24
102	0.35	0.3	0.17	0.27
103	0.37	0.28	0.24	0.25
104	0.33	0.25	0.2	0.19
105	0.31	0.17	0.16	0.27
106	0.25	0.20	0.22	0.27
107	0.34	0.25	0.19	0.24
108	0.47	0.17	0.12	0.33
109	0.29	0.21	0.16	0.27
110	0.26	0.23	0.13	0.27
111	0.24	0.28	0.25	0.24
112	0.27	0.33	0.14	0.20
113	0.31	0.3	0.20	0.36
114	0.29	0.22	0.25	0.25
115	0.21	0.35	0.24	0.17
116	0.25	0.34	0.23	0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
117	0.24	0.29	0.08	0.24
118	0.25	0.28	0.16	0.23
119	0.24	0.18	0.28	0.22
120	0.24	0.29	0.25	0.29
121	0.27	0.28	0.21	0.31
122	0.20	0.34	0.23	0.31
123	0.19	0.33	0.29	0.25
124	0.15	0.29	0.19	0.29
125	0.20	0.27	0.23	0.20
126	0.44	0.32	0.23	0.20
127	0.31	0.30	0.23	0.23
128	0.36	0.19	0.18	0.20
129	0.34	0.29	0.20	0.18
130	0.25	0.28	0.17	0.24
131	0.32	0.32	0.25	0.33
132	0.29	0.33	0.19	0.27
133	0.32	0.23	0.15	0.23
134	0.24	0.23	0.18	0.20
135	0.22	0.16	0.17	0.23
136	0.22	0.22	0.20	0.40
137	0.22	0.22	0.12	0.39
138	0.34	0.29	0.12	0.44
139	0.17	0.18	0.22	0.21
140	0.24	0.32	0.16	0.23
141	0.21	0.23	0.27	0.28
142	0.16	0.34	0.17	0.22
143	0.19	0.16	0.23	0.18
144	0.21	0.15	0.18	0.28
145	0.23	0.25	0.18	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
146	0.25	0.27	0.18	0.26
147	0.30	0.22	0.20	0.23
148	0.29	0.29	0.19	0.23
149	0.33	0.26	0.22	0.25
150	0.42	0.27	0.25	0.17
151	0.32	0.26	0.17	0.29
152	0.25	0.23	0.25	0.32
153	0.29	0.22	0.21	0.27
154	0.29	0.27	0.2	0.31
155	0.23	0.25	0.23	0.29
156	0.25	0.23	0.16	0.23
157	0.30	0.18	0.24	0.28
158	0.29	0.23	0.17	0.26
159	0.34	0.16	0.18	0.34
160	0.33	0.29	0.18	0.30
161	0.27	0.45	0.27	0.20
162	0.63	0.26	0.23	0.23
163	0.21	0.25	0.15	0.25
164	0.24	0.20	0.26	0.33
165	0.29	0.17	0.23	0.23
166	0.31	0.23	0.18	0.300
167	0.27	0.39	0.22	0.33
168	0.40	0.20	0.18	0.31
169	0.25	0.23	0.22	0.31
170	0.33	0.22	0.22	0.25
172	0.35	0.17	0.23	0.17
173	0.31	0.33	0.21	0.24
174	0.40	0.26	0.25	0.23
175	0.28	0.26	0.19	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C35-T50-12.5K	C35-T60-10.0K	C35-T60-12.5K	C35-T60-15.0K
176	0.19	0.28	0.21	0.23
177	0.22	0.19	0.14	0.29
178	0.28	0.19	0.20	0.20
179	0.30	0.30	0.12	0.29
180	0.29	0.25	0.19	0.26
181	0.25	0.19	0.21	0.29
182	0.23	0.22	0.19	0.21
183	0.29	0.22	0.16	0.22
184	0.26	0.21	0.17	0.24
185	0.23	0.24	0.14	0.19
186	0.27	0.19	0.19	0.17
187	0.36	0.25	0.20	0.14
188	0.33	0.18	0.23	0.33
189	0.31	0.27	0.21	0.26
190	0.34	0.17	0.17	0.27
191	0.31	0.18	0.15	0.30
192	0.26	0.17	0.23	0.33
193	0.25	0.30	0.22	0.30
194	0.25	0.31	0.15	0.29
195	0.26	0.27	0.25	0.38
196	0.24	0.25	0.24	0.27
197	0.19	0.37	0.22	0.26
198	0.28	0.29	0.18	0.29
199	0.31	0.30	0.24	0.27
200	0.26	0.39	0.11	0.16
ค่าเฉลี่ย	0.28 ± 0.08	0.26 ± 0.06	0.20 ± 0.05	0.26 ± 0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
1	0.12	0.20	0.41	0.40
2	0.27	0.26	0.25	0.25
3	0.15	0.24	0.28	0.18
4	0.20	0.27	0.35	0.19
5	0.19	0.15	0.25	0.23
6	0.17	0.14	0.21	0.35
7	0.17	0.49	0.43	0.20
8	0.25	0.30	0.35	0.20
9	0.19	0.33	0.29	0.23
10	0.22	0.19	0.25	0.28
11	0.15	0.22	0.42	0.16
12	0.38	0.18	0.22	0.16
13	0.38	0.22	0.18	0.15
14	0.33	0.21	0.21	0.20
15	0.20	0.37	0.36	0.18
16	0.14	0.35	0.3	0.16
17	0.22	0.34	0.33	0.17
18	0.19	0.24	0.25	0.13
19	0.15	0.30	0.34	0.17
20	0.25	0.29	0.24	0.18
21	0.29	0.17	0.24	0.47
22	0.16	0.20	0.29	0.18
23	0.34	0.09	0.29	0.48
24	0.24	0.25	0.27	0.18
25	0.19	0.30	0.23	0.20
26	0.34	0.12	0.19	0.31
27	0.32	0.17	0.44	0.33
28	0.29	0.14	0.23	0.35
29	0.14	0.14	0.29	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
30	0.16	0.44	0.20	0.36
31	0.19	0.37	0.35	0.34
32	0.21	0.47	0.30	0.28
33	0.19	0.21	0.18	0.50
34	0.34	0.28	0.25	0.29
35	0.25	0.29	0.19	0.36
36	0.14	0.24	0.31	0.37
37	0.22	0.23	0.24	0.27
38	0.23	0.31	0.22	0.22
39	0.23	0.22	0.16	0.24
40	0.16	0.23	0.25	0.24
41	0.18	0.16	0.18	0.20
42	0.30	0.28	0.29	0.18
43	0.16	0.20	0.18	0.18
44	0.14	0.16	0.35	0.26
45	0.18	0.15	0.43	0.26
46	0.31	0.14	0.35	0.27
47	0.24	0.19	0.33	0.16
48	0.26	0.39	0.27	0.16
49	0.20	0.23	0.29	0.28
50	0.26	0.40	0.40	0.28
51	0.31	0.36	0.29	0.27
52	0.21	0.37	0.24	0.36
53	0.18	0.19	0.32	0.15
54	0.14	0.31	0.17	0.22
55	0.28	0.19	0.21	0.2
56	0.24	0.27	0.33	0.25
57	0.37	0.35	0.27	0.27
58	0.30	0.30	0.24	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
59	0.18	0.39	0.25	0.20
60	0.17	0.31	0.26	0.39
61	0.24	0.28	0.53	0.32
62	0.14	0.30	0.37	0.14
63	0.15	0.38	0.11	0.22
64	0.15	0.49	0.23	0.26
65	0.23	0.22	0.21	0.19
66	0.19	0.22	0.19	0.29
67	0.23	0.14	0.22	0.18
68	0.16	0.10	0.18	0.11
69	0.18	0.23	0.18	0.16
70	0.21	0.19	0.27	0.23
71	0.13	0.19	0.29	0.20
72	0.21	0.17	0.18	0.43
73	0.14	0.15	0.36	0.39
74	0.18	0.25	0.35	0.36
75	0.16	0.27	0.41	0.36
76	0.14	0.19	0.40	0.16
77	0.12	0.26	0.41	0.13
78	0.19	0.16	0.20	0.17
79	0.20	0.16	0.31	0.14
80	0.21	0.18	0.29	0.27
81	0.15	0.16	0.19	0.32
82	0.17	0.18	0.19	0.33
83	0.18	0.22	0.28	0.27
84	0.27	0.29	0.25	0.33
85	0.12	0.17	0.35	0.14
86	0.16	0.37	0.22	0.17
87	0.21	0.34	0.33	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
88	0.12	0.22	0.29	0.14
89	0.17	0.33	0.24	0.25
90	0.24	0.25	0.25	0.32
91	0.22	0.32	0.24	0.13
92	0.29	0.27	0.3	0.17
93	0.30	0.37	0.26	0.16
94	0.34	0.33	0.24	0.43
95	0.30	0.29	0.33	0.32
96	0.41	0.34	0.31	0.20
97	0.17	0.23	0.31	0.26
98	0.28	0.33	0.31	0.2
99	0.14	0.33	0.16	0.2
100	0.10	0.33	0.43	0.37
101	0.25	0.33	0.25	0.19
102	0.31	0.17	0.23	0.22
103	0.22	0.14	0.33	0.14
104	0.14	0.16	0.18	0.08
105	0.23	0.10	0.25	0.16
106	0.16	0.41	0.27	0.31
107	0.27	0.33	0.19	0.51
108	0.11	0.41	0.37	0.14
109	0.19	0.48	0.18	0.22
110	0.16	0.24	0.11	0.37
111	0.25	0.28	0.16	0.18
112	0.29	0.12	0.23	0.23
113	0.14	0.31	0.17	0.31
114	0.18	0.37	0.17	0.32
115	0.14	0.27	0.22	0.21
116	0.10	0.24	0.23	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
117	0.15	0.24	0.24	0.20
118	0.20	0.31	0.20	0.18
119	0.11	0.26	0.20	0.28
120	0.13	0.26	0.19	0.27
121	0.1	0.31	0.17	0.33
122	0.21	0.14	0.20	0.20
123	0.22	0.20	0.36	0.22
124	0.26	0.19	0.39	0.32
125	0.17	0.19	0.39	0.24
126	0.27	0.17	0.31	0.29
127	0.23	0.27	0.31	0.39
128	0.26	0.16	0.17	0.20
129	0.28	0.39	0.17	0.15
130	0.18	0.33	0.23	0.34
131	0.29	0.41	0.17	0.15
132	0.21	0.33	0.22	0.19
133	0.26	0.13	0.19	0.18
134	0.17	0.16	0.15	0.29
135	0.17	0.15	0.40	0.50
136	0.22	0.17	0.40	0.20
137	0.37	0.22	0.23	0.54
138	0.27	0.30	0.23	0.23
139	0.15	0.30	0.32	0.33
140	0.32	0.20	0.39	0.23
141	0.16	0.25	0.34	0.19
142	0.15	0.17	0.29	0.32
143	0.34	0.30	0.21	0.18
144	0.25	0.25	0.19	0.29
145	0.27	0.21	0.28	0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
146	0.16	0.17	0.39	0.31
147	0.22	0.22	0.45	0.30
148	0.19	0.16	0.25	0.14
149	0.22	0.29	0.23	0.33
150	0.26	0.04	0.31	0.23
151	0.34	0.16	0.32	0.28
152	0.33	0.33	0.31	0.31
153	0.18	0.44	0.45	0.21
154	0.16	0.23	0.32	0.27
155	0.24	0.25	0.26	0.33
156	0.21	0.30	0.30	0.25
157	0.13	0.23	0.25	0.18
158	0.15	0.16	0.23	0.35
159	0.12	0.36	0.41	0.46
160	0.16	0.16	0.25	0.43
161	0.12	0.16	0.28	0.26
162	0.26	0.23	0.35	0.26
163	0.14	0.27	0.25	0.24
164	0.19	0.29	0.21	0.22
165	0.12	0.29	0.43	0.16
166	0.14	0.19	0.35	0.23
167	0.17	0.22	0.29	0.48
168	0.17	0.16	0.25	0.19
169	0.23	0.18	0.42	0.32
170	0.43	0.29	0.22	0.19
172	0.14	0.40	0.18	0.29
173	0.19	0.34	0.21	0.19
174	0.21	0.23	0.36	0.22
175	0.21	0.24	0.30	0.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

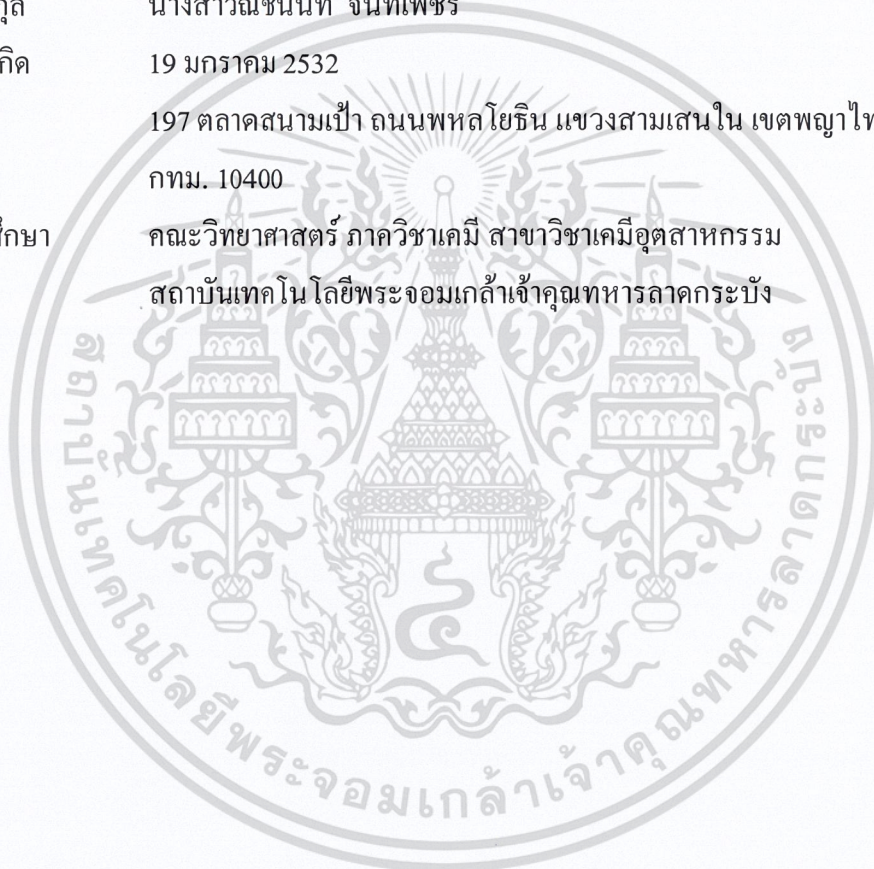
ลำดับที่	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (μm)			
	C40-T40-15.0K	C40-T50-10.0K	C40-T50-12.5K	C40-T50-15.0K
176	0.24	0.23	0.25	0.24
177	0.21	0.21	0.34	0.10
178	0.27	0.12	0.24	0.29
179	0.26	0.15	0.24	0.21
180	0.22	0.17	0.29	0.22
181	0.33	0.27	0.29	0.26
182	0.33	0.27	0.27	0.17
183	0.26	0.26	0.23	0.20
184	0.22	0.21	0.19	0.21
185	0.3	0.25	0.44	0.14
186	0.37	0.28	0.23	0.14
187	0.33	0.19	0.29	0.23
188	0.45	0.14	0.2	0.14
189	0.39	0.27	0.35	0.16
190	0.29	0.14	0.30	0.16
191	0.41	0.18	0.18	0.18
192	0.45	0.16	0.25	0.23
193	0.43	0.27	0.19	0.21
194	0.32	0.42	0.31	0.23
195	0.46	0.24	0.24	0.17
196	0.43	0.29	0.22	0.25
197	0.42	0.21	0.16	0.31
198	0.39	0.24	0.25	0.17
199	0.38	0.17	0.18	0.24
200	0.39	0.25	0.29	0.18
ค่าเฉลี่ย	0.23 ± 0.08	0.25 ± 0.09	0.27 ± 0.08	0.25 ± 0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้แต่ง

ชื่อ – นามสกุล นางสาวชุลีภรณ์ ประวันโต
 วัน เดือน ปีเกิด 30 กันยายน 2531
 ที่อยู่ 215/6 ต. ทางขวาง อ. แวงน้อย จ. ขอนแก่น 40230
 ประวัติการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ – นามสกุล นางสาวณัชนันท์ จันทเพชร
 วัน เดือน ปีเกิด 19 มกราคม 2532
 ที่อยู่ 197 ตลาดสนามเป่า ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสนใน เขตพญาไท
 กทม. 10400
 ประวัติการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้