



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ	การเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดระดับนาโนที่มีนีโอมัยซินด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต Preparation of neomycin-loaded electrospun polylactic acid (PLA) nanofiber
ชื่อนิสิต	นายศุภากร หวังอำนาจพร
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2560

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดระดับนาโนที่มีนีโอมัยซิน
ด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
Preparation of neomycin-loaded electrospun
polylactic acid (PLA) nanofiber

โดย
นายศุภากร หวังอำนาจพร

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560

โครงการ การเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดระดับนาโนที่มีนีโออิมยซินด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต
โดย นายศุภากร หวังอำนาจพร

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ทิพยางค์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรารวรรณ อินทศิริ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุนาวิน)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ การเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดระดับนาโนที่มีนิโอเมซินด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ชื่อนิสิตในโครงการ นายศุภภากร หวังอำนวยพร เลขประจำตัว 5733168323

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อมรราวรณ อินทศิริ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพถูกปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และยาปฏิชีวนะนิโอเมซินถูกบรรจุลงในเส้นใย โดยได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของ PLA และปริมาณนิโอเมซินต่อการขึ้นรูปเส้นใยระดับนาโน จากนั้นจึงตรวจสอบสมบัติด้านการปลดปล่อยนิโอเมซินของเส้นใย ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการบรรจุนิโอเมซินว่า ขึ้นกับความเข้มข้นของนิโอเมซินที่เพิ่มมากขึ้น เส้นใยซึ่งเตรียมจาก PLA 10%w/v และนิโอเมซิน 15 %w/w ให้ค่าการปลดปล่อยนิโอเมซินสูงที่สุดที่เกือบ 100% เมื่อแช่เส้นใยเป็นเวลา 60 นาที

คำสำคัญ: เส้นใยระดับนาโน, วิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต, พอลิแลคติกแอซิด, นิโอเมซิน

Project Title Preparation of neomycin-loaded electrospun polylactic acid (PLA)
nanofiber
Student Name Mr. Supakorn Wamganuayporn Student ID 5733168323
Advisor Name Assistant Professor Amarawan Intasiri, Ph.D.
Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2017

Abstract

In this study, biocompatible polylactic acid (PLA) was electrospun and antibiotic neomycin was loaded into the nanofiber. Effect of PLA concentration and the amount of neomycin on nanofiber fabrication were studied. The releasing amounts of neomycin from electrospun nanofibers were investigated. The results indicated the increase of neomycin loading capacity upon increasing the neomycin concentration. The nanofiber synthesized from PLA 10%w/v and neomycin 15%w/w showed the highest amount of neomycin release was almost 100% within 60 minutes of immersion.

Keywords: Nanofiber, Electrospinning method, Polylactic acid (PLA), Neomycin

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรวรรณ อินทศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้ความรู้ความเข้าใจใส่ คำแนะนำ และคำปรึกษาแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดการวิจัย จนประสบความสำเร็จในการทำวิจัยและการเขียนรายงานฉบับนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ทิพยวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ พันธุมนาวิน ที่ให้ความสนใจในงานวิจัยและเป็นเกียรติอย่างยิ่งในการมาเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ อีกทั้งยังสละเวลาอันมีค่าในการตรวจทานแก้ไข และให้คำแนะนำสำหรับการปรับปรุงรายงานฉบับนี้

เหนือสิ่งอื่นใดกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของผู้วิจัย ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจที่ดีเสมอมา จนประสบความสำเร็จในการวิจัย

โครงการนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) และโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ของคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีการศึกษา 2560 ซึ่งช่วยให้โครงการนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สารบัญ

	หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย	ค	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง	
กิตติกรรมประกาศ	จ	
สารบัญ	ฉ	
สารบัญตาราง	ช	
สารบัญรูป	ฌ	
บทที่ 1	บทนำ	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3	ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	2
1.4.1	เส้นใยระดับนาโนและวิธีการเตรียม	2
1.4.2	พอลิแลคติกแอซิด (PLA)	6
1.4.3	นีโอมัยซิน (Neomycin)	6
1.5	การทบทวนวรรณกรรม	7
บทที่ 2	วิธีการทดลอง	11
2.1	อุปกรณ์และสารเคมี	11
2.2	การเตรียมเส้นใยระดับนาโนของ PLA ที่มีนีโอมัยซิน	11
2.3	การศึกษาสมบัติของเส้นใยที่เตรียมได้	12
2.3.1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	12
2.3.2	หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย	12
2.4	การศึกษาสมบัติในการปลดปล่อยนีโอมัยซินของเส้นใย	12
บทที่ 3	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	13
3.1	การเตรียมเส้นใยระดับนาโนของ PLA ที่มีนีโอมัยซิน	13
3.2	การศึกษาสมบัติของเส้นใยที่เตรียมได้	15
3.2.1	ลักษณะทางสัณฐานวิทยา	15
3.2.2	หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย	15
3.3	การศึกษาสมบัติในการปลดปล่อยนีโอมัยซินของเส้นใย	16
3.3.1	Reproducibility ของการเตรียมเส้นใย	17
3.3.2	ผลของเวลาที่ใช้ในการแช่เส้นใยต่อค่าการปลดปล่อยนีโอมัยซิน	19
บทที่ 4	สรุปการทดลอง	21
เอกสารอ้างอิง		22
ภาคผนวก ก	การคำนวณปริมาณนีโอมัยซินที่บรรจุบนเส้นใย	25
ภาคผนวก ข	การวิเคราะห์ข้อมูลที่ส่งสัยด้วย Q-test	26
ภาคผนวก ค	การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของข้อมูลในชุดเดียวกันโดยใช้ช่วงความเชื่อมั่น (CI) เป็นสถิติทดสอบ	28
ภาคผนวก ง	การตรวจสอบ Reproducibility ของการเตรียมเส้นใยในแต่ละชนิดโดยใช้ ANOVA	30

ภาคผนวก	จ	การทดสอบความแตกต่างของค่าการปลดปล่อยนีโอไมซินของเส้นใยแต่ละชนิดด้วย ANOVA	32
ภาคผนวก	ฉ	การทดสอบคู่ชนิดของเส้นใยที่ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอไมซินที่ต่างต่างกัน	34

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ปริมาณ PLA และนีโอเมย์ซินที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย	12
ตารางที่ 3.1	ลักษณะและร้อยละผลผลิตของเส้นใยที่เตรียมได้	13
ตารางที่ 3.2	ค่าการปลดปล่อยนีโอเมย์ซินของเส้นใยที่เตรียมได้	18
ตารางที่ 3.3	ปริมาณนีโอเมย์ซินที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากเส้นใยเมื่อแช่เส้นใย F5 เป็นเวลาต่างกัน	19

สารบัญรูปภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	จำนวนหัวข้องานวิจัยเกี่ยวกับวิธีอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีนนิ่งที่ได้รับการเผยแพร่ในแต่ละปี [1]	1
รูปที่ 1.2	ลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีนนิ่ง [15] (ก) เส้นใยลูกปัด (ข) เส้นใยเรียบ (ค) เส้นใยแบน	3
รูปที่ 1.3	การเกิดกรวยเทย์เลอร์ [25]	4
รูปที่ 1.4	เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีนนิ่ง [23]	4
รูปที่ 1.5	เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคบับเบิลโพลสปีนนิ่ง [25]	5
รูปที่ 1.6	เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคการปั่นแบบหมุนเหวี่ยง [26]	5
รูปที่ 1.7	โครงสร้างของ PLA ของทั้งสองอีแนนทิโอเมอร์	6
รูปที่ 1.8	กระบวนการผลิต PLA	6
รูปที่ 1.9	โครงสร้างโมเลกุลของนิโอมัยซิน	7
รูปที่ 3.1	ลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ (ก) F1 (PLA 6.6%w/v นิโอมัยซิน 15%w/w) (ข) F2 (PLA 8.0%w/v นิโอมัยซิน 12%w/w) (ค) F3 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 10%w/w) (ง) F4 (PLA 15%w/v นิโอมัยซิน 6.6%w/w) (จ) F5 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 15%w/w) และ (ฉ) F6 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 20%w/w)	14
รูปที่ 3.2	ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้จาก (ก) F3 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 10%w/w) (ข) F4 (PLA 15%w/v นิโอมัยซิน 6.6%w/w) (ค) F5 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 15%w/w)	15
รูปที่ 3.3	สเปกตรัม FT-IR ของ (ก) นิโอมัยซิน, (ข) เส้นใย PLA ที่ปราศจากนิโอมัยซิน, (ค) เส้นใย F3 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 10%w/w), (ง) เส้นใย F5 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 15%w/w), และ (จ) เส้นใย F6 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 20%w/w)	16
รูปที่ 3.4	กราฟแสดงค่าการปลดปล่อยนิโอมัยซินของเส้นใยที่เวลาแช่เส้นใยต่าง ๆ	20

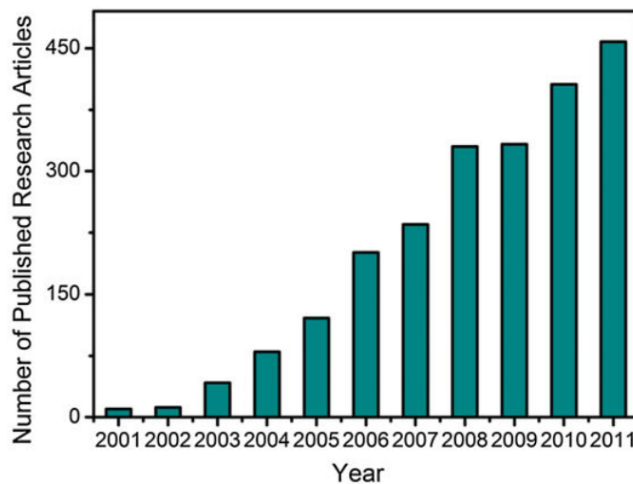
บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา วัสดุทางการแพทย์ได้รับการพัฒนาและวิจัยอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นหลอดเลือดเทียม, เนื้อเยื่อเทียม, ระบบการขนส่งยา, เวชศาสตร์ฟื้นฟู, และวัสดุตกแต่งแผล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัสดุสำหรับตกแต่งบาดแผล ซึ่งสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (electrospinning) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาบาดแผล [1]

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ถึง ค.ศ. 2011 จำนวนงานวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่ได้รับการเผยแพร่ในวารสารวิชาการมีจำนวนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [1] วิธีอิเล็กโทรสปินนิงจึงเป็นที่นิยมในการผลิตเส้นใยขนาดเล็ก เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ให้เส้นใยซึ่งมีพื้นที่ผิวมาก, สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง, มีความทนแรงดึงสูง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย [2] ยิ่งไปกว่านั้นยังมีผู้วิจัยจำนวนมากที่นำเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมาพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งบาดแผล [3-7]



รูปที่ 1.1 จำนวนหัวข้องานวิจัยเกี่ยวกับวิธีอิเล็กโทรสปินนิงที่ได้รับการเผยแพร่ในแต่ละปี [1]

ผ้าพันแผลเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่สำคัญที่สุด ซึ่งถูกนำมาใช้สำหรับการปฐมพยาบาล เพื่อนำมาปิดบาดแผลและดูดซับของเสียออกจากบาดแผล วัสดุตกแต่งแผลที่ดีควรมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับสิ่งมีชีวิต (biocompatibility) นอกจากนี้ หากผ้าพันแผลมีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) จะช่วยลดของเสียอันตรายทางการแพทย์ที่เกิดขึ้น ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 15 ของของเสียทางการแพทย์ทั้งหมด อันเป็นสาเหตุของปัญหามลพิษในการกำจัดขยะและการสะสมของเชื้อโรค [8]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) หลายชนิด ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ [9,10] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ, ราคาถูก, และเป็นพลาสติกที่ทำมาจากวัสดุหมุนเวียน ดังนั้น PLA จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็น โครงร่างกระดูก, วัสดุเย็บแผล, ระบบการขนส่งยา เป็นต้น [11,12] สำหรับวัสดุตกแต่งแผล PLA มีความเหมาะสมใน

การเป็นวัตถุติด เนื่องจากมีการย่อยสลายด้วยวิธีไฮโดรไลซิสของ PLA ทำให้เกิดกรดแลคติกซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

นอกจากนี้ ยาปฏิชีวนะยังถูกนำมาใช้ในผ้าพันแผล เพื่อป้องกันการติดเชื้อของบาดแผลอีกด้วย โดยยาปฏิชีวนะมีหลายชนิดตามการใช้งานหรือกลไกในการยับยั้ง หนึ่งในยาปฏิชีวนะที่มีวางจำหน่ายกันอย่างแพร่หลาย คือนิโอมัยซิน ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะชนิดอะมิโนไกลโคไซด์ นิโอมัยซินมีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ เนื่องจากสามารถยับยั้งการสร้างโปรตีนของแบคทีเรีย โดยการจับกับไรโบโซม 30S ยิ่งไปกว่านั้น นิโอมัยซินยังสามารถใช้ได้ทั้งภายในและภายนอก ดังนั้น นิโอมัยซินจึงเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับใช้เป็นยาที่ถูกบรรจุอยู่ในเส้นใย ในงานวิจัยนี้ จึงมีความสนใจที่จะเตรียมเส้นใยระดับนาโน PLA ที่มีนิโอมัยซินบรรจุอยู่ด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และนำเส้นใยที่เตรียมได้มาทำการศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนิโอมัยซินของเส้นใยต่อไป [12]

1.2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาวิธีการเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดระดับนาโนที่มีนิโอมัยซินด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และศึกษาสมบัติในการปลดปล่อยนิโอมัยซินของเส้นใย

1.3. ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1. การเตรียมเส้นใย PLA ระดับนาโนที่มีนิโอมัยซินด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

การหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด ระดับนาโนที่มีนิโอมัยซินด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ได้แก่ ปริมาณ PLA และปริมาณนิโอมัยซิน

1.3.2. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใย PLA ระดับนาโนที่มีนิโอมัยซินที่เตรียมได้

โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย

1.3.3. การศึกษาสมบัติการปลดปล่อยนิโอมัยซินของเส้นใย

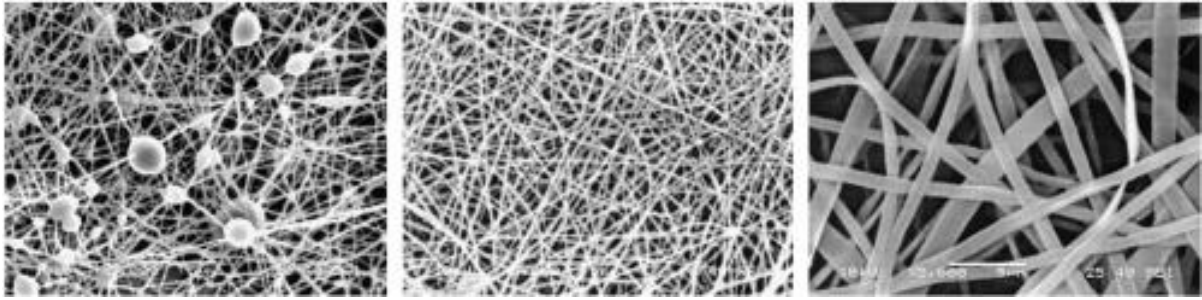
ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการแช่เส้นใย และจลนพลศาสตร์ของการปลดปล่อยนิโอมัยซินของเส้นใย

1.4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.1. เส้นใยระดับนาโนและวิธีการเตรียม

เส้นใยระดับนาโน (nanofiber) หมายถึงเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในระดับนาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะและมีความเป็นรูพรุนสูง แบ่งออกได้ 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 1.2 กล่าวคือ (ก) เส้นใยลูกปัด (beaded fiber) เป็นเส้นใยที่เกิดเม็ดคล้ายลูกปัด จึงมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของเส้นใยลดลง อันเป็นผลมาจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ความเข้มข้นสารละลายพอลิเมอร์ อัตราการไหลของสารละลาย และความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น (ข) เส้นใยเรียบ (smooth fiber) เป็นเส้นใยที่ผู้วิจัยต้องการมากที่สุด ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยการควบคุมปัจจัยดังกล่าวข้างต้นที่ทำให้เกิดเส้นใยลูกปัด และ (ค)

เส้นใยแบน (flat fiber) เป็นเส้นใยที่มีลักษณะเดียวกับเส้นใยเรียบ แต่เนื่องจากการระเหยของตัวทำละลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้ตัวทำละลายบางส่วนตกค้างอยู่ในเส้นใย และเมื่อตัวทำละลายที่เหลืออยู่เกิดการระเหย เส้นใยจึงแบนราบลง [13-15]



(ก)

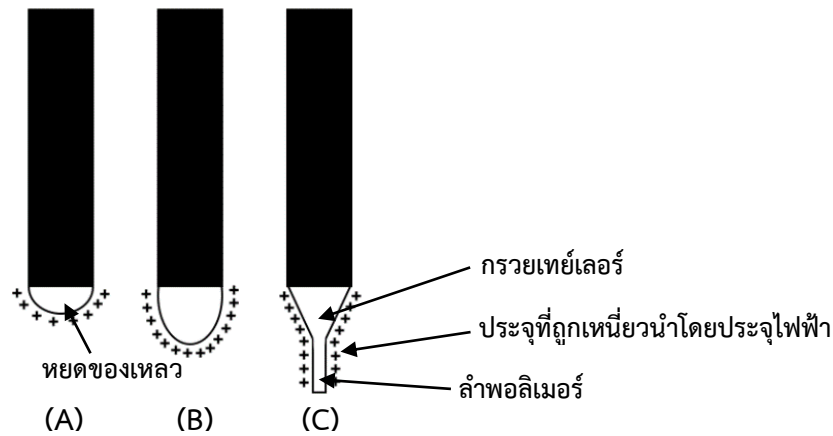
(ข)

(ค)

รูปที่ 1.2 ลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง [15] (ก) เส้นใยลูกปัด (ข) เส้นใยเรียบ (ค) เส้นใยแบน

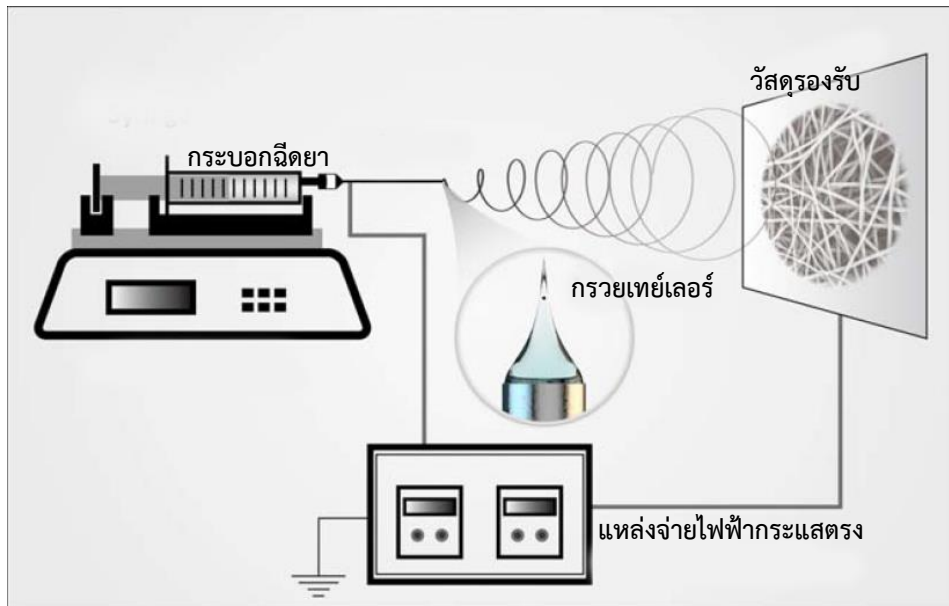
การเตรียมเส้นใยระดับนาโนสามารถทำได้ผ่าน 3 เทคนิคหลัก ดังนี้

1. **เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต** เป็นการรวมตัวของเทคนิคอิเล็กโตรสเปรย์และการปั่นเส้นใย ซึ่งอาศัยไฟฟ้าสถิตในการเกิดเส้นใย แทนการใช้แรงกลต่าง ๆ เช่น แรงกระทำต่อแผ่นราบที่สัมผัสอยู่กับของไหล (hydrostatic forces), แรงแวนแมติก (pneumatics forces) เป็นต้น [16, 17] เทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นวิธีที่ใช้ในการสร้างเส้นใยขนาดเล็ก โดย Cooley ได้จดสิทธิบัตรของวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1902 [18] และ Zeleny ได้อธิบายกลไกของเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง ในปี ค.ศ. 1914 ซึ่งเขาสังเกตการบิดของหยดครึ่งทรงกลมที่ปลายหลอดคาร์ปิลารี เมื่อให้ความต่างศักย์สูง [19] ระหว่างปี ค.ศ. 1931 ถึง ค.ศ. 1944 Formhals เสนอกระบวนการและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่สำหรับการเก็บเส้นใย [18] ในปี ค.ศ. 1938 Rozenblum และ Petryanov-Sokolov สามารถเตรียมเส้นใยระดับนาโนเพื่อใช้เป็นที่ยกรองอากาศ เรียกว่า “กระดาศกรอง Petryanov” [19] ต่อมาในปี ค.ศ. 1969 Taylor เสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของหยดของเหลวที่ปลายเข็ม เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ของเหลว โดยการเปลี่ยนแปลงนี้ เรียกว่า “กรวยเทย์เลอร์” (Taylor cone) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 [20] ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 เป็นต้นมา ความนิยมของการใช้วิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตในการเตรียมเส้นใยได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเป็นวิธีที่เตรียมง่าย ต้นทุนต่ำและมีความสามารถในการใช้งานที่หลากหลาย จึงมีการศึกษาและพัฒนาการเตรียมเส้นใยระดับนาโนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยมากกว่า 200 แห่ง [21,22]



รูปที่ 1.3 การเกิดกรวยเทย์เลอร์ [21]

เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟ (power supply) เครื่องให้สารละลายแบบอัตโนมัติชนิดกระบอกฉีดยา (syringe pump) และวัสดุรองรับ (collector) ดังแสดงในรูปที่ 1.4

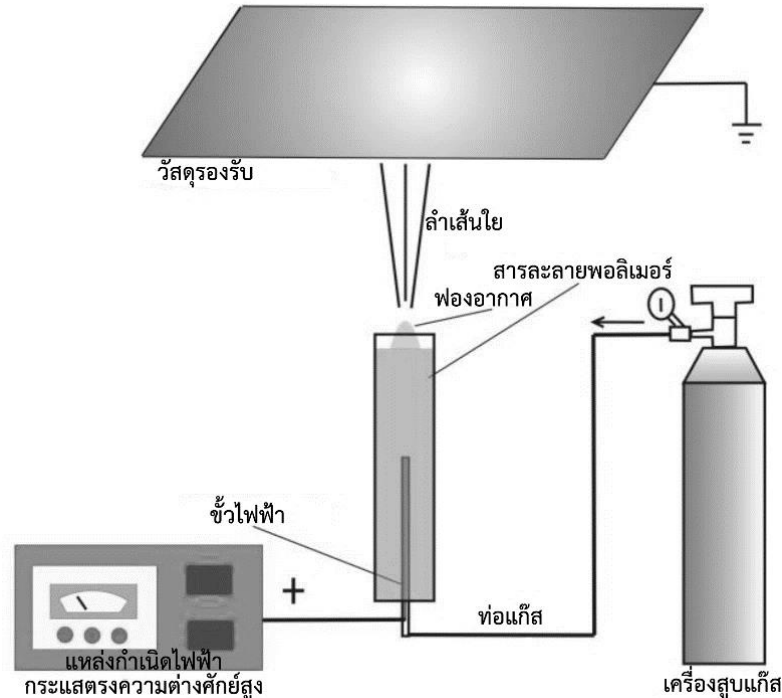


รูปที่ 1.4 เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต [23]

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเกิดขึ้นเมื่อสารละลายพอลิเมอร์ได้รับความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งจะทำให้สารละลายพอลิเมอร์กลายเป็นไอออนบวกจากกระแสไฟฟ้าสถิต และทำให้หยดของเหลวที่ปลายเข็มเกิดการบิดเบี้ยว และนำไปสู่การเกิดกรวยเทย์เลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 เมื่อแรงไฟฟ้าสถิตมีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลาย หยดของเหลวครึ่งทรงกลมบิดเบี้ยวจะถูกขับออกจากปลายเข็มไปยังวัสดุรองรับซึ่งมีประจุลบ ในขณะที่ลำเส้นใยเดินทางไปยังวัสดุรองรับ แรงผลักรจากประจุภายในลำเส้นใยเอง จะทำให้เกิดการหดตัวของเส้นใย ซึ่งยืดระยะทางและเวลาในการเดินทางถึงวัสดุรองรับ ดังนั้น เส้นใยที่แห้งปรากฏขึ้นบนวัสดุรองรับ เนื่องจากเส้นใยบางลงและตัวทำละลายถูกระเหยออกไป [2,21-24]

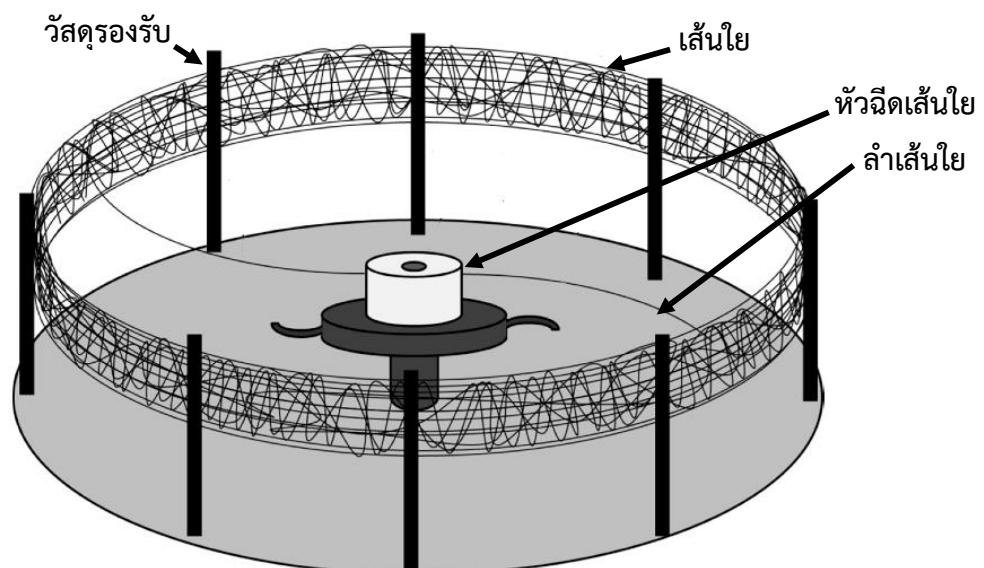
2. **วิธีบีบฟิลสปินนิง (Bubbfil spinning)** เป็นวิธีการเตรียมเส้นใยระดับนาโนโดยอาศัยการเกิดฟองของสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อลดแรงตึงผิวอันเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดเส้นใยระดับนาโน และอาศัยเฉพาะแรงไฟฟ้าสถิตในการเอาชนะแรงตึงผิวเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 2007 โดย He และคณะ

[25] เทคนิคบัพฟิลสปินนิ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญเช่นเดียวกับเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง แต่ใช้เครื่องสูบลูกแก๊ส (Gas pump) แทนเครื่องสูบลอดฉีดยา เพื่อใช้ในการเกิดฟองอากาศของสารละลายพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 วิธีบัพฟิลสปินนิ่งสามารถเตรียมเส้นใยระดับนาโนโดยใช้ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สูงและสามารถใช้กับสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง



รูปที่ 1.5 เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคบัพฟิลสปินนิ่ง [25]

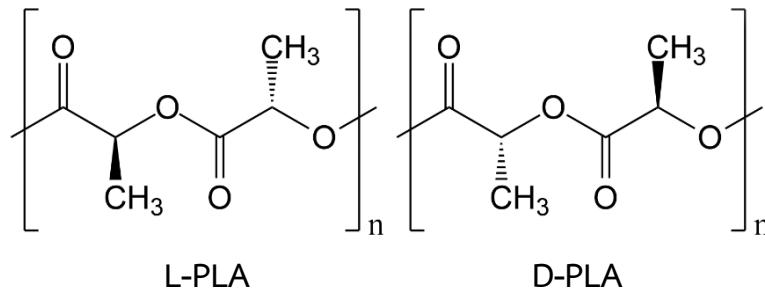
3. *วิธีการปั่นแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Spinning)* เป็นวิธีที่ไม่อาศัยแรงไฟฟ้าสถิตในการเกิดเส้นใยระดับนาโน แต่อาศัยแรงหมุนในการเกิดเส้นใย โดยใช้ความเร็วในการหมุนเป็นปัจจัยในการเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ และเกิดเส้นใยบนวัสดุรองรับซึ่งอยู่ล้อมรอบหัวฉีดเส้นใยที่หมุนด้วยมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1.6 เทคนิคการปั่นแบบหมุนเหวี่ยงมีข้อดีในการเตรียมเส้นใยระดับนาโนที่มีต้นทุนต่ำและใช้ปริมาณตัวทำละลายไม่มาก [26]



รูปที่ 1.6 เครื่องมือที่ใช้ในเทคนิคการปั่นแบบหมุนเหวี่ยง [26]

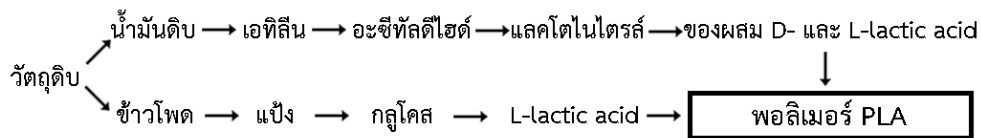
1.4.2. พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเอสเทอร์ของกรดแลคติก (2-hydroxypropionic acid) ซึ่งมี 2 ไอแนนทิโอเมอร์ ได้แก่ L-PLA และ D-PLA ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 โครงสร้างของ PLA ของทั้งสองไอแนนทิโอเมอร์

PLA สามารถสังเคราะห์ผ่านกระบวนการทางปิโตรเลียมซึ่งให้ของผสมระหว่าง L-PLA และ D-PLA ในขณะที่การหมักคาร์โบไฮเดรตให้ผลิตภัณฑ์เพียง L-PLA เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 1.8 [27]



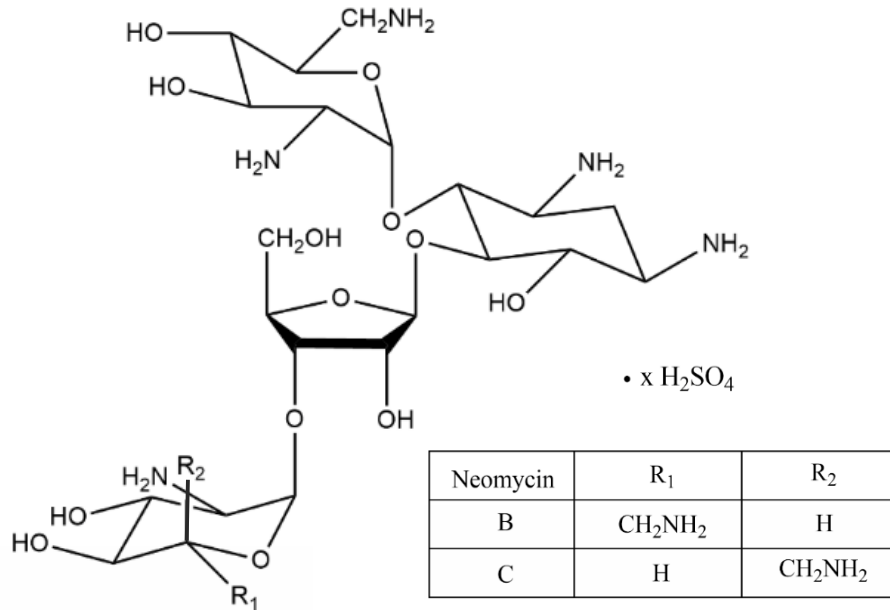
รูปที่ 1.8 กระบวนการผลิต PLA

PLA มีสมบัติโดดเด่นหลายประการดังนี้ ประการแรก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากทรัพยากรหมุนเวียน และการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA ให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ ซึ่งไม่เป็นพิษ ดังนั้น PLA จึงเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีราคาถูก ประการที่สอง PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่เข้ากันได้ทางชีวภาพและถูกนำมาใช้ในการประยุกต์ทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นตัวขนส่งยา, อุปกรณ์ทางด้านออร์โธพีดิกส์ (Orthopedic devices), วัสดุตกแต่งแผล, โครงร่างกระดูก เป็นต้น ประการที่สาม PLA สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรีย [27,28]

นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ มีความแวววาวสูง, มีความใสสูง, สามารถประสานเนื้อวัสดุด้วยความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำ (low heat sealability), มีความทนแรงดึงสูง, มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ, และมีสมบัติป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศที่ดี อย่างไรก็ตาม สมบัติดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุล, อัตราส่วนของไอแนนทิโอเมอร์ L และ D, และการดัดแปลงต่าง ๆ อีกด้วย [29]

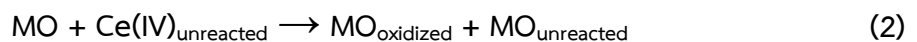
1.4.3. นีโอไมซิน (Neomycin)

นีโอไมซิน (Neomycin) เป็นยาปฏิชีวนะชนิดอะมิไกลโคไซด์ ซึ่งมี 2 ชนิด ได้แก่ neomycin B และ neomycin C ดังแสดงในรูปที่ 1.9 นีโอไมซินเป็นผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จาก *Streptomyces fradiae* และแสดงสมบัติฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ โดยยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีนที่ไรโบซอมขนาด 30S นีโอไมซินเป็นเบสอินทรีย์มีขั้ว ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ แต่ไม่สามารถแพร่ผ่านเนื้อเยื่อต่าง ๆ ได้ เพราะมีความสามารถในการละลายลิพิดที่ต่ำ นอกจากนี้นีโอไมซินสามารถใช้ได้ทั้งภายในและภายนอก [30-32]



รูปที่ 1.9 โครงสร้างโมเลกุลของนีโอมัยซิน

การวิเคราะห์ปริมาณนีโอมัยซินทำได้ด้วยวิธีของ David และคณะ [33] โดยใช้วิธีทางสเปกโตรโฟโตเมทรี เนื่องจากนีโอมัยซินมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำในช่วงความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงของการวิเคราะห์ด้วยแสง UV [34] ดังนั้นการตรวจวัดนีโอมัยซินโดยตรงด้วยเทคนิค UV จึงทำได้ยาก จำเป็นต้องตรวจวัดปริมาณนีโอมัยซินโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสองขั้นตอน เริ่มจากปฏิกิริยาระหว่างนีโอมัยซินกับ Cerium (IV) ในปริมาณที่มากเกินไปในกรดซัลฟูริก ดังสมการ (1) จากนั้นให้ Cerium (IV) ส่วนที่เหลือจากปฏิกิริยา (1) ทำปฏิกิริยากับ Methyl Orange (MO) ในปริมาณที่มากเกินไป ดังสมการ (2) แล้ววัดปริมาณ MO ที่เหลือจากปฏิกิริยา (2) ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 498 นาโนเมตร จากปฏิกิริยาทั้งสองขั้นตอน จะเห็นได้ว่าถ้าในสารละลายมีปริมาณนีโอมัยซินมากขึ้น ปริมาณ Cerium (IV) ที่เหลืออยู่ก็จะน้อยลง ทำให้มี MO เหลืออยู่มากขึ้น นั่นคือ ปริมาณนีโอมัยซินแปรผันตามความเข้มข้นของ MO ที่ตรวจวัดได้ ดังนั้น วิธีนี้จึงใช้ตรวจวัดปริมาณนีโอมัยซินที่ปลดปล่อยออกมาจากเส้นใยได้



1.5. การทบทวนวรรณกรรม

การเตรียมเส้นใยระดับนาโนด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง มีปัจจัยที่ต้องพิจารณาเพื่อให้ได้เส้นใยที่ดีที่สุด เช่น ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ มวลโมกุลพอลิเมอร์ ความหนืดของสารละลาย แรงตึงผิว การนำไฟฟ้าของสารละลาย ระยะทางระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ประเภทของวัสดุรองรับ อุณหภูมิ และความชื้น โดยมีผู้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเตรียมเส้นใย ดังนี้

Tarus และคณะ [35] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเซลลูโลสแอซิเตต (CA) ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ โดยใช้ตัวทำละลายผสม *N,N*-Dimethylacetamide (DMAc) และอะซิโตนในอัตราส่วน 2:3 โดยมวลซึ่งพบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของ CA เป็น 10% และ 12%w/w (ของน้ำหนักโดยรวมของสารละลาย) ส่งผลให้เกิดลูกปัดบนเส้นใยที่เตรียมได้ และเมื่อใช้ความเข้มข้นของ CA เป็น 14% และ 16%w/w จะได้เส้นใยที่มีลักษณะเรียบ นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์แปรผันตรงแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอีกด้วย [18,36]

Koski และคณะ [37] ศึกษาผลของมวลโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ พบว่ามีเส้นใยแบบลูกปัดเกิดขึ้นเมื่อมวลโมเลกุลของ PVA อยู่ในช่วง 9000–10,000 g/mol ในขณะที่มวลโมเลกุลของ PVA ในช่วง 13,000–23,000 g/mol นั้นให้เส้นใยแบบเรียบ เนื่องจากมีสายของ PVA ที่ยาวและมีความหนืดที่มากพอในการคงสภาพลำเส้นใย นอกจากนี้ มวลโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สูงขึ้นยังส่งผลให้ขนาดของเส้นใยสูงขึ้นอีกด้วย

การศึกษาผลของความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ต่อการเกิดเส้นใยแบบลูกปัดของเอทิลีนออกไซด์ (PEO) ในช่วง 13-1835 เซนติพอยส์ (centipoise) โดย Fong และคณะ [38] พบว่า เมื่อความหนืดของสารละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเป็นลูกปัดของเส้นใยมีจำนวนที่ลดลงและห่างกันมากขึ้น จนกระทั่งไม่เหลือลูกปัดบนเส้นใยอีกต่อไป อย่างไรก็ตาม หากใช้สารละลายของ PEO ที่มีความหนืดที่สูงเกินไป จะทำให้เตรียมเส้นใยได้ลำบากเนื่องจากสารละลายมีแรงต้านทานมากเกินไปที่จะเกิดเป็นลำเส้นใย นอกจากนี้ ชนิดของพอลิเมอร์ยังส่งผลต่อช่วงของความหนืดที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยอีกด้วย [18,39]

Yang และคณะ [40] ได้ศึกษาผลของแรงตึงผิวของสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยระดับนาโนที่เตรียมได้ โดยใช้ตัวทำละลายที่มีค่าแรงตึงผิวจากน้อยไปมาก ดังนี้ เอทานอล ไดคลอโรมีเทน และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) ผลการทดลองพบว่า ตัวทำละลายที่แตกต่างกันส่งผลให้สัณฐานวิทยาของเส้นใยแตกต่างกันไปด้วย โดยเมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย พบว่าเส้นใยที่ได้เป็นแบบเรียบ ในขณะที่ตัวทำละลายอีกสองชนิด ให้เส้นใยแบบลูกปัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงตึงผิวที่ลดลง สามารถช่วยให้เกิดเส้นใยที่เรียบได้ อย่างไรก็ตาม แรงตึงผิวที่ใช้ต้องมีค่าที่ไม่ต่ำจนเกินไป ^[14] นอกจากนี้ Yang และคณะ ยังได้ศึกษาสัดส่วนโดยมวลระหว่างเอทานอลและ DMF ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ ซึ่งพบว่า สัดส่วนโดยมวลที่มากขึ้นของเอทานอลในตัวทำละลายผสม ส่งผลให้เส้นใยที่เตรียมได้มีจำนวนลูกปัดที่น้อยลง [39,40]

เนื่องจากพอลิเมอร์บางชนิดสามารถนำไฟฟ้าได้ อันเกิดจากโครงสร้างของพอลิเมอร์มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว หรือการเป็นพาย-คอนจูเกต (π -conjugation) ซึ่งสมบัติในการนำไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลาย ชนิดของพอลิเมอร์ และความสามารถในการแตกตัวของเกลือที่ใช้ในการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ ^[20] ในงานวิจัยของ Baumgarten [41] ได้ศึกษาผลของการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิเมอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอะคริลิกที่เตรียมได้ โดยพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เตรียมได้แปรผกผันกับรากที่สามของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งสารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีจะมีความสามารถในการบรรจุประจุที่มากขึ้น และเพิ่มความทนแรงดึงของลำเส้นใย ส่งผลให้เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดเล็ก

Buchko และคณะ [42] ได้ศึกษาผลของระยะทางระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับ และศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิเมอร์คล้ายไหมที่มีสมบัติคล้ายกับไฟโบรเนกติน (SLPF) ที่เตรียมได้

โดยผลการทดลองพบว่า ระยะทางระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับที่สั้นลงจาก 2.0 เป็น 0.5 เซนติเมตร ทำให้ตัวทำละลายถูกระเหยออกมาไม่หมดเมื่อถึงวัสดุรองรับ ส่งผลให้เส้นใย SLPF ที่เตรียมได้เป็นแบบแบน นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้กับสารละลายพอลิเมอร์ในช่วง 3.7-4.2 kV เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากลำเส้นใยมีแรงไฟฟ้าสถิตมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงส่งของเส้นใยมากขึ้นตามไปด้วย อันนำไปสู่การลดลงของขนาดเส้นใย

Yuan และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้าต่อเส้นใยระดับนาโนของพอลิซัลโฟน (PSF) ที่เตรียมได้ โดยพบว่า เส้นใยมีขนาดเล็กลงเมื่อศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10-20 kV เนื่องจากลำเส้นใยมีความไม่เสถียรมากขึ้น อันเกิดจากแรงผลักของไฟฟ้าสถิตที่มากขึ้น^[38,44] ซึ่งสนับสนุนผลงานวิจัยของ C. Buchko และคณะ [43] นอกจากนี้ Yuan และคณะ [15] ยังได้อธิบาย ผลของอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ได้ กล่าวคือ ขนาดเส้นใยและขนาดรูพรุนของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายจาก 0.40 เป็น 0.66 mL/hr อย่างไรก็ตาม อัตราการไหลที่สูงเกินไปนำไปสู่เส้นใยที่มีลูกบิดขนาดใหญ่ อันเป็นผลมาจากเวลาที่ใช้ในการระเหยตัวทำละลายนั้นไม่มากพอ [44]

อย่างไรก็ตาม Zhang และคณะ [45] ได้อธิบายผลของศักย์ไฟฟ้าต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ซึ่งแย้งกับงานวิจัยของ Buchko และคณะ [42] และ Yuan และคณะ [15] ข้างต้น กล่าวคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นนำไปสู่อัตราการไหลของสารละลายที่สูงขึ้น ทำให้เส้นใย PVA ที่เตรียมได้มีขนาดใหญ่อันเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เส้นใยที่เตรียมได้ที่มีความต่างศักย์สูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่กว้างขึ้น นอกจากนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไป อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดเส้นใยลูกบิดได้ ซึ่งขึ้นกับแรงตึงผิวและความหนืดของสารละลายเช่นเดียวกัน [18,21] ในขณะที่ระยะทางระหว่างปลายเข็มและวัสดุรองรับนั้นให้เส้นใยที่ไม่มีความแตกต่างกัน

นอกจากนี้ ชนิดของวัสดุรองรับ อุณหภูมิ และความชื้นยังมีผลต่อการเตรียมเส้นใย โดยมีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยดังกล่าว ดังนี้

Alfaro De Prá และคณะ [46] ศึกษาผลของชนิดวัสดุรองรับต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย Polycaprolactone (PCL) ที่เตรียมได้ โดยพบว่าเมื่อหมุนดรัมของวัสดุรองรับด้วยอัตราการหมุน 2000 รอบต่อนาที เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง (663 ± 334 นาโนเมตร) เมื่อเทียบกับเส้นใยที่เตรียมด้วยดรัมขนาดหนูนึง (1142 ± 391 นาโนเมตร) เนื่องจากแรงหมุนทำให้ลำเส้นใยเกิดการยืดออก ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง ในขณะที่สายทองแดงคู่ขนานซึ่งห่างกัน 1 เซนติเมตร สามารถเตรียมเส้นใยที่มีขนาดเล็กที่สุด (490 ± 131 นาโนเมตร) เพราะเส้นใยถูกยืดออกตามแนวขวางระหว่างสายทองแดงสองสาย ทำให้เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยจำนวนมาก [3-6] เลือกใช้อะลูมิเนียมฟอยล์เป็นวัสดุรองรับ เนื่องจากมีราคาถูกและสะดวกต่อการใช้งาน [18]

ผลของอุณหภูมิต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิเอไมด์-6 (PA-6) ที่เตรียมได้ ซึ่งถูกศึกษาโดย Mit-uppatham และคณะ [47] พบว่า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 30-60°C เพราะสายพอลิเมอร์มีแรงกระทำต่อกันที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ทำให้ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์มีค่าลดลง ซึ่งช่วยให้เกิดลำเส้นใยได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดเล็กลง ดังนั้น ความหนืดของสารละลายจึงมีความสัมพันธ์ที่แปรผันตรงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย [38]

Casper และคณะ [48] ศึกษาผลของความชื้นต่อเส้นใยพอลิโอสไตรีน (PS) ที่เตรียมได้ โดยพบว่าเส้นใยสามารถถูกเตรียมได้ในเวลาอันสั้นที่ภาวะอากาศแห้ง (มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 5%) เนื่องจากตัวทำละลายสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงนำไปสู่เส้นใยที่มีรูพรุน เนื่องจากการระเหยตัวทำละลายทำได้ยากขึ้น [39]

ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมเส้นใยระดับนาโนสำหรับใช้เป็นวัสดุตกแต่งบาดแผล และการศึกษาการปลดปล่อยยาของเส้นใยที่เตรียมได้ ซึ่งมีผู้วิจัยจำนวนมากทำการศึกษาโดยใช้พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่มียาบรรจุอยู่ในเส้นใย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Perumal และคณะ [3] สามารถเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด (PLA) – ไฮเปอร์branchedพอลิกลีเซอรอล (HPG) ที่มีเคอร์คูมิน สำหรับผลิตเป็นวัสดุตกแต่งแผลที่ให้การปลดปล่อยเคอร์คูมินอย่างต่อเนื่องในช่วง 72 ชั่วโมง และสามารถทนการย่อยสลายทางชีวภาพได้ 14 วัน อย่างไรก็ตาม เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 601 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่และลดประสิทธิภาพในการปลดปล่อยเคอร์คูมิน

Nitanan และคณะ [4] สามารถเตรียมเส้นใยระดับนาโนของพอลิโอสไตรีน (ซิลโฟนิค แอซิด-โค-มาเลอิกแอซิด) (PSSA-MA) / พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ที่มีนีโอไมซิน โดยเตรียมเส้นใยด้วย 6 mg ของพอลิเมอร์ต่อสารละลายนีโอไมซิน 100 mL ที่ความเข้มข้น 0.001 %w/v, 0.01 %w/v, 0.1 %w/v และศึกษาการปลดปล่อยนีโอไมซินด้วยการวัดความขุ่นของน้ำ, วิธีการทดสอบทางจุลชีววิทยา และการนำเส้นใยที่เตรียมได้ไปสัมผัสกับแผลของหนูทดลอง ผลการทดลองพบว่า เส้นใยที่เตรียมได้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาหนูทดลองได้ อย่างไรก็ตาม PVA เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้เช่นเดียวกับนีโอไมซิน ดังนั้นพอลิเมอร์จึงสามารถละลายออกมาได้ และอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนังได้

R. Qi และคณะ [5] สามารถเตรียมเส้นใยระดับนาโนของพอลิ (แลคติก-โค-ไกลโคลิค แอซิด) (PLGA) ที่มีเตตระโซคลิน ไฮโดรคลอไรด์ (TCH) โดยใช้ฮาลอยด์ไซตนาโนทิวบ์ (HNT) เป็นแคปซูลบรรจุยา โดยได้เตรียมเส้นใยจากสารละลาย PLGA 25% w/v และ 1%w/w TCH เมื่อเทียบกับ PLGA เส้นใยที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียได้ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตาม การปลดปล่อย TCH ของเส้นใยค่อนข้างช้า และอาจมีการปลดปล่อยตัวแคปซูล HNT ออกมาในขณะที่มีการปลดปล่อย TCH ด้วย

Immich และคณะ [6] สามารถเตรียมเส้นใยระดับนาโนของ PLA ที่มีไอบูโพรเฟน โดยใช้ระบบแซนวิช ซึ่งได้เติมไอบูโพรเฟนลงไประหว่างชั้นของ PLA ที่เตรียมจากสารละลาย 10 %w/w PLA ในไดคลอโรมีเทน และการปลดปล่อยของยาถูกควบคุมโดยใช้ความหนาของ PLA อย่างไรก็ตาม การควบคุมการปลดปล่อยของไอบูโพรเฟนมีความซับซ้อน เนื่องจากไอบูโพรเฟนเป็นยาที่ละลายน้ำได้ ในขณะที่ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นแรงกระทำระหว่างยาและพอลิเมอร์จึงอ่อนและทำให้เกิดปัญหาในการปลดปล่อยของยา

S. Chitrattha และคณะ [7] เตรียมแผ่นฟิล์มที่มีรูพรุนของ PLA ที่มีเจนนามัยซิน ซัลเฟต (GS) หรือเมโทรนิดาโซล (MZ) โดยเตรียมจาก 10 %w/w PLA ในไดคลอโรมีเทน และใช้ 15 %w/w เจนนามัยซิน ซัลเฟต (GS) และ 3 %w/w เมโทรนิดาโซล การเตรียมแผ่นฟิล์มทำในอุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบที่ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนได้แผ่นฟิล์มที่มีรูพรุน ซึ่งให้สมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ดีเยี่ยม อย่างไรก็ตาม เจนนามัยซิน ซัลเฟต และเมโทรนิดาโซล เป็นยาปฏิชีวนะที่ให้ผลข้างเคียงมากและไม่สามารถใช้ร่วมกับยาชนิดอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าเส้นใยระดับนาโน ทำให้แผ่นฟิล์มปลดปล่อยยาน้อยกว่า

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยการทดลอง 3 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมเส้นใยระดับนาโนของ PLA ที่มีนีโอมีซินด้วยวิธีอิเล็กโทรสปินนิง การศึกษาสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของเส้นใยที่เตรียมได้ และการศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยที่เตรียมได้

2.1. อุปกรณ์และสารเคมี

สารตั้งต้นในการเตรียมเส้นใยระดับนาโน ได้แก่ PLA ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก ปตท., นีโอมีซิน ซัลเฟต (Sigma-Aldrich, จีน), SPAN[®]80 (Fluka, เยอรมนี), และคลอโรฟอร์มเกรดรีเอเจนต์วิเคราะห์ (RCI Labscan, ไทย) สารที่นำมาใช้ในการศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย ได้แก่ Cerium (IV) sulphate (Fluka, สวิตเซอร์แลนด์) และ Methyl Orange (MO) (R&M Chemicals, สหราชอาณาจักร) ถูกนำมาใช้ในการศึกษาปริมาณนีโอมีซิน

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เครื่องให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง (High voltage power supply) ขนาด 0-25 kV (Leybold Didactic GMBH, เยอรมนี) และเครื่องให้สารละลายแบบอัตโนมัติชนิดกระบอกฉีดยา (Syringe pump) (New Eva pump system, Inc., สหรัฐอเมริกา) ในการขึ้นรูปเส้นใย, UV-Visible spectrophotometer (รุ่น Agilent 4835, Agilent Technologies[™], สหรัฐอเมริกา) ในการศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย, Fourier Transform-Infrared Spectrometer (FT-IR, รุ่น Nicolet 8700, Thermo Scientific[™], สหรัฐอเมริกา) ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย, และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM), รุ่น JSM-IT100 InTouchScope[™], ญี่ปุ่น) ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย

2.2. การเตรียมเส้นใยระดับนาโนของ PLA ที่มีนีโอมีซิน

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เตรียมเส้นใยจำนวน 6 ชนิด โดยมีปริมาณ PLA และนีโอมีซินที่ใช้เตรียมดังแสดงในตารางที่ 2.1 และมีวิธีการเตรียมดังนี้

ปิเปตคลอโรฟอร์ม 10.00 mL ใส่ลงในขวดแก้วสำหรับสังเคราะห์ที่บรรจุ PLA น้ำหนักแน่นอน จากนั้นใช้หลอดฉีดยาคูด SPAN[®]80 0.40 mL เติมลงไปในช่วงดังกล่าว ปิดฝาและคนจน PLA ละลายหมด แล้วจึงปิเปต 0.60 mL ของสารละลายนีโอมีซินซึ่งเตรียมด้วยการชั่งนีโอมีซินน้ำหนักแน่นอนละลายในน้ำ 5 mL ใส่ลงในสารละลายผสมข้างต้น คนจนได้ของผสมสีขาวขุ่น จากนั้นใช้หลอดฉีดยาคูดของผสม 10.00 mL แล้วนำหลอดฉีดยาไปวางบนเครื่องให้สารละลายแบบอัตโนมัติ

การปั่นเส้นใยทำโดยต่อขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับปลายเข็มของหลอดฉีดยา และต่อขั้วลบกับวัสดุรองรับซึ่งเป็นอลูมิเนียมฟอยล์ ปรับอัตราการไหลของของผสมเป็น 1.000 mL/hr ศักย์ไฟฟ้าเป็น 22.0 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับวัสดุรองรับเป็น 20.0 cm ทำการฉีดขึ้นรูปเส้นใยที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเส้น

ใยระดับนาโนที่เตรียมได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อระเหยตัวทำละลายออกจากเส้นใย ซึ่งน้ำหนักเส้นใยที่ได้หลังอบเพื่อคำนวณหาร้อยละของผลผลิต

ตารางที่ 2.1 ปริมาณ PLA และนิโอมัยซินที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย

ชื่อเส้นใย	น้ำหนัก PLA (g)	ความเข้มข้นของ สารละลาย PLA (%w/v ของสารละลาย)	น้ำหนัก นิโอมัยซิน (g)	ปริมาณนิโอมัยซิน (%w/w ของเส้นใยตามทฤษฎี)
F1	0.75	6.8	0.11	15
F2	0.88	8.0	0.11	12
F3	1.10	10	0.11	10
F4	1.65	15	0.11	6.6
F5	1.10	10	0.16	15
F6	1.10	10	0.22	20

2.3. การศึกษาสมบัติของเส้นใยที่เตรียมได้

2.3.1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้ ทำโดยการติดเส้นใยขึ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.5.0×5 ตารางเซนติเมตร บนเหรียญบาทด้วยกระดาษคาร์บอน แล้วเคลือบด้วยทอง จากนั้นจึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ขนาดกำลังขยาย 10,000 เท่า ศักย์ไฟฟ้า 20.0 kV สังเกตลักษณะและการจัดเรียงตัวของเส้นใย ปริมาณเม็ดลูกปัดบนเส้นใย และคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย

2.3.2. หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย ทำโดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) ในช่วง 400-4000 cm^{-1} โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของเส้นใยที่มีนิโอมัยซินกับสเปกตรัมของเส้นใยที่ปราศจากนิโอมัยซิน, และยานิโอมัยซินบริสุทธิ์

2.4. การศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนิโอมัยซินของเส้นใย

นำเส้นใยมาตัดออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร จากนั้นชั่งน้ำหนักเส้นใย แนนอน 0.2000 g ใส่ลงในขวดพลาสติกขนาด 30 mL แล้วบีบอัดน้ำ Milli-Q 10.00 mL ใส่ลงไปให้ขวดดังกล่าว แช่เส้นใยเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นแยกส่วนของของเหลวไปวัดหาปริมาณนิโอมัยซินตามวิธีของ I. G. David และคณะ^[33] โดยบีบอัดของเหลวมา 3.00 mL ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 mL จากนั้นบีบอัด 3.00 mL ของสารละลาย 4.00×10^{-3} M นิโอมัยซิน, 600 μL ของสารละลาย 4.00×10^{-3} M Cerium (IV) sulfate, และ 240 μL ของสารละลาย 500 ppm methyl orange (MO) ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรดังกล่าว ปรับปริมาตรด้วยน้ำ Milli-Q จนถึงขีด แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายหลังปรับปริมาตรแล้วที่ความยาวคลื่น 507 นาโนเมตรด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1. การเตรียมเส้นใยระดับนาโนของ PLA ที่มีนีโอแมซิน

งานวิจัยนี้ เริ่มต้นโดยการหาภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมเส้นใย โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ

(1) ความเข้มข้นสารละลาย PLA เป็น 6.8, 8.0, 10, และ 15 %w/v (i.e. เส้นใย F1, F2, F3, และ F4 ตามลำดับ) โดยมีปริมาณของนีโอแมซินคงที่เป็น 0.11 g และ

(2) ความเข้มข้นของสารละลาย PLA คงที่ แต่เปลี่ยนปริมาณนีโอแมซินเป็น 10, 15, และ 20 %w/w (i.e. เส้นใย F3, F5, และ F6 ตามลำดับ)

จึงได้เส้นใยทั้งหมด 6 ชนิด โดยได้ทำการเตรียมเส้นใยแต่ละชนิดจำนวนซ้ำ 3 ซ้ำ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1

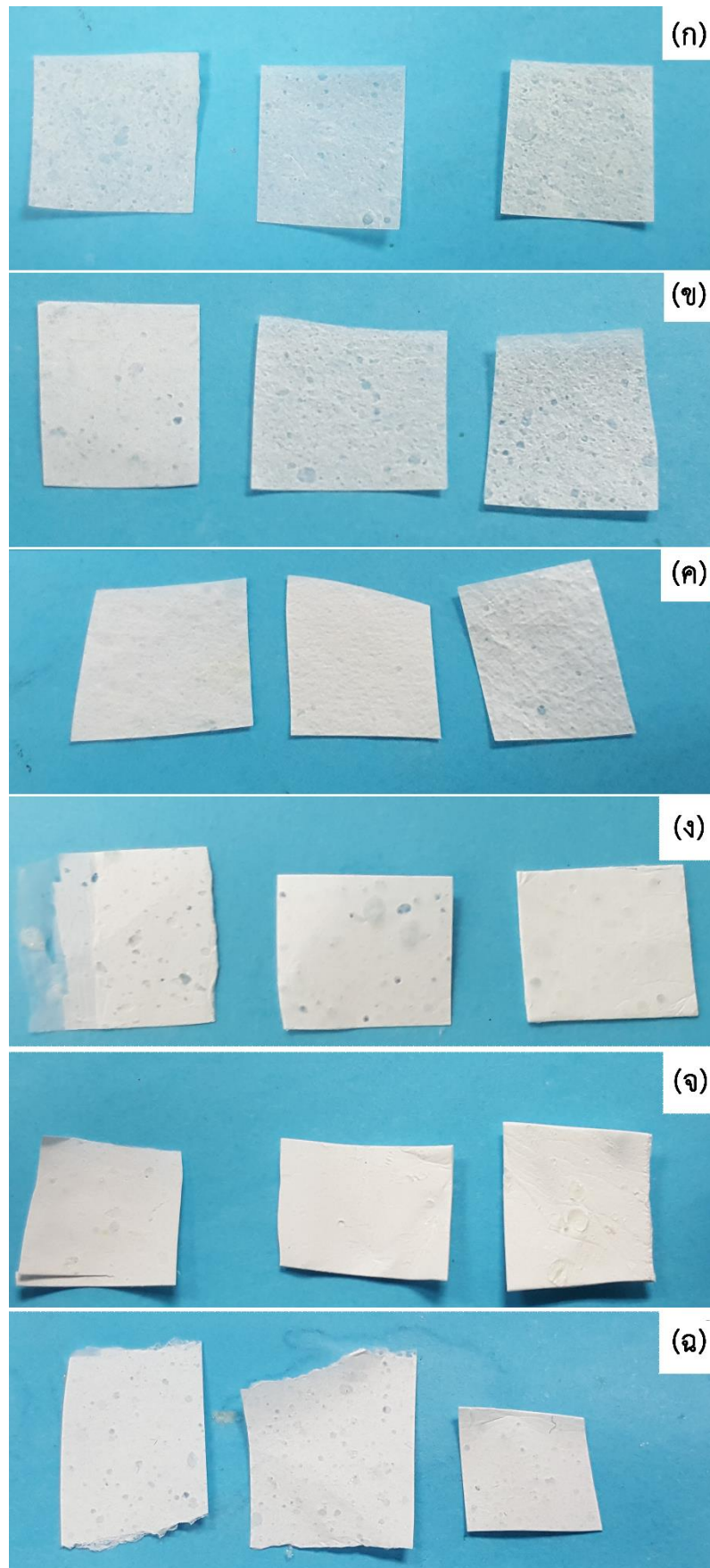
ตารางที่ 3.1 ลักษณะและร้อยละผลผลิตของเส้นใยที่เตรียมได้

ชื่อเส้นใย	ความเข้มข้นของสารละลาย PLA (%w/v)	ปริมาณนีโอแมซิน (%w/w)	ลักษณะเส้นใยที่เตรียมได้	ปริมาณนีโอแมซินที่บรรจุบนเส้นใย (mg /g เส้นใย)*	ร้อยละผลผลิต
F1	6.8	15	แผ่นบางสีขาวมีรูเป็นจำนวนมาก	86.7±0.3	88±5
F2	8.0	12	แผ่นบางสีขาวมีรูเป็นจำนวนมาก	78.5±0.2	80±3
F3	10	10	แผ่นสีขาวมีรูเป็นจำนวนเล็กน้อย	67.8±0.1	73±2
F4	15	6.6	แผ่นหนาสีขาว	50.5±0.1	66±6
F5	10	15	แผ่นสีขาวมีรูเป็นจำนวนเล็กน้อย	98.6±0.1	71±3
F6	10	20	แผ่นสีขาวมีรูเป็นจำนวนเล็กน้อย	128.1±0.1	76±4

* คู่มือการคำนวณในภาคผนวก ก.

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า เส้นใย F4 ที่เตรียมโดยใช้สารละลาย PLA 15%w/v มีร้อยละผลผลิตน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับเส้นใยที่เตรียมโดยใช้สารละลาย PLA ความเข้มข้นต่ำกว่า ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากสารละลายนี้มีความหนืดมากกว่า ทำให้ขณะที่ขึ้นรูปเส้นใย มีส่วนที่เป็นผลผลิตที่ไม่ใช่เส้นใยซึ่งมีลักษณะเป็นสายยาวห้อยลงมาที่ปลายเข็มในปริมาณที่มากกว่า นอกจากนั้น ยังพบว่าเส้นใย F4 นี้มีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใย F1-F3 ซึ่งเตรียมจากสารละลาย PLA เข้มข้นต่ำกว่า แสดงว่าเส้นใย F4 นี้ น่าจะมีปริมาณเส้นใยต่อพื้นที่มากกว่า ยิ่งไปกว่านั้น เส้นใย F4 ยังมีรอยขาดเป็นรูขนาดเล็กในจำนวนที่น้อยลง ซึ่งน่าจะเป็นเพราะลำเส้นใยมีความตึงเครียดมากกว่า

ส่วนในกรณีเส้นใย F3, F5, และ F6 ซึ่งมีปริมาณ PLA คงที่แต่ใช้ปริมาณนีโอแมซินแตกต่างกันในการเตรียมเส้นใย พบว่าลักษณะของเส้นใยและร้อยละผลผลิตของเส้นใยที่เตรียมได้มีความคล้ายคลึงกัน แสดงว่าปริมาณของนีโอแมซินไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญต่อลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้

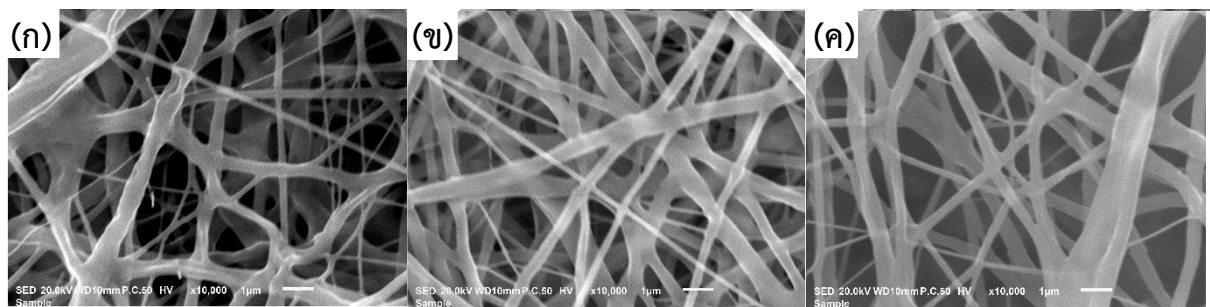


รูปที่ 3.1 ลักษณะของเส้นใยที่เตรียมได้ (ก) F1 (PLA 6.6%w/v นีโอมัยซิน 15%w/w) (ข) F2 (PLA 8.0%w/v นีโอมัยซิน 12%w/w) (ค) F3 (PLA 10%w/v นีโอมัยซิน 10%w/w) (ง) F4 (PLA 15%w/v นีโอมัยซิน 6.6%w/w) (จ) F5 (PLA 10%w/v นีโอมัยซิน 15%w/w) และ (ฉ) F6 (PLA 10%w/v นีโอมัยซิน 20%w/w)

3.2. การศึกษาสมบัติของเส้นใยที่เตรียมได้

3.2.1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เมื่อนำเส้นใย F3, F4, และ F5 ซึ่งเตรียมจากสารละลาย PLA 10%w/v และ นิโอมัยซิน 10%w/w, PLA 15%w/v และนิโอมัยซิน 6.6%w/w, และ PLA 10%w/v และนิโอมัยซิน 15%w/w ตามลำดับ มาทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วย SEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นใยที่เตรียมทั้งสามชนิดนี้เป็นเส้นใยแบบแบนซึ่งมีลักษณะเหมือนเชื่อมติดกัน และไม่พบลูกปัดบนเส้นใย อย่างไรก็ตาม ขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้มีการกระจายค่อนข้างกว้าง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 263 ± 151 , 264 ± 115 , และ 251 ± 156 nm สำหรับเส้นใย F3, F4, และ F5 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าศักย์ไฟฟ้า 22.0 kV ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีแรงคูลอมบ์ (Coulombic force) ที่สูงกว่าแรงหยุ่นหนืด (viscoelastic force) ของสารละลายค่อนข้างมาก ยิ่งไปกว่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าง่าอาจทำให้ลำเส้นใยเดินทางถึงวัสดุรองรับเร็ว ตัวทำละลายจึงมีเวลาในการระเหยน้อย นอกจากนี้ ลำเส้นใยบางส่วนเกิดการสูญเสียประจุขณะขึ้นรูป จึงทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ [49] การพัฒนาเส้นใยเพื่อให้ได้เส้นใยแบบเรียบ สามารถทำได้โดยการลดศักย์ไฟฟ้าเพื่อให้เส้นใยมีความสม่ำเสมอและเพิ่มเวลาในการระเหยของตัวทำละลาย



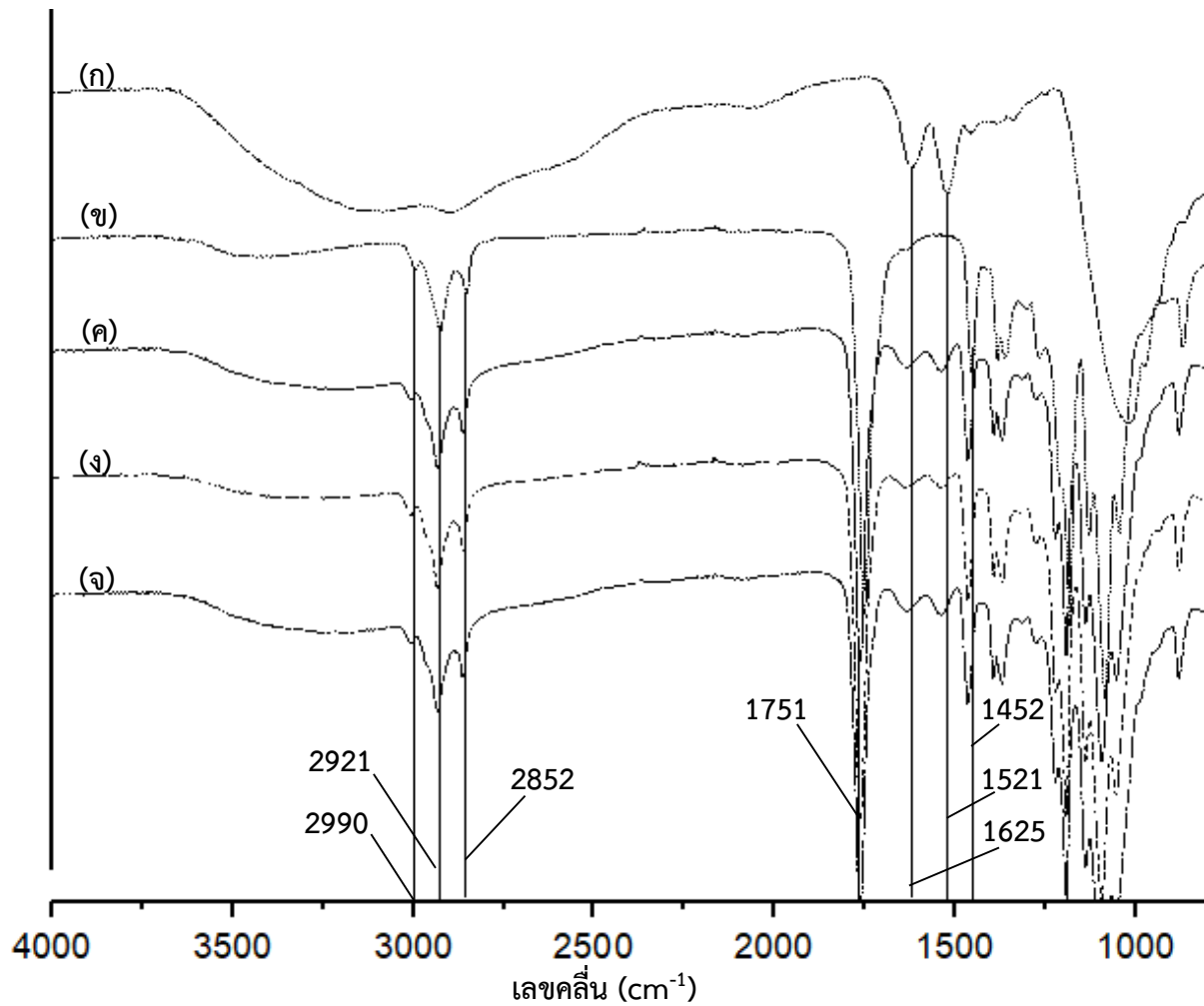
รูปที่ 3.2 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่เตรียมได้จาก (ก) F3 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 10%w/w) (ข) F4 (PLA 15%w/v นิโอมัยซิน 6.6%w/w) (ค) F5 (PLA 10%w/v นิโอมัยซิน 15%w/w)

3.2.2. หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนเส้นใย

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ของเส้นใย F3, F5, และ F6 ซึ่งเตรียมจากสารละลาย PLA 10%w/v แต่มีปริมาณนิโอมัยซินที่แตกต่างกัน ทำโดยใช้เทคนิค FT-IR โดยเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของเส้นใยซึ่งเตรียมจาก PLA 10%w/v แต่ปราศจากนิโอมัยซิน และสเปกตรัมของยานิโอมัยซิน ได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.3

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า สเปกตรัมของเส้นใยทั้งหมดปรากฏพีคที่ 1751 cm^{-1} (C=O stretching), 2852 cm^{-1} (C-H stretching), 2921 cm^{-1} (C-H stretching), และ 2990 cm^{-1} (C-H stretching) ซึ่งเป็นพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของ PLA

นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยที่มีนิโอมัยซิน ยังปรากฏพีคที่ 1521 cm^{-1} (N-H bending), 1625 cm^{-1} (N-H bending), และ 3239 cm^{-1} (O-H stretching) ซึ่งเป็นพีคที่แสดงลักษณะเฉพาะของนิโอมัยซิน อย่างไรก็ตาม พีคของหมู่ซัลเฟตที่ 1019 cm^{-1} (S-O stretching) ในนิโอมัยซิน ถูกบดบังด้วยพีคที่มีความเข้มมากกว่าของ PLA ซึ่งเป็น C-O stretching ในช่วง $1019\text{-}1100 \text{ cm}^{-1}$ และพีคอื่นใน fingerprint region ของ PLA



รูปที่ 3.3 สเปกตรัม FT-IR ของ (ก) นีโอมีซิน, (ข) เส้นใย PLA ที่ปราศจากนีโอมีซิน, (ค) เส้นใย F3 (PLA 10%w/v นีโอมีซิน 10%w/w), (ง) เส้นใย F5 (PLA 10%w/v นีโอมีซิน 15%w/w), และ (จ) เส้นใย F6 (PLA 10%w/v นีโอมีซิน 20%w/w)

3.3. การศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย

เมื่อทำการศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย โดยวิเคราะห์ปริมาณนีโอมีซินด้วยวิธีของ David และคณะ [33] พบว่าสารละลายมีสีชมพูหลังจากเติม methyl orange (MO) เมื่อความเข้มข้นของสารละลายนีโอมีซินมีค่ามากขึ้น สีชมพูของ MO มีความเข้มเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 507 นาโนเมตร มีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณนีโอมีซินจึงสามารถทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงซึ่งแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายนีโอมีซิน อย่างไรก็ตาม ในระหว่างการทดลอง พบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้มีความแปรปรวนสูง เมื่อทำการทดลองในภาวะที่มีแสง เนื่องจากแสงอาจรบกวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนีโอมีซินกับ Cerium (IV) ส่งผลให้ปริมาณ Cerium (IV) ที่เหลือจากปฏิกิริยามีค่าที่แตกต่างจากความเป็นจริง [33] ดังนั้นเพื่อให้ค่าการดูดกลืนแสงมีความเที่ยงมากขึ้น ชุดการทดลองจึงทำในที่มืด โดยหุ้มขวดวัดปริมาตรด้วยอลูมิเนียมฟอยล์

สำหรับการศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอเมซินของเส้นใย มีปัจจัยที่ทำการศึกษา ดังนี้

3.3.1. Reproducibility ของการเตรียมเส้นใย

เมื่อนำเส้นใยทั้ง 6 ชนิด มาศึกษาสมบัติด้านการปลดปล่อยนีโอเมซินโดยการแช่เส้นใยในน้ำ Milli-Q ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และใช้เส้นใยแต่ละชนิดจำนวน 3 ชุด โดยแต่ละชุดทำการทดลอง 4 ครั้ง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติโดยแยกการพิจารณาออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

1. เนื่องจากค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินบางค่าของเส้นใยในชุดเดียวกันมีความผิดปกติ ดังนั้นก่อนการนำข้อมูลไปใช้ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจสอบว่าค่าดังกล่าวควรตัดทิ้งหรือไม่โดยใช้ Q-test เป็นสถิติทดสอบ (ดูภาคผนวก ข) ผลการทดสอบพบว่าผลการทดลองทุกค่าที่สงสัยไม่สามารถตัดทิ้งได้

สำหรับการตรวจสอบค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินในเส้นใยชุดเดียวกันว่ามีความสม่ำเสมอหรือไม่ ด้วยการใช้ช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) เป็นสถิติทดสอบ (ดูภาคผนวก ค) พบว่าค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินของเส้นใยในชุดเดียวกันไม่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นจึงอาจอนุมานได้ว่า เส้นใยที่เตรียมได้ในแต่ละชุดน่าจะมีการกระจายตัวของนีโอเมซินที่สม่ำเสมอ

2. Reproducibility ของการเตรียมเส้นใยแต่ละชนิด วิเคราะห์โดยอาศัยความแปรปรวนทางสถิติของค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินของเส้นใยแต่ละชนิดที่เตรียมได้จำนวน 3 ชุดด้วย ANOVA (ดูภาคผนวก ง) ซึ่งผลทางสถิติที่ได้ พบว่าค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินของเส้นใยชนิดเดียวกันที่เตรียมขึ้นจำนวนสามชุด ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้น การเตรียมเส้นใยแต่ละชนิดจึงมี reproducibility

3. การปลดปล่อยนีโอเมซินของเส้นใยแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันจริงหรือไม่ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลาย PLA และปริมาณนีโอเมซินที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย และใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูล (ดูภาคผนวก จ ตารางที่ ผ8 และตารางที่ ผ9 ตามลำดับ) ซึ่งผลทางสถิติที่ได้พบว่า เส้นใยทั้ง 6 ชนิดให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99% และเมื่อนำค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินไปวิเคราะห์ด้วยวิธี least significant difference (LSD) เพื่อดูว่าเส้นใยชุดใดบ้างที่มีความแตกต่างกัน (ดูภาคผนวก ฉ) ผลที่ได้พบว่า ข้อมูลของเส้นใยแต่ละคู่ที่นำมาเปรียบเทียบกันทุกคู่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าการใช้ PLA ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันในการเตรียมเส้นใย ทำให้ได้เส้นใยที่ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินที่แตกต่างกัน โดยเส้นใย F1 ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินสูงที่สุด และเส้นใย F4 ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินต่ำที่สุด ส่วนในกรณีของการใช้ปริมาณนีโอเมซินที่บรรจุบนเส้นใยที่แตกต่างกัน ทำให้ได้เส้นใยที่ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินที่แตกต่างกัน โดยเส้นใย F5 ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินสูงที่สุด และเส้นใย F4 ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินต่ำที่สุด

ตารางที่ 3.2 ค่าการปลดปล่อยนิโคตินของเส้นใยที่เตรียมได้

เส้นใย	ปริมาณนิโคตินที่ปลดปล่อยออกมา								
	ครั้งที่	mg/g เส้นใย				%การปลดปล่อย			
		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	เฉลี่ย	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	เฉลี่ย
F1	1	50.8	50.6	50.3		58.8	58.3	57.9	
	2	47.1	52.0	52.4		54.5	59.8	60.4	
	3	48.1	52.7	47.4		55.7	60.6	54.6	
	4	51.1	54.7	45.6		59.2	62.9	52.6	
	เฉลี่ย	49.3±2.0	52.5±1.7	48.9±3.0	50.8±3.5	57.0±2.3	60.4±2.0	56.4±3.5	57.9±3.0
F2	1	44.0	39.5	41.6		56.2	50.3	52.9	
	2	43.3	39.8	40.4		55.2	50.8	51.3	
	3	41.6	37.6	42.7		53.1	48.0	54.3	
	4	37.0	44.0	41.0		47.3	56.1	52.0	
	เฉลี่ย	41.5±3.1	40.2±2.7	41.4±1.0	41.0±2.3	52.9±4.0	51.3±3.4	52.6±1.3	52.3±2.9
F3	1	45.2	46.2	46.8		66.6	68.1	69.1	
	2	47.4	42.6	47.7		69.9	62.8	70.4	
	3	47.2	44.1	43.6		69.6	64.9	64.4	
	4	48.1	43.5	45.6		70.9	64.0	67.3	
	เฉลี่ย	47.0±1.3	44.1±1.5	45.9±1.8	45.7±1.9	69.2±1.8	65.0±2.2	67.8±2.6	67.3±2.8
F4	1	24.1	22.6	-		47.8	44.7	-	
	2	23.1	21.7	-		45.8	42.9	-	
	3	24.7	25.0	-		48.9	49.5	-	
	4	25.0	20.9	-		49.6	41.3	-	
	เฉลี่ย	24.2±0.8	22.6±1.8	-	23.7±1.6	48.0±1.7	44.±3.5	-	46.3±3.2
F5	1	94.2	85.6	86.2		95.5*	86.9	87.4	
	2	88.8	91.9	95.9		90.1	93.3	97.2	
	3	89.3	91.4	95.7		90.6	92.8	97.0	
	4	89.5	87.0	88.3		90.8	88.3	89.5	
	เฉลี่ย	89.2±0.3	88.9±3.2	91.6±5.0	90.3±3.5	91.7±2.5	90.3±3.2	92.8±5.2	91.7±3.6
F6	1	66.1	73.7	68.8		51.7	57.4	53.6	
	2	64.4	69.9	68.1		50.3	54.4	53.0	
	3	64.4	71.0	64.0		50.3	55.3	49.9	
	4	67.1	65.4	65.9		52.4	51.0	51.3	
	เฉลี่ย	65.5±1.4	70.0±3.4	67.7±2.2	67.4±2.9	51.2±1.1	54.5±2.7	52.0±1.7	52.6±2.3

3.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการแช่เส้นใยต่อค่าการปลดปล่อยนิโอมัยซิน

การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการแช่เส้นใยต่อค่าการปลดปล่อยนิโอมัยซิน ทำโดยการแช่เส้นใย F5 เป็นเวลาตั้งแต่ 5-240 นาที ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.4 และเมื่อนำค่าร้อยละของการปลดปล่อยนิโอมัยซิน ไปวาดกราฟเทียบกับเวลาที่ใช้ในการแช่เส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การปลดปล่อยนิโอมัยซินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว 60 นาทีแรกของการแช่เส้นใย ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการที่นิโอมัยซินและ PLA มีสมบัติในการชอบน้ำที่แตกต่างกัน กล่าวคือ นิโอมัยซินเป็นยาที่ละลายน้ำได้ดี ในขณะที่ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ว่า ในขณะที่มีการขึ้นรูปเส้นใย นิโอมัยซินจึงกระจายตัวอยู่บนผิวของเส้นใย และเมื่อมีการนำเส้นใยไปแช่ในน้ำ นิโอมัยซินจึงถูกปลดปล่อยออกมาได้เร็ว ส่งผลให้นิโอมัยซินสามารถปลดปล่อยออกมาจากเส้นใยได้อย่างรวดเร็วเมื่อทำการแช่เส้นใยด้วยน้ำ Milli-Q

ตารางที่ 3.3 ปริมาณนิโอมัยซินที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากเส้นใยเมื่อแช่เส้นใย F5 เป็นเวลาต่างกัน

เวลาแช่ เส้นใย (นาที)	ปริมาณนิโอมัยซินที่ปลดปล่อย [§]					
	เส้นใยชุดที่ 1*		เส้นใยชุดที่ 2 [†]		เส้นใยชุดที่ 3 [‡]	
	mg/g เส้นใย	%การปลดปล่อย	mg/g เส้นใย	%การปลดปล่อย	mg/g เส้นใย	%การปลดปล่อย
5	-	-	42.60±0.77	43.31±0.82	-	-
10	59.78±1.00	60.64±1.06	-	-	-	-
20	76.25±0.33	77.35±0.41	-	-	-	-
30	82.54±2.68	83.73±2.59	-	-	74.05±1.56	75.15±1.56
40	90.17±1.32	91.47±1.20	-	-	80.00±0.15	81.09±0.05
50	-	-	-	-	83.45±0.59	84.69±0.53
60	91.48±1.31	92.79±1.22	86.65±0.28	88.09±0.27	88.83±0.77	90.16±0.80
90	-	-	-	-	93.00±0.76	94.39±0.84
120	-	-	96.41±2.04	98.01±1.96	-	-
180	-	-	97.22±0.73	98.84±0.64	-	-
240	-	-	97.73±1.00	99.36±1.05	-	-

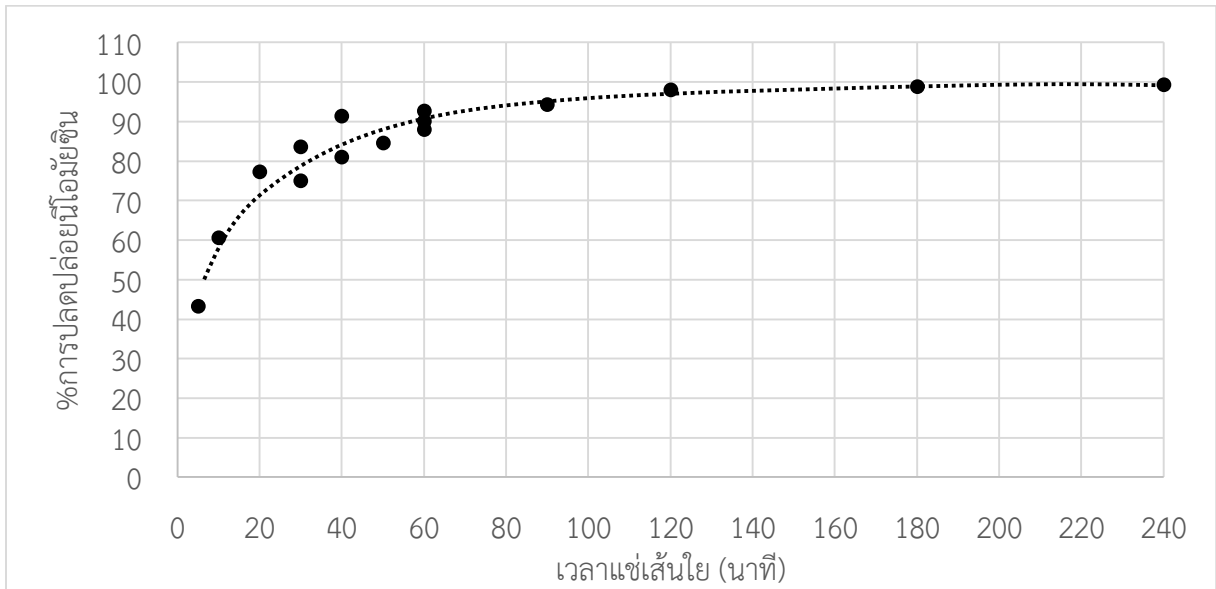
[§] ค่าที่ปรากฏเป็นค่าจากการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ

* เส้นใยชุดที่ 1 มีปริมาณนิโอมัยซินที่บรรจุ 98.60±3.15 mg/g เส้นใย

[†] เส้นใยชุดที่ 2 มีปริมาณนิโอมัยซินที่บรรจุ 98.80±5.20 mg/g เส้นใย

[‡] เส้นใยชุดที่ 3 มีปริมาณนิโอมัยซินที่บรรจุ 98.53±0.11 mg/g เส้นใย

นอกจากนี้ เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %การปลดปล่อยนิโอมัยซินกับระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยที่เวลาแช่เส้นใยต่าง ๆ

พบว่า การปลดปล่อยนีโอมีซินเกิดขึ้น 90% ภายใน 60 นาที ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปลดปล่อยนีโอมีซินอย่างรวดเร็วของเส้นใยในลักษณะที่เรียกว่า burst release [53] ซึ่งลักษณะดังกล่าวเหมาะสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุตกแต่งบาดแผลที่ต้องการการฆ่าเชื้อแบคทีเรียอย่างรวดเร็ว สมบัติดังกล่าวมีข้อดีในการประยุกต์ใช้งานซึ่งต้องการการปลดปล่อยที่รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม burst release เป็นรูปแบบการปลดปล่อยที่ควบคุมได้ยากและให้ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาการควบคุมการปลดปล่อยนีโอมีซินให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

บทที่ 4

สรุปผลการทดลอง

การเตรียมเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดระดับนาโนที่มีนิโอมีซินด้วยวิธีการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาว ไม่พบลูกปัดบนเส้นใย และมีการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยค่อนข้างกว้าง การมีอยู่ของนิโอมีซินในเส้นใยสามารถยืนยันได้ด้วยสเปกตรัม FT-IR ในส่วนของการปลดปล่อยนิโอมีซินของเส้นใยที่เตรียมได้ พบว่าเส้นใยซึ่งเตรียมจากสารละลาย PLA 10%w/v และมีปริมาณนิโอมีซิน 15%w/w ให้ค่าการปลดปล่อยนิโอมีซินของเส้นใยสูงที่สุด โดยการปลดปล่อยนิโอมีซินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก

เอกสารอ้างอิง

1. Persano, L.; Camposeo, A.; Tekmen, C.; Pisignano, D. *Macromolecular Materials and Engineering* **2013**, *298* (5), 504–520.
2. Agarwal, S.; Wendorff, J. H.; Greiner, A. *Polymer* **2008**, *49* (26), 5603–5621.
3. Perumal, G.; Pappuru, S.; Chakraborty, D.; Nandkumar, A. M.; Chand, D. K.; Doble, M. *Materials Science and Engineering: C* **2017**, *76*, 1196–1204.
4. Nitanan, T.; Akkaramongkolporn, P.; Rojanarata, T.; Ngawhirunpat, T.; Opanasopit, P. *International Journal of Pharmaceutics* **2013**, *448* (1), 71–78.
5. Qi, R.; Guo, R.; Zheng, F.; Liu, H.; Yu, J.; Shi, X. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **2013**, *110*, 148–155.
6. Immich, A. P. S.; Arias, M. L.; Carreras, N.; Boemo, R. L.; Tornero, J. A. *Materials Science and Engineering: C* **2013**, *33* (7), 4002–4008.
7. Chitrattha, S.; Phaechamud, T. *Materials Science and Engineering: C* **2016**, *58*, 1122–1130.
8. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs253/en/>
9. Li, C.; Wang, F.; Douglas, G.; Zhang, Z.; Guidoin, R.; Wang, L. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* **2017**, *69*, 39–49.
10. Armentano, I.; Bitinis, N.; Fortunati, E.; Mattioli, S.; Rescignano, N.; Verdejo, R.; Lopez-Manchado, M.; Kenny, J. *Progress in Polymer Science* **2013**, *38* (10-11), 1720–1747.
11. Elsayy, M. A.; Kim, K.-H.; Park, J.-W.; Deep, A. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, *79*, 1346–1352.
12. Dewick, P. M. *Medicinal natural products: a biosynthetic approach*; A John Wiley & Sons: Chichester, 2009.
13. Hellman, L. *American Journal of Obstetrics and Gynecology* **1949**, *58* (6), 1224.
14. Fang, J.; Wang, H.; Niu, H.; Lin, T.; Wang, X. *Macromolecular Symposia* **2010**, *287* (1), 155–161.
15. Yuan, X.; Zhang, Y.; Dong, C.; Sheng, J. *Polymer International* **2004**, *53* (11), 1704–1710.
16. Doshi, J.; Reneker, D. Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting.
17. Rutledge, G. C.; Fridrikh, S. V. *Advanced Drug Delivery Reviews* **2007**, *59* (14), 1384–1391.
18. Bhardwaj, N.; Kundu, S. C. *Biotechnology Advances* **2010**, *28* (3), 325–347.
19. Tucker, N.; Jeffrey, J. J.; Staiger, M. P.; Razzaq, H. A.; Hofman, K. *Journal of engineered fibers and fabrics* **2012**, *7* (2), 63–73.
20. Sill, T. J.; Recum, H. A. V. *Biomaterials* **2008**, *29* (13), 1989–2006.
21. Repanas, A.; Andriopoulou, S.; Glasmacher, B. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* **2016**, *31*, 137–146.

22. Baji, A.; Mai, Y.-W.; Wong, S.-C.; Abtahi, M.; Chen, P. *Composites Science and Technology* **2010**, *70* (5), 703–718.
23. Huang, Y.; Miao, Y.-E.; Liu, T. *Journal of Applied Polymer Science* **2014**, *131* (19).
24. Zhao, Y.; Qiu, Y.; Wang, H.; Chen, Y.; Jin, S.; Chen, S. *International Journal of Polymer Science* **2016**, *2016*, 1–17.
25. Chen, R.-X.; Li, Y.; He, J.-H. *Matéria (Rio de Janeiro)* **2014**, *19* (4), 325–343.
26. Yanilmaz, M.; Zhang, X. *Polymers* **2015**, *7* (4), 629–643.
27. Jamshidian, M.; Tehrany, E. A.; Imran, M.; Jacquot, M.; Desobry, S. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* **2010**, *9* (5), 552–571.
28. Gao, J.; Bao, F.; Ma, R.; Yan, C. *Encyclopedia of Biomedical Polymers and Polymeric Biomaterials* **2016**, 6480–6490.
29. Farah, S.; Anderson, D. G.; Langer, R. *Advanced Drug Delivery Reviews* **2016**, *107*, 367–392.
30. <https://www.drugs.com/pro/neomycin-polymyxin-b-hydrocortisone-ophthalmic-suspension.html>
31. <https://davisplus.fadavis.com/3976/meddeck/pdf/neomycin.pdf>
32. *The international pharmacopoeia; World Health Organization: Geneva, 2013.*
33. David, I. G.; David, V.; Ciucu, A. A.; Ciobanu, A. *Analele Universităţii din Bucureşti – Chimie (serie nouă)* **2010**, *19*, 61–68.
34. Binns, R. B.; Tsuji, K. *Journal of Pharmaceutical Sciences* **1984**, *73* (1), 69–72.
35. Tarus, B.; Fadel, N.; Al-Oufy, A.; El-Messiry, M. *Alexandria Engineering Journal* **2016**, *55*(3), 2975–2984.
36. Afshari, M. *Electrospun nanofibers*; Woodhead Publishing / Elsevier: Amsterdam, 2017.
37. Koski, A.; Yim, K.; Shivkumar, S. *Materials Letters* **2004**, *58* (3-4), 493–497.
38. Fong, H.; Chun, I.; Reneker, D. *Polymer* **1999**, *40* (16), 4585–4592.
39. Li, Z.; Wang, C. *One-Dimensional nanostructures Electrospinning Technique and Unique Nanofibers*; Springer: Berlin, Heidelberg, 2013.
40. Yang, Q.; Li, Z.; Hong, Y.; Zhao, Y.; Qiu, S.; Wang, C.; Wei, Y. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **2004**, *42* (20), 3721–3726.
41. Megelski, S.; Stephens, J. S.; Chase, D. B.; Rabolt, J. F. *Macromolecules* **2002**, *35* (22), 8456–8466.
42. Baumgarten, P. K. *Journal of Colloid and Interface Science* **1971**, *36* (1), 71–79.
43. Buchko, C. J.; Chen, L. C.; Shen, Y.; Martin, D. C. *Polymer* **1999**, *40* (26), 7397–7407.
44. Pelipenko, J.; Kocbek, P.; Kristl, J. *International Journal of Pharmaceutics* **2015**, *484* (1-2), 57–74.
45. Zhang, C.; Yuan, X.; Wu, L.; Han, Y.; Sheng, J. *European Polymer Journal* **2005**, *41* (3), 423–432.
46. Prá, M. A. A. D.; Ribeiro-Do-Valle, R. M.; Maraschin, M.; Veleirinho, B. *Materials Letters* **2017**, *193*, 154–157.

47. Mit-uppatham, C.; Nithitanakul, M.; Supaphol, P.; *Macromolecular Chemistry and Physics*. **2004**, *205* (17), 2327-2338.
48. Casper, C.; Stephens, J.; Tassi, N.; Chase, D.; Rabolt, J.; *Macromolecules* **2004**, *37* (2), 573-578.
49. Yan, X.; Gevelber, M.; *Particulate Science and Technology*. **2015**, *35* (2), 139-149.
50. Sagiv, A.; Parker, N.; Parkhi, V.; Nelson, K.; *Ann Biomed Eng*. **2003**, *31* (9): 1132-1140.

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณนีโอเมยซินที่บรรจุบนเส้นใย

ปริมาณนีโอเมยซินที่บรรจุบนเส้นใยในหน่วย mg นีโอเมยซิน/g เส้นใย สามารถทำได้โดยใช้สมการ (ก)

$$\text{ปริมาณนีโอเมยซินที่บรรจุบนเส้นใย} = \frac{(1000 \times MW_{NOM} \times C_{NOM} \times V_{NOM})}{(MW_{NOM} \times C_{NOM} \times V_{NOM}) + w_{PLA} + (V_{SPAN80} \times d_{SPAN80})} \quad (\text{ก})$$

- โดยที่ MW_{NOM} คือ มวลโมเลกุลของนีโอเมยซิน (908.88 g/mol)
 C_{NOM} คือ ความเข้มข้นของสารละลายนีโอเมยซิน
 V_{NOM} คือ ปริมาตรของสารละลายนีโอเมยซิน
 w_{PLA} คือ น้ำหนักของ PLA
 V_{SPAN80} คือ ปริมาตรของ SPAN80
 d_{SPAN80} คือ ความหนาแน่นของ SPAN80 (0.986 g/mL)

เช่น การคำนวณปริมาณนีโอเมยซินที่บรรจุบนเส้นใย F1 ซึ่งเตรียมโดยใช้ PLA 0.7587 g, ใช้ปริมาตร SPAN80 0.40 mL, และใช้สารละลาย 0.2000 M นีโอเมยซิน 0.60 mL

ดังนั้นปริมาณนีโอเมยซินที่บรรจุบนเส้นใย

$$\begin{aligned} &= \frac{(1000 \times 908.88 \text{ g/mol} \times 0.2000 \text{ M} \times 0.60 \text{ mL})}{(908.88 \text{ g/mol} \times 0.2000 \text{ M} \times 0.60 \text{ mL}) + 0.7587 \text{ g} + (0.40 \text{ mL} \times 0.986 \text{ g/mL})} \\ &= 84.60 \text{ mg นีโอเมยซิน / g เส้นใย} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ข้อมูลที่สงสัยด้วย Q-test

การคำนวณ Q-test สามารถทำได้โดยใช้สมการ (ข)

$$Q_{\text{calculated}} = \frac{|X_{\text{suspect}} - X_{\text{nearest}}|}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (\text{ข})$$

โดยที่	$Q_{\text{calculated}}$	คือ ค่า Q ที่ได้จากการคำนวณ
	X_{suspect}	คือ ค่าที่สงสัย
	X_{nearest}	คือ ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สงสัยมากที่สุด
	X_{max}	คือ ค่าที่สูงที่สุดในข้อมูล
	X_{min}	คือ ค่าที่ต่ำที่สุดในชุดข้อมูล

การคำนวณ

จากตารางที่ 3.3 พบว่า มีบางชุดข้อมูลของค่าการปลดปล่อยนิโคตตินของเส้นใย F2 การทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 2, เส้นใย F5 การทดลองชุดที่ 1, และเส้นใย F6 การทดลองชุดที่ 2 ที่ผิดปกติไปจากค่าการปลดปล่อยนิโคตตินของการทดลองของเส้นใยในชุดเดียวกัน จึงจำเป็นต้องใช้ Q-test ในการตรวจสอบว่าต้องตัดข้อมูลดังกล่าวทิ้งไปหรือไม่ ดังนี้

1. จากค่าการปลดปล่อยนิโคตตินของเส้นใย F2 การทดลองชุดที่ 1 ได้แก่ 44.0, 43.3, 41.6, และ 37.0 mg/g เส้นใย จึงได้ทำการทดสอบ Q-test กับค่า 37.0 mg/g เส้นใย ซึ่งได้ผลดังนี้

$$Q_{\text{calculated}} = \frac{|37.0 - 41.6|}{44.0 - 37.0}$$

$$Q_{\text{calculated}} = 0.657$$

สำหรับจำนวนข้อมูลที่เท่ากับ 4 ($n=4$) ค่า Q_{critical} ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% คือ 0.926 และการตัดข้อมูลที่สงสัยทำได้เมื่อ $Q_{\text{calculated}} > Q_{\text{critical}}$ ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นที่ $Q_{\text{calculated}}$ เท่ากับ 0.657 ซึ่งน้อยกว่า Q_{critical} ดังนั้น ข้อมูลนี้ตัดทิ้งไม่ได้

2. จากค่าการปลดปล่อยนิโคตตินของเส้นใย F2 การทดลองชุดที่ 2 ได้แก่ 39.5, 39.8, 37.6, และ 44.0 mg/g เส้นใย ซึ่งจึงได้ทำการทดสอบ Q-test กับค่า 44.0 mg/g เส้นใย ซึ่งได้ผลดังนี้

$$Q_{\text{calculated}} = \frac{|44.0 - 39.8|}{44.0 - 37.6}$$

$$Q_{\text{calculated}} = 0.656 \text{ ซึ่งน้อยกว่า } Q_{\text{critical}}$$

ดังนั้น ข้อมูลนี้ตัดทิ้งไม่ได้

3. จากค่าการปลดปล่อยไนโอมีซินของเส้นใย F5 การทดลองชุดที่ 1 เป็น 94.2, 88.8, 89.3, และ 89.5 mg/g เส้นใย จึงได้ทำการทดสอบ Q-test กับค่า 94.2 mg/g เส้นใย ซึ่งได้ผลดังนี้

$$Q_{\text{calculated}} = \frac{|94.2 - 89.5|}{94.2 - 88.8}$$

$$Q_{\text{calculated}} = 0.870 \text{ ซึ่งน้อยกว่า } Q_{\text{critical}}$$

ดังนั้น ข้อมูลนี้ตัดทิ้งไม่ได้

1. จากค่าการปลดปล่อยไนโอมีซินของเส้นใย F6 การทดลองชุดที่ 2 เป็น 73.7, 69.9, 71.0, และ 65.4 mg/g เส้นใย จึงได้ทำการทดสอบ Q-test กับค่า 65.4 mg/g เส้นใย ซึ่งได้ผลดังนี้

$$Q_{\text{calculated}} = \frac{|65.4 - 69.9|}{73.7 - 65.4}$$

$$Q_{\text{calculated}} = 0.542 \text{ ซึ่งน้อยกว่า } Q_{\text{critical}}$$

ดังนั้น ข้อมูลนี้ตัดทิ้งไม่ได้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของข้อมูลในชุดเดียวกันโดยใช้ช่วงความเชื่อมั่น (CI) เป็นสถิติทดสอบ

การคำนวณช่วงความเชื่อมั่น (CI) สามารถทำได้โดยใช้สมการ (ค)

$$CI = \bar{x} \pm z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{ค})$$

โดยที่	\bar{x}	คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล
	$z_{\alpha/2}$	คือ ค่าทางสถิติซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ภายใต้การกระจายตัวแบบปกติ
	$1-\alpha$	คือ สัมประสิทธิ์ของความเชื่อมั่น (confidence coefficient)
	σ	คือ ค่า SD ของชุดข้อมูล
	n	คือ จำนวนข้อมูลในชุดข้อมูล

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F1 การทดลองชุดที่ 1 คือ 50.8, 47.1, 48.1, และ 51.1 mg/g เส้นใย และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49.3 ± 2.0 mg/g เส้นใย การคำนวณช่วงความเชื่อมั่น (CI) ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% สำหรับจำนวนชุดข้อมูลเท่ากับ 4 ซึ่งมีค่า $z_{\text{critical}} = 2.58$ เป็นดังนี้

$$CI = 49.3 \pm 2.58 \frac{2.0}{\sqrt{4}}$$

$$CI = 49.3 \pm 2.6 \text{ mg/g เส้นใย}$$

จากการคำนวณ พบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง (± 2.0) มีค่าการกระจายตัวแคบกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณของค่า CI (± 2.6) ดังนั้น ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินในการทดลองชุดเดียวกัน จึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

เมื่อทำการคำนวณในลักษณะเดียวกันกับผลการทดลองทุกชุด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ ผ1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลองของทุกชุดการทดลอง มีค่าการกระจายตัวแคบกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณของค่า CI ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินในการทดลองชุดเดียวกันของทุกชุดการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% จึงอาจอนุมานได้ว่าเส้นใยน่าจะมีการกระจายตัวของนีโอมีซินที่สม่ำเสมอ

ตารางที่ ผ1 ช่วงความเชื่อมั่นของค่าการปลดปล่อยนิโอเมซินของเส้นใยในแต่ละชุดการทดลอง

เส้นใย	ปริมาณนิโอเมซินที่ปลดปล่อยออกมา								
	mg/g เส้นใย				%การปลดปล่อย				
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	เฉลี่ย	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	เฉลี่ย	
F1	เฉลี่ย	49.3±2.0	52.5±1.7	48.9±3.0	50.8±3.5	57.0±2.3	60.4±2.0	56.4±3.5	57.9±3.0
	CI	49.3±2.6	52.5±2.2	48.9±3.9	50.8±2.0	57.0±3.0	60.4±2.5	56.4±4.5	57.9±2.2
F2	เฉลี่ย	41.5±3.1	40.2±2.7	41.4±1.0	41.0±2.3	52.9±4.0	51.3±3.4	52.6±1.3	52.3±2.9
	CI	41.5±4.0	40.2±3.5	41.4±1.3	41.0±1.7	52.9±5.1	51.3±4.4	752.6±1.3	52.3±2.2
F3	เฉลี่ย	47.0±1.3	44.1±1.5	45.9±1.8	45.7±1.9	69.2±1.8	65.0±2.2	67.8±2.6	67.3±2.8
	CI	47.0±1.6	44.1±2.0	45.9±2.3	45.7±1.4	69.2±2.4	65.0±2.2	67.8±2.5	67.3±2.1
F4	เฉลี่ย	24.2±0.8	22.6±1.8	-	23.7±1.6	48.0±1.7	44.±3.5	-	46.3±3.2
	CI	24.2±1.1	22.6±2.3	-	23.7±1.4	48.0±2.2	44.0±4.6	-	46.3±2.9
F5	เฉลี่ย	89.2±0.3	88.9±3.2	91.6±5.0	90.3±3.5	91.7±2.5	90.3±3.2	92.8±5.2	91.7±3.6
	CI	89.2±3.2	88.9±4.1	91.6±6.4	90.3±2.6	91.7±3.3	90.3±4.1	92.8±6.5	91.7±2.6
F6	เฉลี่ย	65.5±1.4	70.0±3.4	67.7±2.2	67.4±2.9	51.2±1.1	54.5±2.7	52.0±1.7	52.6±2.3
	CI	65.5±1.8	70.0±4.4	67.7±2.8	67.4±2.2	51.2±1.4	54.5±3.5	52.0±2.2	52.6±1.7

ภาคผนวก ง.

การตรวจสอบ Reproducibility ของการเตรียมเส้นใยในแต่ละชนิดโดยใช้ ANOVA

เมื่อนำค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 3.3 ของเส้นใยแต่ละชุดมาวิเคราะห์แยกตามชนิดเส้นใยด้วย ANOVA โดยมีสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานหลัก H_0 : ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยชนิดเดียวกันที่เตรียมขึ้นจำนวนสามชุด ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สมมติฐานรอง H_1 : ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยชนิดเดียวกันที่เตรียมขึ้นจำนวนสามชุด มีค่าที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ชุด

ซึ่งการตัดสินใจสมมติฐาน จะพิจารณาจากค่า Sig. (p-value) โดยถ้าค่า Sig. (p-value) มากกว่า 0.01 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ ผ2 ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F1 ในแต่ละชุดด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชุดทดลอง	31.060	2	15.530	2.944	0.104
ภายในชุดทดลอง	47.469	9	5.274		
รวม	78.529	11			

ตารางที่ ผ3 ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F2 ในแต่ละชุดด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชุดทดลอง	3.906	2	1.953	0.326	0.730
ภายในชุดทดลอง	53.897	9	5.989		
รวม	57.803	11			

ตารางที่ ผ4 ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F3 ในแต่ละชุดด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชุดทดลอง	17.282	2	8.641	3.708	0.067
ภายในชุดทดลอง	20.975	9	2.331		
รวม	38.256	11			

ตารางที่ ผ5 ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F4 ในแต่ละชุดด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชุดทดลอง	5.678	1	5.678	2.893	0.140
ภายในชุดทดลอง	11.777	6	1.963		
รวม	17.455	7			

ตารางที่ ผ6 ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F5 ในแต่ละชุดด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชุดทดลอง	13.717	2	6.859	0.499	0.623
ภายในชุดทดลอง	123.708	9	13.745		
รวม	137.425	11			

ตารางที่ ผ7 ผลการวิเคราะห์ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F6 ในแต่ละชุดด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชุดทดลอง	43.133	2	21.566	3.503	0.075
ภายในชุดทดลอง	55.409	9	6.157		
รวม	98.541	11			

จากตารางที่ ผ2-ผ7 จะเห็นได้ว่าค่า Sig. (p-value) ของการวิเคราะห์เส้นใยทุกชุดมีค่ามากกว่า 0.01 จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 และทำให้สรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยชนิดเดียวกันที่เตรียมขึ้นจำนวนสามชุดนี้ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ภาคผนวก จ

การทดสอบความแตกต่างของค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยแต่ละชนิดด้วย ANOVA

การทดสอบว่าค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันจริงหรือไม่ แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1. ความเข้มข้นของสารละลาย PLA ที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย

เมื่อนำข้อมูลของค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F1, F2, F3, และ F4 มาทำการวิเคราะห์โดยใช้ ANOVA โดยมีสมมติฐานตั้งข้อความข้างล่างนี้ และได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ ผ8

สมมติฐานหลัก H_0 : ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F1, F2, F3, และ F4 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สมมติฐานรอง H_1 : ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย มีค่าที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ชุด

ซึ่งการตัดสินใจสมมติฐาน จะพิจารณาจากค่า Sig. (p-value) โดยถ้าค่า Sig. (p-value) มากกว่า 0.01 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ ผ8 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใยที่มีความเข้มข้นสารละลาย PLA ที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยแตกต่างกันด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p-value)
ระหว่างชนิด	3749.030	3	1249.677	260.290	0.000
ชนิดเดียวกัน	192.044	40	4.801		
รวม	3941.074	43			

จากตารางที่ ผ8 จะเห็นได้ว่าค่า Sig. (p-value) ที่วิเคราะห์ได้มีค่าน้อยกว่า 0.01 จึงปฏิเสธ H_0 (ยอมรับ H_1) และสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย มีค่าที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้นเพื่อดูว่าเส้นใยชุดใดบ้างที่ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอมีซินที่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลไปทำ Least Significant Difference (LSD) ต่อไป (ดูภาคผนวก ฉ)

2. ปริมาณนีโอมีซินที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย

เมื่อนำข้อมูลของค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F3, F5, และ F6 มาทำการวิเคราะห์โดยใช้ ANOVA โดยมีสมมติฐานตั้งข้อความข้างล่างนี้ และได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ ผ9

สมมติฐานหลัก H_0 : ค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย F3, F5, และ F6 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

สมมติฐานรอง H_1 : ค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยนีโอมีซินของเส้นใย มีค่าที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ชุด

ซึ่งการตัดสินใจสมมติฐาน จะพิจารณาจากค่า Sig. (p-value) โดยถ้าค่า Sig. (p-value) มากกว่า 0.01 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ ๘9 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยไนโตรเจนของเส้นใยที่มีปริมาณไนโตรเจนที่บรรจุบนเส้นใยที่แตกต่างกันด้วย ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
ระหว่างชนิด	11969.491	2	5984.746	720.206	0.000
ชนิดเดียวกัน	274.222	33	8.310		
รวม	12243.714	35			

จากตารางที่ ๘9 จะเห็นได้ว่าค่า Sig. (p-value) ที่วิเคราะห์ได้มีค่าน้อยกว่า 0.01 จึงปฏิเสธ H_0 (ยอมรับ H_1) และสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของการปลดปล่อยไนโตรเจนของเส้นใย มีค่าที่แตกต่างกันอย่างน้อย 2 ชุด ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้นเพื่อดูว่าเส้นใยชุดใดบ้างที่ให้ค่าการปลดปล่อยไนโตรเจนที่แตกต่างกัน จึงนำข้อมูลไปทำ Least Significant Difference (LSD) ต่อไป (ดูภาคผนวก ฉ)

ภาคผนวก ฉ

การทดสอบหาชนิดของเส้นใยที่ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอมาซินแตกต่างกัน

จากการทดสอบความแตกต่างของค่าการปลดปล่อยนีโอมาซินของเส้นใยแต่ละชนิดด้วย ANOVA พบว่า เส้นใยแต่ละชนิดให้ค่าการปลดปล่อยนีโอมาซินที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้นจึงได้นำชุดข้อมูลในแต่ละคู่มาทดสอบด้วย least significant difference (LSD) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (ง)

$$LSD = t_{\alpha/2, (n-1)k} \sqrt{\frac{2 \times MSE}{n}} \quad (ง)$$

โดยที่	$t_{\alpha/2, (n-1)k}$	คือ ค่าทางสถิติซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ภายใต้การกระจายตัวแบบปกติซึ่งมีลำดับชั้นแห่งความอิสระ (n-1)k
	n	คือ จำนวนทำซ้ำของแต่ละชุดข้อมูล
	k	คือ จำนวนชุดข้อมูล
	MSE	คือ ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

การพิจารณาได้แบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1. ความเข้มข้นสารละลาย PLA ที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย

การทดสอบหาชนิดของเส้นใยที่ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอมาซินแตกต่างกัน ทำโดยเปรียบเทียบผลการปลดปล่อยนีโอมาซินทีละคู่ โดยพิจารณาจากค่า Sig. (p-value) ซึ่งถ้าค่า Sig. (p-value) มากกว่า 0.01 แสดงว่าเส้นใยคู่นั้น ให้ค่าการปลดปล่อยนีโอมาซินที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99% สำหรับการทดลองที่มีเส้นใย 4 ชนิด และแต่ละชนิดทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง จึงมี degree of freedom เท่ากับ 8 และค่า t ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% คือ 3.36 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ ผ10 โดยจะเห็นว่า ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบทุกคู่มีค่า Sig. (p-value) น้อยกว่า 0.01 ดังนั้นค่าการปลดปล่อยนีโอมาซินของเส้นใยทั้ง 4 ชนิดมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ ผ10 ผลการวิเคราะห์ด้วย LSD ของชุดข้อมูลเส้นใยที่มีความเข้มข้นสารละลาย PLA ที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยแตกต่างกัน

เส้นใย	เส้นใย	ผลต่างค่าเฉลี่ย	Std. Error	Sig. (p-value)	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95%	
					Lower Bound	Upper Bound
F1	F2	9.19750*	0.89453	0.000	7.3896	11.0054
	F3	4.57417*	0.89453	0.000	2.7663	6.3821
	F4	26.84417*	1.00011	0.000	24.8229	28.8655
F2	F1	-9.19750*	0.89453	0.000	-11.0054	-7.3896
	F3	-4.62333*	0.89453	0.000	-6.4312	-2.8154
	F4	17.64667*	1.00011	0.000	15.6254	19.6680
F3	F1	-4.57417*	0.89453	0.000	-6.3821	-2.7663
	F2	4.62333*	0.89453	0.000	2.8154	6.4312
	F4	22.27000*	1.00011	0.000	20.2487	24.2913
F4	F1	-26.84417*	1.00011	0.000	-28.8655	-24.8229
	F2	-17.64667*	1.00011	0.000	-19.6680	-15.6254
	F3	-22.27000*	1.00011	0.000	-24.2913	-20.2487

*. ผลต่างค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

2. ปริมาณนีโอเมซินที่ใช้ในการเตรียมเส้นใย

สำหรับปัจจัยนี้ มีเส้นใยทั้งหมด 3 ชนิดและแต่ละชนิดทำการทดลองจำนวน 3 ครั้ง จึงมี degree of freedom เท่ากับ 6 และค่า t ที่ระดับความเชื่อมั่น 99% คือ 3.71 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ ผ11 โดยจะเห็นได้ว่า ข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบทุกคู่มีค่า Sig. (p-value) น้อยกว่า 0.01 ดังนั้นค่าการปลดปล่อยนีโอเมซินของเส้นใยทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ตารางที่ ผ11 ผลการวิเคราะห์ด้วย LSD ของชุดข้อมูลเส้นใยที่มีปริมาณนีโอเมซินบรรจุบนเส้นใยแตกต่างกัน

เส้นใย	เส้นใย	ผลต่างค่าเฉลี่ย	Std. Error	Sig. (p-value)	ช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95%	
					Lower Bound	Upper Bound
F3	F5	-44.65917*	1.17684	0.000	-47.0535	-42.2649
	F6	-21.73333*	1.17684	0.000	-24.1276	-19.3390
F5	F3	44.65917*	1.17684	0.000	42.2649	47.0535
	F6	22.92583*	1.17684	0.000	20.5315	25.3201
F6	F3	21.73333*	1.17684	0.000	19.3390	24.1276
	F5	-22.92583*	1.17684	0.000	-25.3201	-20.5315

*. ผลต่างค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99%

ประวัติผู้วิจัย

นาย ศุภากร หวังอำนวยพร เกิดเมื่อวันที่ 16 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2538 ที่จังหวัดเชียงราย สำเร็จการศึกษา
ชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา
2557 เคยได้รับรางวัลเหรียญทอง การแข่งขันเคมีโอลิมปิกระดับชาติ ครั้งที่ 9 เมื่อ พ.ศ. 2556 เข้าศึกษาต่อ
ในหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา
2557 ได้รับทุนโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.)
เมื่อ พ.ศ. 2558 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ บ้านเลขที่ 37/95 แขวงสะพานสูง เขตสะพานสูง จังหวัด
กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10240 อีเมล: chemistry777.sc@gmail.com