การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเส้นใยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

PREPARATION AND CHARATERIZATION OF POLYEHTYLENE TERAPHTHALATE AND POLYVINYL ALCOHOL BY ELECTROSPINNING

นายกิตติธัช ไพบูลย์ลีสกุล รหัส 53364666

นางสาวภัทราวรรณ ส่งสุข รหัส 53364826

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 30 ก.ย. 2558
เลขทะเบียน 16897678
เลขเรียกหนังสือ ปร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ฬ673ก 2556

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2556

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเส้นใยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรตและพอลิไวนิลแอลกอออล์จากกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติธัช ไพบูลย์ลีสกุล รหัส 53364666
	นางสาวภัทราวรรณ ส่งสุข รหัส 53364826
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.นพวรรณ โม้ทอง
ที่ปรึกษาโครงงานร่วม	Dr.Gareth Michael Ross
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2556

....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ดร.นพวรรณ โม้ทอง)

....กรรมการ
(ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

....กรรมการ
(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)

....กรรมการ
(ดร.นิคม กลมเกลี้ยง)

....กรรมการ
(อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเส้นใยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายกิตติธัช ไพบูลย์ลีสกุล รหัส 53364666
	นางสาวภัทราวรรณ ส่งสุข รหัส 53364826
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.นพวรรณ โม้ทอง
ที่ปรึกษาโครงงานร่วม	Dr.Gareth Michael Ross
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแล้วทำการเปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูปแบบธรรมดาและระบบแบบร่วมแกน โดยเตรียมชิ้นงานจากพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาจะทำการปั่นเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นชั้นที่หนึ่ง จากนั้นทำการปั่นเส้นใยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตทับลงไปเป็นชั้นที่สอง โดยกำหนดสัดส่วนในการขึ้นรูปชิ้นงานเป็น พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือ 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 แล้วให้แรงดันไฟฟ้าในการปั่นเส้นใยอยู่ที่ 15-20 กิโลโวลต์ อัตราการไหลอยู่ที่ 1-2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง มีระยะห่างจากหัวเข็มและฉากรับเป็น 15 เซนติเมตร จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปศึกษาการทนต่อแรงดึง ลักษณะทางกายภาพของเส้นใย และการย่อยสลายของเส้นใย พบว่าในการขึ้นรูปชิ้นงานในส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตที่ให้แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และให้อัตราการไหล 1 มิลลิตรต่อชั่วโมง สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานและเกิดเส้นใย ในการขึ้นรูปชิ้นงานในส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และอัตราการไหล 1 มิลลิตรต่อชั่วโมง สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานและเกิดเส้นใย ในด้านของการย่อยสลายพบว่าการสูญเสียน้ำหนักนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตโดยที่สัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตในชิ้นงานมากนั้นจะมีการ

สูญเสียน้ำหนักในชิ้นงานที่น้อย คือ ที่มีพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็น 100:0 มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเป็น 0.76 และที่สัดส่วนพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์เป็น 0:100 มีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานเป็น 8.48 ต่อมาในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจะทำการปั่นเส้นใยโดยมีสัดส่วนของแกนหรือพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับเปลือกหรือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อยู่ที่ 30:70 แล้วให้แรงดันไฟฟ้าเป็น 15 กิโลโวลต์ อัตราการไหลของแกนอยู่ที่ 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการไหลของเปลือกเป็นอิสระผลที่ได้ คือ ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ดร.นพวรรณ โม้ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน และ Dr.Gareth Michael Ross อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานร่วมที่ให้ได้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีแก้ไขปัญหารวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงงานมาโดยตลอด และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้เพื่อนามาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงงานใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรม สั่งสอน และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา ตลอดการดำเนินโครงงานจนสำเร็จการศึกษา

ผู้ดำเนินโครงงาน

นายกิตติธัช ไพบูลย์ลีสกุล

นางสาวภัทราวรรณ ส่งสุข

ธันวาคม 2556

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ .... ก

บทคัดย่อ .... ข

กิตติกรรมประกาศ .... ง

สารบัญ .... จ

สารบัญตาราง .... ซ

สารบัญรูป .... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 3

1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงงาน 3

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน 3

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน 3

1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน 4

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 5

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1.1 ทฤษฎีที่ 1 หลอดเลือดเทียม 5

2.1.2 ทฤษฎีที่ 2 พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต 6

2.1.3 ทฤษฎีที่ 3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 7

2.1.4 ทฤษฎีที่ 4 กรดไตรฟลูออโรอะซิติก 9

2.1.5 ทฤษฎีที่ 5 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ 9

2.1.6 ทฤษฎีที่ 6 เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต 10

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน.....17
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....17
3.1.1 สารเคมี.....17
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....17
3.2 แผนการดำเนินงาน.....18
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....19
3.3.1 การเตรียมสารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....19
3.3.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....20
3.4 การทดสอบสมบัติชิ้นตัวอย่าง.....21
3.4.1 การทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงาน.....21
3.4.2 การวิเคราะห์เชิงภาพ.....22

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....23
4.1 การหาสภาวะที่ดีที่สุดของชิ้นงานจากกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต.....23
4.2 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต.....30
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน.....31
4.2.2 ผลการทดสอบการย่อยสลาย.....34

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....38
5.1 บทสรุป.....38
5.1.1 ผลการศึกษาการเลือกสภาวะที่ใช้ในการทดลอง.....38
5.1.2 ผลจากการศึกษาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต.....38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....40

ภาคผนวก ก.....42

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน....4

2.1 แสดงสมบัติของกรดไตรฟลูออโรอะซิติก....9

2.2 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน ความหนาแน่นความเป็นรูพรุน และความขรุขระเฉลี่ยของหลอดเลือดเทียม....13

2.3 แสดงความหนาของผนัง Suture Retention ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความสามารถในการยืดและมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น....13

2.4 แสดงความหนา ความหนาแน่น และความพรุนของวัสดุเส้นใยนาโนพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตภายใต้ระยะเวลาที่ต่างกัน....15

2.5 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางความหนาความหนาแน่นและรูพรุนของวัสดุเส้นใยนาโน P(LLA-CL)...16

2.6 แสดงสมบัติทนต่อแรงดึงของวัสดุเส้นใยนาโนที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต....16

3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปหลอดเลือดเทียมด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบชั้น....20

3.2 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปหลอดเลือดเทียมด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน.....20

4.1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์....24

4.2 แสดงน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่สัดส่วนต่างๆ ของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์....34

4.3 แสดงการเปรียบเทียบของเส้นใยที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ระหว่างก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานที่สัดส่วนต่างๆ ของพอลิเอทธิลีนเทเรฟาทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์....35

ก 1) ตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์....43

ก 2) ตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์....44

ก 3) ตารางตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 70:30 ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์....45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

ก 4) ตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต
ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 50:50 ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์.................................46
ก 5) ตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต
ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30:70 ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์.................................47

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรต ...6

2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลีไวนิลแอลกอฮอล์...7

2.3 แผนภาพการจัดระบบหัวฉีดสำหรับเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนและระบบหัวฉีดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ...11

3.1 แสดงกระบวนการทดลอง...18

3.2 เม็ดพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต...19

3.3 เม็ดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์...19

3.4 เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต...20

3.5 แสดงขนาดของชิ้นงานในการย่อยสลาย...21

3.6 ลำดับการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Image J ...22

4.1 แสดงรูปถ่ายเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่างๆ...32

4.2 แสดงรูปถ่ายเส้นใยของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายต่างๆ...32

4.3 แสดงรูปถ่ายเส้นใยของชิ้นงานที่ขึ้นรูปกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย ...33

4.4 แสดงตัวอย่างรูปถ่ายของเส้นใยที่ขึ้นรูปกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ...33

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

โรคเบาหวานเป็นโรคที่พบมากในประเทศไทย จากการศึกษาในกลุ่มผู้ที่มีอายุ 35 ปีขึ้นไปจากจำนวนทั้งหมด 22.2 ล้านคน สามารถตรวจพบผู้ป่วยโรคเบาหวานได้ทั้งหมด 1,581,857 คน โดยมีภาวะแทรกซ้อนทั้งหมดร้อยละ 18 จากผู้ป่วยเบาหวานทั้งหมด และภาวะแทรกซ้อนที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเสียชีวิตอันดับต้นๆ ของคนไทยในแต่ละปี คือ ภาวะไตวาย สาเหตุของโรคเบาหวานเกิดจากจากวิถีชีวิตที่เปลี่ยนแปลงไปอาหารการกินที่มีปริมาณไขมันและคอเลสเตอรอลสูง การใช้ชีวิตอย่างเคร่งเครียดตลอดจนการสูบบุหรี่อย่างหนัก และในอนาคต พบว่ามีแนวโน้มที่เด็กไทยจะเป็นโรคเบาหวานมากขึ้น [1] ซึ่งแนวทางในการรักษาเมื่อเกิดภาวะไตวายเกิดขึ้นจะต้องมีการฟอกเลือดแต่ผู้ป่วยโรคเบาหวานมักมีปัญหาเส้นเลือดจริงนั้นมีภาวะหลอดเลือดแข็งและเล็กผิดปกติกว่าผู้ป่วยอื่นส่งผลให้ต้องมีการทำการใส่หลอดเลือดเทียมสำหรับการฟอกไต [1]

เมื่อหลอดเลือดจริงในร่างกายได้รับความเสียหายหรือไม่สามารถที่จะใช้งานได้ จะมีการใช้หลอดเลือดเทียมทดแทนเพื่อให้หลอดเลือดสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ต่อไปโดยทั่วไป แล้วมีการใช้หลอดเลือดเทียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ แต่ในปัจจุบันวงการวิจัยที่ก้าวหน้าขึ้นได้พยายามมุ่งเน้นไปที่การหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมหลอดเลือดที่มีขนาดกลางและที่มีขนาดเล็ก โดยหลอดเลือดเทียมแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ หลอดเลือดเทียมทางชีวภาพและหลอดเลือดเทียมที่สังเคราะห์ขึ้นมา โดยลักษณะของหลอดเลือดเทียมนั้นจะต้องมีลักษณะคล้ายกับหลอดเลือดจริง คือ มีความยืดหยุ่น หักงอคืนรูปเดิมได้ มีความอ่อนนุ่ม ความเป็นรูพรุนต่ำ และความเข้ากันได้กับร่างกายของมนุษย์ [2]

ปัจจุบันหลอดเลือดเทียมชนิดสังเคราะห์ทำมาจากวัสดุที่มีชื่อทางการค้าว่า ดาครอน (Dacron) หรือพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต (Poly Ethylene Terephthalate, PET) เป็นวัสดุที่มีสมบัติเหนียวยืดหยุ่น ไม่มีความเป็นพิษ และสามารถเข้ากับร่างกายได้ดี นิยมใช้แทนหลอดเลือดที่มีขนาดใหญ่สำหรับการผ่าตัดบายพาส เช่น หลอดเลือดแดง (Aorta) หรือหลอดเลือดแดง (Iliac Artery) และพอ-ลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) มีสมบัติเหนียว สามารถเข้ากับร่างกายได้มีความมันลื่นซึ่งความลื่นของพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนทำให้เลือดสามารถไหลเวียนได้ดีและมีอายุการใช้งานจึงใช้ทดแทนหลอดเลือดที่มีขนาดปานกลางสำหรับการฟอกไต แต่อย่างไรก็ตามยังพบข้อบกพร่องของหลอดเลือดเทียมที่ผลิตจากพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 6 มิลลิเมตร คือ มักเกิดการอุดตันได้เนื่องจากการยึดเกาะของเกล็ดเลือดซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะการไหลของเลือด โดยคณะนักวิจัยที่โรงพยาบาลไนน์เวลส์ ประเทศ

อังกฤษใช้อุปกรณ์สร้างภาพความละเอียดสูง พบว่าเลือดไม่ได้ไหลเป็นเส้นตรงแต่ไหลเป็นเกลียวอยู่ในหลอดเลือดเมื่อหลอดเลือดเทียมขาดความเรียบของพื้นผิวสัมผัสจึงทำให้เกิดการยึดเกาะของเกล็ดเลือดบริเวณผนังหลอดเลือด ก่อตัวเกิดเป็นลิ่มเลือด และอุดตันในเวลาต่อมา [2]

กระบวนการผลิตหลอดเลือดเทียมมีหลายวิธีในการผลิต คือ การผลิตโดยใช้แม่พิมพ์ (Mold) การผลิตแบบนี้มีข้อดีในด้านของความราบเรียบของหลอดเลือดเทียมและมีรูพรุนน้อย ข้อเสีย คือ ไม่สามารถผลิตหลอดเลือดเทียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้ กระบวนการผลิตค่อนข้างยุ่งยาก [3] การขึ้นรูปโดยกระบวนการอัดรีด (Extrusion) โดยข้อดีของการอัดรีด คือ ง่ายต่อการผลิต มีความเป็นรูพรุนต่ำและข้อเสียของการอัดรีด คือ ไม่สามารถผลิตหลอดเลือดเทียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้ [4] ปัจจุบันนิยมผลิตด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) ซึ่งจะประกอบไปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบทั่วไปและระบบเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตขั้นสูง ได้แก่ เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน (Coaxial-Electrospinning, Coax-ES) เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย (Melt-Electrospinning, Melt-ES) เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ (Near-Filed Electrospinning, NF-ES) และเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม (Magneto-Electrospinning, Magneto-ES) ข้อดีของระบบเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต คือ สามารถผลิตหลอดเลือดเทียมที่เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้ ความเป็นรูพรุนต่ำ และง่ายต่อการผลิต [5]

ทางคณะผู้จัดทำโครงงานจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาพื้นผิวทางวิศวกรรมของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อหวังว่าอาจจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการทำหลอดเลือดเทียมในอนาคต โดยสารพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตนี้มีราคาต่ำ หาซื้อได้ง่าย สามารถเข้ากับร่างกายได้ดี ไม่มีความเป็นพิษ มีความเหนียวและมีสีขาว พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษและไม่มีกลิ่น [6] โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติการก่อฟิล์ม มีความสามารถในการยึดติดที่ยอดเยี่ยม มีความเค้นแรงดึง และความยืดหยุ่นสูง

โดยคณะผู้จัดทำมีความคาดหวังว่าจะสามารถพัฒนาพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อประดิษฐ์พื้นผิวทางวิศวกรรมที่มีความเหนียวยืดหยุ่นมีความเป็นรูพรุนต่ำด้วยการเตรียมสารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อฉีดขึ้นรูปในสัดส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบทั่วไปและเครื่องปั่นไฟฟ้าแบบร่วมแกนโดยให้แรงดันไฟฟ้าในช่วง 15-20 กิโลโวลต์ จากนั้นทำการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานด้วยการนำชิ้นงานไปแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ (Phosphate Buffer Saline, PBS) ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscope) เพื่อเปรียบเทียบพื้นผิวและเส้นใยที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะในการขึ้นรูปของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต

1.2.2 เพื่อศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาและเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน

1.3.1 ตัวแปรต้น

1.3.1.1 สัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

1.3.1.2 แรงดันไฟฟ้า 15-20 กิโลโวลต์กระแสตรง

1.3.1.3 อัตราการไหล 1-2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

1.3.2 ตัวแปรตาม

1.3.2.1 ลักษณะของพื้นผิวและเส้นใย

1.3.2.2 การย่อยสลายของชิ้นงาน

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

1.3.3.1 ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร

1.3.3.2 ความเข้มข้นสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร

1.3.3.3 ระยะห่างของหัวเข็มกับฉากรับ

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน

1.4.1 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

ตั้งแต่เดือนเมษายน พ.ศ. 2556 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2556

1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

	การดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงาน								
		เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.6.1	รวบรวมข้อมูล	←→								
1.6.2	วางแผนดำเนินงาน		←	→						
1.6.3	หาเครื่องมือและวัตถุดิบเพื่อทำการทดลอง			←	→					
1.6.4	ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ					←	—	—	→	
1.6.5	ทดสอบชิ้นงาน					←	—	—	→	
1.6.6	วิเคราะห์ผลกรทดลอง							←	→	
1.6.7	สรุปผลการดลองและทำรายงานวิจัย							←	—	→

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากค่านิยมของคนไทยในปัจจุบันเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ลักษณะการใช้ชีวิตเปลี่ยนไป รวมถึงลักษณะของการบริโภคอาหารการกินที่มีปริมาณไขมันและคอเลสเตอรอลสูง การใช้ชีวิตอย่างเคร่งเครียด ตลอดจนการสูบบุหรี่อย่างหนัก ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคร้ายต่างๆ ตามมา เช่น โรคหลอดเลือดหัวใจตีบตัน โรคเบาหวาน ซึ่งโรคเหล่านี้มีแนวทางในการรักษา คือ การผ่าตัดบายพาสและการฟอกไต ในกระบวนการรักษาเหล่านี้จำเป็นต้องใช้หลอดเลือดเทียมเพื่อทดแทนหลอดเลือดจริงที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามปกติ

2.1.1 ทฤษฎีที่ 1 หลอดเลือดเทียม (Vascular Grafts)

หลอดเลือดเทียม คือ ท่อพลาสติกที่มีขนาดเล็กสามารถนำมาใช้แทนหลอดเลือดได้ เมื่อหลอดเลือดในร่างกายของมนุษย์ได้รับความเสียหาย จะมีการใช้หลอดเลือดเทียมทดแทนเพื่อให้หลอดเลือดสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ต่อไป โดยทั่วไปแล้วมีการใช้หลอดเลือดเทียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่แต่ในปัจจุบันวงการวิจัยที่ก้าวหน้าขึ้นได้พยายามมุ่งเน้นไปที่การหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการซ่อมแซมหลอดเลือดขนาดกลางและขนาดเล็ก หลอดเลือดเทียมแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ หลอดเลือดเทียมทางชีวภาพและหลอดเลือดเทียมที่สังเคราะห์ขึ้นมา โดยลักษณะของหลอดเลือดเทียมนั้นจะต้องมีลักษณะคล้ายกับหลอดเลือดจริง คือ มีความยืดหยุ่นหักงอแล้วสามารถคืนรูปเดิมได้ มีความอ่อนนุ่ม ความเป็นรูพรุนต่ำ และเข้ากันได้กับร่างกายของคน [2]

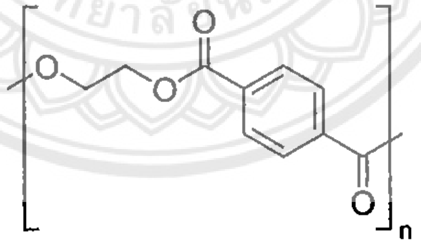
วัสดุที่ใช้ทำหลอดเลือดเทียมชนิดสังเคราะห์ทำมาจากวัสดุที่มีชื่อทางการค้าว่า ดาครอนหรือพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน หลอดเลือดที่ผลิตจากพอลิเอทธิลีน-เทเรฟทาเลตมักนิยมใช้ในหลอดเลือดที่มีขนาดใหญ่ เช่น หลอดเลือดแดงใหญ่เอออร์ตาหรือหลอดเลือดแดงในอุ้งเชิงกรานมากกว่าพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนที่นิยมใช้ในหลอดเลือดที่มีขนาดปานกลาง เนื่องจากหลอดเลือดพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนมีค่าความเสียดทานต่ำมากทำให้ลดการยึดเกาะของเกล็ดเลือดเกิดลิ่มเลือดน้อยกว่าหลอดเลือดพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต นอกจากนี้ยังมีหลอดเลือดเทียมที่มีการเคลือบด้วยเจลาตินเพื่อเพิ่มความราบเรียบแก่พื้นผิวและการเคลือบด้วยเจลาตินยังสามารถตรึงยาปฏิชีวนะเพื่อลดสภาวะการแทรกซ้อนหลังผ่าตัด

2.1.2 ทฤษฎีที่ 2 พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตมีลักษณะเหนียวและโปร่งแสงถูกนำมาผลิตและใช้งานในรูปของเส้นใยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น 2 ขั้นตอนในขั้นตอนแรกเกิดจากปฏิกิริยาการเตรียมเอสเทอร์ (Esterification) โดยใช้กรดเทเรฟทาลิก (Terepthalic Acid) และเอทธิลีนไกคอล (Ethylene Glycol) เป็นสารตั้งต้นหรือใช้ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเทอร์ (Transesterification) โดยใช้ไดเมทิลเทเรฟทาเลท (Dimethyl Terepthalate) ร่วมกับเอทธิลีนไกคอล ที่อุณหภูมิ 275-285 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารได-เอสเทอร์ (Di-ester) เมื่อผ่านเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติเหมาะสำหรับนำมาใช้ผลิตเป็นเส้นใยสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ

2.1.2.1 โครงสร้างทางเคมีพอลิเทธิลีนเทเรฟทาเลต

พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $(C_{10}H_8O_4)_n$ มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงมาก โครงสร้างเป็นอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีค่าความหนืด (Intrinsic Viscosity) ประมาณ 0.58-0.67 เดคาลิตรต่อกรัม ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 1.38 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีค่าเป็น 1.370 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โครงสร้างแบบผลึกเดี่ยว (Single Crystal) มีค่าเป็น 1.455 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [7]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต [7]

2.1.2.2 สมบัติทั่วไปของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต

ก. น้ำหนักเบามีลักษณะโปร่งแสงเหนียวและเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

ข. แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นอสัณฐานมีเนื้อใสและกลุ่มที่เป็นผลึกเดี่ยวมีสีขาว

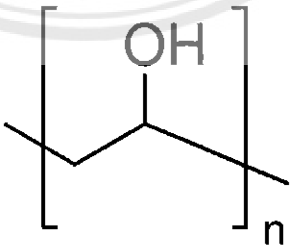
ค. กันก๊าซและแอลกอฮอล์ได้ดี

2.1.3 ทฤษฎีที่ 3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถสังเคราะห์ได้โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันได้เหมือนพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากโมโนเมอร์ (Monomer) ไม่มีอยู่จริงหรือไม่เสถียร โดยอาจจะเปลี่ยนรูปไปอยู่ในโครงสร้างไอโซเมอร์ (Isomer) แบบอื่นที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดังกล่าวจึงต้องเริ่มจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของไวนิลอะซิเทต (Vinyl Acetate) จากนั้นจึงนำพอลิไวนิลอะซิเทต (Polyvinyl Acetate) ที่ได้ไปผ่านด้วยกระบวนการแยกสลายโดยน้ำ (Hydrolysis) โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมธานอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับพอลิไวนิลอะซิเทต 15 กรัม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันจากหมู่อะซิเทตไปเป็นหมู่ไฮดรอกซี ซึ่งส่งผลให้สภาพขั้วของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นและละลายในน้ำได้ดีขึ้น [8]

2.1.3.1 โครงสร้างทางเคมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสูตรเคมีว่า $(C_2H_4O)_n$ โครงสร้างทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.2 มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ 65,000 กรัมโมล ความหนาแน่น 1.19-1.31 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมละลายที่ 230 องศาเซลเซียส และที่ 180-190 องศาเซลเซียส สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากการกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำอย่างสมบูรณ์และได้จากการกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำเป็นบางส่วน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากย่อยสลายได้ด้วยความร้อนอุณหภูมิสูงเท่านั้นและจะละลายน้ำอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [8]

2.1.3.2 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของความชื้น หากความชื้นสูงขึ้นน้ำก็จะถูกดูดซับได้มากขึ้นโดยน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้พลาสติกนิ่มนั้นก็จะลดความเค้นแรงดึงลง แต่จะเพิ่มแรงยืดและแรงเฉือนให้มากขึ้นทำให้มีสมบัติในการยึดเกาะที่ดี นอกจากนี้เมื่อได้รับความชื้นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีสมบัติในการเกิดฟิล์มส่งผลให้สามารถลดการรั่วซึมได้

ก. ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น และละลายน้ำได้

ข. สมบัติการก่อฟิล์มและการยึดติดที่ดี

ค. ทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมัน น้ำมันหล่อลื่นชนิดหนา และตัวทำละลาย

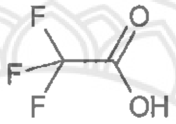
ง. มีความเค้นแรงดึงและความยืดหยุ่นสูง

จ. มีปริมาณออกซิเจนที่สูง มีคุณสมบัติป้องกันการระเหยของกลิ่นและน้ำมัน

2.1.4 ทฤษฎีที่ 4 กรดไตรฟลูออโรอะซิติก (Trifluoroacetic acid, TFA) [16]

กรดไตรฟลูออโรอะซิติกเป็นของเหลวไม่มีสี เป็นไอมีกลิ่นฉุน ไอหนักกว่าอากาศ และมีความเป็นกรดปานกลางทำปฏิกิริยารุนแรงกับด่าง มีสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของกรดไตรฟลูออโรอะซิติก [16]

มวลโมเลกุล	114.02
โครงสร้างทางเคมี	CF_3COOH 
ความหนาแน่นของไอ	3.9 (เมื่อเทียบกับอากาศ)
ความดันไอ	97.5 มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส
การวิเคราะห์	ร้อยละ 99
จุดเดือด	72.4 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	-15.4 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.489 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส

2.1.5 ทฤษฎีที่ 5 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ (phosphate buffer saline, PBS) [18]

ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้กันโดยทั่วไปในงานวิจัยทางชีววิทยา โดยเป็นสารละลายน้ำเกลือตามที่มีโซเดียมฟอสเฟตและในบางสูตรอาจมีโพแทสเซียมคลอไรด์หรือโพแทสเซียมฟอสเฟต โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์นั้นนิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความเป็นไอโซโทนิค (Isotonic) และไม่เป็นพิษต่อเซลล์ ซึ่งจะนำไปใช้งานในการเจือจางสารและล้างภาชนะสำหรับใส่เซลล์ เป็นต้น

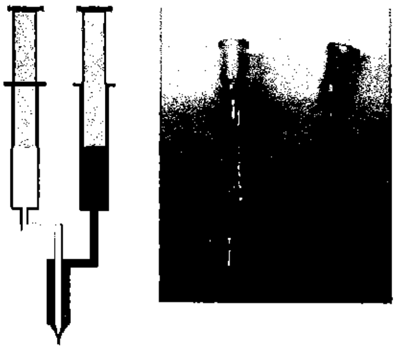
2.1.6 ทฤษฎีที่ 6 เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต

กระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิต คือ เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นเทคนิคในการเตรียมเส้นใยแบบนาโน เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ชุดอุปกรณ์การปั่นไฟฟ้าสถิตประกอบด้วย 3 ชิ้นส่วนหลัก คือ อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าโวลต์เตจสูง อุปกรณ์รองรับเส้นใย และอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

การผลิตเส้นใยโดยกระบวนการไฟฟ้าสถิตต่างจากวิธีผลิตเส้นใยอื่น คือ กระบวนการนี้จะใช้แรงทางไฟฟ้าแทนแรงทางกล โดยพอลิเมอร์เหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสารละลายหรือสารหลอมเหลวที่อยู่ในรูขนาดเล็ก จะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยสนามไฟฟ้าความแรงสูง เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น (Repulsive Coulombic Force) เมื่อมีแรงผลักมากพอถึงขั้นหนึ่งก็จะไปเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์เหลวได้ เส้นพอลิเมอร์เหลวก็จะถูกฉีดออกมาแล้วเปลี่ยนเป็นเส้นใย โดยการระเหยออกของตัวทำละลายหรือโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันเพื่อให้ได้เส้นใยที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจึงมีการพัฒนาเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตที่มีความซับซ้อนมากขึ้นหรือเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตขั้นสูง โดยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตขั้นสูงนี้ได้แก่ เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบหลอมละลาย เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบสนามใกล้ และเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบใช้สนามแม่เหล็กร่วม

เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนถูกนำมาใช้ในการทำให้เส้นใยนาโนมีหน้าที่หรือสมบัติพิเศษเฉพาะตัว (Functionalization) โดยการนำเอาโมเลกุลของสารวัตถุหรือส่วนประกอบอื่นโดยเฉพาะในด้านเทคโนโลยีเซนเซอร์ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ การนำส่งยา และนาโนอิเล็กโทรนิกส์ รวมเข้ากับเส้นใยนาโน ในหลายกรณีไม่สามารถทำโดยการใช้เทคนิคเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตอย่างง่ายได้ ทั้งนี้เนื่องจากมีปัญหาที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ หนึ่งปัญหาความต้องการในการเก็บสารที่อยู่ร่วมกับเส้นใยนาโน เช่น โมเลกุลชีวภาพ ได้แก่ เอนไซม์ โปรตีน ยา ไวรัส และแบคทีเรียในสภาวะแวดล้อมของของเหลว เพื่อที่จะคงสภาพหน้าที่หรือสมบัติเดิมของเส้นใยนาโนนั้นทำได้ยาก สองปัญหาเรื่องน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุที่จะใช้เป็นส่วนแกนในของเส้นใย (Core Fiber) ซึ่งส่วนมากจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมาก ทำให้การทำเส้นใยโดยเทคนิคเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามปัญหาทั้งสองข้อนี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้เทคนิคเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน ซึ่งในปัจจุบันได้เริ่มมีการศึกษาและรายงานการวิจัยทางด้านนี้แล้วจากหลายกลุ่มวิจัยโดยลักษณะของการฉีดแบบร่วมแกนจะมีความแตกต่างจากการฉีดแบบธรรมดา คือ หัวฉีด (Nozzle) ของการฉีดแบบร่วมแกนจะมีลักษณะเป็นเข็มซ้อนกัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการจัดระบบหัวฉีดสำหรับเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนและระบบหัวฉีดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ [10]

เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจะใช้หัวฉีดที่มีแกนขนานร่วมกันซ้อนกันสองอัน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับทั้งสองหัวฉีดมีขนาดเท่ากันและทำให้เกิดการหลอมหยดของสารประกอบ จากนั้นพอลิเมอร์จะถูกขับให้พุ่งออกมาจากหัวฉีดและเกิดเป็นเส้นใยนาโนผสมแบบแกนในเปลือกนอก (Core-shell Nanofiber) เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะพบว่าเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนมีกระบวนการทางกายภาพที่ซับซ้อน

กระบวนการผลิตเส้นใยแบบไฟฟ้าสถิตมีข้อดีหลายประการดังนี้ ข้อหนึ่งเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็ก โดยทั่วไปจะมีขนาดตั้งแต่หลายสิบนาโนเมตรจนถึงประมาณหนึ่งถึงสองไมโครเมตร จึงมักจะถูกเรียกว่า เส้นใยขนาดนาโนหรืออิเล็กโทรสปันนาโนไฟเบอร์ ข้อสองเนื่องจากเส้นใยมีขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากเป็นพิเศษในขณะที่มีน้ำหนักเบา ข้อสามผ้าที่ได้จากเส้นใยนี้จะมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีการส่งผ่านของของเหลวหรือแก๊สได้ดี ข้อดีดังกล่าวทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกแข่งขันกันพัฒนาการนำเส้นใยนาโนนี้ไปใช้ในงาน เช่น การกรองโมเลกุล การประดิษฐ์ชุดป้องกันอาวุธเคมี อาวุธชีวภาพของทหาร การสร้างนาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุโครงสร้างในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ และเป็นวัสดุยึดติดสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น [10, 11]

วัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หลอดเลือดเทียมที่ดีควรมีลักษณะคล้ายกับหลอดเลือดจริง คือ มีความยืดหยุ่น หักงอ คืนรูปเดิมได้ มีความอ่อนนุ่ม มีความเป็นรูพรุนต่ำ ไม่เป็นพิษ และสามารถเข้ากันได้กับร่างกายของคนจึงต้องมีการทดสอบความเป็นรูพรุน การรั่วซึมของเลือด และการต้านแรงดึง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประดิษฐ์หลอดเลือดเทียมควรเลือกใช้วัสดุที่มีความเหมาะสมมีสมบัติที่ดีตามลักษณะของหลอดเลือดเทียมนั่น คือ มีความยืดหยุ่นสูง หักงอสามารถคืนรูปเดิมได้ ไม่เป็นพิษ และสามารถเข้ากันได้กับร่างกาย จึงมีผู้วิจัยหลายคณะได้ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์หลอดเลือดเทียมดังนี้

Li Y. และคณะ [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรตโดยการโคพอลิเมอร์ (Copolymerized) ระหว่างพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิเอทธิลีนไกคอลโมโน-เอทิลอีเทอร์เมทาไคเลต (Polyethyleneglycolmonomethyl Ether Methacylate, PEGMA) ในสถานะของเอทิลีนไกลคอลไดเมทาไคเลต (Dimethacrylate, EGDMA) จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์และออกซิไดซ์ จากนั้นผสมอะซิติกแอนไฮเดรต (Acetic Anhydride, Ac_2O) และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide, DMSO) จากนั้นเกิดกลุ่มแอลดีไฮด์ (Aldehyde) บนพื้นผิวพลาสติกพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต เมื่อเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเรตที่มีกลุ่มแอล-ดีไฮด์ แล้วจะทำการตรึงด้วยสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกลุ่มแอล-ดีไฮด์ที่อยู่บนพื้นผิวของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและกลุ่มไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยพันธะโควาเลนต์ จากนั้นทำการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกน พบว่าบนแผ่นฟิล์มพอลิ-เอทธิลีนเทเรฟทาเลตมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เคลือบที่พื้นผิว จากนั้นทำการตรึงเฮพาริน (Heparin) บนพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อปรับปรุงสมบัติในด้านชีวภาพความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อภายในร่างกายแล้วทำการทดสอบ Plasma Recalcification Time และการยึดเกาะของเกล็ดเลือด

Jiang H. และคณะ [6] ได้ทำการปรับปรุงลิ้นหัวใจเทียมให้มีสมบัติการทนต่อแรงล้าและป้องกันการเกิดลิ่มเลือดอุดตัน โดยการผลิตลิ้นหัวใจเทียมทำขึ้นโดยการหล่อสารละลายพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถนำมาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทั้งยังไม่เป็นพิษต่อร่างกายและไม่ถูกละลายโดยน้ำภายในร่างกาย

การขึ้นรูปหลอดเลือดเทียมนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น งานวิจัยที่ศึกษาเรื่องหลอดเลือดเทียมโดยมีกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกันดังนี้

Ahmed M. และคณะ [4] ได้ศึกษาประดิษฐ์หลอดเลือดเทียมจาก Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane–Poly (Carbonate Urea) Urethane (POSS-PCU) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการการอัดรีด (Extrusion) โดยการอัดรีดแบบสลับกัน (Inversion) ด้วยเครื่องระบบอัตโนมัติ ผ่านการกระจายตัวของโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0-55 ซึ่งทำให้สามารถกำหนด

รูปร่างลักษณะรูพรุนของหลอดเลือดเทียมได้ จากนั้นทำการทดสอบด้วยการกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและทดสอบการต้านทานแรงดึง พบว่าความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลของหลอดเลือดเทียม ดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน ความหนาแน่น ความเป็นรูพรุน และความขรุขระเฉลี่ยของหลอดเลือดเทียม (n = 3)

Graft Modal	Pore Size (μm)	Density(g/cm^3)	Porosity (%)	Rq (nm)
1	N.A.	0.19 ± 0.03	83.19± 2.19	105.2 ± 12.8
2	15.21 ± 1.48	0.15 ± 0.02	86.67 ± 1.81	294.6 ± 11.2
3	20.87 ± 1.87	0.14 ± 0.02	88.12 ± 1.33	361.6 ± 19.8
4	30.75 ± 2.64	0.11 ± 0.01	90.72 ± 0.50	404.2 ± 29.8

ตารางที่ 2.3 แสดงความหนาของผนัง Suture Retention ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความสามารถในการยืด และมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (n = 6)

Graft	Wall Thickness (mm)	Suture Retention (N)	Max Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Young's Modulus (MPa)
1	0.94 ± 0.03	2.23 ± 0.15	1.71 ± 0.42	412 ± 82	0.70 ± 0.02
2	0.78 ± 0.02	4.46 ± 0.32	3.21 ± 0.20	547 ± 18	0.99 ± 0.05
3	0.66 ± 0.01	3.37 ± 0.21	2.38 ± 0.20	450 ± 27	0.69 ± 0.09
4	0.53 ± 0.03	2.33 ± 0.23	1.66 ± 0.25	416 ± 20	0.66 ± 0.04

Valence S. และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างเส้นใยนาโนเพื่อออกแบบหลอดเลือดเทียมชนิดใหม่ๆ การผลิตอวัยวะเทียมด้วยเส้นใยขนาดไมโครหรือขนาดนาโนนั้นทำได้โดยง่ายและคุ้มค่าด้วยการปั่นไฟฟ้าสถิต โดยตัวแปรสำคัญ คือ ขนาดของรูพรุนถ้ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะนำไปสู่ปัญหาต่างๆ เช่น การรั่วไหลของเลือด ในการศึกษานี้หลอดเลือดเทียมแบบสองชั้นที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยการปั่นไฟฟ้าสถิตแล้วทำการเปรียบเทียบหลอดเลือดที่มีความพรุนสูงกับชั้นความพรุนต่ำ โดยในการศึกษานี้มีการทดสอบขนาดเส้นใย ขนาดของรูพรุน ความพรุนรวม การรั่วไหลของน้ำและเลือด ความแข็งแรงทางกล การทนแรงดัน ความคงทนของรอยประสาน และได้รับการทดลองในร่างกายของหนูบริเวณหลอดเลือดแดงใหญ่ในช่องท้องเป็นเวลา 3 ถึง 12 สัปดาห์ พบว่าการรั่วไหลของเลือดในหลอดเลือดเทียมแบบสองชั้นลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับหลอดเลือดความพรุนสูงและหลอดเลือดเทียมทั้งหมดให้ผลลัพธ์ที่ดีในร่างกายด้วยพาเท็นซี่ (Patency) ที่สมบูรณ์แบบและไม่เกิดลิ่มเลือด

จากงานวิจัยพบว่าปัญหาที่สำคัญของหลอดเลือดเทียม คือ ความเป็นรูพรุนซึ่งความเป็นรูพรุนของหลอดเลือดเทียมมีผลต่อการรั่วซึมของเลือดและการยึดเกาะของเกล็ดเลือดทำให้เกิดลิ่มเลือดภายในหลอดเลือดเทียม จึงมีงานวิจัยเพื่อศึกษาการลดความเป็นรูพรุนของหลอดเลือดเทียมดังนี้

Ma Z. และคณะ [14] ได้ศึกษาการผลิตเส้นใยนาโนจากพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเรตที่ขึ้นรูปโดยวิธีการปั่นไฟฟ้าสถิตและมีการปรับปรุงพื้นผิวเลียนแบบเส้นใยโปรตีนที่มีต่อการสร้างพื้นผิวชีวภาพสำหรับเซลล์บุผนังหลอดเลือดให้มีการพัฒนาของวัสดุใหม่สำหรับงานวิศวกรรมหลอดเลือด เริ่มจากการเตรียมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตในตัวทำละลายกรดไตรฟลูโอโลอะซิติกความเข้มข้น 0.2 กรัมต่อมิลลิลิตร ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยที่ระยะห่างจากเข็มถึงตัวรับ (ฟอยล์อลูมิเนียม) เป็นระยะทาง 15 เซนติเมตร ฟอยล์อลูมิเนียมที่ใช้รับเส้นใยนาโนพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนั้นจะถูกควบคุมโดยเวลาที่ทำการฉีด จะได้วัสดุเส้นในนาโนพอลิเอทธิเทเรฟทาเลตเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและความหนาแน่นสูง โดยที่ความหนาวัสดุเส้นในนาโนพอลิเอทธิเทเรฟทาเลตนั้นเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการขึ้นรูป ในขณะที่ค่าความพรุนนั้นมีค่าคงที่ประมาณร้อยละ 82 จากนั้นได้มีการเคลือบด้วยเจลาตินและพอลิเมทธีนเมตาอะคริเลต (Polymethyl Methacrylate, PMAA) แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงความหนา ความหนาแน่น และความพรุนของวัสดุเส้นใยนาโนพอลิเอทธิลีน-เทเรฟทาเลตภายใต้ระยะเวลาที่ต่างกัน

Deposition Time (min)	Thickness of the Nanofiber Mat (μm)	Mass per Unit Area(mg/cm^2)	Apparent Density(g/cm^3)	Porosity(%)
30	6	0.15	0.25	80.7
60	12	0.27	0.23	82.3
120	35	0.78	0.22	83.1

He W. และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาการผลิตเส้นใยนาโนจากจากวัสดุชีวภาพมีแนวโน้มที่จะป้องกันการเกิด Intimal Hyperplasia ภายในหลอดเลือดเทียมขนาดเล็ก โดยทำการเคลือบ Poly(L-Lactic Acid)-co-Poly(E-Caprolactone) ด้วยคอลลาเจน ซึ่งมีความพรุนอยู่ที่ร้อยละ 64 ถึง 67 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย 470±130 นาโนเมตร ซึ่งเส้นใยถูกสร้างขึ้นมาโดยการใช้กระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตตามด้วยการทำพลาสม่าทรีสเม้นต์ (Plasma Treatment) และการเคลือบด้วยคอลลาเจนจะเห็นว่าโครงสร้างได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสแกนและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Transmission Electron Microscope , TEM) ส่วนสมบัติทางกลได้ทำการศึกษาความสามารถการต้านทานแรงดึงและนอกจากนี้ยังพบว่ามีคอลลาเจนบนผิวหน้าของชิ้นงาน โดยสามารถตรวจสอบได้จากเครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) และ Quantified by Colorimetric Method การเคลือบด้วยคอลลาเจนในชิ้นงานจะช่วยปรับปรุงการแพร่เชื้อและการยึดเกาะของเซลล์เยื่อบุผนังหลอดเลือดหัวใจได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา ความหนาแน่น และรูพรุนของวัสดุเส้นใยนาโน P(LLA-CL) (n=6)

Diameter (nm)	Thickness (mm)	Mass per Unit Area (mg/cm^2)	Apparent Density(g/cm^3)	Porosity (%)
470±130	26±5	1.13±0.20	0.43±0.08	64–67

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติทนต่อแรงดึงของวัสดุเส้นใยนาโนที่ขึ้นรูปโดยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต

	P(LLA-CL) NFM	Dacron (PET)	Coronary Artery
Tensile Modulus (MPa)	44±4	14,000	—
Tensile Strength (MPa)	6.3±1.4	170–180	1.40–11.14
Ultimate Strain (%)	175±49	—	45–99

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะในการขึ้นรูปของการพัฒนาพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตเพื่อปรับปรุงพื้นผิวให้ราบเรียบ ซึ่งการศึกษารวบรวมข้อมูลเป็นการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงงานทั้งหมด โดยแหล่งข้อมูลจะได้จากหนังสืองานวิจัยและปริญญานิพนธ์อื่นๆ เป็นหลัก โดยคณะผู้จัดทำจะศึกษาสัดส่วนของกระบวนการขึ้นรูปก่อนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป ด้วยการเตรียมสารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อฉีดขึ้นรูปในสัดส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบทั่วไปและปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน จากนั้นทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวและเส้นใย แล้วทำการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต

3.1.1.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มวลโมเลกุล 65,000 กรัมต่อโมล

3.1.1.3 กรดไตรฟลูออโรอะซิติก

3.1.1.4 ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์

3.1.1.5 น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.2.1 เครื่องชั่งสาร (ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

3.1.2.2 ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask)

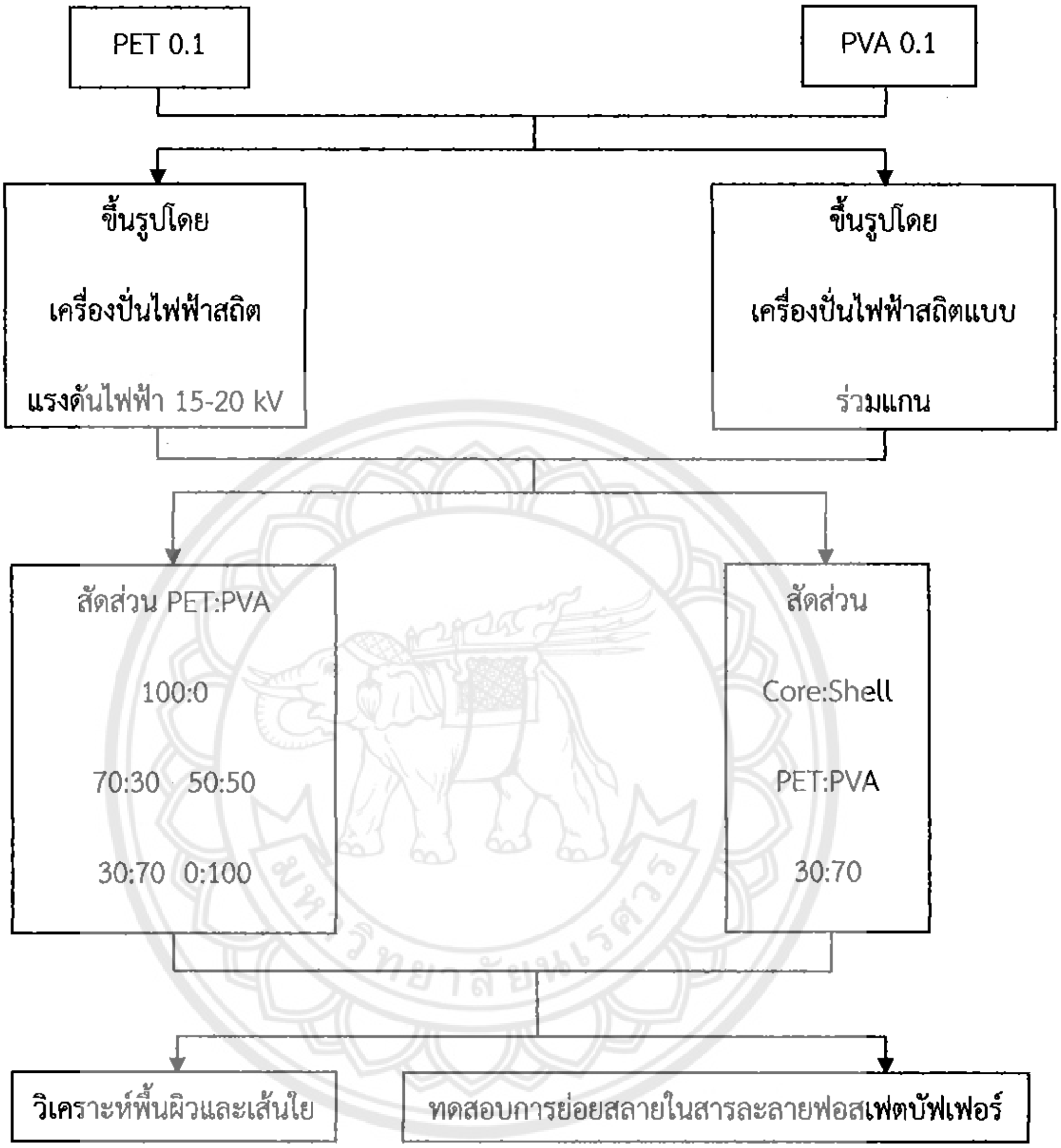
3.1.2.3 เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตและเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน

3.1.2.4 กล้องจุลทรรศน์

3.1.2.5 เตาไฟฟ้าให้ความร้อน

3.1.2.6 บีกเกอร์

3.2 แผนการดำเนินงาน

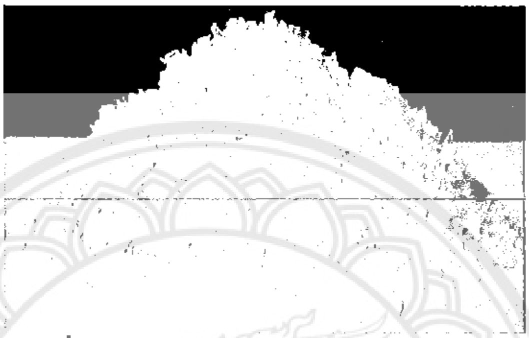


รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการทดลอง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

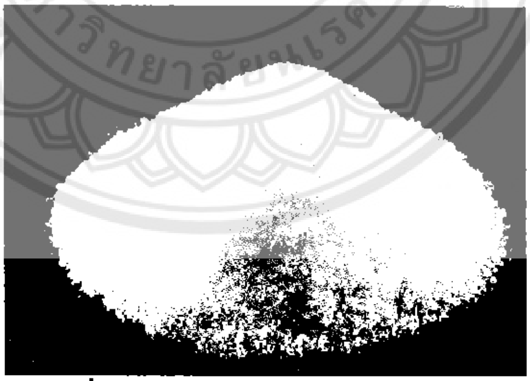
3.3.1 การเตรียมสารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตเตรียมจากการนำเม็ดพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต ดังรูปที่ 3.2 ละลายลงในตัวทำละลายกรดไตรฟลูออโรอะซิติกได้สารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต ที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 3.2 เม็ดพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต [7]

สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เตรียมจากการนำเม็ดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 3.3 ละลายลงในน้ำกลั่นได้สารละลายที่มีความเข้มข้น 0.1 กรัมต่อมิลลิลิตร



รูปที่ 3.3 เม็ดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [8]

แผนการทดลอง

การศึกษาการขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตได้แบ่งการทดลองการขึ้นรูปออกเป็น 2 วิธี คือ การขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบชั้นและการขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน โดยกำหนดสัดส่วนการขึ้นรูป ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

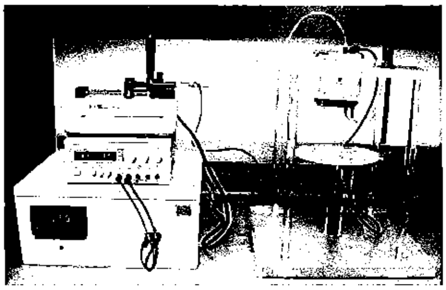
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปหลอดเลือดเทียมด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบชั้น

ชุดการทดลอง	สัดส่วน	
	พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
1	100	0
2	70	30
3	50	50
4	30	70
5	0	100

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปหลอดเลือดเทียมด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน

ชุดการทดลอง	สัดส่วน	
	พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตเป็นแกน	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเปลือก
6	30	70

3.2.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูป



รูปที่ 3.4 เครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต [11]

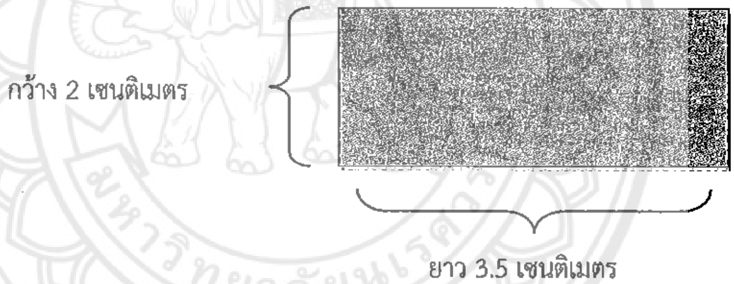
3.2.2.1 การฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต ดังรูปที่ 3.4 ด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า 15-20 กิโลโวลต์กระแสตรง โดยกำหนดระยะห่างจากฉากรับ 15 เซนติเมตร

3.2.2.2 ฉีดขึ้นรูปด้วยชุดการทดลองที่ 1 ถึง 5 จะเริ่มจากทำการฉีดชั้นของพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ก่อนเป็นชั้นแรก หลังจากนั้นทำการฉีดพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตทับเป็นชั้นที่สอง

3.4 การทดสอบสมบัติชิ้นตัวอย่าง

3.4.1 การทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงาน

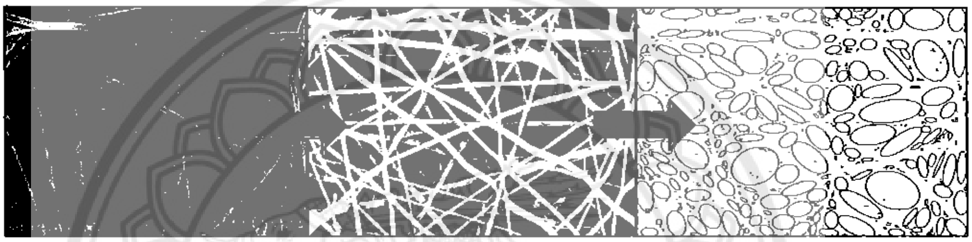
ศึกษาการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานโดยการเตรียมชิ้นงานขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 3.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 แล้วนำไปแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ที่ค่า pH เท่ากับ 7.0 ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการจดบันทึกน้ำหนักทุกๆ 24 ชั่วโมง เพื่อนำไปคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่หายไป โดยชิ้นงานแต่ละสัดส่วนจะถูกเตรียมทั้งหมดอย่างน้อยสามชิ้นงานและใช้ค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ผลเพื่อความแม่นยำของผลการทดลอง



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดของการเตรียมชิ้นงานในการย่อยสลาย

3.4.2 การวิเคราะห์เชิงภาพ (Image Analysis)

รูปถ่ายชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะถูกนำมาวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Image J เพื่อคำนวณหาปริมาณรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และนำข้อมูลมาวิเคราะห์การกระจายตัวของรูพรุนในชิ้นงานเพื่อหาชิ้นงานที่เหมาะสำหรับการเป็นหลอดเลือดเทียม ในการวิเคราะห์จะต้องตั้งสเกลก่อน โดยตั้งสเกลตามแถบสเกลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เลือกพื้นบริเวณที่จะใช้ในการวิเคราะห์ จากนั้นทำการไบนาไรเซชัน (Binarization) และปรับภาพให้เป็นขาวดำ (Threshold) ตามลำดับ แล้วจึงทำการวิเคราะห์อนุภาค (Particle Analysis) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลำดับการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรม Image J

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นทั้งหมด 2 ตอน ซึ่งได้แก่ตอนที่หนึ่ง คือ การหาสภาวะที่เหมาะสมกับการฉีดด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิต ตอนที่สอง คือ การขึ้นรูปชิ้นงานแบบเป็นชั้น โดยมีการกำหนดสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นดังต่อไปนี้ คือ ร้อยละ 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปชิ้นงานโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน โดยทำการกำหนดสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือ ร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการนำไปแช่ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์และศึกษาลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์

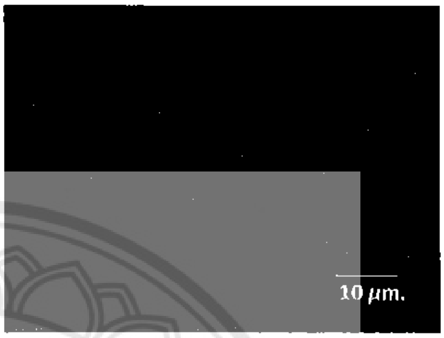
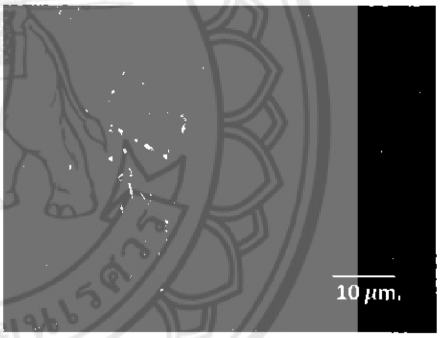
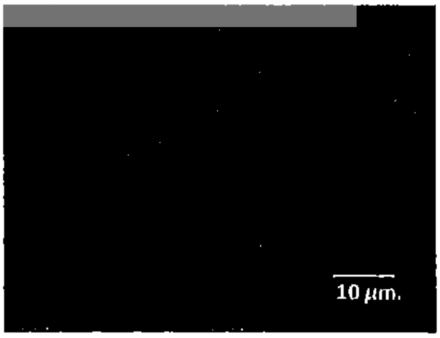
4.1 การหาสภาวะที่ดีที่สุดของชิ้นงานจากกระบวนการการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต

จากการขึ้นรูปชิ้นงานในการศึกษาหาสัดส่วนของพอลิเมอร์สังเคราะห์พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อชิ้นงานตามลำดับ คือ แรงดันไฟฟ้าและอัตราการไหล โดยได้ทำการควบคุมระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับฉากที่รองรับเส้นใยเป็น 15 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากการนำชิ้นงานไปตรวจเบื้องต้นด้วยกล้องจุลทรรศน์ทำให้ได้รู้ถึงสัดส่วนที่เหมาะสมในการทำการศึกษาครั้งนี้ โดยมีลักษณะของชิ้นงานในแต่ละสภาวะที่ทำการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.1

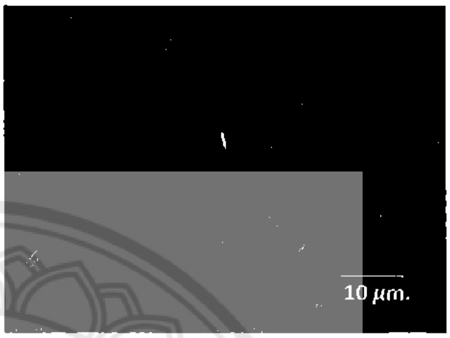
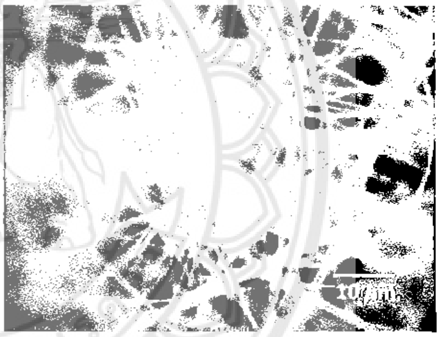
ตารางที่ 4.1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สภาวะ	การขึ้นรูป ได้	การขึ้นรูป ไม่ได้	ลักษณะเส้นใย	รูปภาพ	หมายเหตุ
PET อัตราการไหล 2 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 15 kV ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.4 mm	✓		เส้นใยที่ได้มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ		
PET อัตราการไหล 2 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 20 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.4 mm	✓		เส้นใยที่ได้มีขนาดไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นเส้นใยอย่างสมบูรณ์		
PET อัตราการไหล 1 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 15 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.4 mm	✓		เส้นใยมีลักษณะเล็กสม่ำเสมอและมีความต่อเนื่องของเส้นใย		*

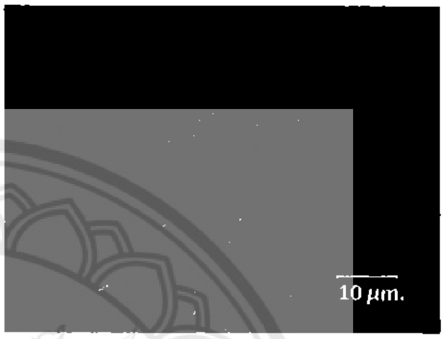
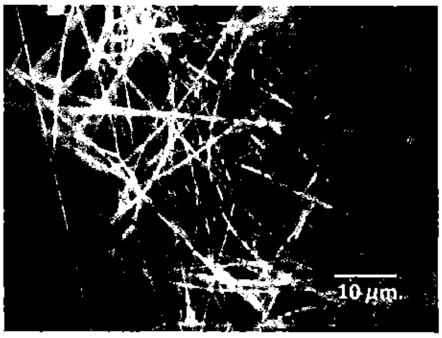
ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สภาวะ	การขึ้นรูป		ลักษณะเส้นใย	รูปภาพ	หมายเหตุ
	ได้	ไม่ได้			
PET อัตราการไหล 1ml/hr แรงดันไฟฟ้า 20kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.4 mm	✓		เส้นใยที่ได้มีลักษณะไม่สมบูรณ์ และมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ		
PET อัตราการไหล 2 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 15 kV ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใย และมีการหยดของสารละลาย		
PET อัตราการไหล 2 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 20 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็กน้อย หรือเส้นใยมีลักษณะใหญ่เกินไป		

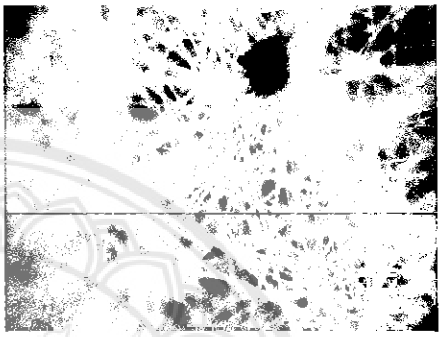
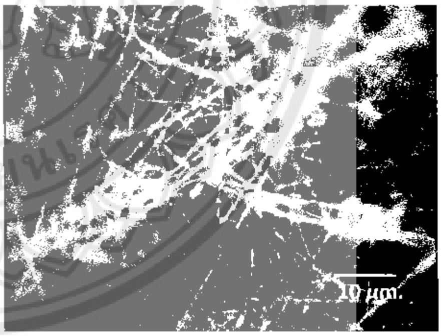
ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สภาวะ	การขึ้นรูป ได้	การขึ้นรูป ไม่ได้	ลักษณะเส้นใย	รูปภาพ	หมายเหตุ
PET อัตราการไหล 1 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 15 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm	✓		มีลักษณะเส้นใยเล็กและยาวมีความต่อเนื่องของเส้นใย		
PET อัตราการไหล 1 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 20 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm	✓		เส้นใยมีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ		*
PVA อัตราการไหล 2 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 15 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm		✓	เกิดการหยดของสารละลายจำนวนมาก	ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้	

ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สภาวะ	การขึ้นรูป		ลักษณะเส้นใย	รูปภาพ	หมายเหตุ
	ได้	ไม่ได้			
PVA อัตราการไหล 2 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 20 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm	✓		เส้นใยมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ไม่เป็นเส้นใยต่อเนื่อง และมีการหยดของสารละลาย		
PVA อัตราการไหล 1 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 15 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm		✓	เกิดการหยดของสารละลายจำนวนมาก	ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้	
PVA อัตราการไหล 1 ml/hr แรงดันไฟฟ้า 20 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 mm	✓		มีลักษณะเส้นใยเล็กต่อเนื่องของเส้นใยและมีการหยดของสารละลายเล็กน้อย		*

ตารางที่ 4.1(ต่อ) แสดงสภาวะที่ใช้ในการทดลองของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สภาวะ	การขึ้นรูป		ลักษณะเส้นใย	รูปภาพ	หมายเหตุ
	ได้	ไม่ได้			
PVA ไม่มีอัตรการไหล แรงดันไฟฟ้า 15 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 1.2 mm	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องมีการหยดของสารละลายเล็กน้อย		*
PVA ไม่มีอัตราการไหล แรงดันไฟฟ้า 20 kV เส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 1.2 mm	✓		มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องมีการหยดของสารละลายเล็กน้อย		

* คือ สภาวะของชิ้นงานที่เลือกนำมาใช้เพื่อทำการทดสอบ

จากผลการทดลองจะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายและระยะห่างคงที่ เมื่อกำหนดอัตราการไหลเป็น 1 และ 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าลักษณะของเส้นใยที่ได้จากทั้งสองพอลิเมอร์มีแนวโน้มของลักษณะเส้นใยที่คล้ายกัน คือ ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เส้นใยมีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง มีการหยดของสารละลายเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากสารละลายระเหยไม่สมบูรณ์จึงเกิดการรวมตัวกลายเป็นหยด เมื่อสารละลายสะสมมากขึ้นจึง

เกิดการหยดของสารละลาย เมื่อกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้า 15 และ 20 กิโลโวลต์ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ เส้นใยของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหยดของสารละลายจำนวนมาก เส้นใยไม่มีความต่อเนื่อง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อการระเหยของสารละลายเพราะถ้าแรงดันไฟฟ้าไม่มากพอที่จะไปเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์เหลวเกิดการสะสมของสารละลายพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์รวมตัวเป็นหยด เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 20 กิโลโวลต์ เส้นใยพอลิพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องมีการหยดของสารละลายเล็กน้อย เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ มีลักษณะที่เป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้สารละลายเกิดการระเหยอย่างไม่สมบูรณ์และเกิดการยึดติดกันระหว่างเส้นใยส่งผลให้เส้นใยมีขนาดใหญ่ เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเป็น 20 กิโลโวลต์ เส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตมีลักษณะที่เป็นเส้นใยต่อเนื่องมีขนาดของเส้นใยที่เล็กลง และเมื่อกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มเป็น 0.4 0.9 และ 1.2 มิลลิเมตร พบว่าเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กและเป็นเส้นใยที่สมบูรณ์ ที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้นเพื่อที่จะขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะของเส้นใยที่สมบูรณ์ แต่เส้นใยที่ได้ก็จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้น

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 มิลลิเมตร อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 20 กิโลโวลต์ และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม 0.4 มิลลิเมตร อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ เพราะการขึ้นรูปที่สภาวะนี้สามารถขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง ไม่เกิดการรวมตัวของเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายใยแมงมุม ขนาดของเส้นใยมีความสม่ำเสมอ และเป็นสภาวะที่มีเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.9 มิลลิเมตร อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เนื่องจากที่สภาวะนี้สามารถฉีดเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง มีการหยดของสารละลายเพียงเล็กน้อย เส้นใยที่ได้จะมีขนาดที่สม่ำเสมอกัน และที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม 1.2 มิลลิเมตร ที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจำเป็นต้องใช้สภาวะแรงดันที่เท่ากันในการขึ้นรูปและที่สภาวะนี้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถฉีดเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง มีการหยดของสารละลายแต่เมื่อทำการซ้อนเข็มของส่วนที่เป็นแกนจะส่งผลให้พื้นที่ในการไหลของพอลิเมอร์เล็กลงจึงทำให้การหยดของของสารละลายลดลง เส้นใยที่ได้มีขนาดสม่ำเสมอ

ดังนั้นจึงได้เลือกสภาวะการขึ้นรูปพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม 0.9 มิลลิเมตร มีอัตราการไหลที่ 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ และสภาวะการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม 0.9 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการไหลเป็น 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้าเป็น 20 กิโลโวลต์ เพื่อนำไปทำการทดลองขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาที่ขึ้นรูปแบบชั้น จากนั้นเลือกสภาวะการขึ้นรูปพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็ม 1.2 มิลลิเมตร ที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 15 กิโลโวลต์ และสภาวะการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเข็ม 0.4 มิลลิเมตร อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ในการทดลองการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน

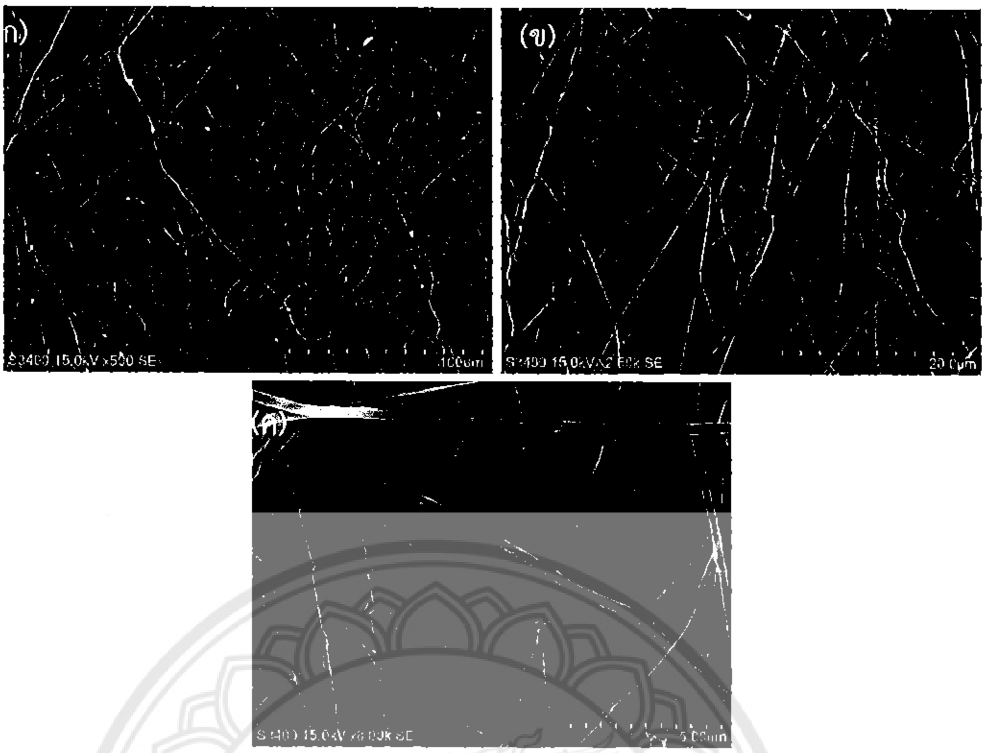
4.2 การขึ้นรูปด้วยกระบวนการการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต

การขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตจะแบ่งออกเป็นสองกระบวนการ คือ การขึ้นรูปด้วยการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาและการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน ซึ่งในการทดลองนี้จะขึ้นรูปกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาโดยการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแบบชั้น คือ กำหนดสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คือ ร้อยละ 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตจะแบ่งออกเป็นสองกระบวนการ คือ การขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดาและการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน ซึ่งในการทดลองนี้จะขึ้นรูปกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน โดยกำหนดสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเท-เรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นร้อยละ 30:70 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารละลายที่ใช้ในการทำละลายพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตมีความสามารถในการระเหยที่เร็วมาก จึงไม่สามารถทำการขึ้นรูปโดยให้ พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตเป็นส่วนที่เป็นเปลือกได้

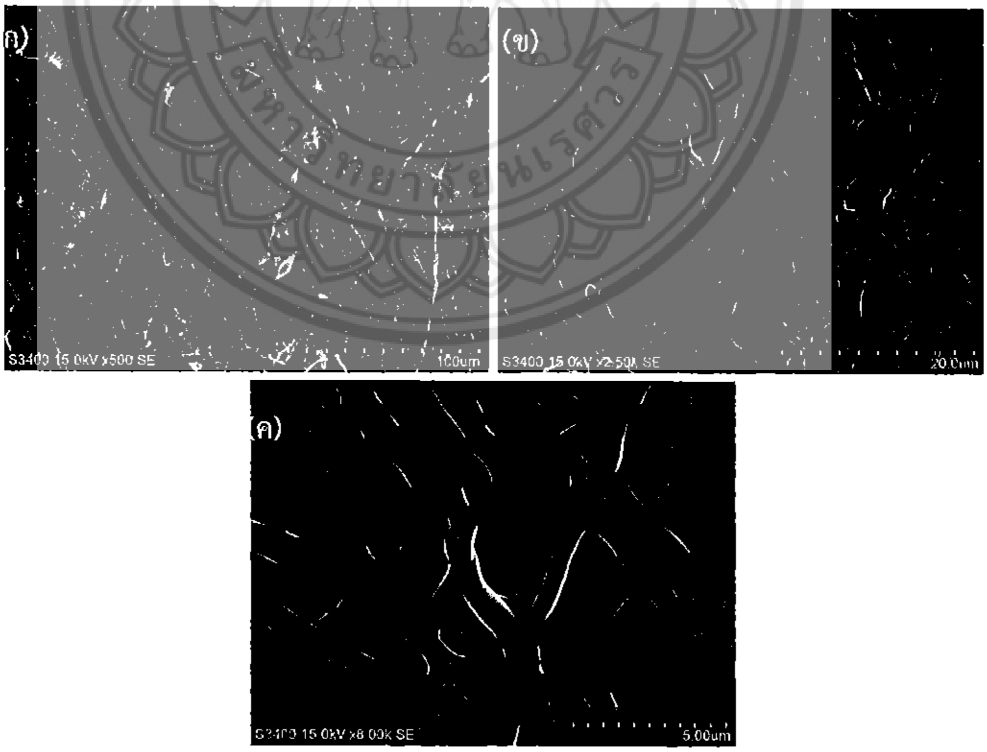
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน

จากการทดสอบด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่า ชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต โดยการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแบบชั้นมีลักษณะพื้นผิวของแต่ละสัดส่วนมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเฉพาะพื้นผิวชั้นบนของชิ้นงาน โดยจะเห็นว่าเส้นใยของผิวหน้าที่เป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์จะมีลักษณะเป็นเส้นใยเป็นเส้นตรงสานทับกัน เส้นใยมีความสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 4.1 เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 231 นาโนเมตร ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่ 93 นาโนเมตร และมีความเป็นรูพรุนเฉลี่ยร้อยละ 48.28 เส้นใยของพื้นผิวหน้าที่เป็นโพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลตจะเห็นว่าลักษณะของเส้นใยไม่มีความสม่ำเสมอ เส้นใยมีการเชื่อมกัน ทั้งนี้เนื่องจากใช้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเกินไปไม่เหมาะสมสำหรับการขึ้นด้วยเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ส่งผลให้ขณะฉีดขึ้นรูปเส้นใยตัวทำละลายไม่สามารถระเหยได้หมดทำให้เส้นใยมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 4.2 เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ 1.33 ไมโครเมตร ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 119 นาโนเมตร และมีความเป็นรูพรุนเฉลี่ยร้อยละ 22.36 การขึ้นรูปกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจะเห็นว่าเส้นใยมีลักษณะไม่สม่ำเสมอเป็นเส้นใยแบบร่วมแกนที่ไม่สมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจากงานวิจัยอื่น แสดงดังรูปที่ 4.4 ทั้งนี้เนื่องจากส่วนที่เป็นเปลือกไม่มีการควบคุมอัตราการไหลรวมไปถึงเข็มที่ฉีดมีขนาดที่เล็กมาก ส่งผลให้การไหลของพอลิเมอร์ไม่ต่อเนื่องทำให้การฉีดขึ้นรูปไม่มีความสม่ำเสมอของส่วนที่เป็นเปลือกตลอดทั้งเส้นใย แสดงดังรูปที่ 4.3 เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ 409 นาโนเมตร ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย 673 นาโนเมตร และมีความเป็นรูพรุนเฉลี่ยร้อยละ 44.93

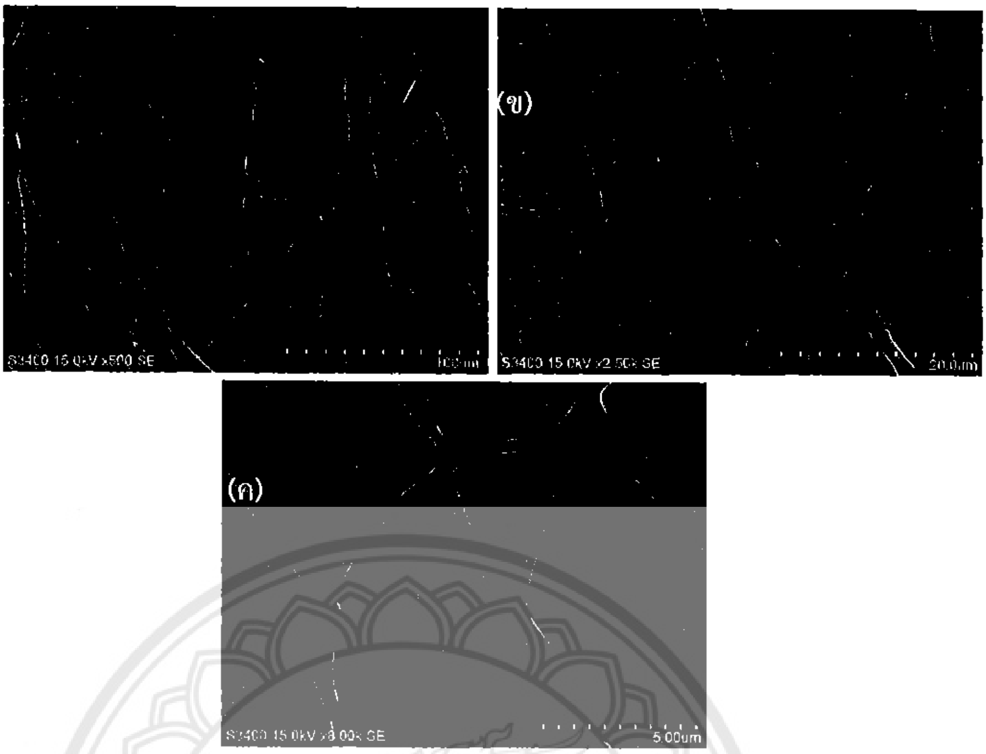
จากลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยพอลิเมอร์ชนิดที่ต่างกันลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานจะมีความแตกต่างกัน เมื่อทดสอบด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด แล้วนำภาพที่ได้จากการทดสอบไปวัดขนาดเฉลี่ยของรูพรุนและร้อยละความเป็นรูพรุนของชิ้นงาน พบว่าลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่มีพื้นผิวเป็นโพลีเอทธิลีนเทเรฟทาเลตมีขนาดเฉลี่ยของรูพรุนน้อยที่สุดและมีร้อยละความเป็นรูพรุนต่ำที่สุด ตามด้วยชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนและชิ้นงานที่มีพื้นผิวเป็นโพลีไวนิลแอลกอฮอล์มีขนาดของรูพรุนและร้อยละความเป็นรูพรุนสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานจากงานวิจัยอื่นจะเห็นว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบธรรมดามีร้อยละความเป็นรูพรุนที่สูงกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบชั้นและแบบร่วมแกน



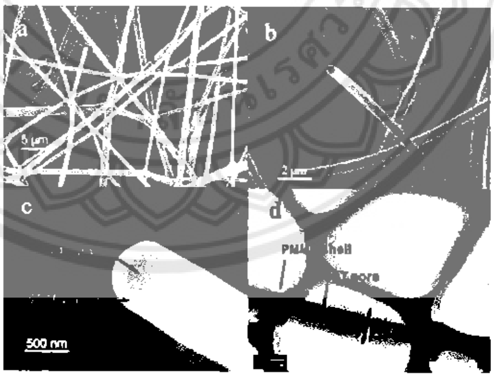
รูปที่ 4.1 แสดงรูปถ่ายเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 2500 เท่า และ ค) 8000 เท่า



รูปที่ 4.2 แสดงรูปถ่ายเส้นใยของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 2500 เท่า และ ค) 8000 เท่า



รูปที่ 4.3 แสดงรูปถ่ายเส้นใยของชิ้นงานที่ขึ้นรูปกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย ก) 500 เท่า ข) 2500 เท่า และ ค) 8000 เท่า



รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างรูปถ่ายของเส้นใยที่ขึ้นรูปกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [19]

4.2.2 ผลการทดสอบการย่อยสลาย

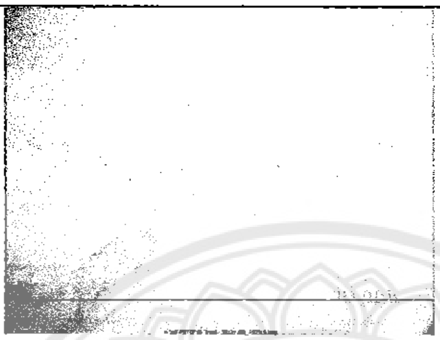
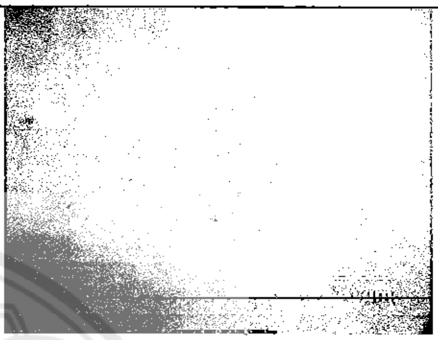
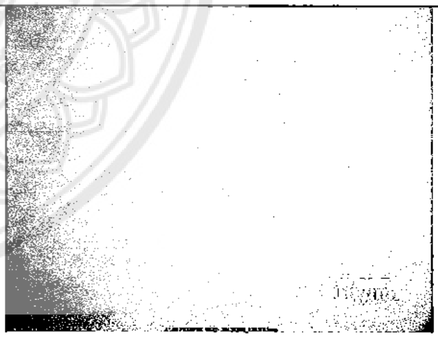
เนื่องจากโครงงานชิ้นนี้มีความคาดหวังว่าจะสามารถพัฒนาพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อประดิษฐ์พื้นผิวทางวิศวกรรมที่ใช้ในร่างกายมนุษย์ ซึ่งมีความจำเป็นต้องมีการทดสอบการย่อยสลายของพอลิเมอร์ด้วยการแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ที่ค่า pH เท่ากับ 7 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่า pH ในร่ายกายมนุษย์ โดยผลการทดลองที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่สัดส่วนต่างๆ ของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

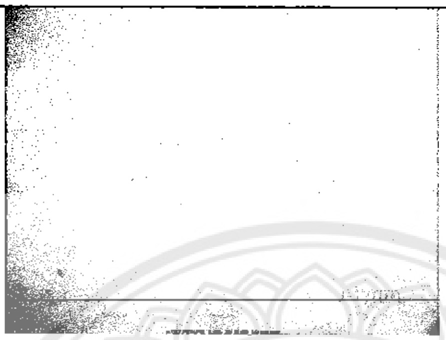
สัดส่วน PET:PVA	น้ำหนักเฉลี่ยก่อนการทดสอบ (mg)	น้ำหนักเฉลี่ยหลังการทดสอบ (mg)	ร้อยละของน้ำหนักที่หายไป
100:0	143.9	142.8	0.76
70:30	56.2	54.1	3.74
50:50	53.1	50.9	4.14
30:70	76.0	72.1	5.13
0:100	44.8	41.0	8.48

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบของเส้นใยที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ระหว่างก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานที่สัดส่วนต่างๆ ของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สัดส่วน PET:PVA	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
100:0		
70:30		
50:50		

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบของเส้นใยที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ระหว่างก่อนการทดสอบและหลังการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นงานที่สัดส่วนต่างๆ ของพอลิเอทธิลีนเทเรฟาทาเรตกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สัดส่วน PET:PVA	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ
30:70		
0:100		

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์เวลากับน้ำหนักของการแช่ชิ้นงานในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์จะเห็นว่าในทุกสัดส่วนของชิ้นงานมีแนวโน้มในทางเดียวกัน คือ เมื่อแช่ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์วันแรกน้ำหนักของชิ้นงานมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากชิ้นงานมีการดูดซับฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ จากนั้นน้ำหนักของชิ้นงานก็จะค่อยๆ ลดลงตามจำนวนวันที่เพิ่มมากขึ้นเพราะมีการย่อยสลายของพอลิเมอร์ โดยที่พอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มีการสูญเสียน้ำหนักชิ้นงาน คือ ร้อยละ 0.76 ตามมาด้วยชิ้นงานที่มีสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตที่ร้อยละ 70 50 และ 30 โดยน้ำหนัก คือ ร้อยละ 3.74 4.14 และ 5.13 ตามลำดับ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก คือ ร้อยละ 8.48 จากผลการทดสอบจะเห็นว่าชิ้นงานที่มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะของเส้นใยที่มีขนาดเล็กทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์มาก รวมไปถึงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติสามารถละลายน้ำได้จึงส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนักที่เร็วที่สุดตามด้วยชิ้นงานที่มีสัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากย่อยสลายเร็วกว่าชิ้นงานที่มีสัดส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

น้อยและพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตที่ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มีการหายไปของน้ำหนักในชิ้นงานที่ต่ำที่สุดเนื่องจากลักษณะของเส้นใยจากพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตที่ได้จากการทดสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด จะเห็นว่าเส้นใยมีลักษณะที่มีขนาดขนาดใหญ่พื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ทั้งยังมีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ แต่เนื่องจากการฉีดพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตเป็นเส้นใยจึงอาจเกิดการหลุดของเนื้อพอลิเมอร์ในฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนักเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานจากการขึ้นรูปของทั้งสองกระบวนการจะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบชั้นจะมีลักษณะพื้นผิวที่มีความราบเรียบเส้นใยมีลักษณะที่สม่ำเสมอ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าต่ำ และมีร้อยละความเป็นรูพรุนที่น้อยกว่าการขึ้นรูปด้วยกระบวนปั่นกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานทั้งหมดจะเห็นว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตจะมีรูพรุนที่ต่ำที่สุด แต่พื้นผิวของชิ้นงานไม่มีความราบเรียบ เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะเห็นว่าชิ้นงานมีความเป็นรูพรุนมากขึ้นเพียงเล็กน้อย พื้นผิวมีความราบเรียบสม่ำเสมอ แต่เมื่อทำการทดสอบการย่อยสลาย พบว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีการสูญเสียของน้ำหนักที่มากที่สุด ดังนั้นชิ้นงานที่ดีที่สุดในงานการทดลองนี้ คือ ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นไฟฟ้าสถิตแบบชั้นที่สัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30 โดยน้ำหนัก เพราะมีความเป็นรูพรุนที่ต่ำ มีพื้นผิวราบเรียบ และมีการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย

หลังการทำการทดสอบด้วยการแช่ชิ้นงานในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ เมื่อนำชิ้นงานไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ยังมีลักษณะที่เป็นเส้นใยสานทับกันและเนื่องจากชิ้นงานที่ทำการทดสอบนั้นมีความหนาไม่เหมาะสมกับการนำไปทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์มีกำลังขยายต่ำจึงไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของชิ้นงานก่อนแช่ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์และชิ้นงานหลังแช่ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

โครงงานเรื่องนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทธิลีนเทเรฟ-ทาเลตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากนั้นเลือกสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำมาศึกษาสมบัติของเส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบชั้นและกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตแบบร่วมแกน เพื่อปรับปรุงลักษณะของพื้นผิว ลักษณะของเส้นใย และดูการย่อยสลายของชิ้นงาน ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลจากการศึกษาการเลือกสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

การเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญเนื่องจากมีปัจจัยมากมายที่ส่งผลต่อลักษณะของเส้นใย เช่น อัตราการไหลและแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น จากการทดลองได้มีการกำหนดอัตราการไหลเป็น 2 ค่า คือ อัตราการไหลที่ 1 และ 2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และได้มีการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 15 และ 20 กิโลโวลต์ จากผลการทดลองจะเห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เนื่องจากที่สภาวะนี้สามารถฉีดเส้นใยพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง มีการหยดของสารละลายที่น้อย และเส้นใยมีขนาดสม่ำเสมอ และสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่ความดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เพราะการขึ้นรูปที่สภาวะนี้สามารถขึ้นรูปเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่อง ไม่เกิดการรวมตัวของเส้นใยที่มีลักษณะคล้ายใยแมงมุมและขนาดของเส้นมีความสม่ำเสมอ

5.1.2 ผลจากการศึกษาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิต

จากการทดลองการศึกษาการขึ้นรูปด้วยกระบวนการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตจะเห็นว่าลักษณะทางกายภาพของเส้นใยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือ มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง มีขนาดของเส้นใยที่สม่ำเสมอ และซ้อนทับกัน

จากผลการทดสอบการย่อยสลายด้วยการแช่ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาไลน์ เมื่อเปรียบเทียบในทุกสัดส่วนจะเห็นว่าพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มีการสูญเสียน้ำหนักของเส้นใยที่ช้าที่สุด ตามมาด้วยชิ้นงานที่มีสัดส่วนของพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตที่ร้อยละ 70 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และชิ้นงานที่มีระยะเวลาในการย่อยสลายเร็วที่สุด คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะเห็นว่าถ้าสามารถขึ้นรูปชิ้นงานเป็นทรงกระบอกได้จะสามารถทดสอบชิ้นงานที่มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปใช้งานสำหรับประดิษฐ์หลอดเลือดเทียม เช่น การทดสอบสมบัติเชิงกล การทดสอบการรั่วซึมของของเหลว และการทดสอบทางชีวภาพว่าชิ้นงานควรไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย การทดสอบการยึดเกาะของเซลล์ต่ำ เนื่องจากเซลล์ของเม็ดเลือดไม่ควรไปยึดเกาะกับผนังของชิ้นงานเพราะจะทำให้เกิดการอุดตันของหลอดเลือดเทียม

เอกสารอ้างอิง

[1] ชลน่าน ศรีแก้ว. (14 พฤศจิกายน 2555). โรคเบาหวาน. **มติชน**, หน้า 4.

[2] สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. (2553). พลาสติกเพื่ออุปกรณ์การแพทย์. **Plastics Intelligence Update,** Vol. 2, No. 4, pp. 4-6.

[3] M.J.W. Koens, K.A. Faraj, R.G. Wismans, J.A. van der Vliet, A.G. Krasznai, V.M.J.I. Cuijpers, J.A. Jansen, W.F. Daamen, T.H. van Kuppevelt. (2010). Controlled fabrication of triple layered and molecularly defined collagen/elastin vascular grafts resembling the native blood vessel. **Acta Biomaterialia,** Vol. 6, pp. 4666-4674.

[4] Maqsood Ahmed, Hossein Ghanbari, Brian G. Cousins, George Hamilton, Alexander M. Seifalian. (2011). Small calibre polyhedral oligomeric silsesquioxane nanocomposite cardiovascular grafts: Influence of porosity on the structure, haemocompatibility and mechanical properties. **Acta Biomaterialia,** Vol. 7, pp. 3857-3867.

[5] S. de Valence, J.C. Tille, J.P. Giliberto, W. Mrowczynski , R. Gurny, B.H. Walpoth, M. Moller. (2012). Advantages of bilayered vascular grafts for surgical applicability and tissue regeneration. **Acta Biomaterialia,** Vol. 8, pp. 3914-3920.

[6] Hongjun Jiang, Gord Campbell, Derek Boughner, Wan-Kei Wan, Mackenzie Quantz. (2004). Design and manufacture of a polyvinyl alcohol (PVA) cryogel tri-leaflet heart valve prosthesis. **Medical Engineering & Physics,** Vol. 26, pp. 269–277.

[7] A.K. van der Vegt & L.E. Govaert, (2005), **Polymeren,** Gebonden, German.

[8] D.Braun, H. Chedron, W. Kern, (1984). **Practical Molecular Organic Chemistry,** 3rd edition, Harwood, NewYork.

[9] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2556). **เจลาติน.** สืบค้นเมื่อ 1 เมษายน 2556, จาก http://th.wikipedia.org/wiki/เจลาติน.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[10] R. Rangkupan, (2002). **Electrospinning process of polymer melts,** Ph.D. Dissertation, The University of Akron, Akron, OH, USA.

[11] D. Li, Y. Xia, (2004). Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel. **Advanced Materials,** Vol. 16, No. 14.

[12] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. (2556). **Scanning Electron Microscope.** สืบค้นเมื่อ 3 เมษายน2556, จาก http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/218-scaning-eletron-microscopysem-.html

[13] Yali Li, K.G. Neoh, E.T. Kang. (2004). Poly(vinyl alcohol) hydrogel fixation on poly(ethylene terephthalate) surface for biomedical application. **Polymer,** Vol. 45, pp. 8779-8789.

[14] Zuwei Ma, Masaya Kotaki, Thomas Yong, Wei Heb, (2005). Seeram Ramakrishna. Surface engineering of electrospun polyethylene terephthalate (PET) nanofibers towards development of a new material for blood vessel engineering. **Biomaterials,** Vol. 26, pp. 2527-2536.

[15] Afra Hadjizadeh, Abdellah Ajji, Martin N. Bureaub. (2010). Preparation and characterization of NaOH treated micro-fibrous polyethylene terephthalate nonwovens for biomedical application. **Journal of the Mechanical Behaior of Biomedical Materials,** Vol. 3, pp. 574-583.

[16] Sigmaaldrich. (2013). **Trifluoroacetic acid.** สืบค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2556, จาก http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/t6508?lang=en&region=US.

[17] William F. Smith, (1996). **Principle of Material Science and Engineering,** 3rd.ed., McGraw-Hill, NewYork.

[18] Wikipedia. (2013). **Phosphate buffered saline.** สืบค้นเมื่อ 1 พฤษจิกายน 2556, จาก http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphate_buffered_saline.

[19] Fengyu Li, Yong Zhao, Yanlin Song, (2010). **Nanofibers,** INTECH, Rijeka.

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการย่อยสลายของชิ้นงาน

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์

วันที่	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.0408	0.0494	0.0442	0.0448
1	0.0637	0.093	0.0855	0.0807
2	0.0427	0.0721	0.0574	0.0574
3	0.0415	0.0577	0.0435	0.0476
4	0.0406	0.0546	0.0433	0.0462
5	0.0398	0.0531	0.0423	0.0451
6	0.0379	0.0521	0.0421	0.0440
6	0.0378	0.0513	0.0418	0.0436
7	0.0378	0.0499	0.0416	0.0431
9	0.0375	0.0477	0.0416	0.0423
10	0.0371	0.0470	0.0411	0.0417
11	0.0371	0.0467	0.0410	0.0416
12	0.0370	0.0463	0.0410	0.0414
28	0.0365	0.0457	0.0408	0.0410
น้ำหนักที่สูญเสีย	0.0043	0.0037	0.0034	0.0038

ตารางที่ ก.2 ตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์ซาไลน์

วันที่	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.1533	0.1435	0.1348	0.1439
1	0.2542	0.2313	0.1982	0.2279
2	0.228	0.2168	0.1936	0.2128
3	0.2117	0.2043	0.1779	0.1980
4	0.1944	0.1937	0.1736	0.1872
5	0.1734	0.1679	0.1651	0.1688
6	0.1611	0.1591	0.1570	0.1591
6	0.158	0.1537	0.1499	0.1539
7	0.1565	0.1451	0.1422	0.1479
9	0.1557	0.1446	0.1403	0.1469
10	0.1546	0.1440	0.1348	0.1445
11	0.1544	0.1429	0.1342	0.1438
12	0.1527	0.1426	0.1341	0.1431
28	0.1526	0.1422	0.1336	0.1428
น้ำหนักที่สูญเสีย	0.0007	0.0013	0.0012	0.0011

ตารางที่ ก.3 ตารางตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีน-เทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 70:30 ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์-ซาไลน์

วันที่	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.0459	0.0503	0.0723	0.0562
1	0.0464	0.0512	0.124	0.0739
2	0.0461	0.0512	0.1089	0.0687
3	0.0456	0.0506	0.0823	0.0595
4	0.0455	0.0505	0.0745	0.0568
5	0.0451	0.0503	0.0733	0.0562
6	0.0454	0.0499	0.0727	0.0560
7	0.0452	0.0497	0.0720	0.0556
8	0.045	0.0496	0.0712	0.0553
9	0.0449	0.0495	0.0710	0.0551
10	0.0449	0.0493	0.0708	0.0550
11	0.0447	0.0493	0.0708	0.0549
28	0.0439	0.0487	0.0689	0.0538
น้ำหนักที่สูญเสีย	0.0020	0.0016	0.0025	0.0020

ตารางที่ ก.4 ตารางตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 50:50 ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์-ซาไลน์

วันที่	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.0696	0.0450	0.0441	0.0529
1	0.0858	0.0698	0.0843	0.0800
2	0.0840	0.0770	0.0541	0.0717
3	0.0838	0.069	0.0472	0.0667
4	0.0834	0.0668	0.0457	0.0653
5	0.0830	0.0668	0.0444	0.0647
6	0.0829	0.0667	0.0443	0.0646
7	0.0829	0.0667	0.0439	0.0645
28	0.0675	0.0343	0.0417	0.0478
น้ำหนักที่สูญเสีย	0.0021	0.0021	0.0024	0.0022

ตารางที่ ก.5 ตารางตารางบันทึกน้ำหนักการย่อยสลายของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยพอลิเอทธิลีน-เทเรฟทาเลตต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30:70 ในสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์-ซาไลน์

วันที่	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	0.0601	0.1002	0.0677	0.0760
1	0.0901	0.1871	0.0949	0.1240
2	0.0625	0.1149	0.069	0.0821
3	0.0610	0.1111	0.0684	0.0802
4	0.0605	0.0997	0.0674	0.0759
5	0.0596	0.0988	0.0670	0.0751
6	0.0588	0.0982	0.0668	0.0746
7	0.0587	0.0971	0.0664	0.0741
8	0.0586	0.0970	0.0664	0.0740
9	0.0584	0.0969	0.0663	0.0739
10	0.0583	0.0967	0.0662	0.0737
11	0.058	0.0963	0.0659	0.0734
28	0.0561	0.0962	0.0641	0.0721
น้ำหนักที่สูญเสีย	0.0040	0.0040	0.0036	0.0039

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน

ชื่อ นายกิตติธัช ไพบูลย์ลีสกุล

ภูมิลำเนา 18/12 หมู่ 2 ต.อ้อมใหญ่ อ.สามพราน จ.นครปฐม

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวัดไร่ขิงวิทยา จ.นครปฐม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: i3ank_gemini@hotmail.com

ชื่อ นางสาวภัทราวรรณ ส่งสุข

ภูมิลำเนา 15 หมู่ 16 ต.สร้างถ่อ อ.เขื่องใน จ.อุบลราชธานี

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเบญจะมะมหาราช จ.อุบลราชธานี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: moomoojung_oreo@hotmail.com