

การพัฒนาแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซึ่งก็ไอออนจากแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีนพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF ZINC ION BATTERY SEPARATORS FROM POLYACRYLONITRILE AND
BIO-RELATED POLYURETHANE ELECTROSPUN FIBER MATS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซึ่งกัไอออนจากแผ่นเส้นใยอิเล็ก โทรสปินพอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ
โดย	น.ส.สุชาวดี สายแสงธรรม
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.มนัญญา โอชวิไล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
.....	
(ดร.มนัญญา โอชวิไล)	กรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.รจนา พรประเสริฐสุข)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภโชค ตันพิชัย)	

สุชาติ สายแสงธรรม : การพัฒนาแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออนจากแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิโพรพิลีน
 ลีอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ. (DEVELOPMENT OF ZINC ION BATTERY
 SEPARATORS FROM POLYACRYLONITRILE AND BIO-RELATED POLYURETHANE
 ELECTROSPUN FIBER MATS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ประณัฐ โปธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาร่วม :
 ดร.มนัญญา โอฆวิไล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิโพรพิลีนของพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพสำหรับใช้เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออน โดยเตรียมพอลิยูรีเทนชีวภาพจากไดไฮดรอกซีไฮดรอกซีชีวภาพ พอลิคาโพรแล็กโทนไดโอด และเอทิลีนไกลคอลพบว่าที่อัตราส่วน 2.1:1:1 พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูงสุด 28,000 กรัมต่อโมล จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิโพรพิลีนของพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่อัตราส่วน 75:25 ด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์พอลิโพรพิลีนร่วมกับการใช้วิธีการออกแบบการทดลองโดยวิธีการทากูชิ ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัย 4 ระดับ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาและสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ จากนั้นใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกย์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเป็นแผ่นกั้นของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิโพรพิลีนพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ โดยสมบัติที่ใช้ในการพิจารณา ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ขนาดรูพรุน ความเป็นรูพรุน ค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์ ความทนแรงดึง ค่าการนำไอออน ค่ามุมสัมผัสของอิเล็กทรอนิกส์และค่าการหดตัวของแผ่นเส้นใย พบว่าการใช้ความเข้มข้นของพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร เป็นภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ โดยมีค่าการนำไอออนสูงถึง 3.11 มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร มีความทนแรงดึง 44.2 เมกะปาสคาล และมีการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์ร้อยละ 1,971 ของแผ่นเส้นใย นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นเส้นใยที่พัฒนาได้สามารถทนต่อการหดตัวทางความร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้มีศักยภาพในการประยุกต์เป็นแผ่นกั้นสำหรับซิงก์ไอออนแบตเตอรี่

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6172144323 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Bio-related polyurethane Electrospinning Separator Zn-ion battery

Suchawadee Saisangtham : DEVELOPMENT OF ZINC ION BATTERY SEPARATORS FROM POLYACRYLONITRILE AND BIO-RELATED POLYURETHANE ELECTROSPUN FIBER MATS. Advisor: Prof. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D. Co-advisor: Manunya Okhawilaj, Ph.D.

The purpose of this research is to fabricate polyacrylonitrile/bio-related polyurethane electrospun fiber mats for using as a separator in Zn-ion battery. A thermoplastic bio-related polyurethane was prepared using partially bio-based diisocyanate, polycaprolactone diol and ethylene glycol at a mole ratio of 2.1:1:1 which yields a maximum molecular weight of 28,000 g/mol. Polyacrylonitrile/bio-related polyurethane electrospun fiber mats at 75:25 by weight were prepared using electrospinning technique coupled with 3 parameters and 4 levels of Taguchi's Design of Experiment. The properties of the obtained electrospun fiber mats i.e., fiber diameter, pore size, porosity, electrolyte uptake, tensile strength, ionic conductivity, contact angle and thermal shrinkage were optimized following the Gray Relational method. It was found that all obtained fiber mats illustrated smooth and continuous fiber without any bead formation. Furthermore, the concentration of 14 wt%, 25 kV of applied voltage and 16 cm of distance from tip to collector were the most suitable fabrication condition providing an ionic conductivity of 3.11 mS/cm, tensile strength of 44.2 MPa and electrolyte uptake of 1,971%. Moreover, the fiber mats show no dimension change upon heating to a temperature of 150°C. Consequently, the polyacrylonitrile/bio-related polyurethane electrospun fiber is a promising candidate for a separator for Zn-ion battery.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science Student's Signature

Academic Year: 2020 Advisor's Signature
Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งใจไว้ได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยความกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช และอาจารย์ ดร.มนัญญา โอฆวิไล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อเสนอชี้แนะ ตลอดถึงการให้ความช่วยเหลือและความเอื้อเฟื้อด้าน อุปกรณ์ สารเคมีและสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังเสียสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการช่วยตรวจสอบ วิทยานิพนธ์ที่เอื้อประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จอย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.รจนา พรประเสริฐสุข และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภโชค ต้นพิชัย กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาและกรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย ให้ความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัยให้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อนนิสิต เจ้าหน้าที่ในสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ และเจ้าหน้าที่หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจเสมอมา รวมถึงอาจารย์ ทุก ๆ ท่านที่ให้คำปรึกษาและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรควิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สุชาวดี สายแสงธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่.....	3
2.2 แผ่นกั้นแบตเตอรี่.....	4
2.3 สมบัติของแผ่นกั้น.....	4
2.4 ประเภทของแผ่นกั้น.....	5
2.5 แบตเตอรี่.....	8
2.6 ซิงก์ไอออนแบตเตอรี่.....	8
2.7 พอลิอะครีโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile, PAN).....	9
2.8 พอลิยูรีเทน (polyurethane, PU).....	10
ไอโซไซยาเนต	11

พอลิออล	13
สายโซ่ต่อ.....	14
2.9 หลักการทำงานของเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง	15
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.11 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE).....	21
2.12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเกรย์.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	28
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	31
3.4.1 การเตรียมพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	31
3.4.2 กระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง.....	31
3.4.3 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ต้องการศึกษา.....	31
3.4.4 กระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นกั้นในแบบเตอรี.....	33
3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติ.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	36
4.1 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพ.....	36
4.1.1 ระยะเวลาการเกิดพรีพอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทนชีวภาพ	36
4.1.2 ผลกระทบของระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์	37
4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่ได้จากการสังเคราะห์.....	38
4.2 อัตราส่วนของพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่มีผลกระทบต่อลักษณะทาง สัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กโทรสปิน	39

4.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	41
4.4 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	49
4.5 ตัวแปรที่มีผลต่อความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	54
4.6 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการดูดซับอเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	58
4.7 ตัวแปรที่มีผลต่อความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	62
4.8 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	67
4.9 มุมสัมผัสของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	71
4.10 การเปลี่ยนทางกายภาพต่อความร้อนของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	73
4.11 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
บรรณานุกรม.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	86

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในแบตเตอรี่.....	3
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นกั้นแบตเตอรี่จากวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	4
รูปที่ 2.3 แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมโครเมตร	6
รูปที่ 2.4 แผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอ	7
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในแบตเตอรี่ซิงก์แมงกานีสไดออกไซด์.....	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างพอลิอะครีโลไนไตรล์	10
รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของพอลิยูรีเทน	11
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างไดไอโซไซยานต	11
รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์เพนตะเมทิลีนไดไอโซไซยานตชีวภาพ	12
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของไดไอโซไซยานตจากสารสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์.....	13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอีเทอร์ พอลิเอสเทอร์ และพอลิคาร์บอเนต.....	14
รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง	15
รูปที่ 2.13 ลักษณะลำเส้นใยพอลิเมอร์.....	16
รูปที่ 2.14 ผลกระทบจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนต่อระยะเวลาในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพรีพอลิยูรีเทน.....	18
รูปที่ 2.15 ผลกระทบจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนต่อระยะเวลาทั้งหมดในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทน.....	19
รูปที่ 2.16 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทน.....	19
รูปที่ 2.17 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิคาโพรแล็กโทน.....	20
รูปที่ 2.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นกั้น.....	21
รูปที่ 3.1 แผนงานวิจัยการเตรียมแผ่นกั้นลูกผสมของพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	30
รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ.....	38
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	40
รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างที่ภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (น้ำเงิน) และอัตราส่วน S/N (แดง)	47

รูปที่ 4.4	สัณฐานวิทยาของรูพรุน	51
รูปที่ 4.5	ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่อขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็ก โทรสปันพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	52
รูปที่ 4.6	ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้น ใยอิเล็กโทรสปันพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	56
รูปที่ 4.7	ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของ แผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปันพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	60
รูปที่ 4.8	ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใย อิเล็กโทรสปัน พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	64
รูปที่ 4.9	การทดสอบความยืดหยุ่นโดยการบิดโค้งแผ่นเส้นใย	65
รูปที่ 4.10	กราฟ NYQUIST ของแผ่นอิเล็กโทรสปันพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ...	67
รูปที่ 4.11	ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อค่าการนำไอออนของแผ่นเส้น ใยอิเล็กโทรสปัน พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ	69
รูปที่ 4.12	มุมสัมผัสของสารอิเล็กโทรไลต์บนแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปันพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรี เทนเชิงชีวภาพ	71
รูปที่ 4.13	แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ก) ก่อนอบ ข) หลังอบ	73
รูปที่ 4.14	แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 74	

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	น้ำหนักโมเลกุลและมุมสัมผัสของพอลิยูรีเทน	18
ตารางที่ 2.2	ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ (STANDARD ORTHOGONAL ARRAY).....	22
ตารางที่ 2.3	ตัวอย่างจำนวนของปัจจัยและระดับปัจจัยของออร์โธโกนอลอาร์เรย์.....	23
ตารางที่ 2.4	การวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากรโดยการวิเคราะห์ผ่านค่า ความแปรปรวน.....	23
ตารางที่ 2.5	ค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองของค่าความเป็นรูปทรงและความทนแรงดึง ..	27
ตารางที่ 3.1	ปัจจัยและระดับของปัจจัย	32
ตารางที่ 3.2	ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ.....	32
ตารางที่ 3.3	แผนการทดลองโดยวิธีการทากูชิ	33
ตารางที่ 4. 1	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่ระยะเวลาการเติมสายโซ่ต่อต่างกัน.....	37
ตารางที่ 4. 2	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน	38
ตารางที่ 4.3	สัณฐานวิทยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์ กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ขึ้นรูปภายใต้ภาวะต่าง ๆ	41
ตารางที่ 4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	48
ตารางที่ 4.5	ขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ แต่ละสูตร.....	50
ตารางที่ 4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปิน.....	53
ตารางที่ 4.7	ความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิง ชีวภาพแต่ละสูตรและแผ่นกั้นทางการค้า.....	55
ตารางที่ 4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปิน.....	57
ตารางที่ 4. 9	การดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรี เทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตรและแผ่นกั้นทางการค้า	59
ตารางที่ 4. 10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรส ป็น	61

ตารางที่ 4. 11 ความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปัน พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิง ชีวภาพแต่ละสูตร.....	63
ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปัน.....	66
ตารางที่ 4.13 การนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปัน พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิง ชีวภาพแต่ละสูตรและค่าการนำไอออนของแผ่นกั้นทางการค้า.....	68
ตารางที่ 4. 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปัน.....	70
ตารางที่ 4.15 มุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์สปันแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปันพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอ ลียูรีเทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตร.....	72
ตารางที่ 4.16 ผลการแปลงข้อมูลดิบ	75
ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	76
ตารางที่ 4.18 ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	77
ตารางที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์.....	78



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีความสำคัญสำหรับสังคมปัจจุบันเป็นอย่างมาก ทำให้มีการพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน ปัจจุบันระบบลิเทียมไอออน เป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความจุสูงสามารถประจุไฟได้เร็ว แต่มีความปลอดภัยต่ำและมีต้นทุนที่สูง ทำให้ระบบแบตเตอรี่ซึ่งก็ไอออนได้รับความนิยมเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทางเลือกเนื่องจากแบตเตอรี่ซึ่งก็ไอออนมีความจุสูง มีต้นทุนต่ำและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งหนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญของแบตเตอรี่ คือ แผ่นกั้นที่ทำหน้าที่กั้นระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดไม่ให้เกิดการสัมผัสและลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้ไอออนไหลผ่านจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่งได้ จึงทำให้แผ่นกั้นจำเป็นจะต้องมีความเป็นรูพรุน ทนความร้อนและสารเคมีได้ดี และมีสมบัติเชิงกลสูง เพื่อที่แผ่นกั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพจนก่อให้เกิดการลัดวงจรเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาแผ่นกั้นสำหรับใช้งานในแบตเตอรี่ซึ่งก็ไอออน โดยใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง เนื่องจากกระบวนการนี้ให้เส้นใยที่มีขนาดเล็กระดับนาโนถึงไมโครเมตร เส้นใยเรียงตัวเป็นแบบนอนวูฟเวน ทำให้แผ่นกั้นที่ได้มีความเป็นรูพรุนสูง เหมาะกับการใช้เป็นแผ่นกั้น นอกจากนี้ยังเลือกใช้พอลิอะคริโลไนไตรล์ผสมกับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพมาผลิตเป็นแผ่นกั้น เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อน ทนต่อสารเคมี มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยในการเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากพอลิอะคริโลไนไตรล์และพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ
2. พัฒนาแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปินจากพอลิอะคริโลไนไตรล์และพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซึ่งก็ไอออน

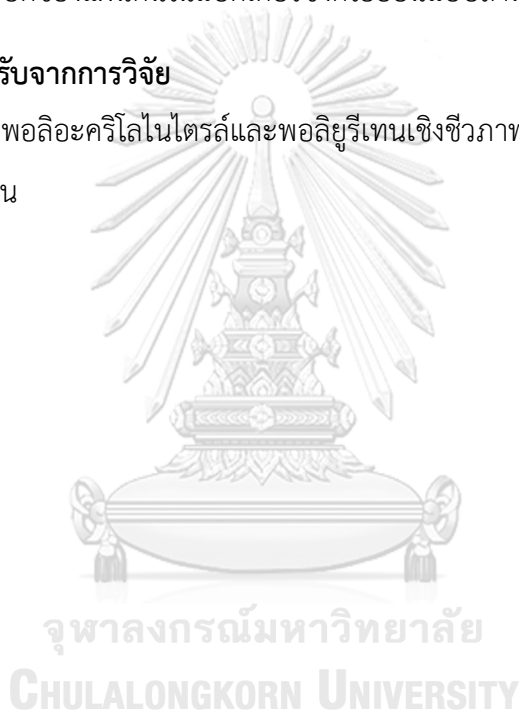
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สังเคราะห์พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพจากไตไฮโซไซยานเนตฐานชีวภาพ พอลิคาโพรแล็กโทน ไดออล และเอทิลีนไกลคอลในอัตราส่วน 2.1:1:1

2. สังเคราะห์พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพโดยการผสมไดไอโซไซยาเนตฐานชีวภาพกับพอลิคาโพรแล็กโทนไดออลเป็นระยะเวลา 0-4 ชั่วโมง จึงเติมเอทิลีนไกลคอล และสังเคราะห์ทิ้งไว้จนครบ 100 ชั่วโมง
3. ขึ้นรูปแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยให้ความต่างศักย์ตั้งแต่ 15-30 กิโลโวลต์ ใช้ความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก ใช้ระยะห่างจากปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างตั้งแต่ 15-25 เซนติเมตร และอัตราการป้อนสารละลายอยู่ที่ 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
4. ศึกษาสมบัติของแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออนแบบถ่านก้อนกระดุม

1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย

ได้แผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์และพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่สามารถนำไปใช้เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออน



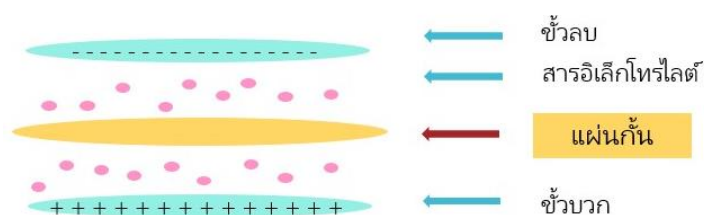
บทที่ 2

ทฤษฎี

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานาน ทำให้มีการพัฒนานำไปใช้งานกับอุปกรณ์ที่หลากหลาย มีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป เช่น มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่ใช้ในถ่านรีโมท ลักษณะเป็นเซลล์กระดุมที่ใช้เป็นถ่านนาฬิกา หรือมีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ในรถยนต์ เป็นต้น

2.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่หนึ่งเซลล์จะประกอบด้วย (แสดงดังรูปที่ 2.1) ขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ขั้วแอโนด (anode) หรือขั้วประจุลบทำหน้าที่ในการจ่ายอิเล็กตรอนและขั้วแคโทด (cathode) หรือขั้วประจุบวกทำหน้าที่ในการรับอิเล็กตรอน โดยมีสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) คือสารละลายเกลือกรดหรือเกลือเบส ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการขับเคลื่อนไอออนจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง และมีแผ่นกั้น (separator) ที่ทำหน้าที่ขึ้นอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วทั้งสองเพื่อป้องกันการสัมผัสกันของขั้วไฟฟ้า

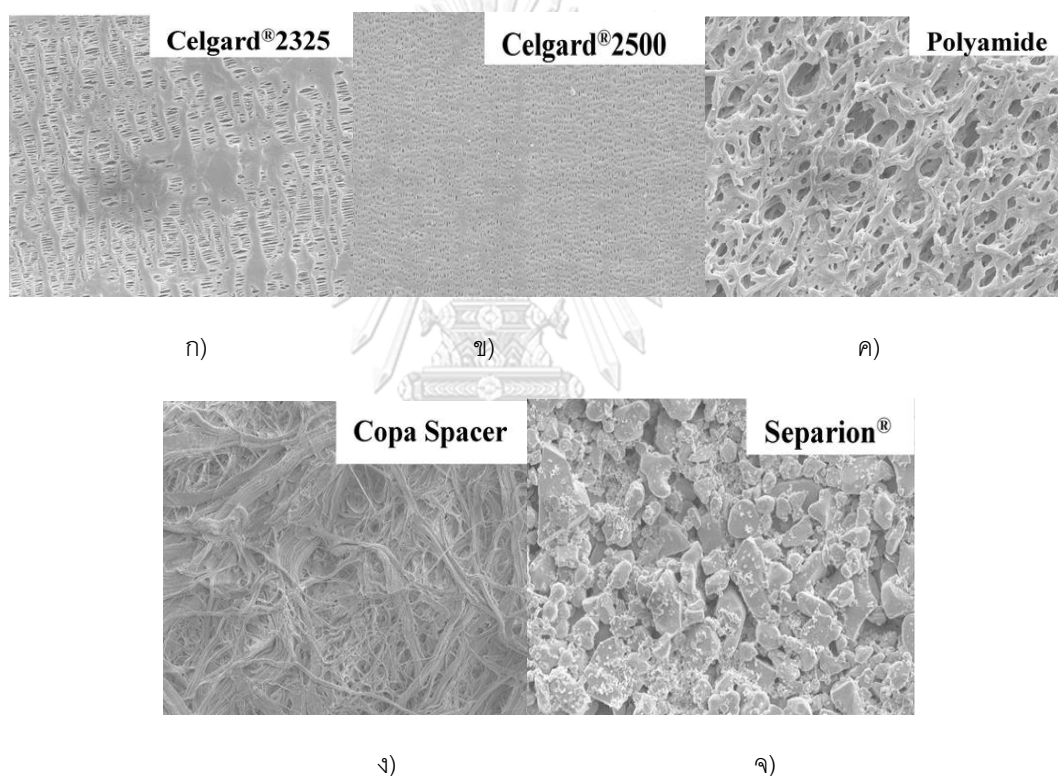


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบในแบตเตอรี่

กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่จะเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ต่อเข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าจะทำให้ไอออนที่สะสมตัวอยู่ในขั้วแอโนดเคลื่อนที่ไปขั้วแคโทดโดยมีสารอิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ (สารอิเล็กโทรไลต์จะถูกดูดซับอยู่ในแผ่นกั้น) ทำให้เกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าและสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าไอออนที่สะสมตัวอยู่ในขั้วแอโนดจะหมด โดยมีข้อจำกัดคือขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะต้องไม่สัมผัสกันเพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจร (short circuit) เกิดขึ้น ดังนั้นการพัฒนาแผ่นกั้นให้มีเสถียรภาพและสามารถให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านได้จึงเป็นเรื่องท้าทายของนักวิจัยเป็นอย่างมาก

2.2 แผ่นกั้นแบตเตอรี่

โดยทั่วไปแผ่นกั้นจะมีลักษณะเป็นแผ่นของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งแผ่นกั้นในยุคแรกทำจากไม้ แต่ไม่มีเสถียรภาพทางเคมีไม่เพียงพอจึงถูกทดแทนด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ ต่อมาจึงมีการพัฒนาใช้ ใยแก้ว (glass fiber mat) เซลลูโลส เซรามิก โลหะ และพอลิเมอร์ มาผลิตเป็นแผ่นกั้น ซึ่งวัสดุแต่ชนิดมีสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2.2 ก) celgard2325 เป็นแผ่นกั้นที่ทำมาจากพอลิเมอร์ 3 ชั้น คือ พอลิโพรพิลีน/พอลิเอสเตอร์/พอลิโพรพิลีน 2.2 ข) celgard2500 เป็นแผ่นกั้นที่ทำมาจากพอลิโพรพิลีน 2.2 ค) แผ่นกั้นที่จากพอลิเอไมด์ 2.2 ง) copa spacer เป็นแผ่นกั้นที่ทำมาจากเซลลูโลส 2.2 จ) separion เป็นแผ่นกั้นที่ทำมาจากเซรามิกบนพอลิเอทีลีนเทรฟทาเลต [2]



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นกั้นแบตเตอรี่จากวัสดุชนิดต่าง ๆ [2]

2.3 สมบัติของแผ่นกั้น

1. ความเป็นรูพรุน (porosity)

แผ่นกั้นที่ดีควรมีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อให้สารอิเล็กโทรไลต์สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในแผ่นกั้นได้ในปริมาณมากทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดี ซึ่งความเป็นรูพรุนนี้

สามารถทดสอบได้จากวิธีการดูดซับของเหลวตามมาตรฐาน ASTM D2873 [3] ซึ่งความสามารถในการดูดซับของเหลวของพอลิเมอร์ก็จะขึ้นอยู่กับพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2. ความสามารถในการเปียก (wettability) และการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte uptake)

แผ่นกั้นที่ดีควรมีความสามารถในการเปียกต่อสารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ได้ดีเนื่องจากมีความสำคัญต่อการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ (หากแผ่นกั้นมีความสามารถในการเปียกที่ดีจะเป็นการประหยัดระยะเวลาในการประกอบขึ้นรูปเป็นเซลล์แบตเตอรี่) ซึ่งสมบัตินี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้เป็นแผ่นกั้น สารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ และความเป็นรูพรุนของแผ่นกั้น

3. สมบัติเชิงกล (mechanical strength)

แผ่นกั้นควรมีความสามารถในการทนแรงเชิงกลได้ดีเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทั้งหมดขึ้นรูปเป็นเซลล์แบตเตอรี่และขณะที่อยู่ในเซลล์แบตเตอรี่ หากแผ่นกั้นมีความแข็งแรงมากจะทำให้เซลล์แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพมาก

4. เสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability)

แผ่นกั้นควรมีเสถียรภาพทางความร้อนเนื่องจากเมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่อาจเพิ่มขึ้น ซึ่งหากแผ่นกั้นไม่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพียงพออาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแผ่นกั้น เช่น เกิดการบิดงอ การหดตัว จะทำให้ขั้วทั้งสองเกิดการสัมผัสกันและเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น

5. เสถียรภาพทางเคมี (chemical stability)

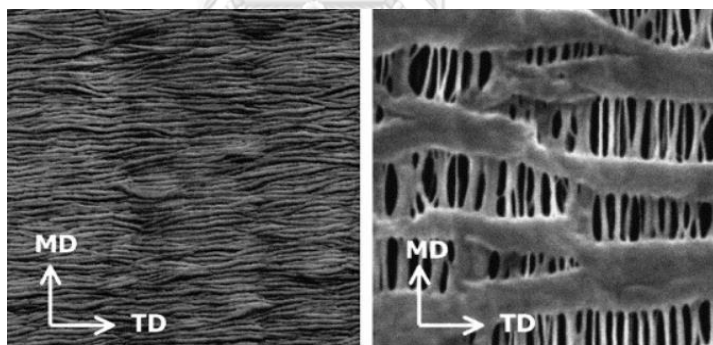
แผ่นกั้นควรมีเสถียรภาพทางเคมี คือวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นกั้นไม่ควรเกิดปฏิกิริยากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองหรือเกิดปฏิกิริยากับสารอิเล็กโทรไลต์และแผ่นกั้นจะต้องไม่ถูกกัดกร่อนด้วยสารที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์เพราะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการลัดวงจรในแบตเตอรี่

2.4 ประเภทของแผ่นกั้น

แผ่นกั้นสามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งานได้ 5 แบบ ได้แก่ 1) แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมครอน 2) แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมโครอนที่ถูกดัดแปลง 3) แผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอ 4) แผ่นกั้นคอมพอสิต และ 5) แผ่นกั้นแบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ [4]

1. แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมครอน (microporous separators)

แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมครอน เป็นแผ่นกั้นที่โดยทั่วไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการให้ความร้อน การอัดรีด ทำให้ได้แผ่นกั้นมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม จากนั้นให้แรงดึงกับแผ่นฟิล์มทำให้เกิดเป็นรูพรุนตามแนวแรงดึงที่มีขนาดรูพรุนอยู่ในระดับไมโครเมตร (แสดงดังรูปที่ 2.3) ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นแผ่นกั้นแบบชั้นเดียวและแผ่นกั้นแบบหลายชั้น แผ่นกั้นแบบชั้นเดียวสามารถเตรียมได้จากพอลิเมอร์ที่หลากหลายชนิดแต่มีการเตรียมจากกระบวนการผลิตเพียงแค่กระบวนการเดียว ส่วนแผ่นกั้นแบบหลายชั้นจะเป็นแผ่นกั้นที่มีการเตรียมมากกว่า 1 ชั้นตอน เพื่อเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นกั้น เช่น เพิ่มความแข็งแรงเชิงกล เพิ่มความต้านทานความร้อน โดยการลามิเนตพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งเข้ากับพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน ซึ่งส่วนใหญ่พอลิเมอร์ที่นำมาใช้กับแผ่นกั้นประเภทนี้จะเป็นพอลิโอเลฟิน เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) พอลิเตตระฟลูออโรเอ ส ที ลี (polytetrafluoroethylene, PTFE) และ พอลิไว นิล ดี น ฟลู ออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) เป็นต้น โดยแผ่นกั้นพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนที่มักนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในแบตเตอรี่ลิเธียม มีชื่อทางการค้า คือ celgard



ก)

ข)

รูปที่ 2.3 แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมโครเมตร

ก) ก่อนให้แรงดึง ข) หลังให้แรงดึง [1]

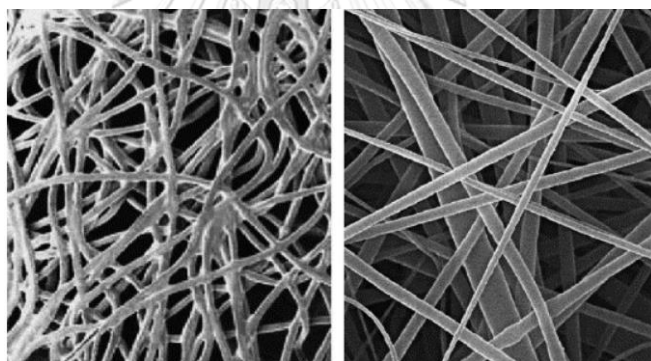
2. แผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมครอนที่ถูกดัดแปลง (modified microporous membrane separators)

แผ่นกั้นประเภทนี้เป็นกรนำแผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมครอนมาดัดแปลงเพื่อเพิ่มสมบัติของแผ่นกั้นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แผ่นกั้นส่วนมากจะผลิตจากพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีสมบัติทางความร้อน ความสามารถในการเปียก และการรักษาสารอิเล็กโทร

ไลต์ที่ไม่ดี จึงนำแผ่นกั้นดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการ การยิงลำแสงอิเล็กตรอน ยิงลำแสงยูวี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นกั้น เป็นต้น

3. แผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอ (non-woven mat separators)

แผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอ เป็นแผ่นกั้นที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใยที่พันพาดกัน ซึ่งสามารถเตรียมได้ด้วยหลายวิธี ได้แก่ เทคนิค melt blown เป็นเทคนิคที่ทำให้ได้เส้นใยขนาดเล็กละเอียดในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร แต่ไม่เป็นเส้นยาวต่อเนื่อง ทำให้เทคนิคนี้ ได้เส้นใยที่ไม่แข็งแรง เทคนิค wet laid เป็นเทคนิคที่ให้เส้นใยสั้นโดยมีน้ำเป็นตัวกลางในการกระจายเส้นใยลงบนแผ่นวัสดุเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นนอนวูฟเวน และเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง (electrospinning) เป็นเทคนิคที่ใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตรและเส้นใยมีความยาวต่อเนื่อง (แสดงดังรูปที่ 2.4) ด้วยโครงสร้างของแผ่นกั้นทำมาจากเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กทำให้แผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอมีความเป็นรูพรุนสูงมากกว่าแผ่นกั้นประเภทอื่น ๆ



ก) ข) CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.4 แผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอ

ก) เทคนิค wet laid ข) เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

4. แผ่นกั้นคอมพอสิต (composite separators)

แผ่นกั้นคอมพอสิตสามารถเตรียมได้จากกระบวนการเคลือบและการเติมวัสดุอนินทรีย์ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide, Al_2O_3) ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium oxide, TiO_2) ลงในแผ่นกั้นแบบมีรูพรุนขนาดไมครอนหรือแผ่นกั้นแบบไม่ถักไม่ทอ เพื่อเป็นการเพิ่มสมบัติทางกล เสถียรภาพทางความร้อน และค่าการนำไอออนให้เพิ่มมากขึ้น

5. แผ่นกั้นแบบอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte membranes)

แผ่นกั้นแบบพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ อิเล็กโทรไลต์เซรามิก พอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ เจลพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรไลต์คอมพอสิต แผ่นกั้นประเภทนี้จะทำงานเป็นทั้งแผ่นกั้นและเป็นอิเล็กโทรไลต์ในการนำไอออนเคลื่อนที่จากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง แผ่นกั้นประเภทนี้ถึงแม้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากแต่มีข้อเสียคือการมีค่าการนำไอออนที่ต่ำที่อุณหภูมิห้อง

ซึ่งในการพิจารณาเลือกใช้แผ่นกั้น นอกจากสมบัติที่ดีของแผ่นกั้น ความเข้ากันได้กับสารเคมีในแบตเตอรี่ก็เป็นเรื่องสำคัญ เพราะถึงแม้แผ่นกั้นจะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์แบตเตอรี่แต่มีผลต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ อาทิ ความหนาแน่นของพลังงาน ความสามารถในการนำไอออนและอายุการใช้งาน เป็นต้น [3]

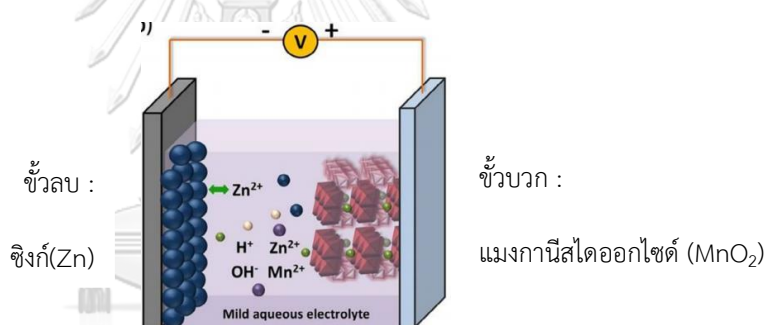
2.5 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิและแบตเตอรี่ทุติยภูมิ แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิเป็นแบตเตอรี่แบบใช้แล้วทิ้งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงเหมาะกับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย ส่วนแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิเป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาชาร์จไฟใหม่ได้ทำให้แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิเป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมและได้รับการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง แบตเตอรี่ประเภททุติยภูมิที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ ลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูงและมีเสถียรภาพที่ดี แต่มีปัญหาในเรื่องความปลอดภัย ราคาต้นทุนสูงและปริมาณลิเทียมที่อยู่อย่างจำกัด จึงเกิดการพัฒนาแบตเตอรี่ทางเลือกที่สามารถให้พลังงานสูง มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ไวไฟ และมีต้นทุนต่ำ [5] ทำให้วัสดุโลหะหลายวาเลนซ์อโลหะทรอน (multivalent metal ion) เช่น Zn^{2+} Ca^{2+} Mg^{2+} Fe^{2+} และ Al^{3+} ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบเอควียสอิเล็กโทรไลต์ (aqueous electrolytes) กลายเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากมีราคาต้นทุนต่ำ ปฏิกิริยามีความปลอดภัย มีค่าการนำไอออนสูงถึง 1 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) ในขณะที่ระบบแบบนอนเอควียสอิเล็กโทรไลต์ (non-Aqueous electrolytes) มีค่าการนำไอออนอยู่ที่ประมาณ 10^{-2} - 10^{-3} ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร [6]

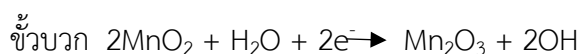
2.6 ชิงก์ไอออนแบตเตอรี่

ชิงก์ไอออนแบตเตอรี่ เป็นแบตเตอรี่ทางเลือกที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจาก มีความจุสูง (820 มิลลิแอมป์ต่อกรัม (mAh/g)) มีศักย์ภาพในการรีดอกซ์ค่อนข้างต่ำ (-0.76 โวลต์ เมื่อ

เทียบกับอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจนมาตรฐาน) ปลอดภัย มีราคาต้นทุนต่ำและใช้อิเล็กโทรไลต์แบบเอควิวียสอิเล็กโทรไลต์ (aqueous electrolytes) ทำให้ปฏิกิริยามีความไวไฟต่ำ มีความปลอดภัยสูง ซึ่งซิงก์ไอออนแบตเตอรี่ประกอบด้วย ขั้วแอโนดที่ใช้วัสดุเป็นโลหะซิงก์ ขั้วแคโทดที่ใช้วัสดุเป็น แมงกานีส (manganese-based materials) ปรัสเซียนบลู (prussian blue analogs) วานาเดียม (vanadium-based materials) และสารอินทรีย์ (organic cathodes) [5] โดยวัสดุที่นิยมใช้เป็นขั้วแคโทด คือ แมงกานีสไดออกไซด์ (manganese dioxide, MnO_2) เนื่องจากเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีปริมาณมากจึงมีต้นทุนต่ำ [7] ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาในแบตเตอรี่ซิงก์แมงกานีสไดออกไซด์ (Zn-MnO_2) แสดงดังรูปที่ 2.5 และในส่วนของแผ่นกั้นที่นิยมใช้ในซิงก์ไอออนแบตเตอรี่ได้แก่ กระดาษกรอง (filter paper) และ แผ่นเส้นใยแก้ว (glass fiber separator) เนื่องจากมีราคาถูก มีความขุ่นสูง แต่มีความยืดหยุ่นต่ำ [8] ทำให้มีเสถียรภาพทางกายภาพไม่เพียงพอ เกิดเสียรูปเมื่อไอออนเคลื่อนผ่านระหว่างการรับและคายประจุซ้ำ ๆ [5, 8] ดังนั้นการใช้แผ่นกั้นจากพอลิเมอร์จึงเป็นแนวทางที่ดีในการเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่



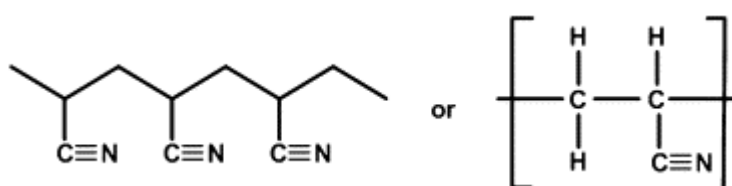
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในแบตเตอรี่ซิงก์แมงกานีสไดออกไซด์ [7]



2.7 พอลิอะคริโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile, PAN)

พอลิอะคริโลไนไตรล์มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสายโซ่พอลิเอทิลีนและมีพันธะไนไตรล์ แสดงดังรูปที่ 2.6 พอลิอะคริโลไนไตรล์ เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี มีความสามารถในการทนต่อสารเคมี และมีความสามารถในการนำ

ไอออนได้ดี ซึ่งในหลายงานวิจัยที่เลือกใช้พอลิอะคริโลไนไตรล์จะนิยมนำพอลิอะคริโลไนไตรล์ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) และเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (TPU) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลเนื่องจากพอลิอะคริโลไนไตรล์มีความเปราะสูง นอกจากนี้ยังมีรายงานการนำพอลิอะคริโลไนไตรล์ไปใช้งานในหลายรูปแบบ เช่น ในงานวิจัยของ Panda และ De [10] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมของพอลิอะคริโลไนไตรล์ และพอลิยูรีเทน สำหรับใช้เป็นเยื่อเลือกผ่าน และในงานวิจัยของ Liu และคณะ [11] พัฒนาแผ่นอิเล็กทรอนิกส์พินนิ่งจากพอลิอะคริโลไนไตรล์ พอลิยูรีเทน และพอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ เพื่อใช้เป็นแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

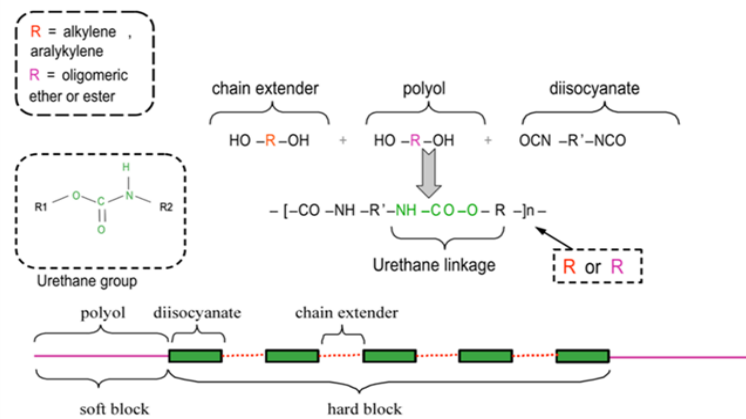


รูปที่ 2.6 โครงสร้างพอลิอะคริโลไนไตรล์ [9]

2.8 พอลิยูรีเทน (polyurethane, PU)

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารเคลือบผิววัสดุ นำไปผลิตเป็นโฟม ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนและใช้ในอุตสาหกรรมสี เป็นต้น ความพิเศษของพอลิยูรีเทน คือ สามารถผลิตได้จากสารตั้งต้นที่หลากหลายทำให้ผู้ผลิตสามารถกำหนดสมบัติของพอลิยูรีเทนได้

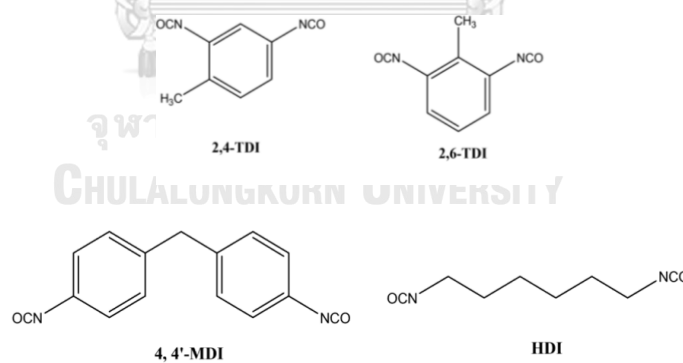
พอลิยูรีเทนเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานตกับพอลิโออล ทำให้พอลิยูรีเทนมีหมู่ฟังก์ชันเป็น (-NH-(C=O)-O-) นำไปสู่การเกิดบล็อกโคพอลิเมอร์แบบเส้นตรง ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแข็ง (hard segment) ที่เตรียมจากไอโซไซยานต (isocyanate) กับส่วนที่เป็นสายโซ่ต่อ (chain extender) แสดงสมบัติทางกายภาพทางด้านความแข็งแรง และส่วนอ่อน (soft segment) ที่เตรียมจากไดออลหรือพอลิโออล (polyol) แสดงสมบัติด้านความยืดหยุ่น ดังแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของพอลิยูรีเทน [12]

ไอโซไซยานเนต

ไอโซไซยานเนตที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน จะเป็นไอโซไซยานเนตที่มี 2 หมู่ฟังก์ชันในหนึ่งโมเลกุล ไดไอโซไซยานเนตมีลักษณะทางโครงสร้างเป็นพันธะคู่ 2 พันธะ ($\text{N}=\text{C}=\text{O}$) ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งแบบอะลิฟาติกและแบบวง เช่น ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานเนต (diphenylmethane diisocyanate, MDI) โทลูอีนไดไอโซไซยานเนต (toluene diisocyanate, TDI) และเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยานเนต (hexamethylene diisocyanate, HDI) เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างไดไอโซไซยานเนต

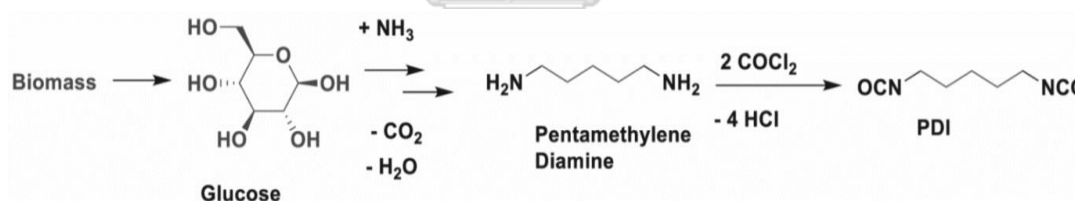
ไดไอโซไซยาเนตที่ได้จากทรัพยากรหมุนเวียน

1. ไดไอโซไซยาเนตจากกรดอะมิโน

ไลซีน เป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ เมทิลเอสเทอร์ไลซีนไดไอโซไซยาเนต (methyl esters of l-lysine diisocyanate, MELDI) หรือ เอทิลเอสเทอร์ไลซีนไดไอโซไซยาเนต (ethyl esters of l-lysine diisocyanate, EELDI) ไลซีนไดไอโซไซยาเนตมีโครงสร้างแบบอะลิฟาติกที่ไม่สมมาตรทำให้เมื่อนำไปสังเคราะห์จะได้พอลิยูรีเทนที่มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน นอกจากนี้ไดไอโซไซยาเนตฐานชีวภาพ (partilly bio-based diisocyanate, PBDI) สามารถสังเคราะห์ได้จาก ไลซีน เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต

2. ไดไอโซไซยาเนตจากน้ำตาล

เพนตะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตชีวภาพ (bio-based pentamethylene diisocyanate, PDI) คือ ไดไอโซไซยาเนตที่ผลิตได้จากชีวมวลโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.9 เพนตะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตชีวภาพมีชื่อทางการค้า คือ DESMODUR® eco N 7300 ภายใต้บริษัทโคเวสโตร



รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์เพนตะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตชีวภาพ [13]

3. ไดไอโซไซยาเนตจากฟูแรน

ฟูแรน เป็นสมาชิกของสารอินทรีย์ที่มีฮาโลเจน เช่น คลอรีนและโบรมีน มีชื่อเต็มว่า พอลิคลอริเนตไดเบนโซฟูแรน (polychlorinated dibenzo furans, PCDFs) ไดไอโซไซยาเนตจากฟูแรนได้รับการเตรียมจากเมทิลฟูโรเอต (methyl furoate) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนและมีการศึกษาจลนศาสตร์และผลการรวมตัวของฟูแรนที่มีผลต่อสมบัติของพอลิยูรีเทน พบว่า วงแหวนฟูแรนไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงกับพอลิยูรีเทน

4. ไดโอโซไซยานาเนตจากลิกนิน

ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติกธรรมชาติที่มีการนำมาใช้ในการสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพมากที่สุดชนิดหนึ่ง ซึ่งสารประกอบเคมีที่ได้จากลิกนินได้แก่ กรดวานิลลิก (vanillic acid) กรดซิงริงอิง (syringic acid) กรดเฟรุลิก (ferulic acid) ซิงริงกอล (syringol) กัวเอคอล (guaiacol) และยูจินอล (eugenol) โดยไดโอโซไซยานาเนตที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพคือ กรดวานิลลิก (vanillic acid) และกรดซิงริงอิง (syringic acid)

5. ไดโอโซไซยานาเนตจากสารสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์

สารสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เป็นสารน้ำมันที่ไม่สามารถบริโภคได้ อุตุสาหกรรมแปรรูปจึงนำมาสังเคราะห์เป็นอะโรมาติกไดฟังก์ชันนอลมอนอเมอร์ ไดโอโซไซยานาเนตที่ได้จากสารสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์จะมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับทุโลอินไดโอโซไซยานาเนต แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของไดโอโซไซยานาเนตจากสารสกัดเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ [13]

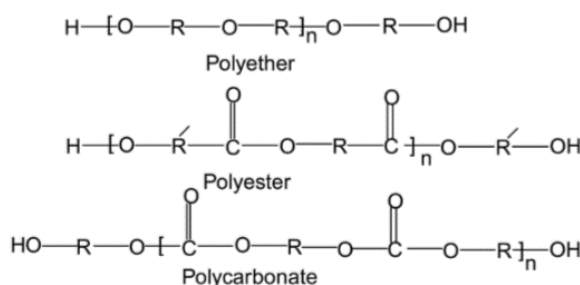
6. ไดโอโซไซยานาเนตจากฝัก

ไดโอโซไซยานาเนตจากฝักเป็นไดโอโซไซยานาเนตแบบอะลิฟาติก ในอุตสาหกรรมมีการนำไดโอโซไซยานาเนตประเภทนี้ไปเตรียมเป็นพอลิยูรีเทนที่ใช้ในงานเคลือบ ได้แก่ Tolonate X FLO 100 เป็นไดโอโซไซยานาเนตภายใต้บริษัทเวนคอเร็กซ์ที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน 25 เปอร์เซ็นต์และกรีนคาร์บอน 32 เปอร์เซ็นต์

พอลิออล

พอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ได้แก่ พอลิอีเทอร์ พอลิเอสเทอร์ และพอลิคาร์บอนเนต (โครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.11) โดยมีน้ำหนักโมเลกุลที่ใช้อยู่ในช่วง 2,000-10,000 กรัมต่อโมลและพอลิออลที่มีจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่ต่ำจะใช้ในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรี

เทน เช่น กลีเซอริน (มี 3 หมู่ฟังก์ชัน) ไดโพรพิลีนไกลคอล น้ำและซอบิทอล (มี 2 หมู่ฟังก์ชัน) ส่วนพอลิเอทิลีนที่มีจำนวนหมู่ฟังก์ชันสูงจะใช้ในการสังเคราะห์เทอร์โมเซตพอลิยูรีเทน



รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอเทอร์ พอลิเอสเทอร์ และพอลิคาร์บอเนต [14]

ในการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนนิยมใช้พอลิเอสเทอร์พอลิเอทิลีนทั้งแบบเส้นและแบบวงที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ พอลิยูรีเทนที่ใช้พอลิเอสเทอร์แบบวงเป็นพอลิเอทิลีนอะดิเปต (polybutylene adipate) พอลิเอทิลีนอะดิเปต (polyethylene adipate) พอลิบิวทิลีนซีบาเคต (polybutylene sebacate) และพอลิคาโพรแล็กโตน (polycaprolactone) เป็นต้น [14]

สายโซ่ต่อ

สายโซ่ต่อ (chain extender) จะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40-300 กรัมต่อโมล แบ่งเป็นสายโซ่ต่อที่ใช้หมู่ไฮดรอกซิลในการต่อและสายโซ่ที่ใช้หมู่เอมีนในการต่อ ซึ่งสายโซ่ต่อที่มีจำนวนหมู่ฟังก์ชันมากก็จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวาง สายโซ่ต่อจัดอยู่ในส่วนแข็งของพอลิยูรีเทนซึ่งจะมีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน การย่อยสลาย และสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัส และความทนแรงดึง

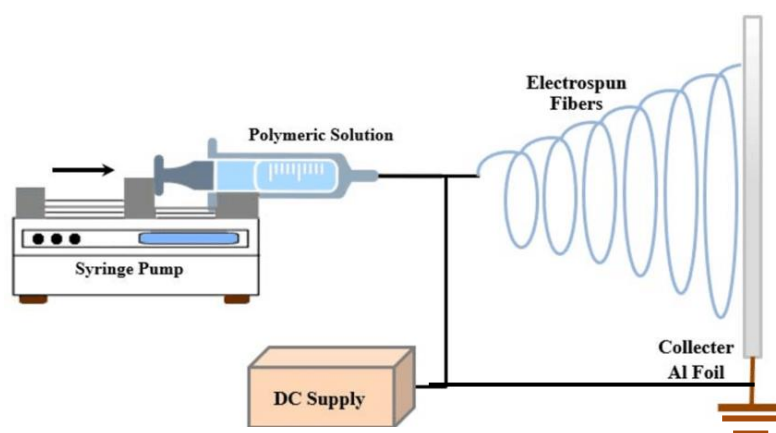
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่สังเคราะห์มาจาก ไดไฮโดรโซไซยานาเตตฐานเชิงชีวภาพกับพอลิคาโพรแล็กโตน (polycaprolactone, PCL) ไดออล ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้และมีไดออลชนิดเอทิลีนไกลคอลเป็นสายโซ่ต่อ เพื่อให้พอลิยูรีเทนที่ได้มีสมบัติเป็นพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้

กระบวนการขึ้นรูปแผ่นกั้นสามารถทำได้ด้วยหลายวิธี เช่น การขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม การฉีดพ่นหรือการปั่นเส้นใย แต่เพื่อให้แผ่นกั้นที่ได้มีลักษณะเป็นแบบนอนวูฟเวฟ ในงานวิจัยจึงเลือกใช้

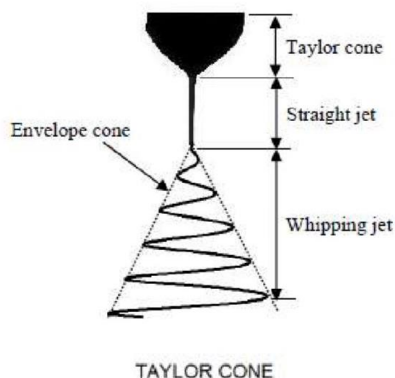
เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ได้ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร โดยใช้แรงจากไฟฟ้าสถิตในการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ ทำให้แผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักเบา มีพื้นที่ผิวมากและมีความเป็นรูพรุนสูง

2.9 หลักการทำงานของเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง

เทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง หรือ การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เข็มฉีดยาที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ เครื่องควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย และแผ่นเก็บตัวอย่าง โดยจะต่อขั้วประจุไฟฟ้าขั้วบวกเข้ากับปลายเข็มฉีดยาและต่อขั้วประจุไฟฟ้าขั้วลบเข้ากับสายดิน แสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเมื่อยังไม่ให้ศักย์ไฟฟ้ากับระบบสารละลายพอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็นหยดครึ่งทรงกลม แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสารละลายพอลิเมอร์จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดการสะสมของประจุที่ปลายเข็มฉีดยา ทำให้หยดสารละลายพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนรูปร่างจากรูปทรงครึ่งวงกลมเป็นรูปทรงกรวย โดยจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เทเลอร์โคโน (แสดงดังรูปที่ 2.13) และเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเกิดแรงผลักรันทางไฟฟ้ามากกว่าแรงตึงผิวสารละลายพอลิเมอร์จะเกิดเป็นลำเส้นใยขนาดเล็กที่พุ่งจากปลายเข็มไปยังแผ่นเก็บตัวอย่าง และในขณะเดียวกันภายในเส้นใยก็มีการผลักรันของประจุทำให้เกิดการสะสมประจุของเส้นใย เรียกว่า วิปปี้งเจ็ต ทำให้เกิดการระเหยของตัวทำละลาย เหลือไว้เพียงเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและมีความยาวต่อเนื่อง [15] บางครั้งเส้นใยที่ได้มีลักษณะบิดโค้งงอหรือบางครั้งก็อาจมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนพอลิเมอร์ หรือบิด (beads) เกาะอยู่ที่เส้นใย สิ่งเหล่านี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า อัตราการไหลของพอลิเมอร์ ระยะห่างระหว่างแผ่นเก็บตัวอย่างกับปลายเข็มฉีดยา หรือ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง [16]



รูปที่ 2.13 ลักษณะลำเส้นใยพอลิเมอร์ [17]

ตัวแปรที่มีผลต่อเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

1. ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์มีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย หากต้องการเส้นใยที่มีขนาดเล็กสามารถทำได้โดยการลดความเข้มข้นของสารละลายลง แต่หากสารละลายมีความเข้มข้นน้อยเกินไปจะทำให้เกิดการเกาะตัวของสารละลายพอลิเมอร์บนเส้นใย [18] และหากสารละลายพอลิเมอร์มีความเข้มข้นมากหรือมีความหนืดมากจนเกินไปก็จะทำให้ได้เส้นใยที่มีลักษณะบิดงอคล้ายริบบิ้น [19]

2. ความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีความสำคัญเพราะเส้นใยพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลกระทบโดยตรงกับลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิเมอร์ หากปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าน้อยเกินไปก็จะทำให้มีแนวโน้มการเกิดการเกาะตัวของสารละลายพอลิเมอร์บนเส้นใยในปริมาณมาก หรือในบางกรณีก็อาจจะไม่เกิดเป็นเส้นใยพอลิเมอร์เลย ในทางกลับกันหากเพิ่มปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มากขึ้นก็จะทำให้ได้เส้นใยพอลิเมอร์ที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ [20]

3. ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างมีผลต่อทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์และลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เส้นใยพอลิ

เมอร์ได้สัมผัสกับอากาศทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยจนเหลือเพียงเส้นใยที่แห้งไปติดอยู่ที่แผ่นเก็บตัวอย่าง ดังนั้นระยะห่างที่น้อยสุดที่ควรกำหนดจะต้องเป็นระยะที่ทำให้ตัวทำละลายระเหยหมดพอดี การกำหนดระยะห่างที่มากเกินไปจะทำให้เส้นใยไปไม่ถึงแผ่นเก็บตัวอย่างและได้เส้นใยที่บางและการกำหนดระยะห่างที่น้อยเกินไปก็มีโอกาสทำให้เกิดปิดบนเส้นใย

4. อัตราการไหลของสารละลาย

อัตราการไหลสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เมื่อให้อัตราการไหลที่สูงจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดใหญ่ หรือหากให้อัตราการไหลที่มากเกินไปจะทำให้ตัวทำละลายเกิดการระเหยไม่ทัน เส้นใยจะมีการเกาะตัวของสารละลายพอลิเมอร์ในปริมาณมาก [18]

5. น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะทำให้ได้เป็นลักษณะก้อนพอลิเมอร์เกาะอยู่บนแผ่นเก็บตัวอย่างเนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลต่ำจะมีสายโซ่ที่สั้นทำให้เมื่อพ่นสารละลายพอลิเมอร์ออกมาจะไม่เกิดการเกี่ยวพันกัน หรืออาจเกิดการเกี่ยวพันกันที่น้อยมาก ๆ ทำให้ได้เส้นใยพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นบางและสั้น [21]

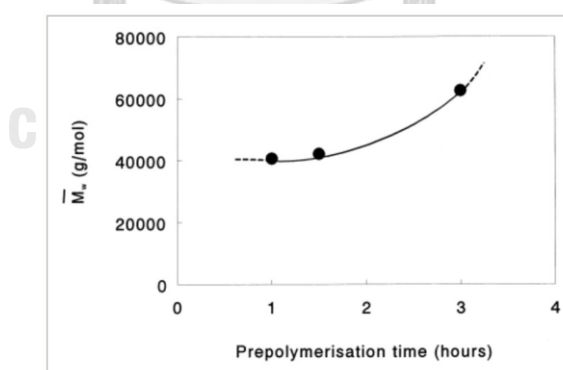
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Oh และคณะ [22] ศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิออลต่ออัตราส่วนของสายโซ่ต่อ ที่มีผลต่อสมบัติของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ โดยใช้สารตั้งต้นเป็นเฮกซะไดเมทิลไอโซไซยาเนต พอลิคาร์บอนเนตพอลิออลและสายโซ่ต่อชนิดไอโซซอร์ไบต์ โดยสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่อัตราส่วนของไดไอโซไซยาเนต: พอลิออล: สายโซ่ต่อ เป็น 10.1:5:5 10.1:6:4 10.1:7:3 10.1:8:2 โดยโมล ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราส่วน 10.1:5:5 โดยโมล เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ได้พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงที่สุดและมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ แสดงดังตารางที่ 2.1

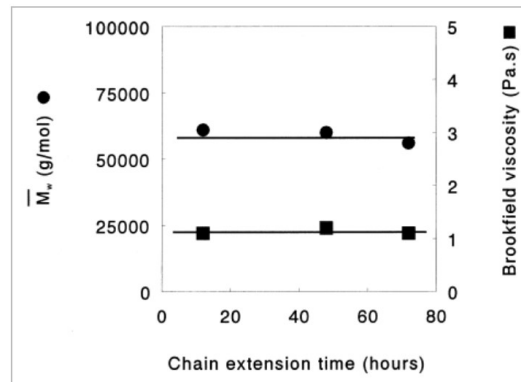
ตารางที่ 2.1 น้ำหนักโมเลกุลและมุมสัมพัทธ์ของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน	เฮกซะไดเมทิลไอโซไซยาเนต	ไอโซซอร์ไบต์	พอลิคาร์บอนเนตพอลิออล	น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล
1	10.1	5	5	196,300	1.56
2	10.1	6	4	163,400	1.68
3	10.1	7	3	121,000	1.55
4	10.1	8	2	106,786	1.90

Adsuar และคณะ [23] ศึกษาผลกระทบของเวลาในการเติมสายโซ่ต่อในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน โดยผสมไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนตกับพอลิคาโพรแล็กโทนไดออล ที่อัตราส่วน 1:2 โดยโมล ในเวลา 1 1.5 และ 3 ชั่วโมง ก่อนเติมสายโซ่ต่อบิวเทนไดออลและสังเคราะห์เป็นเวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง พบว่าช่วงเวลาการเติมสายโซ่ต่อ 3 ชั่วโมง ทำให้สังเคราะห์ได้พอลิยูรีเทนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุด (แสดงดังรูปที่ 2.14) จากนั้นจึงศึกษาระยะเวลาในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน คือ 12 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองทำให้สรุปได้ว่าระยะเวลาของการเกิดพรีพอลิเมอร์ไรเซชันมีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ และระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ที่เพิ่มมากขึ้นแต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์แสดงถึงปฏิกิริยาการเกิดเสร็จสิ้นแล้ว (แสดงดังรูปที่ 2.15)



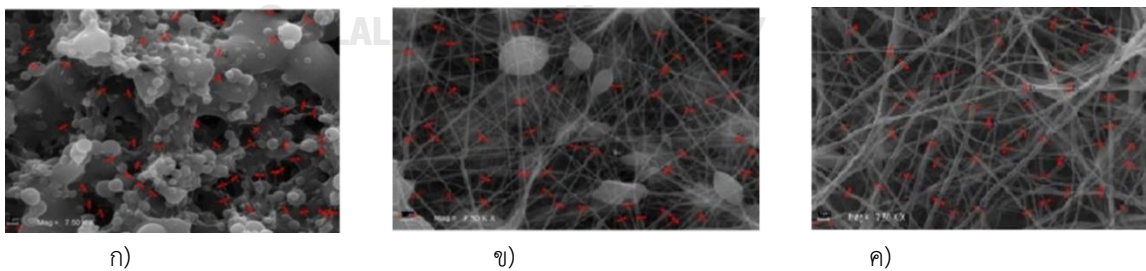
รูปที่ 2.14 ผลกระทบจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนต่อระยะเวลาในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพรีพอลิยูรีเทน [23]



รูปที่ 2.15 ผลกระทบจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนต่อระยะเวลาทั้งหมดในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิยูรีเทน [23]

Karakas และคณะ [24] ศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิยูรีเทน ได้แก่ ความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนในตัวทำละลายชนิดไดเมทิลฟอร์มาไรต์ ในช่วง 4-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ศึกษาความต่างศักย์ที่ให้แก่ระบบในช่วง 10-20 กิโลโวลต์ ศึกษาระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างในช่วง 12-20 เซนติเมตร โดยกำหนดอัตราการป้อนสารคงที่ที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง พบว่าที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 15 เซนติเมตร เป็นภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้เส้นใยพอลิยูรีเทนที่มีความต่อเนื่อง ไม่มีการเกาะตัวของสารละลายพอลิเมอร์บนเส้นใยหรือการโค้งงอของเส้นใยเกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.16

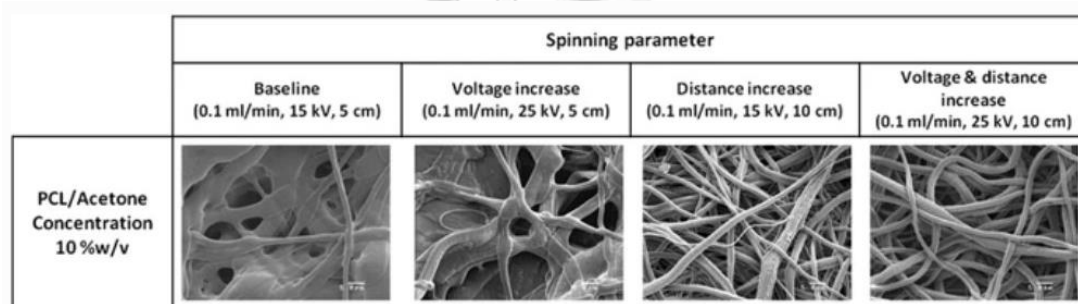
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.16 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิยูรีเทน

ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ มีระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างอยู่ที่ 15 เซนติเมตร ใช้อัตราการไหลที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ก) ความเข้มข้นของสารละลาย 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ข) ความเข้มข้นของสารละลาย 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค) ความเข้มข้นของสารละลาย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [24]

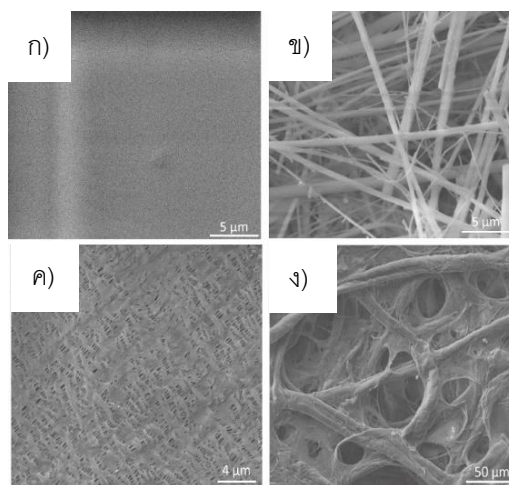
Bosworth และคณะ [25] ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง โดยใช้พอลิคาโพรลีนและใช้ตัวทำละลายอะซิโตน ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 และ 25 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 5 และ 10 เซนติเมตร ใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์อยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และใช้อัตราการไหลอยู่ที่ 0.1 มิลลิตรต่อนาที พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างที่ 5 เซนติเมตร ลักษณะเส้นใยที่ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ ติดทับกัน เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็น 25 กิโลโวลต์และใช้ระยะเป็น 10 เซนติเมตร จะได้เส้นใยที่มีความเรียบและมีความยาวต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 2.17 จึงกล่าวได้ว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างมีผลต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใยพอลิเมอร์



รูปที่ 2.17 ลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใยพอลิคาโพรลีน
ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น

[25]

Ghosh และคณะ [26] ศึกษาค่าการนำไอออนของแผ่นกั้นแต่ละชนิดในระบบแบตเตอรี่ซึ่งกั้นไอออน โดยมีสารละลายซิงก์ซัลเฟตเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งชนิดของแผ่นกั้นที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ nafion เส้นใยแก้ว celgard และกระดาษกรอง แสดงดังรูปที่ 2.18 พบว่า แผ่นกั้นมีค่าการนำไอออน เท่ากับ 2.6 2.8 0.1 และ 0.75 มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดสอบแสดงให้เห็น เส้นใยแก้วมีค่าการนำไอออนสูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลจากโครงสร้างของเส้นใยแก้วที่มีความเป็นรูพรุนสูง ทำให้มีค่าการเปียกที่ดีจึงมีค่าการนำไอออนสูง



รูปที่ 2.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นกั้น

ก) Nafion ข) เส้นใยแก้ว ค) Celgard ง) แผ่นกระดาษกรอง [26]

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการศึกษาปัจจัยที่ในการทดลองหลายปัจจัยและหลายระดับทำให้มีการใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการทากูซิมมาช่วยในการออกแบบการทดลองเพื่อช่วยกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทดลองด้วยจำนวนการทดลองที่น้อยที่สุด และการวิเคราะห์ผลความสัมพันธ์ด้วยวิธีเกรย์

2.11 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นการกำหนดเงื่อนไข เพื่อที่จะทำให้ทราบถึงสาเหตุ ปัจจัย (factor) หรือตัวแปร (input variable) ที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจหรือผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (output response) ซึ่งการออกแบบการทดลองจะใช้แนวคิดทางสถิติ เพื่อเป็นการช่วยลดตัวแปร ลดต้นทุนในกระบวนการผลิต ปัจจัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (controllable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ เป็นต้น
2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (uncontrollable factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ เช่น สภาพแวดล้อม ความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ เป็นต้น

ดังนั้น การออกแบบการทดลอง จึงเป็นการกำหนดเงื่อนไขที่แสดงค่าความแตกต่างของข้อมูลที่มีสาเหตุจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่านั้น เพื่อให้เกิดข้อมูลที่มีสาระมากที่สุดเพื่อใช้สำหรับการตัดสินใจ [27]

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (taguchi experimental design)

วิธีการออกแบบการทดลองของทากูชิเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก สำหรับการทดลองที่มีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากร โดย ดร.ทากูชิพยายามประยุกต์การออกแบบการทดลองให้ง่ายขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์โดยไม่ใช้การแจกแจงทางสถิติและตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน แต่ใช้ฟังก์ชันความสูญเสีย โดยวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือการทำให้อายุการใช้งานมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งผลการทดลองจะถูกแปลงให้เป็นค่าวัดที่พัฒนาขึ้นเอง คือ ค่าอัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio)

แผนการออกแบบการทดลองแบบทากูชิจะใช้การกำหนดตารางออร์โธโกนอลอาร์เรย์ (orthogonal array) จากจำนวนปัจจัยที่สนใจ และจำนวนระดับของปัจจัย ซึ่งตารางออร์โธโกนอลอาร์เรย์จะมี แนวนอนเป็นจำนวนระดับปัจจัยของการทดลองและแนวตั้งเป็นจำนวนปัจจัย โดยใช้สัญลักษณ์ L ตามด้วยตัวอักษรซึ่งบ่งบอกจำนวนการทดลอง [28] ดังตารางที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3

เช่น $L_{16}(3^4)$

L16 คือ จำนวนของการทดลอง 16 การทดลอง

3 คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดของตาราง 3 ปัจจัย

4 คือ ระดับปัจจัย 4 ระดับ

ตารางที่ 2.2 ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ (standard orthogonal array)

จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25
3	L4	L9	L16	L25
4	L8	L9	L16	L25
5	L8	L18	L16	L25

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างจำนวนของปัจจัยและระดับปัจจัยของอโรโกนอลอาร์เรย์

จำนวนปัจจัย	ระดับปัจจัย	การทดลองปกติใช้	การทดลองของทากูชิ
4	2	16 (2^4)	8 (L8)
3	4	64 (4^3)	16 (L16)

นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์ผลด้วยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (anovas) หรือ การวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากรโดยการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน (variance) เรียกว่า “analysis of variance “ หรือเรียกง่าย ๆ ว่า ANOVA ซึ่งนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการออกแบบด้วยวิธีทากูชิ เพื่อบอกถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติที่น่าสนใจมากที่สุด (% contribution) ดังแสดงการคำนวณในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากรโดยการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน

ระดับ (level)	จำนวนปัจจัย			
	1	2	3	4
1	X_i	X_i	X_i	X_i
2	X_i	X_i	X_i	X_i
3	X_i	X_i	X_i	X_i
ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย 1	ค่าเฉลี่ย 2	ค่าเฉลี่ย 3	ค่าเฉลี่ย 4
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{N_{X_i}}$			
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS_B)	SS_{B1}	SS_{B2}	SS_{B3}	SS_{B4}
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS_W)	SS_{W1}	SS_{W2}	SS_{W3}	SS_{W4}
ความแปรปรวน (varian)	V_1	V_2	V_3	V_4
P (%contribution)	P_1	P_2	P_3	P_4

โดยที่ i แทนด้วยข้อมูลปัจจัยที่ 1 2 3 และ 4

j แทนด้วยข้อมูลในคอลัมน์

$$SS_{Bi} = \text{Level} \sum (X_j - \bar{X})^2 \quad (2.1)$$

$$SS_{Wi} = \sum (X_j - \bar{X})^2 \quad (2.2)$$

$$V_i = SS_{Bi} / \text{Level} - 1 \quad (2.3)$$

$$P_i = (SS_{Bi} / \sum SS_{Bi}) \quad (2.4)$$

วิเคราะห์ผลการทดลองโดยการนำค่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองใส่ในตารางออโรโกนอลอาร์เรย์ และวิเคราะห์ผลออกมาในรูปของค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio)

อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (signal to noise ratio) [29] เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมกัน ระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาว่าค่าที่ได้จากการทดลองให้ผลตามเป้าหมายที่ต้องการหรือไม่ มีความมั่นคงต่อปัจจัยรบกวน (noise) ได้ดีเพียงใด ซึ่งการแสดงค่าของ S/N แบ่งได้เป็น 3 กรณีดังนี้

1. กรณีที่ต้องการค่าน้อยเป็นค่าที่ดีกว่า (smaller is better)

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N ของค่าเป้าหมายนั้น ๆ มีค่าเป็นศูนย์ คือ ค่าความต้องการของผลการทดลองมีค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log (1/R \sum_{f=1}^R y_i^2) \quad (2.5)$$

2. กรณีที่ต้องการค่าตามความต้องการเป็นค่าที่ดีที่สุด (nominal is best)

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N นั้น ให้ค่าเป้าหมาย คือค่าที่ดีที่สุดและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อค่านั้นเป็นค่าเป้าหมาย

$$\left(\frac{S}{N_T}\right) = 10 \log \left(\frac{y^2}{s^2}\right) \quad (2.6)$$

3. กรณีที่ต้องการค่ามากเป็นค่าที่ดีกว่า (larger is better)

เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N เป้าหมาย คือ ค่าสูงสุดของค่าที่ต้องการหรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่ามากที่สุด

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10\log (1/R \sum_{f=1}^R 1/y_i^2) \quad (2.7)$$

จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ สามารถนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของแผ่นกั้น ด้วยสมการการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเกรย์

2.12 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเกรย์

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีเกรย์เป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ศึกษาเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่มีต่อสมบัติของแผ่นกั้น ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการทากูชิ [30]

การพิจารณาสมบัติของแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ หากต้องการค่าน้อยดี คำนวณจากสมการ (2.8)

$$X_{ij} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (2.8)$$

และหากต้องการค่ามากที่สุด คำนวณจากสมการ (2.9)

$$X_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij})}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (2.9)$$

เมื่อ X_i คือ ค่าหลังจากการทดสอบเบื้องต้นของเกรย์

โดย i คือ การทดลอง j คือ การตอบสนอง

$\min y_{ij}$ คือ ค่าที่น้อยที่สุดของ y_{ij} สำหรับการตอบสนอง j^{th}

$\max y_{ij}$ คือ ค่าที่มากที่สุดของ y_{ij} สำหรับการตอบสนอง j^{th}

จากการคำนวณในสมการ (2.8) กับสมการ (2.9) ข้อมูลจะถูกเทียบกับลำดับต้นฉบับและถูกแปลงให้เป็นค่ามาตรฐานอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ถ้า X_{ij} ใดๆมีค่าเท่ากับ 1 หรือใกล้เคียง 1 มากกว่าค่าอื่นในการทดลองจะถือว่าการทดลองที่ i นั้นดีที่สุดสำหรับการตอบสนองที่ j และสำหรับลำดับอ้างอิง X_0 ถูกกำหนดให้เป็น $(X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0j}, \dots, X_{0n}) = (1, 1, \dots, 1, \dots, 1)$ เมื่อ X_{0j} เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการตอบสนองที่ลำดับ j จากนั้นจึงทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แบบเกรย์ (grey relational coefficient) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (X_{ij}) กับผลตอบสนองอ้างอิง (X_{0j}) โดยหาได้จากสมการ (2.10)

$$\gamma(X_{0j}, X_{ij}) = \frac{(\Delta_{min} - \xi \Delta_{max})}{(\Delta_{ij} + \xi \Delta_{max})} \quad (2.10)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, m$ และ $j = 1, 2, \dots, n$

เมื่อ

$\gamma(X_{0j}, X_{ij})$ คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองที่ j^{th}

ξ คือ สัมประสิทธิ์ความแตกต่าง (distinguishing coefficient) มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1

โดยค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.11)

$$\Gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(X_{0j}, X_{ij}) \quad (2.11)$$

เมื่อ $i = 1, 2, \dots, m$

$\Gamma(X_0, X_i)$ คือ ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ระหว่างลำดับเปรียบเทียบ X_i และลำดับ

อ้างอิง X_0 ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนอง X_i

จำนวน n การทดลอง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Arifeen และคณะ [30] เพิ่มประสิทธิภาพของความเป็นรูปพรุนและความต้านทานแรงดึงของแผ่นกั้นเส้นใยนาโนพอลิเอคริไลไนไตรล์ เนื่องจากการอบแห้งและแรงอัดความร้อนที่ให้แก่แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ป็นมีผลต่อความเป็นรูปพรุนและความต้านทานแรงดึงของแผ่นเส้นใย งานวิจัยนี้จึงใช้ทฤษฎีของทากูชิในการออกแบบการทดลอง โดยมีจำนวนปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาอบแห้ง แรงดันอัดความร้อน อุณหภูมิความร้อน และเวลาการอัดความร้อน จึงมีการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ในงานวิจัยนี้ต้องการให้ได้ความเป็นรูปพรุนและความต้านทานแรงดึงของเส้นใยที่สูงที่สุดทั้งคู่ จึงเลือกแสดงค่า S/N เป็นแบบค่ามากเป็นค่าที่ดี (larger is better) จากนั้นเลือกใช้กระบวนการ ANOVA ในการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นรูปพรุนและความต้านทานแรงดึงมากที่สุด คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและแรงดันอัดความร้อน ผู้วิจัยจึงใช้ F-test ด้วยโปรแกรม minitab ในการออกแบบการทดลองและทำนายค่าความเป็นรูปพรุนและความทนแรงดึง โดยมีทั้งหมด 3 การทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการเป็นแผ่นกั้นที่ดีนอกจากความเป็นรูปพรุนและความต้านทานแรงดึงที่สูงแล้ว ค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์ ค่าความจุ และค่า

การนำไอออน ก็เป็นอีกปัจจัยที่จะต้องนำมาพิจารณาเช่นกัน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าค่าความเป็นรูพรุนและความทนแรงดึงที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนาย แสดงดังตารางที่ 2.5 และชุดการทดลองที่ 2 เป็นชุดการทดลองที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้แผ่นกั้นที่ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงสรุปว่าวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติเป็นวิธีการที่ทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นรูพรุนและความทนแรงดึงที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.5 ค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองของค่าความเป็นรูพรุนและความทนแรงดึง

การทดลอง	ค่าความเป็นรูพรุน (เปอร์เซ็นต์)		ความทนแรงดึง (เมกะปาสกาล, MPa)	
	ค่าทำนาย	ค่าการทดลอง	ค่าทำนาย	ค่าการทดลอง
ชุดที่ 1	56.06	56.75	35.18	36.21
ชุดที่ 2	60.06	60.80	31.14	32.66
ชุดที่ 3	68.61	67.26	19.83	20.62

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพโดยใช้พอล리카โพรแล็กโทนไดออล ไดไอโซไซยาเนตฐานชีวภาพ และเอทิลีนไกลคอล ผสมพอลิอะคริโลไนไตรล์นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่งเพื่อใช้เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออน

3.1 วัสดุุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ไดไอโซไซยาเนตเชิงชีวภาพ (partially bio-based diisocyanate, PBDI) ชื่อทางการค้า Tolonate™ X FLO 100 บริษัท Vencorex ประเทศฝรั่งเศส
- 3.1.2 พอล리카โพรแล็กโทนไดออล (polycaprolactone diol, PCL) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก 2000 กรัม/โมล บริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.3 เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) บริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.4 พอลิอะคริโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก 150,000 กรัม/โมล บริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.5 ไดบิวทิลทินไดลอเรต (dibutyltin dilaurate, DBTDL) บริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.6 ไดเมทิลฟอร์มามิด (dimethylformamide, DMF) บริษัท RCI Labscan
- 3.1.7 ก๊าซไนโตรเจน เกรดทางการค้า บริษัท Bangkok Industrial Gas
- 3.1.8 แผ่นอะลูมิเนียม (aluminum foil) ยี่ห้อ Diamond
- 3.1.9 แผ่นเส้นใยแก้ว (glass microfiber filters) เกรด GF/D บริษัท Whatman
- 3.1.10 ซิงก์ไตรฟลูออโรเมทาเนสัลโฟเนต (zinc trifluoromethanesulfonate, $C_2F_6O_6S_2Zn$) บริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.11 แผ่นสังกะสี (zinc foil) ขนาด 0.05 มิลลิเมตร เกรดวิเคราะห์ บริษัท Shandong AME Energy

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) บริษัท Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet 6700
- 3.2.2 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของสาร (gel permeation chromatography, GPC) บริษัท Alliance รุ่น Waters e2695 separations modules

- 3.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) บริษัท Hitachi รุ่น SU-4800
- 3.2.4 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine, UTM) บริษัท Tinius Olsen รุ่น 5ST
- 3.2.5 กล้องจุลทรรศน์แบบคอนโฟคอล (confocal microscopy) บริษัท Olympus รุ่น LEXT OLS5000
- 3.2.6 เครื่องวัดอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) บริษัท Palmsens รุ่น Palmsens4
- 3.2.7 ตู้อบ (hot air oven) บริษัท Binder รุ่น VD115
- 3.2.8 เครื่องชั่งดิจิทัลทอลทศนิยมสี่ตำแหน่ง (analytical balance) บริษัท Mettler Toledo รุ่น AB135-S/FACT
- 3.2.9 เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) บริษัท GT SONIC
- 3.2.10 เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (hot plate stirrer) บริษัท IKA รุ่น C-MAG HS 7

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยประกอบด้วยการทำงาน 3 ขั้นตอนซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

ส่วนที่ 1 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพ

ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ได้แก่ ระยะเวลาในการเติมสายโซ่และระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ โดยพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ได้จะถูกพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค FTIR และวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC

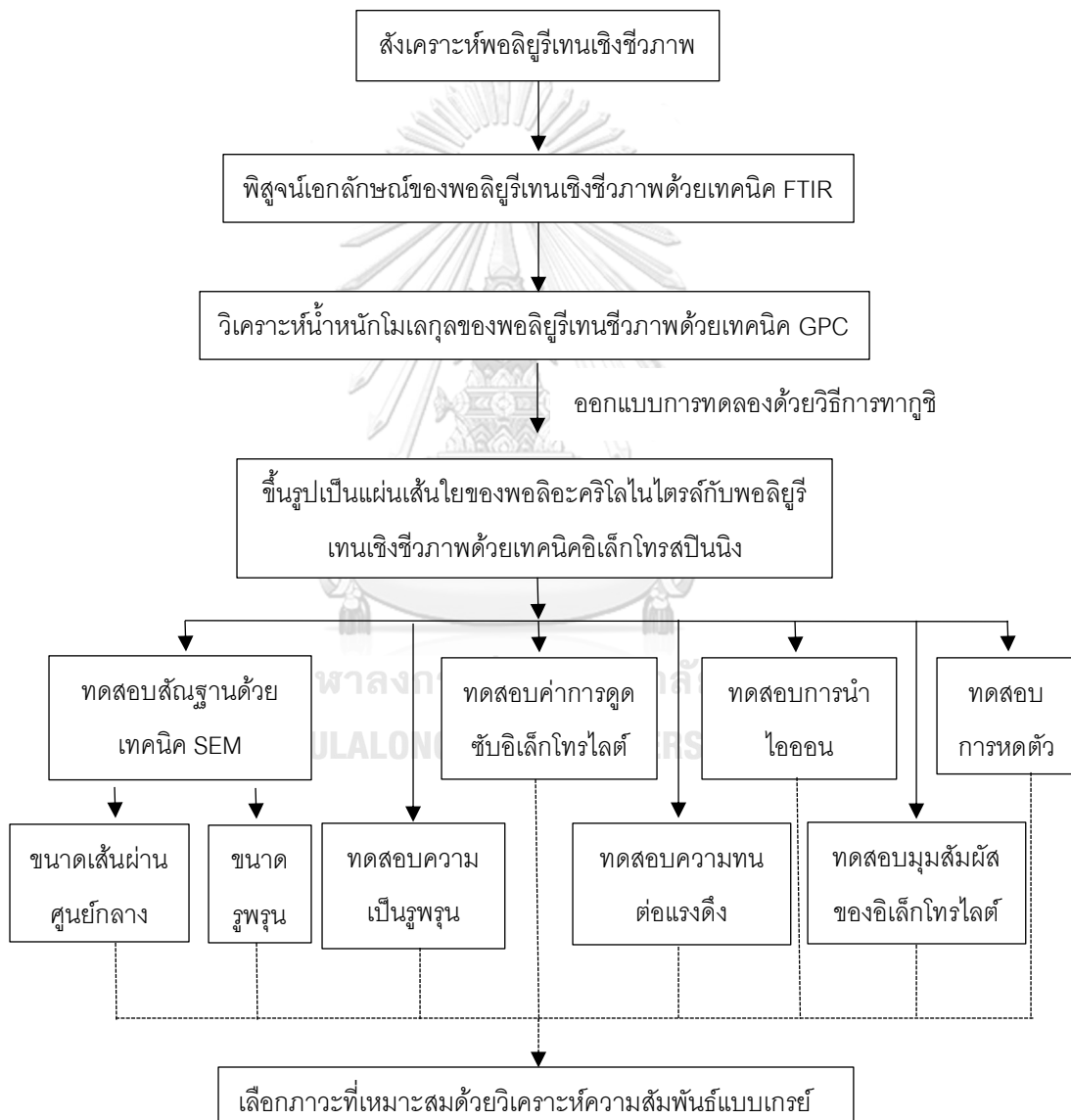
ส่วนที่ 2 การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยพอลิอะคริลาไมด์ร่วมกับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ โดยการตรวจสอบลักษณะทางพื้นฐานวิทยาของเส้นใยด้วยเทคนิค SEM ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบและระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ

ส่วนที่ 3 การเตรียมแผ่นกั้น

การเตรียมแผ่นเส้นใยเป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ ศึกษาสมบัติของแผ่นกั้น ได้แก่ ขนาดเส้นใย ขนาดรูพรุน ความเป็นรูพรุน ค่าการดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ ความทนแรงดึง ค่าการนำไอออน ค่ามัมสัมพัทธ์ของอิเล็กโทรไลต์และการหดตัวของแผ่นเส้นใย

ดังนั้นการดำเนินการวิจัยข้างต้นแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนงานวิจัยการเตรียมแผ่นกั้นของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพเตรียมจากไดไอโซไซยาเนตฐานชีวภาพ พอลิคาโพรแล็กโทนไดออล และเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วน 2.1:1:1 โดยละลายพอลิคาโพรแล็กโทนไดออลในตัวทำละลายไดเมทิลฟอร์มามิเด จากนั้นเติมไดไอโซไซยาเนตฐานชีวภาพและหยดตัวเร่งปฏิกิริยาไดบิวทิลทินไดออลเรท (DBTDL) จำนวนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักของสารละลายจากนั้นเทสารละลายทั้งหมดลงในขวดก้นกลมสามคอ ควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศไนโตรเจน กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมงจึงเติมเอทิลีนไกลคอลและสังเคราะห์ต่อเป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของช่วงเวลาในการเติมเอทิลีนไกลคอล จากนั้นทำให้บริสุทธิ์ นำไปอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเก็บพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพไว้ในเครื่องดูดความชื้น

3.4.2 กระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง

เตรียมสารละลายด้วยการผสมพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่อัตราส่วน 75:25 นำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก ให้ความต่างศักย์แก่ระบบตั้งแต่ 15-30 กิโลโวลต์ ใช้ระยะห่างจากปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างตั้งแต่ 15-25 เซนติเมตรและใช้อัตราการไหลสารละลายอยู่ที่ 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

3.4.3 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ต้องการศึกษา

เพื่อศึกษาปัจจัยในการผลิตแผ่นเส้นใยอิเล็กโตรสปินนิงที่มีผลต่อสมบัติการเป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออน จึงเลือกวิธีการทางสถิติในการออกแบบการทดลองโดยกำหนดปัจจัยที่ต้องการศึกษามีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง ซึ่งแต่ละปัจจัยศึกษาปัจจัยละ 4 ระดับ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4
ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	8	10	12	14
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	19	21	23	25
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บ ตัวอย่าง (เซนติเมตร)	16	18	20	22

ตารางที่ 3.1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ศึกษาโดยมี 3 ปัจจัย 4 ระดับ หากเปรียบเทียบการทดลองแบบ full factorial design จะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น $4^3 = 64$ การทดลอง ซึ่งด้วยระยะเวลาและวัตถุดิบที่จำกัด วิธีของทากูชิจะช่วยลดจำนวนครั้งในการทดลองอย่างมีประสิทธิภาพโดยวิธีของทากูชิที่ 3 ปัจจัย 4 ระดับ จะทำการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง โดยคำนวณจากตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ

ตารางที่ 3.2 ตารางมาตรฐานของวิธีการทากูชิ

จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25
3	L4	L9	L16	L25
4	L8	L9	L16	L25
5	L8	L18	L16	L25

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองโดยวิธีการทาทุชิ

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง		
	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปลายเข็ม ฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)
1	8	19	16
2	8	21	18
3	8	23	20
4	8	25	22
5	10	19	18
6	10	21	16
7	10	23	22
8	10	25	20
9	12	19	20
10	12	21	22
11	12	23	16
12	12	25	18
13	14	19	22
14	14	21	20
15	14	23	18
16	14	25	16

3.3.4 กระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่

นำแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีนตัดเป็นรูปร่างกลมตามขนาดมาตรฐานของแบตเตอรี่แบบกระดุม CR2032 โดยขึ้นเซลล์แบตเตอรี่แบบครึ่งเซลล์ประกอบด้วย ขั้วบวก-ขั้วลบเป็น ซิงค์ (Zn) และสารอิเล็กโทรไลต์ซิงค์ไตรฟลูออโรมีเทนซัลโฟเนต ($C_2F_6O_6S_2Zn$) ความเข้มข้น 1 โมลาร์

3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์และการทดสอบสมบัติ

3.5.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพทำด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) โดยการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ โดยการใช้โหมด ATR ที่ความยาวคลื่น 400-4000 เซนติเมตร⁻¹

3.5.2 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพด้วยเทคนิค Gel permeation chromatography (GPC) โดยใช้เตตระไฮโดรฟูราน (Tetrahydrofuran, THF) เป็นตัวทำละลายให้อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ฉีดสารปริมาณ 100 ไมโครลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า เพื่อศึกษาลักษณะของเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่อง ไม่มีเม็ดปิดและไม่มีการคดงอของเส้นใยพอลิเมอร์

3.5.4 การทดสอบความเป็นรูพรุน

การทดสอบความเป็นรูพรุนของแผ่นอิเล็กโทรสปีน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของแผ่นอิเล็กโทรสปีนที่แช่ด้วยสารละลายบิวทานอลเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร คำนวนจากสมการที่ 3.1

$$\text{ความเป็นรูพรุน (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของแผ่นอิเล็กโทรสปีนที่เปียก} - \text{น้ำหนักของแผ่นอิเล็กโทรสปีนที่แห้ง}}{\text{ความหนาแน่นของบิวทานอล} \times \text{ปริมาตรเต็มของแผ่นอิเล็กโทรสปีนแห้ง}} \times 100\% \quad (3.1)$$

3.5.5 การทดสอบความสามารถในการดูดซับอิเล็กโทรไลต์

การทดสอบความสามารถในการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของแผ่นกั้นที่เปลี่ยนไปเมื่อแช่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร คำนวนจากสมการ 3.2 โดยดัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D570 ซึ่งเป็นมาตรฐานการดูดซับของเหลว

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักของแผ่นกั้นที่เปียก} - \text{น้ำหนักของแผ่นกั้นที่แห้ง})}{\text{น้ำหนักของแผ่นกั้นที่แห้ง}} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.5.6 การทดสอบด้านแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D882 ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 1x6 เซนติเมตร ความหนา 25 ไมโครเมตร ชิ้นงานจะถูกทดสอบในแนวตั้ง ระยะห่างพิคัด 50 มิลลิเมตร ใช้อัตราเร็วที่ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ย

3.5.7 การทดสอบความสามารถในการนำไอออน

การทดสอบค่าการนำไอออนด้วยเทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) ใช้กระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 1 เฮิรตซ์ แรงดันไฟฟ้า 10 มิลลิโวลต์ ทดสอบโดยใช้แบตเตอรี่แบบเซลล์กระดุม (CR2032) โดยจะทำการแช่แผ่นอิเล็กโทรสปีนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงในสารอิเล็กโทรไลต์ก่อนประกอบเป็นแผ่นกั้นในเซลล์แบตเตอรี่ คำนวณค่าจากสมการ 3.3

$$\text{ค่าการนำไอออน (ซีเมนต์/เซนติเมตร)} = \frac{\text{ความหนา}}{\text{ความต้านทานภายใน (bulk resistance)} \times \text{พื้นที่หน้าตัด}} \quad (3.3)$$

3.5.8 การวัดมุมสัมผัส

ความสามารถในการเปียกของแผ่นกั้นต่อสารอิเล็กโทรไลต์ สามารถทดสอบด้วยการวัดค่ามุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดของอิเล็กโทรไลต์กับแผ่นกั้น โดยหยด 5 วินาทีจึงถ่ายรูป

3.5.9 การทดสอบการหดตัวด้วยความร้อน

การทดสอบการหดตัว (thermal shrinkage) ของแผ่นอิเล็กโทรสปีนสามารถทดสอบด้วยการให้ความร้อนแผ่นอิเล็กโทรสปีนที่อุณหภูมิ 90 – 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและทำการวัดขนาดของแผ่นอิเล็กโทรสปีนที่เปลี่ยนไปจากสมการที่ 3.4

$$\text{การหดตัว (\%)} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของแผ่นอิเล็กโทรสปีนเริ่มต้น} - \text{พื้นที่หน้าตัดของแผ่นอิเล็กโทรสปีนสุดท้าย}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของแผ่นอิเล็กโทรสปีนเริ่มต้น}} \times 100\% \quad (3.4)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพ

4.1.1 ระยะเวลาการเกิดพรีพอลิเมอร์ของพอลิยูรีเทนชีวภาพ

จากการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อที่มีต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่สังเคราะห์ได้ ที่แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อที่ 0 ชั่วโมง (เติมสายโซ่ต่อพร้อมกับการเติมไดไอโซไซยานาตและพอลิออล) จะได้พอลิยูรีเทนชีวภาพที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก เท่ากับ 8,500 กรัม/โมล เมื่อเติมสายโซ่ต่อที่ระยะเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่าพอลิยูรีเทนชีวภาพมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักเท่ากับ 9,200 และ 10,000 กรัม/โมล ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพทั้งหมด 12 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อมากขึ้นด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Adsuar และคณะ [23] ที่ศึกษาผลกระทบของเวลาในการเติมสายโซ่ต่อในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ควบคู่กับการทดสอบความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) โดยผสมไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานาตกับพอลิคาโพรแล็กโทนไดออล ที่อัตราส่วน 1:2 โดยโมล ในเวลา 1 1.5 และ 3 ชั่วโมง ก่อนเติมสายโซ่ต่อบิวเทนไดออลและสังเคราะห์ทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง พบว่าช่วงเวลาการเติมสายโซ่ต่อ 1 และ 1.5 ชั่วโมง ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยใกล้เคียงกันแต่ที่เวลาการเติมสายโซ่ต่อ 3 ชั่วโมงได้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่เวลาการเติมสายโซ่ต่อที่ 3 ชั่วโมง แสดงถึงการเกิดการเชื่อมพันธะของไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยานาตกับพอลิคาโพรแล็กโทนไดออล ซึ่งผลจากการศึกษาระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อพบว่าระยะเวลาการเติมสายโซ่ต่อที่ 4 ชั่วโมง พอลิยูรีเทนชีวภาพมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยมากกว่าที่ระยะเวลาการเติมสายโซ่ต่อที่ 0 และ 2 ชั่วโมงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงการเกิดการเชื่อมพันธะของไดไอโซไซยานาตและพอลิออลดังนั้นที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมงจึงเป็นระยะเวลาที่ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนชีวภาพสูงที่สุด

ตารางที่ 4. 1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่ระยะเวลาการเติมสายโซ่ต่อต่างกัน

ระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (กรัม/โมล)	ดิสเพอร์ซิตี (Đ)
0	12	8,500	2.1
2	12	9,200	2.2
4	12	10,000	2.4

4.1.2 ผลกระทบของระยะเวลาทั้งหมดในการสังเคราะห์ที่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

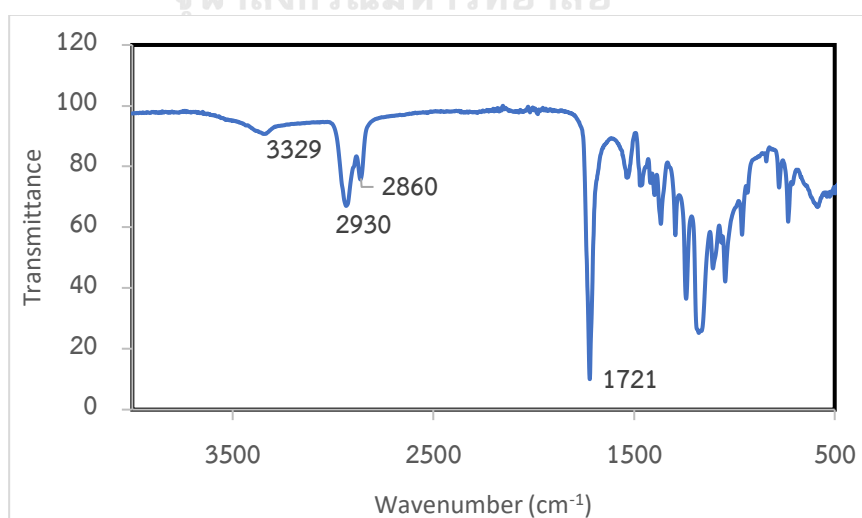
จากการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อในการทดลองที่ 4.1.1 พบว่าที่เวลา 4 ชั่วโมงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการเติมสายโซ่ต่อ ดังนั้นในการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่อน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงใช้ระยะเวลาในการเติมสายโซ่ต่อที่ 4 ชั่วโมงและใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชีวภาพ 4 12 24 และ 100 ชั่วโมง (แสดงดังตารางที่ 4.2) พบว่าพอลิยูรีเทนชีวภาพมีน้ำหนักโมเลกุล 7,600 10,000 20,000 และ 28,000 กรัม/โมล ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการเกิดการเชื่อมพันธะของไดไฮดรอกซีเฮกซานไดออล พอลิเอทิลีนไกลคอลและสายโซ่ต่อเป็นพอลิยูรีเทนชีวภาพที่มีสายโซ่ยาวขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิยูรีเทนชีวภาพที่สังเคราะห์ได้มีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 2.3 2.4 2.2 และ 2.1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความลดลงเมื่อระยะเวลาในการสังเคราะห์มากขึ้น แสดงถึงสายโซ่พอลิยูรีเทนชีวภาพที่เกิดขึ้นมีขนาดสายโซ่ที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการสังเคราะห์มากขึ้น ทั้งนี้จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสังเคราะห์จนถึง 100 ชั่วโมง แต่น้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนชีวภาพเพิ่มขึ้นเพียง 8,000 กรัม/โมล เมื่อเปรียบเทียบกับใช้เวลาในการสังเคราะห์ 24 ชั่วโมง จากงานวิจัยของ Mi และคณะ [31] ที่สังเคราะห์พอลิยูรีเทนโดยใช้พอลิคาโพรแล็กโตนไดออล สายโซ่ต่อบิวเทนไดออล และใช้ไดบิวทิลทินไดลอเรทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นภาวะที่ใกล้เคียงกับการทดลองของผู้วิจัย แต่ใช้หมู่ไดไฮดรอกซีเฮกซานไดออลเป็น เฮกซะเมทิลีนไดไฮดรอกซีเฮกซานไดออล ใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 6 ชั่วโมงพบว่าพอลิยูรีเทนมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ที่ 62,000 กรัมต่อโมล แสดงว่าหมู่ไดไฮดรอกซีเฮกซานไดออลมีผลต่อระยะเวลาการเกิดพอลิยูรีเทน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเป็นไดไฮดรอกซีเฮกซานไดออลเชิงชีวภาพที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและมีโครงสร้างใหญ่จึงเป็นข้อจำกัดทำให้มีการเกิดปฏิกิริยาต่ำ [33]

ตารางที่ 4. 2 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่ระยะเวลาในการสังเคราะห์ต่างกัน

ระยะเวลาในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาในการ เติมสายโซ่ต่อ (ชั่วโมง)	น้ำหนักโมเลกุล เฉลี่ยโดยน้ำหนัก (กรัม/โมล)	ดิสเพอร์ซิตี (Θ)
4	4	7,600	2.3
12	4	10,000	2.4
24	4	20,000	2.2
100	4	28,000	2.1

4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทนชีวภาพที่ได้จากการสังเคราะห์

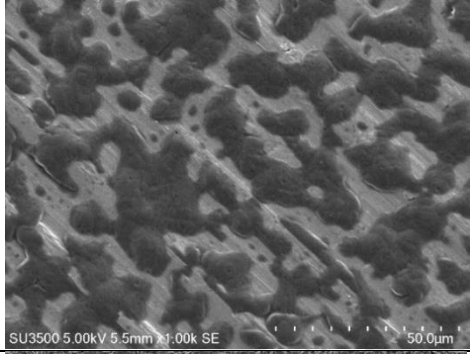
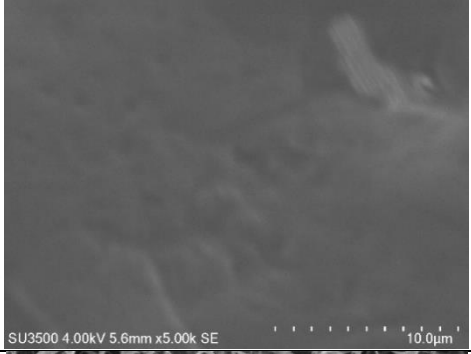
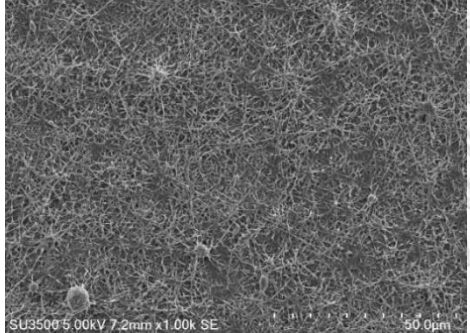
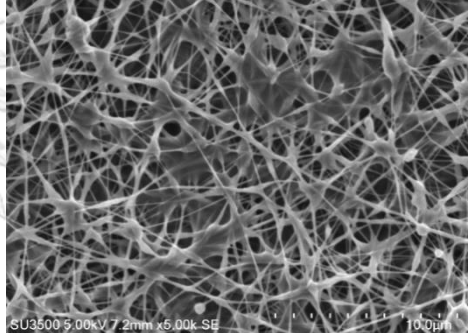
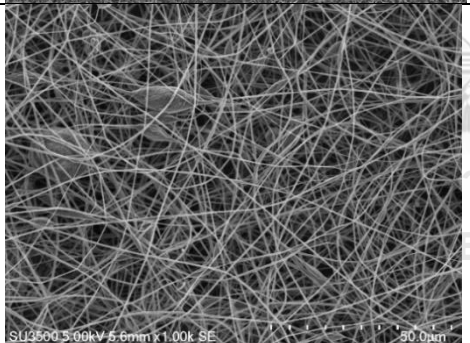
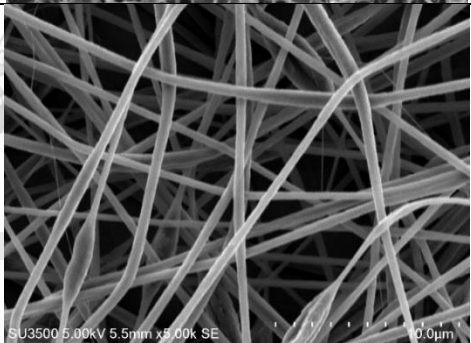
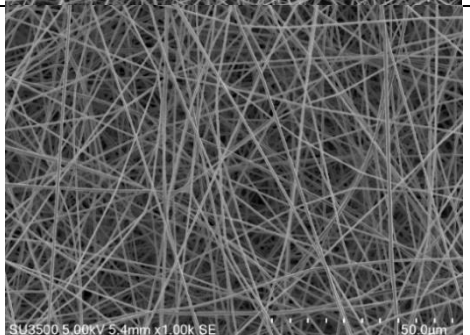
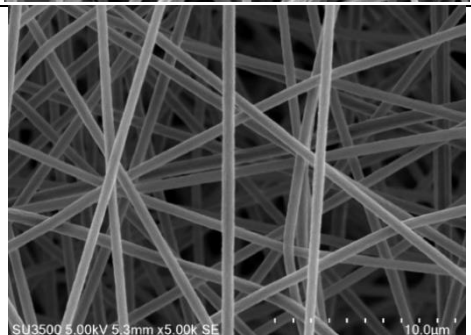
จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิยูรีเทนชีวภาพด้วยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.1 พบว่า แถบสเปกตรัมที่ 3329 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของหมู่ -NH ที่ติดกับคาร์บอนิลในเอไมด์จากส่วนของไอโซไซยาเนต แถบสเปกตรัมที่ 2930-2860 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของแบบยืดของ -CH₂ ในส่วนของพอลิโออล แถบสเปกตรัมที่ 1721 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นแบบยืดหยุ่นของหมู่คาร์บอนิล -C=O ในสารประกอบเอไมด์ และเส้นสเปกตรัมในรูปที่ 4.1 นี้ไม่พบแถบสเปกตรัมที่ 2260 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นแถบการสั่นของหมู่ NCO ที่มีอยู่ในไอโซไซยาเนต ซึ่งการหายไปของแถบสเปกตรัมของหมู่ NCO นี้ แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิยูรีเทนโดยไม่มีไอโซไซยาเนตเหลืออยู่ในสารผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

4.2 อัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่มีผลกระทบต่อลักษณะทาง สัณฐานวิทยาของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์

ผลการศึกษาอัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพต่อการขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์ที่ภาวะเดียวกัน (ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 23 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร) แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ 0:100 สารที่อยู่บนแผ่นเก็บตัวอย่างมีลักษณะเป็นเพียงละอองของสารละลายไม่ปรากฏลักษณะที่เป็นเส้นใย เมื่อเพิ่มกำลังขยายจะเห็นว่าละอองของสารมีลักษณะเป็นฟิล์มเนื้อแน่น ที่ไม่มีรูพรุน ต่อมาอัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ 25:75 สารที่อยู่บนแผ่นเก็บตัวอย่างมีลักษณะเป็นเส้นใยขนาดเล็ก เป็นเส้นบาง ระหว่างเส้นใยมีปิดจำนวนมากและมีลักษณะเป็นแพเชื่อมติดกัน สำหรับอัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ 50:50 เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 5000 เท่า แสดงถึงขนาดของเส้นใยที่มีขนาดใกล้เคียงกัน มีความยาวต่อเนื่อง แต่ยังคงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่สม่ำเสมอทั้งเส้น ยังมีปิดขนาดใหญ่ซึ่งจะเห็นจำนวนปิดได้ชัดในภาพที่กำลังขยาย 1000 เท่า ในอัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ 75:25 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงสม่ำเสมอทั้งเส้น มีความยาวต่อเนื่องและไม่พบปิดบนแผ่นเส้นใย ดังนั้น เพื่อเป็นการลดความไม่แน่นอนที่อาจเกิดกับผลการทดลองที่มีสาเหตุมาจากขนาดของเส้นใย เส้นใยที่มีขนาดสม่ำเสมอ มีความยาวต่อเนื่องและไม่เกิดปิด ที่ได้จากอัตราส่วน 75:25 จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการศึกษาต่อไป

อัตราส่วน พอลิอะคริโลไน ไตรล์ต่อพอลิยูรี เทนเชิงชีวภาพ	กำลังขยาย	
	1000 เท่า	5000 เท่า
0:100	 SU3500 5.00kV 5.5mm x1.00k SE 50.0µm	 SU3500 4.00kV 5.6mm x5.00k SE 10.0µm
25:75	 SU3500 5.00kV 7.2mm x1.00k SE 50.0µm	 SU3500 5.00kV 7.2mm x5.00k SE 10.0µm
50:50	 SU3500 5.00kV 5.6mm x1.00k SE 50.0µm	 SU3500 5.00kV 5.5mm x5.00k SE 10.0µm
75:25	 SU3500 5.00kV 5.4mm x1.00k SE 50.0µm	 SU3500 5.00kV 5.3mm x5.00k SE 10.0µm

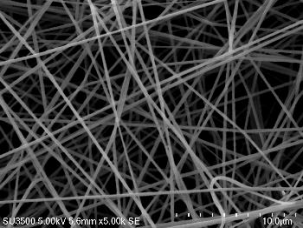
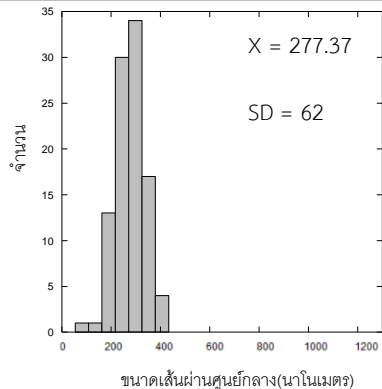
รูปที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

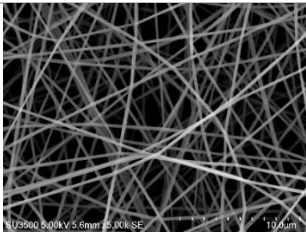
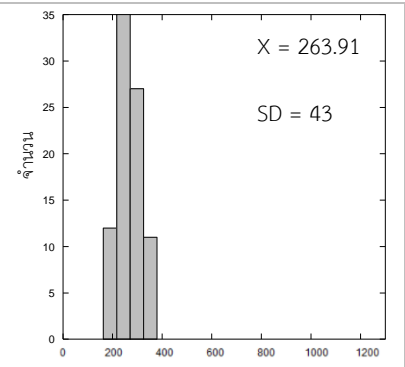
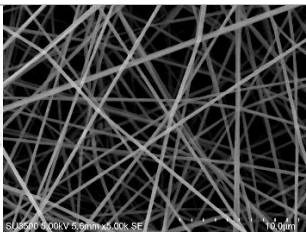
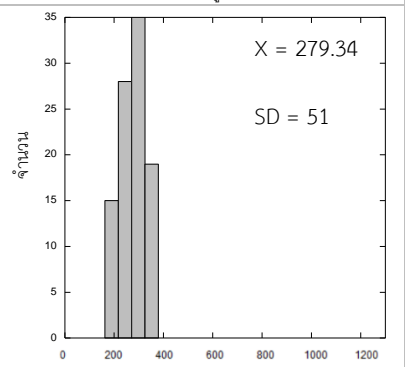
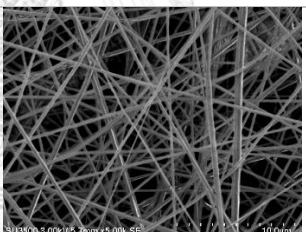
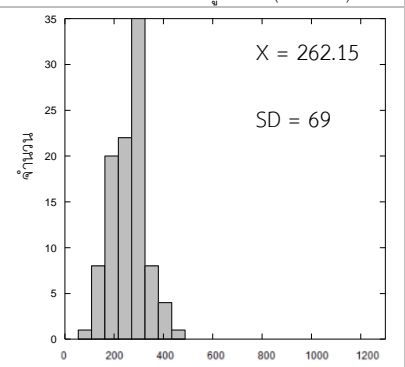
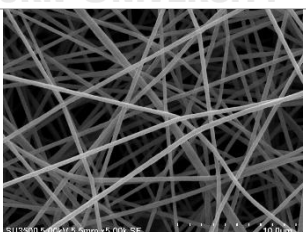
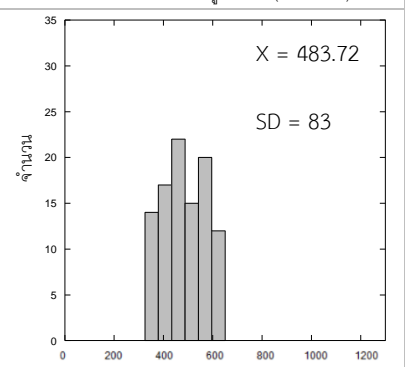
ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงที่อัตราส่วนต่างกัน ที่ภาวะความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 21 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร

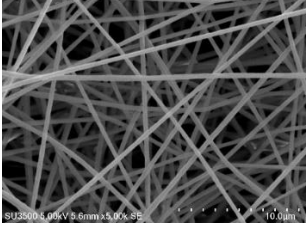
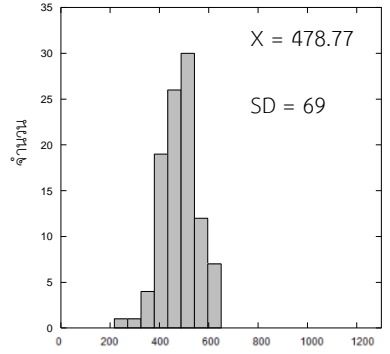
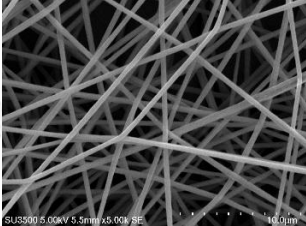
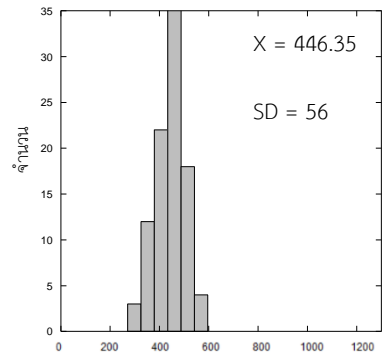
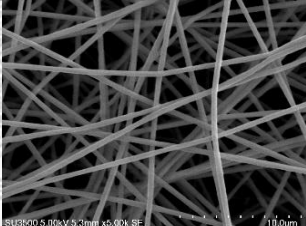
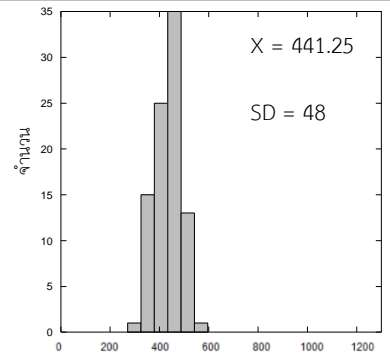
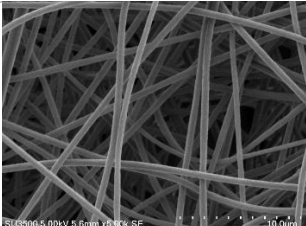
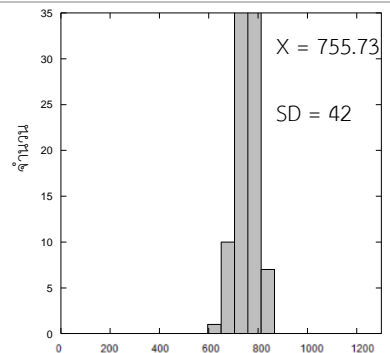
4.3 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

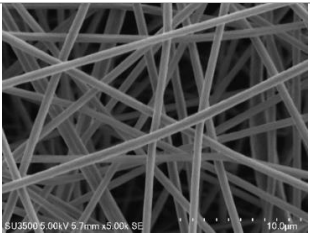
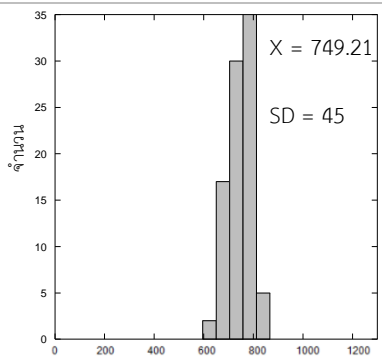
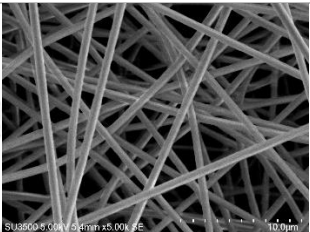
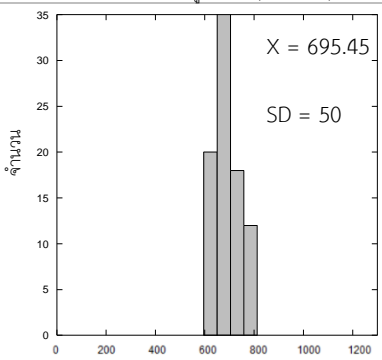
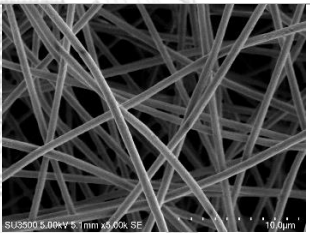
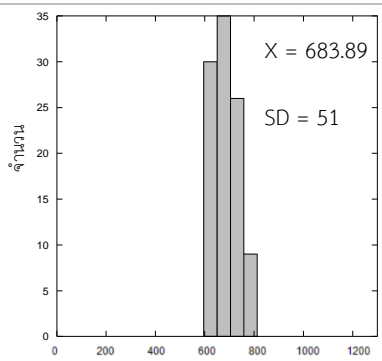
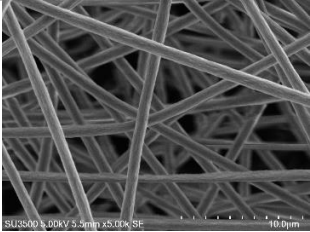
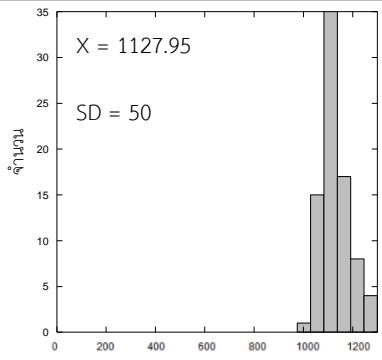
การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่อัตราส่วน 75:25 ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิง โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง 3 ปัจจัย 4 ระดับ แสดงดังตารางที่ 3.3 จากผลการวิเคราะห์เส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ดังตารางที่ 4.3 พบว่าทุกภาวะของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพมีการจัดเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบสุ่ม เส้นใยมีความยาวต่อเนื่อง ไม่โค้งหยิกงอ ไม่พบบิดบนเส้นใย และเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 260 ถึง 1,160 นาโนเมตร

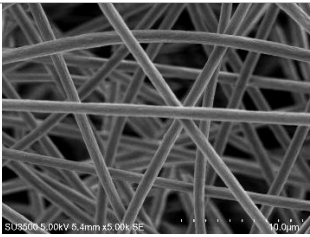
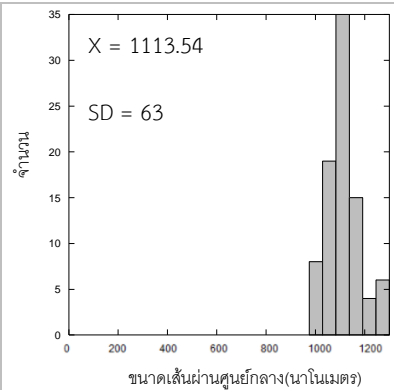
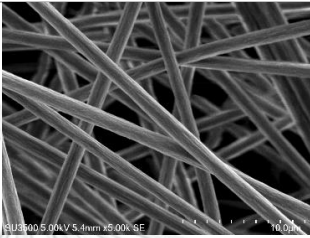
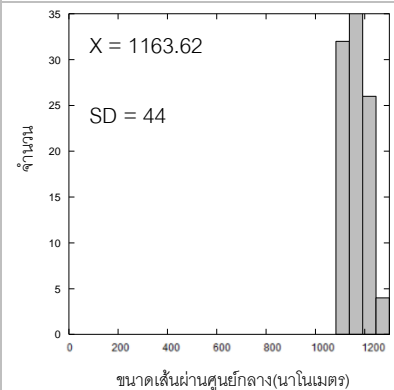
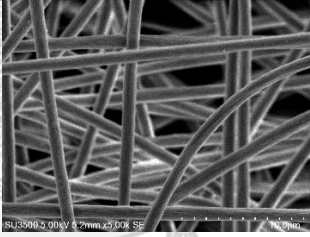
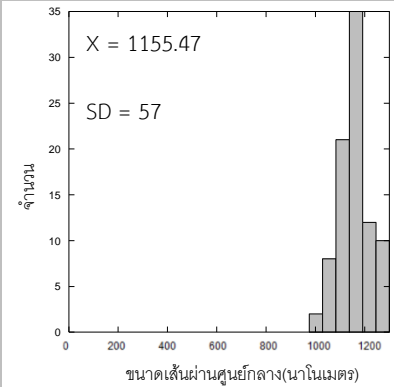
ตารางที่ 4.3 สัณฐานวิทยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่ขึ้นรูปภายใต้ภาวะต่าง ๆ

ลำดับ การ ทดลอง	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง			ภาพทางสัณฐานวิทยา	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการกระจายตัวของเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ
	ความ เข้มข้น (เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก)	ความ ต่าง ศักย์ไฟ ฟ้า (กิโล โวลต์)	ระยะห่าง ระหว่าง ปลายเข็มฉี ดยากับแผ่น เก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)		
1	8	19	16		

2	8	21	18	 <p>SU3900 5.00kV 5.6mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 263.91</p> <p>SD = 43</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>
3	8	23	20	 <p>SU3900 5.00kV 5.9mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 279.34</p> <p>SD = 51</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>
4	8	25	22	 <p>SU3900 5.00kV 5.7mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 262.15</p> <p>SD = 69</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>
5	10	19	18	 <p>SU3900 5.00kV 5.4mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 483.72</p> <p>SD = 83</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>

6	10	21	16	 <p>SU3500 5.00kV 5.6mm X5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 478.77</p> <p>SD = 69</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>
7	10	23	22	 <p>SU3500 5.00kV 5.5mm X5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 446.35</p> <p>SD = 56</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>
8	10	25	20	 <p>SU3500 5.00kV 5.3mm X5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 441.25</p> <p>SD = 48</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>
9	12	19	20	 <p>SU3500 5.00kV 5.6mm X6.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>X = 755.73</p> <p>SD = 42</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p>

10	12	21	22	 <p>SU3500 5.00kV 5.7mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p> <p>$X = 749.21$</p> <p>$SD = 45$</p>
11	12	23	16	 <p>SU3500 5.00kV 5.4mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p> <p>$X = 695.45$</p> <p>$SD = 50$</p>
12	12	25	18	 <p>SU3500 5.00kV 5.1mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p> <p>$X = 683.89$</p> <p>$SD = 51$</p>
13	14	19	22	 <p>SU3500 5.00kV 5.4mm x5.00k SE 10.0um</p>	 <p>จำนวน</p> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นาโนเมตร)</p> <p>$X = 1127.95$</p> <p>$SD = 50$</p>

14	14	21	20		 $X = 1113.54$ $SD = 63$
15	14	23	18		 $X = 1163.62$ $SD = 44$
16	14	25	16		 $X = 1155.47$ $SD = 57$

4.3.1 ผลกระทบของความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย จากรูปที่ 4.3 ก) แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและอัตราส่วน S/N จะพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่ 8 10 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 271 463 721 และ 1,140 นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มข้นน้อยทำให้มีปริมาณเนื้อพอลิเมอร์อยู่ในสารละลายน้อย ขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ที่อยู่ใน

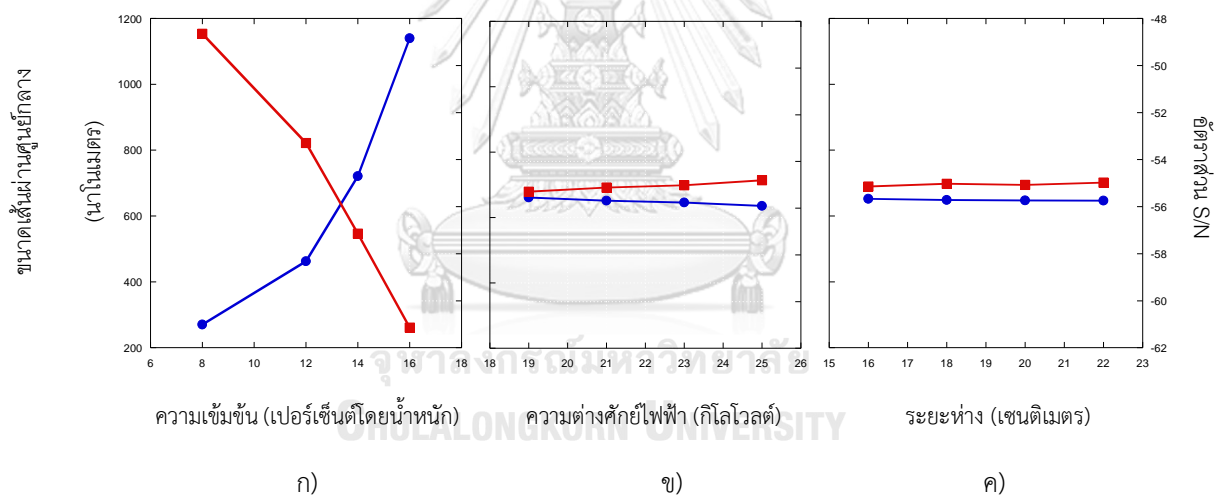
สารละลายจะมีเพิ่มขึ้นส่งผลให้สารละลายพอลิเมอร์มีความหนืดและมีแรงตึงผิว หรือ แรงหนืดยืดหยุ่น (viscoelastic force) สูง ทำให้ลำเส้นใยที่พุ่งออกจากปลายเข็มฉีดยาไปยังแผ่นเก็บตัวอย่างมีความเรียบและสม่ำเสมอทั้งเส้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นมากขึ้น ลำเส้นใยจึงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น [32] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jacobs และคณะ [35] ที่ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุล 900,000 กรัมต่อโมล ที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยศึกษาที่ความเข้มข้น 3 และ 7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าที่ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ได้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดเท่ากับ 34.37 นาโนเมตร และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นที่ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าเท่ากับ 89.98 นาโนเมตร (ขึ้นรูปที่ภาวะความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างอยู่ที่ 15 เซ็นติเมตร) จึงกล่าวได้ว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้น

4.3.2 ผลกระทบของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากรูปที่ 4.3 ข) แสดงความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและอัตราส่วน S/N พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 19 21 23 และ 25 กิโลโวลต์ ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 661 651 646 และ 636 นาโนเมตรตามลำดับ แสดงถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์มีขนาดลดลง เนื่องจากเมื่อยังไม่ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสารละลายจะรวมตัวกันเป็นรูปครึ่งวงกลมที่ปลายเข็มฉีดยาด้วยแรงตึงผิว แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตที่มีประจุตรงกันข้ามกับแรงตึงผิวดังนั้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นจะทำให้เกิดการสะสมประจุที่พื้นผิวของสารละลายบริเวณปลายเข็มฉีดยาทำให้สารละลายเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งวงกลมเป็นรูปร่างคล้ายกรวย เรียกว่า เทเลอร์โคน (taylor cone) และเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดวิกฤตจะทำให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำเส้นใยและด้วยความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างทำให้ลำเส้นใยเกิดการแกว่งและยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงถึงระดับนาโนเมตรแล้วตกไปยังแผ่นเก็บตัวอย่าง [35] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Beachley และคณะ [36] ที่ทำการศึกษาลักษณะของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของพอลิคาโพรแล็กโทน ที่ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 15 และ 20 กิโลโวลต์ พบว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 500 380 และ 250 นาโนเมตรตามลำดับ จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดลดลงเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

4.3.3 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

รูปที่ 4.3 ค) แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและอัตราส่วน S/N พบว่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 18 20 และ 22 เซนติเมตร ทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 652 649 647 และ 646 นาโนเมตร ตามลำดับ แสดงถึงเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นใยพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างคือระยะที่เส้นใยพอลิเมอร์ได้มีระยะเวลาในการเกิดการสับและยึดตัวของเส้นใย [37] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hekmati และคณะ [38] ทำการศึกษาระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่มีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิเอไมด์ โดยใช้ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างอยู่ที่ 5 10 15 และ 20 เซนติเมตร พบว่าเส้นใยพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 313 310 277 และ 223 นาโนเมตร ตามลำดับ เป็นการยืนยันว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีขนาดลดลง



รูปที่ 4.3 ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างที่ภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (น้ำเงิน) และอัตราส่วน S/N (แดง)

จากการวิเคราะห์ผลของทากูชิด้วยโปรแกรม Minitab 16.0 โดยใช้ฟังก์ชันในการวิเคราะห์ เป็นยิ่งเล็กยิ่งดี (smaller is better) เส้นกราฟอัตราส่วน S/N บ่งบอกถึงภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด คือที่ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 22 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงดังตารางที่ 4.4 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบหลัก พบว่า ความเข้มข้นส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด (%contribution) คิดเป็น 99.92 เปอร์เซ็นต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.08 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 0.00 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

ระดับ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (นาโนเมตร)		
	ความเข้มข้น	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มกับแผ่น เก็บตัวอย่าง
1	270.69	661.19	651.77
2	462.52	651.35	648.78
3	721.07	646.19	647.46
4	1,140.14	635.69	646.42
ค่าเฉลี่ย	591.80	648.77	648.12
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	648.61		
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS_B)	1,697,228.59	1,354.36	64.49
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS_W)	437,217.57	338.70	17.06
ความแปรปรวน (Varian)	565,742.86	451.45	21.50
P (%contribution)	99.92	0.08	0.00

จากผลการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ (multiple linear regression) ได้ตั้งสมการที่ (1) พบว่า

ค่าจากการทดลองและค่าการทำนายจากสมการมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 10.98 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (นาโนเมตร)} = -821.85 + 143.35X_1 - 4.08X_2 - 0.87X_3 \quad (1)$$

โดย X_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X_2 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)

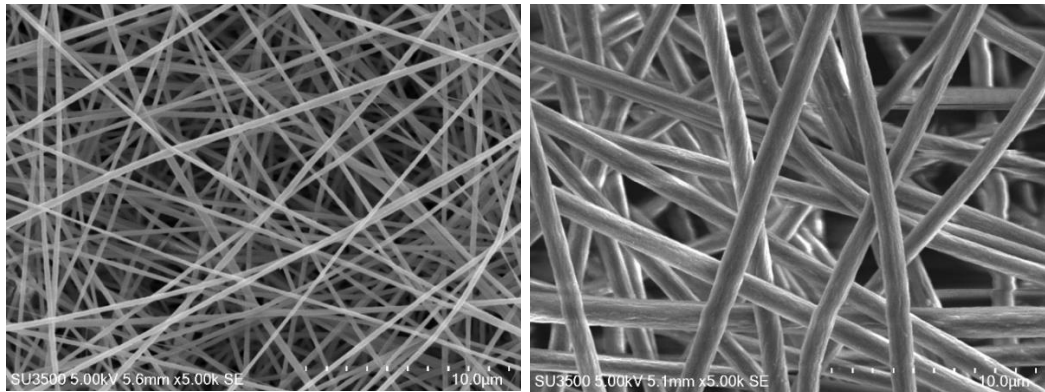
X_3 คือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

4.4 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ดังตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าภาวะในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ที่มีขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุดคือความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง 22 เซนติเมตร มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.02 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.4 ก) และภาวะในการขึ้นรูปที่ให้แผ่นเส้นใยที่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดคือ ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 23 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง 18 เซนติเมตร มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 3.70 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.4 ข) และจากรูปที่ 4.4 ค) แสดงถึงขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยแก้วที่มีขนาดเล็กแต่มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่น ซึ่งจากงานวิจัยของ Panda และ De [10] ศึกษาขนาดรูพรุนของแผ่นฟิล์มพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วน 100/0 90/10 80/20 70/30 และ 60/40 ด้วยวิธี BET พบว่าแผ่นฟิล์มมีขนาดรูพรุนอยู่ที่ 11.6 12.4 14.0 16.4 และ 18 ไมโครเมตร แสดงถึงกระบวนการขึ้นรูปส่งผลต่อขนาดรูพรุน ซึ่งจากการทดลองที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนนิ่งทำให้ได้รูพรุนขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นรูพรุนแบบเปิด ขณะที่การขึ้นรูปแบบแผ่นฟิล์มทำให้ได้รูพรุนขนาดเล็กและมีลักษณะรูพรุนเป็นแบบปิด

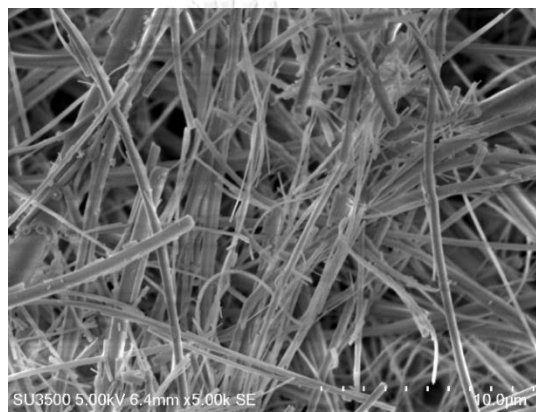
ตารางที่ 4.5 ขนาดรูปทรงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ
แต่ละสูตร

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มฉีดยากับแผ่นเก็บ ตัวอย่าง(เซนติเมตร)	ขนาดรูปทรง (ไมโครเมตร)
1	8	19	16	2.44
2	8	21	18	2.12
3	8	23	20	2.03
4	8	25	22	2.02
5	10	19	18	2.26
6	10	21	16	2.35
7	10	23	22	2.38
8	10	25	20	2.45
9	12	19	20	2.74
10	12	21	22	2.85
11	12	23	16	2.65
12	12	25	18	2.64
13	14	19	22	3.39
14	14	21	20	3.47
15	14	23	18	3.70
16	14	25	16	3.59



ก)

ข)



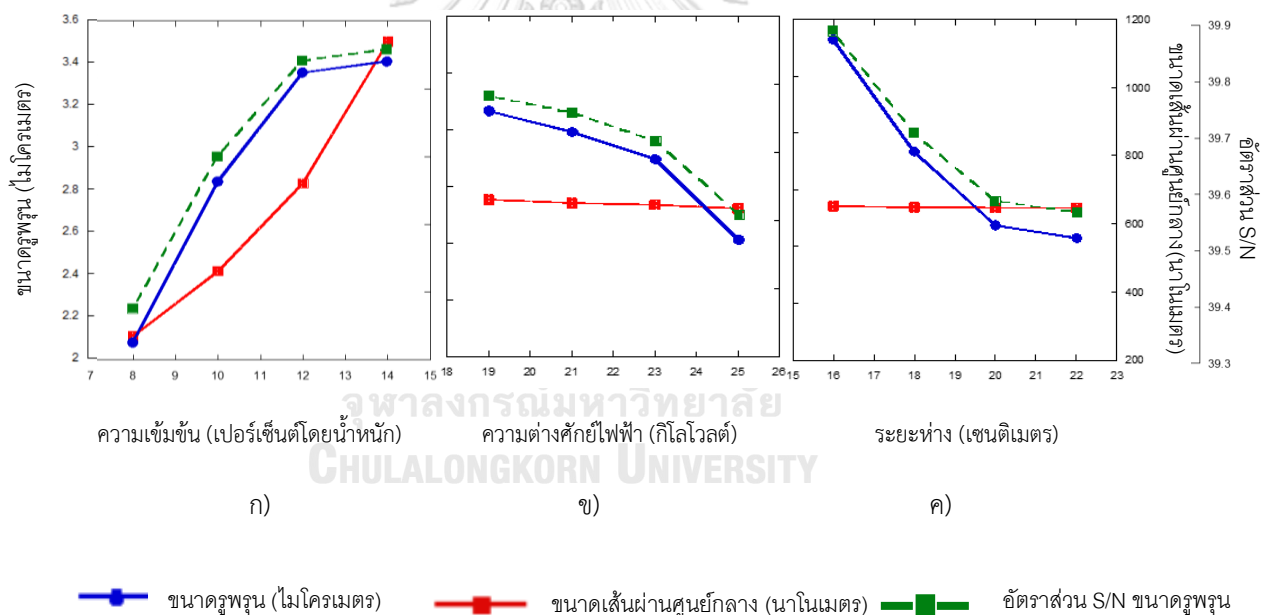
ค)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของรูพรุน

ก) แผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ความเข้มข้นที่ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 22 เซนติเมตร ข) แผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 23 กิโลโวลต์ ระยะห่าง 18 เซนติเมตร ค) แผ่นกั้นเส้นใยแก้ว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดรูพรุนกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ในรูปที่ 4.5 ก) พบว่าที่ความเข้มข้น 8 10 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รูพรุนมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 2.36 2.72 และ 3.54 ไมโครเมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นทำให้อรูพรุนมีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา ในรูปที่ 4.5 ข) พบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 19 21 23 และ 25 กิโลโวลต์ รูพรุนมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.71 2.70 2.69 และ 2.68 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อขนาดรูพรุนพบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขนาดรูพรุนระหว่างของเส้นใยมีขนาดเล็กลง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมี

ขนาดเล็กลง และในรูปที่ 4.5 ค) เมื่อพิจารณาผลของระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่าง จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมติดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่เพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย มีขนาดเล็กลง โดยที่ระยะห่าง 16 18 20 และ 22 เซนติเมตร รูพรุนมีขนาดเท่ากับ 2.76 2.68 2.67 และ 2.66 ไมโครเมตร จากการทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีผลสอดคล้องกับขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยคือเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้นขนาดรูพรุนก็มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยที่ใช้ปริมาตรสารละลายพอลิเมอร์เท่ากันในทุกภาวะทำให้เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้นจำนวนเส้นใยที่พาดทับกันจึงลดน้อยลงเป็นผลให้แผ่นเส้นใยมีช่องว่างระหว่างเส้นใยที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nelson และคณะ [39] ที่ศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยกับขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยพอลิคาโพรแล็กโทน พบว่าขนาดรูพรุนกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีความสัมพันธ์กันเป็นสมการเส้นตรงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้น ขนาดรูพรุนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่างต่อขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริลาไมด์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ผลของทางสถิติโดยใช้ฟังก์ชันยิ่งเล็กลงยิ่งดี (smaller is better) [35] เส้นกราฟอัตราส่วน S/N บ่งบอกถึงภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริลาไมด์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กที่สุดคือที่ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลาย

เชื่อมฉัดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 22 เซนติเมตร คือมีขนาดรูพรุน 2.02 ไมโครเมตร จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงดังตารางที่ 4.6 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบหลัก พบว่าความเข้มข้นส่งผลต่อขนาดรูพรุนมากที่สุด คิดเป็น 99.45 เปอร์เซ็นต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.05 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมฉัดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 0.50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของขนาดรูพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์

ระดับ	ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)		
	ความเข้มข้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บเส้นใย
1	2.15	2.71	2.76
2	2.36	2.70	2.68
3	2.72	2.69	2.67
4	3.54	2.68	2.66
ค่าเฉลี่ย	2.54	2.70	2.68
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	2.69		
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS _B)	4.49	0.00	0.02
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS _w)	1.22	0.00	0.01
ความแปรปรวน (Varian)	1.50	0.00	0.00
P (%contribution)	99.45	0.05	0.50

จากผลการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่างที่ส่งผลต่อขนาดรูพรุนของเส้นใย โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณได้ตั้งสมการที่ (2) พบว่าค่าจากการทดลองและค่าการทำนายจากสมการมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.81 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ขนาดรูพรุน (ไมโครเมตร)} = 0.6 + 0.23X_1 - 0.01X_2 - 0.01X_3 \quad (2)$$

โดย X_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X_2 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)

X_3 คือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

4.5 ตัวแปรที่มีผลต่อความเป็นรูปพรุนของแผ่นเส้นใยพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

ความเป็นรูปพรุนเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญของแผ่นกั้น เนื่องจากแผ่นกั้นที่มีความเป็นรูปพรุนสูง แสดงถึงการมีช่องว่างภายในระหว่างแผ่นกั้นมากทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ดีจึงทำให้ แบตเตอรี่มีค่าการนำไอออนสูง

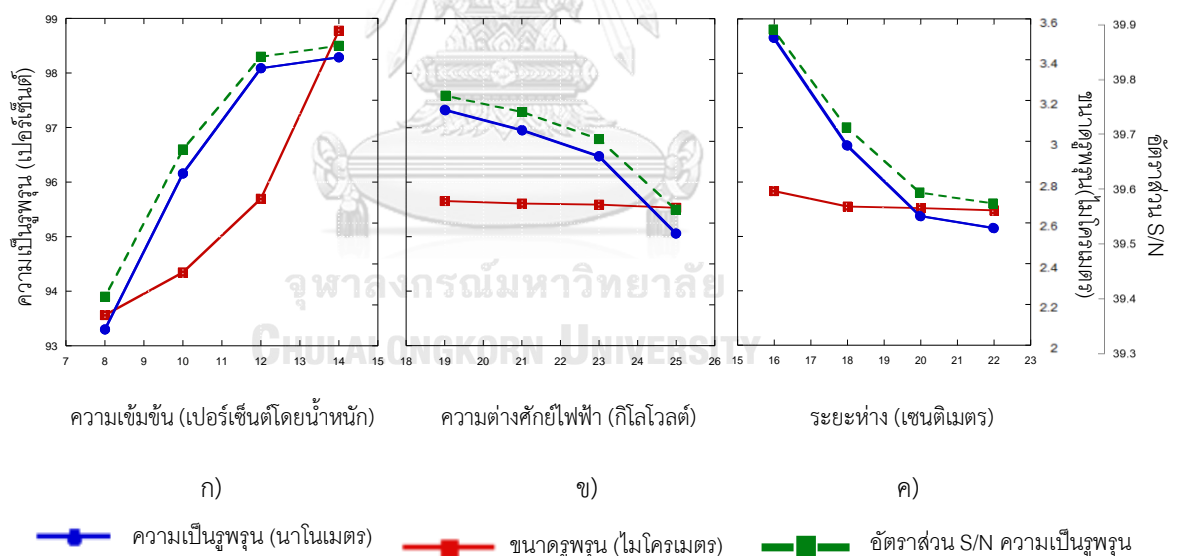
จากการทดสอบความเป็นรูปพรุนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปิน พอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความเป็นรูปพรุน ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปิน พอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ที่ขึ้นรูปด้วยภาวะต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 87.36 ถึง 99.97 เปอร์เซ็นต์ โดยแผ่นเส้นใยที่มีความเป็นรูปพรุนสูงสุด คือ แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยความเข้มข้น 14 โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 23 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง 18 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 99.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความเป็นรูปพรุนของแผ่นเส้นใยแก้ว (เกรด GF/D สำหรับใช้เป็นแผ่นกั้น) มีค่าความเป็นรูปพรุน 91.34 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.7 ความเป็นรูปทรงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอทิลีนไทรลกับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตรและแผ่นกันทางการค้า

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มฉีดยากับแผ่นเก็บ ตัวอย่าง (เซนติเมตร)	ความเป็นรูปทรง (เปอร์เซ็นต์)
1	8	19	16	99.03
2	8	21	18	96.09
3	8	23	20	90.71
4	8	25	22	87.36
5	10	19	18	94.25
6	10	21	16	97.09
7	10	23	22	96.60
8	10	25	20	96.69
9	12	19	20	98.36
10	12	21	22	98.95
11	12	23	16	98.66
12	12	25	18	96.38
13	14	19	22	97.67
14	14	21	20	95.71
15	14	23	18	99.97
16	14	25	16	99.82
	แผ่นเส้นใยแก้ว (Glass fiber)			91.34

เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่มีผลต่อค่าความเป็นรูปทรงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอทิลีนไทรลกับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ดังรูปที่ 4.6 ก) จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ขนาดรูปทรงระหว่างเส้นใยมีขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้แผ่นเส้นใยมีค่าความเป็นรูปทรงสูงขึ้น โดยมีค่าความเป็นรูปทรงเฉลี่ยเท่ากับ 93.30 96.16 98.09 และ 98.29 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นที่ 8 10 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับรูปที่ 4.6 ข) แสดงผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อความเป็นรูปทรงพบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

ขนาดรบกวนระหว่างเส้นใยมีขนาดลดลง ทำให้แผ่นเส้นใยมีค่าความเป็นรบกวนลดลง โดยมีค่าความเป็นรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 97.33 96.96 96.48 และ 95.06 เพอร์เซ็นต์ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 19 21 23 และ 25 กิโลโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่างดังรูปที่ 4.6 ค) จะเห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ขนาดรบกวนระหว่างเส้นใยมีขนาดลดลง ทำให้แผ่นเส้นใยมีค่าความเป็นรบกวนลดลง โดยมีค่าความเป็นรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 98.65 96.67 95.37 และ 95.15 เพอร์เซ็นต์ ที่ระยะห่าง 16 18 20 และ 22 เซนติเมตร ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าขนาดรบกวนระหว่างเส้นใยมีผลต่อค่าความเป็นรบกวน เนื่องจากความเป็นรบกวนเป็นสัดส่วนช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมดดังนั้นขนาดรบกวนระหว่างเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความเป็นรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ohzawa และคณะ [41] ศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดรบกวนระหว่างเส้นใยกับความเป็นรบกวนของแผ่นเส้นใยซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่า เมื่อขนาดรบกวนระหว่างเส้นใยมีค่าเท่ากับ 12 15 และ 17 ไมโครเมตร แผ่นเส้นใยมีค่าความเป็นรบกวนเท่ากับ 0.76 0.82 และ 0.87 เพอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเมื่อขนาดรบกวนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามกันด้วย



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของความชื้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อค่าความเป็นรบกวนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอคริลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ผลของทากูชิโดยใช้ฟังก์ชันยิ่งมามากยิ่งดี (larger is better) เส้นกราฟอัตราส่วน S/N บ่งบอกถึงภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอคริลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่มีค่าความเป็นรบกวนมากที่สุดคือ

ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 19 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.8 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบหลัก พบว่าความเข้มข้นส่งผลต่อค่าความเป็นรูปทรงมากที่สุด คิดเป็น 60.05 เปอร์เซ็นต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 11.04 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 28.91 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเป็นรูปทรงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์

ระดับ	ความเป็นรูปทรง (เปอร์เซ็นต์)		
	ความเข้มข้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง
1	93.30	97.33	98.65
2	96.16	96.96	96.67
3	98.09	96.48	95.37
4	98.29	95.06	95.15
ค่าเฉลี่ย	97.12	96.72	96.02
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	96.46		
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS_B)	64.39	11.84	31.00
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS_W)	17.86	3.24	8.52
ความแปรปรวน (Varian)	21.47	3.95	10.34
P (%contribution)	60.05	11.04	28.91

จากผลการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างที่ส่งผลต่อค่าความเป็นรูปทรงของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณได้ตั้งสมการที่ (3) พบว่าค่าจากการทดลองและค่าการทำนายจากสมการมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.58 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ความเป็นรูปพรุน (เปอร์เซ็นต์)} = 106.38 + 0.85X_1 - 0.36X_2 - 0.59X_3 \quad (3)$$

โดย X_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X_2 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)

X_3 คือ ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

4.6 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

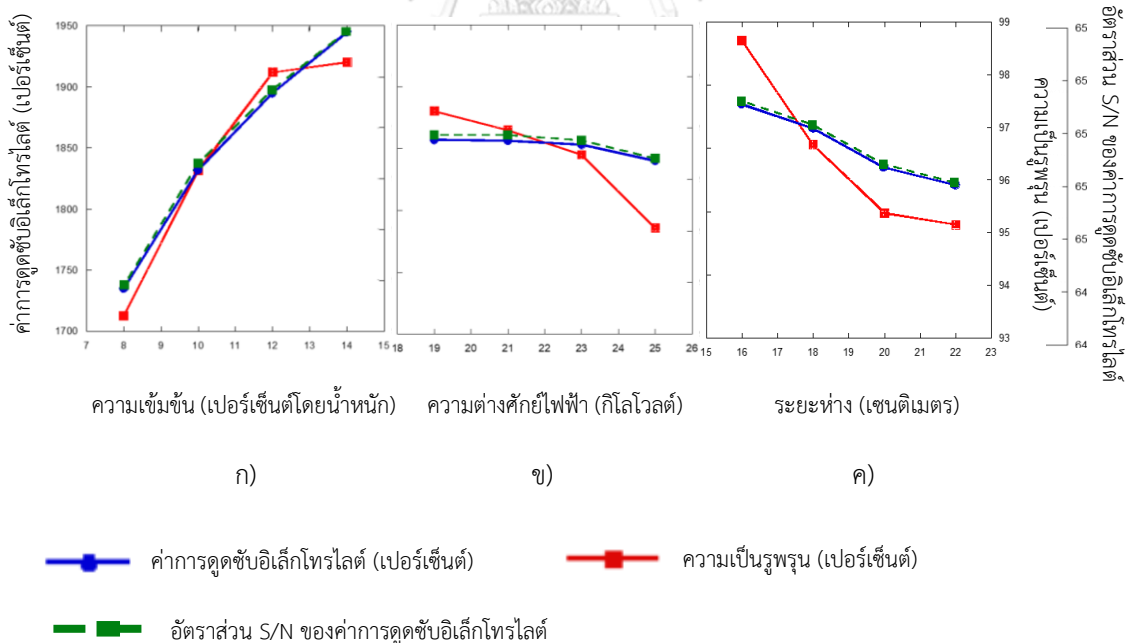
ค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์คือความสามารถในการดูดซับและเก็บรักษาอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นกัน ซึ่งหากแผ่นกันสามารถดูดซับสารอิเล็กโทรไลต์ได้มากส่งผลให้แบตเตอรี่มีค่าการนำไอออนสูง เนื่องจากปริมาณสารอิเล็กโทรไลต์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดมีผลต่อความต้านทานไอออนิกภายในเซลล์ [42] จากการทดสอบค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีน พอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ในตารางที่ 4.9 แสดงค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยแก้วและแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีนพอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่สูตรต่าง ๆ พบว่าแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีนพอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ มีค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์อยู่ที่ 1,650 ถึง 1,971 เปอร์เซ็นต์ โดยแผ่นเส้นใยที่มีการดูดซับอิเล็กโทรไลต์สูงสุด คือ แผ่นเส้นใยที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมติดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร และแผ่นเส้นใยแก้วมีค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์อยู่ที่ 948 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีนพอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ มีค่ามากกว่าแผ่นเส้นใยแก้วคิดเป็น 1,023 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าแผ่นอิเล็กโทรสปีนพอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ มีความสามารถในการดูดซับอิเล็กโทรไลต์ได้ดีกว่าแผ่นเส้นใยแก้วเป็นอย่างมาก

ตารางที่ 4.9 การดูดซับอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตรและแผ่นกั้นทางการค้า

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มฉีดยากับแผ่นเก็บ ตัวอย่าง (เซนติเมตร)	ค่าการดูดซับ อิเล็กทรอนิกส์ (เปอร์เซ็นต์)
1	8	19	16	1,800
2	8	21	18	1,789
3	8	23	20	1,700
4	8	25	22	1,650
5	10	19	18	1,820
6	10	21	16	1,840
7	10	23	22	1,835
8	10	25	20	1,834
9	12	19	20	1,878
10	12	21	22	1,868
11	12	23	16	1,928
12	12	25	18	1,905
13	14	19	22	1,930
14	14	21	20	1,928
15	14	23	18	1,950
16	14	25	16	1,971
แผ่นเส้นใยแก้ว (Glass fiber)				948

จากรูปที่ 4.7 แสดงการศึกษาผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีเอครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ พบว่า รูปที่ 4.7 ก) ความเข้มข้นที่ 8 10 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์เฉลี่ยอยู่ที่ 1,735 1,832 1,895 และ 1,945 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงถึงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์มีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.7 ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 19 21 23 และ 25 กิโลโวลต์ มีค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์เฉลี่ยอยู่ที่ 1,857 1,856 1,853 และ 1,840 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงว่า

เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นรูปทรงมีค่าลดลง ทำให้ค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนมีค่าลดลง และรูปที่ 4.7 ค) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่ 16 18 20 และ 22 เซนติเมตร มีค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนอยู่ที่ 1,885 1,866 1,835 และ 1,821 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นรูปทรงมีค่าลดลง ทำให้ค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนมีค่าลดลง จึงกล่าวได้ว่าค่าความเป็นรูปทรงของแผ่นเส้นใยมีผลต่อค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีน เนื่องจากการดูดซับของแผ่นกั้นคือสารอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนที่เข้าไปอยู่ในส่วนที่เป็นช่องว่างภายในเนื้อในของแผ่นกั้นดังนั้นการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนช่องว่างในแผ่นกั้นหรือการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นรูปทรงจึงเป็นผลให้ค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [11] ที่ศึกษาเจลพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนโดยใช้พอลิไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane, TPU) และพอลิอะคริไนด์ไนไตรล์ (polyacrylonitrile, PAN) ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โพรไพลีน PVDF/TPU/PAN มีค่าความเป็นรูปทรงเท่ากับ 45 73 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้มีค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนเท่ากับ 227 263 และ 311 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าค่าความเป็นรูปทรงมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกับค่าการดูดซับของสารอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีน



รูปที่ 4. 7 ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไพลีนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรไพลีนพอลิอะคริไนด์ไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ผลของทากูซีโดยใช้ฟังก์ชันยิ่งมามากยิ่งดี (Larger is better) เส้นกราฟอัตราส่วน S/N บ่งบอกถึงภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้แผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีนมีค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โทรไลต์มากที่สุดคือที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 21 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.10 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบหลัก พบว่าความเข้มข้นส่งผลต่อค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โทรไลต์มากที่สุด คิดเป็น 90.02 เปอร์เซ็นต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 0.68 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 9.30 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โทรไลต์ของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีน

ระดับ	ค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โทรไลต์ (เปอร์เซ็นต์)		
	ความเข้มข้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง
1	1,734	1,857	1,884
2	1,832	1,856	1,866
3	1,894	1,853	1,835
4	1,944	1,840	1,820
ค่าเฉลี่ย	1,863	1,854	1,850
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	1,851		
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS _B)	98,198	740	10,143
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS _W)	251,12	222	2,540
ความแปรปรวน (Varian)	32,733	247	3,381
P (%contribution)	90.02	0.68	9.30

จากผลการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อผลกระทบค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โทรไลต์ของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีนโดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณได้ตั้งสมการที่ (4) พบว่าค่าจากการทดลองและค่าการทำนายจากสมการมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ค่าการดูดซับอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไนด์ (เปอร์เซ็นต์)} = 1742.12 + 34.61X_1 - 2.69X_2 - 11.16X_3 \quad (4)$$

โดย X_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X_2 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)

X_3 คือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

4.7 ตัวแปรที่มีผลต่อความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

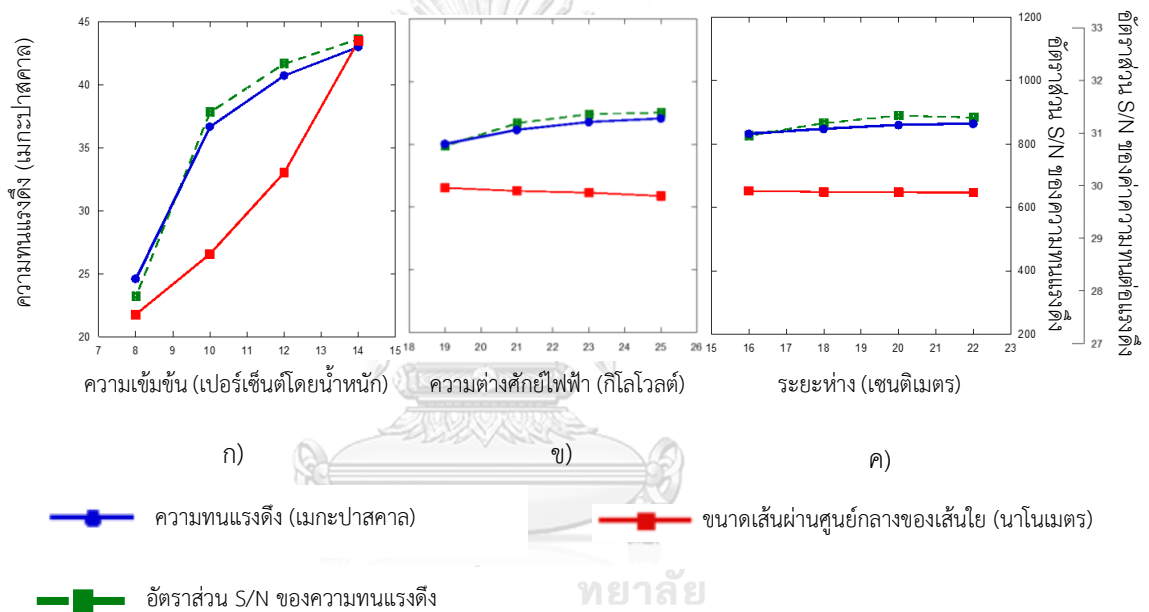
ความสามารถในการทนแรงดึงของแผ่นกั้นเป็นสมบัติหนึ่งแสดงถึงเรื่องความปลอดภัยของแบตเตอรี่ หากแผ่นกั้นมีความทนแรงดึงต่ำส่งผลให้เมื่อนำไปประกอบขึ้นรูปเป็นเซลล์แบตเตอรี่แผ่นกั้นอาจเกิดการฉีกขาดทำให้ขั้วแบตเตอรี่เกิดการสัมผัสกันและเกิดการลัดวงจรเกิดขึ้น จากการศึกษาทดสอบความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไนด์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพในตารางที่ 4.11 แสดงค่าความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพรไนด์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ที่สูตรต่าง ๆ พบว่าแผ่นเส้นใยมีความทนแรงดึงอยู่ที่ 20 – 44 เมกะปาสคาล แผ่นเส้นใยที่มีความทนต่อแรงดึงสูงสุด คือ แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่าง 16 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 44.16 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 4. 11 ความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปัน พอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตร

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มฉีดยากับแผ่นเก็บ ตัวอย่าง (เซนติเมตร)	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)
1	8	19	16	20.9
2	8	21	18	25.1
3	8	23	20	26.7
4	8	25	22	25.6
5	10	19	18	34.9
6	10	21	16	37.8
7	10	23	22	36.6
8	10	25	20	37.5
9	12	19	20	40.9
10	12	21	22	40.8
11	12	23	16	40.3
12	12	25	18	41.0
13	14	19	22	43.4
14	14	21	20	40.9
15	14	23	18	43.6
16	14	25	16	44.2

จากรูปที่ 4.8 แสดงการศึกษาผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์สปันพอลิอะครีโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ พบว่า รูปที่ 4.8 ก) ความเข้มข้นที่ 8 10 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 24.6 36.7 40.7 และ 43.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับ แสดงถึงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงแผ่นเส้นใยมีปริมาณเนื้อสารพอลิเมอร์อยู่มากทำให้ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.8 ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 19 21 23 และ 25 กิโลโวลต์ มีความทนแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 35.0 36.1 36.8 และ 37.0 เมกะปาสคาล

ตามลำดับ และ รูปที่ 4.8 ค) ระยะห่างที่ 16 18 20 และ 22 เซนติเมตร มีความทนแรงดึงเท่ากับ 35.8 36.2 36.5 และ 36.6 เมกะปาสคาล แสดงถึงเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าและเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีค่าลดลง ทำให้ความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความทนต่อแรงดึงมากที่สุด จึงทำให้เห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่ชัดเจนของความทนแรงดึง แต่ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงแผ่นเก็บตัวอย่างเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความทนแรงดึงไม่มากนัก จึงทำให้แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อย่างไม่ชัดเจน



รูปที่ 4.8 ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอีเล็กโทรสปิน พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากการทดสอบความยืดหยุ่นโดยการบิดโค้งแผ่นเส้นใยตามแท่งแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรพบว่าแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพสามารถบิดโค้งตามแท่งแก้วทดสอบได้โดยไม่เกิดการแตกหัก (แสดงดังรูปที่ 4.9)



รูปที่ 4. 9 การทดสอบความยืดหยุ่นโดยการบิดโค้งแผ่นเส้นใย

Zainab และคณะ [43] ศึกษาสมบัติของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์ผสมพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิงแบบแยกหลอดสารละลาย เพื่อใช้เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ลิเทียม โดยพอลิอะคริโลไนไตรล์ที่ความเข้มข้น 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผสมกับพอลิยูรีเทนที่ความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าพอลิอะคริโลไนไตรล์ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 487 นาโนเมตร มีความทนแรงดึงอยู่ที่ 10 เมกะปาสคาลซึ่งมีค่าสูงกว่าที่พอลิอะคริโลไนไตรล์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 390 นาโนเมตร ความทนแรงดึงอยู่ที่ 8 เมกะปาสคาล และทดสอบความยืดหยุ่นจากการพับแผ่นเส้นใยด้วยมุม 180 องศาและการบิดโค้งแผ่นเส้นใยตามแท่งแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรแล้วไม่เกิดการหัก

จากการวิเคราะห์ผลของทากูซีโดยใช้ฟังก์ชันยิ่งยวดยิ่งดี (larger is better) เส้นกราฟอัตราส่วน S/N บ่งบอกถึงภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้แผ่นอิเล็กโทรสปินมีความทนแรงดึงมากที่สุดคือที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 20 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงดังตารางที่ 4.12 เพื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบหลัก พบว่าความเข้มข้นส่งผลต่อค่าความทนต่อแรงดึงมากที่สุด คิดเป็น 98.62 เปอร์เซ็นต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 1.19 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 0.19 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์

ระดับ	ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)		
	ความเข้มข้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่าง
1	24.6	35.0	35.8
2	36.7	36.1	36.2
3	40.7	36.8	36.5
4	43.0	37.1	36.6
ค่าเฉลี่ย	38.7	36.5	36.3
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	36.3		
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS_B)	807.64	9.76	1.54
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS_W)	226.02	2.62	0.40
ความแปรปรวน (Varian)	269.21	3.25	0.51
P (%contribution)	98.62	1.19	0.19

จากผลการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อผลกระทบความทนแรงดึงของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณได้ตั้งสมการที่ (5) พบว่าค่าจากการทดลองและค่าการทำนายจากสมการมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.54 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ความทนแรงดึง (เมกะปาสคาล)} = -6.32 + 2.97X_1 + 0.34X_2 + 0.14X_3 \quad (5)$$

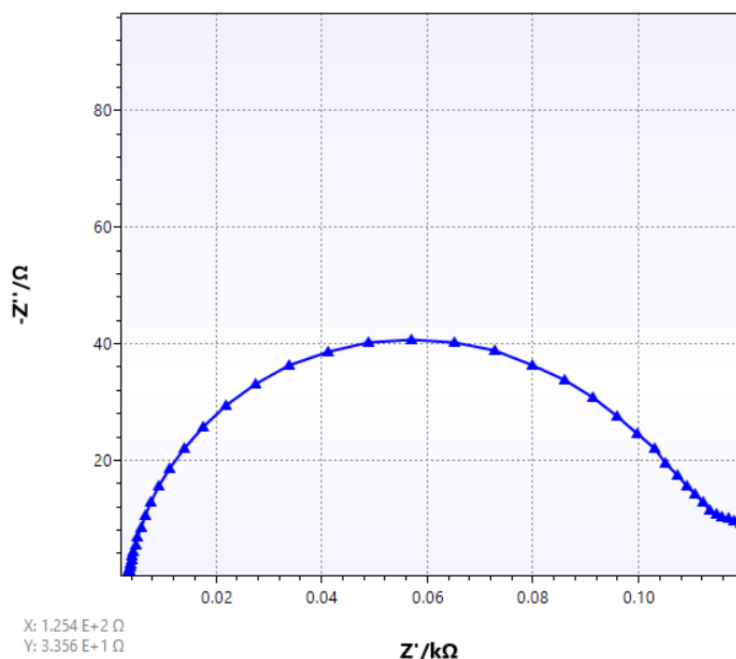
โดย X_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

X_2 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)

X_3 คือ ระยะห่างระหว่างปลายเชื่อมกับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

4.8 ตัวแปรที่มีผลต่อค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

การทดสอบค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ในตารางที่ 4.13 แสดงค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยแก้วและแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่สูตรต่าง ๆ โดยค่าการนำไอออนสามารถคำนวณจาก ค่า bulk impedance ที่ได้จากรูป Nyquist ในรูปที่ 4.10 แผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ มีค่าการนำไอออนสูงสุด คือ แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร โดยมีค่าการนำไอออนเท่ากับ 3.11 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และแผ่นเส้นใยแก้วมีค่าการนำไอออนอยู่ที่ 1.86 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร



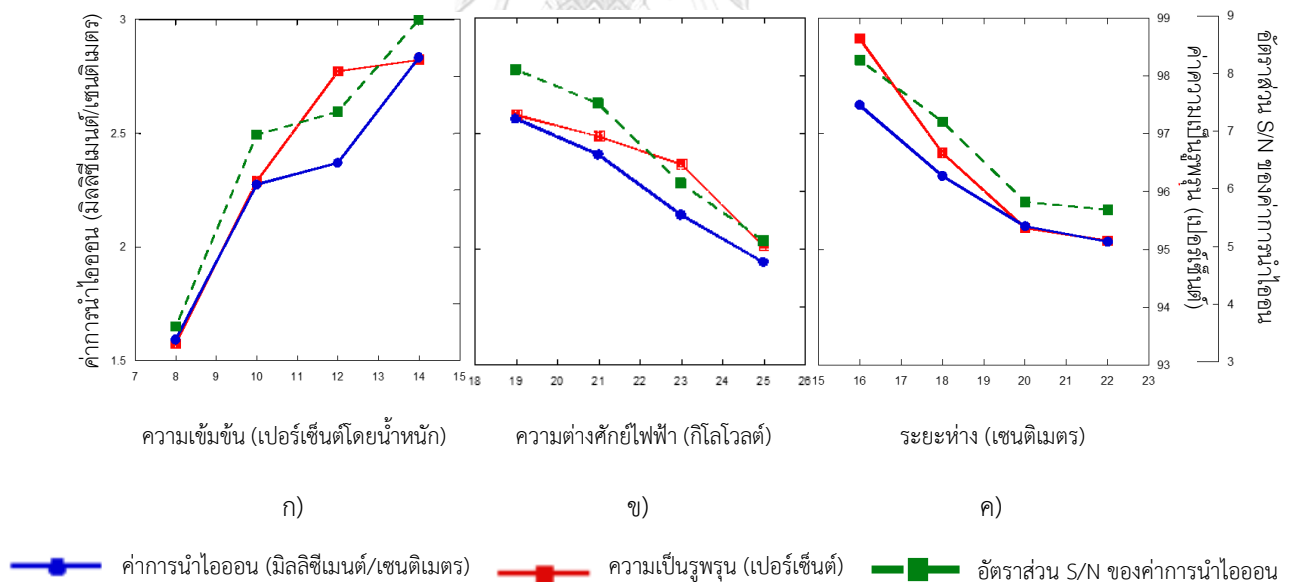
รูปที่ 4.10 กราฟ Nyquist ของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

ตารางที่ 4.13 การนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตรและค่าการนำไอออนของแผ่นกั้นทางการค้า

ลำดับ ที่	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่าง ศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่าง ปลายเข็มฉีดยากับ แผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)	ค่าการนำไอออน (มิลลิซีเมนต์/ เซนติเมตร)
1	8	19	16	2.08
2	8	21	18	2.10
3	8	23	20	1.12
4	8	25	22	1.08
5	10	19	18	2.86
6	10	21	16	2.39
7	10	23	22	2.18
8	10	25	20	1.67
9	12	19	20	2.54
10	12	21	22	2.09
11	12	23	16	2.92
12	12	25	18	1.93
13	14	19	22	2.78
14	14	21	20	3.06
15	14	23	18	2.38
16	14	25	16	3.11
แผ่นเส้นใยแก้ว (Glass fiber)				1.86

จากรูปที่ 4.11 แสดงการศึกษาผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ พบว่า รูปที่ 4.11 ก) ความเข้มข้นที่ 8 10 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการนำไอออนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.59 2.28 2.37 และ 2.83 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงถึงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ความเป็นรูพรุนที่มีมากขึ้น (จากข้อสรุปในหัวข้อที่ 4.4) เป็นผลให้มีค่าการนำไอออนเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.11 ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 19 21 23

และ 25 กิโลโวลต์ มีค่าการนำไอออนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.57 2.41 2.15 และ 1.95 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 ค) ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างที่ 16 18 20 และ 22 เซนติเมตร มีค่าการนำไอออนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.62 2.32 2.10 และ 2.03 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ แสดงถึงความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นรูพรุนมีค่าลดลง ทำให้ค่าการนำไอออนมีค่าลดลง จึงกล่าวได้ว่าค่าความเป็นรูพรุนของแผ่นเส้นใยมีผลต่อค่าการนำไอออน เนื่องจากค่าความเป็นรูพรุนสูงแสดงถึงเส้นทางที่ไอออนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้มากดังนั้นเมื่อค่าความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้น ค่าการนำไอออนจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นรูพรุน [25] ในงานวิจัยของ Ghosh และคณะ [26] ศึกษาแผ่นกั้น nafion แผ่นกั้นอิเล็กโทรสปีนเส้นใยแก้ว แผ่นกระดาษกรอง และแผ่นกั้น celgrad มาใช้ในระบบซิงก์ไอออนแบตเตอรี่โดยใช้ขั้วบวกเป็นวานาเดียมเพนตะออกไซด์ (V_2O_5) ขั้วลบเป็นซิงก์ (Zn) ใช้ 3 โมลแลต ของ $ZnSO_4$ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ พบว่าแผ่นกั้น nafion แผ่นกั้นอิเล็กโทรสปีนเส้นใยแก้ว แผ่นกระดาษกรอง และแผ่นกั้น celgrad มีค่าการนำไอออนเท่ากับ 2.6 2.8 0.75 และ 0.1 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับแสดงให้เห็นถึงเส้นใยแก้วมีค่าการนำไอออนสูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยแก้วที่มีความเป็นรูพรุนสูงที่สุด



รูปที่ 4.11 ผลของความเข้มข้น ความต่างศักย์ไฟฟ้า และระยะห่าง ต่อค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กโทรสปีน พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

จากการวิเคราะห์ผลของทากูชิโดยใช้ฟังก์ชันยิ่งมามากยิ่งดี (larger is better) เส้นกราฟอัตราส่วน S/N บ่งบอกถึงสถานะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้แผ่นอิเล็กโทรสปีนมีค่าการนำไอออนมากที่สุด

คือที่ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ไฟฟ้า 19 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงดังตารางที่ 4.14 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบหลักพบว่าความเข้มข้นส่งผลต่อค่าการนำไอออนมากที่สุด คิดเป็น 91.35 เปอร์เซ็นต์ ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5.21 เปอร์เซ็นต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 3.44 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4. 14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการนำไอออนของแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์

ระดับ	ค่าการนำไอออน (มิลลิซีเมนต์/เซนติเมตร)		
	ความเข้มข้น	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง
1	1.59	2.57	2.62
2	2.28	2.41	2.32
3	2.37	2.15	2.10
4	2.83	1.95	2.03
ค่าเฉลี่ย	2.32	2.28	2.21
ผลรวมเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด	2.27		
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (SS_B)	3.15	0.91	0.85
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (SS_W)	0.80	0.23	0.23
ความแปรปรวน (Varian)	1.049	0.302	0.283
P (%contribution)	64.18	18.48	17.34

จากผลการทดลองสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างต่อผลกระทบค่าการนำไอออนของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์โดยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณได้ดังสมการที่ (6) พบว่าค่าจากการทดลองและค่าการทำนายจากสมการมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 10.90 เปอร์เซ็นต์

$$\text{ค่าการนำไอออน (มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)} = 4.39 + 0.19X_1 - 0.11X_2 - 0.10X_3 \quad (6)$$

โดย X_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

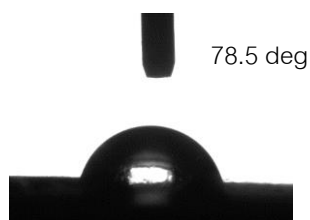
X_2 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)

X_3 คือ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่าง (เซนติเมตร)

4.9 มุมสัมผัสของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

มุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์บ่งบอกสามารถถึงภาวะเปียกของแผ่นกั้น หากแผ่นกั้นมีภาวะเปียกที่ดีจะช่วยลดความต้านทานไอออนิกภายในเซลล์ ช่วยลดเวลาในการเติมอิเล็กโทรไลต์ในระหว่างการประกอบเซลล์และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ภายใต้ภาวะการทำงานปกติ [44]

จากการทดสอบหามุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ในตารางที่ 4.15 แสดงค่ามุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ที่สูตรต่าง ๆ พบว่า แผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ มีมุมสัมผัสตั้งแต่ 64.7 - 89.5 องศา (แสดงดังรูปที่ 4.12) ซึ่งเป็นมุมที่น้อยกว่า 90 องศา ถือว่าแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ มีภาวะการเปียกที่ดี ในขณะที่แผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์มีมุมสัมผัสอยู่ที่ 116 องศา จึงกล่าวได้ว่าพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพมีผลต่อความสามารถในการเปียกของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Panda และคณะ [10] ศึกษาการเตรียมการวิเคราะห์ผลและสมบัติการกั้นของเยื่อเลือกผ่านพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนสำหรับการทำให้น้ำบริสุทธิ์ โดยใช้วิธีการขึ้นรูปเป็นแบบแผ่นฟิล์มที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีค่ามุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์เท่ากับ 81 72 69 56 และ 51 องศา แสดงถึงปริมาณสัดส่วนของพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มมีมุมสัมผัสที่ลดลงดังนั้นพอลิยูรีเทนมีส่วนช่วยให้แผ่นฟิล์มมีความชอบน้ำมากขึ้น



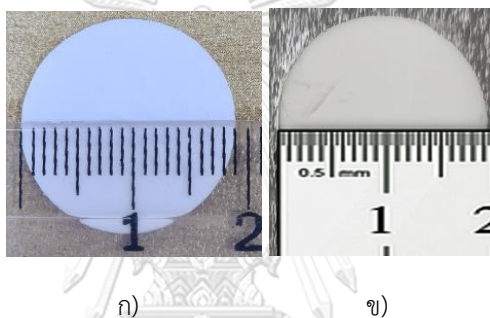
รูปที่ 4.12 มุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

ตารางที่ 4.15 มุมสัมผัสของสารอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์พอลิอะคริไลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพแต่ละสูตร

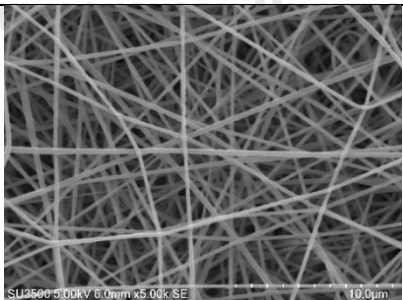
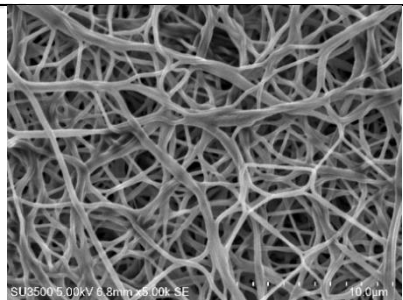
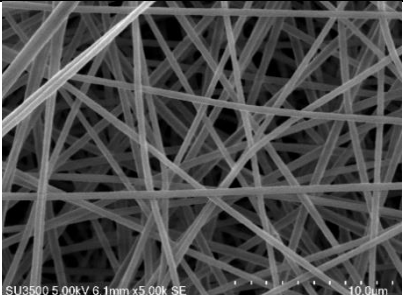
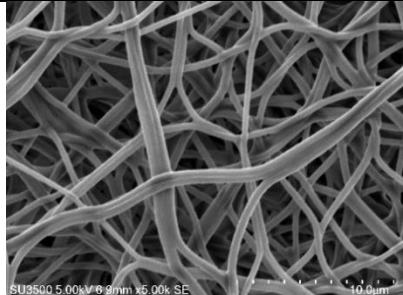
ลำดับ ที่	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	ระยะห่างระหว่างปลาย เข็มฉีดยากับแผ่นเก็บ ตัวอย่าง(เซนติเมตร)	มุมสัมผัส (องศา)
1	8	19	16	68.2
2	8	21	18	69.1
3	8	23	20	64.7
4	8	25	22	81.7
5	10	19	18	71.0
6	10	21	16	70.2
7	10	23	22	75.8
8	10	25	20	81.7
9	12	19	20	68.9
10	12	21	22	81.7
11	12	23	16	88.2
12	12	25	18	86.6
13	14	19	22	89.6
14	14	21	20	87.0
15	14	23	18	87.9
16	14	25	16	78.6
17	พอลิอะคริไลไนไตรล์			116.0

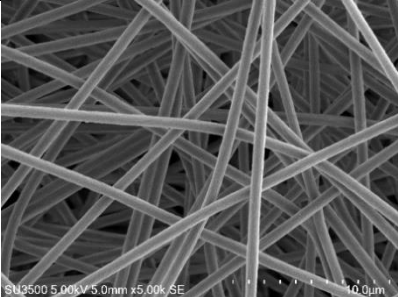
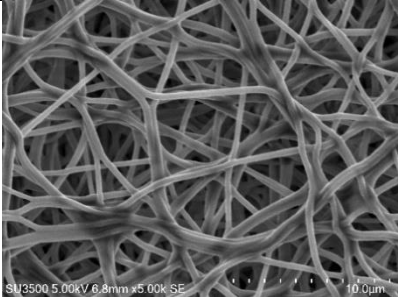
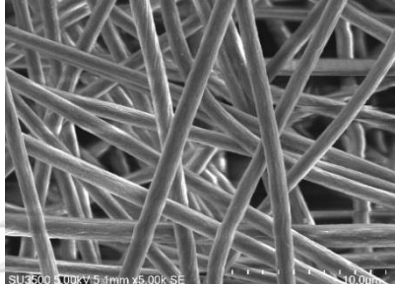

4.10 การเปลี่ยนทางกายภาพต่อความร้อนของแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ

ผลจากการทดลองเมื่อนำแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ออบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่าแผ่นเส้นใยไม่เกิดการหดตัวหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญ แสดงดังรูปที่ 4.13 แต่เมื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพบว่าที่ภาวะความเข้มข้นต่ำ หลังอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสแผ่นเส้นใยเกิดการหยิกโค้งงอมากกว่าเส้นใยที่ภาวะมีความเข้มข้นสูง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้แผ่นเส้นใยยังคงความเป็นรูพรุนให้ออกซิเจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ ดังนั้นกล่าวได้ว่าแผ่นเส้นใยที่ภาวะความเข้มข้นสูงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าแผ่นเส้นใยที่ภาวะความเข้มข้นต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพ ก) ก่อนอบ ข) หลังอบ

ภาวะ	กำลังขยาย 5000 เท่า	
	ก่อนอบ	หลังอบ
ความเข้มข้น 8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 19 กิโล โวลต์ ระยะห่าง 16 เซนติเมตร		
ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 19 กิโล โวลต์ ระยะห่าง 18 เซนติเมตร		

ภาวะ	กำลังขยาย 5000 เท่า	
	ก่อนอบ	หลังอบ
ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 21 กิโล โวลต์ ระยะห่าง 22 เซนติเมตร		
ความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 19 กิโล โวลต์ ระยะห่าง 22 เซนติเมตร		

รูปที่ 4.14 แผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

4.11 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

จากการออกแบบด้วยวิธีทากูชิและการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าแต่ละภาวะส่งผลต่อสมบัติของการเป็นแผ่นกันที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาในกรณีหลายผลการตอบสนองจึงสามารถทำได้โดยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ตารางที่ 4.16 แสดงผลจากการแปลงข้อมูลดิบค่าสูงสุดจากการทดลองจะได้เท่ากับ 0 ในขณะที่ค่าต่ำสุดจะได้เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.16 ผลการแปลงข้อมูลดิบ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	ค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์	ค่าความเป็นรูพรุน	ขนาดรูพรุน	ความทนแรงดึง	ค่าการนำไอออน
0.983121	0.466667	0.925484	0.246002	0	0.172062
0.998055	0.433918	0.69267	0.05531	0.181719	0.047129
0.980933	0.155556	0	0.001764	0.247881	0
1	0	0.265524	0	0.201481	0.03135
0.754218	0.528889	0.54677	0.143004	0.601517	0.55604
0.759709	0.591111	0.771404	0.192707	0.725546	0.415783
0.795668	0.575556	0.732884	0.211749	0.673394	0.22233
0.801333	0.573466	0.740291	0.25342	0.711131	0.103067
0.452474	0.71037	0.872004	0.427017	0.859834	0.604458
0.459708	0.678395	0.919362	0.491769	0.853732	0.35101
0.519339	0.864198	0.895854	0.374286	0.83294	0.484597
0.532167	0.793333	0.715347	0.36559	0.864016	0.348922
0.039568	0.871111	0.817736	0.816217	0.96603	0.863926
0.055556	0.864198	0.662554	0.863826	0.859231	0.860102
0	0.933333	1	1	0.975349	0.81809
0.009034	1	0.987865	0.932775	1	1

จากนั้นนำข้อมูลที่ถูกลบไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกย์แสดงดัง
ตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	ค่าการดูดซับอิเล็กโทรไลต์	ค่าความเป็นรูพรุน	ขนาดรูพรุน	ความทนแรงดึง	ค่าการนำไอออน
0.967344	0.483871	0.870298	0.398725	0.333333	0.376524
0.996125	0.469007	0.619326	0.346095	0.379282	0.344146
0.963266	0.371901	0.333333	0.333726	0.399323	0.333333
1	0.333333	0.40503	0.333333	0.385054	0.340449
0.670437	0.514874	0.524532	0.368461	0.556494	0.529684
0.67541	0.550122	0.686251	0.38247	0.645616	0.461162
0.709893	0.540865	0.651792	0.388123	0.604883	0.391337
0.715649	0.539646	0.658147	0.401097	0.633819	0.357927
0.477315	0.633208	0.796184	0.465991	0.781047	0.558321
0.480634	0.608565	0.861122	0.495918	0.773673	0.435165
0.50986	0.786408	0.827614	0.444163	0.749558	0.492415
0.516618	0.707547	0.637224	0.440758	0.786184	0.434375
0.342364	0.795053	0.732854	0.731226	0.936382	0.786072
0.346154	0.786408	0.597054	0.785948	0.780312	0.781375
0.333333	0.882353	1	1	0.953015	0.733235
0.335353	1	0.976306	0.881484	1	1

ในการเลือกภาวะที่เหมาะสมจะเลือกจากเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ โดยภาวะที่มีค่าเกรดสูงที่สุดแสดงถึงภาวะที่เหมาะสมที่สุดแสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

การทดลอง	ความเข้มข้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความต่างศักย์ (กิโลโวลต์)	ระยะห่าง (เซนติเมตร)	เกรด	ลำดับ
1	8	19	16	0.57168	9
2	8	21	18	0.52566	14
3	8	23	20	0.45581	16
4	8	25	22	0.46620	15
5	10	19	18	0.52741	13
6	10	21	16	0.56684	10
7	10	23	22	0.54782	12
8	10	25	20	0.55105	11
9	12	19	20	0.61868	6
10	12	21	22	0.60918	7
11	12	23	16	0.63500	5
12	12	25	18	0.58712	8
13	14	19	22	0.72066	3
14	14	21	20	0.67954	4
15	14	23	18	0.81699	2
16	14	25	16	0.86552	1

ในการเลือกตัวแปรที่เหมาะสมจะเลือกจากค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ โดยจะเลือกตัวแปรจากระดับที่มีค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่สูงสุดในตัวแปรนั้น ๆ โดยค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แสดงดังตาราง 4.19

ตารางที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

ระดับ	ความเข้มข้น	ความต่างศักย์	ระยะห่าง
1	0.50484	0.609608	0.659762
2	0.548279	0.595306	0.614296
3	0.612494	0.613905	0.57627
4	0.770678	0.617472	0.585963

ดังนั้น ภาวะการผลิตแผ่นเส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่เหมาะสมคือที่ความเข้มข้นสารละลาย 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บตัวอย่าง 16 เซนติเมตร



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยในการเตรียมแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนจากพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพและพัฒนาแผ่นเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์โพรสปีนจากพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพเพื่อใช้เป็นแผ่นกั้นในแบตเตอรี่ซิงก์ไอออน พบว่าในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพจากไดไอโซไซยาเนตเชิงชีวภาพ พอลิคาโพรแล็กโทนไดออกอลและสายโซ่ต่อเอททิลีนไดออกอล ทำให้ได้พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพน้ำหนักโมเลกุลสูงสุดที่ 28,000 กรัมต่อโมล จากนั้นขึ้นรูปเป็นแผ่นกั้นโดยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินนิ่ง ที่อัตราส่วนของพอลิอะคริโลไนไตรล์กับพอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพเท่ากับ 75:25 และออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ และใช้วิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อใช้พิจารณาตัวแปรที่เหมาะสมกับกรณีปัญหาหลายผลตอบสนอง โดยพิจารณาจากสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นแผ่นกั้น ได้แก่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยขนาดเล็ก มีรูพรุนขนาดเล็ก มีความเป็นรูพรุนสูง มีค่าการดูดซับสารอิเล็กทรอนิกส์โพรไลต์สูง มีความทนแรงดึงสูง และมีค่าการนำไอออนสูง จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองพบว่าที่ภาวะความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยากับแผ่นเก็บเส้นใย 16 เซนติเมตร เป็นภาวะที่มีสมบัติการเป็นแผ่นกั้นที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นเส้นใยที่พัฒนาได้สามารถทนต่อการหดตัวทางความร้อนได้ถึง 150 องศาเซลเซียสและมีมุมสัมผัสที่ต่ำกว่า 90 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้มีศักยภาพในการประยุกต์เป็นแผ่นกั้นสำหรับซิงก์ไอออนแบตเตอรี่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสังเคราะห์พอลิยูรีเทนเชิงชีวภาพที่อัตราส่วนของไดไอโซไซยาเนตต่อพอลิออลที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของพอลิเมอร์
2. การกำหนดค่าตัวแปรของความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับแผ่นเก็บตัวอย่างที่ช่วงกว้างขึ้นจะแสดงถึงผลกระทบที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาที่ชัดเจนมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. Arora, P. and Zhang, Z. Battery separators. Chemical Reviews 104(10) (2004): 4419-4462.
2. Kirchhofer, M., Zamory, J., Paillard, E., and Passerini, S. Separators for Li-ion and li-metal battery including ionic liquid based electrolytes based on the TFSI⁻ and FSI⁻ anions. International Journal of Molecular Sciences 15(8) (2014): 14868-14890.
3. Zhang, S.S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. Journal of Power Sources 164 (2007): 351–364.
4. Lee, H., Yanilmaz, M., Toprakci, O., Fu, K. and Zhang, X. A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries. Energy and Environmental Science 7(12) (2014): 3857-3886.
5. Mallick, S. and Raj, C.R. Aqueous rechargeable Zn-ion batteries: strategies for improving the energy storage performance. ChemSusChem 14(9) (2021): 1987-2022.
6. Wang, L. and Zheng, J. Recent advances in cathode materials of rechargeable aqueous zinc-ion batteries. Materials Today Advances 7 (2020): 100078.
7. Xue, T. and Fan, H.J. From aqueous Zn-ion battery to Zn-MnO₂ flow battery: A brief story. Journal of Energy Chemistry 54(2021): 194-201.
8. Ming, J., Guo, J., Xia, C., Wang, W. and Alshareef, H.N. Zinc-ion batteries: materials, mechanisms, and applications. Materials Science and Engineering R 135(2019): 58-84.
9. Rahaman, M.S.A., Ismail, A.F. and Mustafa, A. A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber. Polymer Degradation and Stability 92(8) (2007): 1421-1432.
10. Panda, S.R. and De, S. Preparation, characterization and antifouling properties of polyacrylonitrile/polyurethane blend membranes for water purification. RSC Advances 5(30) (2015): 23599-23612.

11. Liu, Y., Peng, X., Cao, Q., Jing, B., Wang, X. and Deng, Y. Gel polymer electrolyte based on poly (vinylidene fluoride)/thermoplastic polyurethane/polyacrylonitrile by the electrospinning technique. The Journal of Physical Chemistry C 121(35) (2017): 19140-19146.
12. Tan, L., Deng, Y., Cao, Q., Jing, B., Wang, X. and Liu, Y. Gel electrolytes based on polyacrylonitrile/thermoplastic polyurethane/polystyrene for lithium-ion batteries. Ionics 25 (2019): 3673–3682.
13. Tawade, B.V., Shingte, R.D., Kuhire, S.S., Sadavarte, N.V., Garg, K., Maher, D.M., Ichake, A.B., More, A.S. and Wadgaonkar, P.P. Bio-Based Di-/Poly-isocyanates for Polyurethanes: An Overview. Polyurethane Today (2017).
14. Datta, J. and Kasprzyk, P. Thermoplastic polyurethanes derived from petrochemical or renewable resources: A comprehensive review. Polymer Engineering and Science 58(S1) (2018): E14-E35.
15. Shi, X., Zhou, W., Ma, D., Ma, Q., Bridges, D., Ma, Y. and Hu, A. Electrospinning of nanofibers and their applications for energy devices. Journal of Nanomaterials 2015 (2015): 1-20.
16. Alharbi, A.R., Alarifi, I. M., Khan, W.S. and Asmatulu, R. Highly hydrophilic electrospun polyacrylonitrile/polyvinylpyrrolidone nanofibers incorporated with gentamicin as filter medium for dam water and wastewater treatment. Journal of Membrane and Separation Technology 5(2) (2016): 38-56.
17. Yan, X., Yu, M., Ramakrishna, S., Russell, S. J. and Long, Y. Advances in portable electrospinning devices for in situ delivery of personalized wound care. Nanoscale 11(41) (2019): 19166-19178.
18. Mirjalili, M. and Zohoori, S. Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. Journal of Nanostructure in Chemistry 6(3) (2016): 207-213.
19. Yang, Q., Li, Z., Hong, Y., Zhao, Y., Qiu, S., Wang, C. and Wei, Y. Influence of solvents on the formation of ultrathin uniform poly (vinyl pyrrolidone) nanofibers with electrospinning. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 42(20) (2004): 3721-3726.

20. Long, Y.-Z., Yan, Xu., Wang, X., Zhang, J. and Yu, M. Electrospinning: the setup and procedure, in electrospinning: nanofabrication and applications. Elsevier (2019): 21-52.
21. Karakaş, H., Electrospinning of nanofibers and their applications. Istanbul Technical University, Textile Technologies and Design Faculty (2015).
22. Oh, S.Y., Kang, M.S., Knowles, J.C. and Gong, M.S. Synthesis of bio-based thermoplastic polyurethane elastomers containing isosorbide and polycarbonate diol and their biocompatible properties. Journal of Biomaterials Applications 30(3) (2015): 327-337.
23. Adsuar, M.S., Papon, E. and Villenave, J.J. Influence of the synthesis conditions on the properties of thermoplastic polyurethane elastomers. Journal of Applied Polymer Science 76(10) (2000): 1590-1595.
24. Karakas, H., Sarac, A.S., Polat, T., Budak, E.G., Bayram, S., Dag, N. and Jahangiri., S. Polyurethane nanofibers obtained by electrospinning process. International Journal of Health and Medical Engineering 7(3) (2013): 177-180.
25. Bosworth, L.A. and Downes, S. Acetone, a sustainable solvent for electrospinning poly (ϵ -caprolactone) fibres: effect of varying parameters and solution concentrations on fibre diameter. Journal of polymers and the environment 20(3) (2012): 879-886.
26. Ghosh, M., Vijayakumar, V. and Kurungot, S. Dendrite growth suppression by Zn^{2+} integrated nafion ionomer membranes: beyond porous separators toward aqueous Zn/V₂O₅ batteries with extended cycle life. Energy Technology 7(9) (2019): 1900442.
27. Sangsodom, P. A Study the optimization factors of injection process. Industrial Engineering (2010).
28. Chomsamutr, K. and Cherdchoongam, S. A study of efficiency of milling direction on surface roughness by using taguchi method. Kasem Bundit Engineering Journal 8(3) (2018): 246-262
29. Kasemsiri, P., Dulsang, N., Pongsa, U., Hiziroglu, S. and Chindaprasirt, P. Optimization of biodegradable foam composites from cassava starch, oil palm

- fiber, chitosan and palm oil using Taguchi method and grey relational analysis. Journal of Polymers and the Environment 25(2) (2017): 378-390.
30. Arifeen, W.U., Kim, M., Choi, J., Yoo, K., Kurniawan, K. and Ko, T.J. Optimization of porosity and tensile strength of electrospun polyacrylonitrile nanofibrous membranes. Materials Chemistry and Physics 229 (2019): 310-318.
 31. Lin, C.L. processes, Use of the Taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. Materials and Manufacturing Processes 19(2) (2004): 209-220.
 32. Mi, H.-Y., Jing, X., Napiwocki, B.N., Hagerty, B.S., Chen, G. and Turng, L.S. Biocompatible, degradable thermoplastic polyurethane based on polycaprolactone-block-polytetrahydrofuran-block-polycaprolactone copolymers for soft tissue engineering. Journal of Materials Chemistry B 5(22) (2017): 4137-4151.
 33. Glowinska, E., Wolak, W. and Datta, J. Eco-friendly route for thermoplastic polyurethane elastomers with bio-based hard segments composed of bio-glycol and mixtures of aromatic-aliphatic and aliphatic-aliphatic diisocyanate. Journal of Polymers and the Environment 29 (2021): 2140-2149
 34. Tarus, B., Fadel, N., Al-Oufy, A. and El-Messiry, M. Effect of polymer concentration on the morphology and mechanical characteristics of electrospun cellulose acetate and poly (vinyl chloride) nanofiber mats. Alexandria Engineering Journal 55(3) (2016): 2975-2984.
 35. Jacobs, V., Anandjiwala, R.D. and Maaza, M. The influence of electrospinning parameters on the structural morphology and diameter of electrospun nanofibers. Journal of Applied Polymer Science 115(5) (2010): 3130-3136.
 36. Beachley, V. and Wen, X. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. Materials Science and Engineering C 29 (2009): 663-668.
 37. Tipduangta, P. and Sirithunyaalug, J. Fundamental and Application of Electrospinning Technology in Pharmaceuticals and Cosmetics. IJPS 13(2) (2017): 1-15.

38. Hekmati, A.H., Rashidi, A., Ghazisaeidi, R., and Drean, J.Y. Effect of needle length, electrospinning distance, and solution concentration on morphological properties of polyamide-6 electrospun nanowebs. Textile Research Journal 83(14) (2013): 1452-1466.
39. Nelson, M.T., Keith, J.P., Li, B.B., Stocum, D.L. and Li, J. Electrospun composite polycaprolactone scaffolds for optimized tissue regeneration. Journal of Nanoengineering and Nanosystems 226(3) (2012): 111-121.
40. Sabetzadeh, N., Gharehaghaji, A.A. and Javanbakht, M. Porous PAN micro/nanofiber membranes with potential application as Lithium-ion battery separators: physical, morphological and thermal properties. Journal of Polymer Research 26(1) (2019): 20.
41. Ohzawa, Y., Nomura, K. and Sugiyama, K. Relation between porosity and pore size or pressure drop of fibrous SiC filter prepared from carbonized cellulose-powder preforms. Materials Science and Engineering: A 255(1-2) (1998): 33-38.
42. Yanilmaz, M. and Zhang, X. Polymethylmethacrylate/polyacrylonitrile membranes via centrifugal spinning as separator in Li-ion batteries. Polymers 7(4) (2015): 629-643.
43. Zainab, G., Wang, X., Yu, J., Zhai, Y., Babar, A.A., Xiao, K. and Ding, B. Electrospun polyacrylonitrile/polyurethane composite nanofibrous separator with electrochemical performance for high power lithium ion batteries. Materials Chemistry and Physics 182 (2016): 308-314.
44. Huang, X. Separator technologies for lithium-ion batteries. Journal of Solid State Electrochemistry 15(4) (2011): 649-662.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุชาวดี สายแสงธรรม
วัน เดือน ปี เกิด	16 ธันวาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ที่อยู่ปัจจุบัน	943/8 ถนนพระราม 2 ตำบลมหาชัย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY