อิทธิพลของตัวแปรอิเล็กโทรสปินนิ่งต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใยพอลิเมอร์พอลิไวนิลไพโรลิโดน

Effect of Electrospinning Parameters on Microstructure of Polyvinyl Pirrolidone Fiber

พจนารถ รัตนาวรวิเศษ และสุพัตรา วงศ์แสนใหม่*

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

Pojanart Rattanavoraviset and Supattra Wongsaenmai*

Department of Material Science, Faculty of Science, Maejo University,

Nonghan, Sansai, Chiangmai 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่งแบบทำเอง พอลิไวนิลไพโรลิโดนผสมในตัวทำละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นของพอลิไวนิลไพโรลิโดนอยู่ในช่วง 4-12 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายถูกนำมาฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยสภาวะความต่างศักย์ 10-15 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับปลายเข็มเป็น 10-15 เซนติเมตร และอัตราการไหลสารละลาย 1-4 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ตัวแปรที่ศึกษาถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ตัวแปรของสารละลาย (ความเข้มข้นของพอลิเมอร์และความหนืด) และตัวแปรในกระบวนการ (อัตราการไหลสารละลาย ความต่างศักย์ ระยะห่างของวัสดุรองรับ) โดยศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรอิเล็กโทร-สปินนิ่งกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างลักษณะของเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่เตรียมได้ เพื่อให้ได้เส้นใยพอลิเมอร์ขนาดเล็ก สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุสำหรับการกรองหรือทางการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผล ระบบนำส่งยา

คำสำคัญ : พอลิไวนิลไพโรลิโดน; อิเล็กโทรสปินนิ่ง; กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Abstract

In this work, polyvinylpyrrolidone (PVP) fibers were prepared by home-made electrospinning technique. A homogeneous solution of PVP/ethanol were prepared by varying PVP concentration in the range of 4-12 %wt. The solutions were electrospun at 10-15 kV DC by maintaining tip to

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** wongsaenmai@yahoo.com

collector distance (TCD) of 10-15 cm. and syringe rate at 1-4 ml/hr. Those parameters were studied into two parts as solution parameters (polymer concentration and viscosity) and process parameters (syringe rate, voltage, and collection distance). The microstructure was characterized by a scanning electron microscope (SEM). The correlation of working parameters and the fibers morphologies and diameters were explained. The polymer fibers are considered for filtration and medicine applications.

Keywords: polyvinylpyrrolidone; electrospinning; scanning electron microscope (SEM)

1. บทนำ

ปัจจุบันทุกประเทศทั่วโลกให้ความสำคัญกับการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพิ่มขึ้นมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแก้ปัญหาวิกฤติความต้องการทางด้านสุขภาพ พลังงานและสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อเศรษฐกิจและการแข่งขันของประเทศ โดยเส้นใยพอลิเมอร์ (polymer fiber) เริ่มมีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ในปัจจุบันและมีแนวโน้มมากยิ่งขึ้นในอนาคต ในชีวิตประจำวันมนุษย์ได้ใช้ประโยชน์จากเส้นใยในการทำเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม เชือก ด้าย ฯลฯ เส้นใยเหล่านี้มีขนาดเล็กแต่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น เส้นใยจากรังไหมมีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผม แต่ถ้าเส้นใยมีขนาดเล็กลงมากจนกระทั่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าในระดับนาโนเมตร (nanometer, nm) จะเกิดประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก [1]

โดยเส้นใยนาโนมีขนาดของรูพรุนเล็ก ส่งผลทำให้มีสมบัติพิเศษต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า หรือสมบัติทางชีวภาพที่ดีมากเหมาะสำหรับงานเฉพาะด้านซึ่งต้องการความได้เปรียบของขนาดที่เล็กมาก ๆ ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีและสารที่นำมาใช้ประดิษฐ์ ปัจจุบันเริ่มมีการประยุกต์ใช้เส้นใยนาโนทางด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ได้แก่ การประยุกต์ใช้งานของเส้นใยนาโนพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ผ้าปิดแผล ระบบนำส่งยา ระบบการกรองอย่างละเอียด เป็นต้น [1] เส้นใยพอลิเมอร์สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการดึงยืด การใช้แม่พิมพ์ ฯลฯ แต่กระบวนการเหล่านี้จะทำให้ได้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 ไมโครเมตร ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีข้อจำกัด แต่ในเทคโนโลยีสมัยใหม่สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ถึงระดับนาโนเมตร โดยใช้กระบวนการเล็กโทรสปินนิ่ง ซึ่งเส้นใยนาโนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1-100 นาโนเมตร การปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตหรืออิเล็กโทร-สปินนิ่ง (electrospinning) เป็นเทคโนโลยีใหม่อาศัยประโยชน์จากแรงทางไฟฟ้าสถิตในการผลิตเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการกล่าวถึงมากในปัจจุบัน ได้รับการจดลิขสิทธิ์เมื่อปี ค.ศ. 1934 เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนน้อยและประหยัด [2] เทคนิคอิเล็กโทร-สปินนิ่งเป็นการใช้ความต่างศักย์สูงต่อเข้ากับปลายเข็มฉีดยาบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ถ้าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงถึงจุดที่แรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์จะทำให้สารละลายพอลิ-เมอร์พุ่งลงสู่แผ่นรองที่ทำด้วยโลหะทำให้ได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กและบาง โดยในเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยระบบไฟฟ้าสถิตมีอุปกรณ์หลักเพียง 3 อย่าง ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (high-voltage power supply) หลอดรูเล็กที่ทำจากเข็มฉีดยา

(syringe) และแผ่นรองโลหะ (collector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นที่รองรับเส้นใย [3] กระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งเป็นการผลิตเส้นใยนาโนด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) ซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์ที่บรรจุในหลอดสารละลาย โดยต่อศักย์ไฟฟ้าขั้วบวกไว้ที่ปลายเข็มโลหะและศักย์ไฟฟ้าศูนย์ (ground) ที่วัสดุรองรับเส้นใย ซึ่งสารละลายจำนวนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นหยดรูปร่างครึ่งทรงกลมที่บริเวณปลายเข็มโลหะอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงตึงผิว (surface tension) แต่เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากำลังสูงจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมส่วนปลายของโลหะ ทิศของสนามไฟฟ้ามีทิศทางพุ่งออกเนื่องจากเกิดประจุไฟฟ้าบวกเกิดขึ้นที่ผิวของสารละลายจึงทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic repulsion) ขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงตึงผิว ดังนั้นหากศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดแรงผลัก (repulsive force) มากกว่าแรงตึงผิวจะส่งผลให้รูปร่างครึ่งวงกลมของสารละลายที่อยู่ปลายเข็มยืดออกเป็นรูปร่างทรงกรวย เรียกว่ากรวยเทย์เลอร์ (Taylor's cone) และเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤตค่าหนึ่งจะเกิดแรงขับดันให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ (solution jet) และยืดออกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเป็นเส้นใยพุ่งไปยังวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอ (nonwoven nanofibers) บริเวณที่หยดของสารละลายยืดออกห่างจากปลายเข็มโลหะ พบว่าสารละลายถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ผิวของสารละลายและด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำ จึงส่งผลให้เกิดลำของประจุขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงเกิดแรงที่ไม่สมดุลทำให้ลำสารละลายยืดออกในเส้นทางที่ซับซ้อน อันนำมาซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลงอย่างมาก และรอบของการบิดโค้งมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้สารละลายยืดออกเป็นเส้นที่เล็กพร้อมกับการระเหยออกจากตัวทำละลาย ในที่สุดเกิดเส้นใยแห้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรได้ [4] ในปัจจุบันมีการนำเส้นใยที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ได้แก่ (1) ด้านการกรอง เช่น การนำมาทำเป็นไส้กรองดักจับฝุ่นละอองเล็กกว่าระดับไมโคร (2) ด้านการทหาร เช่น ประดิษฐ์ชุดป้องกันอาวุธทางเคมี และ (3) ด้านการแพทย์ เช่น วัสดุปิดแผล ระบบนำส่งยา [5] ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิเล็กโทรสปินนิ่ง ได้แก่ ความต่างศักย์ อัตราการไหลของสารละลาย ระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับปลายเข็ม และความหนืดของสารละลาย ต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใยพอลิเมอร์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง เพื่อให้ได้เส้นใยที่มีผิวเรียบ ขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งเส้นใย และมีขนาดเล็ก โดยเลือกใช้พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ง่าย มีความเป็นพิษต่ำ เปียกผิวได้ดี มีการยึดติดที่ดี จึงนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายหลาย [6]

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมสารละลาย

เตรียมสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน (polyvinylpyrrolidone: M_w = 1,300,000) (Sigma-Aldrich, USA) ที่ความเข้มข้น 4, 6, 8, 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ผสมในตัวทำละลายเอทานอล (ethanol) (Merck, Germany)

2.2 การผลิตเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง

ขึ้นรูปเส้นใยด้วยเครื่องอิเล็กโทรสปินนิ่ง โดยควบคุมตัวแปรอิเล็กโทรสปินนิ่ง ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ความต่างศักย์ อัตราการไหลสารละลายระยะห่างของวัสดุรองรับที่ส่งผลต่อ

ลักษณะสัณฐานของเส้นใย ดังนี้

ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์อยู่ในช่วง 4-12 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สารละลายถูกนำมาฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยสภาวะความต่างศักย์ 10-15 กิโลโวลต์ อัตราการไหลสารละลาย 1-4 มิลลิลิตร/ชั่วโมง และระยะห่างระหว่างวัสดุรองรับกับปลายเข็มเป็น 10-15 เซนติเมตร

2.3 การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใย

ตัดแผ่นเส้นใยติดลงบนเทปคาร์บอน เพื่อยึดเส้นใยกับตัวรองรับ (stub) นำไปเคลือบทอง ต่อมานำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (JSM 5910 LV, Japan) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า จากนั้นนำภาพที่ได้มาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อหาขนาดเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของเส้นใย ต่อมานำมาสร้างกราฟการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยโปรแกรม Origin

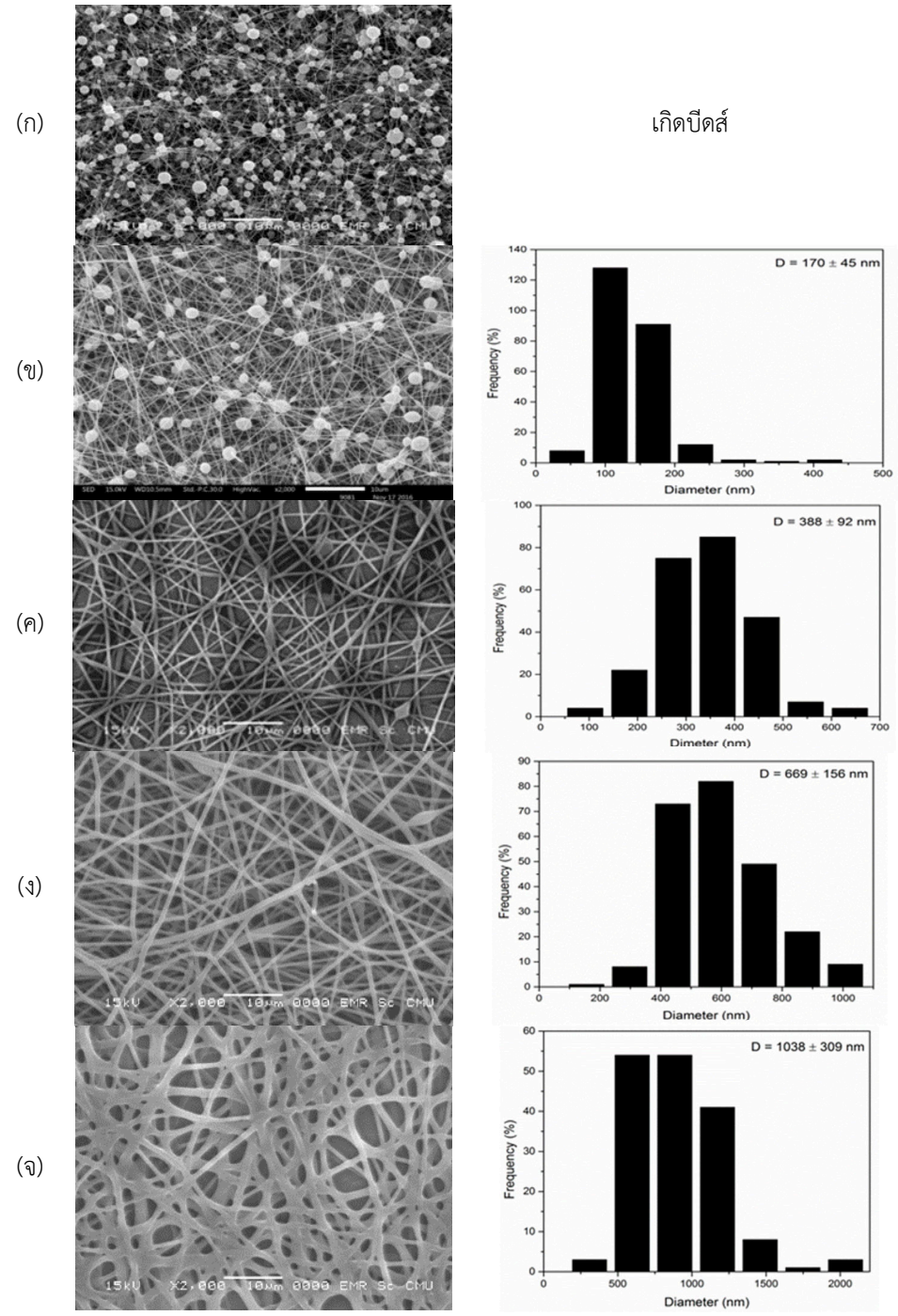
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใย

การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยด้วยเทคนิค SEM ความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน 4, 6, 8, 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร บรรจุลงในหลอดบรรจุสารละลายที่ต่อเข้ากับปลายเข็มโลหะ โดยควบคุมตัวแปร ได้แก่ ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ อัตราการไหลสารละลาย 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ระยะห่างของวัสดุรองรับ 10 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้น 4 และ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าเส้นใยพอลิเมอร์เกิดเม็ดบีดส์ขึ้น เป็นผลมาจากความเข้มข้นและความหนืดของสารละลายต่ำซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอ ในสารละลายที่มีเอทานอลมาก แรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลของเอทานอลดึงดูดกันมาก เพื่อลดพื้นที่ผิวต่อมวลของสารละลายจึงทำให้เกิดเป็นหยดทรงกลม (บีดส์) สำหรับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ 8, 10 และ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่ามีความเหมาะสมต่อการเกิดเส้นใย โดยที่ความเข้มข้น 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 390 และ 670 นาโนเมตรตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เส้นใยมีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ เป็นผลมาจากสารละลายมีความหนืดสูง ซึ่งจะมีพฤติกรรมคล้ายกับเจล ทำให้ดึงเป็นเส้นใยต่อเนื่องได้ยากขึ้น จะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1,038 นาโนเมตร [7] ดังรูปที่ 1ก ถึงรูปที่ 1จ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jing และคณะ [8] ที่ศึกษาเส้นใยผสมระหว่าง PVP/FOG ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง รายงานว่าที่ความเข้มข้นต่ำ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะเกิดบีดส์ปะปนกับเส้นใยและเส้นใยมีเส้นผ่านนศูนย์กลางเฉลี่ยไม่สม่ำเสมอทั้งเส้น ในขณะที่ความเข้มข้นมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตรขึ้นไป เส้นใยจะมีขนาดใหญ่และเกิดการยุบตัวที่บริเวณที่ซ้อนทับของเส้นใย และสารละลายมีความหนืดมากเกินไปจะทำให้การดึงเส้นใยออกจากปลายเข็มได้ยาก เส้นใยมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการศึกษานี้พบว่าความเข้มข้นสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดน

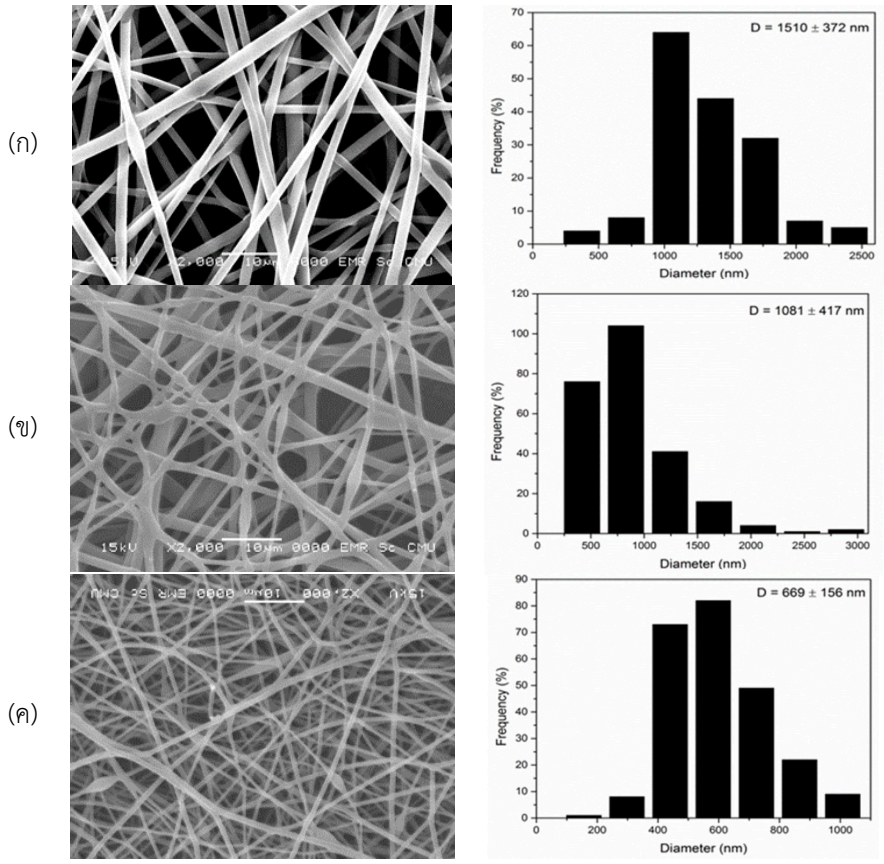
3.2 อิทธิพลของความต่างศักย์ต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใย

การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยด้วยเทคนิค SEM โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิ-



รูปที่ 1 ลักษณะสัณฐานของเส้นใย PVP ที่ความเข้มข้นของ PVP แตกต่างกัน : (ก) 4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร, (ข) 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร, (ค) 8 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร, (ง) 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร, (จ) 12 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ตัวแปรของอิเล็กโทรสปินนิ่ง : ความต่างศักย์ = 15 กิโลโวลต์, อัตราการไหลสารละลาย = 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง, ระยะห่างของวัสดุรองรับ = 10 เซนติเมตร)

ไวนิลไพโรลิโดน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ความต่างศักย์ 10, 13 และ 15 กิโลโวลต์ โดยควบคุมตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหลสารละลาย 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ระยะห่างของวัสดุรองรับ 10 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าทุกค่าความต่างศักย์สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ โดยเส้นใยมีความเรียบสม่ำเสมอ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงตามค่าความต่างศักย์ที่เพิ่มมากขึ้น จะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1510, 1081 และ 669 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2ก ถึงรูปที่ 2ค) การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า สามารถเร่งอัตราการพ่นเส้นใยในกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง ซึ่งเป็นผลทำให้ปริมาณของสารละลายที่ออกจากปลายเข็มมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น จึงสามารถเกิดเส้นใยได้มากขึ้น [9] และการที่ความต่างศักย์เพิ่มขึ้น จะทำให้มีแรงประจุเพิ่มขึ้นมากพอที่จะดึงยืดเส้นใย เป็นผลทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง [10] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Thammasit และคณะ [11] ที่ศึกษาเส้นใยนาโน PVP ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง สารละลาย PVP (M_w = 1,300,000) ที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในตัวทำละลายเอทานอล/น้ำกลั่น ที่มีอัตราส่วน 100/0, 25/75, 50/50, 75/25 และ 0/100 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร (ปริมาณ 10 มิลลิลิตร) รายงานว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ 10, 12, 14 และ 16 กิโลโวลต์ จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์-

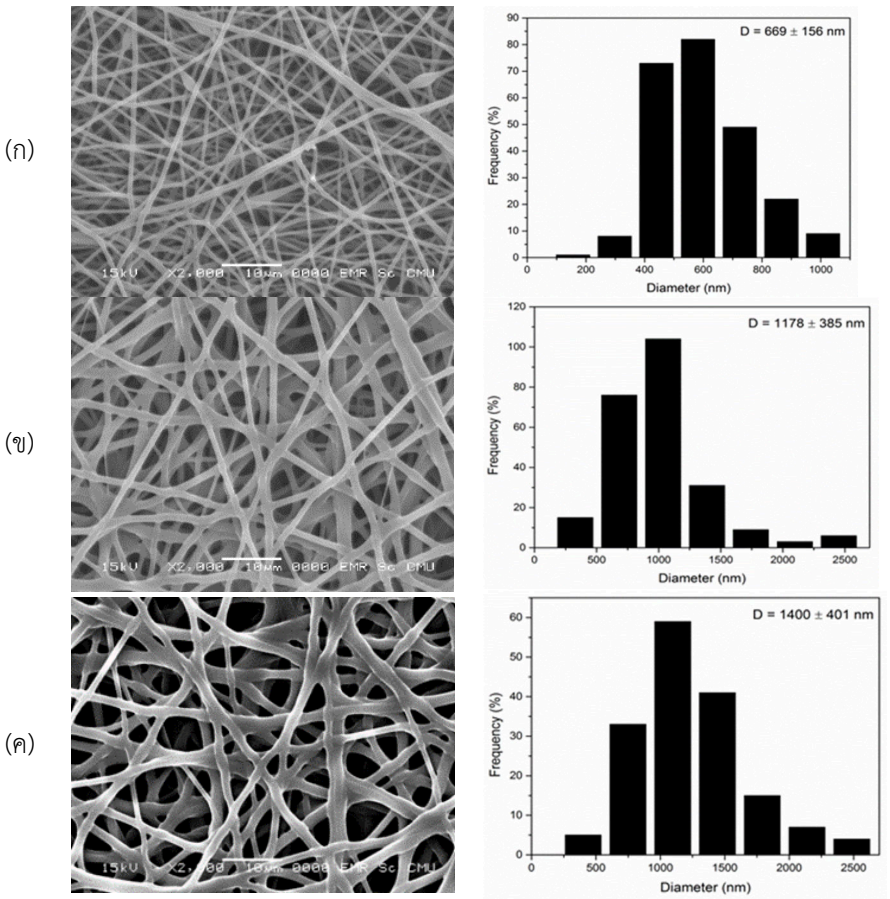


รูปที่ 2 ลักษณะสัณฐานของเส้นใย PVP ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถูกปั่นด้วยความต่างศักย์ต่าง ๆ (ก) 10 กิโลโวลต์, (ข) 13 กิโลโวลต์ และ (ค) 15 กิโลโวลต์ (ตัวแปรของอิเล็กโทรสปินนิ่ง : อัตราการไหลสารละลาย = 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง, ระยะห่างของวัสดุรองรับ = 10 เซนติเมตร)

กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 920, 620, 550 และ 490 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์ กลางเฉลี่ยของเส้นใยจะมีแนวโน้มลดลงตามความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากแรงประจุเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ลำของสารละลายพอลิเมอร์มีขนาดเล็กลง ดังนั้นจากการศึกษานี้พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดนคือ 15 กิโลโวลต์

3.3 อิทธิพลของอัตราการไหลสารละลายต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใย

การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยด้วยเทคนิค SEM โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร อัตราการไหลสารละลาย 1, 2 และ 4 มิลลิลิตร/ชั่วโมง โดยควบคุมตัวแปร ได้แก่ ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างของวัสดุรองรับ 10 เซนติเมตร จากการทดลองพบว่าทุกอัตราการไหลสารละลายสามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ โดยเส้นใยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นตามอัตราการไหลสารละลายที่เพิ่มขึ้น จะได้เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 669, 1,178 และ 1,400 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 3ก ถึงรูปที่ 3ค การที่เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมีขนาดใหญ่ เป็นผลมาจากปริมาณของสารละลายที่ออกมาสู่บริเวณปลาย-

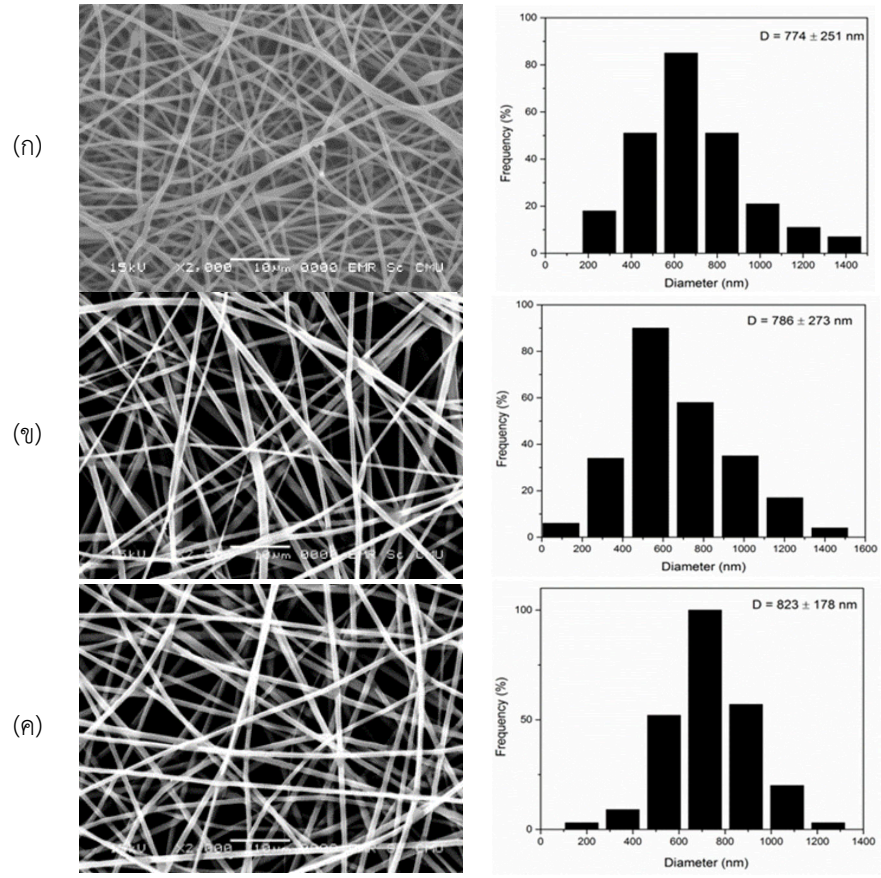


รูปที่ 3 ลักษณะสัณฐานของเส้นใย PVP ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถูกปั่นด้วยอัตราการไหลสารละลายต่าง ๆ (ก) 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง, (ข) 2 มิลลิลิตร/ชั่วโมง และ (ค) 4 มิลลิลิตร/ชั่วโมง (ตัวแปรของอิเล็กโทรสปินนิ่ง : ความต่างศักย์ = 15 กิโลโวลต์, ระยะห่างของวัสดุรองรับ = 10 เซนติเมตร)

เข็มมีปริมาณมากขึ้น จึงทำให้เกิดหยดสารละลายที่บริเวณปลายเข็มมีขนาดใหญ่ นำไปสู่การเกิดกรวยเทย์เลอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ทำให้เส้นใยที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Zargham และคณะ [12] ที่ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของสารละลายต่อลักษณะสัณฐานและการสะสมบนพื้นที่เส้นใยนาโนไนลอน 6 ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง สารละลายไนลอน 6 ที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าเมื่อให้อัตราการไหลสารละลาย 0.1, 0.5, 1 และ 1.5 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลสารละลายที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดหยดสารละลายที่บริเวณปลายเข็มเยอะ นำไปสู่การเกิดกรวยเทย์เลอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ทำให้เส้นใยที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจากการศึกษานี้พบว่าอัตราการไหลสารละลายที่ 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง เหมาะสมในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดน

3.4 อิทธิพลของระยะห่างของวัสดุรองรับต่อลักษณะสัณฐานของเส้นใย

การศึกษาลักษณะสัณฐานของเส้นใยด้วยเทคนิค SEM โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายพอลิ-



รูปที่ 4 ลักษณะสัณฐานของเส้นใย PVP ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ถูกปั่นด้วยระยะห่างวัสดุรองรับต่าง ๆ (ก) 10 เซนติเมตร, (ข) 13 เซนติเมตร และ (ค) 15 เซนติเมตร (ตัวแปรของอิเล็กโทรสปินนิ่ง : ความต่างศักย์ = 15 กิโลโวลต์, อัตราการไหลสารละลาย = 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง)

ไวนิลไพโรลิโดน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ระยะห่างของวัสดุรองรับ 10, 13 และ 15 เซนติเมตร โดยควบคุมตัวแปร ได้แก่ ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ อัตราการไหลสารละลาย 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 774, 786 และ 823 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4ก ถึงรูปที่ 4ค ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะห่างของวัสดุรองรับมีอิทธิพลต่อการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดนด้วยเทคนิคอิเล็กโทรสปินนิ่ง แต่อย่างไรก็ตาม เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบไม่มีแนวโน้ม งานวิจัยนี้ได้เลือกระยะห่างของวัสดุรองรับ 10 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นระยะห่างที่เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด

4. สรุป

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิเล็กโทรสปินนิ่งและลักษณะสัณฐานของเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดน พบว่าตัวแปรที่เหมาะสมของการขึ้นรูปเส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดน ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ อัตราการไหลสารละลาย 1 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ระยะห่างของวัสดุรองรับ 10 เซนติเมตร เนื่องจากได้เส้นใยพอลิไวนิลไพโรลิโดนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 669±156 นาโนเมตร เส้นใยมีความสม่ำเสมอที่สุดและไม่เกิดบีดส์

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ งบประมาณประจำปี 2558 และ 2559 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

6. รายการอ้างอิง

[1] Cool-pee-tunk, Electrospinning, แหล่งที่มา : http://coolpeetunk.blogspot.com/2010/10/nanofiber.html, 4 พฤศจิกายน 2559.

[2] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, Electrospinning nanofibers, แหล่งที่มา : http://www.km.itfd.rmutp.ac.th/wp-content/uploads/2010/10/ab5.pdf, 6 พฤศจิกายน 2559.

[3] ศุภวัลย์ โตเกียรติวงศ์ชัย, 2553, การปั่นเส้นใยโคพอลิเมอร์แบบสามช่วงประเภทสไตรีน-ไอโซ-ไอโซพรีน-สไตรีน ด้วยไฟฟ้าสถิตและการประยุกต์ใช้เส้นใยในวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิสไตรีนเป็นวัสดุเนื้อหลัก, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ, 148 น.

[4] Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.E., Lim, T.C. and Ma, Z., 2005, An Introduction to Electrospinning and Nanofiber, World Scientific Publishing Company, Singapore, 381 p.

[5] ปัทมา ภู่ถาวร, 2549, การศึกษาสมบัติของเส้นใยเซอินที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ, 79 น.

[6] คทายุทธ์ เลิศวิศวกร, 2550, การศึกษาสารยึดชนิดแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลไพโรลิโดนสำหรับหมึกพิมพ์เฟล็กโซกราฟี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, 70 น.

[7] Electrospin Tech. 2012, Introduction to Electrospinning Parameter and Fiber Control, Available Source: http://www.electrospintech.com/index.html, November 6, 2016.

[8] Quan, J., Yu, Y., Branford-White, C., Williams, Yu, D.G., Nie, W. and Zhu, L.M., 2011, Preparation of ultrafine fast-dissolving feruloyl-oleyl-glycerol-loaded polyvinylpyrrolidone fiber mats via electrospinning, Colloid Surf. B 88: 304-309.

[9] Zhong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B. and Chu, B., 2002, Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes, Polymer 43: 4403-4412.

[10] Lee, J.S., Choi, K.H., Ghim, H.D., Kim, S.S., Chun, D.H., Kim, H.Y. and Lyoo, W.S., 2004, Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electrospinning, J. Appl. Polym. Sci. 93: 1638-1646.

[11] Vongsetskul, T., Chantarodsakun, T., Wongsomboon, P., Rangkupan, R. and Tangboriboonnat, P., 2015, Effect of solvent and processing parameters on electrospun polyvinylpyrrolidone ultrafine fibers, Chiang Mai J. Sci. 42: 436-442.

[12] Zargham, S., Bazgir, S., Tavakoli, A., Rashidi, A.S. and Damerchely, R., 2012, The effect of flow rate on morphology and deposition area of electrospun nylon 6 nanofiber, J. Eng. Fiber. Fabr. 7: 42-49.