

การออกแบบและสร้างระบบโรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิงด้วย วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงกระแสตรงสำหรับกระบวนการผลิต เส้นใยพอลิเมอร์

จิรพัฒน์พงษ์ เสนาบุตร^{1*} และ วิเชษฐ์ ทิพย์ประเสริฐ²

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบ โรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิงด้วยวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์แรงดันสูงกระแสตรงสำหรับกระบวนการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยการทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณพัลส์ภายในวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์และทำการปรับสภาวะที่มีผลต่อคุณสมบัติของเส้นใยพอลิเมอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเซลลูล์ซและสารละลายพอลิพรอพิลีน และระยะห่างระหว่างเข็มกับตัวรองรับ อัตราเร็วรอบของแกนหมุน ผลการศึกษาพบว่า ผลของสัญญาณพัลส์ด้านเอาท์พุท TL 494 เป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่ความถี่ 10% และ 40% ที่ความถี่ 24 kHz และ 50 kHz ได้แรงดันสูงสุดที่ 6.5 kV ส่วนผลของความเข้มข้นของสารละลายเซลลูล์ซและสารละลายพอลิพรอพิลีนที่ส่งผลกับการเกิดเส้นใยพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของสารละลายเซลลูล์ซ 40 %wt ระยะห่าง 10 เซนติเมตร ที่อัตราเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเซลลูล์ซเฉลี่ย 10-70 ไมครอน ที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิพรอพิลีน 20 %wt ระยะห่าง 10 เซนติเมตร ที่อัตราเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิพรอพิลีนเฉลี่ย 5-45 ไมครอน ตามลำดับ

คำสำคัญ : เส้นใยพอลิเมอร์, โรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิง, ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

¹ สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

² สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: jirapatpong.amcet@gmail.com รับเมื่อ 29 มีนาคม 2560 ตอบรับเมื่อ 22 มิถุนายน 2560

Rotary Jet Electrospinning Design and Fabrication by DC High Voltage Fly Back Converter for Polymer Fibers Production

Jirapatpong Senabut^{1*} and Wichet Thipprasert²

Abstract

The purpose of this study was to design and fabrication of rotary jet electrospinning (RJE) technique by DC high voltage fly back converter for polymer fibers production. The efficiency of fly back converter was analyzed to pulse signal pattern. The processing conditions, including concentration of shellac and polypropylene polymer, distance between needle and collector, angular velocity and signal detection of fly back converter, respectively. The results showed that TL 494 (output) signal was rectangular pulse waveform at duty cycle 10% and 40% and constantly frequency at 24 kHz and 50 kHz which the highest voltage was 6.5 kV. The concentration of shellac and polypropylene polymer solution directly affected the formation of polymer fiber. Shellac and polypropylene polymer fibers were successfully prepared at 40 %wt, collector distance 10 cm, angular velocity rate at 2,500 rpm and diameters of fibers were in a range of 10-70 μm for shellac polymer as for the concentration of polypropylene polymer at 20 %wt, collector distance 10 cm, angular velocity rate at 3,000 rpm and diameters of fibers were in a range of 5-45 μm , respectively.

Keywords: Polymer fibers, Rotary jet electrospinning, Fly back converter

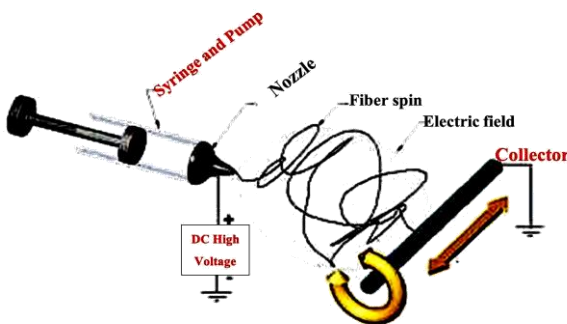
¹ Chemistry Major, Department of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University and Technology Lanna, Chiang Rai.

² Electrical Power Major, Department of Engineering, Rajamangala University and Technology Lanna, Chiang Rai.

* Corresponding author, E-mail: jirapatpong.amcet@gmail.com Received 29 March 2017, Accepted 22 June 2017

1. บทนำ

เทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นใยระดับตั้งแต่ไมโครเมตรถึงนาโนเมตร [1] ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เหมาะกับการผลิตเส้นใยในรูปของสารละลายพอลิเมอร์ เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่สารละลายจะเกิดแรงผลักริเวณผิวหน้าของสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งมีประจุเหมือนกันผ่านรูขนาดเล็กออกมาเป็นเส้นใยพอลิเมอร์ [2] ที่มีความต่อเนื่อง มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก น้ำหนักเบา และความพรุนสูง ด้วยคุณสมบัติที่พิเศษดังกล่าวจึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ เช่น ไมโคร-นาโนคอมพอสิต ตัวกรองชุดป้องกัน และงานทางการแพทย์ เป็นต้นโดยเทคนิคอิเล็กโตรสปินนิง มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ เครื่องศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง เครื่องควบคุมอัตราการไหลสารละลาย (Syringe Pump) พร้อมหลอดฉีดยาติดด้วยเข็มสแตนเลส และวัสดุรองรับที่เป็นโลหะ (Collector) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบอิเล็กโตรสปินนิง (Electrospinning)

เนื่องจากระบบอิเล็กโตรสปินนิงแบบเดิมยังคงมีปัญหาในเรื่องของระบบอัตราการไหลสารละลายที่ยังไม่สม่ำเสมอมีผลต่อขนาดเส้นใย หลอดเก็บสารละลายมีปริมาตรในการบรรจุที่มีปริมาตรน้อยทำให้ต้องหยุดระบบแล้วทำการเติมสารละลายใหม่ แกนมอเตอร์หมุนของตัวรองรับต้องสัมพันธ์กับอัตราการป้อนของสารละลายเพื่อให้เส้นใยที่ออกมามีความต่อเนื่อง และตัวระบบของเครื่องยังมีการแยกชิ้นส่วนทำให้ต้องตรวจสอบระบบด้วยความระมัดระวัง จากปัญหาเหล่านี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการออกแบบและสร้างระบบการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยระบบโรตารีเจ็ตอิเล็กโตรสปินนิง (Rotary Jet Electrospinning; RJE) ที่ใช้หลักการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยแกนหมุนอยู่กับที่แกนหมุนกับตัวรองรับสารละลายความเร็วเชิงมุม (ω) ตามแกนหมุนที่ยึดติดกับบ่อเก็บสารละลาย (Rotary solution reservoir) โดยมีอัตราเร็วรอบ (V) และรัศมีของแกนหมุน (r) เมื่อมีสารละลายพอลิเมอร์ซึ่งอยู่ภายใต้แรงดันภายใน (Hydrostatic pressure) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ (m) โดยจะเกิดแรงผลักริเวณศูนย์กลาง (Centrifugal force) แสดงดังสมการที่ 1 และรูปที่ 2 [3-6]

จากหลักการนี้ได้มีนักวิจัยที่ทำการออกแบบและสร้างระบบมินิโรตารีฟอर्सอิเล็กโตรสปินนิงสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยนาโนไฟเบอร์ด้วยการใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อเพิ่มการยึดของเส้นใยนาโนด้วยอัตราเร็วรอบที่สูงด้วยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถใช้อัตราเร็วรอบในช่วง 3,000-18,000 รอบต่อนาที และระบบแผงควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยอลูมินาและพอลิเอททิลีนออกไซด์ที่อัตราเร็วรอบ 2,000 และ 3,000 รอบต่อนาที นอกจากนี้

การใช้อัตราเร็วรอบที่สูงมากไปจนถึง 45,000 รอบต่อ นาที ระยะห่างของตัวรองรับ และความหนืดของ สารละลายเป็นปัจจัยระบบที่สำคัญที่ทำให้ไม่มีการเกิด เม็ดบีดจนกลายเป็นเส้นใยที่มีความต่อเนื่องจนถึงระดับ นาโน [7-8] อีกทั้งยังได้มีการเปรียบเทียบระบบฟอรัส- อีเล็กโตรสปินนิ่งหมุนเหวี่ยงแบบเดิมกับระบบฟอรัส- อีเล็กโตรสปินนิ่งที่ทำการสร้างขึ้นใหม่สำหรับผลิตเส้น ใยพอลิเมอร์ขนาดเล็กโดยเป้าหมายเพื่อต้องการลด อัตราเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงและแรงดันไฟฟ้า โดย ระบบอีเล็กโตรสปินนิ่งแบบเดิมจะใช้แรงดันไฟฟ้า ในช่วง 10-30 กิโลโวลต์ และอัตราเร็วรอบในการหมุน อยู่ในช่วง 4,000-12,000 รอบต่อนาที และระบบฟอรัส- อีเล็กโตรสปินนิ่งแบบใหม่จะใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วงต่ำ ที่ 2.8-6.0 กิโลโวลต์ อัตราเร็วรอบในการหมุนอยู่ในช่วง ต่ำที่ 360-540 รอบต่อนาที ระยะห่างระหว่างแกนหมุน ในช่วง 2.0-4.0 เซนติเมตร โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ แรงดันไฟฟ้า อัตราเร็วรอบ ระยะห่างตัวรองรับ และ ความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการเกิดเส้นใย พบว่า ใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 3 กิโลโวลต์ อัตราเร็วรอบ 420 รอบต่อนาที ระยะห่างตัวรองรับที่ 2.0 เซนติเมตร และความเข้มข้นของสารละลายพอลิสไตรีนพอลิเมอร์ ที่ 18 % โดยน้ำหนัก มีค่าการกระจายตัวเป็นของเส้นใย อยู่ที่ประมาณ 97 % ตามลำดับ [9] และด้วยระบบอีเล็ก- โตรสปินนิ่งแบบหมุนเหวี่ยงที่ทำการออกแบบ และสร้างจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทาง ด้านชีวการแพทย์จากการใช้สารละลาย Poly (3- hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate; PHBV) ในการ ขึ้นรูปเส้นใยไมโคร-นาโนสำหรับใช้กับงานทางด้าน วิศวกรรมเนื้อเยื่อ เช่น กระดูก กระดูกอ่อน ผิวหนัง และ เส้นประสาท เป็นต้น และจะทำการศึกษาระบบ ได้แก่

อัตราเร็วรอบในการหมุน ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับ ตัวรองรับ และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ รวมถึงการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใย [10-11]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีการพัฒนาออกแบบและสร้าง ระบบโรตารีเจ็คทีอีเล็กโตรอีเล็กโตรสปินนิ่ง (RJE) โดย อาศัยหลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการผลิตเส้นใย เซลล์เล็กที่ได้จากครั้งที่ทำให้ได้ง่ายตามท้องถิ่น และพอลิ- พรอปิลีนที่มีราคาถูก มีขายตามท้องตลาด พร้อมด้วยใช้ แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง โดยใช้หลักการของ วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ ด้วยการนำหม้อแปลง ฟลายแบคในโททรทัศน์มาเป็นตัวจ่ายไฟฟ้า [12] ให้ มากกว่าหรือเท่ากับ 6 กิโลโวลต์ ซึ่งมีต้นทุนต่ำ และมี ขนาดเล็ก อีกทั้งระบบอีเล็กโตรสปินนิ่งจะรวมเอาชุด อุปกรณ์ทั้ง 3 ส่วนรวมไว้ในชุดเดียวกันซึ่งสามารถ เคลื่อนย้าย กะทัดรัด และง่ายต่อการประกอบ พร้อมทั้ง ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบ RJE ได้แก่ ความเข้มข้นของ สารละลายพอลิเมอร์ อัตราเร็วรอบการหมุนเหวี่ยง (รอบ/นาที) ระยะห่างระหว่างเข็มกับตัวรองรับ และทำ การทดสอบวงจรประสิทธิภาพของวงจรในแหล่งจ่าย ไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูงสำหรับการเตรียมเส้นใย- พอลิเมอร์

2. วิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบระบบโรตารีเจ็คทีอีเล็กโตรสปินนิ่ง

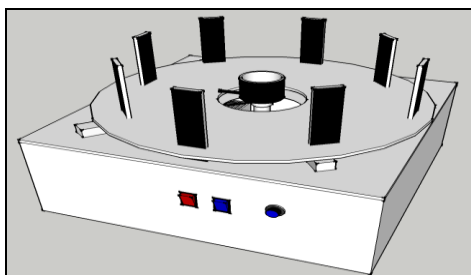
การออกแบบระบบสำหรับการผลิตเส้นใยพอลิ- เมอร์จะมีส่วนประกอบแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3 โดยระบบจะถูกออกแบบไว้ในเครื่องเดียวกันโดยใช้ หลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ด้วยการพัฒนาชุด บ่อเก็บสารละลายที่สามารถบรรจุสารละลายได้มากขึ้น

อัตราเร็วรอบในการเหวี่ยงสารละลายเพื่อเพิ่มการยึดของเส้นใยพอลิเมอร์ และการปรับระยะห่างของตัวรองรับเส้นใยที่สามารถปรับระดับได้ อีกทั้งเครื่องที่ออกแบบและผลิตสามารถเคลื่อนย้าย และง่ายต่อการใช้งาน

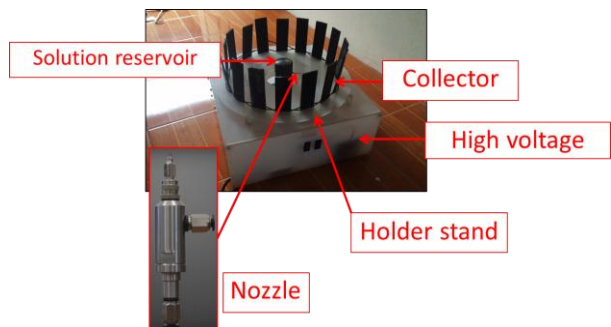
2.2 การออกแบบระบบวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ระบบวงจรมีใช้ไฟกระแสตรงแรงดันสูงด้วยวงจรพัลส์เบอร์ TL494 ในการควบคุมสัญญาณพัลส์ตรงขาที่ 3 และปรับสัญญาณคลื่นแบบพัลส์ (Duty cycle) ที่ตำแหน่งตัวต้านทานซึ่งปรับค่าได้ (VR1) 0 – 80 % และความถี่ของสัญญาณที่ 24 และ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ปรับควิตซ์ไซเคิล 10-40% โดยกำหนดจาก (VR2, C1) ที่ต่อจากขา 5 และขา 6 และเมื่อได้สัญญาณพัลส์ตามที่ต้องการแล้วจากนั้นนำไปผ่านวงจรถับเกตของมอสเฟต (M) เบอร์ TLP250 ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ หม้อแปลงฟลายแบคมีอัตราส่วนจำนวนรอบ $N_1:N_2$ ทำหน้าที่เป็นตัวเก็บพลังงานและแยกกราวด์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 4

$$F_{\text{centrifugal}} = m\omega^2 R \quad (1)$$

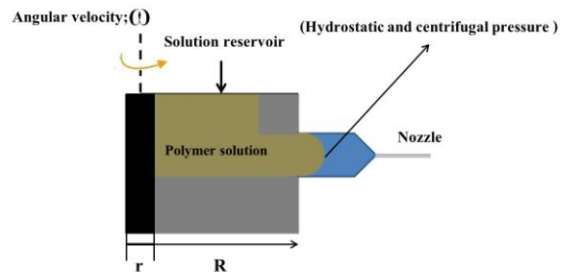


(a)

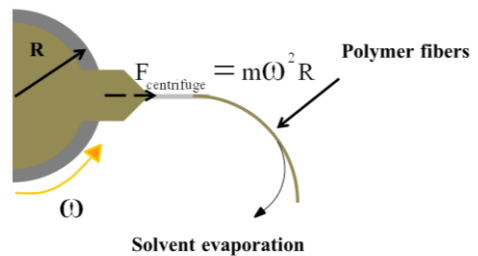


(b)

รูปที่ 3 ระบบโรตารีเจ็ตอิเล็กโตรสปินนิ่ง (a) การออกแบบระบบเครื่องด้วยโปรแกรมทางวิศวกรรม (Solid work) และ (b) ระบบเครื่องที่ทำการสร้างขึ้น



(a)

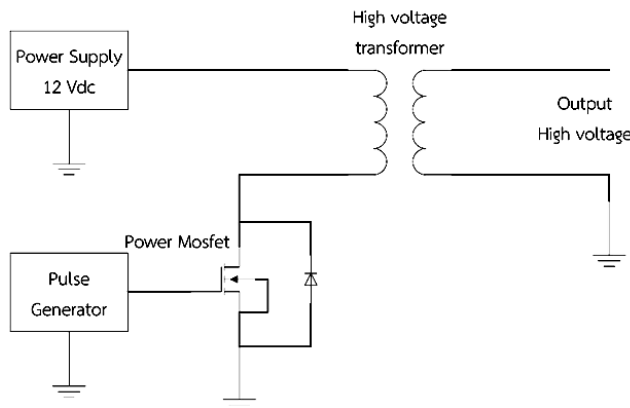


(b)

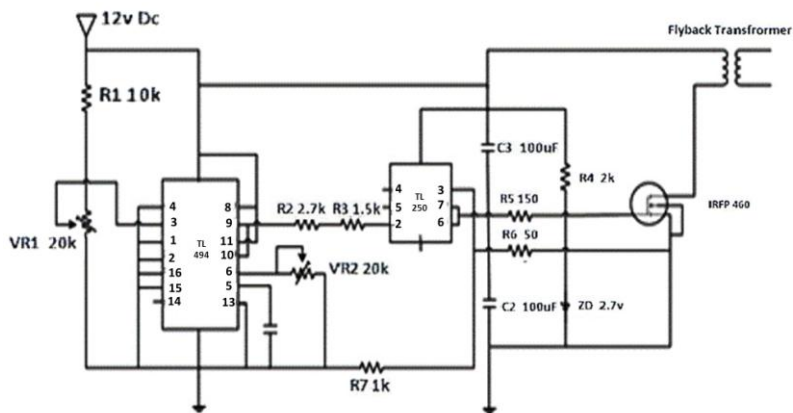
รูปที่ 2 ส่วนขยายของกระบวนการเกิดเส้นใยพอลิเมอร์ระบบ RJE (a) ความเร็วเชิงมุมของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของบ่อเก็บสารละลาย และ (b) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ [4]

ตารางที่ 1 ระบบโรตารีเจ็ทอิเล็กทรอนิกส์ปืนนิ่ง

ระบบ	ส่วนประกอบ
ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage; HV)	แรงดัน ไม่เกิน 6.5 กิโลโวลต์ กระแสตรง ระบบสัญญาณพัลส์
บ่อเก็บสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer solution reservoir)	- เป็นวัสดุสแตนเลสทรงกระบอก สูง 4.0 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 เซนติเมตร (พร้อมชุดประกอบหัวเข็ม) - ความจุปริมาตรไม่เกิน 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร
มอเตอร์ (Motor)	- อัตราเร็วรอบ 3000-4000 รอบต่อนาที - แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ 12v~60 โวลต์
ตัวรองรับเส้นใย (Collector)	ฐานยึด แผ่นอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 เซนติเมตร ฐานรับ แผ่นเหล็กขนาด 4x13 เซนติเมตร ปรับระยะห่างระหว่างเข็มที่ 5 และ 10 เซนติเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์พื้นฐาน (ก) แผนภูมิวงจรการทำงานไฟฟ้าแรงดันสูง และ (ข) วงจรสมมูล

2.3 การทดสอบสัญญาณวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

ทำการอ่านสัญญาณควบคุมด้านเอาต์พุตของไอซีเบอร์ TL494 จากเครื่องมือวัดในรูปแบบของสัญญาณ (โดยปรับค่าดิ้วตี่ไซเคิล 10 และ 40 % ที่ค่าความถี่ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 50 กิโลเฮิร์ตซ์) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลทางด้านไฟฟ้า

2.4 การเตรียมสารละลายเซลลิกและสารละลายพอลิพรอพิลีน

เตรียมสารละลายเซลลิกที่ 20, 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ด้วยการละลายครั้งลงในสารละลายเอทานอล (99.9%, AR grade, RCI Labscan, Thailand) และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปั่นด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่อัตราเร็วรอบมากกว่า 8,000 รอบต่อนาที เพื่อแยกตะกอนและสิ่งเจือปนออก ในส่วนสารละลายพอลิเมอร์มาตรฐานสามารถเตรียมได้จากสารละลายพอลิพรอพิลีน (Thai Polypropylene Co, Ltd เกรด P401S, Pellet) ในตัวทำละลายโทลูอีน (Toluene, AR grade, RCI Labscan, Thailand) ที่อัตราส่วนของ 20 % โดยน้ำหนัก

สำหรับใช้เป็นตัวแทนมาตรฐานขนาดของเส้นใยพอลิเมอร์ ตามลำดับ

2.5 การศึกษาสภาวะของระบบโรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิงและการประเมินผลของเส้นใยพอลิเมอร์

นำสารละลายเซลลิกและสารละลายพอลิพรอพิลีนที่เตรียมได้บรรจุใส่ลงในบ่อเก็บสารละลายของระบบโรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิง จากนั้นทำการศึกษาสภาวะของระบบที่มีผลต่อเส้นใยเซลลิกและเส้นใยพอลิพรอพิลีน เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ระยะห่างระหว่างเข็มกับตัวรองรับ และอัตราเร็วรอบ แสดงผลการทดลองของการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ แสดงดังตารางที่ 2

2.6 วิเคราะห์คุณลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ทำการวิเคราะห์ลักษณะเส้นใยด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) และทำการวิเคราะห์ขนาดของเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยโปรแกรม imageJ version 7J

ตารางที่ 2 สภาวะการทดลองของการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์

สถานะการทดลอง	เซลลิก		
	ความเข้มข้นของสารละลาย (%โดยน้ำหนัก)	ระยะห่างตัวรองรับ (เซนติเมตร)	อัตราเร็วรอบ (รอบ/นาที)
1	20		
2	30	5	2,500
3	40		
4	20		
5	30	10	2,500
6	40		

ตารางที่ 2 สภาวะการทดลองของการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ (ต่อ)

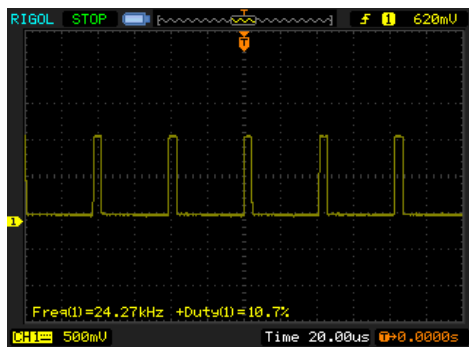
สภาวะการทดลอง	พอลิพรอพิลีน		
	ความเข้มข้นของสารละลาย (%โดยน้ำหนัก)	ระยะห่างตัวรองรับ (เซนติเมตร)	อัตราเร็วรอบ (รอบ/นาที)
7	20	10	3,000

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

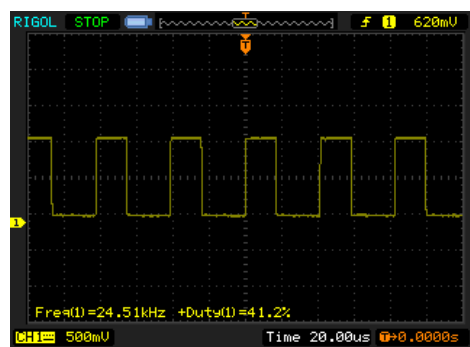
3.1 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

จากผลของการวัดสัญญาณด้านเอาต์พุต TL 494 ว่าได้รูปของสัญญาณเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมที่สามารถปรับความถี่ได้ 10% และ 40% โดยสามารถคงค่าความถี่ไว้ที่ 24 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่ง

เป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้ เนื่องจากเมื่อมีการปรับความถี่เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเพิ่มขึ้นและสัญญาณพัลส์มีคลื่นสัญญาณเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์สวิตซ์โดยแรงดันเอาต์พุต (out put) ที่วัดได้มีแรงดันเท่ากับ 6.5 กิโลโวลต์ ตามโหลด แสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6

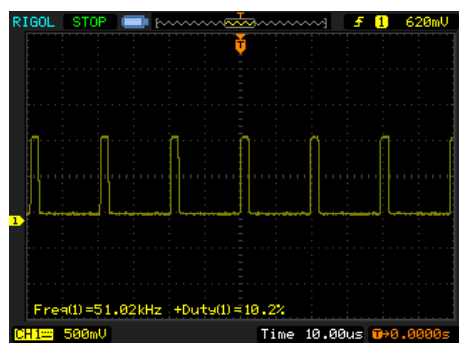


(a)

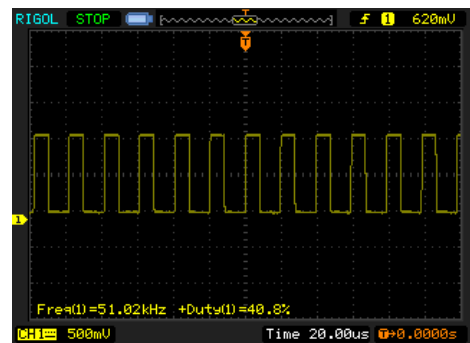


(b)

รูปที่ 5 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากเอาต์พุตที่ค่ารอบทำงาน 10 % ที่ (a) 24 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 50 กิโลเฮิร์ตซ์



(c)

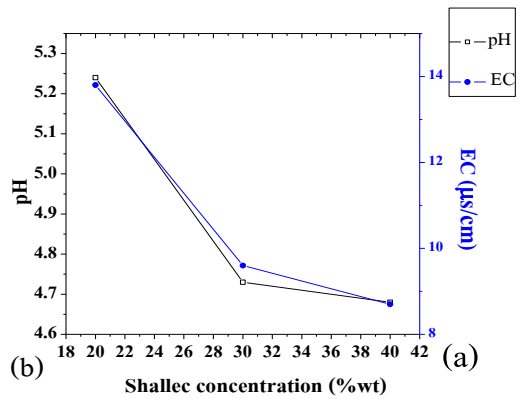
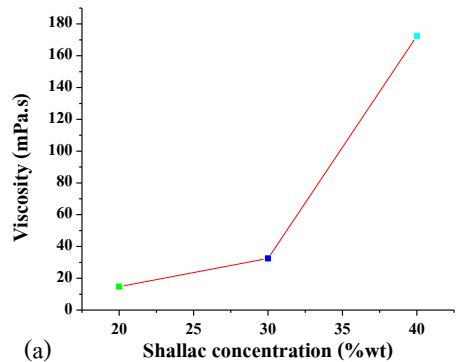


(d)

รูปที่ 6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่ออกจากเอาต์พุตที่ค่ารอบทำงาน 40 % ที่ (c) 24 กิโลเฮิร์ตซ์ และ (d) 50 กิโลเฮิร์ตซ์

3.2 ผลของค่าความหนืด ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายพอลิเมอร์

ผลความเข้มข้นของเซลล์ต่อความหนืด ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าในตัวทำละลายเอทานอล แสดงดังรูปที่ 7 จากผลการทดลอง พบว่า สารละลายเซลล์เล็กมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์ โดยค่าความหนืดมีผลต่อการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ และค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเซลล์เล็กมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเซลล์ซึ่งค่าพีเอชมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดที่สูงขึ้นเพราะว่าสารละลายเซลล์เล็กจะไม่ละลายในพีเอชต่ำแต่จะละลายได้ดีเมื่อมีพีเอชสูงขึ้น [13] ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติของค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ของตัวทำละลายเอทานอลที่มีค่าสูงทำให้เกิดการละลายได้ดีจึงช่วยลดการเกิดปมและขนาดของเส้นใยลงได้ [14] และค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของเซลล์เพิ่มขึ้นจะมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี เมื่อค่าการนำไฟฟ้าสูงความสามารถในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าได้ดีกว่าสารละลายเซลล์เล็กที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นเส้นใยที่พุ่งออกจากสารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงจะเกิดแรงดึงของสารละลายได้ดีกว่าสารละลายที่มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำทำให้ได้เส้นใยขนาดเล็ก [13-15] ในส่วนของสารละลายพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ที่สภาวะการทดลองที่ 7 มีค่าความหนืดเท่ากับ 24,326.4 mPa·s เนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์มีค่าความหนืดที่สูงมากทำให้เส้นใยพอลิเมอร์มีความพันเกี่ยวสูง เมื่อถูกสะบัดออกมาจากปลายเข็มในกระบวนการปั่นเหวี่ยง ทำให้เส้นใยที่ได้มีความต่อเนื่องเป็นเส้นมากขึ้น



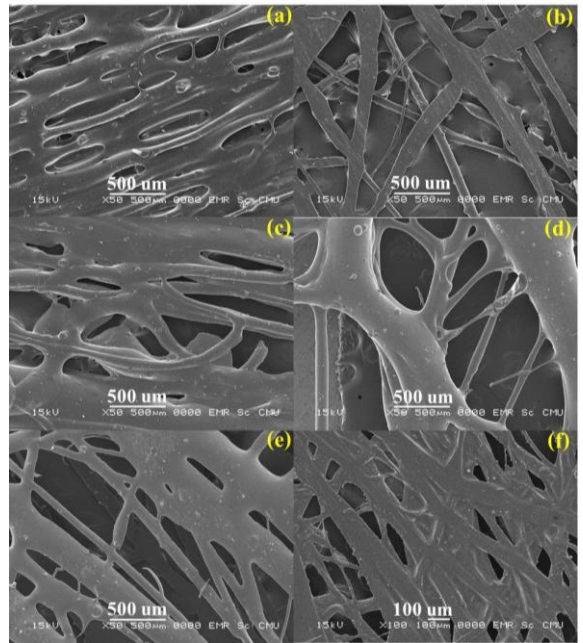
รูปที่ 7 ผลของความเข้มข้นของเซลล์เล็กต่อ (a) ค่าความหนืด และ (b) ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า

3.3 ผลของขนาดและการกระจายของเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผลิตจากระบบโรตารีเจ็ตอิเล็กโตรสปินนิง

ผลของขนาดและการกระจายของเส้นใยพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากระบบโรตารีเจ็ตอิเล็กโตรสปินนิง ได้แก่สารละลายเซลล์เล็กและสารละลายพอลิพรอพิลีน พบว่าที่ระยะห่าง 5 และ 10 เซนติเมตร ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 6.5 กิโลโวลต์จากการทดลอง พบว่า ที่สภาวะการทดลองที่ 2 และ 3 พบว่า มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเซลล์เล็ก คือ 78 และ 52 ไมครอน และเมื่อวิเคราะห์จากภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 8 (a) และ (b)

ที่สภาวะการทดลองที่ 3 มีการกระจายตัวของเส้นใยพอลิเมอร์ที่สม่ำเสมอมากกว่า ส่วนที่สภาวะการทดลองที่ 1 ไม่สามารถขึ้นรูปเส้นใยได้ ที่สภาวะการทดลองที่ 4, 5 และ 6 พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยเซลเล็ก คือ 91, 67 และ 66 ไมครอน จากการวิเคราะห์ภาพถ่าย SEM แสดงดังรูปที่ 8 (c), (d) และ (e) พบว่าสภาวะการทดลองที่ 6 มีการกระจายตัวของเส้นใยพอลิเมอร์ที่เห็นเป็นเส้นใยเด่นชัดขึ้น และสภาวะการทดลองที่ 7 พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยพอลิพรอพิลีน คือ 28 ไมครอน ผลแสดงดังรูปที่ 8 (f) และจากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และกระจายตัวของเส้นใยที่สม่ำเสมอเห็นเป็นเส้นใยที่ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าเครื่องโรตารีเจ็ตอิเล็กโตรสปินนิ่งที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นสามารถทำการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ได้

จากข้อมูลการกระจายตัว (Histogram) ของเส้นใยพอลิเมอร์ พบว่า จากรูปที่ 9 (a) และ (b) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยตั้งแต่ 50-110 ไมครอน และ 15-35, 45-65 และ 65-85 ไมครอน รูปที่ 9 (c), (d) และ (e) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยตั้งแต่ 63-113, 30-70 และ 10-70 ไมครอน และรูปที่ 9 (f) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยตั้งแต่ 5-45 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งขนาดของเส้นใยที่เตรียมได้จากระบบโรตารีเจ็ตอิเล็กโตรสปินนิ่งจะต้องมีการควบคุมอัตราเร็วรอบ ระยะห่างระหว่างเข็มกับตัวรองรับ และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่เหมาะสม ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราเร็วรอบในการหมุนที่สูงขึ้น ระยะห่างที่เพิ่มขึ้น ขนาดของเส้นใยพอลิเมอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง โดยสภาวะการทดลองของระบบที่สามารถนำไปใช้กับการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์คือ สภาวะการทดลองที่ 3, 5 และ 7 ตามลำดับ



รูปที่ 8 ลักษณะของเส้นใยพอลิเมอร์ (a) และ (b) โครงสร้างเส้นใยเซลเล็กที่สภาวะการทดลองที่ 2 และ 3 (c), (d) และ (e) โครงสร้างเส้นใยเซลเล็กที่สภาวะการทดลองที่ 4, 5 และ 6 (f) เส้นใยพอลิพรอพิลีนที่สภาวะการทดลองที่ 7

3.4 ผลของระยะห่างของเข็มกับตัวรองรับและอัตราเร็วรอบ

จากผลการทดลอง พบว่า ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเซลเล็ก ที่ระยะห่าง 5 และ 10 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที มีแนวโน้มความเข้มข้นของเส้นใยมากขึ้นที่ความเข้มข้นของสารละลายเซลเล็กมากกว่า 30 % โดยน้ำหนัก โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายเซลเล็กที่ความเข้มข้น 40 % โดยน้ำหนักมีการกระจายตัวของเส้นใยที่สม่ำเสมออีกทั้งยังไม่เกิดเส้นใยปนบดซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความหนืดของสารละลายที่เพิ่มขึ้น

จากการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์ คือ ความหนืดเนื่องจากเมื่อมีการให้แรงดันไฟฟ้าแก่สารละลายพอลิเมอร์จะทำให้แรงผลักดันไฟฟ้าในสารละลายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเกิดแรงดึงผิวบริเวณปลายเข็มทำให้เกิดยึดตัวของเส้นใยพอลิเมอร์ที่และมีแรงดันภายในของบ่อเก็บสารละลายและแรงดันการหมุนเหวี่ยง เกิดเป็นแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางผลักดันให้สารละลายพอลิเมอร์พุ่งออกจากปลายเข็มไปยังตัวรองรับ โดยที่ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ยังเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้มีการยึดของเส้นใยมากขึ้นภายใต้แรงดันไฟฟ้าสามารถต้านทานแรงดึงผิวของสารละลายได้เมื่อมีความหนืดของสารละลายที่เหมาะสมในส่วนอัตราเร็วเชิงมุม และระยะห่างของตัวรองรับยังส่งผลต่อคุณภาพเส้นใยพอลิเมอร์จากงานวิจัย [13] เมื่อทำการเพิ่มอัตราเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยงสูงขึ้น พบว่า เส้นใยพอลิเมอร์ไม่ยึดติดกันเป็นแผ่นและได้เส้นใยที่สม่ำเสมอ เมื่อระยะห่างของตัวรองรับมีระยะห่างเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการยึดของเส้นใยพอลิเมอร์ที่มีขนาดเส้นใยเล็กลง

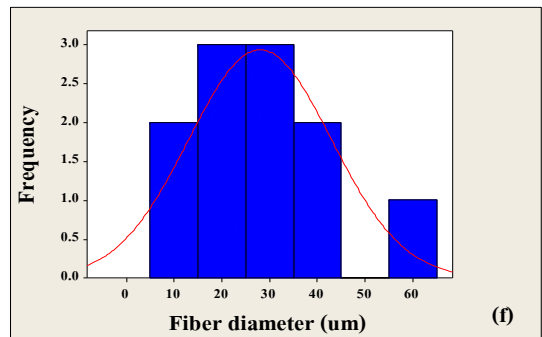
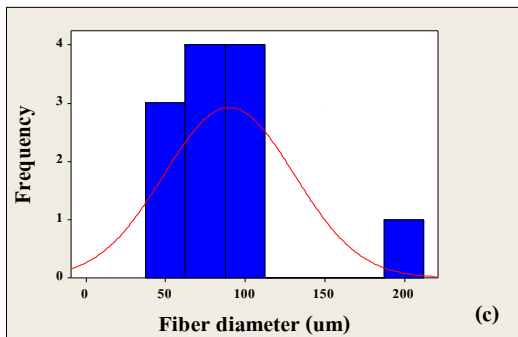
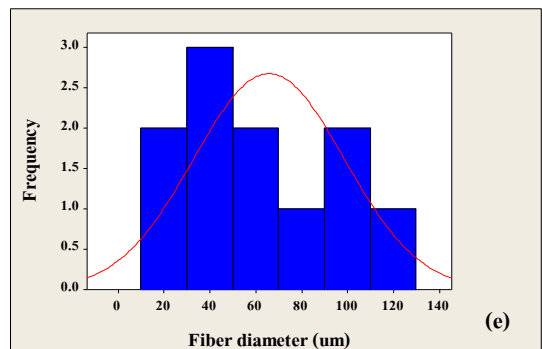
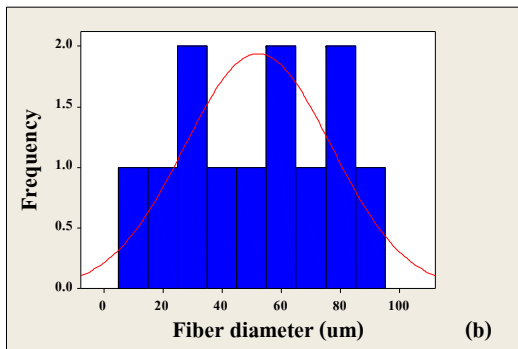
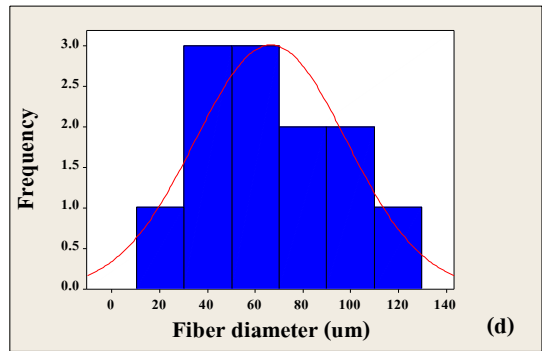
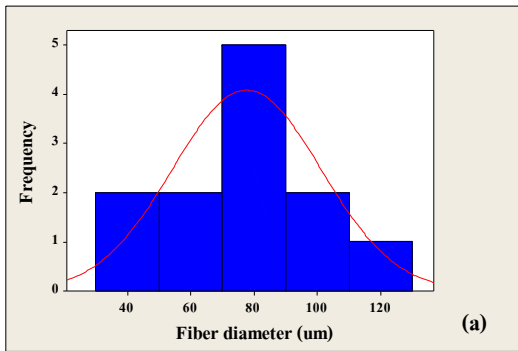
4. สรุปผล

การเตรียมเส้นใยพอลิเมอร์จากสารละลายเซลล์เล็กและพอลิพรอพิลีนด้วยการออกแบบและสร้างระบบโรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิง มีความโดดเด่น คือ การนำหลักการการหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในอัตราเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดแรงผลักดันของสารละลายพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดการยึดของเส้นใยทดแทนการใช้เข็มฉีดและปั๊มที่ต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของสารละลาย ภายใต้

วงจรรไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยการนำหม้อแปลงฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ในโททรทัศน์มาเป็นตัวจ่ายไฟฟ้า ซึ่งหาได้ง่าย และต้นทุนต่ำ โดยสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 6.5 กิโลโวลต์ อีกทั้งระบบที่ทำการออกแบบและสร้างจะรวมเอาส่วนประกอบของอิเล็กทรอนิกส์เป็นแบบเดิมรวมไว้เข้าเป็นชุดเดียวกัน และสามารถควบคุมขนาดของเส้นใยพอลิเมอร์ได้จากตัวรองรับสารละลายที่ปรับรัศมีได้ โดยปัจจัยในการทดสอบสภาวะเครื่องโรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิง ที่มีส่วนสำคัญในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ คือ ความเข้มข้นของสารละลายมีเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดแรงดึงผิวทำให้เกิดการยึดของเส้นใยได้มากขึ้น ระยะห่างตัวรองรับช่วยเพิ่มรัศมีในการยึดของเส้นใย ที่สอดคล้องกับอัตราเร็วรอบในการหมุนเหวี่ยง โดยสภาวะการทดลองที่ให้ผลของขนาดเส้นใยเซลล์เล็กมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและมีความสม่ำเสมอ อยู่ในช่วงขนาดของเส้นใยพอลิเมอร์ในระดับไมโครเมตร คือ สภาวะการทดลองที่ 3, 5 และ 7 จึงทำให้ระบบ RIS สามารถที่จะนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เชียงรายสำหรับพัฒนาศักยภาพนักศึกษา ปีงบประมาณ 2559 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร และสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนงบประมาณวิจัย



รูปที่ 9 ผลค่าการกระจายตัวของเส้นใยพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากระบบ โรตารีเจ็ทอิเล็กโตรสปินนิ่งที่แรงดันไฟฟ้า 6.5 กิโลโวลต์ (a) และ (b) เส้นใยเซลลูล์โลสที่สภาวะการทดลองที่ 2 และ 3 (c), (d) และ (e) เส้นใยเซลลูล์โลสที่ทดลองที่ 4, 5 และ 6 และ (f) เส้นใยพอลิพรอพิลีนที่สภาวะการทดลองที่ 7

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Hasan, M. Alam and K.A. Nayem, “Application of Electrospinning Techniques for The Production of Tissue Engineering Scaffolds:

A Review”, European Scientific Journal 10, 2014, pp. 265-278.

[2] J. Wong, “Preparation of Electrospun Poly (vinylalcohol)/Multi-walled carbon nanotubes”,

- Proceedings The 7th National Science Research Conference, Naresuan University, Thailand, 2015, pp.1-6. (in Thai)
- [3] M.R. Badrossamay, K. Balachandran, A.K. Capulli, H.M. Golecki, A. Agarwal, J.A. Goss, H. Kim, K. Shin and K.K. Parker, “Engineering Hybrid Polymer-Protein Super-Aligned Nanofibers Via Rotary Jet Spinning”, *Biomaterials Journal* 35, 2014, pp. 3188-3197.
- [4] H. McIlwee, Golecki, H. Yuan, C. Glavin, B. Potter, M.R. Badrossamay, J.A. Goss, Michael D. Phillips and K.K. Parker, “Effect of Solvent Evaporation on Fiber Morphology in Rotary Jet Spinning”, *American Chemical Society* 30, 2014, pp. 13369–13374.
- [5] L. Ren and S.P. Kotha, “Centrifugal jet spinning for highly efficient and large-scale fabrication of barium titanate nanofibers”, *Material Letter* 117, 2014, pp. 153–157.
- [6] G.M. Gonzalez, L.A. MacQueen, J.U. Lind, S.A. Fitzgibbons, C.O. Chantre, I. Huggler, H.M. Golecki, J.A. Goss and K.K. Parker, “Production of synthetic, para-aramid and biopolymer nanofibers by immersion rotary jet-spinning”, *Macromolecular Materials and Engineering* 302, 2017, pp.1-11.
- [7] I.G.P. Agastya Eka Wiraputra, A. Fauzi, A. Zulfi and M.M. Munir and Khairurrijal, “The design of mini-rotary forcespinning system for nanofiber synthesis”, *Procedia Engineering* 170, 2017, pp. 24 -30.
- [8] L.F. Deravi, N.R. Sinatra, C.O. Chantre, A.P. Nesmith, H. Yuan, S.K. Deravi, J.A. Goss, L.A. MacQueen, M.R. Badrossamay, G.M. Gonzalez, M.D. Phillips and K.K. Parker, “Design and fabrication of fibrous nanomaterials using pull spinning”, *Macromolecular Materials and Engineering* 302, 2017, pp.1-14.
- [9] S.L. Liu, Y.Z. Long, Z.H. Zhang, H.D. Zhang, B. Sun, J.C. Zhang and W.P. Han, “Assembly of oriented ultrafine polymer fibers by centrifugal electrospinning”, *Journal of Nanomaterials*, 2013, pp. 1-9.
- [10] S.J Upson, T. O’Haire, S.J. Russell, K. Dalgarno and A.M. Ferreira, “Centrifugally spun PHBV micro and nanofibers”, *Materials Science and Engineering* 76, 2017, pp. 190-195.
- [11] F. Dabirian, S.A. Hosseini Ravandi, A.R. Pishavar and R.A. Abuzade, “A comparative study of jet formation and nanofiber alignment in electrospinning and electrocentrifugal spinning systems”, *Journal of Electrostatics* 69, 2011, pp. 540-546.
- [12] S. Ketkaew, “Design of Small Size High Voltage DC Switching Power Supply”, *Conference Sustainable Community Development, Thailand, 2012*, pp.961-966.
- [13] T. Thammachat, “Preparation and Evaluation of Shallic-Based Electrospun Fibers Containing an

- Antimicrobials Agent”, Master Thesis, School of Pharmaceutical Science, Silpakorn University, Thailand, 2010, pp. 86-87.
- [14] C. Nawani and N. Vittayakorn, “Ceramic Nanofibers”, Journal of Science Ladfrabang 20, 2011, pp. 14-28.
- [15] S. Baiguera, C.D. Gaudio, E. Lucatelli, E. Kuevda, M. Boieri, B. Mazzanti, A. Bianco and P. Macchiarini, “Electrospun gelatin scaffolds incorporating rat decellularized brain extracellular matrix for neural tissue engineering”, Biomaterials 35, 2014, pp.1205-1214.