

ผลของชนิดตัวทำละลายต่อลักษณะเส้นใยพอลิแลคไทด์ ที่เตรียมด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง

Effect of solvents on polylactide fiber morphology prepared by electrospinning process

ยศฐา ศรีเทพ¹ อรปริยา เวียงอินทร์^{1*} และ อลงกรณ์ ละม่อม¹
Yottha Srithep¹, Onpreeya Veang-in^{1*} and Alongkorn Lamom¹

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการนำเอาเส้นใยนาโนไฟเบอร์ไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้านการแพทย์ ด้านชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายต่อลักษณะเส้นใยพอลิแลคไทด์ ที่เตรียมด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง การทดลองจะเริ่มจากการนำพอลิแลคไทด์มาผสมกับตัวทำละลายต่างๆ ในอัตราส่วน 10:90 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวทำละลายสามชนิด คือ อะซิโตน คลอโรฟอร์ม และไดคลอโรมีเทน นอกจากนี้ยังศึกษาการผสมกันของตัวทำละลายทั้งสามชนิดที่อัตราส่วนต่างๆ สารละลายพอลิแลคไทด์ที่ได้จะนำมาปั่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง โดยใช้อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงวัสดุรองรับ 15 เซนติเมตร ศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง 15 กิโลโวลต์ และใช้เวลาในการปั่น 3 ชั่วโมง จากการทดลองจะพบว่าเส้นใยที่ได้จากการผสมตัวทำละลายระหว่างอะซิโตนกับคลอโรฟอร์มในอัตราส่วนร้อยละ 35:65 โดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอและเล็กที่สุดเฉลี่ยอยู่ที่ 1253.18 นาโนเมตร

คำสำคัญ: เส้นใย พอลิแลคไทด์ อิเล็กโตรสปินนิง

Abstract

Nanofibers have been used in the industries and biomedical applications for years. This research aimed to study the effect of different solvents on the morphology of polylactide (PLA) nanofibers prepared by electrospinning process. Polylactide was dissolved in difference solvents like acetone, chloroform, and dichloromethane. The ratio of polylactide and solvents was 10 and 90 by weight. The solvents used in this study were acetone, chloroform and dichloromethane. Moreover, the effects of fiber spinning using mixed solvents were studied. In which the polymer solution was spun by the electrospinning machine. The flow rate was 1 millimeter per hour, the distance between the capillary needle and the drum collector was 15 centimeter, the voltage was 15 kilovolts and the spinning time was 3

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

¹ Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150

* Corresponding author. E-mail: onpreeya.vea@msu.ac.th

hours. The morphology and size of nanofibers were determined. The results showed that the nanofibers produced by the mixed of acetone/chloroform at the ratio of 35/65 by weight had the most consistent and the lowest average diameter of 1253.18 nanometer.

Keywords: fiber, polylactide, electrospinning

บทนำ

พอลิแลกติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งเป็นสารที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง เริ่มแรกการนำ PLA ไปประยุกต์ใช้งานจะถูกจำกัดในวงแคบ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง สก๊วะที่ได้นั้นมีปริมาณน้อย และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ในปัจจุบันนักวิจัยได้ค้นพบเทคนิคการผลิต PLA ที่ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูงและมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม (Datta, & Henry, 2006) จึงส่งผลให้ PLA ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายมากขึ้น คือ PLA สามารถสก๊วะที่ได้นั้นโดยพอลิเมอร์เช่นแบบเปิดวงแหวนของแลคไทด์ ซึ่งจะทำได้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูง มีการใช้งานที่หลากหลายขึ้น เช่น ระบบการกรอง (Doshi, & Reneker, 1995) สารเคมีและเซ็นเซอร์ออปติคัล (Agarwal, Wendorff & Greiner, 2008) วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Khil, Cha, Kim, Kim, & Bhattarai, 2003; Yang, Murugan, Wang, & Ramakrishna, 2005; Kanani, & Bahrami, 2010) การรักษาบาดแผล (Kenawy et al., 2002) และการปลดปล่อยยา ซึ่งสามารถทำได้โดย electrospun nanofibres เนื่องจาก PLA มีพื้นที่ผิวสูงต่ออัตราส่วนปริมาตร ขนาดรูเล็ก และรูพรุนสูง สามารถสลายตัวได้ผลิตจากวัตถุดิบยั่งยืน (sustainable sources) มีความเป็นพิษต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงทำให้ PLA จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสามารถแก้ไขปัญหาการ

กำจัดขยะ อีกทั้งถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่นๆ (Weber, Haugeard, Festersen, & Bertelsen, 2002)

เส้นใยนาโนไฟเบอร์ (nanofibers) เป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ในระดับนาโนเมตร โดยจะมีขนาดตั้งแต่ 150-900 นาโนเมตร และมีความยาวต่อเนื่อง (Aljehani, Hussaini, Alotmany, & Aldhaheeri, 2014) ในปัจจุบันมีการนำเส้นใยนาโนไฟเบอร์มาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางไม่ว่าจะเป็นในด้านอุตสาหกรรม มีการนำไปพัฒนาต่อยอดในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่ให้คุณสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง และน้ำหนักเบา ไม่ว่าจะเป็นส่วนลำตัวของเครื่องบินหรือชิ้นส่วนของรถยนต์ (carbon nanofiber) ในด้านการแพทย์ที่นำมาใช้สำหรับสร้างโครงเลี้ยงเซลล์ในหลอดเลือดหรือผ้าปิดแผลที่สามารถป้องกันการติดเชื้อและระบายอากาศได้ดี และมีการนำมาผลิตเป็นวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ผ้าปิดจมูก วัสดุกรองน้ำ ซึ่งในอนาคตจะมีการนำเอาเส้นใยนาโนไฟเบอร์มาใช้กันอย่างแพร่หลาย (Karakas, 2015)

ในการขึ้นรูปเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง (electrostatic spinning) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะหลอมเหลวหรือสารละลาย จาก (Figure 1) เป็นกระบวนการแสดงการทำงานของกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง โดยอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าสถิต ซึ่ง

สารละลายจะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุที่มีรูขนาดเล็ก จากนั้นให้พลังงานไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความต่างศักย์ บริเวณปลายรูและฉากรองรับ จะเกิดประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น ซึ่งประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงเกิดแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น และเมื่อความต่างศักย์มีค่ามากพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดผิวของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์จะถูกดึงออกมาเป็นเส้นใยไปที่ฉากรองรับ (Kenawy et al., 2002) ซึ่งเทคนิคนี้ได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องมามากกว่า 60 ปีแล้ว และมีแนวโน้มการนำมาใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน โดยขนาดเส้นใยที่ได้จะอยู่ในช่วงไมโครถึงนาโนเมตร (Breuer, & Sundararaj, 2004; Tucker, Stanger, & Staiger, 2012) และกระบวนการ electrospinning ได้ถูกใช้มานานกว่าสามทศวรรษในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ (Shi et al., 2015) กระบวนการอิเล็กโตรสปินนิ่งได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการนี้มีความซับซ้อนน้อย สามารถผลิตเส้นใยที่มีขนาดเล็กและยาวต่อเนื่องโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากแผ่นเส้นใย

อิเล็กโตรสปินมีสมบัติที่เฉพาะและโดดเด่น ยกตัวอย่างเช่น พื้นที่ผิวต่อมวลหรือปริมาตรสูง ความเป็นรูพรุนสูง และสมบัติเชิงกลสูง ซึ่งลักษณะของเส้นใยจะถูกกำหนดโดยปัจจัยที่สำคัญ คือ สมบัติของสารละลาย เงื่อนไขของกระบวนการ และสภาพแวดล้อม การเลือกตัวทำละลายหรือสารละลายผสมเพื่อละลายพอลิเมอร์จึงเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการแก้ปัญหาคุณสมบัติของเส้นใย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของพอลิเมอร์ การนำไฟฟ้า และแรงดึงดูดผิวของสารละลายทั้งหมดมีผลสำคัญต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (Fong, Chun, & Reneker, 1999)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากระบวนการผลิตเส้นใยนาโนไฟเบอร์ด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิตด้วยพอลิแลคไทด์ เพื่อหาอัตราส่วนความเหมาะสมของสารทำละลายที่ผสมกันระหว่างอะซิโตน (ACE) คลอโรฟอร์ม (CHL) และไดคลอโรมีเทน (DCM) ในการผลิตเส้นใยที่สม่ำเสมอ ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กและสมบรูณ์ที่สุด

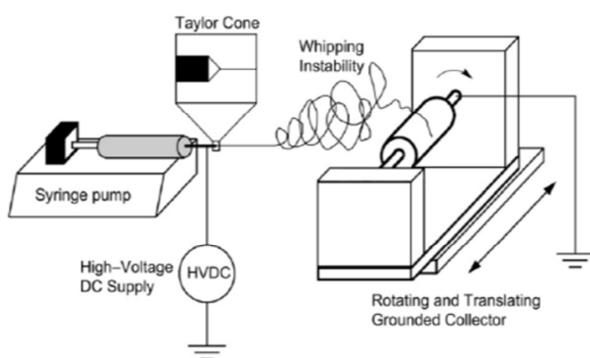


Figure 1 Electrospinning process (Kenawy et al., 2002).

วิธีการศึกษา

วัสดุ

พอลิแลคไทด์ เกรด LX175 จากบริษัท Corbion มีน้ำหนักโมเลกุล 210,000 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 1.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการไหล 6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที อุณหภูมิคล้ำวแก้ว (T_g) 55 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว (T_m) 155 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับการอัดขึ้นรูปฟิล์ม การขึ้นรูปด้วยความร้อน หรือการปั่นเส้นใย

อะซิโตน (acetone, C_3H_6O) เกรด AR จากบริษัท Anapure มีน้ำหนักโมเลกุล 58.08 กรัมต่อโมล จุดเดือด 55.80 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว -95 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.79 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นสารตัวทำละลายอินทรีย์ระเหยง่าย ใช้มากในกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมสำหรับใช้เป็นตัวทำละลายสารต่างๆ สามารถผลิตและสกัดได้จากธรรมชาติ และการสังเคราะห์ทางเคมีจากปิโตรเลียม

คลอโรฟอร์ม (chloroform, $CHCl_3$) จากบริษัท VWR BDH Prolabo chemical มีน้ำหนักโมเลกุล 119.38 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 1.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือด 59.70 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว -63.50 องศาเซลเซียส เป็นสารตั้งต้นตัวทำปฏิกิริยา และเป็นตัวทำละลาย เป็นสารควบคุม เพราะเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane, CH_2Cl_2) จากบริษัท Fisher chemical มีน้ำหนักโมเลกุล 84.93 กรัมต่อโมล ความหนาแน่น 1.32 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว -96.70 องศาเซลเซียส จุดเดือด 40 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวไม่มีสี ระเหยได้ง่าย มีกลิ่นหอม มักใช้เป็นตัวทำ-

ละลาย เนื่องจากเป็นสารประกอบคลอโรคาร์บอนที่มีอันตรายน้อยที่สุดชนิดหนึ่ง

ขั้นตอนการทดลอง

เตรียมพอลิแลคไทด์มาละลายกับตัวทำละลาย 3 ชนิด คือ อะซิโตน คลอโรฟอร์ม และไดคลอโรมีเทน ในอัตราส่วนตัวทำละลายต่อพอลิแลคไทด์ ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังศึกษาการผสมกันของสารละลายอะซิโตนผสมกับคลอโรฟอร์ม (ACE:CHL 20:80, 35:65, 50:50, 65:35, 80:20 และ 100:0 เปอร์เซ็นต์) อะซิโตนกับไดคลอโรมีเทน (ACE:DCM 20:80, 35:65, 50:50, 65:35, 80:20 และ 0:100 เปอร์เซ็นต์) และคลอโรฟอร์มผสมกับไดคลอโรมีเทน (CHL:DCM 20:80, 35:65, 50:50, 65:35, 80:20 และ 100:0 เปอร์เซ็นต์) ในอัตราส่วนต่างๆ พอลิเมอร์ที่ผสมกับตัวทำละลายถูกนำมาละลายด้วยเครื่อง hotplate stirrer (เครื่องกวนสารละลาย) ยี่ห้อ Bante รุ่น MS300 magnetic stirrer ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

สารละลายที่ได้ถูกนำมาปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตด้วยเครื่อง electrospinning โดยนำสารละลายที่เตรียมไว้ใส่ลงในหลอดบรรจุสารขนาด 6 มิลลิลิตร หัวเข็มโลหะเบอร์ 21 โดยมีความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างหลอดบรรจุสารละลายพอลิแลคไทด์กับวัสดุรองรับ 15 เซนติเมตร และใช้เวลา 3 ชั่วโมงในการปั่น

การทดสอบสัณฐานวิทยา

เพื่อดูลักษณะของเส้นใย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง การกระจายตัวของเส้นใย โดยเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำ 20 นาโนเมตร ก่อนการตรวจสอบ โดยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) LEO รุ่น LEO 1450VP

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

สัณฐานวิทยา

เป็นการตรวจสอบขนาด รูปร่าง ลักษณะและความสมบูรณ์ของเส้นใยพอลิแลคไทด์ ที่ผสมตัวทำละลายอะซิโตน คลอโรฟอร์ม และไดคลอโรมีเทน โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ศึกษาชิ้นงานที่กำลังขยาย 1000 เท่า และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจำนวน 100 จุด จาก (Figure 2) แสดงผลของตัวทำละลาย ACE, CHL และ DCM พบว่าเส้นใยที่ได้จาก PLA ละลายด้วย ACE ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่าน-

ศูนย์กลางประมาณ 1372 ถึง 3656 นาโนเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 2209.28 นาโนเมตร เส้นใยมีขนาดเล็ก เป็นเส้นยาวค่อนข้างสม่ำเสมอ (Casasola, Thomas, Trybala, & Georgiadou, 2014) แต่เนื่องจาก ACE แห้งตัวช้า จึงทำให้เส้นใยเชื่อมต่อกันเป็นก้อน บริเวณจุดเชื่อมทับกัน ส่วน PLA ที่ละลายด้วย CHL ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8511.16 นาโนเมตร พบว่าเส้นใยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ที่สุด เมื่อเทียบกับตัวทำละลาย ACE และ DCM ความยาวของเส้นใยต่อเนื่อง แต่ขนาดไม่สม่ำเสมอ และเส้นใยที่ได้จาก PLA ละลายด้วย DCM ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 2010 ถึง 12538 นาโนเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4272.67 นาโนเมตร พบว่าเส้นใยมีขนาดปานกลาง ไม่ค่อยสม่ำเสมอ

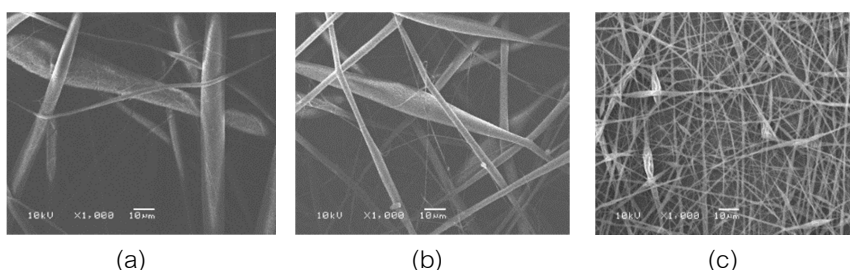


Figure 2 SEM micrographs of fibers of (a) CHL (b) DCM and (c) ACE 100% under 1000x magnification.

เมื่อผสมตัวทำละลาย ACE และ CHL ในอัตราส่วน ACE:CHL ร้อยละ 20:80, 35:65, 65:35 และ 80:20 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยจะมีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น เมื่ออัตราส่วน CHL เพิ่มขึ้น นั่นคือที่อัตราส่วน ACE:CHL ร้อยละ 20:80 โดยน้ำหนัก เส้นใยมีขนาดใหญ่ที่สุด ค่อนข้างสม่ำเสมอ และไม่ไหลเชื่อมติดกันเป็นก้อน ที่อัตราส่วน ACE:CHL ร้อยละ 35:65 พบว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่

612 ถึง 2106 นาโนเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 1253.18 นาโนเมตร มีขนาดเล็ก สมบูรณ์ สม่ำเสมอ และไม่ไหลเชื่อมติดกันเป็นก้อน และที่อัตราส่วน ACE:CHL ร้อยละ 50:50, 65:35 และ 80:20 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ใกล้เคียงกัน มีความสมบูรณ์ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่เชื่อมติดกันเป็นก้อนเล็กน้อยดังแสดงใน (Figure 3)

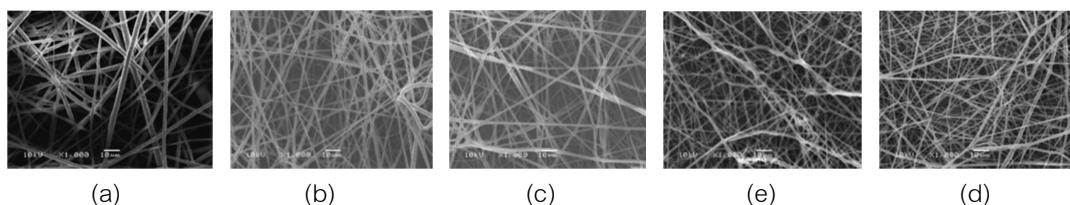


Figure 3 SEM micrographs of ACE:CHL fibers of (a) 20:80 (b) 35:65 (c) 50:50 (d) 65:35 and (e) 80:20% under 1000x magnification.

เมื่อผสมตัวทำละลาย ACE และ DCM ในอัตราส่วน ACE:DCM ร้อยละ 20:80, 35:65, 50:50, 65:35 และ 80:20 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง มีความสมบูรณ์และสม่ำเสมอมากขึ้น เมื่อปริมาณ DCM ลดลง นั่นคือที่อัตราส่วน ACE:DCM ร้อยละ 20:80 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยมี

ขนาดใหญ่ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 2238.43 นาโนเมตร และมีขนาดเล็กลงจนถึงอัตราส่วน ACE:DCM ร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยมีขนาดเล็กที่สุด คือมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ประมาณ 1394.82 นาโนเมตร เส้นใยมีความสมบูรณ์ เล็กและสม่ำเสมอ ดังแสดงใน (Figure 4)

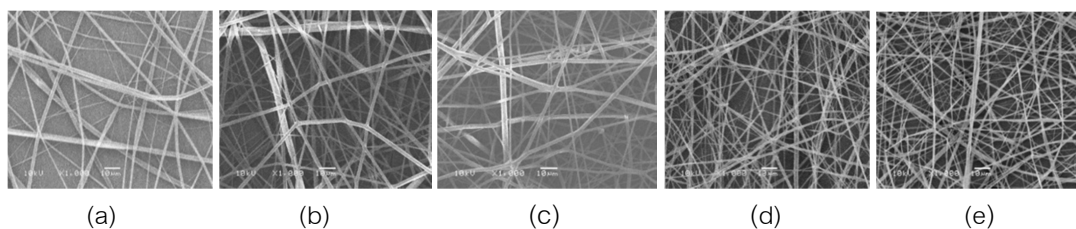


Figure 4 SEM micrographs of ACE:DCM fibers of (a) 20:80 (b) 35:65 (c) 50:50 (d) 65:35 and (e) 80:20% under 1000x magnification.

เมื่อผสมตัวทำละลาย CHL และ DCM ในอัตราส่วน CHL:DCM ร้อยละ 20:80, 35:65, 50:50, 65:35 และ 80:20 โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดของเส้นใยโดยเฉลี่ยมีขนาดลดลงตามปริมาณ DCM ที่ลดลง จนถึงอัตราส่วน CHL:DCM ร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก

โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 3391.97 นาโนเมตร พบว่าเส้นใยมีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กและสม่ำเสมอ แต่เมื่อปริมาณ DCM ลดลงมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยมีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงใน (Figure 5)

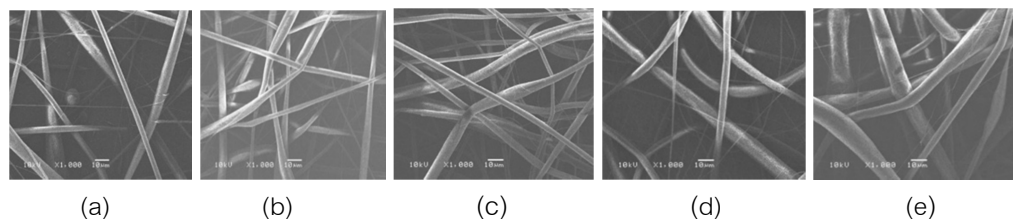


Figure 5 SEM micrographs of CHL:DCM fibers of (a) 20:80 (b) 35:65 (c) 50:50 (d) 65:35 and (e) 80:20% under 1000x magnification.

ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผสมตัวทำละลายต่างๆ ที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทั้งหมดมาเปรียบเทียบขนาด โดยใช้ค่าเฉลี่ยเส้นใยจำนวน 100 จุดพบว่าที่ตัวทำละลาย CHL ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ทำให้สารละลาย PLA มีขนาดเส้นใยที่ใหญ่ที่สุด โดย

มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 8511.16 นาโนเมตร และที่ตัวทำละลาย ACE:CHL ร้อยละ 35:65 โดยน้ำหนัก ทำให้สารละลาย PLA มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 1253.18 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กที่สุด อีกทั้งลักษณะเส้นใยยังมีความสม่ำเสมออีกด้วย ซึ่งสรุปได้ดัง (Table 1)

Table 1 Comparison results of various solvents on fiber size.

sample	average diameter (nm)	standard deviation	min diameter (nm)	max diameter (nm)
ACE (100%)	2209.28	521.18	1372.63	3656.29
CHL (100%)	8511.16	3569.46	2247.67	20059.35
DCM (100%)	4272.67	2164.63	2010.37	12538.20
ACE/CHL (20:80)	3003.01	751.15	1056.91	4670.91
ACE/CHL (35:65)	1253.18	256.99	612.59	2106.21
ACE/CHL (50:50)	2180.47	544.70	1329.56	3590.48
ACE/CHL (65:35)	2021.35	434.95	1147.42	3410.38
ACE/CHL (80:20)	1960.77	425.31	1152.62	3875.72
ACE/DCM (20:80)	2238.43	652.41	1025.55	4567.60
ACE/DCM (35:65)	2228.38	674.08	1351.40	4416.07
ACE/DCM (50:50)	2323.01	724.32	1117.51	4560.66
ACE/DCM (65:35)	1726.33	439.66	835.80	3234.81
ACE/DCM (80:20)	1394.82	436.08	637.55	3076.19
CHL/DCM (20:80)	4682.97	1778.62	2590.41	12417.18
CHL/DCM (35:65)	3607.87	985.32	1864.65	5883.48
CHL/DCM (50:50)	3391.97	915.99	1885.28	7874.18
CHL/DCM (65:35)	5342.66	1849.31	2339.28	11118.05
CHL/DCM (80:20)	6421.70	3311.93	2179.59	14755.53

สรุป

เส้นใยที่ได้จากการ ACE มีขนาดเล็กที่สุด ก่อนข้างสม่ำเสมอ เนื่องจากกระเหยตัวซ้ำจึงเกิด จุดเชื่อมระหว่างเส้นที่ทับกัน ส่วนเส้นใยที่ได้จาก CHL มีขนาดใหญ่ที่สุดและไม่สม่ำเสมอ และเส้นใยที่ได้จาก DCM มีขนาดที่ใหญ่ปานกลางและไม่สม่ำเสมอ

เส้นใยที่ได้จาก ACE ผสมกับ CHL จะมีความ สมบูรณ์และสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่ออัตราส่วน CHL มากขึ้น เช่นเดียวกับเส้นใยที่ได้จาก ACE ผสมกับ DCM จะมีความสมบูรณ์มากขึ้นเมื่ออัตราส่วน DCM มากขึ้น และเส้นใยที่ได้จาก CHL กับ DCM จะมี ขนาดเส้นใยที่ใหญ่ขึ้นเมื่อ CHL มากขึ้น

จากการเปรียบเทียบลักษณะขนาดและความ สมบูรณ์ของเส้นใยที่ได้จากทดลอง จะพบว่าเส้นใยที่ ได้จากการผสมตัวทำละลายระหว่าง ACE กับ CHL ในอัตราส่วน ACE:CHL ร้อยละ 35:65 โดยน้ำหนัก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็ก มีความสมบูรณ์ และ มีความสม่ำเสมอของเส้นใยมากที่สุด ซึ่งสามารถนำ ตัวทำละลายและอัตราส่วนดังกล่าว ไปประยุกต์ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ต้องการนำมาฉีดขึ้นรูป เป็นเส้นใยที่มีความสมบูรณ์ เพื่อสามารถนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมต่างๆ ต่อไป เช่น เส้นใยในอุตสาหกรรม เครื่องนุ่งห่ม เสื้อผ้า ผ้าเบาะรถยนต์ เป็นต้น

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม ที่ให้ความรู้และความอนุเคราะห์ สถานที่เพื่อใช้ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Aljehani, A. K., Hussaini, M. A., Alothmany, N. Sh., & Aldhaheeri, R. W. (2014). Effect of electrospinning parameters on nanofiber diameter made of poly (vinyl alcohol) as determined by Atomic Force Microscopy. In *2014 Middle East Conference on Biomedical Engineering (MECBME)*. Doha, Qatar: IEEE.
- Agarwal, S., Wendorff, J. H., & Greiner, A. (2008). Use of electrospinning technique for biomedical applications. *Polymer*, 49, 5603-5621.
- Breuer, O., & Sundararaj, U. (2004). Big return from small fibres: a review of polymer/carbon nanotubes composites. *Polymer composites*, 25, 630-644.
- Casasola, R., Thomas, N. L., Trybala, A., & Georgiadou, S. (2014). Electrospun poly lactic acid (PLA) fiber: Effect of different solvent system on fiber morphology and diameter. *Polymer*, 55, 4728-4737.
- Datta, R., & Henry, M. (2006). Lactic acid: Recent advances in products, processes and technologies a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 81, 1119-1129.
- Doshi, J. & Reneker, D. H. (1995). Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *Journal of Electrostatics*, 35, 151-160.
- Fong, H., Chun, I., & Reneker, D. (1999). Beaded nanofibers formed during electrospinning. *Polymer*, 40, 4585-4592.
- Karakas, H. (2015). *Electrospinning of nanofibers and their applications*. Istanbul: Textile Technologies and Design Faculty, Istanbul Technical University.

- Kanani, A. G., & Bahrami, S. H. (2010). Review on electrospun nanofibers scaffold and biomedical applications. *Trends Biomaterial Artificial Organs*, 24, 93-115.
- Kenawy, E. R., Bowlin, G. L., Mansfield, K., Layman, J., Simpson, D. G., & Sanders, E. H. (2002). Release of tetracycline hydrochloride from electrospun poly(ethylene-co-vinylacetate), poly(lactic acid), and a blend. *Journal of Controlled Release : Official Journal of the Controlled Release Society*, 81, 57-64.
- Khil, M., Cha, D., Kim, H., Kim, I., & Bhattarai, N. (2003). Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing. *Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterial*, 67, 675-679.
- Shi, X., Zhou, W., Ma, D., Ma, Q., Bridges, D., Ma, Y., & Hu, A. (2015). Review article electrospinning of nanofibers and their applications for energy devices. *Journal of Nanomaterials*, 2005, 1-20.
- Tucker, N., Stanger, J. J., & Staiger, M. P. (2012). The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7, 63-73.
- Weber, C. J., Haugaard, V., Festersen, R., & Bertelsen G. (2002). Production and applications of biobased packaging materials for the food industry. *Food Additives & Contaminants*, 19, 172-177.
- Yang, F., Murugan, R., Wang, S., & Ramakrishna, S. (2005). Electrospinning of nano/micro scale poly(L-lactic acid) aligned fibers and their potential in neural tissue engineering. *Biomaterials*, 26, 2603-2610.