

ORIGINAL ARTICLE

# Characterization of Polylactic Acid Nanofiber from Electrospinning Technique

Sasiprapa Chitrattha<sup>1\*</sup>, Anon Chaisenhan<sup>1</sup>, Methawee Thongnak<sup>1</sup>,  
Kritpinya Namma<sup>1</sup>, and Sontaya Limmatvapirat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Pharmacy, Siam University, Bangkok 10160, Thailand

<sup>2</sup>Department of Pharmaceutical Technology, Faculty of Pharmacy,  
Silpakorn University, Nakhonpathom 73000, Thailand

\*E-mail: sasi\_toey@hotmail.com

## Abstract

Nowadays, nanotechnology has been interested for its applications. Especially, nanofiber produced from electrospinning process because it is easy to produce, inexpensive and various properties. In this study, polylactic acid (PLA) which is biodegradability and biocompatibility was dissolved in dichloromethane (DCM) at different concentrations. Then, PLA fibers were fabricated by electrospinning technique. The viscosity of PLA solutions and physicochemical properties including morphology, size, mechanical properties, crystalline properties and thermal properties of PLA fibers were evaluated. The results showed that the increasing of viscosity of PLA solutions decreased the beads within fibers. The diameter size of PLA fibers increased when concentration of PLA solutions increased. PLA fibers displayed the amorphous form although PLA materials is semi-crystalline properties. On the other hand, the melting point of PLA fibers is similar to PLA materials. The elasticity of fibers depended on fibers arrangement. PLA fiber at concentration of 20 %w/w exhibited the consistently arrangement, without beads within fiber and resisted to the tension. The average of diameter size of that fiber was 5,000 nm. Therefore, this PLA nanofiber is appropriate to develop further to use in many applications.

**Keywords:** electrospinning, nanofibers, polylactic acid

## นิพนธ์ต้นฉบับ

### ลักษณะของเส้นใยนาโนพอลิแลคติกแอซิดจากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

ศศิประภา ชิตรัตน์<sup>1\*</sup>, อานนท์ ชัยเสนาหาญ<sup>1</sup>, เมธาวี ทองนาค<sup>1</sup>, กฤษณ์ภิญญา นามมา<sup>1</sup> และ สอนทยา ลิ้มมัทวาริรัตน์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพฯ 10160

<sup>2</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม 73000

\*อีเมล: sasi\_toey@hotmail.com

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันเส้นใยระดับนาโนเมตรที่ผลิตโดยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากผลิตง่าย ราคาถูก และมีคุณสมบัติหลากหลาย งานวิจัยนี้ใช้พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติและเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต มาขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง โดยเตรียมสารละลายพอลิแลคติกแอซิดในตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) ที่ความเข้มข้นต่างๆ นำไปขึ้นรูปเป็นเส้นใย จากนั้นนำไปประเมินความเหนียว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ขนาดของเส้นใย คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติความแข็งแรง และคุณสมบัติเชิงความร้อน ผลการประเมินพบว่าความเหนียวของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นทำให้จำนวนเม็ดบีดในเส้นใยลดลง ขนาดของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้น ความเป็นผลึกของเส้นใยลดลงแต่ยังมีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงค่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับผงพอลิแลคติกแอซิด ความยืดหยุ่นของเส้นใยขึ้นกับลักษณะการจัดเรียงตัว โดยพบว่าเส้นใยจากสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักให้เส้นใยที่มีขนาดสม่ำเสมอ ไม่พบเม็ดบีดกระจายรวมกับเส้นใย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5,000 นาโนเมตร และทนต่อแรงยึดได้ดีกว่าความเข้มข้นอื่น ดังนั้นจึงเหมาะสมนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ ต่อไป

**คำสำคัญ:** เส้นใยนาโน, พอลิแลคติกแอซิด, อิเล็กโทรสปินนิง

Received: April 28<sup>th</sup>, 2016

Accepted: June 15<sup>th</sup>, 2016

## บทนำ

เทคโนโลยีทางการแพทย์ในปัจจุบันมีความทันสมัยและสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ป่วยได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการนำเทคโนโลยีมาใช้ร่วมกับการรักษาในรูปแบบต่างๆ โดยทางเภสัชกรรมมีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในการนำส่งยา รูปแบบใหม่ ซึ่งรูปแบบที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือการเตรียมเภสัชภัณฑ์ในรูปแบบเส้นใยนาโนจากกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง (electrospinning) เนื่องจากเส้นใยนาโนสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรมได้หลากหลายด้าน จึงมีผู้สนใจลงทุนและมีการพัฒนากระบวนการผลิตมาอย่างต่อเนื่อง โดยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง หลอดบรรจุสารละลายที่ติดเข็มโลหะ และวัสดุรองรับ กระบวนการเริ่มจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูงแก่สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวผ่านเข็มโลหะที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าครอบคลุมตรงส่วนปลายเข็มโลหะและมีประจุเกิดขึ้นในทิศตรงกันข้ามกับแรงดึงดูดของสารละลายพอลิเมอร์ หยดสารละลายรูปทรงกลมบนปลายเข็มจะเริ่มเปลี่ยนรูปร่างเป็นรูปกรวยเมื่อแรงผลักทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึงค่าวิกฤติค่าหนึ่งจะเกิดแรงผลักให้สารละลายพุ่งออกมาเป็นลำ ต่อมาลำของสารละลายนี้จะยืดออกจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร และตกซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับในลักษณะที่ไม่เกิดการถักทอหรือเป็นเพียงการวางเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ (1)

พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่อยู่ในกลุ่มอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) มีลักษณะเป็นสารกึ่งผลึกละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ ถือเป็นพลาสติกชีวภาพเนื่องจากสามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ มี

ความเข้ากันได้กับสิ่งมีชีวิต และสามารถผลิตทดแทนชิ้นใหม่ได้จากธรรมชาติ อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดยังมีข้อด้อยบางประการคือมีความเหนียวต่ำ อัตราการสลายตัวช้า และไม่ชอบน้ำ (2, 3) ดังนั้นจึงมีการวิจัยเพื่อปรับปรุงข้อเสียและพัฒนาข้อดีเหล่านี้ของพอลิแลคติกแอซิดออกมามากมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านชีวการแพทย์และทางเภสัชกรรม (4)

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการขึ้นรูปพอลิแลคติกแอซิดเป็นแผ่นเส้นใยนาโนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง และทำการประเมินคุณสมบัติความเหนียว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ขนาดของเส้นใย คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติความเป็นผลึก และคุณสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นเส้นใยที่ได้ เพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดให้ได้มาซึ่งรูปแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์และทางเภสัชกรรมต่อไป

## วัสดุและวิธีการวิจัย

### 1. วัสดุที่ใช้

พอลิแลคติกแอซิด (Semi-crystalline PLA, 4% D-lactide, 96% L-lactide content, MW = 121,400 g/ mol, Grade 2002D, SCG, Rayong, Thailand) ไต ค ล อ โร มี เท น (Lot N2ZG2A, SK Chemicals, Korea) กระจกฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร (Lot.151024N, Terumo Corporation, Philippines) เข็มฉีดยา (No. 20, Lot. 11H05, NIPRO Medical Corporation, Japan)

### 2. วิธีการวิจัย

#### 2.1 การเตรียมแผ่นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง

เตรียมสารละลายพอลิแลคติกแอซิดด้วยการละลายพอลิแลคติกแอซิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 12.5, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายไตรคลอโรมีเทน ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน บรรจุสารละลายลงกระจกฉีดยาที่ติดเข็มแล้ว นำไปติดตั้งที่แท่นวางกระ

บอกฉีดยาบนเครื่องควบคุมอัตราการฉีดสารละลาย ต่อ  
 ขั้วไฟฟ้าขั้วบวกเข้ากับวัสดุรองรับ และขั้วลบต่อเข้ากับ  
 ปลายเข็ม กำหนดให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์  
 ระยะห่างระหว่างเข็มฉีดยากับวัสดุรองรับ 15 เซนติเมตร  
 อัตราการฉีดสารละลาย 1 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และ  
 ความเร็วรอบของแกนหมุนของวัสดุรองรับ 1.56 เมตร  
 ต่อนาที

## 2.2 การทดสอบความหนืดของสารละลาย

นำสารละลายพอลิแลกติกแอซิดที่ความเข้มข้น  
 ร้อยละ 1, 5, 10, 12.5, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มา  
 ทดสอบความหนืดที่อุณหภูมิห้อง shear rate 0.05-  
 0.50 sec<sup>-1</sup> ด้วยเครื่องวัดความหนืด (brookfield  
 viscometer, DV-E, Engineering laboratories. Inc.,  
 USA) ใช้หัววัดชนิด UL adaptor เบอร์ 01 (n=3)

## 2.3 การประเมินลักษณะทางกายภาพของเส้นใย

นำเส้นใยจากสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 5,  
 10, 12.5, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก มาส่องกล้อง  
 จุลทรรศน์ (digital microscopy, Dinolite, model  
 AM-313T, Germany) เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ  
 บันทึกภาพที่กำลังขยาย 40 เท่า และวัดขนาดเส้นใยจาก  
 ภาพที่ได้

## 2.4 การประเมินคุณสมบัติความเป็นผลึกของเส้นใย

ศึกษาคุณสมบัติความเป็นผลึกของแผ่นเส้นใย  
 เปรียบเทียบกับผงพอลิแลกติกแอซิดด้วยเครื่องวิเคราะห์  
 โครงสร้างผลึก (powder X-ray diffraction,  
 PXRD, Miniflex II, Rigaku Corp. Tokyo, Japan) โดย  
 ใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นทองแดง (Cu K $\alpha$ ) ที่ความ  
 ยาวคลื่น 1.541841 นาโนเมตร ศึกษาที่มุม 5 ถึง 40  
 องศาสองทีตา (2 $\theta$ ) ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ และ  
 กระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์

## 2.5 การประเมินคุณสมบัติเชิงความร้อนของเส้นใย

ศึกษาคุณสมบัติเชิงความร้อนของแผ่นเส้นใย  
 เปรียบเทียบกับผงพอลิแลกติกแอซิดด้วยเครื่องดิฟเฟอ-

เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential  
 scanning calorimeter, DSC, PerkinElmer,  
 Sapphire DSC, Japan) มีสภาวะศักย์ไฟฟ้า 115 โวลต์  
 วัดที่อุณหภูมิระหว่าง -20 ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตรา  
 การให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

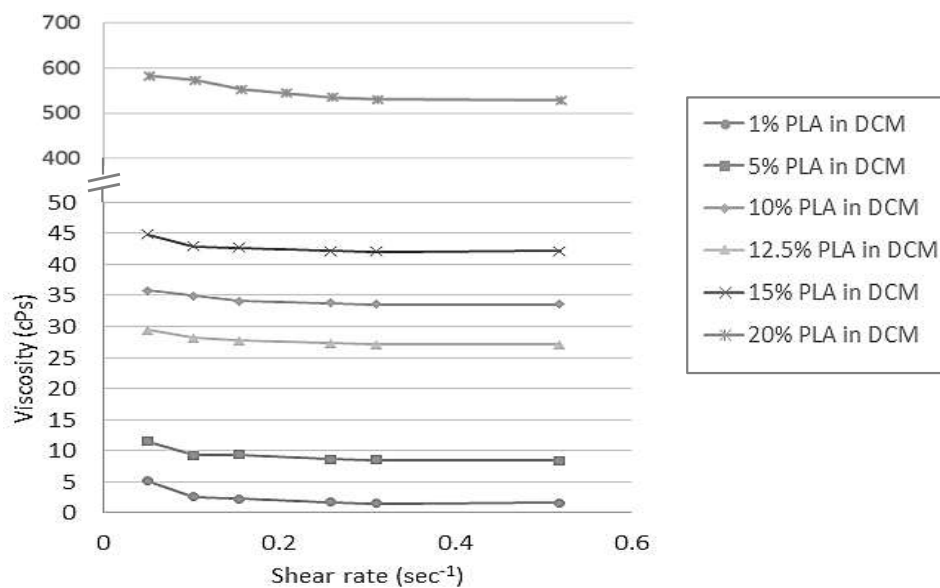
## 2.6 การประเมินคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย

นำเส้นใยตัวอย่างตัดให้ได้ขนาด 0.6 x 3 ตาราง  
 เซนติเมตร (n=10) มาศึกษาคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง  
 วิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA. XT. plus texture analyser,  
 Chapra Techcenter Co. Ltd. UK) ด้วยวิธีการดึงยืด  
 โดยใช้เครื่องถ่วงน้ำหนัก 5 กิโลกรัม และบันทึกค่า  
 ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และมอดูลัสของ  
 ยืด (young's modulus) ซึ่งบอกความยืดหยุ่นของเส้น  
 ใยได้

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. ผลการทดสอบความหนืดของสารละลาย

ความหนืดของสารละลายพอลิแลกติกแอซิด  
 แสดงในรูปที่ 1 พบว่าความหนืดมีความสัมพันธ์กับความ  
 เข้มข้นของสารละลาย คือความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น  
 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้  
 สารละลายที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะม  
 ความหนืดสูงกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก  
 แต่ค่าความหนืดที่ได้มีได้ต่างกันมากนัก ประกอบกับ  
 ความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองค่านี้มีใกล้เคียง  
 กันด้วย และพบว่าการไหลของสารละลายมีแนวโน้มเป็น  
 แบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic behavior) ในทุก  
 ความเข้มข้น คือของเหลวจะเริ่มไหลเมื่อมีแรงกระทำ  
 และจะไหลดีขึ้นเมื่อมีแรงกระทำมากขึ้นซึ่งอัตราเร็วไม่  
 เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่ใช้ ซึ่งสอดคล้องกับ  
 การศึกษาการไหลของสารละลายพอลิแลกติกแอซิดจาก  
 การทดลองของ Oliveira และคณะ (5)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (shear rate) กับความหนืด (viscosity) ของสารละลายพอลิแลคติกแอซิด ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1, 5, 10, 12.5, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

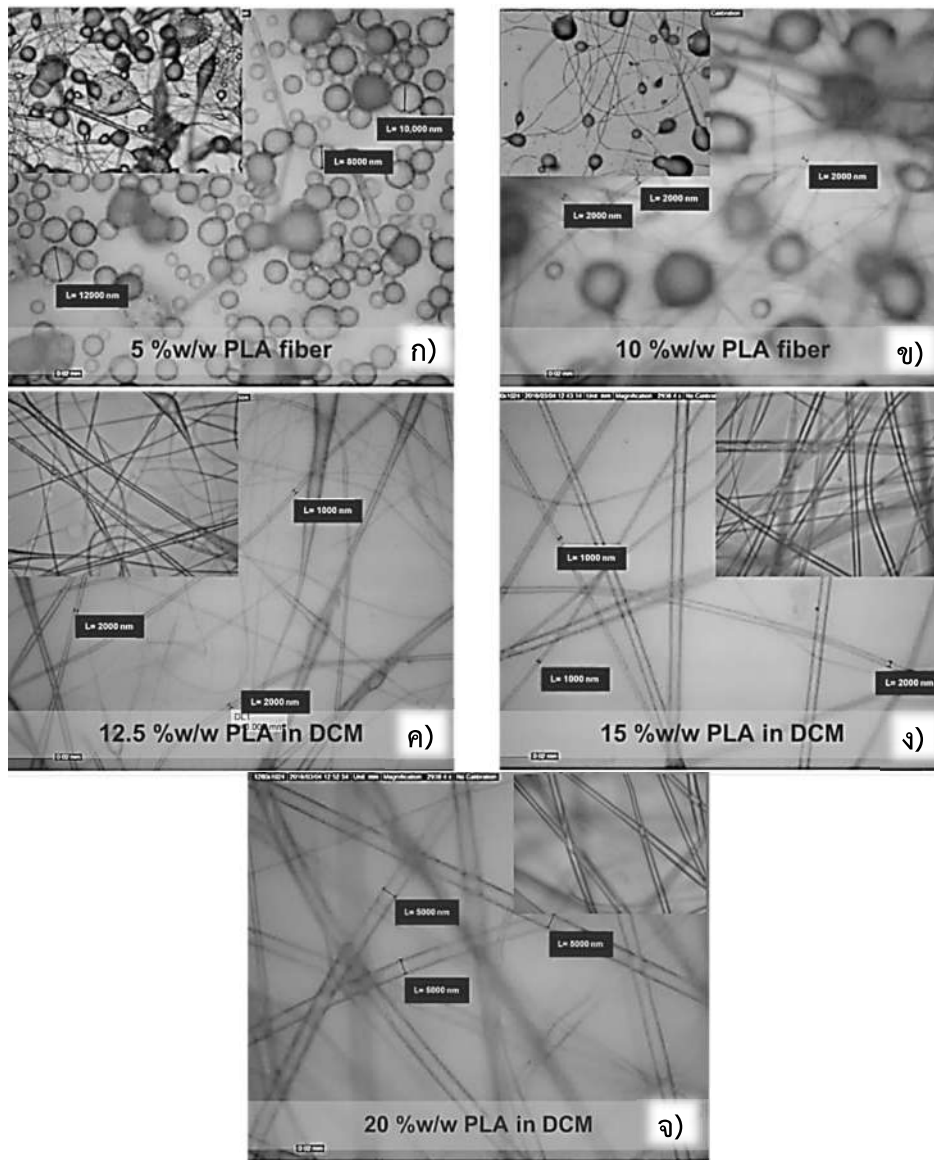
## 2. ลักษณะทางกายภาพของเส้นใย

จากลักษณะของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จากสารละลายพอลิแลคติกแอซิดความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 12.5, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 2 ก, ข, ค, ง และ จ ตามลำดับ) พบว่าเส้นใยจากสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมีลักษณะเป็นเม็ดปิดขนาดใหญ่และพบเส้นใยน้อยมาก แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้นลักษณะของเม็ดปิดจะมีจำนวนลดลงแต่มีจำนวนเส้นใยเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งการเรียงตัวของเส้นใยค่อนข้างเป็นระเบียบมากขึ้นตามลำดับ และยังพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยยังเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนเส้นใยของสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักนั้นไม่สามารถศึกษาได้เนื่องจากสารละลายมีความหนืดมากจนไม่สามารถสปีนออกมาได้ อย่างไรก็ตามลักษณะเส้นใยที่เรียงตัวเป็นเส้นตรงและเป็นระเบียบนี้จะเกิดขึ้นในความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมช่วงหนึ่งเท่านั้น หากเกินค่าที่เหมาะสมไปลักษณะของเส้นใยจะเกิดการบิดตัวเป็นเกลียวและอาจเรียงตัวไม่เป็น

ระเบียบอีกต่อไป (6) โดยงานวิจัยนี้พบว่าเส้นใยจากสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักให้ลักษณะเส้นใยที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ขนาดสม่ำเสมอ ไม่พบเม็ดปิดในเส้นใย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5000 นาโนเมตร ซึ่งเป็นลักษณะเส้นใยที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาต่อมากที่สุด

## 3. คุณสมบัติความเป็นผลึกของเส้นใย

ผลจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของการเลี้ยวเบน ( $2\theta$ ) กับความเข้มแสง (intensity) ในรูปที่ 3 พบว่าเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 3 ก และ ข ตามลำดับ) ไม่แสดงความเป็นผลึกคือมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) เนื่องจากพบกราฟที่เป็นรูปแบบฮาโล (halo pattern) ส่วนผงพอลิแลคติกแอซิดที่ยังไม่ผ่านกระบวนการผลิตเส้นใยนั้นพบพีคหลักที่ 17.46 และ 19.50 องศาสองทีตา ( $2\theta$ ) (รูปที่ 3ค) ซึ่งแสดงความเป็นกึ่งผลึก (semi-crystalline) (2, 3) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิดจากผงไปเป็นเส้นใยโดยผ่านกระบวนการอิเล็กโทรสปิน-



รูปที่ 2 ลักษณะเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ก) ร้อยละ 5, ข) ร้อยละ 10 ค) ร้อยละ 12.5 ง) ร้อยละ 15 และ จ) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

นี้ทำให้คุณสมบัติความเป็นผลึกของสารเปลี่ยนแปลงจากกึ่งผลึกไปเป็นไม่มีรูปผลึก

#### 4. คุณสมบัติเชิงความร้อนของเส้นใย

คุณสมบัติเชิงความร้อนของเส้นใยแสดงในรูปที่ 4 พบว่าผงพอลิแลกติกแอซิดมีจุดหลอมเหลว 171.00 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 65.20 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับค่าของพอลิแลกติกแอซิดโดยทั่วไปที่มีค่าจุดหลอมเหลวในช่วง 170-180 องศาเซลเซียส (3) และมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 50-65 องศาเซลเซียส (7) เมื่อผงพอลิ

แลกติกแอซิดเปลี่ยนเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10, 12.5, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก พบจุดหลอมเหลวของเส้นใยเท่ากับ 168.80, 169.50, 169.00, 168.80 และ 169.00 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ 65.28, 65.45, 68.17, 67.72 และ 68.08 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทั้งจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของผงและเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Picciani และคณะ (8) ที่พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยน

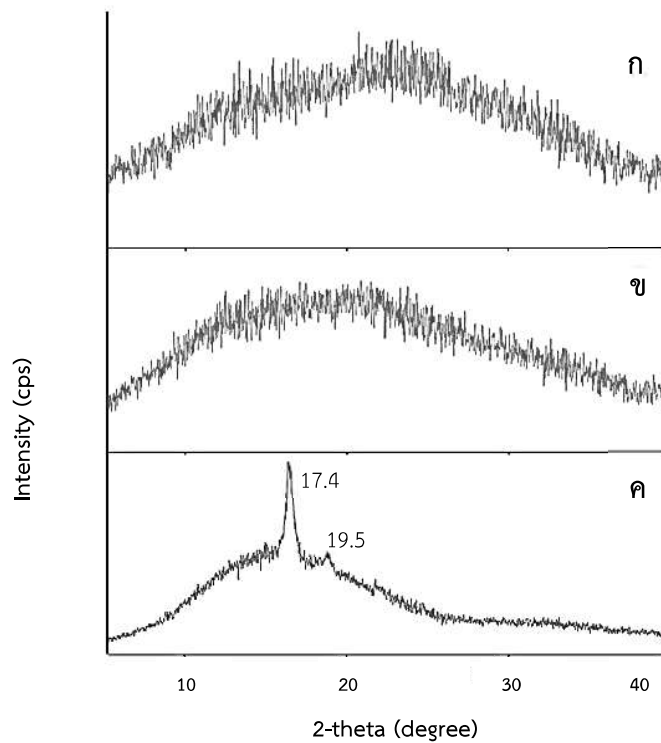
สถานะคล้ายแก้วของเส้นใยจะลดลงต่ำกว่าผงพอลิแล็กติกแอซิดเนื่องจากผลเกี่ยวเนื่องมาจากความเป็นผลึกของสาร โดยเส้นใยนั้นมีความเป็นผลึกน้อยกว่าผงพอลิแล็กติกแอซิดจึงทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีค่าต่ำกว่านั่นเอง

### 5. คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใย

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล (รูปที่ 5) พบว่าเส้นใยพอลิแล็กติกแอซิดความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีความทนต่อแรงดึงและมอดูลัสของยังมากกว่า

เส้นใยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก แสดงว่าเส้นใยความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นมากกว่า เป็นผลมาจากเส้นใยความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีเม็ดปิดปะปนและเส้นใยเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าจึงทำให้เส้นใยมีลักษณะเปราะแตกง่ายกว่า สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Moon

และคณะ (9) ที่พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยจะขึ้นกับลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยนั้น

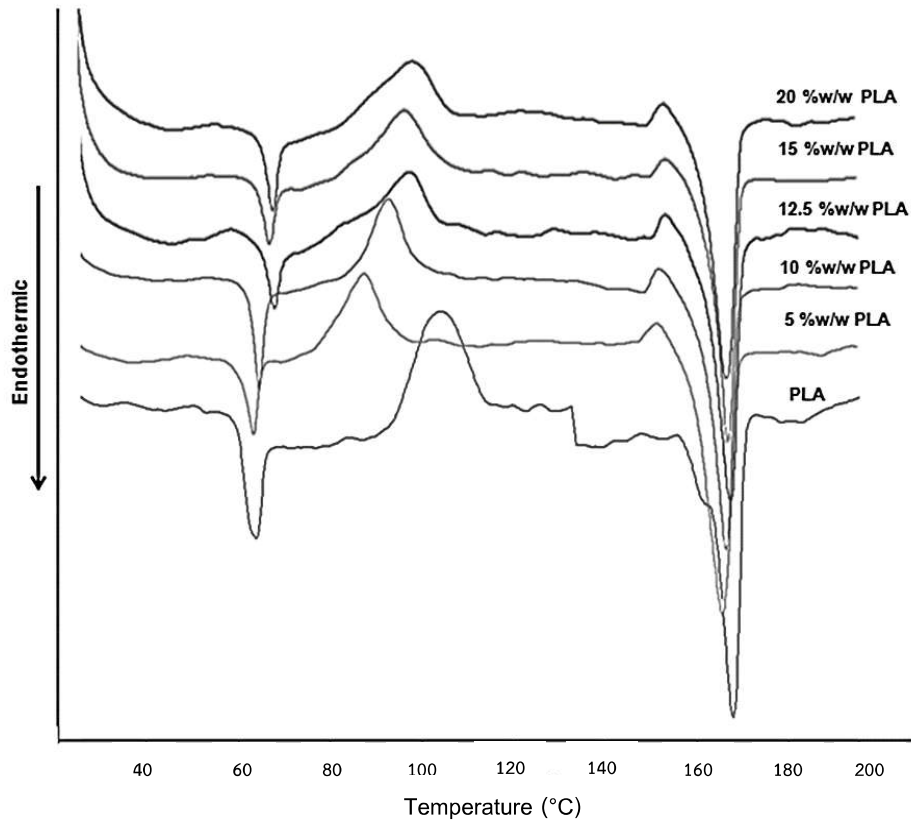


รูปที่ 3 กราฟความเป็นผลึกของเส้นใยความเข้มข้นต่างๆ ก) ร้อยละ 15 และ ข) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และ ค) ผงพอลิแล็กติกแอซิด

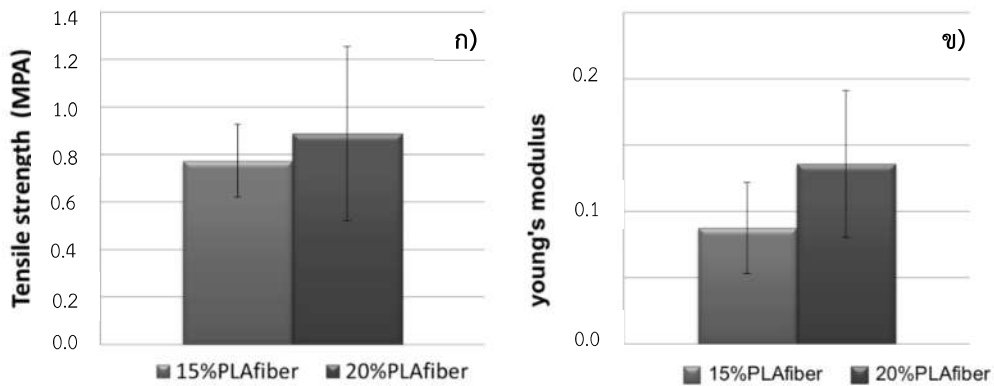
### สรุปผลการวิจัย

การขึ้นรูปเส้นใยนาโนพอลิแล็กติกแอซิดจากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงในงานวิจัยนี้ พบว่าความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นและมีผลต่อลักษณะของเส้นใยที่ได้ โดยสารละลายที่มีความหนืดมากกว่าจะให้ลักษณะที่เป็นเส้นใยมากกว่า

พบเม็ดปิดปะปนน้อยลง มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้น และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยเพิ่มขึ้น ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยนี้ยังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยด้วย โดยเส้นใยที่เป็นเส้นเรียงตัวเป็นระเบียบและไม่มีเม็ดปิดปะปนจะมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากกว่า พบว่าการเปลี่ยนแปลงลักษณะทาง



รูปที่ 4 กราฟดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีของเส้นใยและผงพอลิแลกติกแอซิด



รูปที่ 5 คุณสมบัติเชิงกล ก) ความทนต่อแรงดึง และ ข) โมดูลัสของยัง ของเส้นใยพอลิแลกติกแอซิดความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

กายภาพจากผงไปเป็นเส้นใยของพอลิแลกติกแอซิดทำให้คุณสมบัติความเป็นผลึกเปลี่ยนแปลงไปคือเปลี่ยนจากรูปแบบกิ่งผลึกไปเป็นอสัณฐาน แต่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพนี้ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงความร้อนของสารไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิการ

เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าใกล้เคียงค่าเดิม โดยงานวิจัยนี้พบว่าเส้นใยจากสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ให้ลักษณะเส้นใยที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์และทางเภสัชกรรมต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. ภก. ธวัชชัย แพชมัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารพอลิแลคติกแอซิด รศ. ดร. ภก. สนทยา ลิ้มมัทวาทิรัตน์ ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือและห้องปฏิบัติการทางเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการทำงานวิจัย และขอขอบคุณคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ที่ให้งบประมาณสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้มา ณ ที่นี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

1. Doshi J, Reneker DH. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. *J Electrostat.* 1995;35(2-3):151-60.
2. Garlotta D. A literature review of poly(lactic acid). *J Polym Environ.* 2001;9:63-84.
3. Rasal RM, Janorkar AV, Hirt DE. Poly(lactic acid) modifications. *Prog Polym Sci* 2010;35:338-56.
4. Sin LT, Rahmat AR, Rahman WAWA. Polylactic acid: PLA biopolymer technology and applications. New York: Plastics Design Library/ William Andrew Publishing; 2012.
5. Oliveira J, Brichi GS, Marconcini JM, Mattoso LHC, Glenn GM, Medeiros ES. Effect of solvent on the physical and morphological properties of poly(lactic acid) nanofibers obtained by solution blow spinning. *J Eng Fiber Fabr.* 2014;9(4):117-25.
6. Li Z, Wang C. Chapter 2: Effects of working parameters on electrospinning. One-dimensional nanostructures. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 2013.
7. Buchatip S, Petchsuk A, Kongsuwan K. Synthesis and mechanical properties of poly (LLA-co-DLLA) copolymers. *J Met Mat Min.* 2008;18:175-80.
8. Picciani P, Medeiros ES, Pan Z, Soares BG. Structural, electrical, mechanical, and thermal properties of electrospun poly( lactic acid) / polyaniline blend fibers. *Macromol Mater Eng.* 2010;295(7):618-27.
9. Moon SC, Farris RJ. The morphology, mechanical properties, and flammability of aligned electrospun polycarbonate (PC) nanofibers. *Polym Eng Sci.* 2008;48(9):1848-54.