

# การพัฒนาและคุณลักษณะของเส้นใยอิเล็กทรอนิกส์ปั่น จากพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุหน้ากากอนามัย

สุรรา วรวงศากุล<sup>1</sup>, สุรเชษฐ์ ตุ่มมี<sup>2</sup> และชिरาวุฒิ เพชรเย็น<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>2</sup>โปรแกรมวิชาออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารวมทั้งการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอนุภาคนาโน โดยเตรียมด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ปั่นซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย การเติมอนุภาคนาโนในเส้นใยพอลิเมอร์ผสมช่วยเพิ่มปริมาณผลึกจากการศึกษาฐานฐานวิทยาดวงจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือนาโนซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอนุภาคนาโนที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก พบว่าเส้นใยหลังเติมอนุภาคนาโนมีลักษณะปราศจากข้อบกพร่องและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนเติมอนุภาคนาโนในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (80:20) มีค่าเท่ากับ  $3.43 \pm 1.10$  ไมโครเมตร และเส้นใยหลังเติมอนุภาคนาโนแสดงถึงความไม่ชอบน้ำ จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล พบว่าการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มากเกินไปมีแนวโน้มทำให้คุณสมบัติการสลายตัวทางความร้อนและสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงและจากการทดสอบความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* ด้วยเทคนิค Disc diffusion พบว่าแผ่นของเส้นใยทุกอัตราส่วนผสมของการเติมอนุภาคนาโนสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ในบางส่วนซึ่งมีความน่าสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นหน้ากากอนามัยได้

**คำสำคัญ:** พอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, อิเล็กทรอนิกส์ปั่น, ซิงค์ออกไซด์

# Development and Characterization of Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) Electrospun Fibers Face Mask Material with Zinc Oxide Nanoparticles

Suwara Vorawongsagul<sup>1</sup>, Surachet Toommee<sup>2</sup> and Chiravoot Pechyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University.

<sup>2</sup>Industrial Product Design Program, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University.

## Abstract

Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) (PLA/PBS) were prepared with zinc oxide or zinc oxide aluminum alloys using electrospinning process. The electrospun fibers were characterized for physical, structural, thermal, mechanical, and antimicrobial properties. The addition of nanoparticles into the PLA/PBS electrospun fibers increased the degree of crystallinity. Scanning electron microscopy (SEM) images characterized the fracture morphology of the fiber mats with different contents of nano-zinc oxide or nanosized zinc oxide aluminum alloys at varying amounts (0.5, 1.0, 3.0, and 5.0% by weight). The morphology of fibers after incorporated nanoparticles showed defect-free fibers and the diameter was not significantly different compared to PLA/PBS ratio (80:20) electrospun fibers was  $3.43 \pm 1.10 \mu\text{m}$ . The PLA/PBS electrospun fibers with nanoparticles showed hydrophobicity. The properties of thermal and mechanical decreased when added excessive nanoparticles. Various amounts of nanoparticle sized zinc oxide (ZnO) or aluminum doped ZnO (Al-doped ZnO) were added into the fibers and the antibacterial activity were tested against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* by using disc diffusion technique. The results showed that all electrospun fibers could inhibit the bacteria. This study suggests that the PLA/PBS blends fiber with nanoparticles could be applied for face mask materials.

**Keywords:** Poly (lactic acid), Poly (butylene succinate), Electrospinning, Zinc Oxide.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุที่ทำจากพลาสติกเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นถุงพลาสติกขวดพลาสติกฟิล์มพลาสติกหรือภาชนะต่างๆ ซึ่งปฏิเสธไม่ได้ว่าการใช้วัสดุที่ทำจากพลาสติกนั้นช่วยอำนวยความสะดวกอีกทั้งยังมีราคาที่ไม่สูงจึงมีการใช้กันอย่างกว้างขวางแต่ก็ยังมีผลกระทบต่อตามมาก็คือปัญหาขยะจากการใช้พลาสติกเหล่านี้เนื่องจากพลาสติกส่วนมากที่ใช้กันในปัจจุบันเช่นพอลิเอทิลีน (PE), พอลิโพรพิลีน (PP), พอลิสไตรีน (PS), พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), และพอลิเอสเตอร์ได้แก่พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) เป็นต้นโดยพลาสติกเหล่านี้ใช้วัตถุดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในการผลิตทำให้ขยะจากพลาสติกจำพวกนี้ย่อยสลายได้ยากใช้เวลานานในการย่อยสลายหรือพลาสติกบางชนิดไม่สามารถย่อยสลายได้จึงเกิดปัญหาในการจัดการกับขยะซึ่งถ้าเผาทำลายเพื่อย่อยสลายพลาสติกก็จะก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

สังคมในปัจจุบันได้ให้ความสนใจในเรื่องสิ่งแวดล้อมมากขึ้นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาขยะที่น่าสนใจในปัจจุบันคือการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) แทนพลาสติกสังเคราะห์ (Synthesis plastic) เนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ทางสิ่งแวดล้อมทำให้ไม่เป็นพิษต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อมอีกด้วยโดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีอยู่หลายชนิดแต่ที่ได้รับความนิยมและกำลังพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมก็คือพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS)

พอลิแลคไทด์หรือพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพลาสติกที่สามารถผลิตได้จากวัสดุทางธรรมชาติได้แก่มันฝรั่งมันสำปะหลังแป้งข้าวโพดเป็นต้นสามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติมีความเป็นพิษต่ำมีสมบัติเชิงกลที่ดีแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของการทนความร้อนต่ำความเหนียวและยืดหยุ่นต่ำทำให้มีความแข็งแรงเปราะจึงทำให้ยากต่อการนำไปใช้งานดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติด้านการยืดหยุ่นของพอลิแลคติกแอซิดด้วยการผสมกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพลาสติกที่มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีมีความยืดหยุ่นสูงและเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ [1-2]

Elwathig AM Hassan และคณะ [2] และ Amita Bhatia และคณะ [3] ศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่าการผสมกันของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตจะเริ่มมีความไม่เข้ากันเมื่อผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้ค่าต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสจะลดลง และผลจาก DSC ช่วยยืนยันผลความไม่เข้ากันของการผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผสมพอลิเมอร์ทั้งสอง คือ 90:10 และ 80:20 [2-3]

อย่างไรก็ตามการเพิ่มสมบัติพิเศษในการต้านเชื้อแบคทีเรียให้กับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งดังนั้นจึงมีแนวคิดในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวโดยใช้ซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนซึ่งซิงค์ออกไซด์ระดับนาโนเป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติและไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกายสามารถเพิ่มความแข็งแรงทนทานแก่วัสดุต้านทานรังสียูวี และสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบอีกด้วยเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้ในอนาคต

กลไกการยับยั้งแบคทีเรียโดยใช้หลักการโฟโตแคตะไลติก (Photocatalytic) คือ เมื่อแสงมากระทบกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นไปยังสถานะกระตุ้น (Excited state :  $e^-$ ) ทำให้เกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน (hole :  $h^+$ ) ในชั้นสถานะเดิม (ground state) เมื่อ  $h^+$  ทำปฏิกิริยากับน้ำ ( $H_2O$ ) จะได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $OH^\cdot$ ) กับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) โดย  $OH^\cdot$  เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง ทำให้สารอินทรีย์สลายตัว ส่วน  $e^-$  ในสถานะกระตุ้นจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ซูเปอร์ออกไซด์ ( $O_2^{\cdot-}$ ) และทำปฏิกิริยาต่อไปกับ  $H^+$  ได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $HO_2^\cdot$ ) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกันระหว่าง  $HO_2^\cdot$  กับ  $H^+$  และ  $e^-$  ได้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โดยพบว่า  $H_2O_2$  จะผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียเกิดอันตรกิริยากับวัสดุอินทรีย์จนเกิดการเสื่อมสลาย และฆ่าแบคทีเรียได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) [4]

Lliya Rashkova และคณะ [5] ศึกษาสมบัติโฟโตแคตะไลติกและการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยพอลิแลคติก

แอซิดที่เคลือบผิวด้วยซิงค์ออกไซด์ พบว่าการเคลือบซิงค์ออกไซด์บนผิวของแผ่นเส้นใยทำให้มีสมบัติโฟโตแคตะไลติก และสามารถยับยั้งแบคทีเรีย *S.aureus* ได้

Garcia Morales และคณะ [6] ศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยผสมระหว่างพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตและนาโนซิงค์ออกไซด์ขึ้นรูปด้วยอิเล็กโตรสปินนิง พบว่าแผ่นเส้นใยผสม มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรีย *S.aureus* และ *E.coli* ได้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ได้นำมาถึงานวิจัยนี้โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโนจากการผสมพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตและดัดแปรด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมเพื่อศึกษาการพัฒนาสมบัติยับยั้งแบคทีเรียของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกทั้งสมบัติด้านอื่นๆของพลาสติกหลังขึ้นรูปแบบนอนวูเวน (Non-woven) ด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปพัฒนาเป็นหน้ากากอนามัย

## 2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมและศึกษาคุณลักษณะแผ่นเส้นใยจากการผสมพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต และดัดแปรด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนแตกต่างกัน ขึ้นรูปด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิง

2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย ของแผ่นเส้นใยจากการผสมพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตและดัดแปรด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

## 3. วิธีการทดลอง

การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยจากการผสมพอลิแลคติกแอซิด (Ingeo<sup>TM</sup> Biopolymer 6100D) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (BioPBS<sup>TM</sup> FZ91PM) และดัดแปรโครงสร้างด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20-40 นาโนเมตร) และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก โดยละลายในสารละลายไดคลอโรมีเทนและเอทานอลที่ 90:10 โดยปริมาตร

2. นำพอลิเมอร์ผสมมาเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักแล้วนำไปเข้าเครื่องโซนิคิเคชันเป็นเวลา 30 นาที

3. นำสารผสมที่ได้ไปฉีดขึ้นรูปเส้นใยนาโนเป็นผืนเส้นใยด้วยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงโดยบรรจุสารละลายลงในกระบอกฉีดขนาด 5 มิลลิเมตรและติดตั้งบนระบบฉีดสารละลายใช้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 25 กิโลโวลต์ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงแผ่นรองรับ 17 เซนติเมตรอัตราการฉีดสารละลายเท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

4. ได้แผ่นเส้นใยจากการผสมพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันแล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ของแผ่นเส้นใย

## 4. ผลการทดลอง

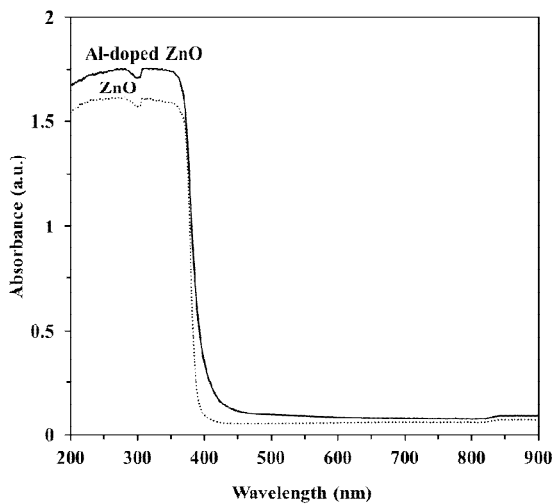
การเตรียมเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักกับอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในปริมาณร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก เพื่อนำไปพัฒนาเป็นหน้ากากอนามัย ต้องมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย

### 4.1 การทดสอบสมบัติการดูดกลืนรังสียูวีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม (UV absorption)

การทดสอบสมบัติการดูดกลืนรังสียูวีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักด้วยเครื่อง UV-VIS Spectroscopy รุ่น Shimadzu UV-2600 เริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 200 ถึง 900 นาโนเมตรซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 พบว่าจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคทั้งสองมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสียูวีที่ความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโน

เมตร [7] โดยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมจะมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสียูวีมากกว่า ซิงค์ออกไซด์ที่ไม่ได้เจือด้วยอลูมิเนียม

การดูดกลืนแสงจะขึ้นกับขนาดและรูปร่างของอนุภาค จากงานวิจัยของฉิซากร ภูตานนท์ และศรุต อำนวยโยธิน [8] ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพคุณลักษณะพื้นที่ผิว และการยับยั้งแบคทีเรียของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมผลปรากฏว่าเมื่อวัดขนาดพื้นที่ผิวและสมบัติความเป็นรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิค BET โดยอาศัยการแทนที่ของแก๊สไนโตรเจนในรูพรุนและพื้นที่ผิวพบว่า การเจือด้วยอลูมิเนียมลงไปนซิงค์ออกไซด์ทำให้ขนาดอนุภาคเล็กลงแต่มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคมากขึ้นเมื่อวัดพื้นที่ผิวของอนุภาคจะได้ว่าอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีพื้นที่ผิวรูพรุนเท่ากับ 10.12 ตารางเมตรต่อกรัม ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักมีพื้นที่ผิวรูพรุนเท่ากับ 76.54 ตารางเมตรต่อกรัม [8] จะเห็นได้ว่าผลของการดูดกลืนรังสียูวีที่พบว่าซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการดูดซับรังสียูวีสูงกว่าซิงค์ออกไซด์ซึ่งอธิบายได้จากพื้นที่ผิวรูพรุนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1 การดูดกลืนรังสียูวีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม

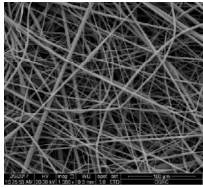
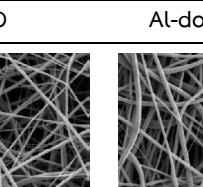
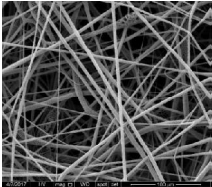
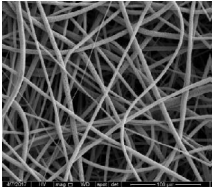
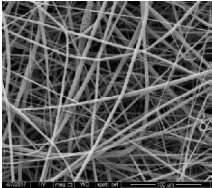
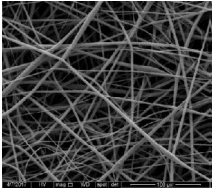
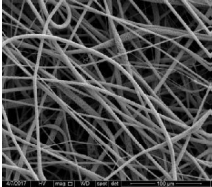
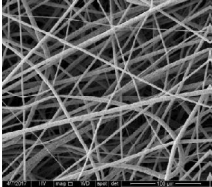

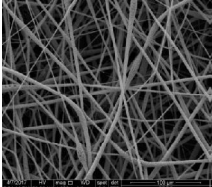
#### 4.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่บรรจุสารต้านจุลชีพ

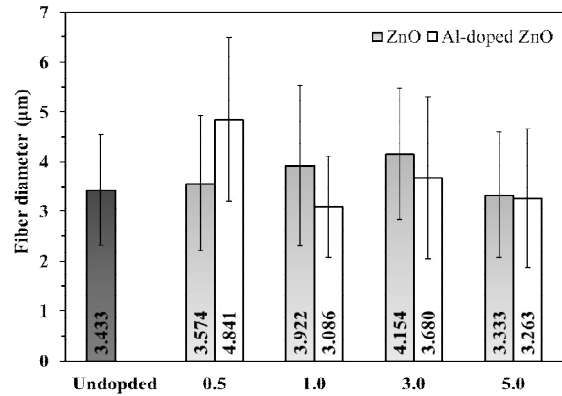
จากการศึกษาอัตราส่วนที่ต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปโดยวิธีอิเล็กโตรสปินนิงวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า แสดงผลดังตารางที่ 1 พบว่าเส้นใยมีลักษณะที่ปราศจากข้อบกพร่อง (Defect-free fibers) เป็นรูพรุนและมีการสานกันแบบสุ่มคล้ายกันกับก่อนที่จะเติมอนุภาคลงไปและจากภาพเมื่อเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมลงในเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตทำให้เส้นใยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมลงไปทำให้ความหนืดของสารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยเพิ่มขึ้น [9]

การศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมแสดงผลดังรูปที่ 2 เมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ลงในเส้นใยผสมร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 3.57 3.92 4.15 และ 3.33 ไมโครเมตร ตามลำดับเมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมลงในเส้นใยผสมร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 4.84 3.09 3.68 และ 3.26 ไมโครเมตร ตามลำดับจะเห็นว่าในช่วงของการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนักเส้นใยมีแนวโน้มที่เส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นตามลำดับและการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่เมื่อวิเคราะห์ผลของขนาดเส้นใยที่เกิดขึ้นด้วย Anova test พบว่าเส้นใยก่อนที่จะเติมอนุภาคและหลังจากเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนต่างกัันมี

ความแตกต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่มากหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

**ตารางที่ 1** ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก และบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกันที่กำลังขยาย 1000 เท่า

	กำลังขยาย 1000 เท่า	
	ZnO	Al-doped ZnO
Undoped		
0.5%		
1.0 %		
3.0 %		
5.0 %		


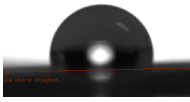




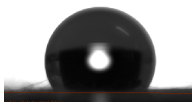




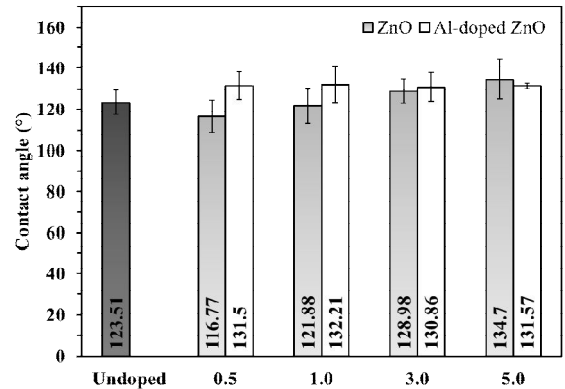
**รูปที่ 2** ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน

#### 4.3 การทดสอบความสามารถในการเปียก (Wettability)

จากการวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของแผ่นเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวิทิลีนซัคซิเนต โดยการหยดน้ำปราศจากไอออนลงบนแผ่นเส้นใยพบว่าค่าของมุมที่วัดได้อยู่ในช่วง 116-134 องศา ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 3 มีลักษณะของหยดน้ำเป็นรูปทรงค่อนข้างกลมและมีบริเวณเล็กๆ ที่ฐานของหยดน้ำที่ยังคงแตะกับผิวของแผ่นเส้นใยเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคลงไป การเติมซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักวัดค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยได้เท่ากับ 116.76 121.88 128.98 และ 134.7 องศาตามลำดับ การเติมซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักวัดค่ามุมสัมผัสเฉลี่ยได้เท่ากับ 131.5 132.21 130.86 และ 131.58 องศาตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ของแผ่นเส้นใยไม่แตกต่างจากก่อนเติมอนุภาคลงไปมากนัก [10] และเมื่อวิเคราะห์ด้วย Anova test พบว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของมุมสัมผัสที่วัดได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 ค่ามุมสัมผัสและรูปภาพของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

มุมสัมผัส (องศา) และรูปภาพ		
Undoped	 123.51 ± 6.12	
	ZnO	Al-doped ZnO
0.5%	 116.77 ± 7.69	 131.50 ± 6.66
1.0 %	 121.88 ± 8.60	 132.21 ± 8.81
3.0 %	 128.98 ± 5.86	 130.86 ± 7.05
5.0 %	 134.70 ± 9.76	 131.57 ± 1.41

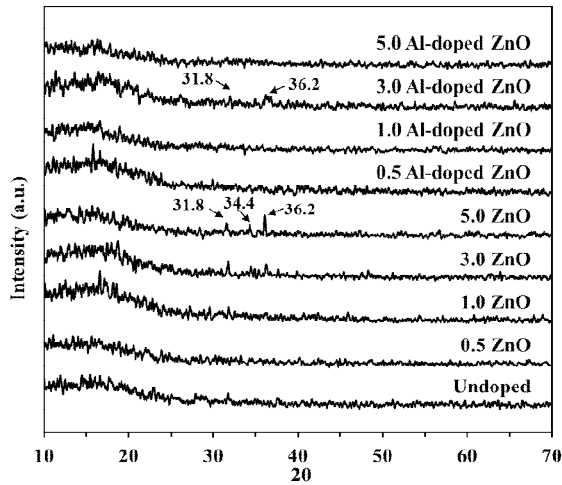


รูปที่ 3 ค่ามุมสัมผัสของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

#### 4.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของเส้นใยด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)

การวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชันโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสี  $\text{CuK}\alpha$  เมื่อแกน  $x$  เป็นค่ามุม  $2\theta$  ในช่วง  $10^\circ$  ถึง  $70^\circ$  และแกน  $y$  เป็นค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ร้อยละ 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักปรากฏพีคชัดเจนที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $31.8^\circ$   $34.4^\circ$  และ  $36.2^\circ$  [11-13] ส่วนเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม (Al-doped ZnO) ร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนักปรากฏพีคชัดเจนที่ตำแหน่งมุม  $2\theta$  เท่ากับ  $31.8^\circ$  และ  $36.2^\circ$  เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการเกิดพีคระหว่างแผ่นเส้นใยก่อนเติมและหลังเติมอนุภาคในอัตราส่วนแตกต่างกันพบว่าลักษณะเส้นกราฟไม่แตกต่างกันอาจเพราะการเติมอนุภาคเข้าไปไม่ได้มีผลในเรื่องของการเกิดผลึกในเส้นใยที่

มากขึ้นหรืออาจเพราะผลึกมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคดังกล่าวได้ชัดเจน

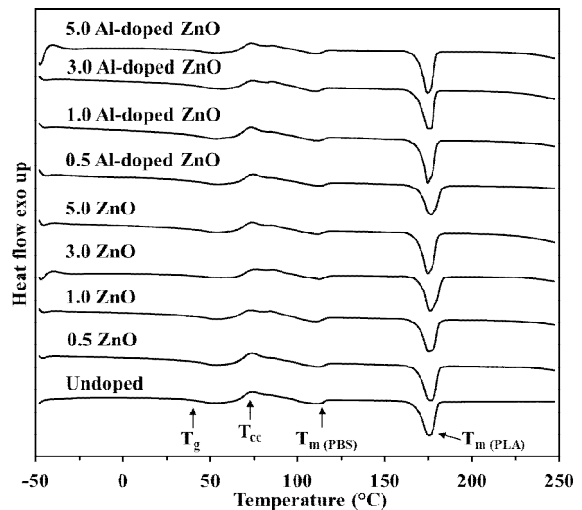


รูปที่ 4 ผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของเส้นใยผสมระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยนำหน้ากับบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกัน

#### 4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีของเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยนำหน้ากับบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยนำหน้าเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ -50 ถึง 250 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ในการทดสอบ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้เติมอนุภาคกับแผ่นเส้นใยที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันพบว่าจากรูปที่ 5 เส้นใยที่ไม่ได้เติมอนุภาคมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) เท่ากับ 35.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_{cc}$ ) เท่ากับ 74.1 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิবিทิลีนซัคซิเนตและพอลิแลคติกแอซิด เท่ากับ 110.5 และ 175.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เส้นใยที่เติมอนุภาค

นาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันนั้นปรากฏพีคของ  $T_g$ ,  $T_{cc}$  และ  $T_m$  ในตำแหน่งอุณหภูมิแทบไม่แตกต่างจากแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคแต่อย่างไรก็ตาม Degree of crystallinity ของแผ่นเส้นใยที่เติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนแตกต่างกันมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งในส่วนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนซัคซิเนตเมื่อเทียบกับแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้เติมอนุภาคดังกล่าวลงไปอาจเกิดจากอนุภาคนาโนที่เติมในพอลิเมอร์ผสมเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนตัวมาจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้นและอนุภาคนาโนมีประสิทธิภาพเป็นจุดกำเนิดนิวเคลียส (Nucleating site) ส่งผลให้ Degree of crystallinity เพิ่มมากขึ้น [14-15]



รูปที่ 5 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยนำหน้ากับบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

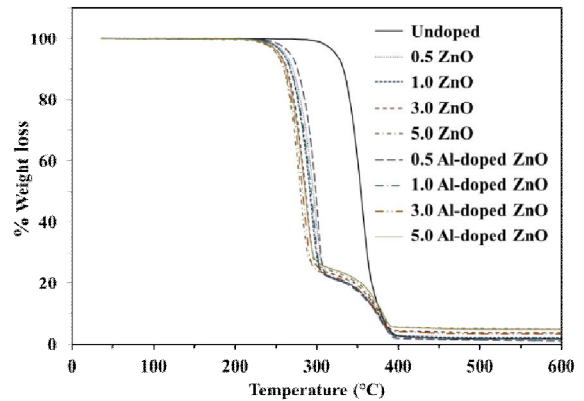
#### 4.6 การทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric Analysis, TGA)

การทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิสของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยนำหน้ากับบรรจุอนุภาคนาโน



ซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 35 ถึง 600 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ในการทดสอบ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคและหลังเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันพบว่าก่อนเติมอนุภาคเส้นใยมีอุณหภูมิสลายตัว ( $T_d$ ) ที่ 355.1 องศาเซลเซียสร้อยละการสลายตัวทางความร้อนเท่ากับร้อยละ 98.20 เมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมลงไปในเส้นใยทำให้เกิดการสลายตัว 2 ช่วงและทำให้มีอุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.8 การเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์อัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักในเส้นใยทำให้มีอุณหภูมิสลายตัวช่วงแรก ( $T_{d1}$ ) เฉลี่ยที่ 288.48 องศาเซลเซียสร้อยละการสลายตัวทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 77.37 อุณหภูมิสลายตัวช่วงที่สอง ( $T_{d2}$ ) เฉลี่ยที่ 379.55 องศาเซลเซียสร้อยละการสลายตัวทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 19.48 ส่วนการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักในเส้นใยทำให้มีอุณหภูมิสลายตัวช่วงแรก ( $T_{d1}$ ) เฉลี่ยที่ 290.55 องศาเซลเซียสร้อยละการสลายตัวทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 77.69 อุณหภูมิสลายตัวช่วงที่สอง ( $T_{d2}$ ) เฉลี่ยที่ 379.13 องศาเซลเซียสร้อยละการสลายตัวทางความร้อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 19.58

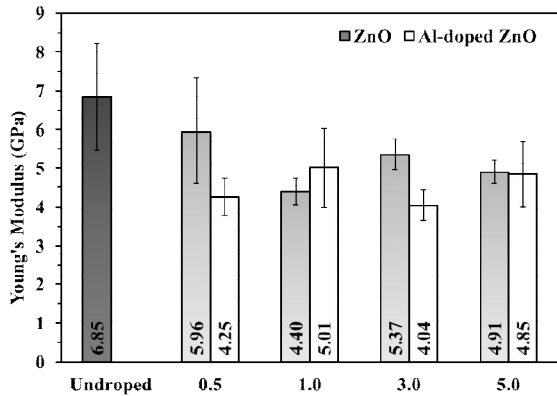
จะเห็นได้ว่าการเติมอนุภาคลงในเส้นใยส่งผลให้เกิดอุณหภูมิการสลายตัวขึ้นสองช่วงซึ่งเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นเส้นใยมากขึ้นแต่จะเกิดการสลายตัวช่วงแรกซึ่งเป็นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิวิทิลีนซัคซิเนตที่อุณหภูมิลดลงและอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติมอนุภาคเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับการยึดเกาะที่ระหว่างอนุภาคกับพอลิเมอร์ผสมซึ่งการเติมอนุภาคในปริมาณมากเกินไปอาจจะทำให้เกิดการแยกตัวออกบริเวณผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มลดลง [6]



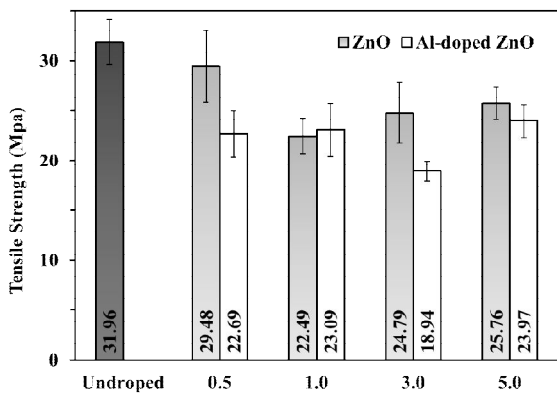
รูปที่ 6 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก (Weight Loss (%)) ของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิวิทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน

#### 4.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D 882 ของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิวิทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกันได้แก่ ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าค่า Young's modulus (Young's modulus) ของแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคเท่ากับ 6.85 GPa เมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันในแผ่นเส้นใยผสมพบว่ามียังมอดูลัสมีค่าลดลงเมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในทุกอัตราส่วน



รูปที่ 7 ย้ยมอดูลัสของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน



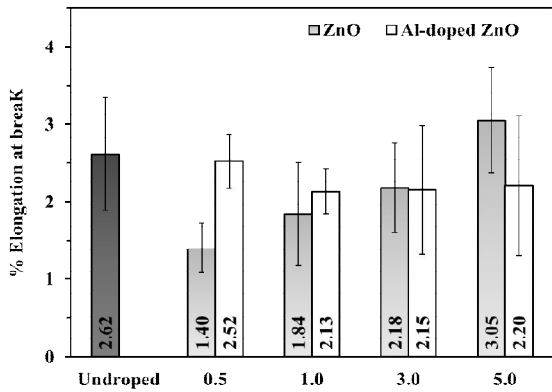
รูปที่ 8 ความสามารถในการทนต่อแรงดึงของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน

จากรูปที่ 8 แสดงค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกันพบว่าค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงลดลงเช่นเดียวกับ

ค่าย้ยมอดูลัสเมื่อเติมอนุภาคลงในแผ่นเส้นใยผสมค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงของแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคเท่ากับ 31.96 MPa เมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน ในแผ่นเส้นใยผสมพบว่ามีความสามารถในการทนต่อแรงดึงลดลงเมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วน

เมื่อมาพิจารณาการยืดตัว (%Elongation) ของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนต่างกัน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9 พบว่าค่าร้อยละการยืดตัวของแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคเท่ากับร้อยละ 2.62 เมื่อเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน ในแผ่นเส้นใยผสมพบว่าค่าร้อยละการยืดตัวมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ หรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียม เมื่อมีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าค่าร้อยละการยืดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.40 (ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก) เป็นร้อยละ 3.05 (ร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก) แต่เมื่อเติมซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าค่าร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มลดลง

จะเห็นได้ว่าสมบัติทางกลของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักที่มีการบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนต่างกันทำให้ค่าย้ยมอดูลัสค่าการทนต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัวของเส้นใยมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมอนุภาคลงไปในเส้นใยผสมมีการกระจายตัวที่ไม่ค่อยดี จึงอาจจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค จึงส่งผลให้การยืดเกาะระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคและพอลิเมอร์เกิดความไม่เข้ากัน ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง



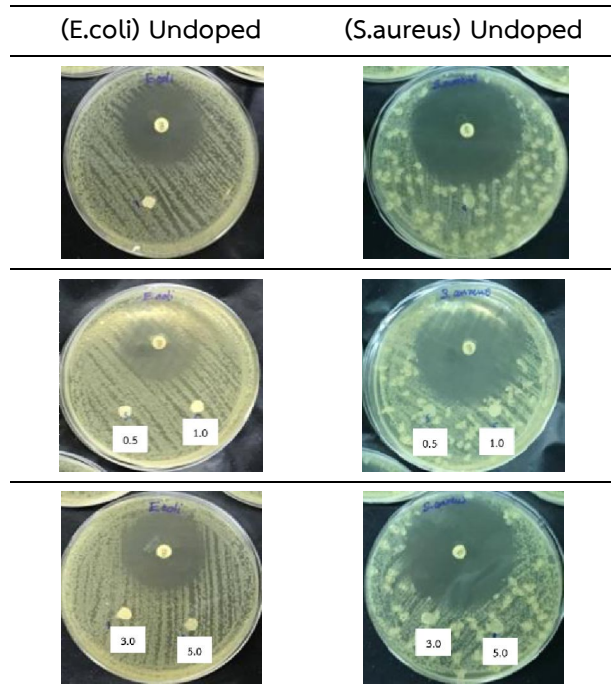
รูปที่ 9 ร้อยละการยืดตัวของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกัน

#### 4.8 การทดสอบสมบัติการยับยั้งแบคทีเรีย

การทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Disc diffusion ตามมาตรฐาน AATCC 147 ของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียสองชนิดคือแบคทีเรียแกรมลบชนิด *Escherichia coli* (*E.coli*) และแบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ตัดชิ้นงานเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตรและนำตัวอย่างไปแช่ในอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียซึ่งมีเชื้อแบคทีเรียอยู่แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใสผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมลงไปทุกอัตราส่วนพบว่าสามารถยับยั้งการเกิดแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบได้บางส่วน เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวเป็นการอาศัยการแพร่ของสารที่ใช้ยับยั้งออกมายับยั้งแบคทีเรียในอาหารเลี้ยงเชื้อแต่การเติมอนุภาคลงในเส้นใยอาจทำให้เส้นใยซึ่งเป็นพอลิเมอร์ขัดขวางการแพร่ออกของสารซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่อยู่ภายในอีก

ทั้งแผ่นเส้นใยยังแสดงความไม่ชอบน้ำจึงทำให้สารยับยั้งและแบคทีเรียไม่สัมผัสกันและไม่เกิดการแพร่ตามหลักการนี้จึงมีผลในการยับยั้งแบคทีเรียเกิดขึ้นในบางส่วน

ตารางที่ 3 ผลการยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ (*E.coli*) และแกรมบวก (*S. aureus*) ของเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก บรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน



#### 5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวทิลีนซัคซิเนตและดัดแปรด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพสมบัติทางเคมีสมบัติเชิงกลสมบัติทางความร้อนและความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอเล็กโตรสปินนิง

การเตรียมแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিวทิลีนซัคซิเนตอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักบรรจุอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมอัตราส่วนแตกต่างกันได้แก่ร้อยละ 0.5 1.0 3.0 และ 5.0 โดยน้ำหนักเมื่อนำมาทดสอบสมบัติทาง

กายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่าเกิดเส้นใยไม่เกิดข้อบกพร่องมีลักษณะเหมือนกับเส้นใยก่อนเติมอนุภาคลงไปแต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากการเติมอนุภาคทำให้ความหนืดของสารละลายที่ใช้ในการขึ้นรูปเส้นใยเพิ่มขึ้นแต่การเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นยังคงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญผลการวัดมุมสัมผัสของแผ่นเส้นใยพบว่าเส้นใยยังคงมีสมบัติความไม่ชอบน้ำทุกอัตราส่วนของการเติมอนุภาคทั้งสองเหมือนกับแผ่นเส้นใยก่อนเติมอนุภาคลงไปผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีพบว่า การเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือซิงค์ออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆทำให้ Degree of crystallinity ของแผ่นเส้นใยเพิ่มมากขึ้นทั้งในส่วนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอาจเกิดจากการที่อนุภาคที่เติมเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนตัวมาจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ Degree of crystallinity เพิ่มขึ้นการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลซิสพบว่า จะเห็นได้ว่าการเติมอนุภาคลงในเส้นใยส่งผลให้เกิดอุณหภูมิการสลายตัวขึ้นสองช่วงซึ่งเพิ่มอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นเส้นใยมากขึ้นผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมในอัตราส่วนแตกต่างกันพบว่าเส้นใยพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมอนุภาคลงไปจะมีค่า Young's Modulus การทนต่อแรงดึงและค่าร้อยละการยืดตัวของเส้นใยมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมอนุภาคลงในเส้นใยพอลิเมอร์ผสมมีการเกาะกลุ่มกันอนุภาคจึงทำให้เกิดความไม่เข้ากันของอนุภาคนานอกับเส้นใยพอลิเมอร์ส่วนสมบัติด้านการยับยั้งแบคทีเรียของแผ่นเส้นใยที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมด้วยวิธี Disc diffusion พบว่าแผ่นเส้นใยสามารถยับยั้งแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ได้ในบางส่วนในทุกอัตราส่วนของการเติมอนุภาคดังกล่าวเนื่องจากเพราะเส้นใยซึ่งเป็นพอลิเมอร์ขัดขวางการแพร่ออกของสารซิงค์ออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอลูมิเนียมที่อยู่ภายในจึงยับยั้งแบคทีเรียได้บางส่วนจากการทดสอบด้วยวิธีนี้ได้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยโครงการสร้างปัญญาวิทย์ผลิตนักเทคโนโลยี (Young Scientist and Technologist Programme : YSTP) ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำงานวิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ปิยฉัตร ช่วยสินวล และ รศ.ดร.สุพรรณดา เตชะสกุลที่ให้คำปรึกษา แนะนำ วิเคราะห์ และความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลากการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ น.ส.สุชารัตน์ เคนอาต ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hassan E, et al. ,“Dynamic Mechanical Properties and Thermal Stability of Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) Blends Composites”, Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, 2013, pp.85-94.
- [2] Elwathig AM Hassan, et al., “Biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) fibers with high elongation for health care products”, Textile Research Journal, 2017, pp.1-10.
- [3] Amita Bhatia, et al., “Compatibility of Biodegradable Poly (lactic Acid)(PLA) and Poly (butylene succinate) (PBS) Blends for Packaging Applications”, Korea- Australia Rheology Journal, 2007, pp.125-131.
- [4] เณศรา แก้วคง, “การพัฒนาผ้ายับยั้งแบคทีเรียบนวัสดุสิ่งทอ”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาเคมีนวัตกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, ปทุมธานี, 2557.
- [5] Lliya R, et al., “Electrospinning / electro spraying vs. electrospinning: A comparative

- study on the design of poly(l-lactide)/zinc oxide non-woven textile”, Applied Surface Science, 2014, pp.842-850.
- [6] Graciela M, et al., “Electrospinning and electrospraying techniques for designing novel antibacterial poly (3-hydroxy butyrate) /zinc oxide nanofibrous composites”, Journal of Materials Science, 2016, pp.8593-8609.
- [7] Suwanboon S, et al, “The dependence of optical properties on the morphology and defects of nanocrystalline ZnO powders and their antibacterial activity”, Journal of Ceramics Processing Research, 2010, pp.547-551.
- [8] ณิชากร ภูตานนท์ และศรุต อำนวยโยธิน, “การศึกษาการแทนที่ของอะลูมิเนียมในโครงสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์และการประยุกต์ใช้ในการยับยั้งแบคทีเรีย”, ปริญาวิทยาสตวรรษบัณฑิตสาขาวัสดุศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2558.
- [9] Abdullah Khalil, Raed Hashaikeh, “Electrospinning of nickel oxide nanofiber: Process parameters and morphology control. Materials Characterization”, 2014, pp.65-71.
- [10] Jinwoo Kim, et al., “Enhanced corrosion resistance and biocompatibility of AZ31 Mg alloy using PCL/ZnO NPs via electrospinning. Applied Surface Science”, 2017, pp.249-258.
- [11] Ashaq Hussain Shan, “Investigations of optical, structural, antibacterial and photocatalytic properties of doped ZnO nanostructures”, In partial fulfillment for the award of the degree of Doctor of Philosophy in Physics, AbdurRahman University, 2014.
- [12] Xinchang Wang, et al, “Synthesis and ethanol sensing properties of Al- doped ZnO nanofibers”, Current Applied Physics, 2013, pp.403-407.
- [13] Ivo Kuritka, et al., “Antibacterial performance of ZnO-based fillers with mesoscales structured morphology in model medical PVC composites”, Materials Science and Engineering C, 2014, pp.70-77.
- [14] ศศิพงศ์ สุนทรเต็ม, “การเตรียมวัสดุคอมโพสิตความเข้ากันได้และสมบัติของนาโนซิลเวอร์พอลิแอกติกแอซิด/พอลิไบิวทิลีนซิคซิเนต”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, 2555.
- [15] Poosub T, et al., “Effect of TiO<sub>2</sub> and ZnO on Thin Film Properties of PET/PBS Blend for Food Packaging Applications”, Energy Procedia, 2014, pp.102-111.
-