



การเตรียมและการหาลักษณะเฉพาะของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

Preparation and Characterization of Nonwovens from Poly (Lactic Acid)
and Poly (Butylene Succinate) by Melt blown Process

ธัญญา ชลปรีชา*

Thananya Cholprecha

พัชรี ประทุมพงษ์**

Patcharee Pratumpong

หยาดนภา ผาเจริญ***

Yardnapar Parcharoen

นที ศรีสวัสดิ์****

Natee Srisawat

นรรจพร เรืองไพศาล****

Nanjaporn Rongpaisan

สุรเชษฐ์ ตุ่มมี*****

Surachet Toommee

ชिरาวุฒิ เพชรเย็น*****

Chiravoot Pechyen

Received : February 11, 2023

Revised : September 27, 2023

Accepted : March 1, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียม และจำแนกลักษณะของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งเป็น พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้แทนการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น โดย ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเมลต์โบลว์นเพื่อศึกษาลักษณะของผ้าไม่ทอที่พารามิเตอร์การขึ้นรูปแตกต่างกัน 6 สภาวะ ได้แก่ ความดันลม 0.2 และ 0.4 เมกะปาสคาล และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บที่ 15 30 และ 45 เซนติเมตรตามลำดับ ผลจากการศึกษารูปร่างสันฐานพบว่า การเพิ่มความดันลม และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บส่งผลให้เส้นใยจากผ้าไม่ทอของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ การทดสอบสมบัติทางกล ชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันลม เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเกิดผลึกได้มากกว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างของหัวฉีดกับตัวม้วนเก็บสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกจากการวัดการเลี้ยวเบน

ของรังสีเอ็กซ์ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดสามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอได้สมบูรณ์ทุกสภาวะ ในขณะที่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตควรใช้ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บมากกว่า 15 เซนติเมตรขึ้นไป อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดสามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ทอได้ด้วยกระบวนการเมลต์โบลนและสามารถพัฒนาไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไปได้

คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด / พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต / ผ้าไม่ทอ / เมลต์โบลน

*นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Master of Science program students Department of Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University(Corresponding Author) e-mail: s.toommee@gmail.com

**อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer of Physics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

***อาจารย์ประจำวิทยาลัยแพทยศาสตร์นานาชาติจุฬาภรณ์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer at Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University

****อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอและเส้นใย คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
Lecturer in Textile and Fiber Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

*****อาจารย์ประจำคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
Lecturer at Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

*****อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Lecturer in Materials and Textile Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

ABSTRACT

This research aimed to prepare and characterize nonwovens from poly lactic acid and polybutylene succinate, which is a biodegradable polymer instead of using synthetic polymers. This research using the melt-blown process while varying the melt-blown process parameters to study the characteristics of non-woven fabrics, including air pressure (0.2 and 0.4 MPa) and die-to-collector distance (15, 30, and 45 cm). The result shown that increasing the air pressure and die-to-collector distance resulted in the production of smaller fibers. Simultaneously, the tensile strength was dependent on the polymer, air pressure, and die-to-collector distance used, and the percentage elongation at the break tended to increase with an increasing die-to-collector distance. Regarding thermal properties, the PBS nonwovens exhibited an increased level of crystallinity when the die-to-collector distance was raised, consistent with the degree of crystallinity obtained from X-ray diffraction analysis. Poly lactic acid could be successfully processed into nonwovens under all six investigated conditions, whereas nonwoven polybutylene succinate could not be formed at a die-to-collector distance of 15 cm. However, both polymers demonstrated the feasibility of being processed into nonwovens using the melt-blown technique, showing potential for applications in the textile industry.

Keywords : Poly (lactic acid) / Poly (butylene succinate) / Nonwovens / Melt blown

บทนำ

ผ้าไม่ทอ (Nonwovens) คือ ผ้าที่เกิดจากการขึ้นรูปเส้นใยโดยตรงอย่างมีทิศทาง หรือกระจัดกระจายไม่มีทิศทาง แล้วทำให้เส้นใยยึดติดกันด้วยกระบวนการเชิงกล กระบวนการทางเคมี กระบวนการความร้อน กระบวนการที่ใช้สารละลาย หรือการผสมผสานกันระหว่างกระบวนการก็ได้ ในปัจจุบันผ้าไม่ทอมีความสำคัญและมีความต้องการสูงในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Peng, et al., 2019) เนื่องจากสามารถปรับแต่งสมบัติของผ้าได้จากสมบัติที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ สามารถออกแบบให้มีลักษณะ และสมบัติที่หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น เฟอร์นิเจอร์ เครื่องนุ่งห่ม กีฬา งานด้านโยธา การแพทย์ สิ่งแวดล้อม การเกษตร ฯลฯ อีกทั้งยังมีกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก มีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงสามารถใช้สำหรับผลิตภัณฑ์ใช้แล้วทิ้ง (Disposable) ได้ (Yalcin, 2015)

โดยทั่วไปแล้ววัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตผ้าไม่ทอ จะเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดต่างๆ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน ไนลอน และพอลิคาร์บอเนต พอลิเมอร์เหล่านี้ล้วนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในกระบวนการผลิตมีการปลดปล่อยสารพิษจำนวนมากระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ ทำให้ใช้เวลานานในการย่อยสลายหรือบางชนิดไม่สามารถย่อยสลายได้ ส่งผลให้เกิดเป็นปัญหาขยะพลาสติก

(Chen & Patel, 2012) ในงานวิจัยนี้สนใจเรื่องปัญหาสิ่งแวดล้อม และอยากลดปัญหาดังกล่าว จึงใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในการผลิตผ้าไม่ทอแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีอยู่หลายชนิด แต่ที่ได้รับความนิยม และผู้วิจัยสนใจมากที่สุดคือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly lactic acid: PLA) และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Poly butylene succinate: PBS) เนื่องจากผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ จึงสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยไม่ก่อสารพิษ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีสมบัติทางความร้อนที่ดี (Nor & Mariatti, 2020) สามารถแปรรูปได้หลากหลายทั้งการหล่อฟิล์ม การอัดรีด การขึ้นรูปแบบเป่า และการปั่นเส้นใย PLA ได้มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ปัจจุบันมีการผลิตในโรงงานระดับโลกสองแห่งโดย NatureWorks LLC ในสหรัฐอเมริกาและ Total Corbion ในประเทศไทย กำลังการผลิต PLA ที่คาดการณ์ไว้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงปี 2561 ถึง 2566 (Shen Su, et al., 2013) PLA เป็นพอลิเอสเตอร์อเนกประสงค์ มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงสูง ความโปร่งใสสูง (ในสถานะอสัณฐาน) และการนำไปใช้กระบวนการผลิตง่าย สำหรับ PBS เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชีวภาพอื่นๆ PBS มีประสิทธิภาพเชิงนิเวศที่ดีกว่า มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในการใช้งานหลายประเภท (Shen Su, et al., 2013) PBS ยังมีคุณสมบัติที่ต้องการมากมาย เช่น ความยืดหยุ่นสูงและเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเยี่ยม

สำหรับการผลิตผ้าไม่ทอสามารถผลิตได้หลากหลายกรรมวิธี เช่น กระบวนการปั่นหลอม (Melt spinning) มีลักษณะเส้นใยยาวแบบต่อเนื่อง (Jompang, et al., 2013) กระบวนการสปันบอนด์ (Spun bond) เป็นกระบวนการปั่นเส้นใยอย่างต่อเนื่องทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวเหมือนกระบวนการปั่นหลอม ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันแต่มีลักษณะเส้นใยค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น และกระบวนการเมลต์โบลน (Melt blown) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการอัดรีดแบบต่อเนื่องอาศัยกระแสลมร้อนในการผลิตผ้าไม่ทอ ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตในขั้นตอนเดียว (Duran, et al., 2013) โดยสามารถสร้างเส้นใยจากพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวได้โดยตรงไม่ต้องใช้กลไกการดึง จึงช่วยให้กระบวนการนี้ได้เปรียบด้านต้นทุนอย่างชัดเจน นอกจากนี้ กระบวนการเมลต์โบลน ยังให้ผลผลิตมากกว่ากระบวนการอื่น และเป็นวิธีที่สามารถทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กถึงไมโครและนาโนได้ จึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมากในการผลิตผ้าไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลน อย่างไรก็ตาม กระบวนการเมลต์โบลนมีข้อจำกัดในด้านดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปจำเป็นต้องมีค่า 1000 กรัมต่อ 10 นาทีขึ้นไป ซึ่งพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต มีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่า 1000 มาก ผู้วิจัยจึงสนใจปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเมลต์โบลนเพื่อขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Kathryn, 2013) และเนื่องด้วยสัณฐานวิทยาของเส้นใยมีความไวต่อพารามิเตอร์ในกระบวนการเมลต์โบลนมาก จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่แม่นยำในการผลิต จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่า การเพิ่มความดันลมหรือความเร็วลม (ATR) ส่งผลให้เกิดแรงต้าน (Drag force) ที่สูงขึ้น และการลดทอน (Attenuation) สูงขึ้น ซึ่งจะช่วยลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ในขณะที่ความดันลมที่สูงเกินไปสามารถทำลายเส้นใยได้เช่นกัน นอกจากนี้ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ (Die-to-collector distance: DCD) ยังส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโดยตรง (Yahya & Olos, 2021) และอิทธิพลของระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ ต่อสมบัติของเส้นใยจะแตกต่างกันตามสมบัติของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูป ความไม่เสถียร ความไม่

อำนาจของพอลิเมอร์ต่อกระบวนการเมลต์โบลว์น ส่งผลให้เกิดสัมพันธภาพของเส้นใยเปลี่ยนไป แม้จะมีความรู้อย่างกว้างขวางเกี่ยวกับกระบวนการเมลต์โบลว์น แต่กลไกการสร้างเส้นใยในกระบวนการนี้ยังคงต้องการการมองเชิงลึกอีกมากในสภาวะการขึ้นรูปผ้าไม่ทอ (Bresee & Qureshi, 2002)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมผ้าไม่ทอจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น และศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ความดันอากาศที่ใช้ในการขึ้นรูป และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ จากนั้นศึกษารูปร่างลักษณะสัมพันธภาพสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และโครงสร้างผลึกของผ้าที่ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) เครื่องทดสอบแรงดึง และเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ และสามารถพัฒนาผ้าไม่ทอที่สามารถย่อยสลายได้ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

พอลิแลคติกแอซิด Ingeo™ Biopolymer 3251D, NatureWorks, LLC, USA; MFR 24 g/10min (180°C/2.16 kg), density 1.24 g cm⁻³, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกรด FZ78tm, PTT MCC BIOCHEM, Thailand; MFR 27.96 g/10min (180°C/2.16 kg), density 1.31 g cm⁻³, เครื่องวัดดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ (Melt flow indexer รุ่น XRL-400A), เครื่องผลิตผ้าเมลต์โบลว์น (Melt blown machine) รุ่น SR V-N-28 ยี่ห้อ NIHON YUKI SR-RUDER BAMBI แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องผลิตผ้าเมลต์โบลว์น

การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมพอลิเมอร์ก่อนขึ้นรูปแผ่นผ้า โดยการนำเม็ดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงขึ้นไป เพื่อไล่ความชื้นให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่ดีที่สุด

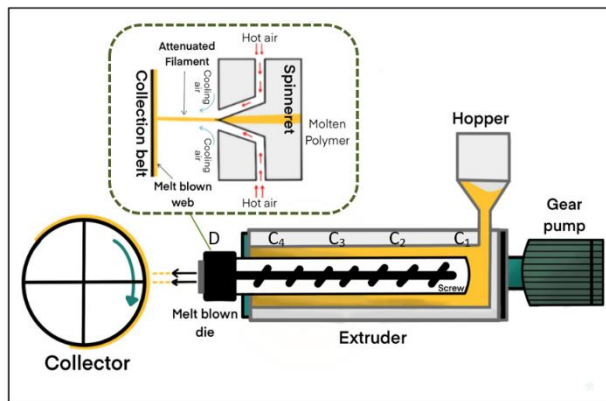
ศึกษาดัชนีการไหลของเม็ดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเครื่องวัดดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ (Melt flow indexer) ที่อุณหภูมิ 180-250 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่ใช้ 2.16 กิโลกรัม โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Polymer	MFI (g/10min)							
	180°C	190°C	200°C	210°C	220°C	230°C	240°C	250°C
PBS(FZ78tm)	27.96	31.98	40.06	45.94	58.34	66.84	67.66	80.02
PLA(3251D)	25.00	43.06	51.28	82.97	103.40	120.84	-	-

การเตรียมผ้าแบบไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

สำหรับการทดลองนี้เป็นออกแบบห้องปฏิบัติการ และสร้างชุดทดลองในการผลิตผ้าแบบไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์นขึ้นเอง ซึ่งเป็นเทคนิคการเป่าหลอมละลายที่ใช้การอัดรีดแบบต่อเนื่องในขั้นตอนเดียว โดยใช้กระแสมเป็นหลัก แสดงดังภาพที่ 2 ในขั้นตอนแรกป้อนเม็ดพอลิเมอร์เข้าไปในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวผ่านทางกรวยหรือ ฮอปเปอร์ (Hopper) พอลิเมอร์จะค่อยๆ หลอมละลายด้วยความร้อนจากสกรูและถูกอัดออกมาทางช่องเล็กๆ (Spinneret) จากนั้นพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวจะถูกกดทอนให้เล็กลงเป็นไมโครไฟเบอร์ด้วยกระแสมร้อน ในระหว่างนี้เส้นใยจะถูกส่งไปยังตัวม้วนเก็บ (Collector) และจะเกิดพันธะที่จุดสัมผัสระหว่างเส้นใยกับเส้นใย สุดท้ายเส้นใยถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเพื่อสร้างผ้าแบบไม่ทอ



ภาพที่ 2 กระบวนการขึ้นรูปเส้นใยของเมลต์โบลว์น

ในงานวิจัยนี้ทำการปรับตั้งพารามิเตอร์ให้คงที่ดังนี้ อัตราเร็วการหมุนของสกรู (TP) 13.2 รอบต่อนาที หัวฉีดแบบกลม 3 รู (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 มิลลิเมตร) อุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปปรับให้เหมาะสมตามชนิดของพอลิเมอร์ สำหรับพอลิแลคติกแอซิดใช้อุณหภูมิที่ตำแหน่ง C_1 - C_4 อยู่ที่ 170-240 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่หัวฉีด (D) 250 องศาเซลเซียส พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตใช้อุณหภูมิตำแหน่ง C_1 - C_4 อยู่ที่ 170-270 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่หัวฉีด (D) 275 องศาเซลเซียส อ้างอิงตามตำแหน่งดังภาพที่ 2 และมีการปรับตั้งสภาวะการขึ้นรูปแผ่นผ้าไม่ทอดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะการปรับตั้งการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

Sample code		Conditions	
		DCD (cm)	Air pressure (MPa)
Poly lactic acid (PLA)	PLA-1	15	0.2
	PLA-2	15	0.4
	PLA-3	30	0.2
	PLA-4	30	0.4
	PLA-5	45	0.2
	PLA-6	45	0.4
Polybutylene succinate (PBS)	PBS-1	15	0.2
	PBS-2	15	0.4
	PBS-3	30	0.2
	PBS-4	30	0.4
	PBS-5	45	0.2
	PBS-6	45	0.4

วิธีการทดสอบ และวิเคราะห์ผล







หลังจากขึ้นรูปผ้าแบบไม่ถักทอจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในสภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกันแล้วนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ดังนี้

1. ทดสอบสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) NETZSCH DSC 214 ตัวอย่าง (ประมาณ 3 มิลลิกรัม) ถูกทำให้ร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน (อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที) ที่อุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) JEOL JSM-6610LV, Oxford X-Max 50 วัดที่ 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย x1000 เท่า (Low vacuum mode) ขนาดตัวอย่าง 1x1 เซนติเมตร ทำการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนนำไปทดสอบ
3. ทดสอบสมบัติทางกลของตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Instron universal testing machine (INSTRON 5560) ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ใช้ขนาดตัวอย่าง 1x10 เซนติเมตรจำนวนตัวอย่างละ 10 ชิ้นงานทดสอบที่อัตราการดึง 10 มิลลิเมตรต่อนาที
4. วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของผ้าไม่ทอโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD), Bruker AXS Model D8 Advance, Germany Diffraction patterns ของตัวอย่างวัดโดย Cu-K α radiation (ความยาวคลื่น 0.154 นาโนเมตร) ที่ 30 กิโลโวลต์ และ 10 มิลลแอมแปร์ ศึกษาในช่วงมุม 2 θ ตั้งแต่ 5 ถึง 40 องศา

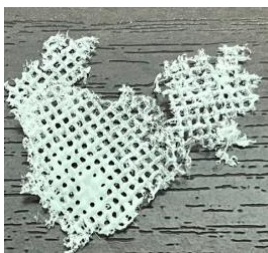



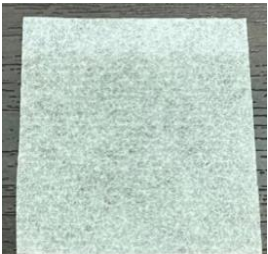

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาลักษณะปรากฏทางกายภาพ

ผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิเมอร์ 2 ชนิด ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์ในสภาวะแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 สังเกตได้ว่าผ้าไม่ทอพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะนุ่มฟูคล้ายสำลี สำหรับผ้าไม่ทอพอลิบิวทิลีน-ซัคซิเนตมีลักษณะแข็งเปราะ และบางกว่า และไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าที่สมบูรณ์ได้ในสภาวะที่ 1 และ 2 หรือที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร

Air pressure (MPa)	Die to collector distance (DCD)		
	15 cm	30 cm	45 cm
0.2			
0.4			

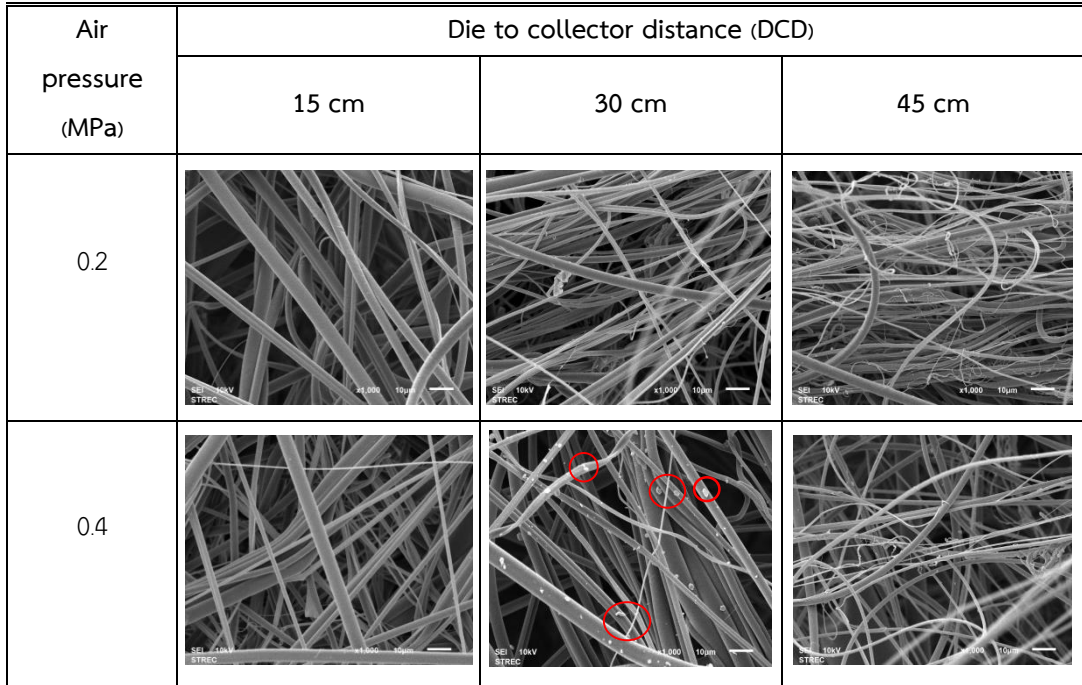
ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์ขึ้นรูปที่สภาวะแตกต่างกัน

Air pressure (MPa)	Die to collector distance (DCD)		
	15 cm	30 cm	45 cm
0.2			
0.4			

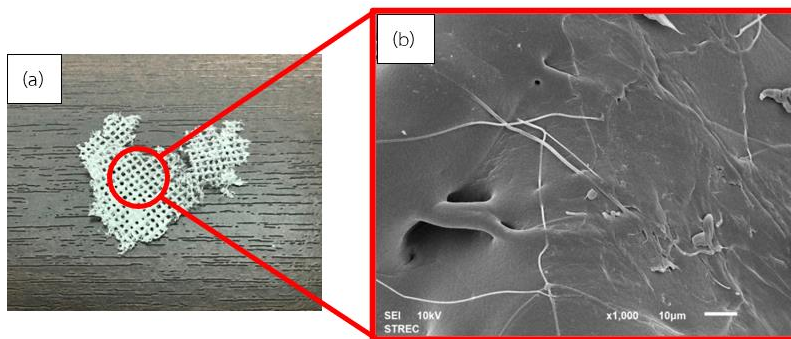
ภาพที่ 4 แสดงลักษณะของผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิเอทิลีนซัคซินเนตด้วยกระบวนการเมลต์โบลน ขึ้นรูปที่สภาวะแตกต่างกัน

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผ้าไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลน ภาพที่ 5 แสดงภาพถ่ายกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 1000 เท่าของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลนในสภาวะที่แตกต่างกัน 6 สภาวะ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวคล้ายกัน แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และการจัดเรียงตัวของเส้นใยแตกต่างกันออกไปตามสภาวะการขึ้นรูป พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล ลักษณะเส้นใยเรียงเป็นระเบียบ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.19 ไมโครเมตร พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล มีลักษณะเส้นใยยาวเรียงเป็นระเบียบเช่นกัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.95 ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่าสภาวะแรก พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.79 ไมโครเมตร พอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.46 ไมโครเมตร เมื่อสังเกตจากภาพในสภาวะนี้มีหยดเส้นใยเล็กๆ เกาะอยู่บริเวณเส้นใยทั้งนี้อาจเป็นเพราะความกดอากาศหรือความดันลมที่สูงเกินไปทำให้เส้นใยสลายหาย และสร้างหยดเส้นใยเล็กๆ (Droplets, Flies) ออกมา และมาถูกรวมเข้ากับเส้นใย (Yahya & Olos, 2021) ผ้าไม่ทอขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล ได้เส้นใยยาวมีลักษณะโค้งงอจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ

2.77 ไมโครเมตร และพอลิแลคติกขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นใยมีความโค้งงอคล้ายกับภาพก่อนหน้านี้ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.25 ไมโครเมตร



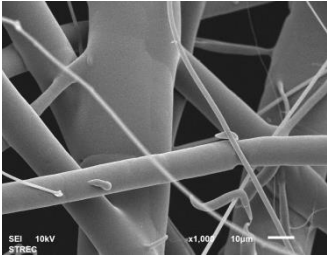
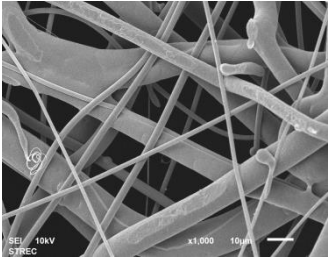
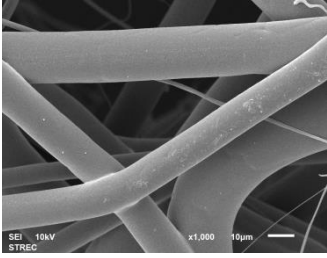
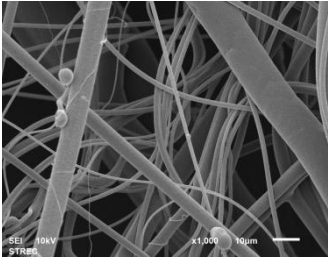
ภาพที่ 5 รูปร่างสัณฐานของผ้าไม่ทอขึ้นรูปจากพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น ขึ้นรูปที่สภาวะแตกต่างกัน



ภาพที่ 6 ตัวอย่างชิ้นงานพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลม 0.2 เมกะปาสคาล (a) ภาพจากแสงจริง (b) กำลังขยาย 1000 เท่า

การขึ้นรูปผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 และ 0.4 เมกะปาสคาล ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าได้อย่างสมบูรณ์ แสดงดังภาพที่ 6 (a) เนื่องจากระยะที่ใกล้เกินไป กระแสพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวใช้เวลาในการแข็งตัวหรือเกิดผลึกได้ไม่ทันเมื่อ

พอลิเมอร์กระทบกับตัวเก็บเส้นใยขณะนั้นพอลิเมอร์ยังมีลักษณะเหนียวหนืดอยู่และถูกรวมตัวเป็นก้อนเส้นใยขนาดใหญ่ลักษณะดังภาพที่ 6 (b)

Air pressure (MPa)	Die to collector distance (DCD)	
	30 cm	45 cm
0.2		
0.4		

ภาพที่ 7 รูปร่างสัณฐานของผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์นที่สภาวะแตกต่างกัน

ภาพที่ 7 แสดงภาพของผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์นในสภาวะที่แตกต่างกัน 4 สภาวะ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวคล้ายกัน ขนาดของเส้นใยค่อนข้างใหญ่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล เส้นใยมีขนาดใหญ่มาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 11.80 ไมโครเมตร พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 6.79 ไมโครเมตร พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.2 เมกะปาสคาล เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 11.82 ไมโครเมตร พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 45 เซนติเมตร ความดันลมที่ 0.4 เมกะปาสคาล เส้นใยมีขนาดเล็กกว่าสภาวะอื่น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 4.21 ไมโครเมตร

ตารางที่ 3 ตารางสรุปค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยที่สภาวะแตกต่างกัน

Sample code		Conditions		Diameter (μm)
		DCD (cm)	Air pressure (MPa)	
Poly lactic acid (PLA)	PLA-1	15	0.2	3.19
	PLA-2	15	0.4	2.95
	PLA-3	30	0.2	2.79
	PLA-4	30	0.4	3.46
	PLA-5	45	0.2	2.77
	PLA-6	45	0.4	2.25
Polybutylene succinate (PBS)	PBS-1	15	0.2	-
	PBS-2	15	0.4	-
	PBS-3	30	0.2	11.80
	PBS-4	30	0.4	6.79
	PBS-5	45	0.2	11.82
	PBS-6	45	0.4	4.21

เมื่อพิจารณารูปร่างสัณฐานและวิเคราะห์อิทธิพลในกระบวนการผลิต พบว่า ชนิดของพอลิเมอร์ส่งผลต่อรูปร่างสัณฐานของผ้าไม่ทออย่างชัดเจน คือ เส้นใยที่ได้จากผ้าพอลิแลคติกแอซิด มีขนาดเล็กและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีขนาดที่สม่ำเสมอว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต นอกจากนี้ ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บยังมีผลกระทบโดยตรงกับขนาดของเส้นใย คือ เมื่อเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บเป็น 30 และ 45 เซนติเมตร ขนาดเส้นใยของผ้าไม่ทอจากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงความดันลมที่เพิ่มขึ้นขนาดเส้นใยก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน

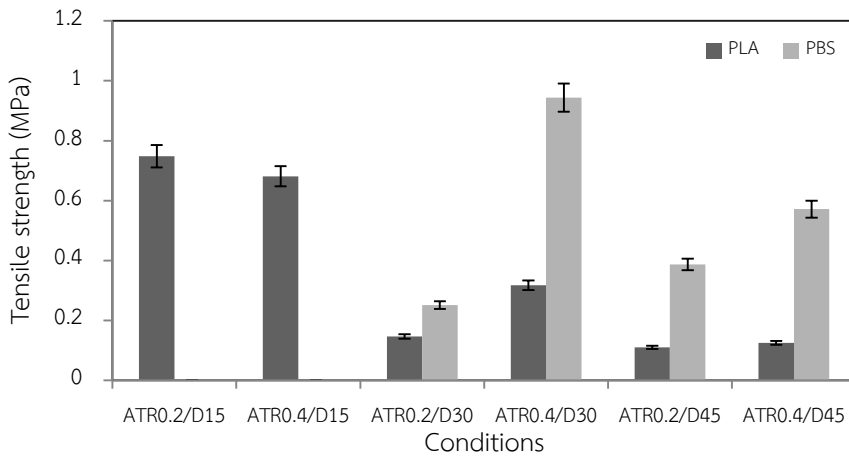
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติทางกลผ้าไม่ทอ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Instron universal testing machine (INSTRON 5560)) โดยจะทดสอบชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผ้าสมบูรณ์เท่านั้น ผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สภาวะ 1 และ 2 ไม่สามารถทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงได้ ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และ ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของผ้าไม่ทอแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลของผ้าไม่ทอจากพอลิเมอร์ 2 ชนิดผลิตด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น

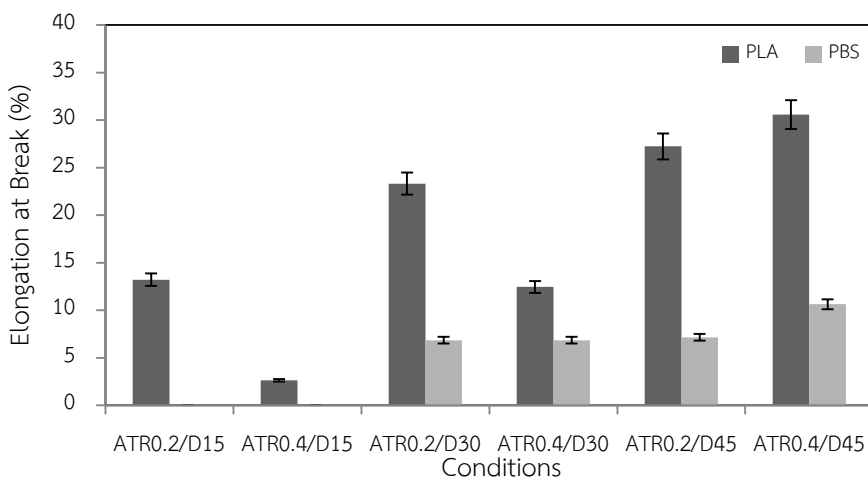
Polymers	Condition		Tensile strength (MPa)	%Elongation
	Air pressure (MPa)	DCD (cm)		
Poly lactic acid (PLA)	0.2	15	0.75 ± 0.04	13.22 ± 0.66
	0.4	15	0.68 ± 0.03	2.63 ± 0.13
	0.2	30	0.15 ± 0.01	23.32 ± 1.16
	0.4	30	0.32 ± 0.02	12.45 ± 0.62
	0.2	45	0.11 ± 0.01	27.24 ± 1.36
	0.4	45	0.13 ± 0.01	30.58 ± 1.53
Polybutylene succinate (PBS)	0.2	15	-	-
	0.4	15	-	-
	0.2	30	0.25 ± 0.01	6.86 ± 0.34
	0.4	30	0.95 ± 0.05	6.85 ± 0.34
	0.2	45	0.39 ± 0.02	7.16 ± 0.36
	0.4	45	0.57 ± 0.03	10.63 ± 0.53

จากการทดสอบแสดงผลการทดสอบในภาพที่ 8 ค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น พบว่า ผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่สภาวะที่ 4 มีความสามารถในการทนต่อแรงดึงมากที่สุด คือ 0.95 เมกะปาสคาล และเมื่อสังเกตภาพรวมของกราฟผ้าไม่ทอจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูงกว่าผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดมากในทุกสภาวะที่สามารถทดสอบได้ เมื่อพิจารณาผลกระทบของความดันลม พบว่าความดันลมที่มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการทนต่อแรงดึงของผ้ามีแนวโน้มสูงขึ้น และพิจารณาผลกระทบจากระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ สำหรับผ้าไม่ทอพอลิแลคติกแอซิดมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงสูงที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 15 เซนติเมตร และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ เพิ่มขึ้นต่าง ในทางกลับกันผ้าจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าความสามารถทนต่อแรงดึงมากกว่าที่ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ 30 เซนติเมตร



ภาพที่ 8 ความสามารถในการทนต่อแรงดึงของผ้าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่สภาวะการขึ้นรูปแตกต่างกัน

ภาพที่ 9 แสดงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของผ้าไม่ทอจากพอลิแลคติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พิจารณาชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป พบว่า ผ้าจากพอลิแลคติกแอซิดมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าผ้าจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในทุกๆ สภาวะ นอกจากนี้แล้วอิทธิพลของความดันลมยังส่งผลต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้า คือ เมื่อความดันลมสูงขึ้นผ้าที่ได้มีแนวโน้มของร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ พบว่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของผ้าจากพอลิแลคติกแอซิดมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บเช่นเดียวกับผ้าจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ

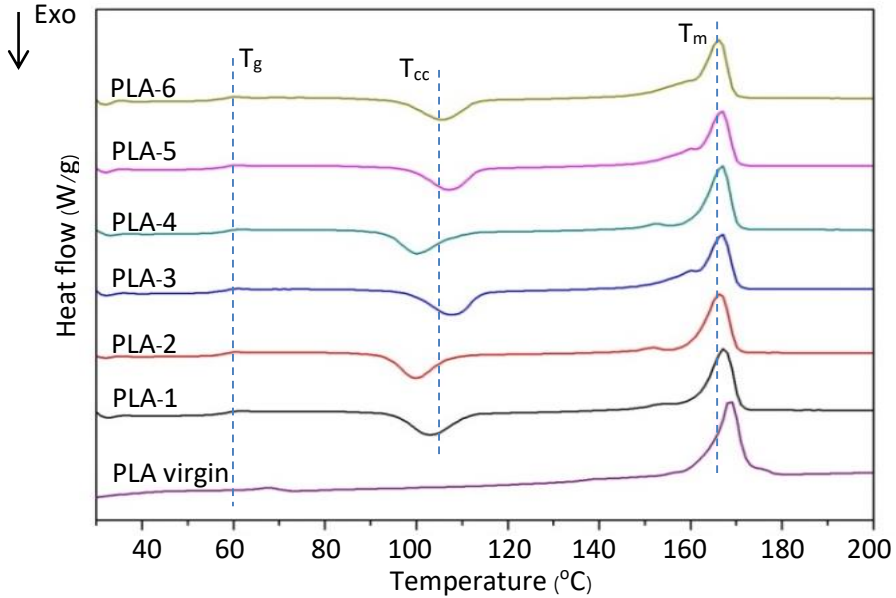


ภาพที่ 9 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของผ้าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ที่สภาวะการขึ้นรูปแตกต่างกัน

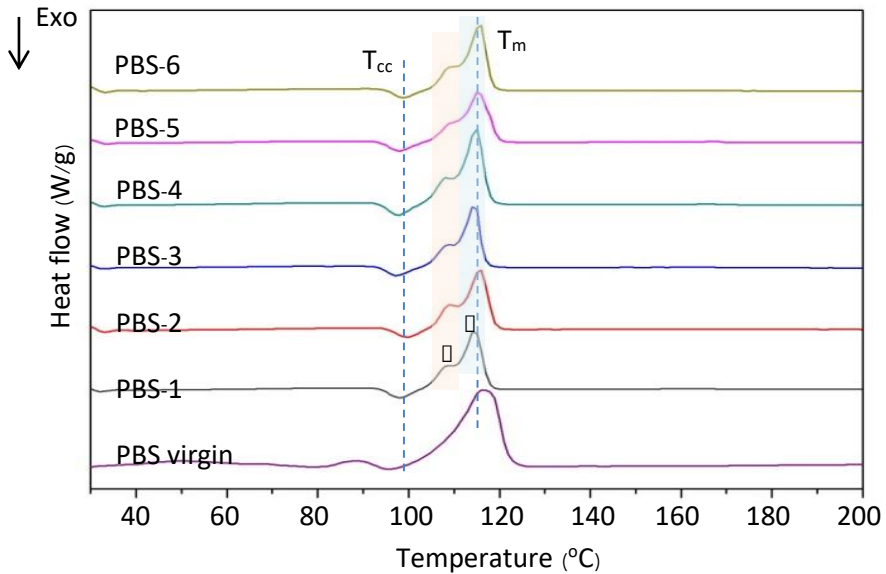
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ของเม็ด พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตก่อนขึ้นรูป และผ้าไม่ทอ ภาพที่ 10 (a)-(b) และสรุปตารางที่ 5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของเม็ด PLA บริสุทธิ์อยู่ที่ประมาณ 68.10 °C. ในทางตรงกันข้าม อุณหภูมิดังกล่าวลดลงเหลือประมาณ 60.10 °C ในผ้าไม่ทอของ PLA ซึ่งแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยในทั้ง 6 สภาวะ เกี่ยวกับความกดอากาศที่แตกต่างกันและ DCD ที่ใช้ในการก่อตัวเส้นใยโดย กระบวนการเมลต์โบลว์ ดังนั้นกล่าวได้ว่ากระบวนการเมลต์โบลว์ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ PLA แต่ไม่ขึ้นอยู่กับการ DCD และความดันอากาศที่ใช้ นอกจากนี้กราฟเส้นโค้ง DSC ของตัวอย่างทั้ง 6 สภาวะที่แตกต่างกันของ PLA แสดงจุดสูงสุดของการคายความร้อนซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการตกผลึกเย็น (Cold crystallization temperature, T_{cc}) ของกระบวนการ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ และการจัดเรียงใหม่ของสายโซ่ โพลิเมอร์ PLA ถึงกระนั้น T_{cc} ก็แตกต่างกันไปตามตัวอย่างผ้าไม่ทอของ PLA ที่แตกต่างกัน เม็ด PLA บริสุทธิ์และ ผ้าไม่ทอของ PLA แสดงพฤติกรรมการตกผลึกหลายอย่าง แต่ค่าสูงสุดของ T_{cc} ไม่ปรากฏในเม็ด PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากการตกผลึกเกิดขึ้นใน PLA ที่ผ่านกระบวนการเมลต์โบลว์ (ผ้าไม่ทอของ PLA) และเงื่อนไขของการขึ้น รูปในกระบวนการเมลต์โบลว์ที่แตกต่างกัน นำไปสู่ค่า T_{cc} ที่แตกต่างกัน อุณหภูมิหลอมเหลวของผลึก (T_m) มี ค่าประมาณเท่ากันสำหรับผ้าไม่ทอ PLA ทั้ง 6 สภาวะ ประมาณ 167 °C แตกต่างจาก T_m ของเม็ด PLA เล็กน้อย การตกผลึกซ้ำของผลึกที่มีความคงตัวทางความร้อนที่แตกต่างกันนั้นเชื่อมโยงกับการอธิบายจุดสูงสุดหรือพีค สูงสุดของ T_m พีคของการดูดกลืนความร้อนเกิดจากผลึกที่แตกต่างกัน 3 ประเภท การหลอมซ้ำของผลึกที่เกิดขึ้น ระหว่างการตกผลึกซ้ำ และพีคสูงสุดของการอบอ่อน (Annealing peak) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ เศษส่วนอสัณฐานแข็ง (RAF) จาก RAF ที่มีลักษณะคล้ายของแข็งไปเป็นลักษณะคล้ายของเหลว RAF การค้นพบ นี้สอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้านี้ (Puchalski, et al., 2019) สำหรับ PBS และเม็ดบริสุทธิ์และผ้าไม่ทอของ PBS และ PLA ต่างๆ มักจะแสดงการเปลี่ยนแปลง T_{cc} และ T_m ที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 10 (b) เมื่อวิเคราะห์ ผลกระทบของ DCD และความดันอากาศต่อพฤติกรรมทางความร้อน พบว่าผ้าไม่ทอ PBS และ PLA แสดง พฤติกรรมทางความร้อนที่คล้ายกัน โดย T_{cc} ของเม็ด PBS บริสุทธิ์อยู่ที่ 95.4°C และเพิ่มขึ้นเป็น 97-98 °C ในผ้า ไม่ทอ PBS โดยธรรมชาติแล้วสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าควรจะตกผลึกก่อน เนื่องจากอัตราการ เคลื่อนที่และการแพร่กระจายของสายโซ่จะสูงกว่าที่อุณหภูมิที่กำหนด ดังนั้นกระบวนการเมลต์โบลว์ ส่งผล กระบวนการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ PBS โดยการเปลี่ยนแปลงใน DCD และความดันอากาศมีผลกระทบ เล็กน้อยและไม่มีผลกระทบที่มีนัยสำคัญต่อ T_{cc} ของผ้าไม่ทอ PBS (Chae, H.G., et al., 2004) กราฟการหลอม ละลายในเวลาต่อมาของเม็ด PBS บริสุทธิ์ และผ้าไม่ทอ PBS ที่แตกต่างกันเผยให้เห็นว่า T_m ของเม็ด PBS บริสุทธิ์ คือ 116.4 °C จากนั้นลดลงเหลือ 114 °C ในผ้าไม่ทอ PBS นั่นคือกระบวนการเมลต์โบลว์ส่งผลต่อการ ละลายของ PBS นอกจากนี้พบการรวมกันของ α - และ β -crystal เชื่อมต่อกับพีคของการหลอมเหลว การ ปรากฏที่ซับซ้อนของจุดหลอมเหลวสองจุดน่าจะเกิดจากการปฏิสัมพันธ์ของการเปลี่ยนเฟส β - ถึง α และกลไก

การตกผลึกใหม่ เชื่อกันว่ากลไกการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนทำให้ T_m ของ β -crystal สูงกว่าของ α -one อย่างมาก (Yang, et al., 2011)



(a)



(b)

ภาพที่ 10 กราฟสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ของผ้าไม่ทอ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลดต์โบล์วน์ที่สภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

การวิเคราะห์การให้ความร้อน DSC ของวัสดุที่ศึกษาสรุปไว้ในตารางที่ 5 ในแง่ของความแปรผันโดยประมาณใน T_g , T_m , อุณหภูมิการตกผลึก (T_c), T_{cc} และระดับความเป็นผลึก (X_c) สำหรับตัวอย่างผ้าไม่ทอ PLA และ PBS ที่ศึกษา X_c ถูกคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ ΔH_m คือเอนทัลปีการหลอมเหลว ΔH_{cc} คือเอนทัลปีของการตกผลึกเย็น และ ΔH_f^0 คือเอนทัลปีการหลอมของโพลีเมอร์ที่เป็นผลึก 100% (เท่ากับ 93.1 J/g สำหรับ PLA (Tsuji H., 2005) และ 110.3 J/g สำหรับ PBS (Hu, et al., 2017))

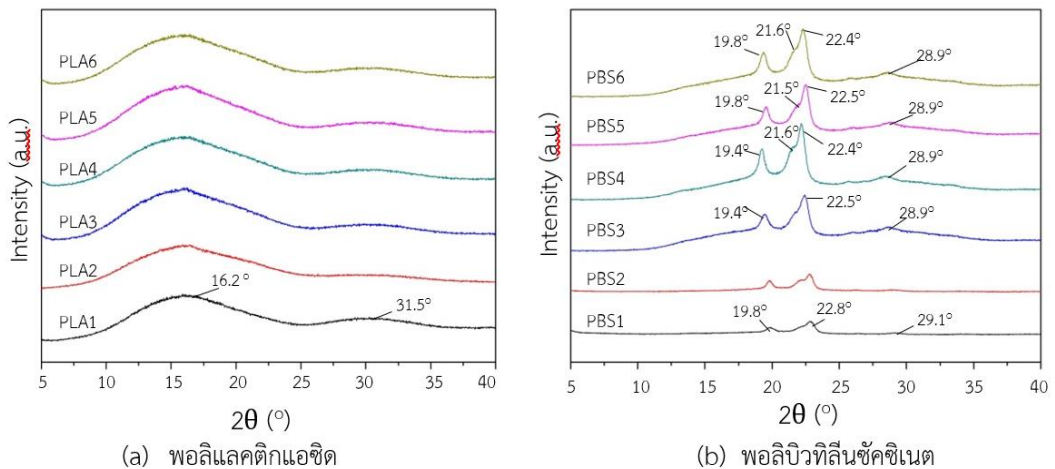
ตารางที่ 5 สมบัติทางความร้อนของเม็ดพอลิแลคติกแอซิด และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ผ้าไม่ทอพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Conditions		Poly lactic acid (PLA)					Polybutylene succinate (PBS)			
Air pressure (MPa)	DCD (cm)	T_g (°C)	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Neat		68.1	169.2	-	41.3	-	95.4	116.4	77.9	61.93
0.2	15	60.1	167.1	105.8	54.7	15.80	98.1	114.5	72.0	56.80
0.4	15	60.2	167.3	100.7	51.3	21.03	98.7	114.6	80.4	64.53
0.2	30	60.0	167.3	109.0	42.4	10.05	97.3	114.5	70.9	55.51
0.4	30	60.1	167.0	100.9	44.3	13.34	97.4	114.8	75.7	59.61
0.2	45	60.2	167.0	108.9	50.3	18.93	97.1	114.4	72.3	56.34
0.4	45	60.0	167.2	106.5	52.23	20.91	97.5	114.6	80.2	64.88

ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากผลการทดสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของผ้าพอลิแลคติกแอซิด และผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยการทดสอบเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ภาพที่ 4 แสดงผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผ้าพอลิแลคติกแอซิด ทั้ง 6 สภาวะ มีลักษณะพีกกว้าง (Broad) ซึ่งให้เห็นว่าส่วนใหญ่พอลิแลคติกแอซิดอยู่ในสถานะอสัณฐานหรือปริมาณของผลึกต่ำ อย่างไรก็ตามผ้าพอลิแลคติกแอซิดทั้ง 6 สภาวะ พบพีคการเลี้ยวเบนที่สามารถสังเกตสองจุดที่ $2\theta = 16.2^\circ$ และ 31.5° เหมือนกัน สอดคล้องกับพีคการเลี้ยวเบนของเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Elwathig, Salah, You & Muhuo, 2018) สำหรับผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ในภาพที่ 4 พบว่ามีความเป็นผลึกมากกว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิดอย่างชัดเจน โดยกราฟของ PBS1 และ PBS2 ปรากฏพีคที่ความเข้มสูงสุดที่ $2\theta = 22.8^\circ$ และพีคที่มีความเข้มน้อยลงมา คือ 19.8° และ 29.1° มีความเป็นผลึกน้อยกว่าสภาวะอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากทั้ง 2 สภาวะมีระยะการขึ้นรูป (DCD) ที่ 15 เซนติเมตรซึ่ง

ใกล้เกินไป พอลิเมอร์ไม่สามารถจัดเรียงผลึกได้ทันขณะขึ้นรูป ส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าที่สมบูรณ์ได้และมีความเป็นผลึกน้อยกว่าสภาวะอื่น ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บมากขึ้นเป็น 30 และ 45 เซนติเมตร ในตัวอย่าง PBS3 PBS4 PBS5 PBS6 ส่งผลให้ความเป็นผลึกมากขึ้นดังกราฟ แสดงให้เห็นว่าระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ มีผลกระทบต่อความเป็นผลึกของผ้าพอลิবিທີลีนซัคซิเนต นอกจากนี้แล้วความดันลมยังมีผลต่อความเป็นผลึกของผ้าพอลิবিທີลีนซัคซิเนตเช่นกัน สังเกตได้จากกราฟ PBS4 และPBS6 เป็นการขึ้นรูปที่ความดันลม 0.4 เมกะปาสคาล มีพีคความเข้มสูงกว่าสภาวะที่ความดันลม 0.2 เมกะปาสคาลอย่างชัดเจน และปรากฏพีคที่ความเข้มสูงสุดที่ $2\theta=22.5^\circ$ และพีคที่มีความเข้มน้อยลงมา คือ 19.8° 21.6° และ 29.1° สอดคล้องกับพีคการเลี้ยวเบนของเส้นใยพอลิแลคติกแอสซิติก (Chaiwutthinan, 2014) และสามารถกล่าวได้ว่าการเพิ่มระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บ และความดันลมช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกของผ้าพอลิবিທີลีนซัคซิเนต



ภาพที่ 8 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผ้าไม่ทอ ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเมลต์โบลวน์ที่สภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

อภิปรายผล

จากการศึกษาการเตรียมผ้าไม่ทอด้วยกระบวนการเมลต์โบลวน์ และศึกษาอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอสซิติก และพอลิবিທີลีนซัคซิเนต ความดันลมที่ใช้ในการขึ้นรูป 0.2 และ 0.4 เมกะปาสคาลและ ระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวม้วนเก็บที่ 15 30 และ 45 เซนติเมตร จากนั้นศึกษาสมบัติทางความร้อน รูปร่างสันฐาน สมบัติทางกล โครงสร้างผลึก และหมู่ฟังก์ชันของผ้าไม่ทอ สามารถสรุปได้ว่า พอลิแลคติกแอสซิติก สามารถขึ้นรูปเป็นผ้าไม่ถักทอได้ดีทั้ง 6 สภาวะ สำหรับพอลิবিທີลีนซัคซิเนต ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นเส้นใยที่สมบูรณ์ได้ในระยะ 15 เซนติเมตร เนื่องจากพอลิবিທີลีนซัคซิเนต มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ค่อนข้างต่ำทำให้พอลิเมอร์ที่ถูกเป่าลงบนตัวม้วนเก็บแข็งตัวไม่ทันในระยะนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาศมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) ซึ่งให้เห็นว่า

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถเกิดผลึกได้มากกว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างของหัวฉีดกับตัวหมุนเก็บ การศึกษารูปร่าง สัณฐานพบว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีขนาดเส้นใยใหญ่กว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิดอย่างชัดเจน นอกจากนี้การเพิ่มความดันลม และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวหมุนเก็บส่งผลให้เส้นใยที่ได้จากผ้าไม่ทอของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ผลทดสอบสมบัติทางกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ยังชี้ให้เห็นว่า ความสามารถในการทนต่อแรงดึงและ ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันลมในการขึ้นรูป โดยที่ผ้าพอลิแลคติกแอซิดและ ผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มีความสามารถทนแรงดึงสูงสุดที่ ระยะห่างหัวฉีดกับตัวหมุนเก็บ 15 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมากสุดในระยะ 45 เซนติเมตร ผลจากการศึกษาโครงสร้างผลึกพบว่าผ้าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเป็นผลึกมากกว่าผ้าพอลิแลคติกแอซิด และปริมาณผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างของหัวฉีดกับตัวหมุนเก็บ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าอิทธิพลของกระบวนการผลิต ได้แก่ ชนิดของพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ความดันอากาศที่ใช้ในการขึ้นรูป และระยะห่างจากหัวฉีดถึงตัวหมุนเก็บ ล้วนมีผลกระทบต่อขนาดเส้นใยของผ้า สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และโครงสร้างผลึกอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามผ้าไม่ทอสามารถเตรียมได้จากพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดด้วยกระบวนการเมลต์โบลว์น และสามารถพัฒนาไปใช้สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนพัฒนาบัณฑิต (วช.) จากสำนักงานวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณบุรี และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัย

References

- Bresee, R.R. & Qureshi, U.A. (2002). Fiber motion near the collector during melt blowing : part2-fly formation. **International nonwovens journal**, **11**(3), 21-27.
- Chae, H.G., Park, S.H., Kim, B.C. & Kim, D.K. (2004). Effect of methyl substitution of the ethylene unit on the physical properties of poly (butylene succinate). **J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys**, **42**, 1759-1766.
- Chuayjulit, S., Chaiwutthinan, P., Samutthong, S., Saravari, O. & Boonmahitthisud, A. (2014). Effects of Poly (butylene succinate) and Calcium Carbonate on the Physical Properties of Plasticized Poly(vinyl chloride). **Journal of Metals, Materials and Minerals**, **24**(2), 15-21.
- Chaiwutthinan, P., Pimpan, V., Chuayjulit, S. & Leejarkpai, T. (2015). Biodegradable Plastics Prepared from Poly (lactic acid), Poly(butylene succinate) and Microcrystalline Cellulose Extracted from Waste-Cotton Fabric with a Chain Extender. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, **23**(1), 114-125.
- Chen, G.Q. & Patel, M.K. (2012). Plastics derived from biological sources: present and future: A technical and environmental review. **Chemical Reviews**, **112**, 2082-99.
- Duran, K., Deniz, D., Gurkan, O. & Kevser, K. (2013). Investigation of the physical properties of melt blown nonwovens for air filtration. **Journal of textile & apparel**, **23**(2), 136-142.
- Elwathig, H., Salah, E., You, W. & Muhuo, Y. (2017). Biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) fibers with high elongation for health care products. **Textile Research Journal**, **88**(15), 1735-1744.
- Hu, X., Su, T., Pan, W., Li, P. & Wang, Z. (2017). Difference in solid-state properties and enzymatic degradation of three kinds of poly (butylene succinate)/cellulose blends. **RSC Adv**, **7**, 35496-35503.
- Jompang, L., Supaphorn, T., Jessada, W., Prayoon, S., Chiyaprek, A., Tirapong, C., Narin, K., Narongchai, O. & Narongchai, O. (2013). Poly (lactic acid) and poly (butylene succinate) blend fibers prepared by melt spinning technique. **Energy Procedia**, **34**(5), 493-499.
- Kathryn, C.D. (2013). Overview and analysis of the meltblown process and parameters. **Journal of textile & apparel, Technology and management**, **6**(1), 1-21.

- Nor, F.Z. & Mariatti, J. (2020) A review on degradation mechanisms of polylactic acid: hydrolytic photodegradative microbial and enzymatic degradation. **Polymer engineering and science**, **60**, 2061-2075.
- Peng, M., Jia, H. & Jiang, L. (2019). Study on structure and property of PP/TPU meltblown nonwovens. **Journal Text Inst**, **110**, 468-475.
- Puchalski, M., Siwek, P., Panayotov, N., Berova, M., Kowalska, S. & Krucnska, I. (2019) Influence of various climatic conditions on the structural changes of semicrystalline pla spun-bonded mulching nonwovens during outdoor composting. **Polymers**, **11**, 559.
- Shen, S., Rodion, K., Sengul, T. & Stephan, K. (2013). Polylactide (PLA) and its blends with poly(butylene succinate) (PBS): a brief review. **Journal Polymers (Basel)**, **11**(7), 1193.
- Tsuji, H. (2005). Poly (lactide) stereocomplexes : Formation, structure, properties, degradation, and applications. **Macromol. Biosci**, **5**, 569–597.
- Yahya, K. & Olos, M. (2021). Revealing of process-structure-property relationships of fine polypropylene fiber mats generated via melt blowing. **Polymers Advanced Technologies**, **10**(32), 5270.
- Yang, J., Pan, P., Hua, L., Xie, Y., Dong, T., Zhu, B., Inoue, Y. & Feng, X. (2011). Fractionated crystallization, polymorphic crystalline structure, and spherulite morphology of poly (butylene adipate) in its miscible blend with poly (butylene succinate). **Polymer**, **52**, 3460.3468.
- Yalcin Y. (2015). Effect of air quenching on characteristics of thermoplastic polyurethane meltblown nonwoven. **Journal textile and apparel**, **25**(3), 236-245.