การเตรียมพอลิบิวธิลีนซัคซิเนตนอนวูฟเวนที่มีขนาดละเอียดด้วยค๊อตตอนแคนดี้เมลโบรนด์

Preparation of Ultra-fine Polybutylene Succinate Nonwoven via Cotton-candy Meltblown Process

นรรจพร เรืองไพศาล และนารีรัตน์ จริยะปัญญา*

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: nanjaporn_r@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการค๊อตตอนแคนดี้เมลโบรนถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อขึ้นรูปพอลิบิวทิลีนซัคซิเนนอนวูฟเวนให้มีขนาดละเอียด เพื่อการใช้งานป้องกัน ช่วยเสริมและประกอบกับผลิตภัณฑ์นอนวูฟเวนหลักเพื่อเสริมประสิทธิภาพการนำไปใช้งาน สำหรับการเตรียมขึ้นรูปแผ่นนอนวูฟเวนสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นเมลโบรนสำหรับการศึกษานี้ถูกออกแบบการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ โดยบนพื้นฐานของการตรวจสอบสมบัติพฤติกรรมทางความร้อน (DSC) และค่าอัตราการไหล (MFI) ทั้งนี้การตั้งค่าถูกกำหนดให้อุณหภูมิ แรงลมร้อน ระยะทางระหว่างหัวฉีดถึงชุดม้วนเก็บและความเร็วในการม้วนเก็บคงที่ โดยปรับเปลี่ยนค่าความเร็วสกรูให้เพิ่มขึ้น เพื่อสังเกตุความเปลี่ยนแปลงที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูปของกระบวนการ การทดสอบต่าง ๆ แสดงผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า เนื้อพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการฟอร์มเส้นใยในโครงสร้างผ้า การกระจายตัวของขนาดเส้นใย น้ำหนักผ้า อีกทั้งยังส่งผลต่อค่าการซึมผ่านของอากาศ ดังนั้นแนวคิดการผลิตแผ่นเมลโบรนจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่เป็นวัสดุที่เป็นเป็นกับสิ่งแวดล้อมอาจสามารถขยายการผลิตเชิงพานิชย์ได้

คำสำคัญ: เส้นใยขนาดนาโน, การขึ้นรูปแบบเป่าลมร้อน, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Abstract

Cotton-candy meltblown process was adopt for polybutylene succinate nonwoven production with ultra-fine fiber, in order to utilize as a barrier and support some efficiency of main product. For sample preparation, melt-spinning condition of meltblown process was set according to verification of thermal properties such as thermal behavior (DSC) and melt flow index (MFI). Spinning temperature, hot-air jet, distance from spinneret to collector and collector speed were fixed while adjustment of screw speed was increased for observing processability. Result suggested that tendency of mass flow rate affected on formation of ultra-fine fiber in nonwoven structure including distributed fiber, basis weight and air permeability. Therefore, a concept of eco-friendly nonwoven from biobased polymer could be expand into commercial manufacture.

Keywords: Nanofiber, meltblown process, polybutylene succinate and eco-friendly

บทนำ

เมลโบรนด์นอนวูฟเวนหรือเป็นการขึ้นรูปแบบเป่าลมร้อน เป็นเทคโนโลยีที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการขึ้นรูปนอนวูฟเวนที่ต้องการสมบัติเฉพาะทาง ขนาดเส้นใยในโครงสร้างผ้าละเอียดมักถูกใช้ในงานที่ต้องใช้แล้วทิ้ง (disposable product) เช่น การกรอง การดูดซับ และ/หรือ การใช้งานที่ต้องการพื้นที่ผิวสัมผัสมาก เป็นต้น เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่ได้ผลิตภัณฑ์นอนวูฟเวนปริมาณมาก (high productivity) และประหยัดพลังงาน (save energy) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนปั่นแบบสารละลาย [1]–[3] โดยพอลิเมอร์ที่สามารถนำมาใช้ผลิตในกระบวนการนี้จำกัด และ มีสมบัติจำเพาะ ได้แก่ พอลิพรอพิลีนที่มีอัตราการไหลสูงพิเศษ (>800 g/ 10 min หรือมากกว่า) และมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลแคบ (Narrow molecular weight) เพื่อให้สามารถหลอมเหลวได้อย่างสมบูรณ์ และมีความหนืดที่เหมาะสมมากพอจะถูกเป่าด้วยลมร้อน ยืดตัวและฟอร์มเป็นแผ่นนอนวูฟเวนที่มีความสม่ำเสมอได้ เป็นที่ทราบว่าพอลิพรอพิลีนนั้น ย่อยสลายได้ยาก จึงมักพบขยะจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้จำนวนมาก

ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจอย่างยิ่งที่จะพัฒนาแผ่นเมลโบรนด์นอนวูฟเวนที่พผลิตจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพประเภทที่สามารถย่อยสลายได้เร็วกว่า “พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต” หรือ PBS เป็นหนึ่งในกลุ่มของโคพอลิเมอร์ของพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรงระหว่างกรดซัคซินิกและ1,4 บิวเทนไดออลเป็นมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่สารมารถย่อยสลายได้ที่สภาวะที่เหมาะสม [4-5] สำหรับกระบวนการขึ้นรูปโดยการหลอมด้วยความร้อน PBS มีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวช่วง 120-132 องศาเซลเซียส และค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว -32 องศาเซลเซียส จึงเป็นอีกหนึ่งความท้ายทายในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นด้วยเทคนิคการเป่าลมร้อน มีรายงานการวิจัยที่ผ่านเกี่ยวกับพอลิเมอร์ชนิดโคพอลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการขึ้นรูปเส้นใยค่อนข้างต่ำเนื่องจากค่าการบวมตัวและความแข็งแรงขณะหลอมเหลวสูง [6-7] เพื่อที่จะได้รับแผ่นนอนวูฟเวนที่ผลิตจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีขนาดเส้นใยละเอียดผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป่าแบบลมร้อนด้วยเครื่องค๊อตตอนแคนดี้เมลโบรนด์ โดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ทดสอบวิเคราะห์หาสมบัติพื้นฐานของแผ่นนอนวูฟเวนที่ขึ้นรูปได้ เป็นโจทย์หลักในการพัฒนาแผ่นนอนวูฟเวนเมลโบรนด์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ลดปัญหามลภาวะจากขยะรวมทั้งเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการต่อยอดไปยังอุตสาหกรรมนอนวูฟเวนทางเลือกเชิงพานิชน์ในอนาคต

วิธีการศึกษา

1. วัตถุดิบ

1.1 เม็ดชิฟพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (MFR: 22 g/10 min, Density 1.31 g/cm^3)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

2.1 เครื่องขึ้นรูปแผ่นนอนวูฟเวนค๊อตตอนแคนดี้เมลโบรนด์

2.2 เครื่องทดสอบการไหลของพอลิเมอร์ (Melt Flow index, MFI)

2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

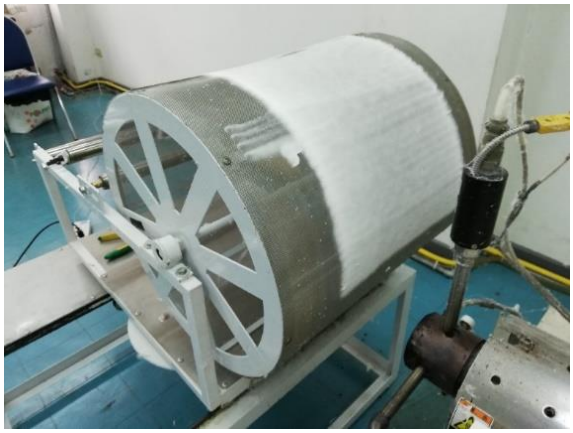
2.3 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC, NETZSCH 200F3)

2.4 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของอากาศ (air permeability, TEXTEST instrument)

3. ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.1 ศึกษาการเตรียมและสภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปแผ่นนอนวูฟเวนเมลโบรนด์จากพอลิบิทิลีนซัคซิเนตก่อนทำการขึ้นรูป PBS ถูกอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นสะสมในเม็ดชิฟ โดยการขึ้น

รูปตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 1 สภาวะการหลอมเพื่อขึ้นรูปแผ่นนอนวูฟเวนตัวแปรต่าง ๆ ถูกตั้งค่าดังตารางที่ 1 ดังนี้ อุณหภูมิการหลอมพอลิเมอร์ที่หัวฉีด คือ 230 องศาเซลเซียส, ระยะทางการเก็บฟอร์มเส้นใยจากหัวฉีดไปยังตัวเก็บและความดันลมร้อนเพื่อเป่ายืดเส้นใยถูกตั้งให้คงที่ที่ 35 เซนติเมตร, 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามลำดับ ความเร็วของชุดม้วนเก็บคงที่ที่ 2.5 เมตรต่อนาที ตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนคือความเร็วสรูสำหรับป้อนเนื้อพอลิเมอร์ คือ 6.7, 12 และ 22 รอบต่อนาที ทั้งนี้สภาวะการขึ้นรูปดังกล่าวเป็นสภาวะที่สามารถขึ้นรูปแผ่นได้อย่างต่อเนื่อง ลักษณะตัวอย่างแผ่นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ขึ้นรูปได้แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 1 แสดงการชุดเป่าลมร้อนและการฟอร์มแผ่นเมลโบรนนอนวูฟเวน

ตารางที่ 1 แสดงการตั้งค่าและสภาวะการขึ้นรูปแผ่นเมลโบรนนอนวูฟเวน

ตัวแปร	การตั้งค่า (สัญลักษณ์)
Spinning temperature (°C)	230 (T230)
Screw speed (rpm)	6.7, 12 and 22
Spinneret to collector distance (cm)	35 (D35)
Blowing-air pressure (psi)	40 (A40)
Conveyer velocity (m/min)	2.5

3.2 การทดสอบลักษณะทางความร้อนและกายภาพของเม็ดชิฟและแผ่นเมลโบรนนอนวูฟเวน

3.2.1 ทดสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดชิฟพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตก่อนทำการขึ้นรูปด้วยการหาค่าดัชนีการไหล (MFI) ด้วยมาตรฐาน ASTM D 1238

3.2.2 วิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของเม็ดชิฟพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตก่อนทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องDifferential Scanning Calorimetor (DSC) ด้วยอัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ 5 องศาต่อนาที ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30-200 องศาเซลเซียส

3.2.3 ทดสอบลักษณะของเส้นใยกล้วยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) กำลังขยายภาพสูง ระหว่าง 50 เท่า และ 2000 เท่า

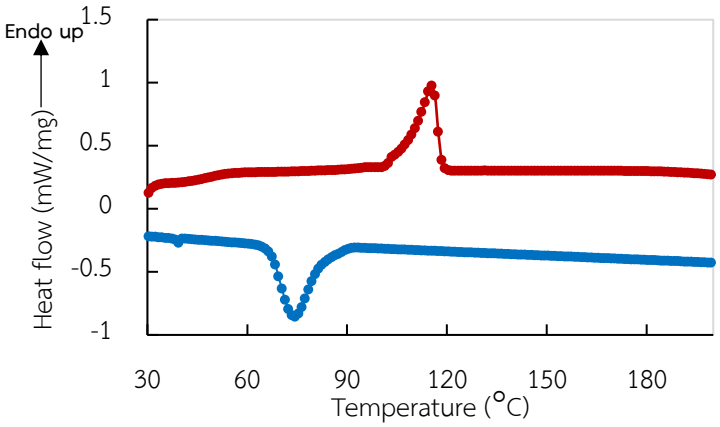
3.2.4 หาน้ำหนักผ้าที่รู้พื้นที่ที่แน่นอน (Basic weight, กรัมต่อตารางเมตร) ด้วยมาตรฐาน D 3776-96

3.2.5 ทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ (air permeability) ด้วยมาตรฐาน ASTM D 737

ผลการศึกษา

1. ผลการทดสอบค่าพลังงานทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

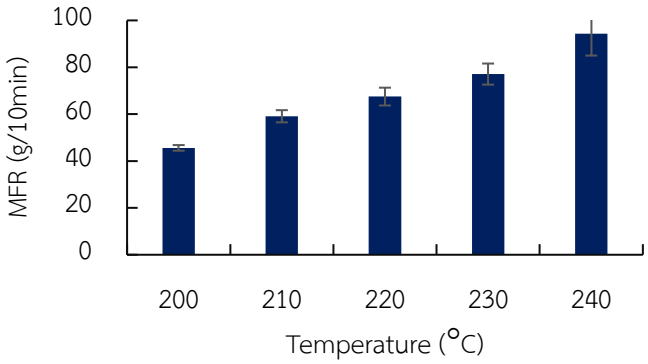
จากผลการทดสอบการดูดและคายพลังงานความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต แสดงดังภาพที่ 2 พบว่า ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ (Tm) 116.4 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเกิดผลึก (Tc) ที่ 73 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องค่าอุณหภูมิสูงกว่า Tm ค่อนข้างมากกว่ากระบวนการปกติเพื่อปรับการไหลให้เหมาะสมต่อเทคนิคเป่าลมร้อน



ภาพที่ 2 กราฟเทอร์โมแกรมแสดงพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ภายใต้การเพิ่มและลดอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ 5 องศาต่อนาที

2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการไหลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ภาพที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการไหลของพอลิบิวทิลีนขณะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่างกันต่อความสามารถในการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเป่าลมร้อนนั้น พบว่า ค่าอัตราการไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 200 ถึง 240 องศาเซลเซียส โดยสำหรับการขึ้นรูปมักพบไม่ต่อเนื่องของพอลิเมอร์หลอมเมื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำกว่า 220 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 230 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์แสดงค่าอัตราการไหลสูง (> 80 กรัม/ 10 นาที) ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ค่อนข้างต่อเนื่องในทุก ๆ การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบสกรู (6.7, 12 และ 22 รอบต่อนาที ตามลำดับ) ดังกล่าวในข้างต้น

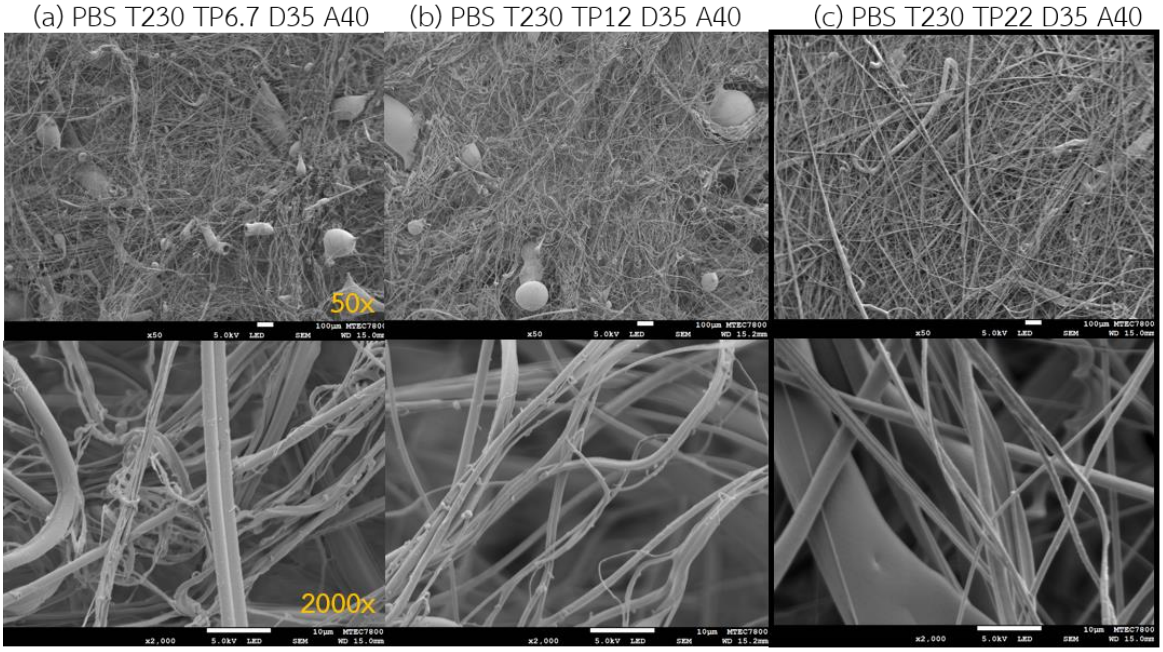


ภาพที่ 3 ค่าอัตราการไหลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

สำหรับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคเป่าลมร้อน นั้นต้องการพอลิเมอร์หลอมที่มีค่าอัตราการไหลที่สูงพิเศษเพื่อช่วยในการไหลยืดตัวขณะร้อน [8] สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิสูง มากกว่า 230 องศาเซลเซียส สามารถขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามสำหรับการทดลองนี้เลือกที่ 230 องศาเซลเซียส คืออุณภูมิที่ต่ำที่สุดที่สามารถขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการเสื่อมสลายทางความร้อน

3. ผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของแผ่นเมลโบรนที่ขึ้นรูปได้

ภาพที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของแผ่นเมลโบรนนอนวูฟเวนที่ขึ้นรูปได้ โดยทำการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบสกรูเพื่อเพิ่มเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไม่เท่ากันจากน้อยไปมาก(ตัวแปรอื่น คงที่) พบว่า ที่ความเร็วสกรูต่ำ (a) และ (b) การกระจายตัวของขนาดเส้นใยในโครงสร้างมีขนาดเล็ก (<1 ไมครอน ถึง 5 ไมครอน) อย่างไรก็ตามถึงแม้ขนาดเส้นใยมีจะขนาดเล็กลักษณะแต่มักพบเม็ดบีทหรือหยดในโครงสร้างแผ่นตัวอย่าง โดยเมื่อเพิ่มความเร็วสกรูเพื่อเพิ่มเนื้อพอลิเมอร์เป็น 22 รอบต่อนาที พบว่าการการหยดในแผ่นตัวอย่างน้อยลงและขนาดเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (<1 ไมครอน ถึง >10 ไมครอน) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นช่วยการไหลให้สม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อถูกเป่าร้อนความร้อนที่มีความดันสูง ลักษณะโดยทั่วไปของแผ่นเมลโบรนที่ขึ้นรูปได้มีความเรียบและสม่ำเสมอที่สภาวะการขึ้นรูปต่าง ๆ กัน มองด้วยตาเปล่าไม่สามารถเห็นการเกิดหยดหรือบีทได้ (ภาพที่ 5)



ภาพที่ 4 ลักษณะสัณฐานของแผ่นเมลโบรนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบสกรูต่างกัน (a) 6.7 รอบต่อนาที (b) 12 รอบต่อนาที และ (c) 22 รอบต่อนาที

ภาพที่ 5 ตัวอย่างแผ่นเมลโบรนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ขึ้นรูปได้

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผ้าและค่าการซึมผ่านอากาศของตัวอย่างเมลโบรนที่สภาวะขึ้นรูปต่างกัน

ตัวอย่างทดสอบ	น้ำหนักผ้า (กรัมต่อตารางเมตร)	ค่าการซึมผ่านอากาศ ($cm^3/cm^2/s$)
PBS_T230_**TP6.7**_D35_A40	62.36 ±5.65	56.3 ± 1.2
PBS_T230_**TP12**_D35_A40	92.31 ±7.14	45.1 ± 0.8
PBS_T230_**TP22**_D35_A40	121.1 ± 12.96	39.2 ± 1.7

การตรวจสอบความสามารถการซึมผ่านของอากาศผ่านแผ่นเมลโบรนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีการฟอร์มความหนาแน่นของเส้นใยต่อตารางพื้นที่ต่างกันหรือมีน้ำหนักผ้าต่อตารางเมตรที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักผ้าเป็นไปตามการเพิ่มปริมาณเนื้อพอลิเมอร์หลอม (เพิ่มความเร็วรอบสกรู ตั้งแต่ 6.7 12 และ 22 รอบต่อนาที ตามลำดับ) ค่าน้ำหนักผ้าที่วัดได้คือ 62.36, 92.31 และ 121.1 กรัมต่อตารางเมตร ในทางกลับกัน ค่าการซึมผ่านอากาศลดลง จาก 56.3 45.1 และ 39.2 ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าความหนาแน่นของเส้นใยที่แพคตัวในโครงสร้างผ้าที่เพิ่มขึ้น ลดความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ อีกนัยยะหนึ่งคือ อาจส่งผลต่อความสามารถและความเหมาะสมต่อการใช้งานของแผ่นเมลโบรนที่ใช้งานในประเภทต่าง ๆ กัน

บทสรุป

การเตรียมแผ่นเมลโบรนด้วยผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่าลมร้อน (Cotton-candy melt-blown process) สามารถทำได้สำเร็จที่อุณหภูมิการขึ้นรูปมากกว่า 230 องศาเซลเซียส โดยค่าอัตรากาไหลที่อุณหภูมิช่วงขึ้นรูปดังกล่าวส่งผลต่อการไหลขณะหลอมเหลวที่ต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากพอทำให้สามารถเตรียมตัวอย่างได้อย่างต่อเนื่อง (good processability) ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของเนื้อพอลิเมอร์หลอม (เพิ่มความเร็วสกรู) ค่าน้ำหนักผ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการซึมผ่านของอากาศลดลง อีกทั้งช่วยการฟอร์มตัวของเส้นใยในโครงสร้างเมลโบรนที่สม่ำเสมอมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Grafe, T., and Graham, K. (2003). Polymeric nanofibers and nanofiber webs: a new class of nonwovens. International Nonwovens Journal, (1), 51-55.

[2] Geus, H.G. (2016). Developments in manufacturing techniques for technical nonwovens. In Kellie, G. (Ed.), Advances in Technical Nonwovens (pp. 133-153). Cambridge, Woodhead Publishing.

[3] Bhardwaj, N., and Kundu, S.C. (2010). Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. Biotechnology advances, 28(3), 325-347.

[4] Wang, X., Zhou, J., & Li, L. (2007). Multiple melting behavior of poly (butylene succinate). European Polymer Journal, 43(8), 3163-3170

[5] Prahsarn, C., Klinsukhon, W., Padee, S., Suwannamek, N., Roungpaisan, N., and Srisawat, N. (2016). Hollow segmented-pie PLA/PBS and PLA/PP bicomponent fibers: an investigation on fiber properties and splittability. Journal of Materials Science, 51(24), 10910-10916.

[6] Shi, X.Q., Ito, H., and Kikutani, T. (2006). Structure development and properties of high-speed melt spun poly (butylene terephthalate)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) bicomponent fibers. Polymer, 47(2), 611-616.

[7] Dasdemir, M., Maze, B., Anantharamaiah, N., and Pourdeyhimi, B. (2012). Influence of polymer type, composition, and interface on the structural and mechanical properties of core/sheath type bicomponent nonwoven fibers. Journal of Materials Science, 47(16), 5955-5969.

[8] Rungiah, S., Ruamsuk, R., Vroman, P., Takarada, W., Appert‐Collin, J. C., and Kikutani, T. (2017). Structural characterization of polypropylene/poly (lactic acid) bicomponent meltblown. Journal of Applied Polymer Science, 134(14), 1-9.