**บทที่ 4**

**ผลการวิจัย**

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิแอลแล็กไทด์บล็อกพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรปทาเลต (PLLA-*b*-PBAT) โดยมี L-lactideเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีอัตราส่วน L-lactide/PBAT เป็น 100/0.3, 100/0.6 และ100/1.0wt% โดยมี PBAT โดยทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำมันอุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจะได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ปนอยู่แล้วนำไปละลายด้วยคลอโรฟอร์ม จากนั้นนำไปตกตะกอนด้วยเมทานอลเพื่อกำจัดมอนอเมอร์แล้วนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศจากนั้นนำสารที่กรองได้ไปอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมงหรือจนสารแห้งที่อุณหภูมิ 45 °C แล้วนำไปชั่งนำหนักเก็บสารในขวดปิดฝาให้เรียบร้อยจากนั้นนำผลึกพอลิเมอร์ที่ได้มาทำการศึกษาหาปริมาณร้อยละผลผลิต (%Yield) และศึกษาคุณลักษณะทางเคมีของ PLLA-*b*-PBAT การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งรายละเอียดและผลจากการวิจัยเป็นดังนี้

**4.1 ผลการหาปริมาณร้อยละผลผลิต (Yield percent)**

จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิแอลแล็กไทด์บล็อกพอลิบิวทิลีนอะดิเพตเทเรปธาเลต (PLLA-*b*-PBAT) โดยมี L-lactideเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีอัตราส่วน L-lactide/PBAT เป็น 100/0.3, 100/0.6 และ100/1.0wt% โดยทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำมัน (Oilbath) เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจะได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ปนอยู่แล้วนำไปละลายด้วยคลอโรฟอร์ม จากนั้นนำไปตกตะกอนด้วยเมทานอล เพื่อกำจัดมอนอเมอร์แล้วนำไปกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศจากนั้นนำสารที่กรองได้ใส่บีกเกอร์ปิดด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์เจาะรูเล็กๆนำไปอบเป็นเวลา 12 ชั่วโมงหรือจนสารแห้งที่อุณหภูมิ 45$°$C แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเก็บสารในขวดปิดฝาให้เรียบร้อย พอลิเมอร์ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 4.1

 ก. พอลิเมอร์ก่อนอบแห้ง ข. พอลิเมอร์หลังอบแห้ง

**รูปที่ 4.1** ลักษณะของพอลิเมอร์ ก. พอลิเมอร์ก่อนอบแห้ง และ ข. พอลิเมอร์หลังอบแห้ง

จากรูปที่ 4.1 พอลิเมอร์ ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จะนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณร้อยละผลผลิต พบว่าน้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้งของการสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนระหว่างL-lactide/PBAT เป็น 100/0.6 wt% ที่เวลา 4 ชั่วโมง น้ำหนักที่ได้คือ 29.35 กรัม เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณร้อยละผลผลิตพบว่าผลผลิตที่ได้คือ 97.22% ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะการสังเคราะห์อื่นๆ แสดงวิธีคำนวณได้ดังนี้ และร้อยละผลผลิตของตัวอย่างชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.1

ร้อยละผลผลิต (%) =$ \frac{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้(กรัม)}{น้ำหนักlactide + PBAT(กรัม)}$ x 100

 = $\frac{29.35กรัม}{30.19 กรัม}$ x 100

 = 97.22%

**ตารางที่ 4.1** ผลการหาร้อยละผลผลิตของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ตัวอย่าง** | **L-lactide (wt%)** | **PBAT** **(wt%)** | **อุณหภูมิ****(°C)** | **เวลา****(ชั่วโมง)** | **ร้อยละผลผลิต** |
| 1 | 100 | 0.3 | 160 | 4 | 92.60 |
| 2 | 100 | 0.6 | 97.22 |
| 3 | 100 | 1.0 | 92.30 |
| 4 | 100 | 0.3 | 8 | 95.05 |
| 5 | 100 | 0.6 | 96.27 |
| 6 | 100 | 1.0 | 93.37 |

จากการคำนวณหาปริมาณร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของพอลิเมอร์ทั้ง 3 ตัวอย่างที่สังเคราะห์โดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณร้อยละผลผลิตต่ำกว่า พอลิเมอร์อีก 3 ตัวอย่างที่ใช้เวลาการสังเคราะห์เป็น 8 ชั่วโมง แต่ที่สภาวะการทดลองทุกๆสภาวะส่งผลให้ร้อยละผลผลิตที่ได้ค่อนข้างสูงใกล้เคียงกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าสภาวะการทดลองที่ใช้ในการวิจัยนี้สามารถที่จะสังเคราะห์ PLLA-*b*-PBAT ได้ค่อนข้างสมบูรณ์

**4.2 ผลการศึกษาหาน้ำหนักโมเลกุล**

 ในการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค GPC ของ PLLA-*b*-PBAT โดยมี L-lactideเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีอัตราส่วน L-lactide/PBAT เป็น 100/0.3, 100/0.6 และ100/1.0wt% ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของ PLLA-*b*-PBAT แสดงดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.**2 น้ำหนักโมเลกุลของ PLLA-*b*-PBAT จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GPC

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ตัวอย่าง** | **L-lactide/PBAT****(wt%)** | **อุณหภูมิ****(°C)** | **เวลา****(ชั่วโมง)** | **Mw****(g/mol)** | **Mn****(g/mol)** | **PDI** |
| 1 | 100/0.3 | 160 | 4 | 7,616 | 6,415 | 1.1872 |
| 2 | 100/0.6 | 17,890 | 9,319 | 1.9197 |
| 3 | 100/1.0 | 16,848 | 11,053 | 1.5243 |
| 4 | 100/0.3 | 8 | 34,097 | 21,918 | 1.5557 |
| 5 | 100/0.6 | 31,511 | 18,604 | 1.6938 |
| 6 | 100/1.0 | 26,726 | 13,183 | 2.0273 |

การทดสอบหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC พบว่าในการสังเคราะห์ PLLA-*b*-PBAT โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง L-lactide/PBAT เป็น 100/0.3wt% อุณหภูมิ 160°C ใช้เวลา 8 ชั่วโมง ส่งผลให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล (Mw) สูงที่สุดเป็น 34,097 g/mol เมื่อเปรียบเทียบการสังเคราะห์ที่อัตราส่วน L-lactide/PBAT เป็น 100/0.3wt% ที่เท่ากัน แต่ใช้เวลาเป็น 4 ชั่วโมง พบว่าได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำมากเป็น 7,616 g/mol ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะดังกล่าวมีการใช้เวลาที่นานเพียงพอมอนอเมอร์ (L-lactide) สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้อย่างเต็มที่จึงเกิด PLLA-*b*-PBAT ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า และที่เวลาการสังเคราะห์เป็น 8 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของ PLLA-*b*-PBAT โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง L-lactide/PBAT เป็น 100/0.6 และ 100/1.0 เมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นน้ำหนักโมเลกุลจะลดลง เนื่องจาก PBAT ทำหน้าที่เป็นสารตัวเริ่มปฏิกิริยาในการเกิดสายโซ่โมเลกุลของ PLLA ดังนั้นหากปริมาณเพิ่มขึ้นจำนวนโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนโมเลกุลของตัวเริ่มปฏิกิริยา แต่สายโซ่โมเลกุลจะลดต่ำลงเนื่องจากปริมาณมอนอเมอร์ที่เข้าทำปฏิกิริยาการเชื่อมต่อมีจำนวนเฉลี่ยที่ลดลง

**4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี**

ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Proton Nuclear Magnetic Resonance (1H-NMR) ของ PLLA-*b*-PBAT โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบประมาณ 0.05 mg ละลายใน chloroform-d, CDCl3 ซึ่ง1H-NMR สเปคตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีในการสังเคราะห์ PLLA-*b*-PBAT ที่ใช้อัตราส่วนระหว่าง L-lactide/PBAT เป็น 100/0.3 อุณหภูมิการสังเคราะห์ที่ 160°C ใช้เวลาสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.2 และ 1H-NMR สเปคตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ PLLA-*b*-PBAT โดยใช้สภาวะอื่นๆจะมีลักษณะสเปคตรัมเหมือนกัน (ไม่แสดงในที่นี้) แตกต่างกันเพียงความเข้มของพีคในตำแหน่ง (a) และ (b) ซึ่งจะบ่งบอกถึงน้ำหนักโมเลกุลของ PLLA ที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างนั่นเอง

จาก 1H-NMR สเปคตรัมดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบพีคที่เคมิคอลชิพ (δ) 5.09 ppm (a) และ 1.49 ppm (b) ซึ่งหมายถึงการเรโซแนนซ์ของโปรตรอน (-CH) ที่ติดกับหมู่เมทิล (-CH3) และ โปรตรอนบนหมู่เมทิล (-CH3) ในโครงสร้างของ PLLA ที่เคมิคอลชิพ 4.38-4.46 ppm (c) หมายถึงเมทิลีนโปรตรอน (-CH2) ที่ติดกับ dimethyl terephthalate ที่อยู่ในโมเลกุลของ PBAT และที่ตำแหน่ง 2.34 ppm (d) เมทิลีนโปรตรอน (-CH2) ในกรดอะดิปิคที่อยู่ในโมเลกุลของ PBAT เช่นกัน ซึ่งแท้จริงแล้วตำแหน่งพีคที่สำคัญของโมเลกุล PBAT ทีต้องพบคือที่ตำแหน่ง 3.65-3.75 ppm ซึ่งหมายถึง เมทิลีนโปรตรอน ที่อยู่ใน butanediol ที่ติดกับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในส่วนปลายของโมเลกุล PBAT แต่จาก 1H-NMR สเปคตรัมของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้นั้น ไม่พบพีคดังกล่าว นั่นแสดงว่าหมู่ไฮดรอกซิลตรงปลายสายโซ่โมเลกุลของ PBAT ได้เกิดปฏิกิริยาการควบแน่นกับหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่อยู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของ PLLA แล้ว (Ding. 2018 : 41-48) ดังนั้นโครงสร้างโมเลกุลของ PLLA-*b*-PBAT ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยผลของ 1H-NMR จึงเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.3 และเป็นตามการสันนิษฐานไว้



**รูปที่ 4.2** 1H-NMR สเปคตรัม ของ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์ในอัตราส่วน L-lactide/PBAT: 100/0.3 อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.**3 ตำแหน่งพีคที่ค่าเคมิคอลชิพต่างๆในโครงสร้างของ PLLA-*b*-PBAT (Ding. 2018 : 41-48; Pitchta. 2014 : 288-296)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  **เคมิคอลชิพ (ppm)** | **ประเภทโปรตอน** | **ชนิดของพอลิเมอร์** |
| 5.09 (a) | -CH protons closed -CH3 group | PLLA |
| 1.49 (b) | protons on methyl group | PLLA |
| 4.38-4.46 (c) | Outer methylene proton | PBAT |
| 2.34 (d) | Outer CH2 group in adipic acid | PBAT |

**4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน**

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์ได้ ทำโดยใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (thermal transition) ของสารตัวอย่าง ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิ ในบรรยากาศที่ถูกควบคุม การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ทำที่อุณหภูมิ -10 ถึง 200°C อัตราเร็วการให้ความร้อนเท่ากับ 10°C/min โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบประมาณ 3 – 5 mg กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง L-lactide/PBAT ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 4 และ 8 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ค่าทางความร้อนต่างๆที่ได้จาก DSC ได้แก่ เอนทาลปีของการหลอมเหลว (∆Hm) อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Tm) และปริมาณผลึกในพอลิเมอร์ (percentage of crystallinity) แสดงในตารางที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3-4.4 และตารางที่ 4.4 สามารถเห็นพีคการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์เพียง 1 ตำแหน่งได้อย่างชัดเจน แม้ในโครงสร้างจะมี PBATเป็นองค์ประกอบแต่โครงสร้างของ PBAT เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน จึงไม่ปรากฏพีคการหลอมเหลว และพบว่า PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์ในทุกๆสภาวะ มีจุดหลอมเหลว (Tm) ใกล้เคียงกันอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 162-167°C ซึ่งจากการวิจัยก่อนหน้านี้มีการรายงานว่าค่า Tm ของ PLA อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 160-180 °C (Tsuji. 2005 : 569–597) จากผลการทดลองด้วยเทคนิค DSC ดังกล่าวทำให้สามารถประเมินได้ว่า ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากการวิจัยนี้มีโครงสร้างเป็น PLA เนื่องจากจุดหลอมเหลวที่วิเคราะห์ได้ตรงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะในการสังเคราะห์ตัวอย่างทุกชนิดในการวิจัยนี้สามารถเปลี่ยนแอลแล็คไทด์มอนอเมอร์ไปเป็น PLLA ได้ด้วยปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวง ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนนี้ก็สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค 1H-NMR ที่วิเคราะห์ได้ว่าตัวอย่างมีโครงสร้างของ PLLA เกิดขึ้นและบล็อกอยู่กับ PBAT

 และพบว่าปริมาณผลึกของ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์ได้ในอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะร้อยละมีปริมาณผลึกเฉลี่ยแล้วสูงกว่าที่การสังเคราะห์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลคือ การสังเคราะห์ที่ใช้เวลานาน 8 ชั่วโมง จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ในทุกๆอัตราส่วยของ L-lactide/PBAT ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าการให้เวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า จะทำให้สารสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากว่า มีเวลาในการจัดเรียงโมเลกุลได้ดีกว่า ซึ่งการที่พอลิเมอร์มีปริมาณผลึก และน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่า ก็จะมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่านั่นเอง



**รูปที่ 4.3** กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่ได้จาก DSC ของ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง L-lactide/PBAT ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



**รูปที่ 4.4** กราฟการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่ได้จาก DSC ของ PLLA-*b*-PBAT ที่สังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง L-lactide/PBAT ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

**ตารางที่ 4.**4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA-*b*-PBAT

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ตัวอย่าง****L-lactide/PBAT****(wt%)** | **อุณหภูมิ****(°C)** | **เวลา****(ชั่วโมง)** | **∆Hm****(J/g)** | **Tm****(°C)** | **Yield (%)** | **Crystallinity****(%)** |
| 100/0.3 | 160 | 4 | 74.01 | 162.9 | 92.60 | 79.58 |
| 100/0.6 | 64.55 | 162 | 97.22 | 69.41 |
| 100/1.0 | 41.91 | 161.65 | 92.30 | 44.09 |
| 100/0.3 | 8 | 65.93 | 168.61 | 95.05 | 70.89 |
| 100/0.6 | 56.42 | 167.47 | 96.27 | 60.67 |
| 100/1.0 | 65.86 | 167.38 | 93.37 | 70.82 |
| PBAT | - | - | 93.28 | 95.55 | - | - |
| Lactide | - | - | 91.85 | 96.45 | - | - |

**4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของ PLLA-*b*-PBAT โดยการเทฟิล์ม**

ในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของ PLLA-*b*-PBAT โดยการเทฟิล์ม ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ลักษณะการขึ้นรูปของตัวอย่าง ในการทดสอบทำโดยนำ PLLA-*b*-PBAT ประมาณ 5 กรัม ไปละลายด้วยคลอโรฟอร์ม 50 ml เทสารละลายของตัวอย่างลงในจานเพาะเชื้อ ทิ้งให้สารละลายคลอโรฟอร์มระเหยจนหมด ผลของการทำแผ่นฟิล์มของตัวอย่างทุกชนิดแสดงดังรูปที่ 4.5

จากการทดสอบวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ PLLA-*b*-PBAT ที่ทำการเทฟิล์มและทิ้งให้สารละลายคลอโรฟอร์มระเหยหมด ซึ่งผลการทดสอบการขึ้นรูปทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าที่ช่วงสังเคราะห์ที่เวลา 8 ชั่วโมงของอัตราส่วนของ L-lactide/PBATเป็น 100/0.3 wt% และ 100/0.6 wt% ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มมากที่สุด แต่ยังคงมีความเปราะจึงไม่สามารถนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลคือที่สภาวะดังกล่าว ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสุด ซึ่งการที่น้ำหนักโมเลกุลสูงจะส่งผลต่อการเกี่ยวพันกันของโมเลกุลพอลิเมอร์ได้มาก ซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มได้ แต่ทั้งนี้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากการวิจัยนี้ก็ยังค่อนข้างต่ำมาก จึงไม่สามารถเกิดแผ่นฟิล์มขึ้นได้ ซึ่งต้องมีการวิจัยต่อยอด เพื่อทำให้ได้ PLLA-*b*-PBAT ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น จึงจะสามารถนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลได้ และสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในอนาคต

|  |  |
| --- | --- |
| **ก.** | **ข.** |
| L-lactide/PBAT: 100/0.3 | L-lactide/PBAT: 100/0.3 |
| L-lactide/PBAT: 100/0.6 | L-lactide/PBAT: 100/0.6 |
| L-lactide/PBAT: 100/1.0 | L-lactide/PBAT: 100/1.0 |

**รูปที่ 4.5** ลักษณะทางกายภาพของ PLLA-*b*-PBAT หลังจากผ่านกระบวนการเทฟิล์ม ก. PLLA-*b*-PBAT ที่ใช้เวลาการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง ข. PLLA-*b*-PBAT ที่ใช้เวลาการสังเคราะห์ 8 ชั่วโมง อุณหภูมิ 160°C