

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

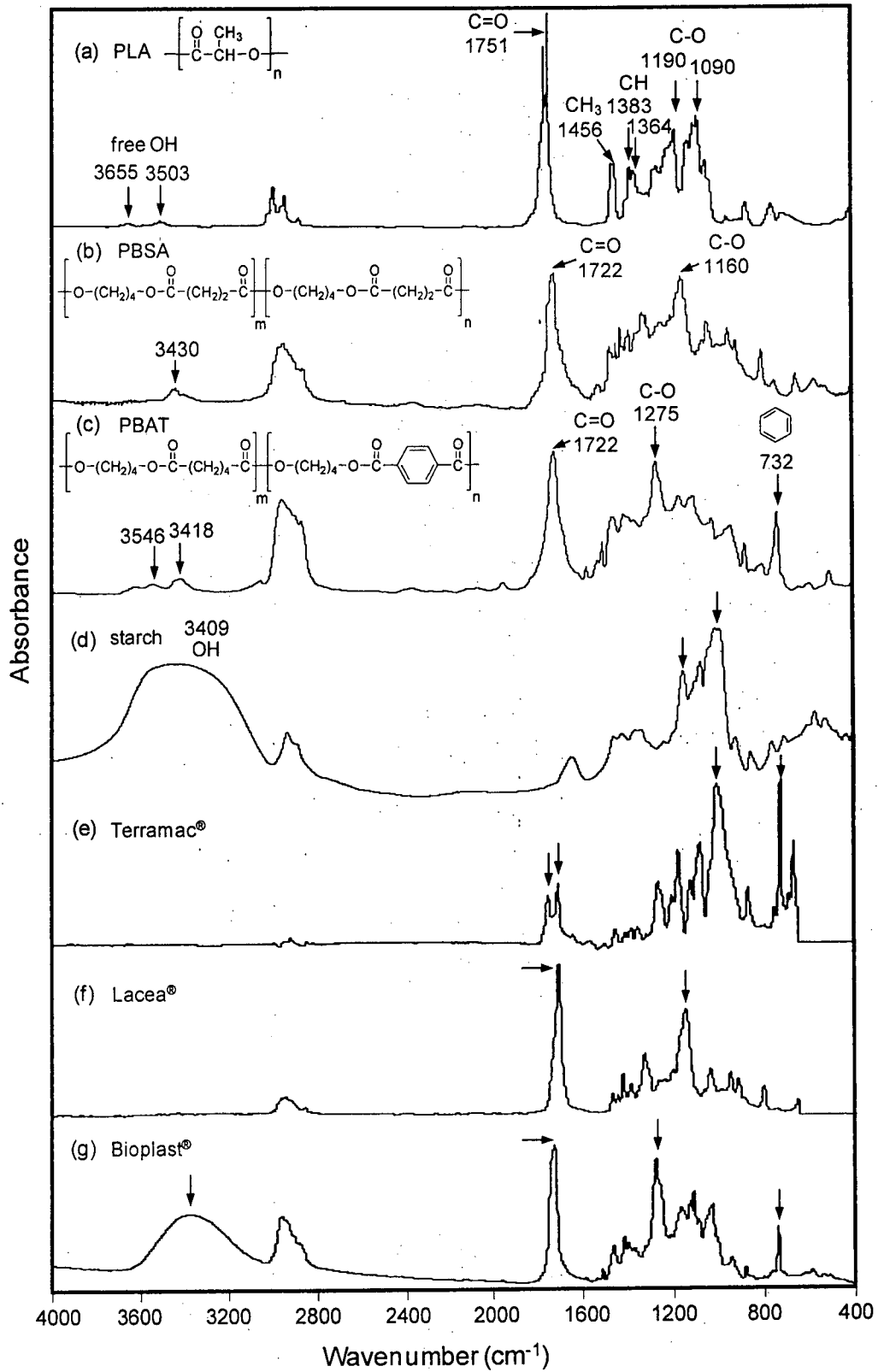
#### 1. การดำเนินงานในส่วนของการศึกษาทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและพัฒนาสู่ระดับนําร่อง

##### 1.1. การศึกษาสมบัติของถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาด

###### 1.1.1. การวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วย FT-IR ของถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาด

รูปที่ 4.1 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแล็กติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลต แป้ง และถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาด อันได้แก่ Terramac<sup>®</sup> Lacea<sup>®</sup> และ Bioplast<sup>®</sup> ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.1(a) เราพบพีกขนาดเล็กที่ 3655 และ 3503  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับการสั่นของ free OH stretching แสดงถึงโครงสร้างหมู่ OH ที่ปลายสายโซ่ของพอลิแล็กติกแอซิด พีกบริเวณ 2995-2880, 1751, 1456, 1383 และ 1364, 1190 และ 1090  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่ CH stretching, C=O ในหมู่เอสเทอร์,  $\text{CH}_3$  bending, CH deformation, C-O stretching ตามลำดับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท (รูปที่ 4.1(b)) แสดงพีกสำคัญที่ 3430, 2900-2800, 1722 และ 1300-1000  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับ free OH ที่ปลายสายโซ่,  $\text{CH}_2$  repeat unit, C=O และ C-O stretching ตามลำดับ พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลต (รูปที่ 4.1(c)) แสดงสเปกตรัมที่คล้ายคลึงกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท แต่มีพีกสำคัญที่ 732  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะคาร์บอนในวงอะโรมาติกในกรณีของแป้ง พีกกว้างบริเวณ 4000-3000 และ 1200-975  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลและ pyranose ring ตามลำดับ

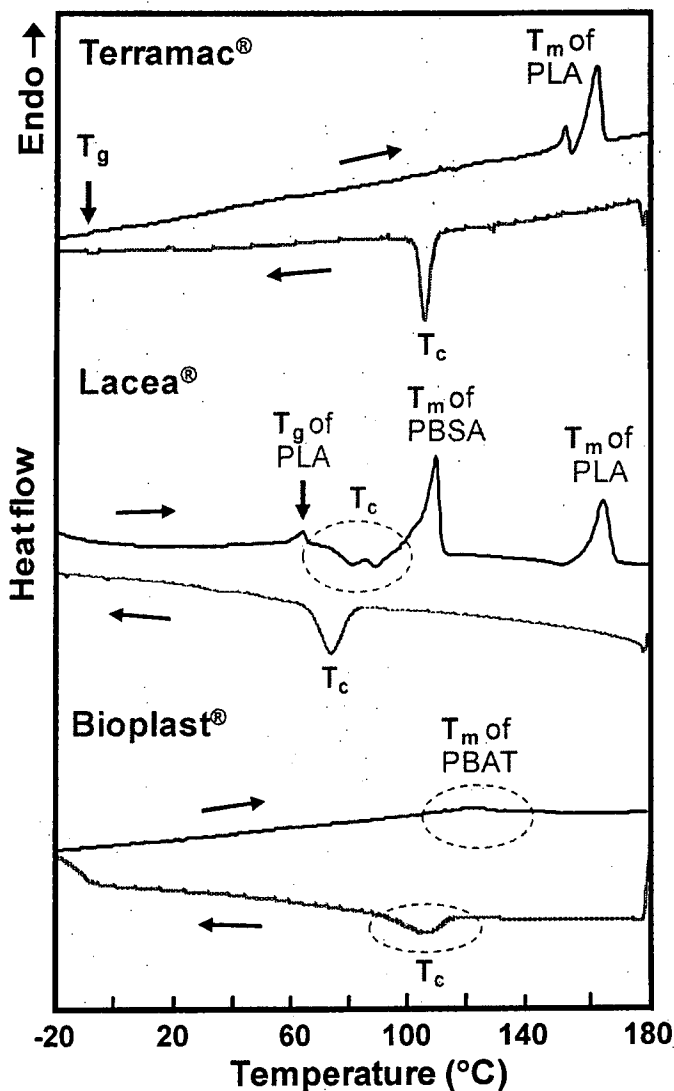
เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ Terramac<sup>®</sup> (รูปที่ 4.1(e)) พีกที่เด่น คือ สองพีกในบริเวณ 1800-1700  $\text{cm}^{-1}$  และพีกแหลมในบริเวณ 1000-900 และ 800-700  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งน่าจะเป็น C=O, C-O stretching และวงอะโรมาติก พีกตำแหน่งดังกล่าวพบในสเปกตรัมของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท สเปกตรัมของ Lacea<sup>®</sup> มีพีกที่เด่นชัดในตำแหน่งประมาณ 1700 และ 1100  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึง C=O และ C-O stretching และสเปกตรัมบริเวณ 1600-800  $\text{cm}^{-1}$  มีลักษณะคล้ายคลึงกับสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท ส่วน Bioplast<sup>®</sup> แสดงพีกกว้างที่ 3600-3000  $\text{cm}^{-1}$  และรูปแบบของพีกบริเวณ 1160 และ 1020  $\text{cm}^{-1}$  คล้ายคลึงกับพันธะไฮโดรเจนและ pyranose ring ที่พบในแป้ง พีกแหลมในตำแหน่งประมาณ 1700, 1275 และ 732  $\text{cm}^{-1}$  และลักษณะสเปกตรัมบริเวณ 1800-700  $\text{cm}^{-1}$  คล้ายกับสเปกตรัมของพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลต เมื่อพิจารณาข้อมูลดังกล่าว เราพบว่า Terramac<sup>®</sup> น่าจะได้รับการผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลต Lacea<sup>®</sup> น่าจะได้รับการผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท และ Bioplast<sup>®</sup> น่าจะได้รับการผสมของพอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลตและแป้ง



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) พอลิแล็กติกแอซิด (b) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพต (c) พอลิบิวทิลีนอะดิเพตเทเรฟทาเลต (d) แป้ง (e) Terramac® (f) Lacea® และ (g) Bioplast®

### 1.1.2. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาด

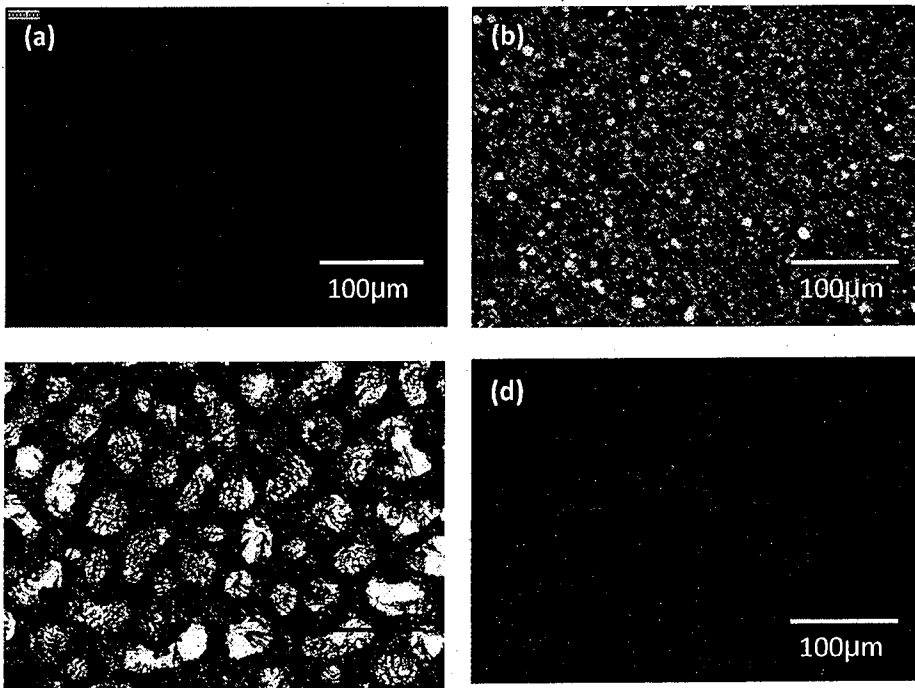
รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ Terramac<sup>®</sup> Lacea<sup>®</sup> และ Bioplast<sup>®</sup> เราพบ endothermic peak ของ Terramac<sup>®</sup> และ Lacea<sup>®</sup> อย่างชัดเจนที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งตรงกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PLA<sup>48</sup> ในขณะที่ Bioplast<sup>®</sup> แสดงช่วง endothermic peak ที่ประมาณ 125 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PBAT นอกจากนี้ในกรณีของ Lacea<sup>®</sup> เราพบ endothermic peak อีกหนึ่งตำแหน่งที่ประมาณ 110 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเป็นอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PBSA ผลดังกล่าวช่วยยืนยันว่า Terramac<sup>®</sup> ประกอบด้วย PLA เป็นหลัก Lacea<sup>®</sup> ประกอบด้วย PLA และ PBSA ส่วน Bioplast<sup>®</sup> ประกอบด้วย PBAT



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของ Terramac<sup>®</sup> Lacea<sup>®</sup> และ Bioplast<sup>®</sup>

### 1.1.3. การศึกษาการเกิดสเฟียรูไลต์ของถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาด

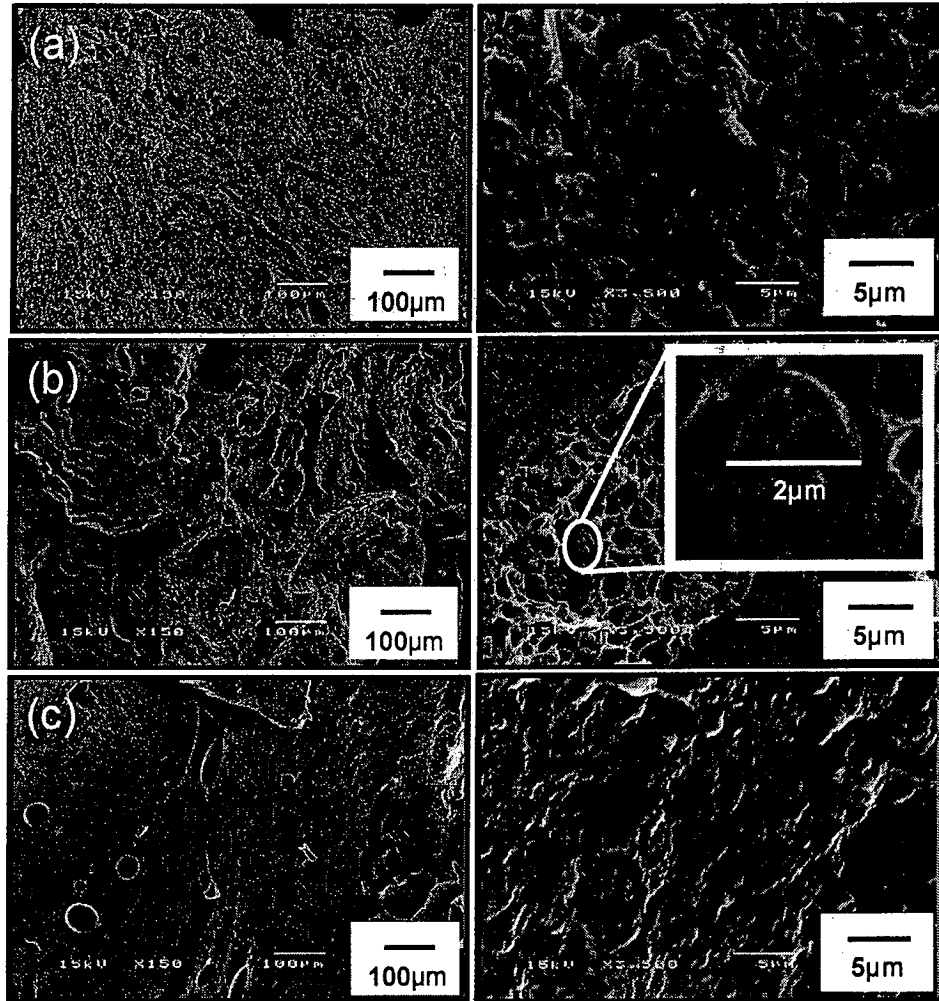
การเกิดสเฟียรูไลต์ของสารที่อุณหภูมิห้อง หลังจากลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิหลอม (melting temperature) เป็นปรากฏการณ์ที่เชื่อมโยงกับการตกผลึก ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ รูปที่ 4.3 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ของ PLA และถุงพลาสติกชีวภาพที่ขายในท้องตลาด ณ อุณหภูมิห้อง ภาพที่ได้ของ PLA เป็นภาพทึบแสง หมายถึงไม่มีการก่อตัวของผลึกใดๆ (รูปที่ 4.3(a)) ซึ่งแสดงเป็นนัยว่า PLA มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิหลอม ส่วน Terramac<sup>®</sup> (รูปที่ 4.3(b)) แสดงภาพผลึกขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่ว Lacea<sup>®</sup> (รูปที่ 4.3(c)) แสดงสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจายปะปนกัน ส่วน Bioplast<sup>®</sup> (รูปที่ 4.3(d)) มีการเกิดผลึกขนาดเล็กกระจายในบริเวณทึบ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากการลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิหลอมแล้ว PLA มีสภาพเป็น amorphous ในขณะที่ถุงพลาสติกชีวภาพที่ขายในท้องตลาดสามารถเกิดผลึกได้ ถึงแม้ว่าจะเกิดผลึกที่แตกต่างกันก็ตาม



รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ของ (a) PLA (b) Terramac<sup>®</sup> (c) Lacea<sup>®</sup> และ (d) Bioplast<sup>®</sup>

### 1.1.4. การศึกษาลักษณะพื้นผิวของถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาด

รูปที่ 4.4 แสดงภาพกำลังขยาย 150 และ 3,500 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พื้นผิวของ Terramac<sup>®</sup> มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (รูปที่ 4.4(a)) แสดงถึงการผสมที่เข้ากันได้ดีของ PLA และ PBAT ส่วนพื้นผิวของ Lacea<sup>®</sup> ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และพบเม็ดกลมเล็กๆ ขนาดประมาณ 2  $\mu\text{m}$  กระจายอยู่ในบางบริเวณ (รูปที่ 4.4(b)) เม็ดกลมดังกล่าวน่าจะเป็นสารเติมแต่งประเภทอนินทรีย์ที่มักใช้เป็นตัวเติม เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกในกรณีของ Bioplast<sup>®</sup> ภาพที่ได้เป็นภาพที่มีพื้นผิวเรียบและมีรูเล็กๆ เกิดขึ้นบางส่วน เมื่อขยายภาพในส่วนของพื้นผิวที่เรียบ พบความเป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวนั้น (รูปที่ 4.4(c)) จึงเป็นไปได้ว่า แป้งที่นำมาใช้ผสมใน Bioplast<sup>®</sup> เป็นแป้งที่ถูกดัดแปรให้เสียรูปร่าง

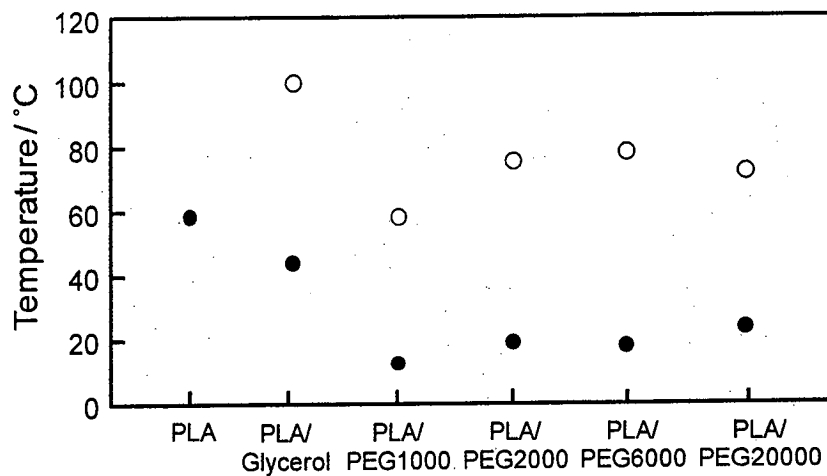


รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) Terramac<sup>®</sup> (b) Lacea<sup>®</sup> และ (c) Bioplast<sup>®</sup>

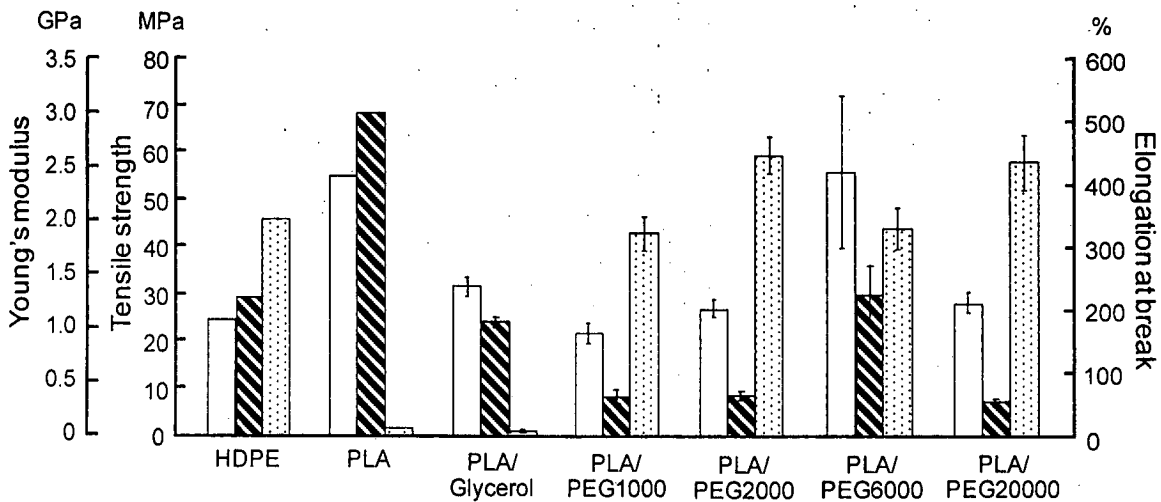
การศึกษาถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีขายในท้องตลาดพบว่า Terramac<sup>®</sup> Lacea<sup>®</sup> และ Bioplast<sup>®</sup> เป็นสารกึ่งผลึก โดยที่ Terramac<sup>®</sup> ประกอบด้วย PLA และ PBAT Lacea<sup>®</sup> ประกอบด้วย PLA PBSA และสารเติมแต่งประเภทอนินทรีย์ ส่วน Bioplast<sup>®</sup> ประกอบด้วย PBAT และแป้งที่ถูกดัดแปรโครงสร้าง

## 1.2. การเสริมสภาพพลาสติกของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอลและกลีเซอรอล

การที่พอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature) ค่อนข้างสูง (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส) เป็นผลให้พอลิแล็กติกแอซิดมีความเปราะสูงที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นพลาสติกโพลีเมอร์ที่มีความเหนียวและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ -120 องศาเซลเซียส การเติมสารเสริมสภาพพลาสติกจะช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ทำให้สารผสมที่ได้มีสมบัติความเหนียวดีขึ้น สารเสริมสภาพพลาสติกที่เลือกใช้ในการทดลอง ได้แก่ กลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึก เมื่อเติมกลีเซอรอลหรือพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,000 2,000 6,000 และ 20,000 ดาลตัน ลงในพอลิแล็กติกแอซิดในอัตราส่วน 20:80 เราพบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของสารผสมลดลงและลดลงมากที่สุดไปสู่ 12.4 องศาเซลเซียส ในกรณีที่เติมพอลิเอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุล 1,000 ดาลตัน นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิ (cooling) แล้ว การเติมสารเสริมสภาพพลาสติกนั้นยังทำให้เกิดอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature) ของสารผสมอีกด้วย แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตกผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกล



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ , ●) และอุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ , ○) ของพอลิแล็กติกแอซิด สารผสมของพอลิแล็กติกแอซิดกับกลีเซอรอลและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ในอัตราส่วน 80:20



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength, □) โมดูลัสของยัง (Young's modulus, ■) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break, ▨) ของพอลิแล็กติกแอซิด สารผสมของพอลิแล็กติกแอซิดกับกลีเซอรอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

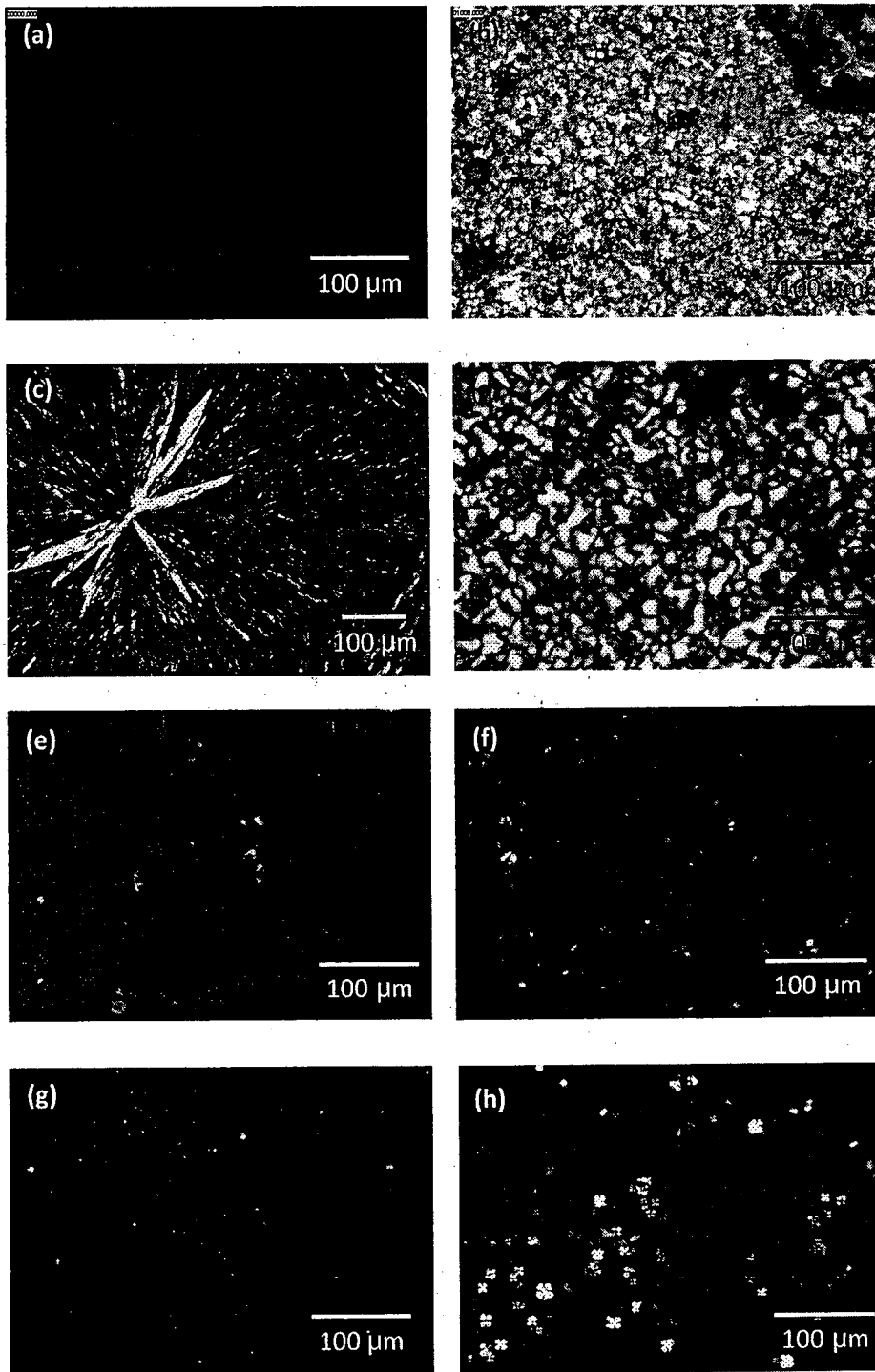
รูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength) โมดูลัสของยัง (Young's modulus) และความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break) ของพอลิแล็กติกแอซิด สารผสมของพอลิแล็กติกแอซิดและสารเสริมสภาพพลาสติกที่เลือกใช้ แสดงให้เห็นว่า ค่าความแข็งแรงสูงสุดและโมดูลัสของยังของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีน อย่างไรก็ตาม ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิดซึ่งอยู่ในระดับต่ำ คือ 10-15% ชี้ให้เห็นว่าพอลิแล็กติกแอซิดมีความเปราะสูง การผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลกับพอลิแล็กติกแอซิดในอัตราส่วน 20:80 มีผลให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดและโมดูลัสของยังลดลง แต่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเหนียวที่มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของพอลิเอทิลีนพบว่า การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 6,000 ดาลตัน ให้ผลที่ใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนมากที่สุด อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่สูงขึ้นนั้นเป็นค่าที่ได้จากการดึงยึดในทิศทางการขึ้นรูป (machine direction) สำหรับทิศทางด้านขวาง (transverse direction) ยังมีความเปราะเช่นเดียวกับพอลิแล็กติกแอซิด

### 1.3. การเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยสารก่อผลึกประเภทต่าง ๆ

สมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของพอลิแล็กติกแอซิด คือ อัตราการเกิดผลึกต่ำ ทำให้ไม่เหมาะในการนำไปใช้งานผลิตถุงพลาสติกที่ต้องการสมบัติความเหนียว การเติมสารก่อผลึกหรือสารเร่งการตกผลึก (nucleating agent) น่าจะช่วยทำให้ปริมาณผลึกในสารผสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติความแข็งแรงความเหนียว การศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลนอกจากช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วแล้ว ยังทำให้พอลิแล็กติกแอซิดมีความสามารถในการตกผลึกสูงขึ้น ดังเห็นได้จากอุณหภูมิการเกิดผลึกที่พบจากการวัดด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry ในรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.7 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (Polarized Optical Microscope) ที่ใช้ในการศึกษาพื้นฐานวิทยา การวัดผลึกที่เกิดขึ้น เริ่มจากการให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างด้วยเครื่องให้ความร้อนจนถึง 180 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สารหลอมทั้งหมด จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างเย็นลงตามลำดับ พร้อมจับภาพเมื่อตัวอย่างเริ่มมีการตกผลึก ในกรณีพอลิแล็กติกแอซิด (รูปที่ 4.7(a)) ภาพที่ได้จะเป็นลักษณะภาพทึบ ไม่แสดงการก่อตัวของผลึกใดๆ แม้ว่าอุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ในขณะที่สารผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (80:20)

แสดงการก่อตัวเป็นผลึกสเฟียรูไลต์ เมื่ออุณหภูมิลดลงที่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีนัยว่า พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นสารที่ช่วยเร่งการก่อตัวของผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดได้ ทั้งนี้ผลึกที่เกิดขึ้นอย่างทั่วถึงและมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของพอลิเอทิลีนไกลคอลในพอลิแล็กติกแอซิดด้วย



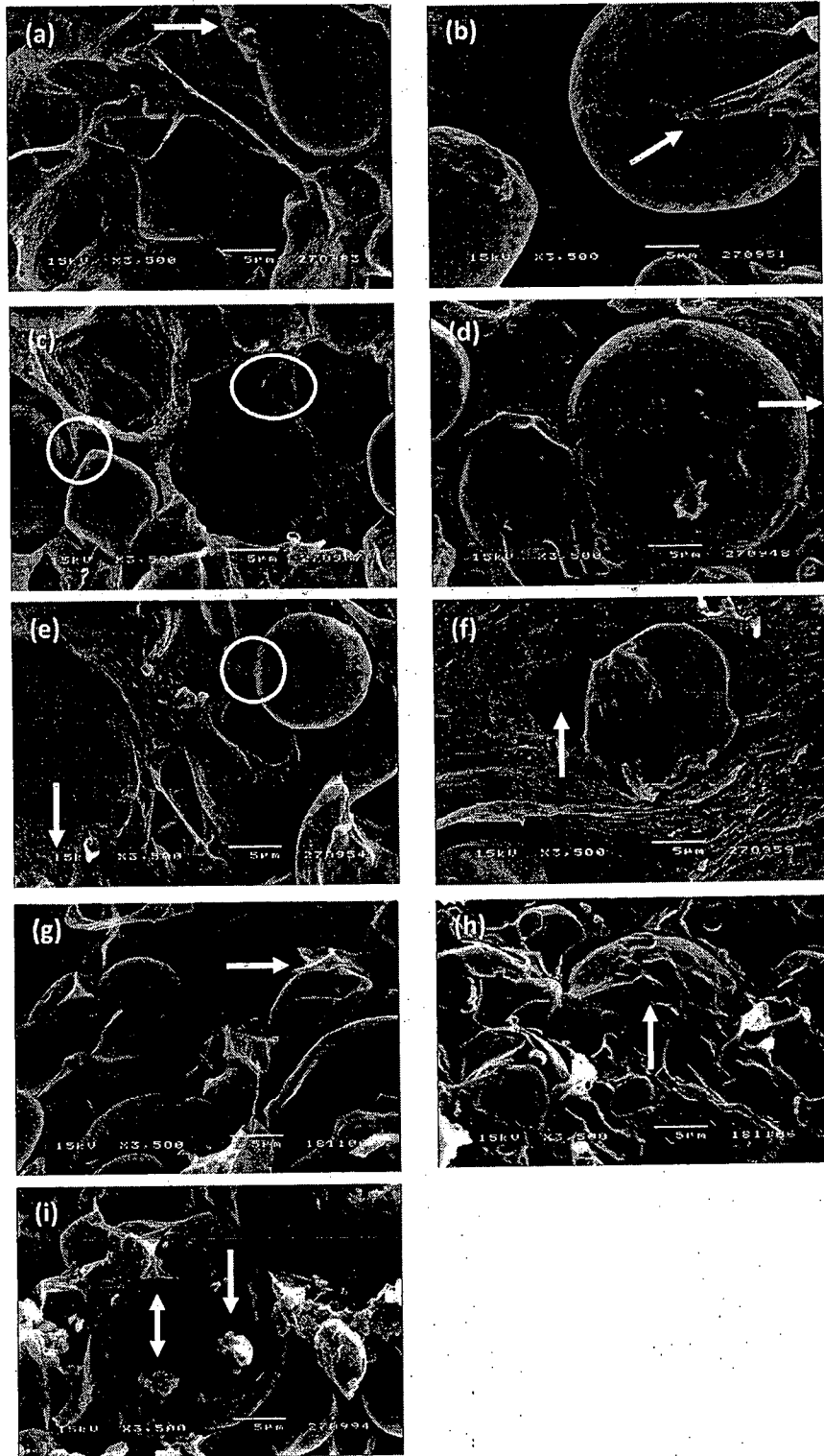
รูปที่ 4.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ ณ อุณหภูมิห้อง หลังลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิการหลอมเหลวของ (a) พอลิแล็กติกแอซิด (b) พอลิแล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง 70:30 (c) พอลิเอทิลีนไกลคอล (น้ำหนักโมเลกุล 6,000 ดาลตัน) (d) พอลิแล็กติกแอซิด:พอลิเอทิลีนไกลคอล (น้ำหนักโมเลกุล 6,000 ดาลตัน) 80:20 (e) พอลิแล็กติกแอซิดผสม Talc 1 phr (f) พอลิแล็กติกแอซิดผสม Closite Na<sup>+</sup> 1 phr (g) พอลิแล็กติกแอซิดผสมพอลิออกซิเมทิลีน 1 phr (h) พอลิแล็กติกแอซิดผสมกรดซัคซินิก 1 phr

#### 1.4. การเติมตัวเติม (Filler) และสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (Compatibilizer)

ในงานวิจัยส่วนนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังในการผสมเพื่อเป็นแนวทางการลดต้นทุน เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศ และสามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ แต่การผสมแป้งกับพอลิเมอร์มีปัญหาที่สำคัญ คือ ความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างแป้งและพอลิเมอร์ ดังแสดงรูปที่ 4.8(a) และ 4.8(g) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดของสารผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 70:30 และ 55:45 ที่เตรียมได้จากการกวนด้วยเครื่องให้ความร้อน แสดงช่องว่างระหว่างเม็ดกลมของแป้งและเนื้อพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ซึ่งให้เห็นถึงการแยกวัฏภาคของแป้งมันสำปะหลังและพอลิแล็กติกแอซิด เป็นผลให้สมบัติความแข็งแรงลดลง

การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้จำนวนเล็กน้อยมีส่วนช่วยให้แป้งและพอลิแล็กติกแอซิดเข้ากันได้ และส่งผลให้สมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น หากแต่ข้อควรระวังของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ คือ การที่สารเสริมสภาพเข้ากันได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงต้องอยู่ในข้อกำหนดเรื่องปริมาณการใช้ตามมาตรฐานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ผู้วิจัยเลือกใช้สารประสานต่างๆ เช่น มาลิกแอนไฮไดรด์ 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอริกซีโชน และเมทิลีนได-พารา-ฟีนิลไดไอโซไซยานเนต<sup>49</sup> โดยเติมลงไปในการผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแป้งมันสำปะหลัง

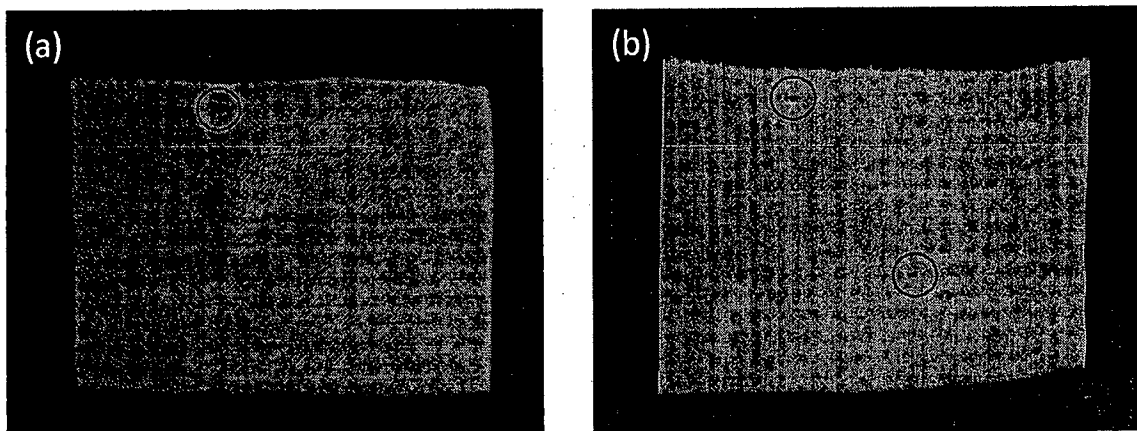
เมื่อเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ลงไป เม็ดกลมของแป้งมีสารเกาะยึดติดอยู่และช่องว่างระหว่างเม็ดแป้งและเนื้อพอลิเมอร์ลดลง ในกรณีที่เติม 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอริกซีโชน เม็ดแป้งมีรูปร่างไม่เป็นทรงกลมเช่นเดิม และพื้นผิวมีลักษณะค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเติมเมทิลีนได-พารา-ฟีนิลไดไอโซไซยานเนตในสารผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแป้ง เราพบสารยึดเกาะที่ผิวของแป้ง ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่สารประกอบไอโซไซยานเนตทำให้เกิดพันธะยูรีเทนเชื่อมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและแป้งให้เป็นเนื้อเดียวกัน<sup>50</sup> ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ช่วยทำให้สารผสมระหว่างแป้งและพอลิแล็กติกแอซิดเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งมีผลต่อสมบัติความแข็งแรงและความเหนียว



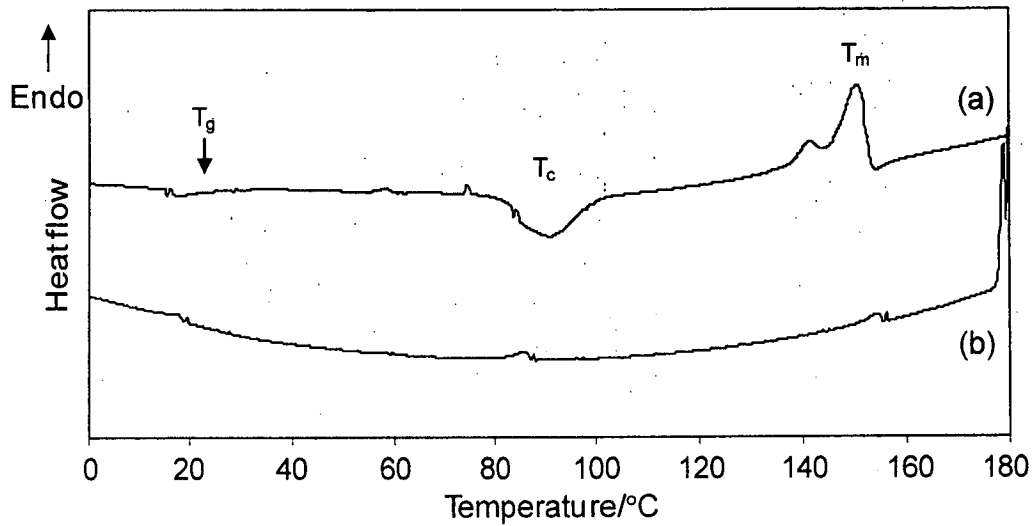
รูปที่ 4.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของ (a) พอลิแล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง = 70:30 (b) พอลิแล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง:พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท = 60:30:10 เมื่อเติม (c) มาลิกแอนไฮไดรด์ 1 phr และ (d) 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอวกซีไคลเลน 1 phr (e) พอลิแล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง:พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท:กลีเซอรอล = 55:30:10:5 (f) พอลิแล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง:พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพท:พอลิเอทิลีนไกลคอล = 55:30:10:5 (g) พอลิแล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง = 55:45 เมื่อเติม (h) 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอวกซีไคลเลน 1 phr และ (i) เมทิลีนได-พารา-ฟีนิลไดไอโซไซยาเนต 0.5 phr

### 1.5. การศึกษาเบื้องต้นของฟิล์มพอลิเล็กติกแอซิด

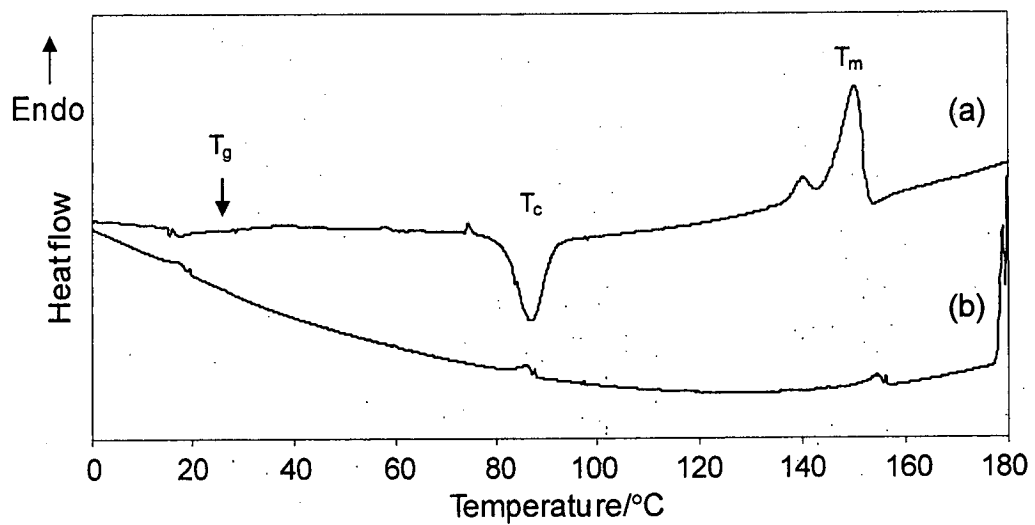
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะของฟิล์มที่เกิดขึ้น เมื่อผสมพอลิเล็กติกแอซิด แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วน 50:40:10 และเติม 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอริกไซเลน 1 phr หรือ เมทิลินได-พารา-ฟีนิลไดไฮโดรควิโนน 1 phr เราพบว่า ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีรูกระจายอยู่ทั่ว ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันของแป้งและพอลิเล็กติกแอซิด การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการผสมพอลิเล็กติกแอซิด แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วน 50:40:10 และเติมสารสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ทำให้ทราบว่า ฟิล์มของสารที่เติม 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอริกไซเลน 1 phr แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วที่ 26 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากพอลิเล็กติกแอซิดที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วประมาณ 60 องศาเซลเซียส<sup>17</sup> นอกจากนี้ ยังพบอุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 91 และ 150 องศาเซลเซียส อีกด้วย ส่วนฟิล์มของสารผสมที่เติมเมทิลินได-พารา-ฟีนิลไดไฮโดรควิโนน 1 phr แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ 26 87 และ 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ข้อมูลทางความร้อนเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า สูตรผสมเหล่านี้มีสมบัติเป็นสารกึ่งผลึก



รูปที่ 4.9 ลักษณะฟิล์มที่เกิดขึ้นของพอลิเล็กติกแอซิด:แป้งมันสำปะหลัง:พอลิเอทิลีนไกลคอล = 50:40:10 เมื่อเติม (a) 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอริกไซเลน 1 phr และ (b) เมทิลินได-พารา-ฟีนิลไดไฮโดรควิโนน 1 phr (วงกลมแสดงตัวอย่างบริเวณที่เป็นรู)



รูปที่ 4.10 DSC thermogram ของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลคอลล = 50:40:10 และ 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทอซซิลเลน 1 phr เมื่อ (a) เพิ่มอุนหนุมิและ (b) ลดอุนหนุมิ



รูปที่ 4.11 DSC thermogram ของฟิล์มที่เกิดขึ้นจากการผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลคอลล = 50:40:10 และ เมทิลีนได-พารา-ฟีนิลไดไอโซไซยาเนต 1 phr เมื่อ (a) เพิ่มอุนหนุมิและ (b) ลดอุนหนุมิ

## 2. การดำเนินงานในส่วนของการศึกษาทดลองในระดับกึ่งอุตสาหกรรม และระดับอุตสาหกรรม

โดยทั่วไป พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) มีลักษณะใส สามารถขึ้นรูปได้เหมือนเทอร์มอพลาสติกที่ได้จากกระบวนการทางปิโตรเคมี อย่างไรก็ตาม PLA ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความเปราะ ความยืดหยุ่นและการทนต่อแรงกระแทกได้ต่ำ รวมไปถึงราคาที่สูงกว่าพอลิเอทิลีน (ราคาพอลิเอทิลีน 50 บาทต่อ 1 กิโลกรัม และราคาพอลิแล็กติกแอซิด 150 บาทต่อ 1 กิโลกรัม) จึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเติมแต่งลงไปใน PLA ด้วยการทำคอมพาวนด์ สำหรับการพัฒนาสูตรคอมพาวนด์ในปีที่ 2 นี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้แป้งมันสำปะหลังในการทำคอมพาวนด์ เพื่อช่วยลดราคาต้นทุนของ PLA ลักษณะของฟิล์ม PLA ที่ถูกคอมพาวนด์ด้วยแป้งมันสำปะหลังและเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชมันสำปะหลังในรูปที่ 4.12 แสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่างอนุภาคของแป้งกับ PLA เนื่องจากความไม่ชอบน้ำของ PLA ซึ่งมีรายงานไว้ในบทความต่าง ๆ<sup>5-9</sup> ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันด้วยการเปลี่ยนแป้งมันสำปะหลังให้เป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ก่อนทำคอมพาวนด์กับ PLA เพื่อทำลายแกนรูลของสตาร์ช (รูปที่ 4.12 (f)-(h)) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชมันสำปะหลังสามารถเติมลงไปใน PLA เพื่อขึ้นรูปด้วยการเป่าถุงได้ปริมาณมากถึง 40% โดยน้ำหนัก เมื่อเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณสูงขึ้น การขึ้นรูปด้วยการเป่าถุงไม่สามารถทำได้ เนื่องจากกลีเซอรอลและความชื้นที่อยู่ในคอมพาวนด์มีปริมาณสูงขึ้นตามปริมาณเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ทำให้ความแข็งแรงขณะหลอม (melt strength) ของคอมพาวนด์ลดลง การทำคอมพาวนด์ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงไป 20-30% ขึ้นอยู่กับปริมาณของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่เติมลงไป อย่างไรก็ตาม ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชยังคงปรากฏให้เห็นอยู่บ้าง สำหรับการปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันโดยอาศัยสารประกอบไซเลนนั้น ผู้วิจัยทำการศึกษาสารประกอบไซเลน 3 ชนิด ได้แก่ 3-ไกลซิดอกโพรพิลไตรเมทรอกซีไซเลน (GPMS) 3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทรอกซีไซเลน (APMS) และ 3-คลอโรโพรพิลไตรเมทรอกซีไซเลน (CPMS) และพบว่า ชนิดของสารประกอบไซเลนมีผลต่อการปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันของสตาร์ชกับ PLA อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความแตกต่างของแผ่นฟิล์มที่แสดงในรูปที่ 4.12 (c)-(e) โดย CPMS สามารถปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันของสตาร์ชกับ PLA ได้อย่างเห็นได้ชัด

### 2.1. ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่ถูกขึ้นรูปด้วย Blown Film Extruder

#### 2.1.1 ลักษณะของแผ่นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์ประกอบของสตาร์ชและเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช แบบ single-layer

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

i)

j)

k)

รูปที่ 4.12 ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรมของ a) PLA b) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ช 90:10 c) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย GPMS 90:10 d) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย APMS 90:10 e) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS 90:10 f) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช 90:10 g) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชในอัตราส่วน 70:30 h) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชในอัตราส่วน 60:40 i) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 84:16 j) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 75:25 และ k) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 75:25

2.1.2 ลักษณะของแผ่นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และพลาสติก  
แตกสลายทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ แบบ *single-layer*

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

รูปที่ 4.13 ลักษณะแผ่นฟิล์มของ a) PLA b) คอมพาวนด์ของ PLA และ PEG ในอัตราส่วน 90:10 c) คอมพาวนด์ของ PLA และ PEG ในอัตราส่วน 85:15 d) คอมพาวนด์ของ PLA PBAT และ PEG ในอัตราส่วน 80:10:10 e) คอมพาวนด์ของ PLA และ Bioflex ในอัตราส่วน 90:10 f) คอมพาวนด์ของ PLA และ Ecovio ในอัตราส่วน 90:10 g) คอมพาวนด์ของ PLA PBS และ SEBS ในอัตราส่วน 85:10:5 และ h) คอมพาวนด์ของ PLA PBS และ SEBS ในอัตราส่วน 80:10:10

เมื่อสังเกตฟิล์มในรูปที่ 4.13 ด้วยตาเปล่า เราพบว่าฟิล์มของ PLA ที่มีองค์ประกอบของ PEG มีความเหนียวมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA (รูปที่ 4.13 (a)) เมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้น ความใสของฟิล์มลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก ช่วยทำให้เกิดการตกผลึกเร็วขึ้น และยังทำให้เกิดการเชื่อมต่อในระดับโมเลกุล (crosslinking) กับสายโซ่ของ PLA อีกด้วย<sup>12-15</sup>

นอกจากนี้ การปรับปรุงความเหนียวให้กับฟิล์ม PLA อีกหนทางหนึ่ง คือ การผสม PLA กับพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ชนิดอื่นที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น พอลิবিวทีลีนอะดิเพทเทรทาเลต (PBAT) พอลิবিวทีลีนซัคซิเนต (PBS) Bioflex และ Ecovio เป็นต้น ฟิล์มที่ได้เหล่านี้มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น แต่ความใสของ PLA ลดลง (รูปที่ 4.13 (d)-(h))

อย่างไรก็ตาม การเติมพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพชนิดอื่นผสมกับ PLA นั้น มีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณที่เติมลงไป หากมีปริมาณมากเกินไป มีผลทำให้เกิดการแยกวัฏภาค (phase separation) เช่น คอมพาวนด์ของ PLA PBAT และ PEG ในอัตราส่วน 60:30:10 มีการแยกชั้นของ PLA กับ PBAT อย่างชัดเจน ซึ่งสังเกตได้ด้วยตาเปล่า และไม่สามารถขึ้นรูปด้วยการเป่าถุงได้ เพราะมีความแข็งแรงขณะหลอม (melt strength) ต่ำ

2.1.3 ลักษณะของแผ่นฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มอดิฟายด้วยอนุภาคพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ชนิดอื่น ๆ  
แบบ multi-layer

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

i)

j)

k)

l)

m)

n)

o)

รูปที่ 4.14 ลักษณะแผ่นฟิล์มแบบ multi-layer ของ a) C1 ถึง o) C15 ตามที่รายงานไว้ในบทที่ 3 (ทุกตัวอย่างเป็นแบบ 2 layers ยกเว้น C6 เป็นแบบ 3 layers)

รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มของสูตรต่างๆ ที่ได้จากการขึ้นรูปแบบ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแบบ single-layer ฟิล์มแบบ multi-layer ที่ได้มีลักษณะขุ่นขาว มีความหนาและความเหนียวเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจาก Bioflex และ SEBS ที่ถูกอัดรีดออกมาพร้อมกับ PLA ในกรณีที่มี POM เป็นส่วนประกอบ ฟิล์มที่ได้มีความเปราะมากขึ้นและไม่ยืดหยุ่น

2.1.4 ลักษณะของแผ่นฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ถูกดึงยึดในสองทิศทางของคอมพาวนด์พอลิแล็กติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาไรซ์ที่ดัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 75:25 ที่อุณหภูมิและสัดส่วนการดึงยึดต่าง ๆ

a)

b)

c)

d)

e)

f)

g)

h)

i)

รูปที่ 4.15 ลักษณะแผ่นฟิล์มของคอมพาวนด์พอลิเล็กติกแอซิดกับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 75:25 ที่ถูกดึงยืดทั้งสองทิศทางที่อุณหภูมิ 80°C ด้วยสัดส่วนการดึงยืดที่ a) 3x3 b) 4x4 และ c) 5x5 ที่อุณหภูมิ 90°C ด้วยสัดส่วนการดึงยืดที่ d) 3x3 e) 4x4 และ f) 5x5 และที่อุณหภูมิ 100°C ด้วยสัดส่วนการดึงยืดที่ g) 3x3 h) 4x4 และ i) 5x5

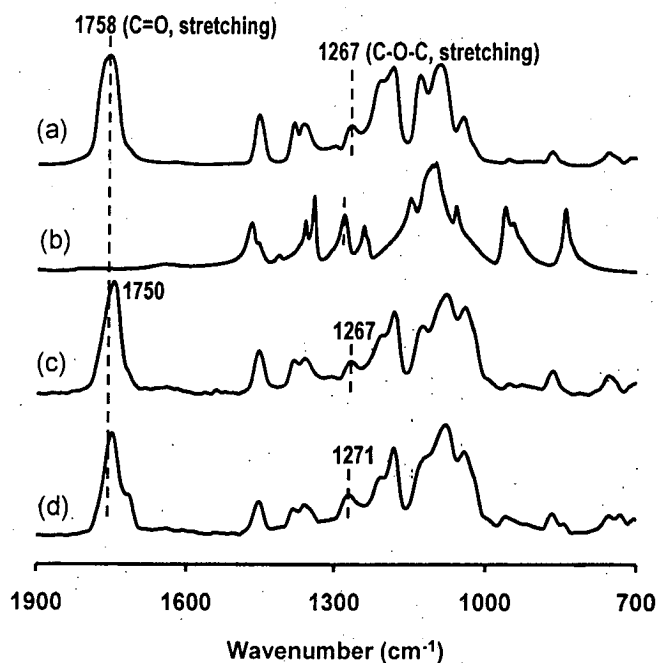
แผ่นฟิล์มตามรูปที่ 4.15 a) - i) ถูกดึงยืดในสองทิศทางพร้อมๆกันด้วยเครื่อง biaxial stretching ระดับห้องปฏิบัติการที่สัดส่วนการดึง 3x3, 4x4 และ 5x5 เท่าของความยาวเดิม โดยแผ่นฟิล์มจะถูกนำไปเก็บที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ก่อนจะถูกดึงยืดออก ที่อุณหภูมิที่ทำการศึกษาได้แก่ 80°C, 90°C และ 100°C เป็นเวลา 30 วินาที ก่อนถูกดึงออกทั้งสองทิศทาง ลักษณะของฟิล์มหลังถูกดึง (รูปที่ 4.15 a) - i)) จะมีความเหนียวเพิ่มมากกว่าฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการเป่าถุง (รูปที่ 4.12 k) ของคอมพาวนด์ชนิดเดียวกัน (คอมพาวนด์ของพอลิเล็กติกแอซิดกับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 75:25) ฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยการเป่าถุงจะถูกดึงทิศทางเดียวคือ ทิศตามทางของเครื่องมือ machine direction ดังเช่นกรณีของการดึงในสองทิศทางของฟิล์มของคอมพาวนด์พอลิเล็กติกแอซิดกับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับฟิล์มที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว<sup>51</sup>

ในระหว่างที่ทำการศึกษา เราพบว่าอุณหภูมิที่ใช้เก็บตัวอย่างก่อนถูกดึงยืดมีผลต่อการดึงฟิล์มในสองทิศทาง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 80°C ฟิล์มจะไม่สามารถถูกดึงได้ที่สัดส่วน 5x5 เท่าของความยาวเดิม ฟิล์มจะขาดก่อน นอกจากนี้

แรงที่ใช้ในการดึง เราพบว่าที่สัดส่วนการดึง 3x3 ที่อุณหภูมิ 80°C ใช้แรงในการดึงมากกว่า (85 N) ที่อุณหภูมิที่ 90°C และ 100°C (4 N)

## 2.2. การวิเคราะห์ทางโครงสร้างทางเคมีของแผ่นฟิล์มด้วย FT-IR

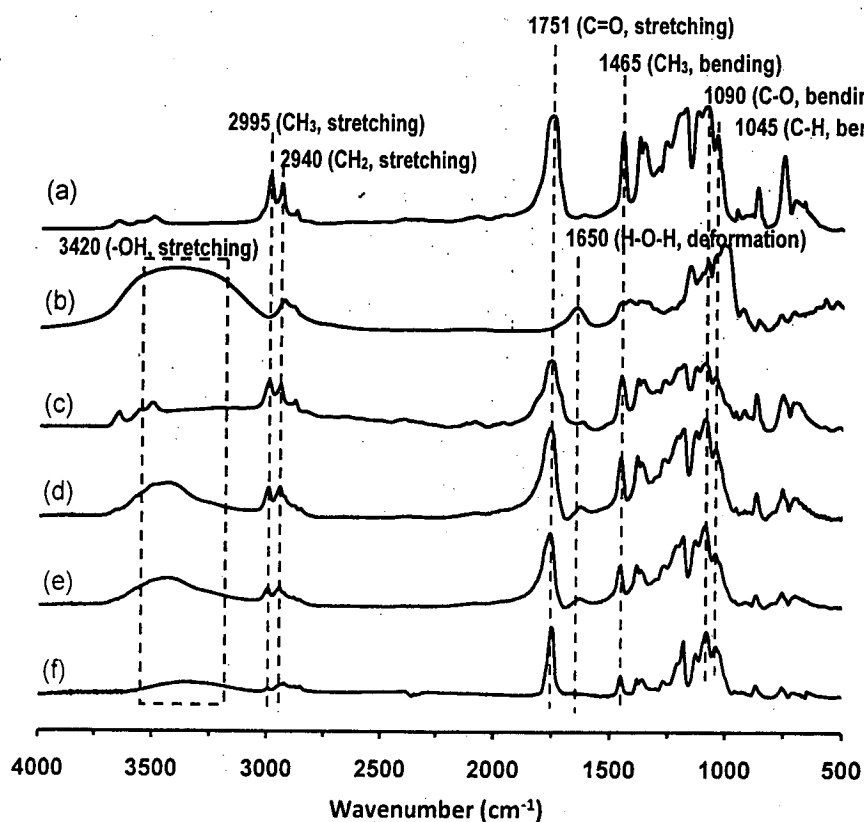
### 2.2.1 ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนไกลคอลในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) ฟิล์ม PLA (b) PEG และ ฟิล์มที่ได้จากคอมพาวนด์ของ PLA และ PEG ในอัตราส่วน (c) 90:10 และ (d) 85:15

รูปที่ 4.16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA ที่คอมพาวนด์ด้วย PEG ในช่วง 700-1900  $\text{cm}^{-1}$  ตำแหน่งของพีคที่แสดงถึงหมู่คาร์บอนิลเลื่อนจาก 1758  $\text{cm}^{-1}$  เป็น 1750  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ปลายสายโซ่ PEG กับหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ของ PLA และส่งผลทำให้ฟิล์มของคอมพาวนด์เหล่านี้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเลื่อนตำแหน่งของพีคที่ 1267  $\text{cm}^{-1}$  ของ PLA ไปที่ 1271  $\text{cm}^{-1}$  ของ PLA/PEG 85:15 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการสั่นของ C-O-C antisymmetric stretching ในหมู่เอสเทอร์ ยังช่วยยืนยันความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอีกด้วย

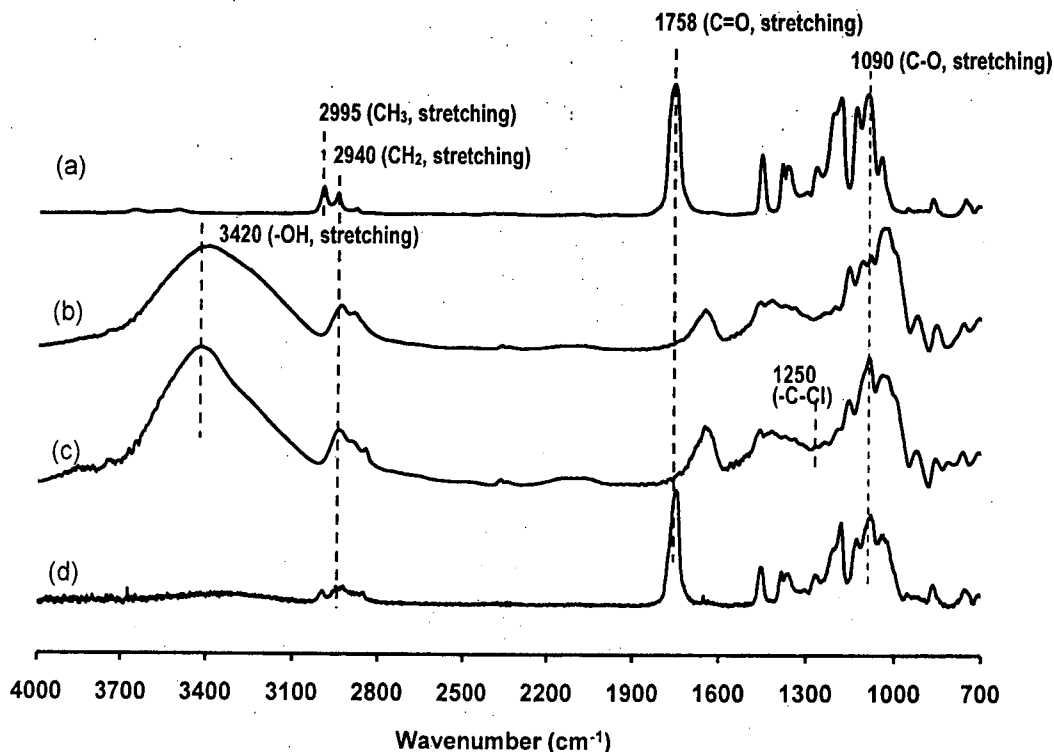
### 2.2.2 พิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์ประกอบของสตาร์ช



รูปที่ 4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) PLA (b) สตาร์ช (c) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ช, PLA/ST1 (d) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย GPMS, PLA/ST2 (e) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย APMS, PLA/ST3 และ (f) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย 3-คลอโรโพรพิลไดรเมทรอกซีไซเลน, PLA/ST4

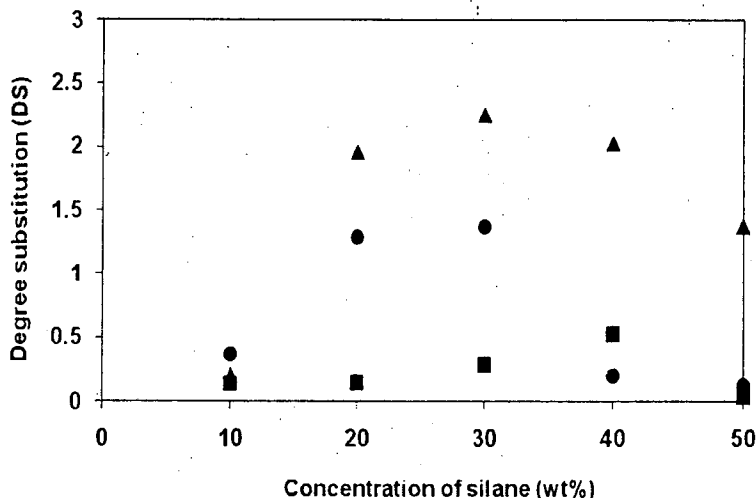
PLA ถูกนำไปผสมกับสตาร์ชที่ถูกตัดแปรในอัตราส่วน 90:10 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยใช้อุณหภูมิ 155-165 องศาเซลเซียส คอมพาวนด์ที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วย FTIR รูปที่ 4.16 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA สตาร์ช และ PLA ที่ผสมกับสตาร์ชตัดแปรด้วยไซเลนแบบต่างๆ เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 (a) พีคที่เด่นชัดของ PLA คือ พีคบริเวณ 2995-2880, 1751, 1465, 1383 และ 1364, 1190 และ 1090, และ 1045  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ CH stretching, C=O ในหมู่เอสเทอร์,  $\text{CH}_3$  bending, CH deformation, C-O bending และ CH bending ตามลำดับ คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรต่างๆ (รูปที่ 4.17 (b)-(f)) แสดงพีคบริเวณ 1650-1640  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ H-O-H deformation ซึ่งเป็นส่วนของน้ำที่ถูกดูดซับไว้ในส่วนอสัณฐานของสตาร์ช สำหรับพีคที่แสดงถึงสารประกอบไซเลน -Si-O- ซึ่งจะปรากฏอยู่ในช่วง 1090-1100  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับพีคของ C-O stretching ของสตาร์ช เมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ถูกตัดแปร สัดส่วนของความเข้มของพีคที่ 1090  $\text{cm}^{-1}$  ต่อพีคที่ 1045  $\text{cm}^{-1}$  ของสตาร์ชที่ถูกตัดแปรด้วยสารประกอบไซเลนทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงเป็นนัยว่าสารประกอบไซเลนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ -OH ของสตาร์ชได้

### 2.2.3 พิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์ประกอบของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช



รูปที่ 4.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) PLA (b) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (c) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วย CPMS 10 wt% และ (d) คอมพาวนด์ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.18 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช และ PLA ที่ผสมกับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วยสารประกอบซิลิโคน CPMS เมื่อพิจารณารูปที่ 4.18 (a) พีคที่เด่นชัดของ PLA คือพีคบริเวณ 2995-2880, 1758, 1456, 1383 และ 1364, 1190 และ 1090  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ CH stretching, C=O ในหมู่เอสเทอร์,  $\text{CH}_3$  bending, CH deformation และ C-O stretching ตามลำดับ ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชนั้น พีคในช่วง 3600-3200  $\text{cm}^{-1}$  ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากสตาร์ชมีหมู่ -OH เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชมีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูง สำหรับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วยสารประกอบซิลิโคน CPMS พีคที่ 1250  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ C-Cl wagging ใน CPMS ปรากฏขึ้น นอกจากนี้ เรายังพบการเลื่อนของพีค (peak shifting) ในช่วง 1100-1070  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสั่นของหมู่ C-O stretching และพันธะของ Si-O โดยเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชแสดงตำแหน่งการสั่นของหมู่ C-O stretching ที่ 1090  $\text{cm}^{-1}$  ในขณะที่เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วย CPMS และคอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วย CPMS แสดงพีคที่ 1085  $\text{cm}^{-1}$  และความเข้มของพีค ณ ตำแหน่งนี้สูงกว่าบริเวณข้างเคียง ซึ่งชี้ให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบซิลิโคนกับหมู่ -OH ของพอลิแล็กติกแอซิด



รูปที่ 4.19 Degree of substitution (DS) ของสารประกอบไฮเลนนโมเลกุลของสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยสารประกอบไฮเลนนชนิดต่าง ๆ (แป้งที่ดัดแปรด้วย GPMS ● , APMS ▲ และ CPMS ■ )

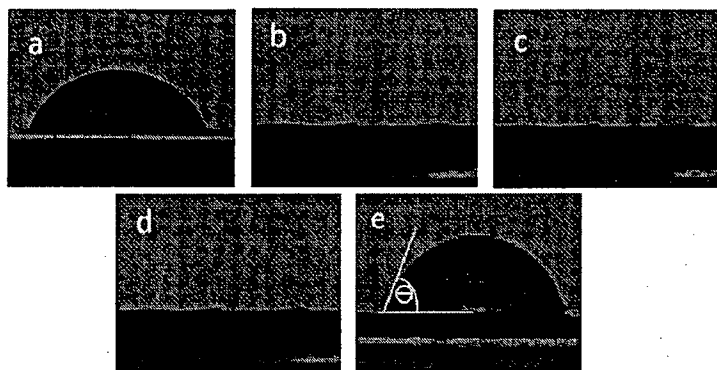
หากต้องการหาปริมาณสารประกอบไฮเลนนในสตาร์ชที่ถูกดัดแปร ทำได้โดยใช้เทคนิค <sup>1</sup>H NMR โดยนำผลวิเคราะห์โปรตอนที่ได้มาคำนวณหาค่า Degree of substitution (DS) ซึ่งคำนวณได้จากสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีคของโปรตอนของสารประกอบไฮเลนนต่อพื้นที่ใต้พีคของโปรตอนของกลูโคส 1 วง

จาก <sup>1</sup>H NMR เราพบว่าพีคของโปรตอนของสารประกอบไฮเลนนปรากฏอยู่ในช่วง 0.8-1.2 ppm ซึ่งแสดงถึง -CH<sub>2</sub>- ของสารประกอบไฮเลนนและพีคของโปรตอนของกลูโคสจะปรากฏที่ตำแหน่ง 5.3 ppm ซึ่งแสดงถึง -CH- ตำแหน่งที่ 1 ของวงกลูโคสในโมเลกุลของสตาร์ช

เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบไฮเลนนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ OH บนสายโซ่ของสตาร์ชจากค่า DS ที่คำนวณได้ เราพบว่าค่า DS สูงที่สุดที่ความเข้มข้นของสารประกอบไฮเลนน 30% (สตาร์ชที่ดัดแปรด้วย GPMS และ APMS) และ 40% (สตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS) โดยสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย APMS มีค่า DS ถึง 2.25 ในขณะที่ CPMS และ GPMS มีค่า DS เท่ากับ 1.37 และ 0.53 ตามลำดับ (ดังแสดงในรูปที่ 4.19)

2.3. การศึกษาการปรับปรุงความไม่ชอบน้ำของสตาร์ชและเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยสารประกอบไฮเลนน

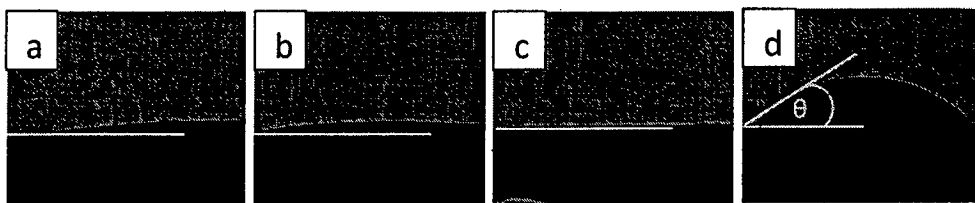
2.3.1 การปรับปรุงความไม่ชอบน้ำของสตาร์ช (สังเกตจากการวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวของสตาร์ชต่าง ๆ)



รูปที่ 4.20 มุมสัมผัส (contact angle) ของน้ำบนพื้นผิวของ (a) फिल्म PLA (b) สตาร์ช (c) สตาร์ชดัดแปรด้วย GPMS (d) สตาร์ชดัดแปรด้วย APMS และ (e) สตาร์ชดัดแปรด้วย CPMS

เนื่องจากโครงสร้างของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้สตาร์ชมีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูง จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สตาร์ชทั่วไปไม่สามารถถูกผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับ PLA ซึ่งมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ได้ รูปที่ 4. 20 (a) แสดงหยดน้ำบนผิวฟิล์ม PLA ซึ่งทำมุม  $70 \pm 5$  องศา กับผิวฟิล์ม ในขณะที่หยดน้ำไม่สามารถคงอยู่บนพื้นผิวของสตาร์ชได้ (รูปที่ 4. 20 (b)) ผลมุมสัมผัสของน้ำบนสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย GPMS และ APMS (รูปที่ 4. 20 (c)-(d)) แสดงให้เห็นว่า หยดน้ำไม่สามารถคงอยู่บนพื้นผิวได้เช่นกัน ซึ่งหมายถึง สตาร์ชดัดแปรทั้ง 2 ชนิดยังมีความชอบน้ำอยู่ เมื่อสตาร์ชถูกดัดแปรด้วยสารประกอบซิลิโคน CPMS ผลการทดลอง (รูปที่ 4. 20 (e)) แสดงให้เห็นว่า หยดน้ำสามารถคงอยู่บนพื้นผิวของสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วย CPMS ได้ โดยเกิดมุม  $60 \pm 5$  องศา กับพื้นผิว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สารประกอบซิลิโคน CPMS เกิดพันธะโควาเลนต์กับหมู่ OH ของแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างน้ำกับสตาร์ชลดลง จึงมีผลทำให้พื้นผิวของสตาร์ชมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น<sup>52</sup>

### 2.3.2 การปรับปรุงความไม่ชอบน้ำของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (สังเกตจากการวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชต่าง ๆ)



รูปที่ 4.21 มุมสัมผัส (contact angle) ของน้ำบนพื้นผิวของ (a) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (b) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วย GPMS (c) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วย APMS และ (d) เทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วย CPMS

เมื่อทำคอมพาวนด์สตาร์ชให้เป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ผลการวัดมุมสัมผัสของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วย GPMS และ APMS (รูปที่ 4. 21 (a)-(c)) แสดงให้เห็นว่า มีบางส่วนของน้ำเหลืออยู่บนพื้นผิวของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ซึ่งอาจเป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงให้เป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชนั้น ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล (intermolecular hydrogen bond) ของพอลิแซ็กคาไรด์ถูกทำลายลง ความชอบน้ำของสตาร์ชจึงลดลง อย่างไรก็ตาม โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชไม่ได้ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไป (หมู่ OH ของสตาร์ชไม่ได้ถูกทำปฏิกิริยาทางเคมีกับกลีเซอรอลที่ได้เติมลงไป) เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ให้กับสตาร์ช โดยลดอุณหภูมิหลอมของสตาร์ชลง (เนื่องจากสตาร์ชมีอุณหภูมิหลอมใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัว ทำให้เป็นอุปสรรคในการขึ้นรูปชิ้นงานของสตาร์ช)<sup>53-56</sup>

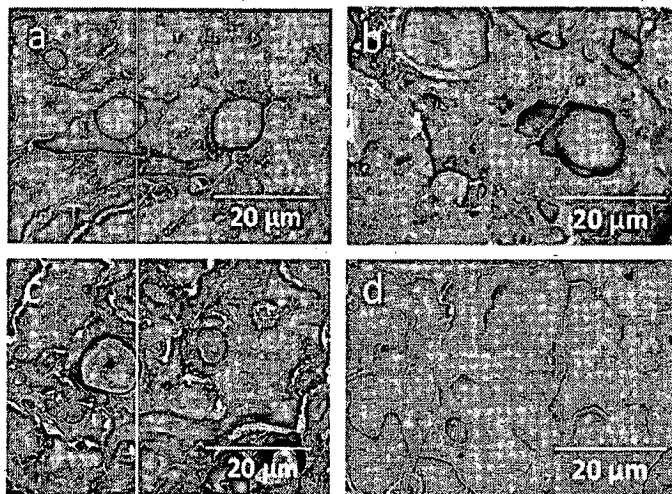
เมื่อทำการวัดมุมสัมผัสจากรูปที่ 4.21 (a), (b) เราพบว่าหยดน้ำทำมุมประมาณ  $10 \pm 2$  องศา บนพื้นผิวตัวอย่าง แสดงให้เห็นถึงความสามารถของน้ำในการซึมผ่านพื้นผิวของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชได้ แต่บางส่วนของหยดน้ำยังสามารถคงอยู่บนพื้นผิวได้ เช่นเดียวกับกรณีของสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วย CPMS

สำหรับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชของสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยซิลิโคน CPMS (รูปที่ 4. 21 (d)) นั้น เราพบว่า หยดน้ำทำมุมเท่ากับ  $40 \pm 5$  องศา กับพื้นผิว ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของ CPMS ในการปรับปรุงความไม่ชอบน้ำของสตาร์ช อย่างไรก็ตาม มุมของน้ำบนผิวเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยซิลิโคน CPMS มีค่าต่ำกว่ากรณีของสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ดังรูปที่ 4.19 (e) ( $60 \pm 5$  องศา) ทั้งนี้เพราะกลีเซอรอลมีหมู่ OH ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ ความชอบน้ำของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชของสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยซิลิโคน CPMS จึงเพิ่มขึ้น<sup>52</sup>

## 2.4. การศึกษาลักษณะพื้นผิวของคอมพาวนด์

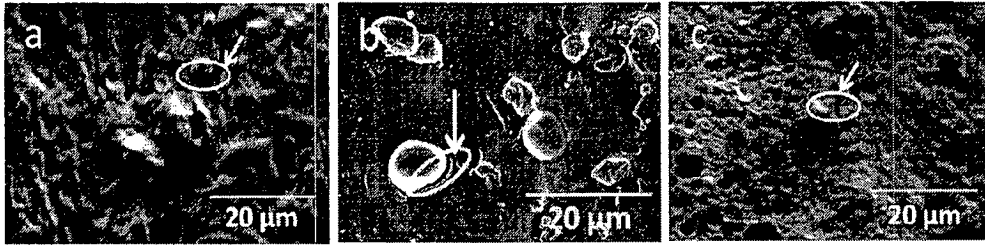
### 2.4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์ประกอบของสตาร์ช

โดยทั่วไป การผสมสตาร์ชกับพอลิเมอร์นั้นมีปัญหาที่สำคัญ คือ ความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างสตาร์ช (ที่ชอบน้ำ) และพอลิเมอร์ (ไม่ชอบน้ำ) การดัดแปรโครงสร้างของสตาร์ชจึงเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำได้ รูปที่ 4.22 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของคอมพาวนด์ที่ได้จาก PLA กับสตาร์ช ช่องว่างระหว่างเนื้อพอลิเมอร์ PLA และเม็ดกลมของสตาร์ช ไม่ว่าจะเป็นสตาร์ชที่ไม่ถูกดัดแปรหรือสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วย GPMS หรือ APMS เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างอย่างชัดเจน ในขณะที่ PLA ที่คอมพาวนด์กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS นั้น มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันของฟิล์มระหว่างฟิล์มที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและฟิล์มที่มีการแยกชั้นของอนุภาคของสตาร์ชเกิดขึ้น ดังที่ได้แสดงไว้ใน 2.7 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพาวนด์



รูปที่ 4.22 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของ (a) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ช (b) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชดัดแปรด้วย GPMS (c) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชดัดแปรด้วย APMS และ (d) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชดัดแปรด้วย CPMS

การปรับปรุงสตาร์ชให้เป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชนั้น ช่วยลดการแยกชั้นกันระหว่างสตาร์ชและ PLA ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 4. 23 (c)) โดยปริมาณของสารประกอบไซเลนที่ใช้ในการดัดแปรเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชคิดเป็นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก คณะผู้วิจัยได้ศึกษาปริมาณของสารประกอบไซเลน CPMS ที่มีผลต่อเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช พบว่า เมื่อปริมาณสารประกอบไซเลนในเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชต่ำกว่าร้อยละ 15 ฟิล์มที่ได้มีผิวที่หยาบคล้ายกับฟิล์มที่ได้จากคอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วย GPMS

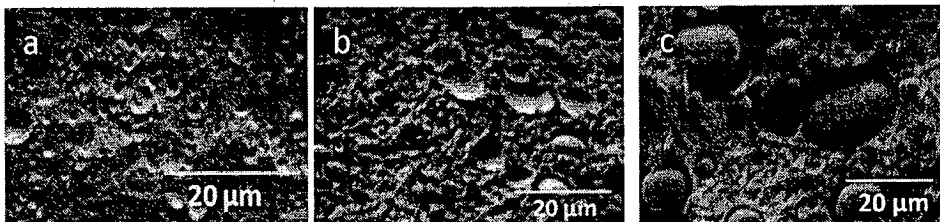


รูปที่ 4.23 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของ (a) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (b) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วย GPMS และ (c) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วย CPMS (ในอัตราส่วน PLA:TPS 70:30)

#### 2.4.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีสารเติมแต่งอื่น ๆ

ในกรณีของพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกใน PLA ผลการวิเคราะห์คอมพาวนด์ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่า พื้นผิวมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่พบการแยกวัฏภาคของสารใดๆ นอกจากนั้น ยังพบช่องและรูในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งอาจเป็นผลของความชื้นในอากาศที่เมื่อดคอมพาวนด์ (extrudate) ดูดซับไว้ และเมื่อถูกหลอมอีกครั้งในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ความชื้นที่ถูกดูดซับไว้ระเหยออก ทำให้เกิดฟองอากาศภายในแผ่นฟิล์มที่นำมาตรวจสอบ

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเกี่ยวกับ PBAT ที่ไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับ PLA ได้นั้น เมื่อปริมาณของ PBAT สูงขึ้นถึงร้อยละ 30 (รูปที่ 4.24 (b), (c)) การแยกวัฏภาคปรากฏขึ้นอย่างเด่นชัดโดยพบช่องว่างระหว่างส่วนของ PBAT ในโครงร่างของพอลิแล็กติกแอซิด และขนาดของ PBAT ที่ใหญ่ขึ้นตามปริมาณที่ผสม รวมถึงความหลากหลายของขนาด PBAT ซึ่งแสดงถึง ความไม่สม่ำเสมอในการรวมตัวของ PBAT (poor dispersion) ใน PLA



รูปที่ 4.24 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของ (a) คอมพาวนด์ของ PLA กับ PEG ในอัตราส่วน 90:10 (b) คอมพาวนด์ของ PLA:PBAT:PEG ในอัตราส่วน 80:10:10 และ (c) คอมพาวนด์ของ PLA:PBAT:PEG ในอัตราส่วน 60:30:10

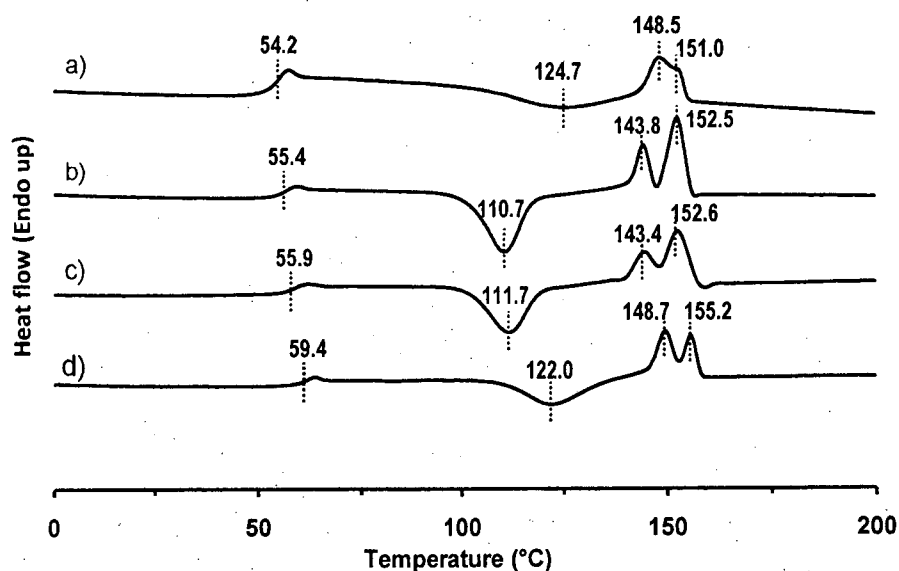
### 2.5. การศึกษาสมบัติทางความร้อน

#### 2.5.1 สมบัติทางความร้อนของสารผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับสตาร์ชและสตาร์ชตัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน

โดยทั่วไป อุณหภูมิหลอมของ PLA (melting temperature) อยู่ที่ประมาณ 160 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature) อยู่ในช่วง 55-60 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส) จึงทำให้ฟิล์มของ PLA มีลักษณะแข็งเปราะ เป็นอุปสรรคต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ PLA ยังคงมีอัตราการตกผลึกช้า ทำให้ฟิล์มของ PLA ไส แต่มีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ โดยอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature) ของ PLA นั้น อยู่ที่ประมาณ 125 องศา

เซลเซียส และมีช่วงการตกผลึกกว้าง (100-145 องศาเซลเซียส) ซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วย DSC ในรูปที่ 4.25 (a)

รูป 4.25 (b)-(d) แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของคอมพาวนด์ที่เตรียมได้จาก PLA และสตาร์ชในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อผสม PLA กับสตาร์ชในอัตราส่วน 90:10 อุณหภูมิการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ลดลงเป็น 110.7 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับ PLA กับสตาร์ชในอัตราส่วน 70:30 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของสตาร์ชสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดผลึกของ PLA ดังที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว<sup>28</sup> แต่เมื่ออัตราส่วนของสตาร์ชสูงถึงร้อยละ 50 อุณหภูมิการเกิดผลึกของคอมพาวนด์มีค่าสูงขึ้นใกล้เคียงอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ผสมสตาร์ช เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชมีอุณหภูมิคล้ายแก้วสูงขึ้น เมื่อปริมาณสตาร์ชเพิ่มขึ้น

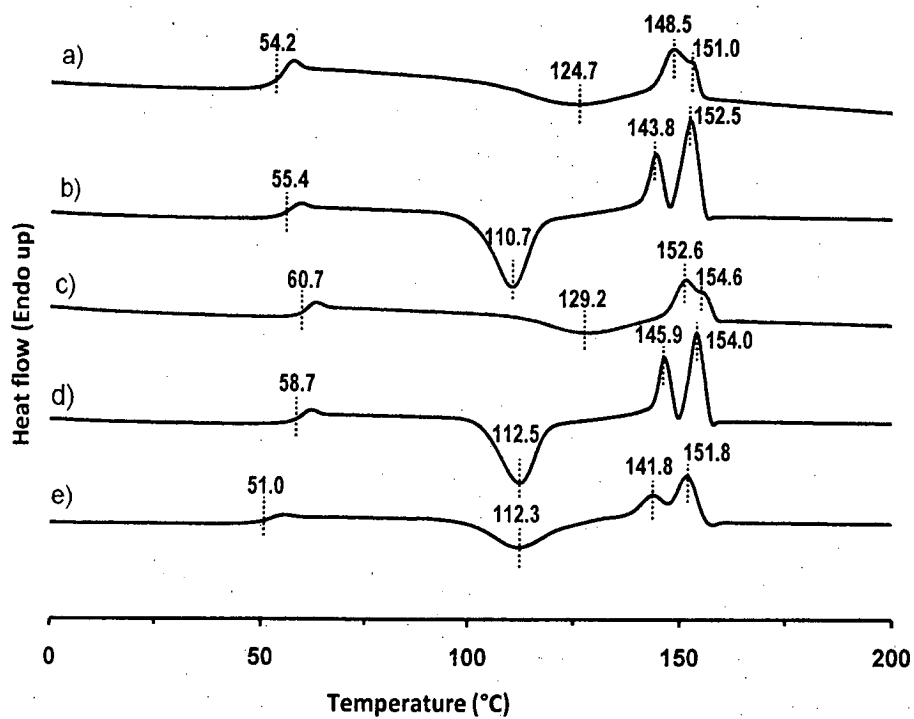


รูปที่ 4.25 DSC Thermogram ของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดกับสตาร์ชในปริมาณต่าง ๆ (a) PLA คอมพาวนด์ของ PLA กับแป้งในอัตราส่วน (b) 90:10 (c) 70:30 และ (d) 50:50

รูปที่ 4.26 แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature) และอุณหภูมิหลอม (melting temperature) ของ PLA และคอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชในอัตราส่วน 90:10 คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย GPMS และ APMS แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วเพิ่มขึ้นถึง 60 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของคอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ลดลงเป็น 51 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลจากความเข้ากันได้เป็นอย่างดีระหว่าง PLA กับสตาร์ชที่ถูกดัดแปร เมื่อพิจารณาเรื่องผลของสตาร์ชที่ดัดแปรต่อการเกิดผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปร มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับ PLA ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชที่ดัดแปรสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดผลึกของ PLA ดังเช่นตัวอย่างของสตาร์ชที่ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งสามารถเร่งการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน<sup>57</sup> ยกเว้นกรณีของคอมพาวนด์ PLA กับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย GPMS ซึ่งแสดงอุณหภูมิการเกิดผลึกที่สูงขึ้นและช่วงการเกิดผลึกที่กว้างคล้าย PLA ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจาก GPMS ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ทำให้สตาร์ชเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (crosslinking) ระหว่างสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์ เมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วย GPMS จึงไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดผลึกให้กับ PLA ได้

เมื่อเปรียบเทียบช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกของ PLA และคอมพาวนด์ที่เตรียมได้ คอมพาวนด์ของ PLA ที่ผสมกับสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS แสดงช่วงการเกิดผลึกที่กว้าง (broad peak) เทียบกับช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมกับแป้งดัดแปรอื่น ๆ นอกจากนี้ช่วงการหลอมเหลวของคอมพาวนด์แสดงตำแหน่งสูงสุด 2 ตำแหน่ง

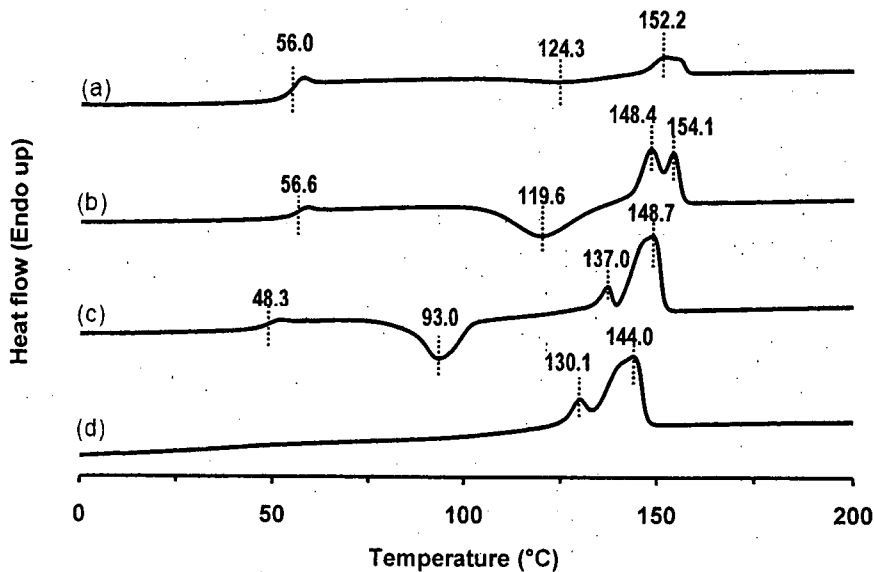
ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างของรูปแบบผลึกของ PLA (PLA commercial grade ประกอบด้วย D- และ L-isomers)<sup>58-59</sup>



รูปที่ 4.26 DSC Thermogram ของ (a) PLA (b) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ช (c) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย GPMS (d) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย APMS และ (e) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย CPMS ในอัตราส่วน PLA:สตาร์ช = 90:10

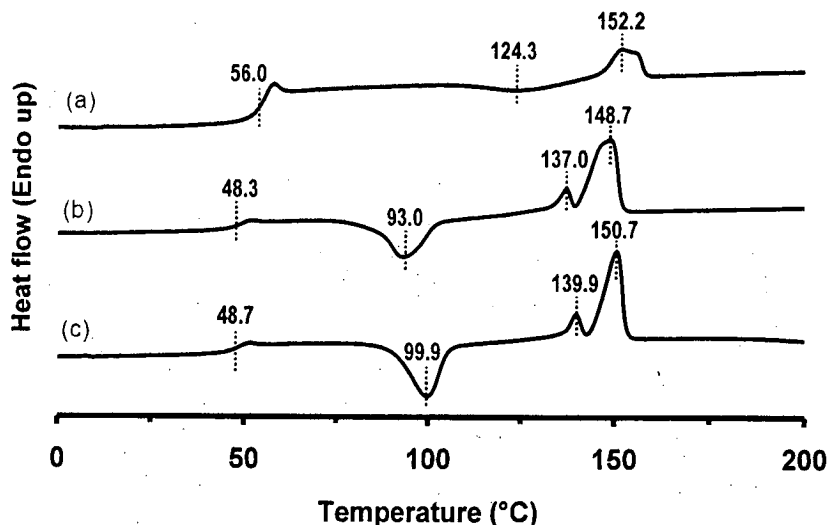
## 2.5.2 สมบัติทางความร้อนของคอมพาวนด์ระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชและเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปร

รูปที่ 4.27 แสดงสมบัติทางความร้อนของคอมพาวนด์ PLA ที่มีองค์ประกอบของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช เมื่อปริมาณเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิหลอมลดลง ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากกลีเซอรอลที่อยู่ในเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ซึ่งกลีเซอรอลสามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) ให้กับพอลิเมอร์ทั่วไป รวมทั้ง PLA ได้<sup>4</sup> ในการทดลองนี้ อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อแป้งที่ใช้ในการเตรียมเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (กลีเซอรอล:แป้ง = 65:35) คงที่ ดังนั้นเมื่อปริมาณของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชในคอมพาวนด์สูงขึ้น ปริมาณกลีเซอรอลของระบบจึงเพิ่มขึ้นด้วย และกลีเซอรอลช่วยให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA เคลื่อนที่ได้ง่าย จึงทำให้สายโซ่เกิดการจัดเรียงตัว ซึ่งเอื้อต่อการเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ PLA ที่ไม่ถูกผสมเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (รูปที่ 4.26(a)) เกิดผลึกช้าและมีความเป็นผลึกต่ำ<sup>56</sup>



รูปที่ 4.27 DSC Thermogram ของคอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชในอัตราส่วนต่างๆ (a) PLA (b) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชในอัตราส่วน 70:30 (c) 60:40 และ (d) 50:50

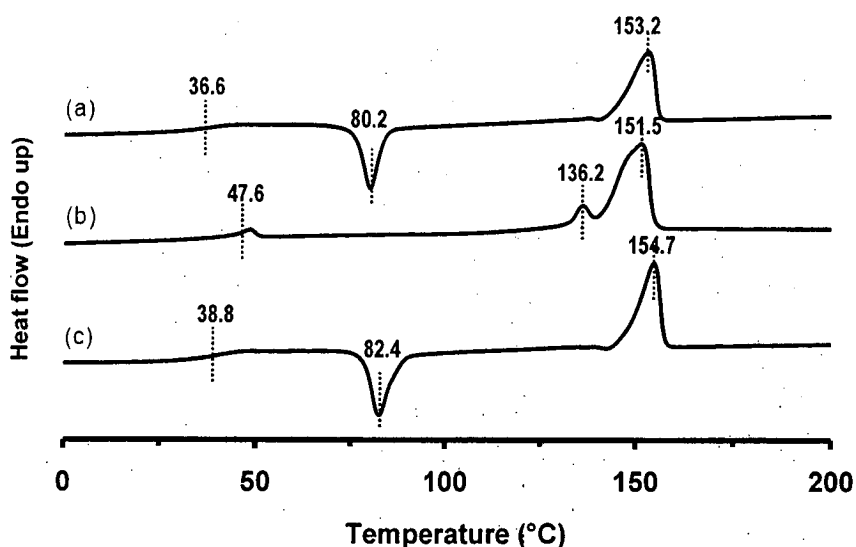
ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นความเป็นเนื้อเดียวกันของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS ผู้วิจัยเลือกเตรียมคอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วยไซเลน CPMS รูปที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของคอมพาวนด์ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชดัดแปรด้วยไซเลน CPMS ในอัตราส่วน 60:40 เมื่อเปรียบเทียบคอมพาวนด์ระหว่าง PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ดัดแปรและดัดแปรด้วย CPMS เราพบว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน แต่อุณหภูมิการเกิดผลึกของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ดัดแปรด้วย CPMS สูงกว่าและเอนทัลปีของการตกผลึกเพิ่มขึ้นจาก 15.01 J/g เป็น 22.43 J/g ซึ่งอาจเป็นผลจากสภาพเข้ากันได้ที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ถูกดัดแปร



รูปที่ 4.28 DSC Thermogram ของ (a) PLA (b) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช และ (c) คอมพาวนด์ของ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วยไซเลน CPMS ในอัตราส่วน 60:40

### 2.5.3 สมบัติทางความร้อนของคอมพาวนด์ระหว่างพอลิเล็กติกแอซิดกับพอลิเอทิลีนไกลคอล

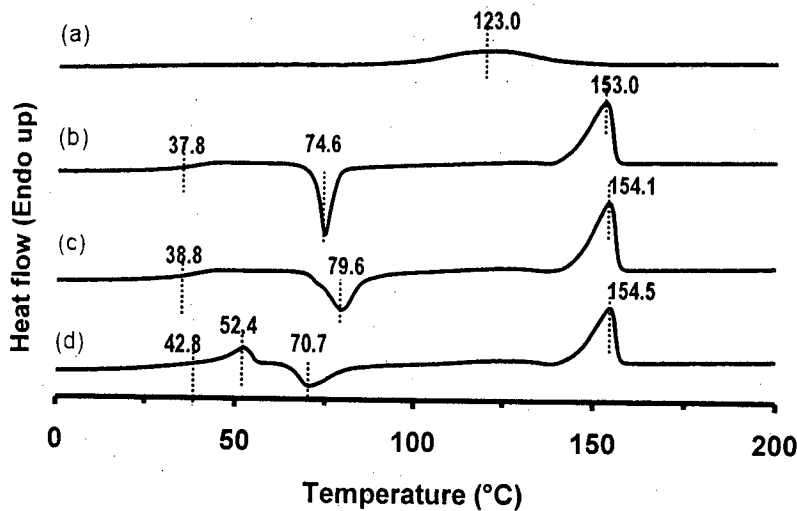
เมื่อทำคอมพาวนด์ PLA ด้วย PEG ในอัตราส่วนต่างๆ ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน (รูปที่ 4.29) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วลดลงมาที่ประมาณ  $40 \pm 5$  องศาเซลเซียส และมีช่วงการเกิดผลึกเกิดขึ้นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส (สำหรับคอมพาวนด์ของ PLA และ PEG ในอัตราส่วน 85:15 อุณหภูมิการเกิดผลึกอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงการลดอุณหภูมิของระบบ (cooling) เช่นเดียวกับการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีน) ทั้งนี้เนื่องมาจาก PEG ทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกใน PLA เอื้อต่อการเคลื่อนตัวของสายโซ่ PLA เช่นเดียวกับกลีเซอรอล<sup>4</sup> อย่างไรก็ตาม หากปริมาณ PEG สูงถึง 20% มีผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะหลอมลดลงจนไม่สามารถคงตัวเป็นเส้น เมื่้อออกจากเครื่องอัดรีด



รูปที่ 4.29 DSC Thermogram ของคอมพาวนด์ของ PLA และ PEG ในอัตราส่วน (a) 90:10 (b) 85:15 และ (c) 80:20 (สังเกตจากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 แก่ระบบ)

#### 2.5.4 สมบัติทางความร้อนของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดกับพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ

เพื่อศึกษาผลของพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ชนิดอื่น ๆ พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเรต (PBAT) เป็นตัวอย่างหนึ่งที่ผู้วิจัยเลือกใช้ คอมพาวนด์ของ PLA PBAT และ PEG ถูกเตรียมในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ได้แก่ 80:10:10 70:20:10 และ 60:30:10 (รูปที่ 4.30 (a)-(c)) รูปที่ 4.30 แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนของคอมพาวนด์ที่เตรียมได้ คอมพาวนด์ที่มี PBAT เป็นองค์ประกอบ แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำกว่าคอมพาวนด์ที่มีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของ PBAT ต่ำ (-50 องศาเซลเซียส) จึงช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของคอมพาวนด์ลงไปถึง 38 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเกิดผลึกของคอมพาวนด์อยู่ในช่วง 70-80 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของ PBAT เพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 30 ขององค์ประกอบทั้งหมด คอมพาวนด์แสดงพีคการดูดพลังงาน 2 ตำแหน่ง (52.4 และ 154.5 องศาเซลเซียส) ซึ่งอาจเป็นผลจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันระหว่าง PLA กับ PBAT อีกทั้งในระบบคอมพาวนด์มีองค์ประกอบของ PEG ซึ่งเป็นสารเสริมสภาพพลาสติก จึงทำให้อุณหภูมิหลอมปรากฏที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ PBAT (123 องศาเซลเซียส) (รูปที่ 4.30 (a)) ดังนั้น การผสม PBAT และ PEG ช่วยลดอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและเอื้อในการเกิดผลึก ซึ่งน่าจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของพอลิเมอร์ที่เติมมากเกินไป มีผลทำให้เกิดการแยกชั้นและส่งผลกระทบต่อสมบัติสุดท้ายเช่นกัน

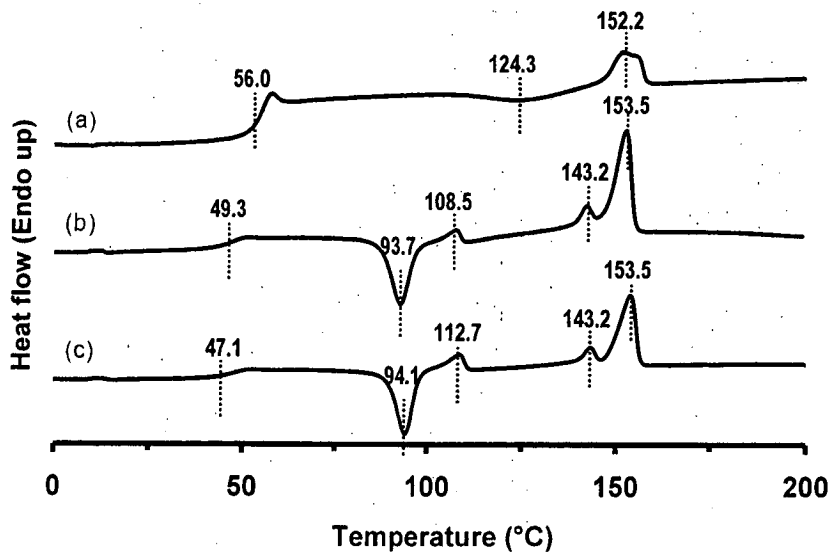


รูปที่ 4.30 DSC Thermogram ของ (a) PBAT และคอมพาวนด์ของ PLA/PBAT/PEG ในอัตราส่วน (b) 80/10/10 (c) 70/20/10 และ (d) 60/30/10

นอกจากนั้น ผู้วิจัยได้ทดลองใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีความเหนียวและมีการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เมื่อทำคอมพาวนด์ PLA กับ PBS และ SEBS อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของคอมพาวนด์ที่ได้อลดลงเหลือประมาณ 48 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจาก PBS ที่เป็นองค์ประกอบของคอมพาวนด์ มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของ PBS มีค่าประมาณ -30 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ พีคที่แสดงการดูดกลืนพลังงานปรากฏขึ้น 3 ตำแหน่ง ได้แก่ 110 (อุณหภูมิหลอมของ PBS บริสุทธิ์) 143 และ 153 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิหลอมของ PLA บริสุทธิ์) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการแยกวัฏภาค (phase separation) ระหว่าง PLA และ PBS อย่างชัดเจน แม้ว่าปริมาณ PBS ที่ถูกเติมลงไปมีเพียงร้อยละ 10

เมื่อพิจารณาผลของ SEBS (รูปที่ 4.31 (b), (c)) คอมพาวนด์ที่มีปริมาณ SEBS ที่ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิหลอมของคอมพาวนด์ที่ประมาณ 48 94 และ 153 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ SEBS ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของคอมพาว

วนตัวอย่างเด่นชัด (อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของส่วนเอทิลีนและบิวทิลีนบนสายโซ่ของ SEBS มีค่าอยู่ในช่วง -60 ถึง -50 องศาเซลเซียส)

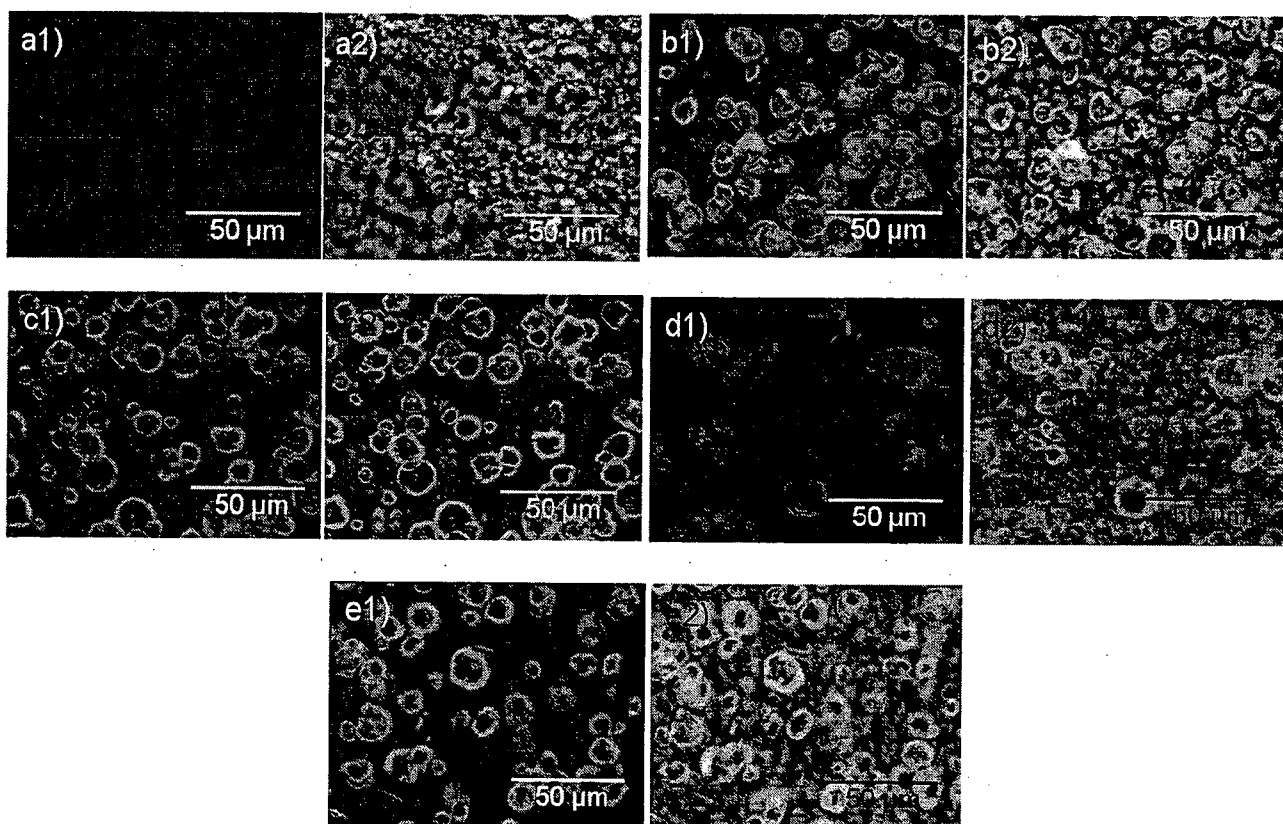


รูปที่ 4.31 DSC Thermogram ของ (a) PLA และคอมพาวนด์ของ PLA/PBS/SEBS ในอัตราส่วน (b) 85/10 /5 และ (c) 80/10/10

## 2.6. การศึกษาการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดกับสตาร์ช

การศึกษาการเกิดผลึกแบบ isothermal crystallization ทำได้โดยให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างที่อุณหภูมิหลอมจนตัวอย่างหลอมหมด แล้วลดอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาการเกิดผลึก และคงไว้ที่อุณหภูมินั้นๆ จนผลึกเกิดขึ้น รูปที่ 4.32 แสดงภาพของสเฟียร์รูไลท์ที่เกิดขึ้น หลังการหลอมแล้วลดอุณหภูมิลงให้คงที่ที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิแรกเริ่มของการตกผลึก (ข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ทางความร้อน) เป็นเวลา 30 นาที รูปที่ 4.32 (b)-(e) แสดงผลึกของเม็ดแป้งซึ่งมีลักษณะเป็นวงคล้ายกันหอย เวลาที่เริ่มเกิดสเฟียร์รูไลท์และการกระจายตัวของสเฟียร์รูไลท์ที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ สเฟียร์รูไลท์ของ PLA เริ่มเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที และกระจายไม่สม่ำเสมอ เมื่อผสมสตาร์ชเข้ากับ PLA สเฟียร์รูไลท์เกิดเร็วขึ้น หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 2 นาที และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับการเกิดสเฟียร์รูไลท์ของ PLA

สำหรับ PLA ที่ผสมกับสตาร์ชตัดแปรด้วยสารประกอบโซเลนต่างชนิดกัน เวลาเริ่มต้นของการเกิดสเฟียร์รูไลท์ของ PLA ที่ผสมกับสตาร์ชตัดแปรด้วยสารประกอบโซเลนทั้ง 3 ชนิดนั้นไม่แตกต่างกัน (ประมาณ 2-3 นาที) และการกระจายตัวของสเฟียร์รูไลท์ที่เกิดขึ้นใหม่นั้นสม่ำเสมอโดยทั่วกัน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเร่งการตกผลึกของสตาร์ชที่ถูกตัดแปรด้วยสารประกอบโซเลน



รูปที่ 4.32 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ที่ 100 องศาเซลเซียส ณ นาทีที่ 0 (1) และนาทีที่ 30 (2) ของ (a) PLA (b) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ช (c) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย GPMS (d) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย APMS และ (e) คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย CPMS

ตารางที่ 1 ช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุด และอัตราการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดกับสตาร์ซสูตรต่าง ๆ ในอัตราส่วน 90:10

คอมพาวนด์	ช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึก (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึกสูงสุด (°C)	อัตราการเกิดสเฟียรูไลต์ ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )
PLA	105 - 141.5	124.7	$0.50 \pm 0.02$
PLA/สตาร์ซ	96.7 - 116.5	110.7	$0.94 \pm 0.02$
PLA/สตาร์ซ-GPMS	110 - 142.7	129.2	$0.65 \pm 0.02$
PLA/สตาร์ซ-APMS	97 - 118.9	112.5	$0.60 \pm 0.01$
PLA/สตาร์ซ-CPMS	93.8 - 126	112.3	$1.16 \pm 0.05$

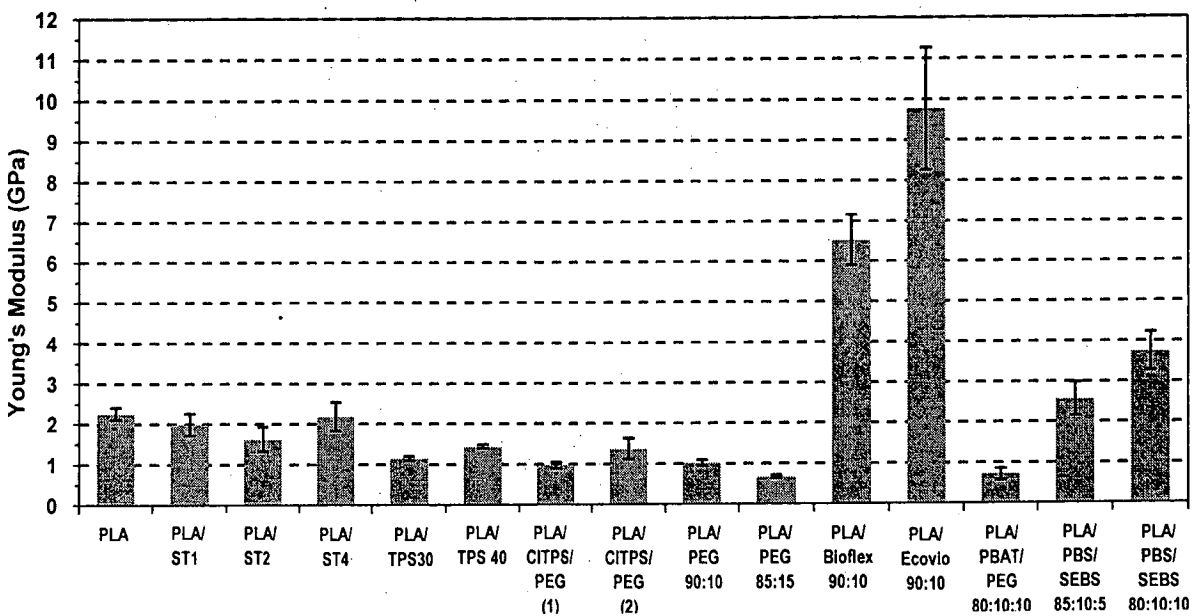
ตารางที่ 1 แสดงอัตราเร็วในการเกิดสเฟียรูไลต์ของ PLA คอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ซ และคอมพาวนด์ของ PLA กับสตาร์ซตัดแปรด้วยสารประกอบไซเลนชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA อัตราเร็วในการเกิดสเฟียรูไลต์ของ PLA ที่ผสมสตาร์ซสูงขึ้น แสดงถึงการที่สตาร์ซช่วยเร่งการเกิดสเฟียรูไลต์ สำหรับ PLA ที่ผสมสตาร์ซตัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน ชนิดของสารประกอบไซเลนที่ใช้ตัดแปรส่งผลต่ออัตราเร็วของการเกิดสเฟียรูไลต์เช่นกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อผสมสตาร์ซที่ตัดแปรด้วย CPMS อัตราเร็วในการเกิดสเฟียรูไลต์ของ PLA เพิ่มขึ้น (ประมาณ 2 เท่า) ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่ได้ กล่าวคือ อุณหภูมิเริ่มการตกผลึกและช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกของคอมพาวนด์ของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมสตาร์ซตัดแปรด้วย CPMS นั้น มีค่าต่ำกว่าและมีช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกกว้างกว่า PLA จึงทำให้ สเฟียรูไลต์ของคอมพาวนด์เกิดเร็วขึ้น

## 2.7. การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพาวนด์พอลิแล็กติกแอซิด

### 2.7.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้จากคอมพาวนด์พอลิแล็กติกแอซิดแบบ single-layer

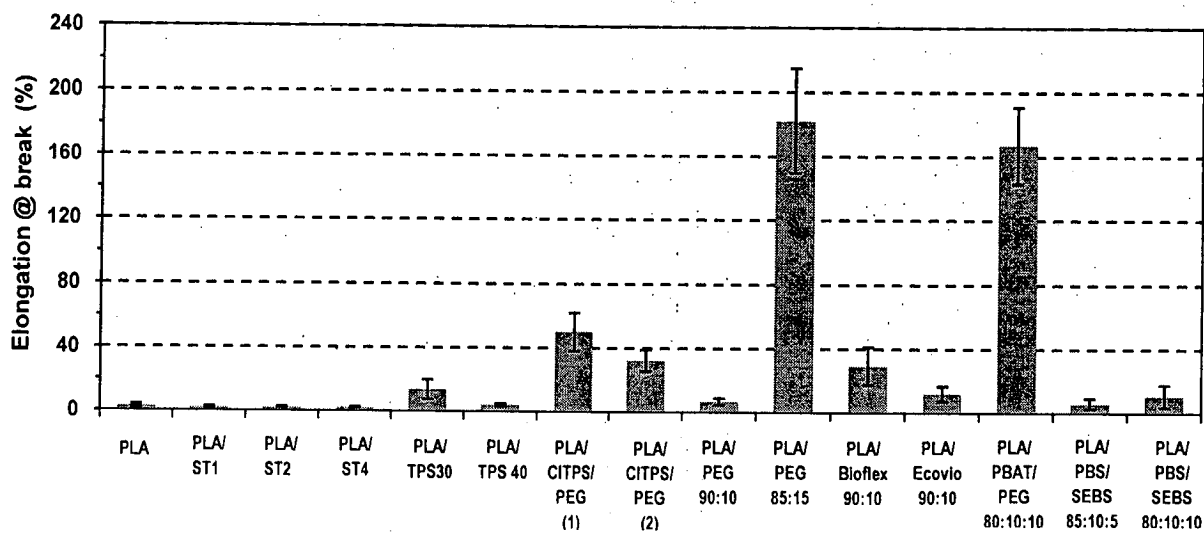
สำหรับคอมพาวนด์ที่สามารถขึ้นรูปด้วยการเป่าได้นั้น ฟิล์มที่ได้ถูกนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล รูปที่ 4.33 แสดงค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มสูตรต่างๆ ค่ามอดูลัสของยังของ PLA ที่มีองค์ประกอบของแป้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัด ฟิล์มยังคงมีความแข็งเกร็งสูง (Rigidity, Young's Modulus ประมาณ 2,000 MPa) ต้องออกแรงดึงมากกว่าพอลิเอทิลีนจึงเสียรูปได้ (Young's Modulus ของ LDPE ประมาณ 20 MPa) เมื่อเปลี่ยนแป้งให้อยู่ในรูปของเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์มจากคอมพาวนด์ที่ได้ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลในเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกเหมือนกับ PEG ที่ช่วยในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA ทำให้ฟิล์มมีความแข็งเกร็งลดลง

ในกรณีของฟิล์มจากคอมพาวนด์ระหว่าง PLA กับพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ชนิดอื่น ๆ ค่ามอดูลัสของยังของฟิล์ม PLA ที่คอมพาวนด์ด้วย Bioflex และ Ecovio มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Bioflex และ Ecovio เป็นพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีส่วนผสมของ PLA ทำให้เมื่อผสม Bioflex และ Ecovio เข้าไป จึงเป็นการเพิ่มความแข็งเกร็งในฟิล์ม ในขณะที่ฟิล์มจากคอมพาวนด์ PLA กับ PBAT ซึ่งเป็นพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ที่มีความยืดหยุ่นสูง แสดงค่ามอดูลัสของยังลดลงถึงครึ่งหนึ่ง เมื่อเทียบกับค่าของฟิล์ม PLA อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของ PBAT สูงเกินไป การแยกวัฏภาคเกิดขึ้น ทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ยกต่อการขึ้นรูปด้วยการเป่าสูง เมื่อทำคอมพาวนด์ PLA กับ PBS และ SEBS ค่ามอดูลัสของยังสูงขึ้นอย่างชัดเจน และเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ SEBS ทั้งนี้อาจเป็นผลจากสไตรีนที่เป็นองค์ประกอบใน SEBS และมีวงอะโรมาติกในสายโซ่ จึงทำให้ฟิล์มสามารถต้านทานแรงดึงได้มากขึ้น



รูปที่ 4.33 มอดูลัสของยัง (Young's modulus, MPa) ของฟิล์ม PLA, PLA กับแป้ง (PLA/ST1), PLA กับแป้งตัดแปรด้วย GPMS (PLA/ST2), PLA กับแป้งตัดแปรด้วย CPMS (PLA/ST4), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช 70:30 (PLA/TPS30), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช 60:40 (PLA/TPS40), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วย CPMS 75:15:10 (PLA/CITPS/PEG (1)), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วย CPMS 70:25:5 (PLA/CITPS/PEG (2)), PLA/PEG 90:10, PLA/PEG 85:15, PLA/Bioflex 90:10, PLA/Ecovio 90:10, PLA/PBAT/PEG 80:10:10, PLA/PBS/SEBS 85:10:5 และ PLA/PBS/SEBS 80:10:10

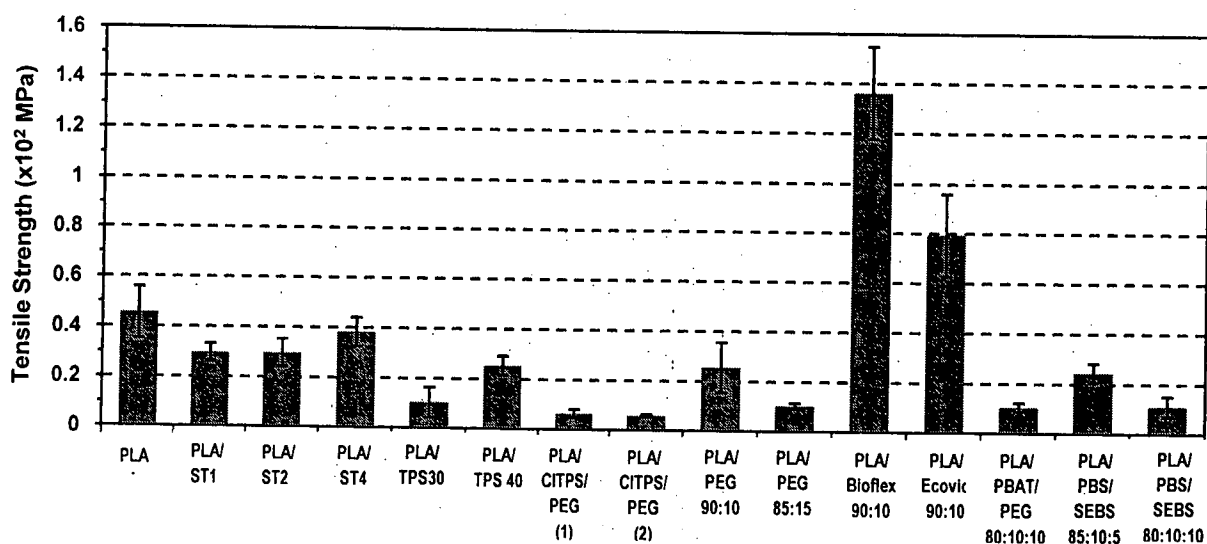
เมื่อพิจารณาค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.34) พลาสติก PLA ซึ่งมีความเปราะ สามารถถูกดึงยืดได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีน (Elongation @ break ของ LDPE ประมาณ 500-600%) แผ่นฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช (PLA/TPS30) นั้น สามารถยืดตัวได้มากกว่าฟิล์มของ PLA ประมาณ 4 เท่า แต่เมื่อเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชมีปริมาณเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 40 (PLA/TPS40) แผ่นฟิล์มที่ได้ยืดตัวได้ต่ำอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณแป้งในคอมพาวนด์มีมากขึ้น ซึ่งแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีสถานภาพคล้ายยาง (rubbery state) ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA สำหรับฟิล์มจากคอมพาวนด์ที่มีเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชตัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน CPMS ฟิล์มที่เตรียมได้นั้นถูกดึงยืดได้มากกว่าฟิล์มจากคอมพาวนด์ที่มีเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ถูกตัดแปรอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้จะเป็นผลจากความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ระหว่าง PLA กับแป้งที่ถูกตัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน CPMS รวมทั้งกลีเซอรอลและ PEG ที่ช่วยเสริมความยืดหยุ่นของฟิล์มปริมาณของ PEG ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกในฟิล์ม PLA มีอิทธิพลต่อค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดอย่างชัดเจน โดยค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ PEG เพิ่มขึ้น กรณีของการเติม PBAT ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 160% ใกล้เคียงกับฟิล์มจากคอมพาวนด์ของ PLA/PEG 85/15 ซึ่งมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงถึง 180% ในกรณีของคอมพาวนด์ที่มีองค์ประกอบของ Bioflex และ Ecovio นั้น Bioflex และ Ecovio ช่วยปรับปรุงความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA ได้ โดยฟิล์มของคอมพาวนด์ที่มีองค์ประกอบของ Bioflex และ Ecovio ถูกดึงยืดได้ใกล้เคียงกับฟิล์มของคอมพาวนด์ที่ผสมเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช นอกจากนั้น PBS และ SEBS ที่ผสมในคอมพาวนด์ ก็ช่วยเพิ่มความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเช่นกัน



รูปที่ 4.34 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break, %) ของฟิล์ม PLA, PLA กับแป้ง (PLA/ST1), PLA กับแป้งตัดแปรด้วย GPMS (PLA/ST2), PLA กับแป้งตัดแปรด้วย CPMS (PLA/ST4), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช 70:30 (PLA/TPS30), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช 60:40 (PLA/TPS40), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วย CPMS 75:15:10 (PLA/CITPS/PEG (1)), PLA กับเทอร์มอพลาสติกสตาร์ชที่ตัดแปรด้วย CPMS 70:25:5 ขึ้นรูประดับอุตสาหกรรม (PLA/CITPS/PEG (2)), PLA/PEG 90:10, PLA/PEG 85:15, PLA/Bioflex 90:10, PLA/Ecovio 90:10, PLA/PBAT/PEG 80:10:10, PLA/PBS/SEBS 85:10:5 และ PLA/PBS/SEBS 80:10:10

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงสูงสุดของฟิล์ม เราพบว่าฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA กับแป้งที่ไม่ตัดแปรและแป้งที่ตัดแปรด้วย GPMS มีค่าลดลง (รูปที่ 4.35) ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการแยกชั้นระหว่างแป้งและ PLA แต่เมื่อเตรียมฟิล์มจากคอมพาวนด์ของ PLA กับแป้งที่ตัดแปรด้วย CPMS ซึ่งมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ความแข็งแรงสูงสุดของฟิล์มที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มของ PLA (ค่าความแข็งแรงสูงสุดของ PLA 45 MPa) ซึ่งมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนเกือบสองเท่า (ค่าความแข็งแรงสูงสุดของพอลิเอทิลีน 20 MPa) สำหรับฟิล์มของคอมพาวนด์ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช PEG และ PBAT นั้น ค่าความแข็งแรงสูงสุดของฟิล์มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องมาจากองค์ประกอบเหล่านี้เอื้อต่อการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เมื่อออกแรงดึงให้ฟิล์มยืดจนขาด จึงใช้แรงน้อยลง เมื่อนำ Bioflex และ Ecovio มาคอมพาวนด์กับ PLA ค่าความแข็งแรงสูงสุดของฟิล์มคอมพาวนด์ที่ได้ถูกปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 2-3 เท่า ฟิล์มที่ได้มีความแข็งแรงสูงมาก ทนต่อแรงดึงได้สูงก่อนจะขาด

ดังนั้นหากมีวัตถุประสงค์ในการผลิตฟิล์มจาก PLA ให้มีความแข็งแรงหรือความยืดหยุ่นสูง การคอมพาวนด์ข้างต้นจึงเป็นอีกหนทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาฟิล์มของ PLA

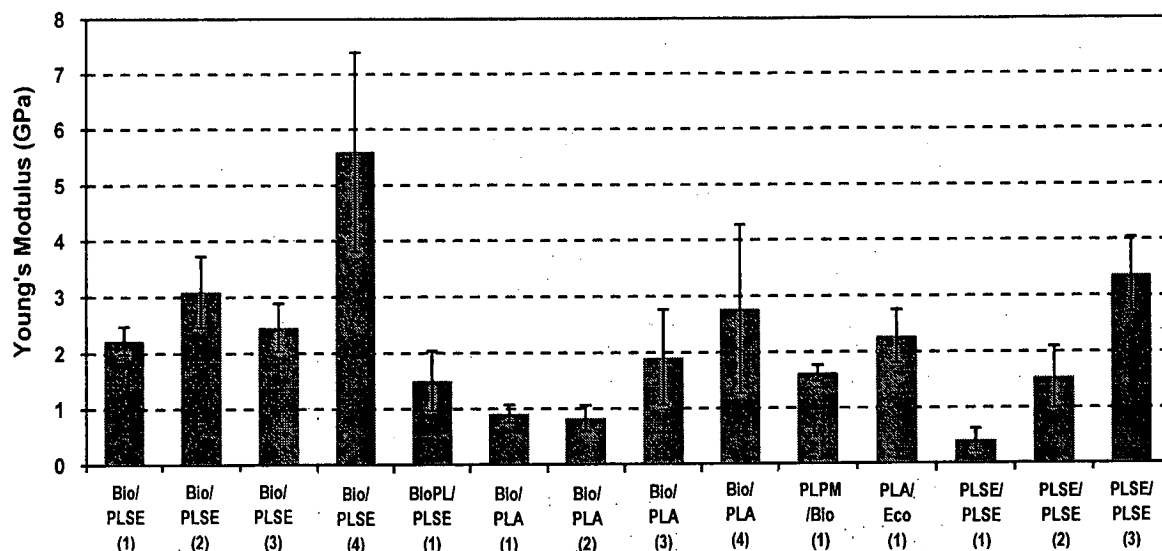


รูปที่ 4.35 ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength, MPa) ของฟิล์ม PLA, PLA กับสตาร์ช (PLA/ST1), PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย GPMS (PLA/ST2), PLA กับสตาร์ชตัดแปรด้วย CPMS (PLA/ST4), PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช 70:30 (PLA/TPS30), PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช 60:40 (PLA/TPS40), PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่ตัดแปรด้วย CPMS 75:15:10 (PLA/CITPS/PEG (1)), PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรชที่ตัดแปรด้วย CPMS 70:25:5 ขึ้นรูประดับอุตสาหกรรม (PLA/CITPS/PEG (2)), PLA/PEG 90:10, PLA/PEG 85:15, PLA/Bioflex 90:10, PLA/Ecovio 90:10, PLA/PBAT/PEG 80:10:10, PLA/PBS/SEBS 85:10:5 และ PLA/PBS/SEBS 80:10:10

be expected.

increased. For multi-branched high molecular weight PDLA, the ultimate goal of sc-PLA can when the core molecules are relatively long polymer chains, the crystallization will be much polymerization of PLLA and PDLA on the multi-branched core molecules. It is expected that Chapter 5 considers the use of catalysts to enhance the degree of

### 2.7.2 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพาวนด์พอลิแล็กติกแอซิดแบบ multi-layer



รูปที่ 4.36 มอดุลัสของยัง (Young's modulus, MPa) ของฟิล์ม PLA แบบ multi-layer ด้วยเครื่องอัดรีดที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 30 mm และเครื่องอัดรีดที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 20 mm มีดังนี้:

ชั้นที่ 1 : Bioflex, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 95:5 (Bio/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 20, 20 rpm (1), 10, 30 rpm (2), 10, 25 rpm (3) และ 20, 10 rpm (4)

ชั้นที่ 1 : Bioflex/PLA, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 95:5 (BioPL/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 20, 20 rpm (1)

ชั้นที่ 1 : Bioflex, ชั้นที่ 2 : PLA ด้วยอัตราเร็ว 10, 30 rpm (1), 50, 30 rpm (2), 20, 20 rpm (3) และ 20, 10 rpm (4)

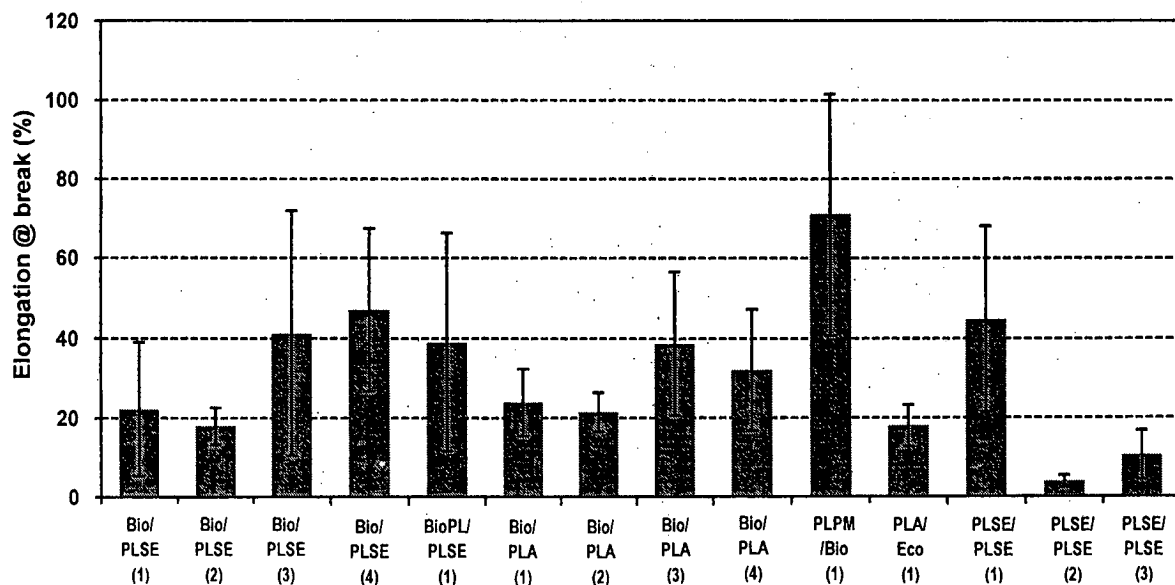
ชั้นที่ 1 : PLA/POM 95:5, ชั้นที่ 2 : Bioflex (PLPM/Bio) ด้วยอัตราเร็ว 20, 10 rpm (1)

ชั้นที่ 1 : PLA, ชั้นที่ 2 : Ecovio (PLA/Eco) ด้วยอัตราเร็ว 20, 10 rpm (1)

ชั้นที่ 1 คือ PLA/SEBS 99:1, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 90:10 (PLSE/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 5, 30 rpm (1), 5, 20 rpm (2) และ 10, 20 rpm (3)

ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มแบบ multi-layer นอกจากการศึกษาชนิดของพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้และสารเติมแต่งอื่นๆ แล้ว ผู้วิจัยได้ศึกษาสภาวะในการขึ้นรูปของฟิล์มอีกด้วย อันได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของสกรู และเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูในเครื่องอัด เมื่อพิจารณาฟิล์มแบบ multi-layer ของ Bioflex/PLA/SEBS (1) ถึง (4) เราพบว่าค่ามอดุลัสของยังสูงกว่า ฟิล์ม PLA แบบ single-layer (ประมาณ 2 GPa) ทั้งนี้เพราะฟิล์มมีองค์ประกอบของ Bioflex ซึ่งมีความแข็งแรงเหมือน PLA แต่ยืดหยุ่นกว่า และ SEBS ที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับ PLA ผลของ Bioflex ต่อค่ามอดุลัสของยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Bio/PLSE (1) กับ (4) (อัตราเร็วของสกรูของชั้น PLA/SEBS น้อยกว่าชั้น Bioflex) อย่างไรก็ตาม การผสม POM และ Ecovio ไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสของยัง ดังแสดงผลใกล้เคียงกับฟิล์ม PLA แบบ single layer คือ ประมาณ 2 GPa ทั้งนี้เนื่องมาจากความแข็งเกร็ง (Rigidity) ของ POM และ Ecovio กรณีของฟิล์มของ Bioflex/PLA แบบ multi-layer ค่ามอดุลัสของยังของฟิล์มนี้เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ Bioflex เพิ่มขึ้น (Bio/PLA (1-4)) เช่นเดียวกับฟิล์ม Bioflex/PLA/SEBS (1) ถึง (4) สำหรับฟิล์มของ PLA/SEBS แบบ multi-layer (PLSE/PLSE (1-3)) ค่ามอดุลัสของยังของฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของ PLA ที่มีปริมาณมากขึ้นในฟิล์ม (อัตราเร็วของสกรูของชั้น PLA/SEBS 99:1 สูงขึ้นจาก 5 เป็น 10 rpm)

เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของแข็งของฟิล์มแบบ multi-layer และแบบ single layer พบว่าฟิล์มแบบ multi-layer โดยส่วนใหญ่มีค่ามอดูลัสของแข็งสูงกว่าเล็กน้อย ยกเว้นกรณีของฟิล์มแบบ single layer ของ PLA/Ecovio 90:10 และ PLA/Bioflex 90:10 ที่มีค่ามอดูลัสของแข็งสูงกว่า คือ 7-10 GPa



รูปที่ 4.37 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (Elongation at break, %) ของฟิล์ม PLA แบบ multi-layer ด้วยเครื่องอัดรีดที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 30 mm และเครื่องอัดรีดที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 20 mm มีดังนี้:

ชั้นที่ 1 : Bioflex, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 95:5 (Bio/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 20, 20 rpm (1), 10, 30 rpm (2), 10, 25 rpm (3) และ 20, 10 rpm (4)

ชั้นที่ 1 : Bioflex/PLA, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 95:5 (BioPL/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 20, 20 rpm (1)

ชั้นที่ 1 : Bioflex, ชั้นที่ 2 : PLA ด้วยอัตราเร็ว 10, 30 rpm (1), 50, 30 rpm (2), 20, 20 rpm (3) และ 20, 10 rpm (4)

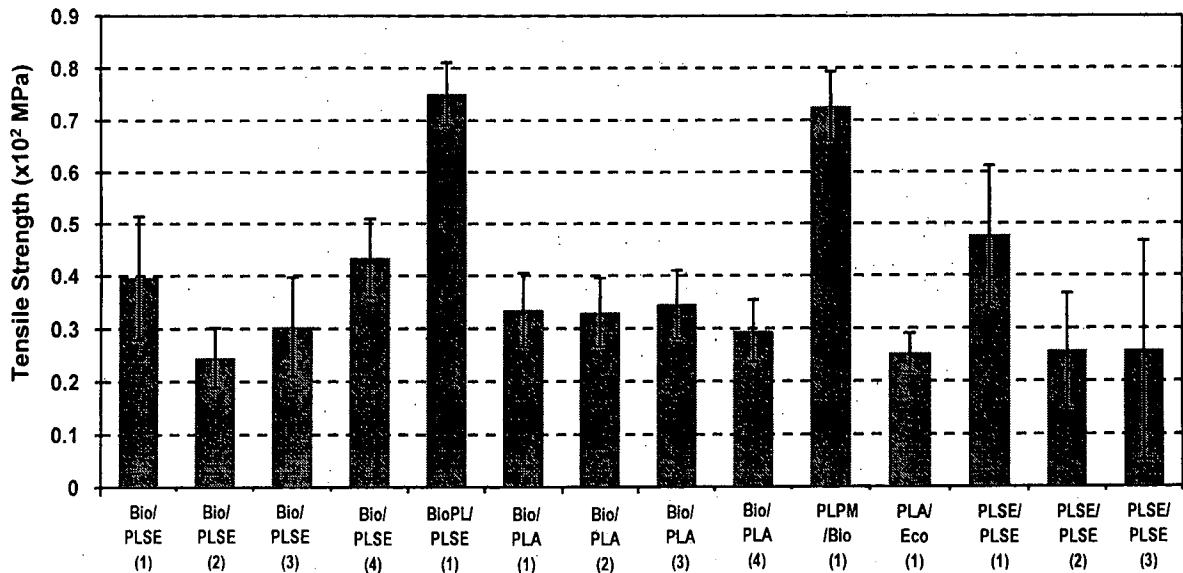
ชั้นที่ 1 : PLA/POM 95:5, ชั้นที่ 2 : Bioflex (PLPM/Bio) ด้วยอัตราเร็ว 20, 10 rpm (1)

ชั้นที่ 1 : PLA, ชั้นที่ 2 : Ecovio (PLA/Eco) ด้วยอัตราเร็ว 20, 10 rpm (1)

ชั้นที่ 1 คือ PLA/SEBS 99:1, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 90:10 (PLSE/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 5, 30 rpm (1), 5, 20 rpm (2) และ 10, 20 rpm (3)

ฟิล์มแบบ multi-layer ส่วนใหญ่ถูกดึงยืดออกได้มากกว่าฟิล์มแบบ single layer โดยส่วนใหญ่มีค่า Elongation at break ของฟิล์มแบบ multi-layer อยู่ที่ประมาณ 20-70% ในขณะที่ % Elongation at break ของฟิล์มแบบ single layer มีค่าประมาณ 3-10% ยกเว้นกรณีของฟิล์ม PLA/CITPS/PEG (1), PLA/PEG 85:15 และ PLA/PBAT/PEG 80:10:10 ที่มีค่า % Elongation at break ของฟิล์ม เท่ากับ 45%, 180% และ 165% ตามลำดับ (รูปที่ 4.34 และ 4.37) ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์ม multi-layer มีองค์ประกอบของเรซินที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่า PLA โดยเฉพาะฟิล์ม PLPM/Bio (1) ที่มีองค์ประกอบของ Bioflex และ POM ซึ่งมีค่า % Elongation at break ของฟิล์มประมาณ 70%

อย่างไรก็ตามสูตรของฟิล์มที่มีค่า % Elongation at break สูงที่สุดคือ PLA/PBAT/PEG 80:10:10 แบบ single layer



รูปที่ 4.38 ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Tensile strength, MPa) ของฟิล์ม PLA แบบ *multi-layer* ด้วยเครื่องอัดรีด เครื่องที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 30 mm และเครื่องที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 20 mm มีดังนี้:

ชั้นที่ 1 : Bioflex, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 95:5 (Bio/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 20, 20 rpm (1), 10, 30 rpm (2), 10, 25 rpm (3) และ 20, 10 rpm (4)

ชั้นที่ 1 : Bioflex/PLA, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 95:5 (BioPL/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 20, 20 rpm (1)

ชั้นที่ 1 : Bioflex, ชั้นที่ 2 : PLA ด้วยอัตราเร็ว 10, 30 rpm (1), 50, 30 rpm (2), 20, 20 rpm (3) และ 20, 10 rpm (4)

ชั้นที่ 1 : PLA/POM 95:5, ชั้นที่ 2 : Bioflex (PLPM/Bio) ด้วยอัตราเร็ว 20, 10 rpm (1)

ชั้นที่ 1 : PLA, ชั้นที่ 2 : Ecovio (PLA/Eco) ด้วยอัตราเร็ว 20, 10 rpm (1)

ชั้นที่ 1 คือ PLA/SEBS 99:1, ชั้นที่ 2 : PLA/SEBS 90:10 (PLSE/PLSE) ด้วยอัตราเร็ว 5, 30 rpm (1), 5, 20 rpm (2) และ 10, 20 rpm (3)

ฟิล์มแบบ *multi-layer* ส่วนใหญ่มีค่าความแข็งแรงสูงสุด ประมาณ 0.4 MPa การเติม Bioflex ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดลดลงเล็กน้อย การเพิ่มปริมาณ PLA ของ BioPL/PLSE (1) และเติม POM (PLPM/Bio (1)) ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.7-0.8 MPa เนื่องจาก PLA และ POM มีค่าความแข็งแรงสูง

ค่าความแข็งแรงสูงสุดของฟิล์มแบบ *multi-layer* โดยรวมแล้วมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด ของ *single layer* ฟิล์มแบบ *single layer* ที่ไม่มีสตาบิลไรเซอร์เป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่จะค่าความแข็งแรงสูงสุดจะต่ำกว่า 0.4 MPa ยกเว้นกรณีที่มีการเติม Ecovio และ Bioflex

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงทั้งหมดที่ได้ศึกษา เราพบว่าฟิล์มแบบ *single layer* มีสมบัติเชิงกลดีกว่าฟิล์มแบบ *multi-layer* กล่าวคือ ฟิล์มแบบ *single layer* ของ PLA/Ecovio 90:10 และ PLA/Bioflex 90:10 มีค่ามอดูลัสของยัง และค่า Tensile strength อยู่ในช่วง 8-10 GPa และ 80-135 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มแบบ *multi-layer* ของ Bio/PLSE (4) มีค่ามอดูลัสของยังและค่า Tensile strength อยู่ที่ 5.5 GPa และ 75 MPa ตามลำดับ

สำหรับ %Elongation @ break ของฟิล์มแบบ *single layer* ของ PLA/PEG 85:15 มีค่าประมาณ 170% ในขณะที่ฟิล์มแบบ *multi-layer* ของ PLPM/Bio (1) มีค่าประมาณ 70%

อย่างไรก็ตามแต่ละสูตรคอมพาวด์ที่ได้ศึกษานั้น มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ฟิล์มที่ต้องการความแข็งแรงสูง ไม่ต้องการความยืดหยุ่น ฟิล์มของ PLA/Bioflex 90:10 หรือ ฟิล์มของ Bio/PLSE (4) แบบ *multi-layer* ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีกว่าฟิล์มของ PLA/PEG 85:15 เป็นต้น

## 2.8. การศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านแผ่นฟิล์มคอมพาวนด์

โดยทั่วไป PLA มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ปานกลาง ทำให้ไม่เหมาะกับการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สุญญากาศ อาทิเช่น ถุงข้าวสาร ซึ่งปัจจุบันได้ผลิตจากพอลิเอทิลีนและไนลอน โดยการขึ้นรูปแบบ multi-layer ถุงพลาสติกเหล่านี้สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดี แต่อย่างไรก็ตามถุงพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาสูตรคอมพาวนด์ของ PLA กับสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านได้ของก๊าซออกซิเจนของ PLA อย่างต่อเนื่อง โดยมีวัตถุประสงค์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สุญญากาศที่มีพื้นฐานเป็น PLA ที่สามารถนำไปใช้แทนบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กันในปัจจุบัน

ตารางที่ 2 แสดงค่าการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มที่ได้จากคอมพาวนด์และถุงพลาสติกตัวอย่าง ผลการทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส แสดงให้เห็นว่าก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านฟิล์มของ PLA ได้สูงมาก อันเป็นผลมาจากความเป็นอสัณฐานของฟิล์ม PLA ฟิล์มจากคอมพาวนด์ของ PLA กับ PEG มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น นั่นคือ สายโซ่ของ PLA สามารถเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบแน่นอนหนามากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนยังคงมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มถุงข้าวสาร สำหรับฟิล์ม PLA/CITPS 75:25 ซึ่งถูกขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรม การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าต่ำกว่าขีดความสามารถของเครื่องที่จะทำการตรวจวัดได้ นั่นหมายถึง ฟิล์มสูตรนี้มีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สายโซ่ของอะไมโลสในแป้งซึ่งเป็นองค์ประกอบของฟิล์มมีการจัดเรียงตัวในระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสตาρχให้เป็นเทอร์มอพลาสติกสตาร์ช จึงทำให้ก๊าซออกซิเจนไม่สามารถซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้<sup>o</sup>

ตารางที่ 2 ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์มแบบต่างๆ

ฟิล์มจากคอมพาวนด์	ค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (cc/m <sup>2</sup> day)
PLA	17465.98 ± 1403.78
PLA/PEG 90:10	16643.00 ± 1157.37
PLA/PEG 85:15	16600.52 ± 2684.76
PLA/CITPS 75:25 (ขึ้นรูปจากโรงงานอุตสาหกรรม)	N/A* (<50)
RICE BAG (LDPE/NYLON 6)	485.67 ± 19.14

\*N/A: Not available

## 2.9. การคำนวณราคาของวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอมพาวด์ของพอลิแล็กติกเอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์

เนื่องจากราคาของ PLA มีราคาสูงกว่าพลาสติกทั่วไปที่ตั้งที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งเป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการนำ PLA มาใช้แทนพลาสติกทั่วไป การคอมพาวด์ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดราคาต้นทุนการผลิตถุงพลาสติกแตกสลายทางชีวภาพได้ ให้สามารถแข่งขันกับพลาสติกทั่วไปตามท้องตลาดได้

ตารางที่ 3 แสดงราคาต้นทุนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอมพาวด์ของพอลิแล็กติกเอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ เราพบว่าคอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ช่วยทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ใช้ ถ้าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ถูกเติมลงไปมากขึ้น ต้นทุนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตจะยิ่งลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการดัดแปรสตาโรซ์ด้วยสารประกอบไซเลน ต้นทุนการผลิตไม่สามารถลดลงได้เนื่องจากสารประกอบไซเลนมีราคาค่อนข้างสูง (ราคาของสารประกอบไซเลนประมาณ 9,000 บาท/ลิตร) แต่ลักษณะของฟิล์มที่ได้จะเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ากรณีของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์มันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปร

ตารางที่ 3 ราคาต้นทุนของวัสดุที่ใช้ในการผลิตคอมพาวด์ของพอลิแล็กติกเอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์

วัสดุ	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
PLA	150.00
Ecovio	240.00
สตาโรซ์	20.00
กลีเซอรอล	50.00
เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์	25.05
เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ดัดแปรดัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน	900.00
คอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ 90:10	137.50
คอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ 75:25	118.75
คอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ 50:50	87.50
คอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ดัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน 90:10	225.00
คอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ดัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน 75:25	337.50
คอมพาวด์ของ PLA กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ที่ดัดแปรด้วยสารประกอบไซเลน 50:50	525.00