

การขึ้นรูปและวิเคราะห์วัสดุผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต

Compression molding and characterization of poly(lactic acid)  
and poly(butylene succinate) composites

ปริญญานิพนธ์

ของ

อนันต์ สรสิทธิ์ 55010310161

วิษุฒม์ อรัญเสน 55010310451

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม





คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเห็นสมควร  
รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตของ  
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สดสาคร อินธิเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ)

มหาวิทยาลัยมหาสารคามได้อนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีรพัฒน์ ชมภูคำ)

หัวหน้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ อาจารย์ที่  
ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ อย่างดียิ่ง

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป  
อาจารย์ผู้ควบคุมสอบปริญญานิพนธ์

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุตสาคร อินธิเดช กรรมการ  
สอบปริญญานิพนธ์

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยมหาสารคามและคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่  
ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเรื่องงบประมาณค่าใช้จ่ายและสถานที่ในการจัดทำปริญญานิพนธ์นี้

อนันต์ สรสิทธิ์

วิษณุวัฒน์ อรัญเสน



|                  |                                                                              |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง       | การขึ้นรูปและวิเคราะห์วัสดุผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต |
| ผู้วิจัย         | นายอนันต์ สรสิทธิ์<br>นายวิษุทธิ์ อธิฐาน                                     |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ                                           |
| ปริญญา           | วศ.บ. สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต                                               |
| มหาวิทยาลัย      | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2559                                         |

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาผลของกระบวนการผสมพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS ) และสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุลกับพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) โดยการนำเอาพลาสติก (PLA) มาผสมกับพลาสติก PBS (10, 30 และ 50 เปอร์เซ็นต์) และสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล 0, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ โดยกระบวนการผสมถูกทำในเครื่องผสมภายในและหลังจากนั้นถูกตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติกแล้วทำการฉีดพลาสติกเข้าในแม่พิมพ์ด้วยเครื่องฉีดพลาสติก จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณพลาสติก (PBS) ที่นำมาผสมกับพลาสติก (PLA) จะเพิ่มค่าระยะยืดให้กับพลาสติก (PLA) แต่จะลดค่า Young's Modulus และความต้านทานแรงดึงของพลาสติก PLA นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุลจาก 0, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ จะเพิ่มค่าระยะยืดให้กับพลาสติก PLA มากขึ้นและจะลดค่า Young's Modulus และความต้านทานแรงดึงของพลาสติก PLA มากขึ้นด้วย และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติก PBS กับสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุลทำให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของ PLA และพลังงานในการหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลง



**TITLE** Compression Molding and Characterization of Poly Lactic Acid  
and Poly Butylene Succinate Composites

**AUTHOR** Mr. Anan Sorasit  
Mr. Wichayut Aranyasen

**ADVISOR** Asst.Prof.Yottha Srithep, Ph.D

**DEGREE** B.Eng. (Manufacturing Engineering)

**UNIVERSITY** Mahasarakham University **YEAR** 2016

### Abstract

This senior project aimed to study the effects of the poly butylene succinate (PBS) and chain extender on the mechanical and thermal properties of poly lactic acid (PLA). Melt blending of PLA, PBS (10, 30 and 50%) and chain extender (0, 2 and 4%) was performed in an internal mixer. The blended materials were cut by cutting machine and then injection moulded. It was found that increasing the PBS content increased their elongation at break but decreased young's modulus and tensile strength of the PLA/PBS. Moreover, increasing the chain extender content from 0 to 4% increased the elongation at break and tensile strength of PLA. Beside, when PBS and chain extender increased, the melt point of PLA and energy in the melting decreased



## สารบัญ

| บทที่                                                       | หน้า |
|-------------------------------------------------------------|------|
| 1 บทนำ .....                                                | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....                            | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....                           | 1    |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา .....                                    | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....                         | 2    |
| 1.5 สถานที่ดำเนินการศึกษา .....                             | 2    |
| 1.6 แผนการดำเนินการศึกษา .....                              | 3    |
| 1.7 งบประมาณ .....                                          | 3    |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                       | 4    |
| 2.1 พลาสติกชีวภาพ .....                                     | 4    |
| 2.2 พลาสติก PLA หรือ Polylactic-acid .....                  | 5    |
| 2.2.1 การสังเคราะห์โพลิแลกติกแอซิด .....                    | 5    |
| 2.2.2 ความสำคัญและประโยชน์กรดแลกติก .....                   | 6    |
| 2.2.3 สมบัติของโพลิแลกติกแอซิด .....                        | 6    |
| 2.2.4 การย่อยสลายของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA .....          | 7    |
| 2.2.5 การนำไปใช้ประโยชน์ของโพลิแลกติกแอซิด .....            | 8    |
| 2.3 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylenesuccinate: PBS) ..... | 10   |
| 2.4 การทดสอบการดึงด้วยเครื่อง (Tensile Testing) .....       | 12   |
| 2.4.1 สมบัติแรงดึงของพลาสติก (ASTM D638) .....              | 13   |
| 2.4.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแผ่นพลาสติก .....              | 14   |
| 2.5 เครื่อง Thermo gravimetric Analysis (TGA) 4000) .....   | 15   |
| 2.5.1 สิ่งที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ออกมาได้ .....           | 15   |
| 2.6 เครื่อง DSC .....                                       | 16   |
| 2.7 กล้อง Polarized Microscope .....                        | 19   |
| 2.8 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) .....        | 20   |



## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                                                                                                      | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3 วิธีดำเนินการศึกษา .....                                                                                 | 22   |
| 3.1 การผสมพอลิเมอร์ที่ลื่นซัคซิเนตและสารช่วยยืดยืดสายโซ่ต่อ<br>พอลิแล็กติกแอซิดคอมโพสิตพลาสติก .....       | 22   |
| 3.1.1 วัสดุ .....                                                                                          | 22   |
| 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....                                                                           | 22   |
| 3.2 การเตรียมวัตถุดิบ .....                                                                                | 23   |
| 3.2.1 เครื่องอบไล่ความชื้น .....                                                                           | 23   |
| 3.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก .....                                                                             | 23   |
| 3.2.3 เครื่องผสมพลาสติก (Extruder) .....                                                                   | 24   |
| 3.2.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก .....                                                                          | 25   |
| 3.2.5 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding) .....                                                          | 26   |
| 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ Tensile Testing .....                                                                  | 26   |
| 3.3.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาทดสอบ<br>หาค่าคุณสมบัติทางกลต่างๆ .....                              | 26   |
| 3.4 ขั้นตอนการทดสอบTGA (Thermo Gravimetric Analysis) .....                                                 | 26   |
| 3.4.1 การทดสอบ TGA (Thermo Gravimetric Analysis)<br>โดยมีขั้นตอนการทำได้ดังนี้ .....                       | 26   |
| 3.5 ขั้นตอนการทดสอบ DSC (Differential scanning colorimeter) .....                                          | 26   |
| 3.5.1 การทดสอบ DSC (Differential scanning colorimeter)<br>มีขั้นตอนดังนี้ .....                            | 26   |
| 3.6 ขั้นตอนการทดสอบดูโครงสร้างของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์<br>(Polarized Microscope) .....                    | 27   |
| 3.6.1 ขั้นตอนการดูโครงสร้างของผลึกมีดังนี้ .....                                                           | 27   |
| 3.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ PLA ผสม PBS โดยใช้กล้องส่องอิเล็กตรอน SEM<br>(Scanning Electron Microscopy) ..... | 28   |



สารบัญ (ต่อ)

| บทที่                                               | หน้า |
|-----------------------------------------------------|------|
| 4 ผลการศึกษางานวิจัย .....                          | 29   |
| 4.1 การศึกษาการทดสอบแรงดึง .....                    | 29   |
| 4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อน .....                 | 34   |
| 4.2.1 การทดสอบทางความร้อนด้วยวิธี                   |      |
| Thermo Gravimetric Analysis (TGA) .....             | 34   |
| 4.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี        |      |
| Differential Scanning Calorimeter (DSC) .....       | 37   |
| 4.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์        |      |
| ผสมระหว่าง PLA และ PBS .....                        | 42   |
| 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....                 | 46   |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย .....                            | 46   |
| 5.1.1 ผลของการผสมและฉีดพลาสติก .....                | 46   |
| 5.1.2 ผลการทดสอบเชิงกล Tensile testing .....        | 46   |
| 5.1.3 ผลทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี TGA ..... | 46   |
| 5.1.4 ผลทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี DSC ..... | 46   |
| 5.1.5 ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา .....          | 47   |
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรค .....                           | 47   |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ .....                                | 47   |
| บรรณานุกรม .....                                    | 48   |
| ประวัติย่อผู้วิจัย .....                            | 51   |



## บัญชีตาราง

| ตาราง                                                                          | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ตารางขอบเขตการศึกษา .....                                                    | 2    |
| 2 ตารางแผนการดำเนินการศึกษาภาคเรียนที่ 1/2558และ 2/2558 .....                  | 3    |
| 3 ตาราง ข้อดีและข้อเสียของพลาสติกชีวภาพ (Polylactic-acid,Bioplastic) .....     | 9    |
| 4 ตาราง ข้อดีและข้อเสียพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylenesuccinate: PBS) ..... | 11   |



## บัญชีภาพประกอบ

| ภาพประกอบ                                                                                   | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพ .....                                                           | 4    |
| 2 การย่อยสลายได้ของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA .....                                           | 8    |
| 3 การย่อยสลายได้ของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PBS .....                                           | 10   |
| 4 ภาพลักษณะการดึงของเครื่อง Tensile ตอนที่ดึงขึ้นงานทดสอบ .....                             | 12   |
| 5 ภาพชิ้นงานที่นำมาทดสอบการดึงของเครื่อง Tensile Testing .....                              | 12   |
| 6 การทดสอบแรงดึงของแผ่นพลาสติกมาตรฐาน ASTM D638 .....                                       | 13   |
| 7 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบแผ่นก่อนและหลังการทดสอบ .....                                        | 14   |
| 8 ลักษณะของเครื่อง TGA4000 ที่นำมาใช้ทดสอบชิ้นงาน .....                                     | 15   |
| 9 กราฟเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA .....                                        | 16   |
| 10 หลักการทำงานของเครื่อง DSC .....                                                         | 17   |
| 11 กล้องจุลทรรศน์ Polarized Microscope .....                                                | 19   |
| 12 เครื่อง Scanning Electron Microscopy .....                                               | 20   |
| 13 หลักการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscopy .....                                | 21   |
| 14 เครื่องอบไล่ความชื้น .....                                                               | 23   |
| 15 เครื่องชั่งดิจิตอล .....                                                                 | 23   |
| 16 เครื่องผสม Extruder .....                                                                | 24   |
| 17 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก .....                                                              | 24   |
| 18 เครื่องฉีดพลาสติก Injection Molding .....                                                | 25   |
| 19 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานและการดึงชิ้นงาน .....                                   | 25   |
| 20 เครื่อง TGA .....                                                                        | 26   |
| 21 เครื่อง DSC .....                                                                        | 27   |
| 22 การดูโครงสร้างของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ Polarized Microscope .....                       | 27   |
| 23 การเตรียมชิ้นงานก่อนการส่องกล้องอิเล็กตรอน SEM .....                                     | 28   |
| 24 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ PLA ผสมยาง โดยใช้กล้องส่องอิเล็กตรอน SEM .....                      | 28   |
| 25 กราฟ Elongation at break (%) ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend<br>ที่อัตราส่วนต่างๆ ..... | 29   |



## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

### ภาพประกอบ

### หน้า

|                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 26 กราฟ Elongation at break (%) ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่ปริมาณ PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4% ..... | 30 |
| 27 กราฟค่า Young's modulus ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ .....                                                                                 | 31 |
| 28 กราฟค่า Young's modulus ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่ปริมาณ PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4% .....      | 31 |
| 29 กราฟค่า Tensile strength ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ .....                                                                                | 32 |
| 30 กราฟค่า Tensile strength ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่ปริมาณ PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender .....                             | 33 |
| 31 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS ที่ปริมาณ 10%, 30% และ 50% .....                                                                                         | 35 |
| 32 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS10% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยChain extender 4% .....                                                            | 35 |
| 33 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS30% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยChain extender 4% .....                                                            | 36 |
| 34 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS50%และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยChain extender 4% .....                                                             | 36 |
| 35 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 10% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ0%, 2% และ 4% .....       | 38 |
| 36 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 30% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ0%, 2% และ 4% .....       | 39 |
| 37 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ0%, 2% และ 4% .....       | 40 |



## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ                                                                                        | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 38 SEM ของการแตกหักของ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วน                                               |      |
| (a) PLA (b) PBS (c) 90/10 (d) 70/30 (e) 50/50 .....                                              | 41   |
| 39 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากเครื่อง Injection molding ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ .....              | 42   |
| 40 SEM ของการแตกหักของ PLA/PBS/C blends ที่อัตราส่วน                                             |      |
| (a) (88/10/2) (b) (68/30/2) (c) (48/50/2) .....                                                  | 43   |
| 41 SEM ของการแตกหักของ PLA/PBS/C blends ที่อัตราส่วน                                             |      |
| (a) (86/10/4) (b) (66/30/4) (c) (46/50/4) .....                                                  | 44   |
| 42 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 10%, 30% และ 50% ..... | 45   |



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันปริมาณการใช้งานพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพอลิเมอร์สังเคราะห์ในกลุ่มพลาสติกโดยมีข้อดีคือ น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมีต่าง ๆ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้นำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ หรือเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆได้อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราการผลิตและการใช้งานพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดขยะพลาสติกและปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากความคงทนต่อสภาวะแวดล้อมของพลาสติกและไม่สามารถย่อยสลาย ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาดังกล่าวคือ การใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) หรือพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ปัจจุบัน (PLA) และ (PBS) มีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้น แต่ข้อเสียของพลาสติกทั้งสองชนิดคือ มีราคาแพง และเสื่อมสภาพทางความร้อนได้ง่ายจากกระบวนการผลิต นอกจากนี้ (PLA) มีลักษณะแข็งเปราะขณะที่ (PBS) มีการยึดตัวที่ดี ดังนั้นการปรับปรุงการใช้งาน (PLA) และ (PBS) จึงเป็นที่น่าสนใจโดยการผลิตพลาสติกทั้งสองชนิดได้จากแหล่งวัตถุดิบทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาลเช่น ข้าวโพดมันสำปะหลังหรืออ้อยที่นิยมนำใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์อย่างแพร่หลายเช่นถ้วยจานขวดบรรจุน้ำดื่มเป็นต้นและสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเดียวกันกับพลาสติกจากวัตถุดิบปิโตรเลียมเช่นการอัดรีด (extrusion) แม่พิมพ์แบบฉีด (injection molding) และกระบวนการอัด (compression) เป็นต้นแต่พอลิ (แลกติกแอซิด) มีข้อจำกัดในเรื่องของคุณสมบัติความเปราะ (brittle) หรือมีค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ต่ำดังนั้นพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ที่มีความทนทานต่อแรงกระแทกและสามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิ (แลกติกแอซิด) ได้มาผสมจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิ (แลกติกแอซิด) ให้มีความเหนียว (toughness) และสามารถทนต่อแรงกระแทกได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงต่างๆได้เพิ่มขึ้น
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนของ และสัณฐานวิทยา
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลของพลาสติก PLA กับพลาสติก PBS
- 1.2.4 เพื่อศึกษาโครงสร้างของพลาสติก PLA ที่ผสมกับพลาสติก PBS



### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

ตาราง 1 ขอบเขตการศึกษา

| ลำดับที่ | พลาสติก PLA | พลาสติก PBS | Chain Extender |
|----------|-------------|-------------|----------------|
| 1        | 100%        | -           | -              |
| 2        | 90%         | 10%         | -              |
| 3        | 70%         | 30%         | -              |
| 4        | 50%         | 50%         | -              |
| 5        | 88%         | 10%         | 2%             |
| 6        | 68%         | 30%         | 2%             |
| 7        | 48%         | 50%         | 2%             |
| 8        | 86%         | 10%         | 4%             |
| 9        | 66%         | 30%         | 4%             |
| 10       | 46%         | 50%         | 4%             |
| 11       | -           | 100%        | -              |

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 พลาสติก (PLA) กับพลาสติก (PBS) และ Chain Extender เมื่อผสมกันแล้วมีคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น

1.4.2 สามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.4.3 เป็นการสร้างวัสดุที่มีคุณสมบัติใหม่ขึ้นมาเพื่อรองรับความต้องการของมนุษย์ในปัจจุบัน

### 1.5 สถานที่ดำเนินการศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

อาคารปฏิบัติการคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



## 1.6 แผนการดำเนินการศึกษา

ตาราง 2 แผนการดำเนินการศึกษาภาคเรียนที่ 1/2558 และ 2/2558

| รายการ                                |  | ระยะเวลาดำเนินงาน |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---------------------------------------|--|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                                       |  | ส.ค.              | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| 1. หาข้อมูล-ค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัย  |  | ↔                 |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 2. ศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนการทำงานวิจัย |  |                   |      | ↔    |      |      |      |      |       |       |
| 3. ทำการทดลองและทดสอบ                 |  |                   |      |      | ↔    |      |      |      |       |       |
| 4. ผลการทดลอง                         |  |                   |      |      |      |      | ↔    |      |       |       |
| 5. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล           |  |                   |      |      |      |      |      | ↔    |       |       |
| 6. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์           |  |                   |      |      |      |      |      |      | ↔     |       |

## 1.7 งบประมาณ

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 1.7.1 ค่าพลาสติก PBS         | 2500 บาท  |
| 1.7.2 สารเคมีพลาสติก PLA     | 1000 บาท  |
| 1.7.3 ค่าเครื่องมือวิเคราะห์ | 3500 บาท  |
| 1.7.4 ค่าวัสดุสำหรับการทดลอง | 3000 บาท  |
| รวม                          | 10000 บาท |



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ซึ่งสามารถปลูกหมุนเวียนและทดแทนกันได้โดยใช้ระยะเวลาอันสั้น อาทิเช่น น้ำตาลจากข้าวโพด มันสำปะหลัง หรืออ้อย เป็นต้น หรืออาจจะผลิตจากปิโตรเคมี (Petrobase) ก็ได้โดยมีทั้งคุณสมบัติที่ย่อยสลายตัวได้ และย่อยสลายตัวไม่ได้ทางชีวภาพ ทั้งนี้จากกระแสอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ประกอบกับความพยายามที่จะลดการพึ่งพิงการใช้พลังงานน้ำมันจากฟอสซิลที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบจากชีวมวลและสามารถย่อยสลายได้เป็นที่สนใจและน่าจับตามอง โดยเม็ดพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบชีวมวลและย่อยสลายได้ที่ถูกใช้ไปขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกมากที่สุดคือ Polylactic Acid (PLA) โดยมีสัดส่วนการผลิตสูงถึงร้อยละ 45.1 ของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากชีวมวลที่ย่อยสลายทางชีวภาพทั้งหมดลำดับถัดมาคือ Biodegradable starch blend และ Polyhydroxyalkanoate (PHA) โดยมีสัดส่วนการผลิตอยู่ที่ร้อยละ 38.4 และร้อยละ 8.1 ของเม็ดพลาสติกชีวภาพจากชีวมวล ที่ย่อยสลายทางชีวภาพทั้งหมด



ภาพประกอบ 1 ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพ



## 2.2 พลาสติก PLA หรือ Polylactic-acid

พลาสติก PLA เนื่องจากเป็นวัสดุที่เกิดจากผลผลิตธรรมชาติ จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ง่าย พลาสติก PLA มีวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต PLA ได้แก่พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และ มันสำปะหลัง โดยผ่านกระบวนการผลิตที่จะเริ่มจากการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล และใช้กระบวนการ fermentation ด้วยแบคทีเรียได้เป็น lactic acid และนำ lactic acid ที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น polymer ที่เป็นสายยาวที่เรียกว่า polylactic acid ซึ่ง PLA มีคุณสมบัติพิเศษคือมีความใสไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน

### 2.2.1 การสังเคราะห์โพลีแลคติกแอซิด

D - และ L- มีชื่อว่า PDLA และ PLLA ตามลำดับ โพลีเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนผสมทั้ง D - และ L- ในโครงสร้างเรียกว่า Poly(DL-lactide) หรือ PDLLA เป็นโพลีเมอร์แบบสัณฐานที่มีหมู่เมทิล(Methyl group) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนพบว่า PLLA และ PDLA มีสมบัติเชิงกล เช่น การทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสและสมบัติทางความร้อนสูงกว่า PDLLA แต่ PDLLA มีเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดสูง และสามารถย่อยสลายได้ภายในเวลาที่รวดเร็วกว่าโพลีเมอร์ อัตราส่วนของ Dแลคติกแอซิด นี้มีผลต่อคุณสมบัติของ PLA คือจุดหลอมเหลว และระดับการตกผลึก (Martin and Averous, 2001) ซึ่งโพลีเมอร์ของกรดแลคติกหรือโพลีแลคติกแอซิดสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่ายโดยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ กระบวนการผลิตโพลีแลคติกแอซิด เริ่มต้นจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ โดยการปลูกพืชผลิตแป้งซึ่งใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และนำวัตถุดิบ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ แสงของพืชได้ ผลผลิตเป็นแป้ง จากนั้นจึงนำเอาแป้งมาผ่านกระบวนการหมักโดยใช้ จุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลขนาดใหญ่ ของแป้งและน้ำตาลเป็นกรดแลคติกซึ่งใช้เป็นโมโนเมอร์ ในขั้นตอนการสังเคราะห์ โพลีเมอร์ ที่สามารถสังเคราะห์ได้โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 กระบวนการที่แตกต่างกันถึงแม้ว่าโพลีเมอร์ที่ผลิตได้จากทั้งสองกระบวนการนี้จะมีโครงสร้างและสมบัติต่างๆเหมือนกันทุกประการ แต่ก็มีรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการสังเคราะห์ ที่ต่างกัน จึงเป็นที่มาของการเรียกชื่อโพลีเมอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ ที่ได้จากกระบวนการแรกมักจะเรียกว่า โพลีแลคติกแอซิด เนื่องจากกระบวนการนี้เริ่มต้นจากการใช้กรดแลคติกโดยตรงจนได้ โพลีเมอร์ในขั้นตอนสุดท้าย ในกระบวนการที่สองจะมีการเปลี่ยนกรดแลคติก โดยปฏิกิริยาการรวมตัวของกรดแลคติก 2 โมเลกุล แล้วเกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่มีชื่อว่าแลคไทด์ก่อน จากนั้นจึงนำเอาวงแหวนแลคไทด์นี้มาสังเคราะห์เป็นสายโซ่ยาวโพลีเมอร์ในขั้นตอนต่อมา ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชื่อผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ จากกระบวนการนี้ว่า



โพลีแลคไทด์ อย่างไรก็ตาม โพลีเมอร์ที่ได้จากทั้งสองกระบวนการก็ คือสารชนิดเดียวกันนั่นเอง ซึ่งเมื่อสังเคราะห์ได้แล้วก็สามารถนำมาขึ้นรูปเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

### 2.2.2 ความสำคัญและประโยชน์ของกรดแลคติก

กรดแลคติกถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายชนิด ได้แก่ ในอุตสาหกรรมอาหาร มีการนำกรดแลคติกมาใช้ในการปรับความเป็นกรด-ด่างของอาหาร และเติมแต่งกลิ่นของอาหาร เป็นบัฟเฟอร์ หรือใช้ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากกรดแลคติกให้รสเปรี้ยวเล็กน้อย ไม่มีกลิ่นรุนแรงเกลิอของกรดแลคติก เช่น โซเดียมแลคเตท และโพแทสเซียมแลคเตทมีรสเค็มเล็กน้อย และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นกลางจึงนิยมเติมในอาหารแปรรูปประเภทเนื้อไก่และอาหารทะเล เพื่อยืดอายุการเก็บ แคลเซียมแลคเตทเป็นสารที่นิยมเติมในเครื่องดื่มนมและเครื่องดื่มน้ำผลไม้เสริมแคลเซียม และเร็วกว่าการให้พลังงานของกลูโคสประมาณ 2-10 เท่า นอกจากนี้กรดแลคติกยังสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตทางเคมีและชีวภาพของการผลิตกรดอินทรีย์ตัวอื่นๆ เช่น กรดโพรพิโอนิกกรดอะซิติก และกรดอะซิโกลอนพันธุ์ของกรดแลคติกก็ สามารถใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมการย้อมผ้า การชุบโลหะ ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตยากำจัดวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา และยาฆ่าแมลง ใช้เป็นส่วนผสมของแลคเกอร์และสารโพลีเมอร์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากยาง ใช้ในการพิมพ์สีผ้า และกระดาษ การย้อมสีผ้าช่วยทำให้เกิดความเงางามของผ้าไหมและผ้าไหมสังเคราะห์

### 2.2.3 สมบัติของโพลีแลคติกแอซิด

แนวโน้มการผลิต และการใช้งานพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) ในอนาคตอันใกล้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่มุ่งเน้นการผลิตและการใช้งานพลาสติกที่ย่อยสลายได้ในกระบวนการหมัก (Compostable plastics) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 1-3 เดือน พร้อมกับเศษอาหารภายในโรงหมักขยะอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อม ทำให้เราสามารถกำจัดขยะบรรจุภัณฑ์ เศษอาหารและขยะอินทรีย์อื่นๆ ได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถใช้ทำปุ๋ยผสม ปรับสภาพดิน ทำให้ดินร่วนซุยสำหรับการเพาะปลูกพืชและผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งผลิตผลทางการเกษตรส่วนหนึ่งสามารถนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยโพลีแลคติกแอซิดมีลักษณะใส และมีความแวววาวสูงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ PLA มีสมบัติทางกลและสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับโพลีเมอร์ พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถกักเก็บกลิ่นและรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แ



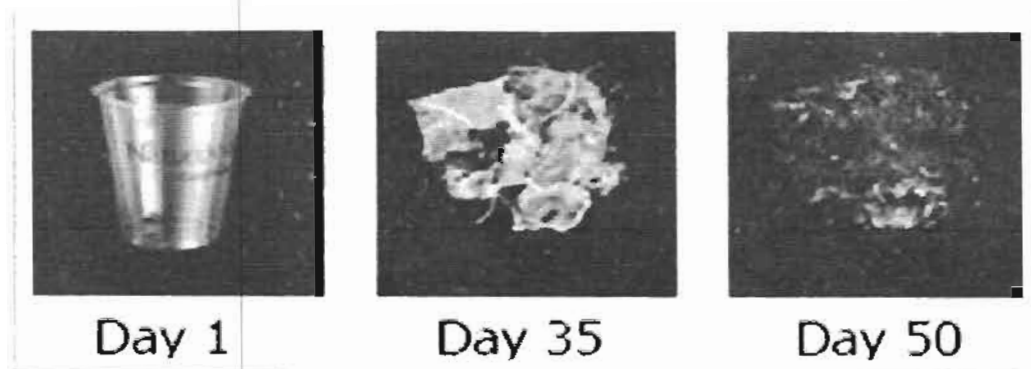
เสริมสร้างพลาสติกมีความแข็ง ความคงทนต่อการกระแทกและความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ PET นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ PS และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ polyethylene (PE) หรือ polypropylene (PP) ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกโอเลฟิน ที่ผลิตจากกระบวนการทางปิโตรเคมี (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2550) ภาพที่ 2 แสดงการผลิตและการสลายโพลีแลคติกแอซิด

นอกจากนี้ PLA ยังมีคุณสมบัติจุดหลอมเหลวสูงถึง 180 องศาเซลเซียส และมีความโปร่งแสงสูงจึงมีการพัฒนานำ PLA มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อบรรจุอาหาร ซึ่งมีข้อได้เปรียบในทางการค้าเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์อาหารแบบเดิมที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี เนื่องจากโพลิเมอร์ของกรดแลคติกสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีความปลอดภัยสำหรับการบรรจุอาหาร พันธะเอสเทอร์ของ PLA สามารถทำสลายได้ง่ายด้วยเอนไซม์ protease proteinase K bromelain ficin esterase และ trypsin หรือการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ *Fusariummoniliforme* *Penicilliumrequesfortii* (Torres et al, 1996) *Amycolatopsis* (Pranamuda et al, 1997) และ *Bacillusbrevis* (Tomita et al, 1999) เป็นต้น จากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ PLA เป็นที่ต้องการในตลาดขณะนี้และมีแนวโน้มว่าจะมีความต้องการเพิ่มมากขึ้นในอนาคต แต่ ข้อจำกัดทางการค้าของ PLA คือราคาที่ยังสูงอยู่ในปัจจุบันดังนั้นถ้าสามารถใช้วัตถุดิบหรือใช้ทางการเกษตรราคาถูกเป็นสับสเตรทสำหรับกระบวนการหมักเพื่อผลิตกรดแลคติกได้ก็จะสามารถลดต้นทุนการผลิต PLA ได้

#### 2.2.4 การย่อยสลายได้ของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA

โพลีแลคติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่จะไม่ ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิ Tg ใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ และกรดแลคติกโดยการไฮโดรไลซิสซึ่งเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแลคติกที่ได้จะถูกย่อยสลายต่อไปโดยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่อยู่ในธรรมชาติไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและมวลชีวภาพ การย่อยสลายของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA ในภาพประกอบ 2





ภาพประกอบ 2 การย่อยสลายได้ของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA

#### 2.2.5 การนำไปใช้ประโยชน์ของโพลีแลคติกแอซิด

PLA เป็นโพลีเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆ หลายด้าน ได้แก่ ด้านการแพทย์ เนื่องจาก PLA เป็นโพลีเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (biological system) ในร่างกาย จึงทำให้ PLA เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์ มานาน เช่น ไหมเย็บแผล ตัวเย็บแผล วัสดุปิดแผล อุปกรณ์ฝังในร่างกาย อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ยตามช่วงเวลาที่กำหนด ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่องโฟม फिल्मสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก ตัวเคลือบภาชนะกระดาษ ด้านเส้นใยและแผ่นผ้าแบบ non-woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้าและเครื่องนุ่งห่ม เส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก แผ่นรองพื้นและอุปกรณ์ตกแต่งภายใน ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์ แผ่นซีดี อื่นๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาษสารยึดติด ห่อพลาสติกชั่วคราว



ตาราง 3 ข้อดีและข้อเสีย ของพลาสติกชีวภาพ (Polylactic-acid,Bioplastic)

| ข้อดีของพลาสติก PLA                                                                                                                                                                      | ข้อเสียของพลาสติก PLA                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. มีลักษณะใสและเงา ชิ้นงานที่ออกมามีลักษณะ<br>กึ่งใส คล้ายแก้ว และมีความเงากว่า จึงเหมาะ<br>ชิ้นงานพวกโมเดล หรือ วัตถุที่ต้องการความเงา                                                 | 1. ไม่แข็งแรงเปราะง่าย ไม่ทนต่อแรงบิด ถัด<br>หรือบิดพลาสติก ABS จะเริ่มงอแล้วค่อยขาด แต่<br>PLA จะหักได้เลยทันที (คุณสมบัติคล้ายแก้ว) |
| 2. ความแข็งในระดับที่พอเหมาะ เนื่องจาก<br>คุณสมบัติคล้ายๆกับแก้ว คือ แข็ง จึงเหมาะกับ<br>ชิ้นงานที่ต้องการความแข็ง แต่ต้องระวังให้ดี<br>เนื่องจากไม่ทนต่อ การบิด และการดึง               | 2. ทนความร้อนได้น้อยกว่า เนื่องจากมี Glass<br>Transition(สถานะที่มีคุณสมบัติกึ่งของแข็ง-<br>ของเหลว) ที่ 60-65 องศาเท่านั้น           |
| 3. กลิ่นเป็นมิตร มีหลอมละลายจะมีกลิ่นอ่อนๆ<br>เนื่องจากเป็นส่วนประกอบจากธรรมชาติ กลิ่นจึง<br>ไม่เหมือนพลาสติกโดยทั่วไป                                                                   | 3. เปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายๆ จากไปไว้ในที่อุณหภูมิสูง<br>ไม่ควรเก็บไว้ในรถหรือใกล้เครื่องทำความร้อน                                      |
| 4. ชิ้นงานสวยกว่า เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่<br>180-220 องศา น้ำพลาสติกที่ออกจากหัวฉีดนั้น<br>จะมีความหนืดน้อยกว่า PLA ทำให้เกิดชิ้นงานที่มี<br>ความคมมากกว่า เก็บรายละเอียดดีกว่า    | 4. ย่อยสลายได้ง่ายกว่า เนื่องจากเป็นวัสดุหลัก<br>จากธรรมชาติ จึงย่อยสลายได้ง่ายกว่า ไม่เหมาะ<br>อย่างยิ่งที่จะเอาไปใช้งานตากแดด       |
| 5. ใช้งานง่ายกว่า ขึ้นรูปง่ายกว่า เนื่องจากจุด<br>หลอมเหลวต่ำ และไม่ต้องใช้แผ่นรองความร้อน<br>ขึ้นรูปและเย็นตัวเร็วกว่า                                                                  | 5. ขึ้นการผลิตมีราคาสูง และเกิดกระบวนการ<br>hydrolysis ได้ง่าย                                                                        |
| 6. ย่อยสลายง่ายเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ย่อย<br>สลายกลายเป็นปุ๋ยหมักได้ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อ<br>เกษตรเป็นอย่างมาก, นำกลับมาRecycleใหม่ได้<br>และที่สำคัญลดสภาวะโลกร้อนและสภาวะเรือน<br>กระจก |                                                                                                                                       |



### 2.3 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylenesuccinate: PBS)

พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นพลาสติกที่ใช้กรดซัคซินิก (Succinic Acid) และ 1,4 บิวเทนไดออล (1,4 Butanediol) เป็นสารตั้งต้นผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นกลายเป็นพอลิเอสเตอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง โดยที่พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) มีลักษณะทางกายภาพเป็นเรซินสีขาวขุ่น มีความยืดหยุ่น (flexibility) และความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สูงสามารถทนความร้อนได้สูง รวมทั้งสามารถย่อยสลายได้ดีกว่ากรดพอลิแลคติก (Poly-Lactic Acid: PLA) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นที่สำคัญอย่างมาก การนำ PBS ไปใช้งานแทนที่พลาสติกที่ใช้อยู่ทั่วไป เช่น ในอุตสาหกรรมเกษตร มีการนำไปผลิตเป็นฟิล์มคลุมดิน กระถางต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มหรือปลดปล่อยยาฆ่าแมลงฆ่าวัชพืช เป็นต้น หรือในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์จะเน้นผลิตภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง เช่น ฟิล์มเคลือบแก้ว กระดาษ หรือขวดน้ำฟิล์มบรรจุภัณฑ์และอาหาร เป็นต้น เห็นได้ชัดว่าพลาสติก (PBS) ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพราะเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ดีซึ่งในประเทศไทยก็ได้เริ่มมีโครงการเกาะเสม็ดเป็นจุดเริ่มต้นของกลุ่มบริษัทปตท. (PTT) ในการใช้ถุงพลาสติกชีวภาพชนิด PBS ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกโดยมีร้านค้าเข้าร่วมถึง 60 ร้านค้า ซึ่งคาดว่าจะลดปริมาณขยะได้ปีละกว่า 700 ตัน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ปีละ 4,800 ตัน



ภาพประกอบ 3 การย่อยสลายได้ของบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก PBS



ตาราง 4 ข้อดีและข้อเสียพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylenesuccinate: PBS)

| ข้อดีของพลาสติก PBS                                                                                                                            | ข้อเสียของพลาสติก PBS                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. PBS สามารถย่อยสลายกลายเป็นผงธุลีได้ภายใน 2 – 3 เดือนในสภาวะแวดล้อมปกติ                                                                      | 1. ย่อยสลายได้ง่าย เนื่องจากเป็นวัสดุหลักจากธรรมชาติจึงย่อยสลายได้ง่ายจึงไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะเอาไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง |
| 2. PBS สามารถนำไปผสมกับพลาสติกชนิดต่างๆ เพื่อผลิตเป็นสิ่งของเครื่องใช้ในครัวเรือนได้เพราะมีคุณสมบัติทนความร้อนจึงเหมาะในการใช้เคลือบแก้วกระดาด | 2. ความแข็งแรงน้อย เมื่อนำไปขึ้นรูปจะมีลักษณะขุ่น นิ่ม เหนียว ทนความร้อนได้ไม่เกิน 80 องศา                                 |
| 3. PBS ปลอดภัยที่จะใช้เป็นภาชนะใส่อาหาร รวมถึงช้อนส้อม แบบใช้แล้วทิ้ง                                                                          | 3. ย่อยสลายได้ง่าย เนื่องจากเป็นวัสดุหลักจากธรรมชาติ จึงย่อยสลายได้ง่ายกว่า ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะเอาไปใช้งานตากแดด      |
| 4. PBS สามารถย่อยสลายได้ในน้ำ จึงช่วยลดขยะสะสมในแหล่งน้ำ                                                                                       | 4. ขั้นตอนการผลิตมีราคาสูง สิ้นเปลืองพลังงาน                                                                               |
| 5. การใช้ PBS จะช่วยลดปริมาณขยะในหลุมฝังกลบ ซึ่งปัจจุบันเป็นขยะพลาสติกถึง 20% (โดยปริมาตร)                                                     |                                                                                                                            |

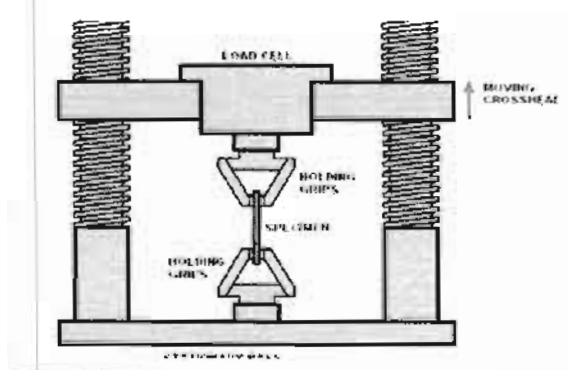
- พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybutylenesuccinate) เป็นพลาสติกที่มีความพิเศษคือ เป็นทั้ง Biodegradable plastic และ Compostable plastic มีลักษณะขุ่น นิ่ม เหนียว ทนความร้อนได้สูงกว่า 80 องศาและสามารถย่อยสลายได้ที่อุณหภูมิห้องหากมีเชื้อจุลินทรีย์อยู่ ภายในระยะเวลา 3 – 6 เดือน ขึ้นกับความหนาของผลิตภัณฑ์ เหมาะสำหรับผลิตชิ้นงานอาทิ ฟิล์ม ชิ้นงานฉีด (Injection molding) และชิ้นงานแบบรีด (Extrusion)

- โพลีแลคติกแอซิด (Polylactic Acid) เป็นพลาสติกประเภท Compostable plastic มีลักษณะใส แข็ง เปราะ ทนความร้อนได้ไม่เกิน 60 องศาโดยปกติแล้วเมื่อตั้งทิ้งไว้ไม่สามารถย่อยสลายได้ แต่จะสามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลา 6 เดือนใน Composting facility โดยถ้าชิ้นงานมีความหนาขึ้นอาจจะใช้เวลามากกว่านี้

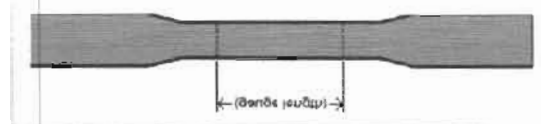


## 2.4 การทดสอบการดึงด้วยเครื่อง (Tensile Testing)

การทดสอบแรงดึง (tension test หรือ tensile test) คือ วิธีการทดสอบเพื่อหาความเค้นดึงและเนื้อสัมผัส (texture analysis) โดยใช้แรงดึง (tensile force) ดึงวัสดุอย่างช้าๆ ทำให้วัสดุจะยืดยาวขึ้นอาจให้แรงดึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดแล้วบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึง (tensile- stress) กับความเครียดตามแนวดึง (tensile strain) แสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟเรียกว่ากราฟความเค้นกับความเครียด (stress-strain curve) หรือ แรงดึงกับระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) ซึ่งเป็นระยะที่วัสดุยืดตัวออกจากระยะเดิมการทดสอบเนื้อสัมผัสแบบการทดสอบแรงดึง (tensile test) และการทดสอบแรงอัด (compression test) ที่ใช้แรงประเภทเดียวกันคือเป็นแรงตรง (Direct Load) กระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดต่างกันที่การทดสอบแรงดึงใช้หาการค่าการยืดตัวการทดสอบแรงกดหาการหดตัว ดังภาพประกอบ4 และตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ ดังภาพประกอบ5



ภาพประกอบ 4 ภาพลักษณะการดึงของเครื่อง Tensile ตอนที่ดึงชิ้นงานทดสอบ

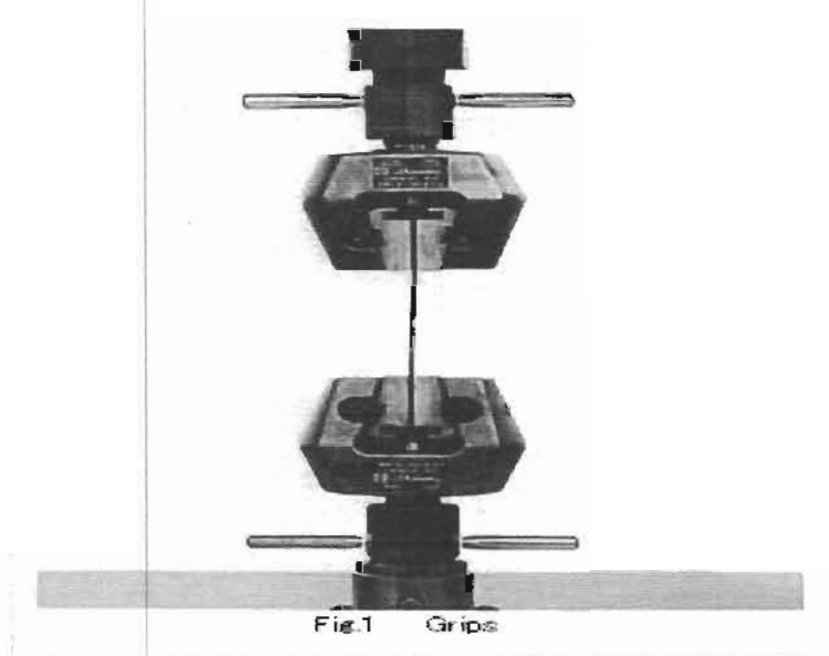


ภาพประกอบ 5 ภาพชิ้นงานที่นำมาทดสอบการดึงของเครื่อง Tensile Testing



#### 2.4.1 สมบัติแรงดึงของพลาสติก (ASTM D638)

ส่วนนี้ของมาตรฐาน ASTM,D638 ระบุสภาวะสำหรับการหาสมบัติแรงดึงของพลาสติกและพลาสติกเสริมแรง โดยใช้ชิ้นงานรูปทรงดัมเบลล์ (Types I – V), แท่งหรือท่อทรงกระบอก สมบัติแรงดึงเหล่านี้ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเครียดที่จุดแตกหักและมอดูลัส สมบัติทางกลของพลาสติกสามารถเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารตัวเติมบางประเภทเข้าไปในพลาสติก เช่น ความแข็งแรง การยืดตัวและความเหนียว เช่นเดียวกับวัสดุหลายประเภท จะต้องมีการใช้ extensometer ในการวัดค่าความเครียดได้อย่างถูกต้อง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพลาสติกมักจะประกอบด้วยส่วนของอีลาสติกแบบเชิงเส้นและส่วนของพลาสติกแบบไม่เป็นเชิงเส้น บริเวณส่วนของเชิงเส้นนั้นจะเกิดขึ้นที่ค่าความเครียดต่ำมากและเนื่องจากค่ามอดูลัสจะตรวจวัดได้ในบริเวณนี้การใช้ extensometer, ที่มีความละเอียดสูงจึงมีความจำเป็นโดยส่วนใหญ่แล้ว extensometer นี้จะมีระยะการวัดที่จำกัดและจะต้องมีการถอดออกจากชิ้นงานในระหว่างการทดสอบด้วยแต่ extensometer แบบไร้สัมผัสเช่น Advanced Video Extensometer(AVE) หรือ Standard Video Extensometer(SVE), จะมีความละเอียดและความยืดหยุ่นในการตรวจวัดค่ามอดูลัสและความเครียดที่จุดแตกหักสำหรับพลาสติกเกือบทุกประเภท นอกจากนี้เรายังแนะนำให้ใช้ mechanical, wedge, grips หรือ pneumatic side-acting grips สำหรับการจับยึดชิ้นงานในการทดสอบนี้

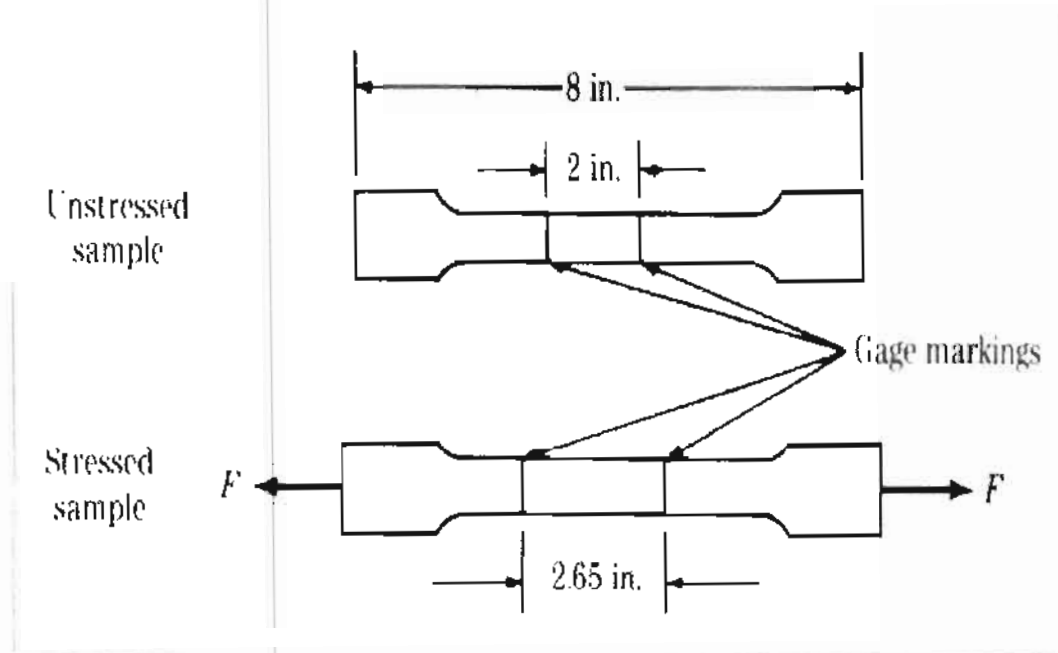


ภาพประกอบ 6 การทดสอบแรงดึงของแผ่นพลาสติกมาตรฐาน ASTM D638



### 2.4.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแผ่นพลาสติก

ความเครียด (strain) เมื่อแผ่นพลาสติกหรือโลหะที่ทดสอบได้รับแรงดึงในทางเดียวดังแสดงในภาพที่ 9 เป็นเหตุให้แท่งโลหะเกิดการยืดออกในทิศทางของแรงนั้นการเคลื่อนนี้จะเรียกว่า ความเครียด(strain),โดยนิยามความเครียดเป็นการยืดอันเนื่องจากแรงดึงทางเดียวที่กระทำกับชิ้นทดสอบซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวของชิ้นทดสอบในทิศทางของแรงนั้นเทียบกับความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ดังนั้นก่อนทำการทดสอบต้องวัดพื้นที่หน้าตัดและระยะทดสอบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ โดยระยะทดสอบเริ่มต้นจะทำการเป็นเครื่องหมายสองจุดบนชิ้นทดสอบอุปกรณ์วัดการยืดหรือความเครียดจะใช้ในการวัดระยะยืดของชิ้น ทดสอบในระหว่างการทดสอบหรืออาจวัดจากผลต่างของระยะห่างของสองจุดข้างต้น ผลต่างระหว่างระยะทดสอบเริ่มต้นกับสุดท้ายเรียกว่าระยะยืด (elongation),หน่วยของระยะยืดใช้เป็นนิ้วหรือมิลลิเมตรและถ้านำค่าระยะยืดหารด้วยระยะทดสอบเริ่มต้นเรียกว่าความเครียด ดังนั้นความเครียดของแท่งโลหะดังแสดงในภาพประกอบ 9

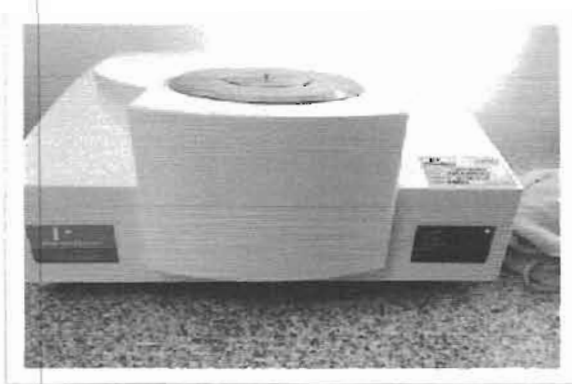


ภาพประกอบ 7 แสดงชิ้นงานทดสอบแรงดึงแบบแผ่นก่อนและหลังการทดสอบ



## 2.5 เครื่อง Thermo gravimetric Analysis (TGA) 4000

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุโดยเฉพาะพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องซึ่งมีความไวสูงเทคนิคนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนเฟส การแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันหรือปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องซึ่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูงโดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีความว่องไวเช่น อากาศหรือออกซิเจนโดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลายหรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ



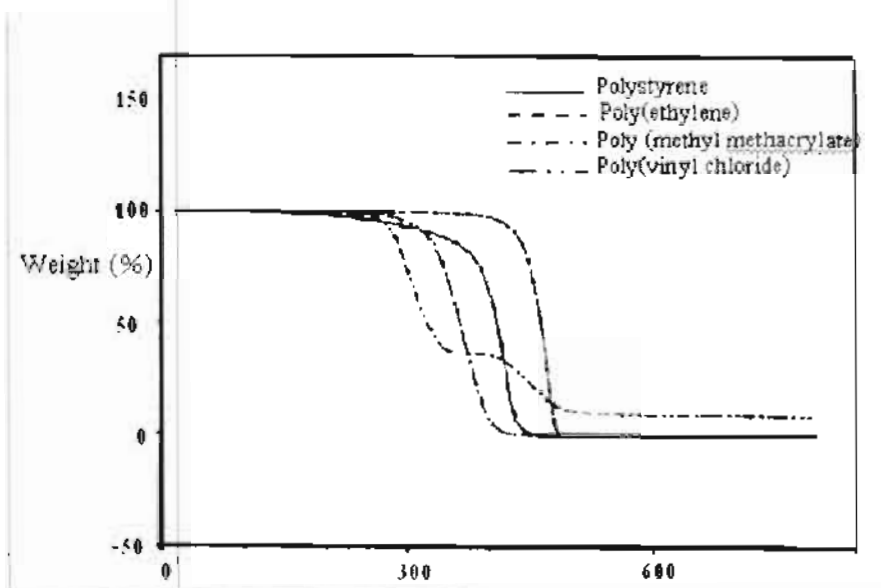
ภาพประกอบ 8 ลักษณะของเครื่อง TGA4000 ที่นำมาใช้ทดสอบชิ้นงาน

### 2.5.1 สิ่งที่เครื่องสามารถวิเคราะห์ออกมาได้

- 2.5.1.1 วิเคราะห์ปริมาณสารเติมแต่งในพลาสติกหรือผลิตภัณฑ์พลาสติก
- 2.5.1.2 วิเคราะห์ปริมาณน้ำหรือปริมาณตัวทำละลายในสีกาว เป็นต้น
- 2.5.1.3 วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบต่างๆของผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณสารเติมแต่ง
- 2.5.1.4 ใช้ประยุกต์ในการวิเคราะห์หา Moisture, inorganic residue ในผลิตภัณฑ์

ประเภทถ่านหิน



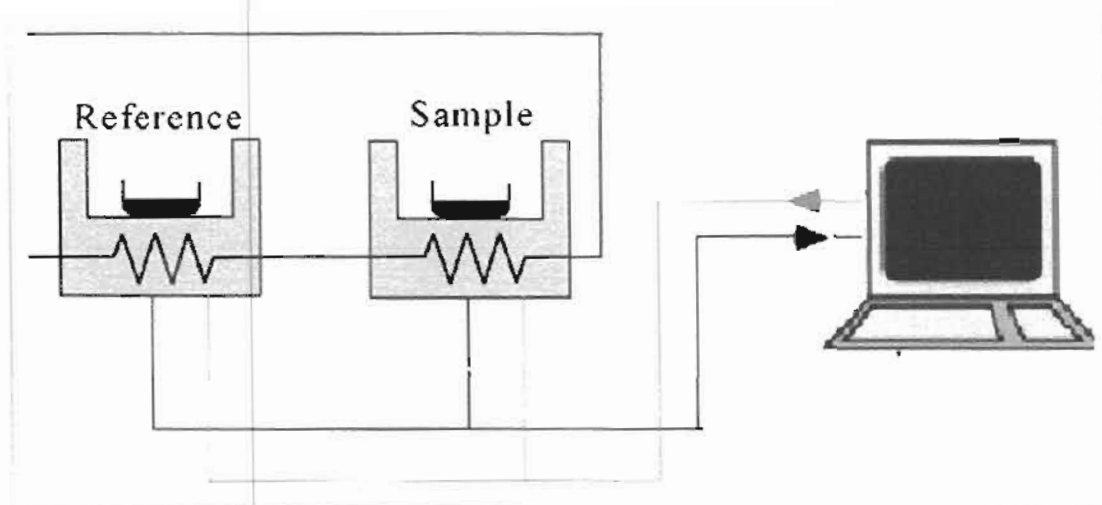


ภาพประกอบ 9 กราฟเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA  
(มหาวิทยาลัยบูรพา.เว็บไซต์)

## 2.6 เครื่อง DSC

ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter). หรือที่เรียกว่าเครื่อง DSC, เป็นแคลอริมิเตอร์ (calorimeter) ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal Transition) ของสารตัวอย่างที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่างเมื่อถูกเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิในบรรยากาศที่ถูกควบคุมหลักพื้นฐานของ DSC คือ นำภาต 2 ภาต คือ ภาตที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) และภาตอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นภาตเปล่าวางอยู่ข้างกันไปวางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (heater) ชนิดเดียวกันเมื่อเริ่มการทดลอง อุปกรณ์ให้ความร้อนจะเริ่มให้ความร้อนแก่ภาตทั้งสองโดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 10 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที) โดยจะควบคุมให้ความร้อนภาตทั้งสองที่วางแยกกันด้วยอัตราการเพิ่มความร้อนที่เท่ากันตลอดทั้งการทดลอง





ภาพประกอบ 10 หลักการทำงานของเครื่อง DSC (Differential scanning calorimeter)  
(เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบทางความร้อน โดย นายวีระพงศ์ สังวาล)

หลังการให้ความร้อนอุณหภูมิของภาตทั้งสองจะเพิ่มด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจาก Sample Pan มีตัวอย่างอยู่ข้างในแต่ Reference Pan ไม่มีการมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ Sample Pan มีสารในปริมาณที่มากกว่า Reference Pan นั้นหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อน Sample-Pan มากกว่าทำให้ Reference Pan เพื่อที่จะคงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากันดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ Sample Pan จะต้องทำงานหนักกว่า Furnace ที่อยู่ใต้ Reference Pan คือมันต้องให้ความร้อนมากกว่าและการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก Furnace ทั้งสองนี้ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC. และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่ายเราจะสร้างกราฟโดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิและแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ Furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งโดยปกติแล้วการทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่ม (หรือลด) อุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น, 10 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส และสิ้นสุดการทดลองที่ 300 องศาเซลเซียส) หรือการรักษารอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal), เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น, 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศก็มีบทบาทสำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิโดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบ คือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing Atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจนหรืออากาศ)



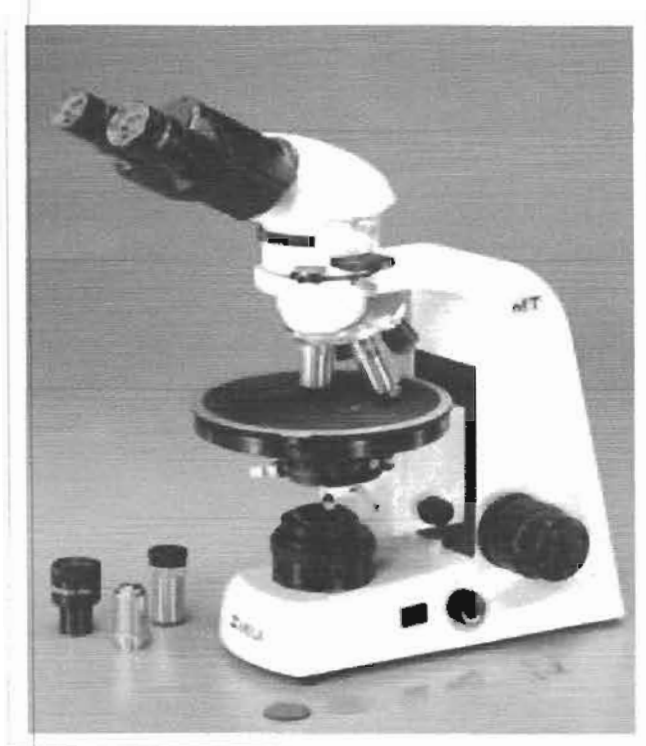
ความร้อนที่ไหลสารตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ไหลสารตัวอย่างและถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลาผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วยมิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลส์ (mJ) พลังงานที่ไหลสารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี, (Enthalpy), ของสารตัวอย่างเมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงานเราเรียกว่า Enthalpy, มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงานเราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่นการหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อน Sample Pan มากกว่าที่ให้ Reference Pan เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ Sample Pan และ Reference Pan ให้เท่ากันความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง Sample Pan มากกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง Reference Pan ค่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Endothermic DSC เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ในอุตสาหกรรมเคมีพลาสติก อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ อากาศยานไปจนถึงอาหารและยา โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้ทั้งสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์และสำหรับงานวิจัยตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง DSC เช่น Melting Point (จุดหลอมเหลว) Glass Transition Temperature ( $T_g$ , อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว) Oxidation Stability (ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน) Reaction Kinetics (จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา) หรือ Purity (ความบริสุทธิ์) ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดนี้จะมีข้อมูลต่างๆเหล่านี้ที่เป็นค่าเฉพาะตัว. เช่น Low Density Polyethylene (LDPE) มี Melting Point อยู่ที่ประมาณ 110 องศาเซลเซียสและเกิดการตกผลึก (Crystallization) ที่ประมาณ 293 องศาเซลเซียส ในขณะที่ Polyethylene terephthalate (PET) มี  $T_g$  ที่ประมาณ 69 องศาเซลเซียสและมี Melting Point อยู่ที่ประมาณ 256 องศาเซลเซียสและเกิด Crystallization ที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตขวดน้ำอัดลม (เรียกกันว่าขวดเพ็ท) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนถึง 3 ลักษณะ โดยที่ Glass Transition และ Melting เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบดูดพลังงาน (Endothermic) ในขณะที่ Crystallization เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบคายพลังงาน (Exothermic)



## 2.7 กล้อง Polarized Microscope

Polarized Microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยโครงสร้างที่เห็นจะสว่างตัดกับพื้นที่มืด ซึ่ง Polarized Microscope เป็นกล้องจุลทรรศน์รูปแบบหนึ่งของ Light Microscope ซึ่งกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะใช้ในการมอง Material ประเภท Biological ต่างๆเช่น กล้ามเนื้อ และประเภทของสินแร่หรือแร่ธาตุต่างๆ เพื่อดูลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์ว่ามีทิศทางไปในทางใด เพื่อนำไปวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างของวัตถุนั้นๆ ซึ่งจะใช้หลักการ Polarize ของแสง



ภาพประกอบ 11 กล้องจุลทรรศน์ Polarized Microscope



## 2.8 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)

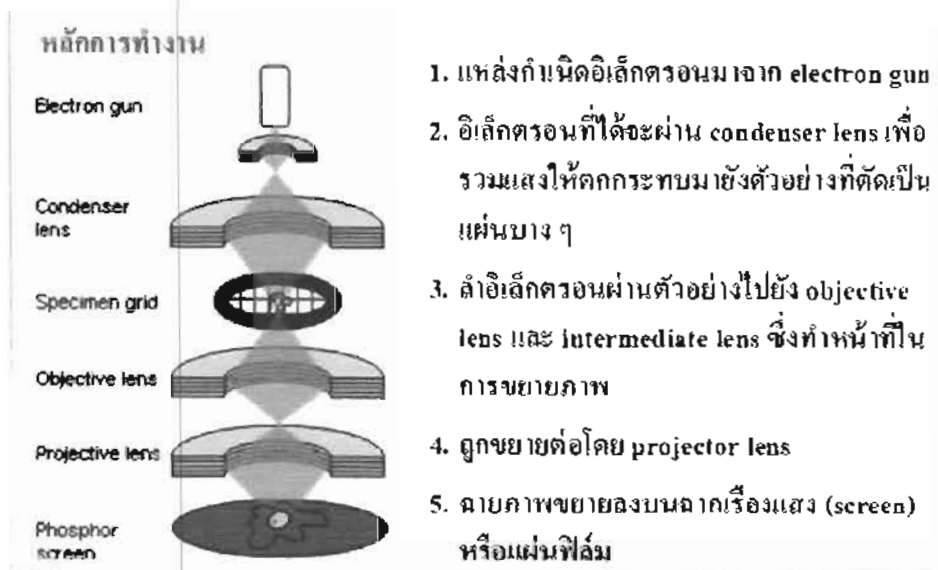
Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายไม่สูงเท่ากับเครื่อง TEM (เครื่อง SEM มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร) การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องที่ตัวอย่างจะต้องมีขนาดบางเท่ากับเมื่อดูด้วยเครื่อง TEM ก็ได้ (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น



ภาพประกอบ 12 ภาพเครื่อง Scanning Electron Microscopy

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย





ภาพประกอบ 13 ภาพหลักการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscopy



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเครื่องมือ อุปกรณ์ในการผสมพลาสติกที่มีโครงสร้างแบบ PLA PBS และ Chain Extender โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัยดังรายละเอียดขั้นตอนต่างๆดังนี้

#### 3.1 การผสมพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์และสารช่วยยืดสายโซ่ต่อพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตพลาสติก

##### 3.1.1 วัสดุ

3.1.1.1 เม็ดพลาสติก PLA

3.1.1.2 เม็ดพลาสติก PBS

3.1.1.3 Chain Extender

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.1 เครื่องอบพลาสติก

3.1.2.2 เครื่องชั่งดิจิตอล

3.1.2.3 เครื่องบดผสม (Extruder)

3.1.2.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก

3.1.2.5 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding)

3.1.2.6 เครื่องทดสอบการดึง (Tensile Testing)

3.1.2.7 เครื่องทดสอบ TGA (Thermo Gravimetric Analysis)

3.1.2.8 เครื่องทดสอบ DSC (Differential scanning calorimeter)

3.1.2.9 กล้องจุลทรรศน์ Polarized Microscope

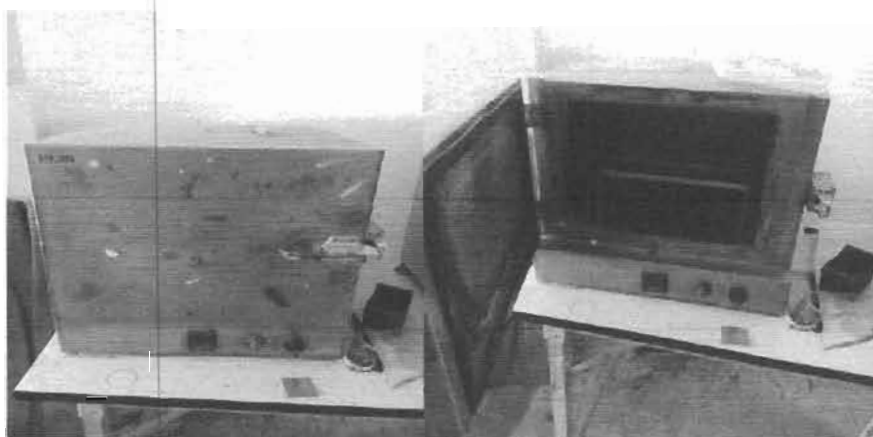
3.1.2.10 กล้องส่องอิเล็กตรอน SEM (Scanning Electron Microscopy)



### 3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

#### 3.2.1 เครื่องอบไล่ความชื้น

เริ่มจากการนำพลาสติก PLA และ พลาสติก PBS นำไปอบไล่ความชื้นโดยใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ที่ 80 องศาเซลเซียสหรือ อบที่อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสค้างคืน



ภาพประกอบ 14 เครื่องอบไล่ความชื้น

#### 3.2.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก

นำมาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล ผสมกันระหว่างพลาสติก (PLA) พลาสติก (PBS) และ Chain Extender ตามสัดส่วนต่างๆ

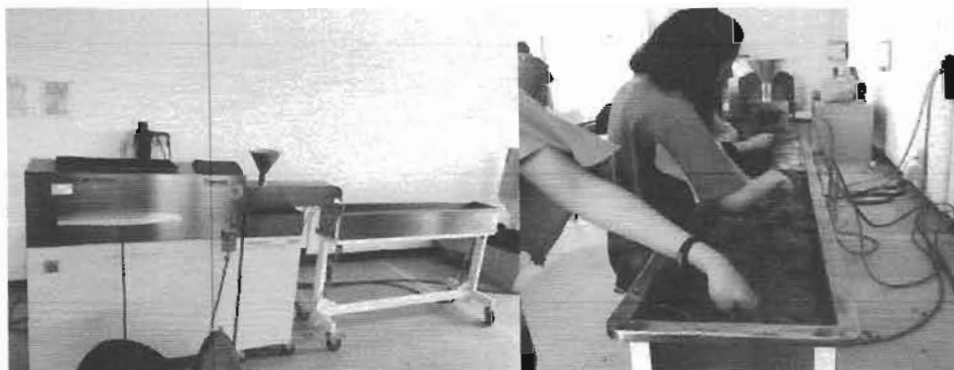


ภาพประกอบ 15 เครื่องชั่งดิจิตอล



### 3.2.3 เครื่องผสมพลาสติก (Extruder)

นำมาผสมโดยใช้เครื่องผสม (Extruder) ใช้ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยใช้ อุณหภูมิที่ 190 องศาเซลเซียส จากนั้นก็ให้เย็นตัวในน้ำดังออกมาเป็นเส้นๆตามรูปด้านล่าง



ภาพประกอบ 16 เครื่องผสม (Extruder)

### 3.2.4 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก

หลังจากการผสมพลาสติกจากเครื่องผสม (Extruder) ก็เอาเส้นพลาสติกมาตัดด้วยเครื่อง ตัดเม็ดพลาสติก



ภาพประกอบ 17 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก

หลังจากนั้นนำพลาสติกที่ได้จากการตัดทำเม็ดพลาสติกแล้วก็นำไปอบไล่ความชื้นอีกครั้ง เพราะว่าตอนออกจากเครื่องผสม พลาสติกของเราถูกน้ำในขบวนการเย็นตัวของพลาสติก



### 3.2.5 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding)

ผสมวัตถุดิบเข้ากันด้วยเครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding) โดยมีอัตราส่วนและอุณหภูมิที่ 190°C



ภาพประกอบ 18 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding)

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ Tensile Testing

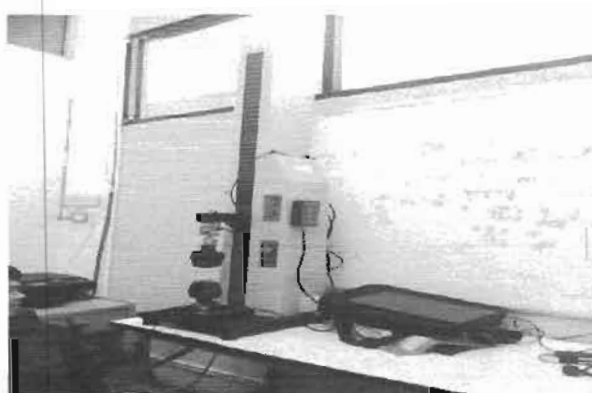
3.3.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วมาทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลต่างๆ

3.3.1.1 ป้อนค่า ความสูง และ ความหนาของชิ้นงานลงไปโปรแกรมของเครื่อง

3.3.1.2 ใส่ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที

3.3.1.3 นำชิ้นงานใส่เครื่องทดสอบ

3.3.1.4 เอาชิ้นงานที่ดึงขาดแล้ว มาวัดระยะความยาวของชิ้นงานบริเวณที่ขาด



ภาพประกอบ 19 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานและการดึงชิ้นงาน



### 3.4 ขั้นตอนการทดสอบ TGA (Thermo Gravimetric Analysis)

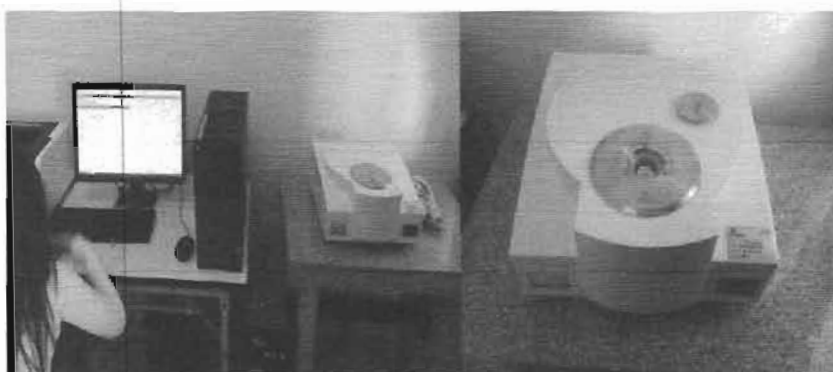
#### 3.4.1 การทดสอบ TGA (Thermo Gravimetric Analysis) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.4.1.1 เปิดเครื่อง TGA ใส่ค่าที่ได้ลงไปโดยที่น้ำหนักของเม็ดพลาสติกเครื่องจะชั่งให้น้ำหนักของเม็ดพลาสติกที่ใส่ลงไปบนเครื่องประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อครั้ง

3.4.1.2 นำชิ้นส่วนของเม็ดพลาสติกใส่ในถาด

3.4.1.3 เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.4.1.4 รอจนกว่าชิ้นงานจะไหม้หมดจนเป็นขี้เถ้า



ภาพประกอบ 20 เครื่อง TGA (Thermo Gravimetric Analysis)

### 3.5 ขั้นตอนการทดสอบ DSC (Differential scanning calorimeter)

#### 3.5.1 การทดสอบ DSC (Differential scanning calorimeter) มีขั้นตอนดังนี้

3.5.1.1 เตรียมถาด DSC จำนวน 2 ถาด

3.5.1.2 ใส่ชิ้นงานในถาด DSC 1 ถาด

3.5.1.3 นำถาด DSC เข้าเครื่อง แล้วดูผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการหลอมเหลว  
พลังงานที่ต้องใช้จากเครื่องโดยแสดงผ่านกราฟ





ภาพประกอบ 21 เครื่อง DSC

### 3.6 ขั้นตอนการทดสอบดูโครงสร้างของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Polarized Microscope)

#### 3.6.1 ขั้นตอนการดูโครงสร้างของผลึกมีดังนี้

3.6.1.1 นำแผ่นกระจกใสไปวางบนเครื่องให้ความร้อน

3.6.1.2 นำเม็ดพลาสติกไปวางบนกระจกใส

3.6.1.3 นำแผ่นกระจกใสไปวางทับเม็ดพลาสติกและใช้แรงกดจนให้น้ำพลาสติกที่หลอม

ละลายกระจายจนทั่ว

3.6.1.4 เมื่อเย็นตัวแล้วนำไปส่องเพื่อดูโครงสร้างของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์

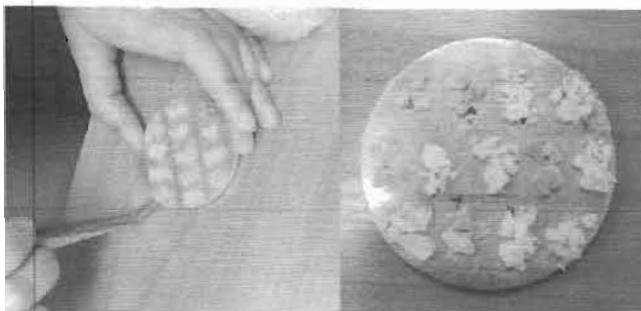
Polarized Microscope



ภาพประกอบ 22 การดูโครงสร้างของผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์ Polarized Microscope



### 3.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ PLA ผสม PBS โดยใช้กล้องส่องอิเล็กตรอน SEM (Scanning Electron Microscopy)



ภาพประกอบ 23 การเตรียมชิ้นงานก่อนการส่องกล้องอิเล็กตรอน SEM



ภาพประกอบ 24 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ PLA ผสมยาง โดยใช้กล้องส่องอิเล็กตรอน SEM (Scanning Electron Microscopy)

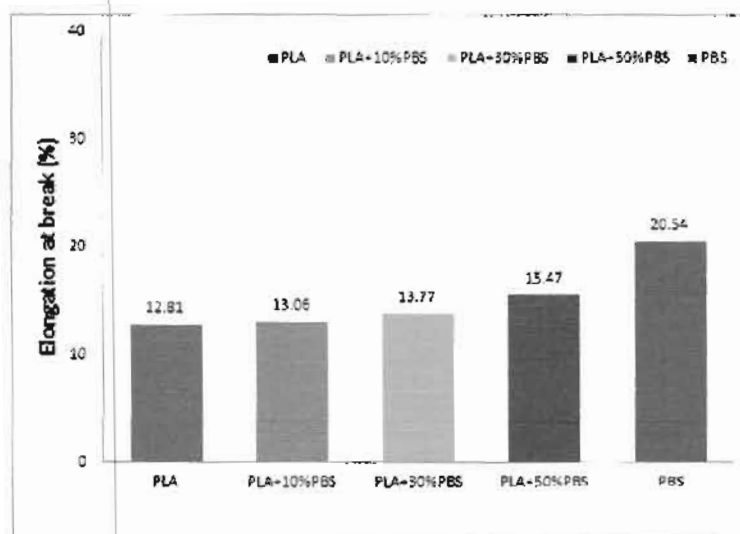


## บทที่ 4

### ผลการศึกษางานวิจัย

#### 4.1 การศึกษาการทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบนี้ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อนำมาคำนวณหาค่า Elongation at break (%) ดังตัวอย่างภาพที่ 37 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ กราฟแสดงให้เห็นว่า PLA มีค่า Elongation at break (%) ประมาณ 12.81% และ PBS มีค่า Elongation at break (%) ประมาณ 20.54% และเมื่อพิจารณา PLA / PBS blend ที่อัตราส่วน PBS 10%, 30% และ 50% จะเห็นว่า ค่า Elongation at break (%) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ PBS คือได้ค่า Elongation at break (%) ประมาณ 13.06%, 13.77% และ 15.47% ตามลำดับ

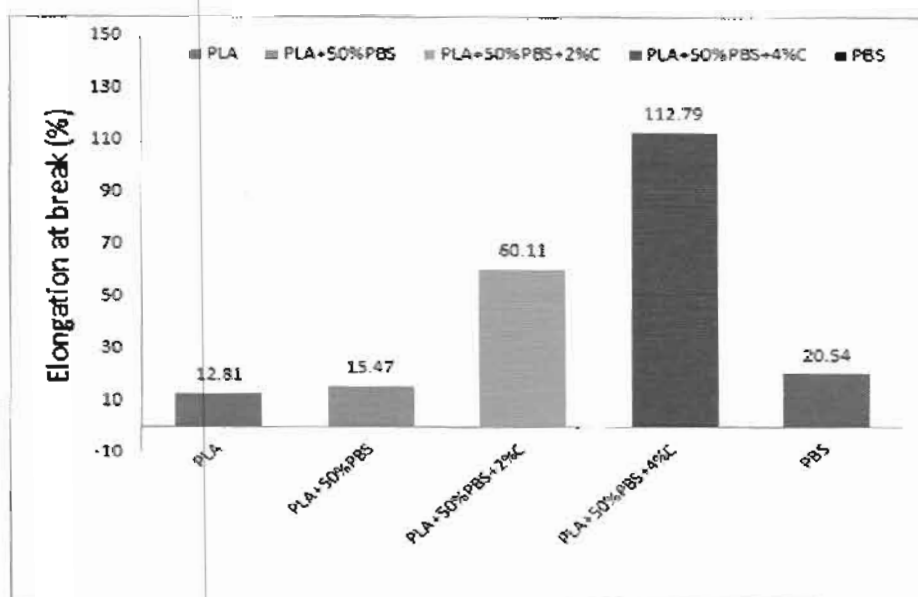


ภาพประกอบ 25 กราฟ Elongation at break (%) ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณ PBS 50% เมื่อเติม Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4% จากภาพที่ 38 จะเห็นว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Chain extender คือมีค่าประมาณ 15.47%, 60.11% และ 112.79% ตามลำดับ ซึ่งทุกอัตราส่วนที่มีการเติม Chain ext. ค่ามากกว่า PLA และ PBS บริสุทธิ์ ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากปริมาณของ PBS ที่สูงที่สุดใน



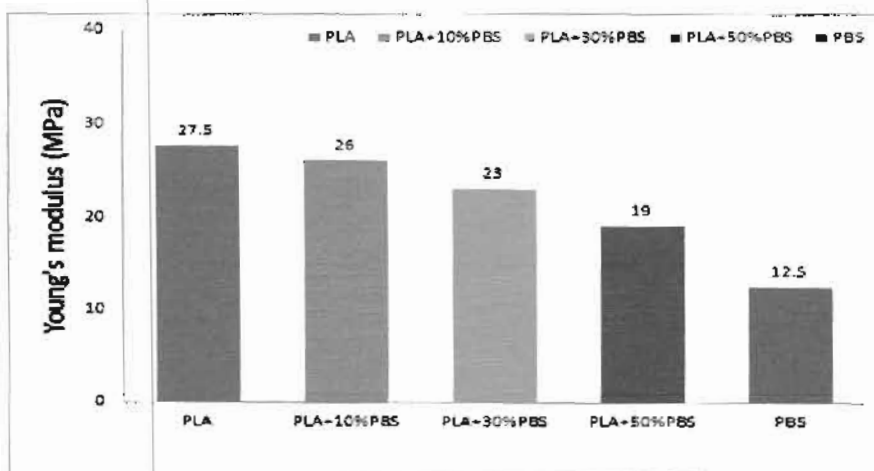
PLA ที่ทำให้ชิ้นงานก่อนการเติม Chain extender มีค่า Elongation at break ต่ำกว่าตัวอย่างอื่น และเมื่อยังเติมปริมาณ Chain extender ที่สูงขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของ Chain extender ที่ทำให้โมเลกุลของสารมีการยึดและผสมเข้ากันได้ดีขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความยืดหยุ่นมากขึ้น



ภาพประกอบ 26 กราฟ Elongation at break (%) ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่ปริมาณ PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4%

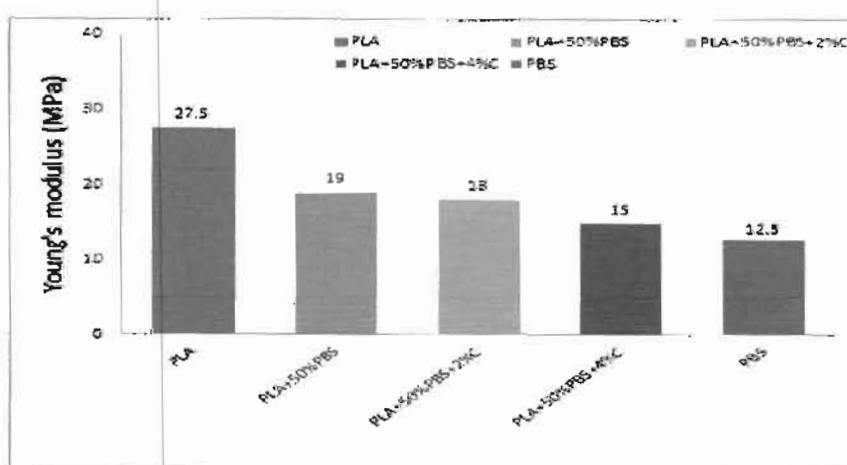
เมื่อพิจารณาจากค่า Young's modulus จากภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่า PLA มีค่า Young's modulus ประมาณ 27.5 MPa และ PBS มีค่า Young's modulus ประมาณ 12.5 MPa และเมื่อมีอัตราส่วนผสมใน PLA ที่ปริมาณ 10%, 30% และ 50% พบว่าเมื่อยังเพิ่มปริมาณ PBS ก็ยังจะทำให้ PLA / PBS blend มีค่า Young's modulus มีแนวโน้มลดลงมากขึ้น คือมีค่าประมาณ 26 MPa, 23 MPa และ 19 MPa ตามลำดับ





ภาพประกอบ 27 กราฟค่า Young's modulus ของ PLA, PBS และ PLA/PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ

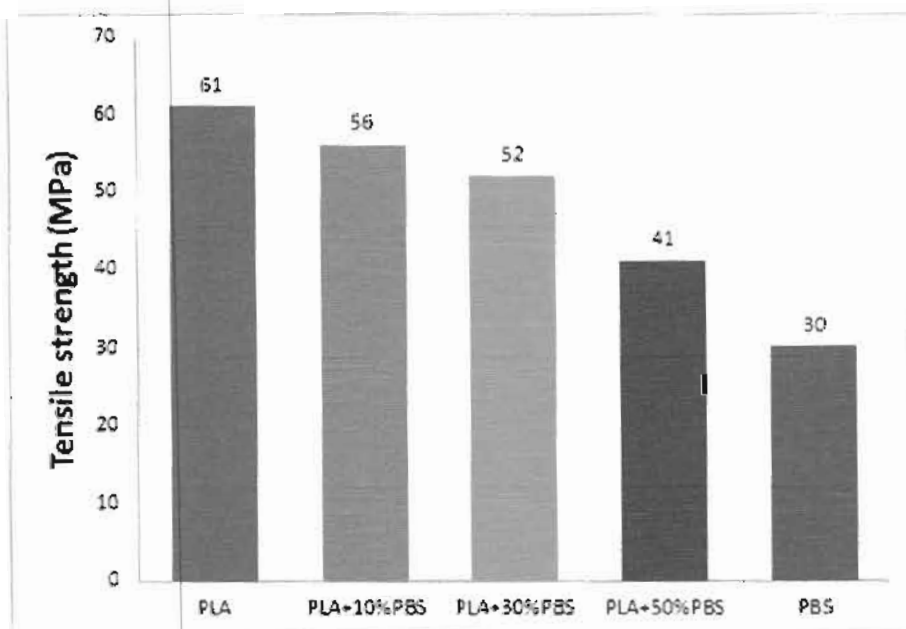
เมื่อพิจารณาจากการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล หรือ Chain extender ที่ 0%, 2% และ 4% ที่ปริมาณ PBS 50% จากรูปที่ จะเห็นว่าการเติม Chain extender ไม่ได้ทำให้ค่า Young's modulus มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเนื่องมาจาก PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นกว่า PLA และเมื่อนำมาผสมกันก็จะทำให้ PLA / PBS blend นี้มีความยืดหยุ่นมากขึ้นคือจะทำให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง



ภาพประกอบ 28 กราฟค่า Young's modulus ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่ปริมาณ PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4%



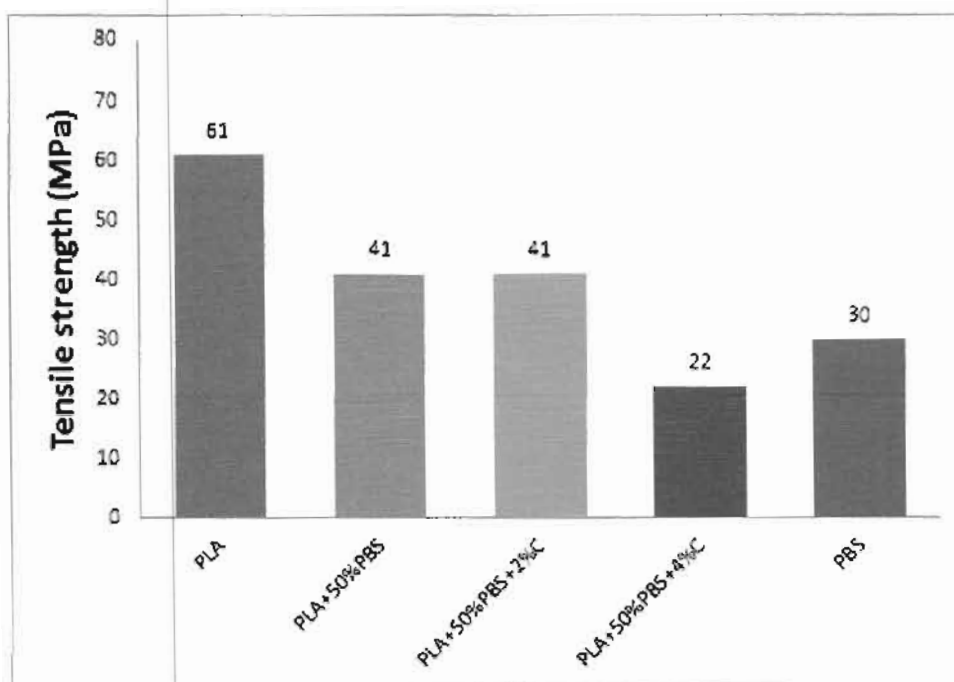
เมื่อพิจารณาจากค่า Tensile strength จากภาพที่ 41 แสดงให้เห็นว่า PLA มีค่า Tensile strength ประมาณ 61 MPa และ PBS มีค่า Tensile strength ประมาณ 30 MPa ส่วน PLA / PBS blend มีค่า Tensile strength อยู่ระหว่าง PLA และ PBS เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสม PBS จะทำให้ค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลงเหมือนกับค่า Young's modulus



ภาพประกอบ 29 กราฟค่า Tensile strength ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ

และเมื่อพิจารณาจากการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล หรือ Chain extender ที่ 0%, 2% และ 4% ที่ปริมาณ PBS 50% จากรูปที่ จะเห็นว่าค่า Tensile strength ของ PLA / PBS blend มีค่าลดลงตามปริมาณ Chain extender ที่ 4% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับไม่เติมสาร Chain extender จะเห็นว่าตัวอย่างที่ไม่เติมสาร Chain extender มีค่า Tensile strength มากกว่าเติมสาร Chain extender





ภาพประกอบ 30 กราฟค่า Tensile strength ของ PLA, PBS และ PLA / PBS blend ที่ปริมาณ PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4%

อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่า Young's modulus และค่า Tensile strength มีค่าลดลงจากที่ยังไม่เติมสารปรับปรุงความเข้ากันได้และ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS ปริมาณเท่ากัน แต่เติมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ปริมาณต่างกัน จะเห็นว่ายิ่งเพิ่มปริมาณสารปรับปรุงความเข้ากันได้ ค่า Young's modulus และค่า Tensile strength มีค่าลดลงเหมือนกัน ซึ่งเป็นผลมาจาก PBS เป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นกว่า PLA จึงทำให้วัสดุมีความแข็งลดลง จึงทำให้ค่า Young's modulus และค่า Tensile strength มีค่าลดลงตามไปด้วย แต่สำหรับค่า Elongation at break ของ PLA / PBS blend จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ PBS เพิ่มมากขึ้น ค่า Elongation at break จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาว่าการเติมสารปรับปรุงความเข้ากันได้เมื่อปริมาณ PBS เท่ากัน จะเห็นว่า เมื่อปริมาณของสารปรับปรุงความเข้ากันได้มากขึ้น ค่า Elongation at break ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และมีค่าสูงกว่า PLA และ PBS บริสุทธิ์อีกด้วย ซึ่งแสดงว่าสารปรับปรุงความเข้ากันได้ช่วยทำให้ PLA / PBS blend มีความยืดหยุ่นและความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก Chain extender ช่วยเพิ่มแรงยึดของรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ PLA มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า Elongation at break ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBS และ Chain extender



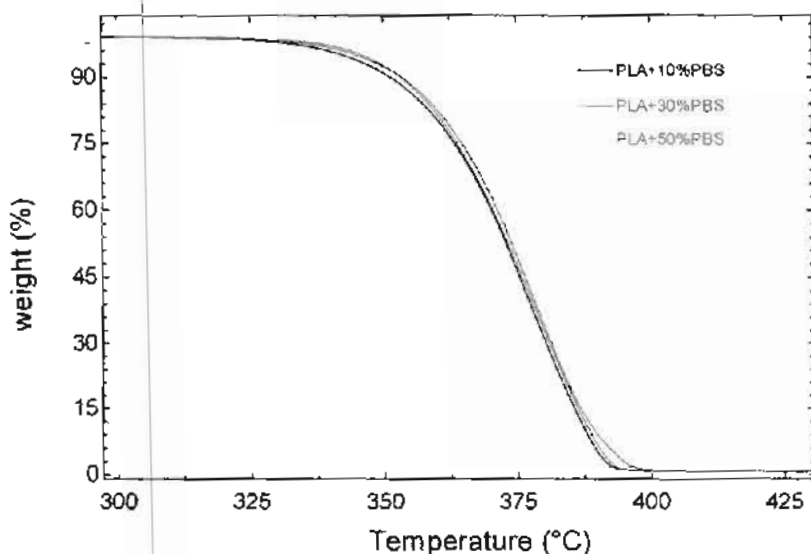
## 4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ทำการทดสอบด้วยเครื่อง DSC (Differential scanning calorimeter) เพื่อวิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นตั้งแต่ -10 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยใช้ Heating Rate 10 °C/min ใช้ตัวอย่างในการทดลองประมาณ 3 -5 มิลลิกรัม เพื่อศึกษาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature,  $T_g$ ) อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) ค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) และ Degree of crystallinity และการทดสอบการเสถียรทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA (Thermo Gravimetric Analysis) โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยใช้ Heating Rate 10 °C/min ใช้ตัวอย่างในการทดลองประมาณ 10 - 15 มิลลิกรัมเพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ( $T_d$ )

### 4.2.1 การทดสอบทางความร้อนด้วยวิธี Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

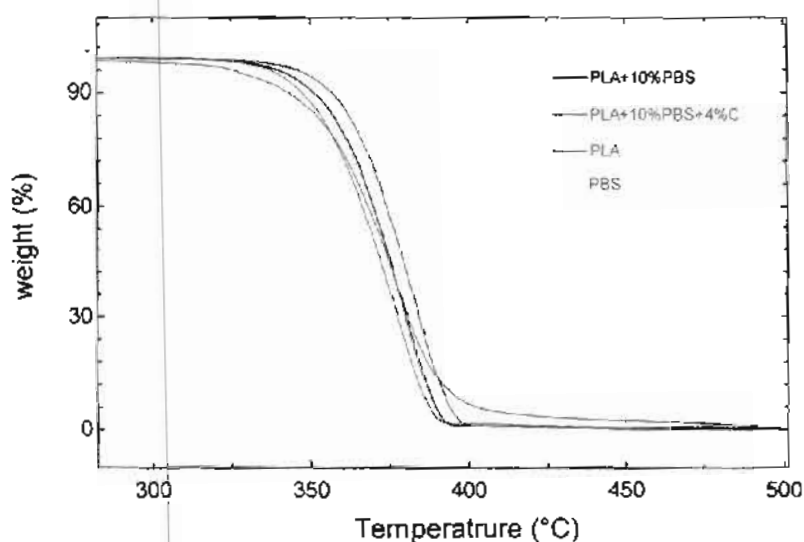
ในการทดสอบด้วยวิธีนี้จะใช้อุณหภูมิเริ่มต้นตั้งแต่ 30 – 600°C และใช้ Heating rate 10°C/min ซึ่งได้ผลตามรูปที่ 31 จะเห็นว่า PLA มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 1 ประมาณ 325°C และมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 2 ประมาณ 395°C ส่วน PBS มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 340°C และมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 2 ประมาณ 400°C เมื่อมีการนำ PBS มาผสมกับ PLA กลายเป็นพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วน 10%, 30% และ 50% จะพบว่าทั้งสามอัตราส่วนมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกันคือมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 1 ประมาณ 350°C และมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวทางความร้อนช่วงที่ 2 ประมาณ 385°C ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณ PBS ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทนต่ออุณหภูมิในการย่อยสลายให้ดีขึ้นเท่าใดนัก อาจเนื่องมาจากการผสมที่ไม่ค่อยเข้ากันได้ดีเท่าที่ควร





ภาพประกอบ 31 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS ที่ปริมาณ 10%, 30% และ 50%

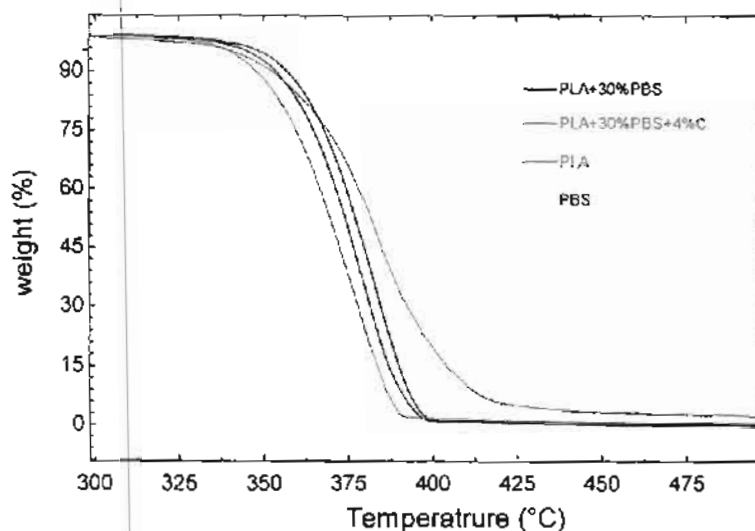
แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง PLA / PBS 10% และ PLA / PBS 10% / Chain extender 4% จากภาพที่ 34 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมที่มี Chain extender 4% มีการเริ่มสลายตัวเร็วกว่าอัตราส่วนอื่นๆ แต่สลายตัวจนหมดช้ากว่าอัตราส่วนอื่นๆ อาจเนื่องมาจาก Chain extender มีส่วนช่วยให้วัสดุสามารถผสมเข้ากันได้ดีขึ้น และเนื่องด้วยปริมาณ PBS ที่มีอัตราส่วนน้อยคือ 10% จึงทำให้มีส่วนช่วยในการสลายตัวช้าขึ้นเล็กน้อย



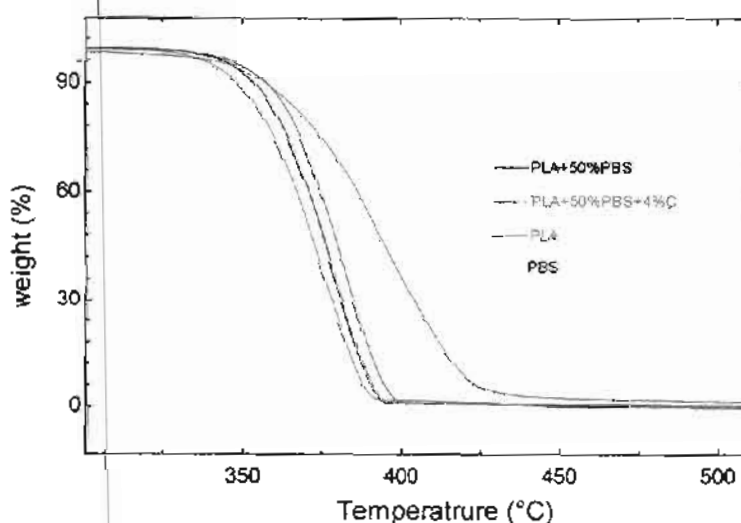
ภาพประกอบ 32 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS 10% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender 4%



เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการผสม PBS 30% และ PBS 50% ที่มีการผสม Chain extender 4% จากภาพที่ 35 จะเห็นว่าที่ปริมาณ Chain extender มีส่วนช่วยให้ PBS ผสมเข้ากันกับ PLA ได้ดีขึ้น และเมื่อมีปริมาณ PBS เพิ่มขึ้นที่ 50% ทำให้เกิดอัตราการสลายตัวช้าที่สุด



ภาพประกอบ 33 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS30% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยChain extender 4%



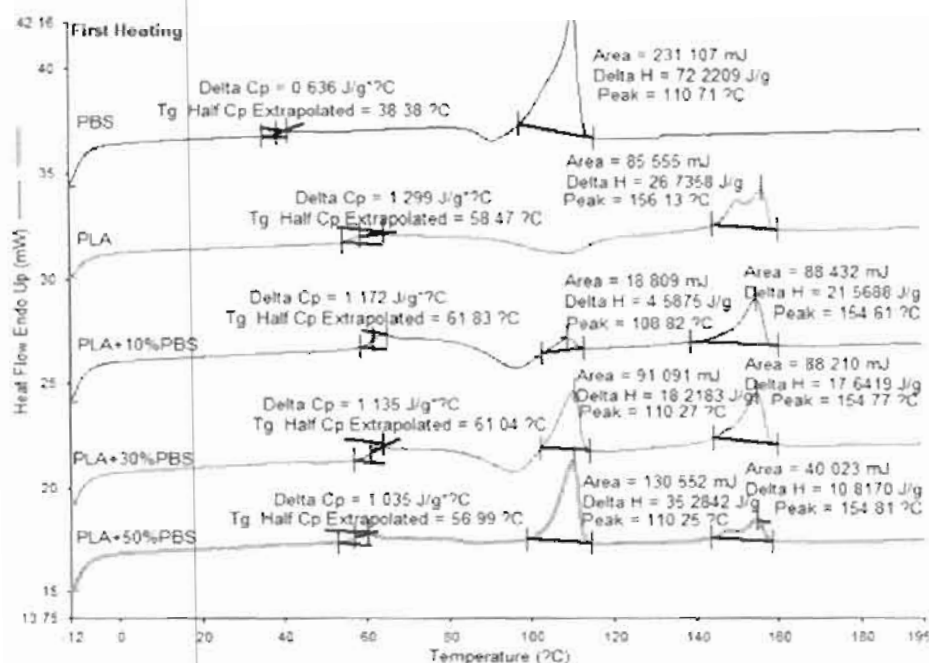
ภาพประกอบ 34 กราฟ TGA ของ PLA / PBS blend ที่ผสม PBS50%และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยChain extender 4%



#### 4.2.2 ผลการทดลองคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี Differential Scanning Calorimeter (DSC)

PLA ที่มี PBS 0%, 10%, 30% และ 50% ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี DSC ดังแสดงในภาพที่ 35 จะเห็นว่าชิ้นงาน PLA มีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature,  $T_g$ ) อยู่ที่ประมาณ 58.4 °C และชิ้นงาน PBS มีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature,  $T_g$ ) อยู่ที่ประมาณ 38.3 °C เมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า  $T_g$  ลดลง ที่ปริมาณ PBS 50% ค่า  $T_g$  มีค่าประมาณ 56.9 °C ซึ่งเป็นผลมาจาก PBS ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มอุณหภูมิความอ่อนตัวของพลาสติกให้กับ PLA จึงทำให้ค่า  $T_g$  มีค่าลดลงตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) ของ PLA มีค่าประมาณ 156 °C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) อยู่ที่ประมาณ 26.7 J/g และอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) ของ PBS มีค่าประมาณ 110 °C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) อยู่ที่ประมาณ 72.2 J/g การเพิ่มขึ้นของปริมาณ PBS ทำให้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจาก PBS มีสมบัติทนความร้อนได้ดี และค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) มีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก PBS ไปเพิ่มสมบัติความอ่อนตัว เพิ่มความยืดหยุ่น ลดความเปราะ ทำให้ใช้พลังงานในการหลอมเหลวน้อยลง ซึ่งจากที่ปริมาณ PBS 50% มีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีค่าประมาณ 154.8 °C มีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ประมาณ 10.8 J/g จากกราฟจะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมของ PLA และ PBS จะเกิดจุดอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ขึ้น 2 จุด ซึ่งเกิดจากการผสมที่ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดการแยกเฟสระหว่างวัสดุเกิดขึ้น ซึ่งได้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีค่าประมาณ 108 °C, 110 °C และ 110 °C ตามปริมาณสารช่วยยัดโมเลกุลและมีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ประมาณ 4.5 J/g, 18.2 J/g และ 35.2 J/g ตามปริมาณสารช่วยยัดโมเลกุล

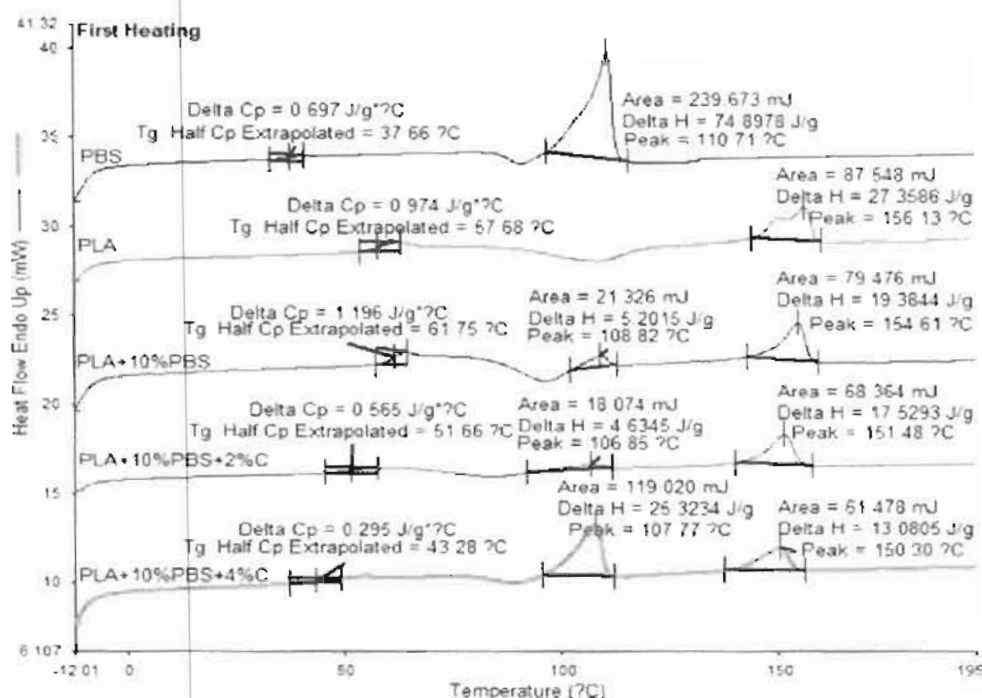




ภาพประกอบ 35 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 10%, 30% และ 50%

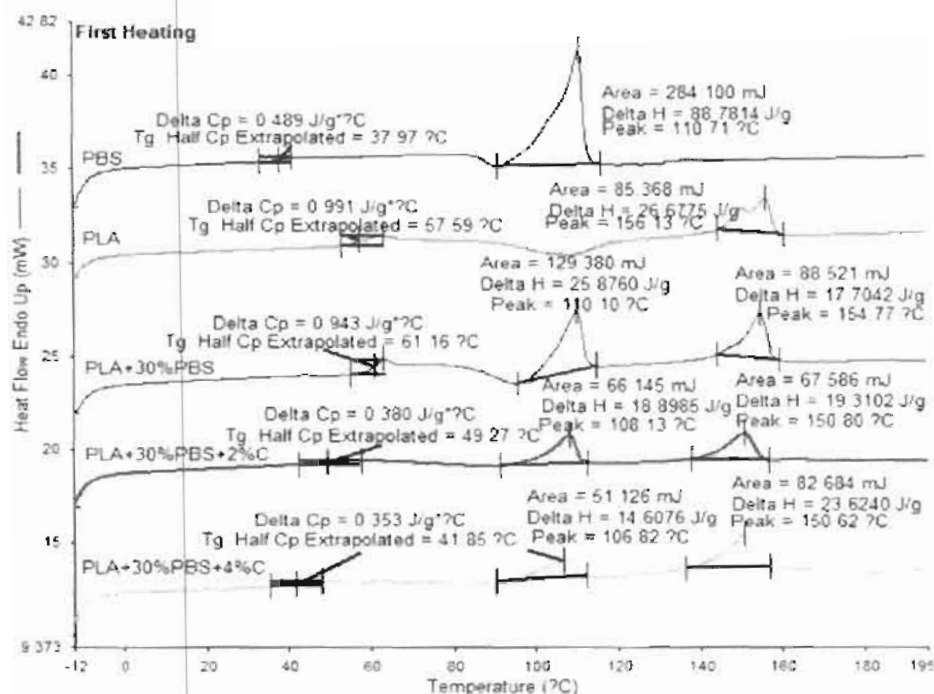
เมื่อพิจารณาที่ PLA ผสม PBS 10% โดยการเติมสารช่วยยึดสายโซโม่เลกุล 0%, 2% และ 4% จาก ภาพที่ 36 จะเห็นว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวและพลังงานในการหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ สารช่วยยึดสายโซโม่เลกุล โดยที่ปริมาณของสารตัวอย่างที่ผสมสารช่วยยึดสายโซโม่เลกุล 0% มีจุด หลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 154.6 °C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวประมาณ 19.3 J/g และที่ ปริมาณของสารตัวอย่างที่ผสมสารช่วยยึดสายโซโม่เลกุล 4% มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 150.3 °C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวประมาณ 13J/g ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature,  $T_g$ ) มีค่าลดลงจาก 61 °C, 51 °C และ 43 °C ตามปริมาณสารช่วยยึดสายโซโม่เลกุล และ ได้ค่าพลังงานในการหลอมเหลวลดลงตามปริมาณสารช่วยยึดสายโซโม่เลกุล คือ 1.19J/g, 0.56 J/g และ 0.29 J/g ตามลำดับ และเช่นกันกับผลการเพิ่มปริมาณ PBS คือจะเกิดจุดอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ขึ้น 2 จุด ซึ่งเกิดจากการผสมที่ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดการแยกเฟสระหว่างวัสดุเกิดขึ้น ซึ่งได้ค่า อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีค่าประมาณ 108°C, 106°Cและ 107°Cตามปริมาณสารช่วยยึดโม่เลกุล และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ประมาณ 5.2 J/g, 4.6 J/gและ 25.3 J/gตามปริมาณสาร ช่วยยึดโม่เลกุล





ภาพประกอบ 36 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 10% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4%

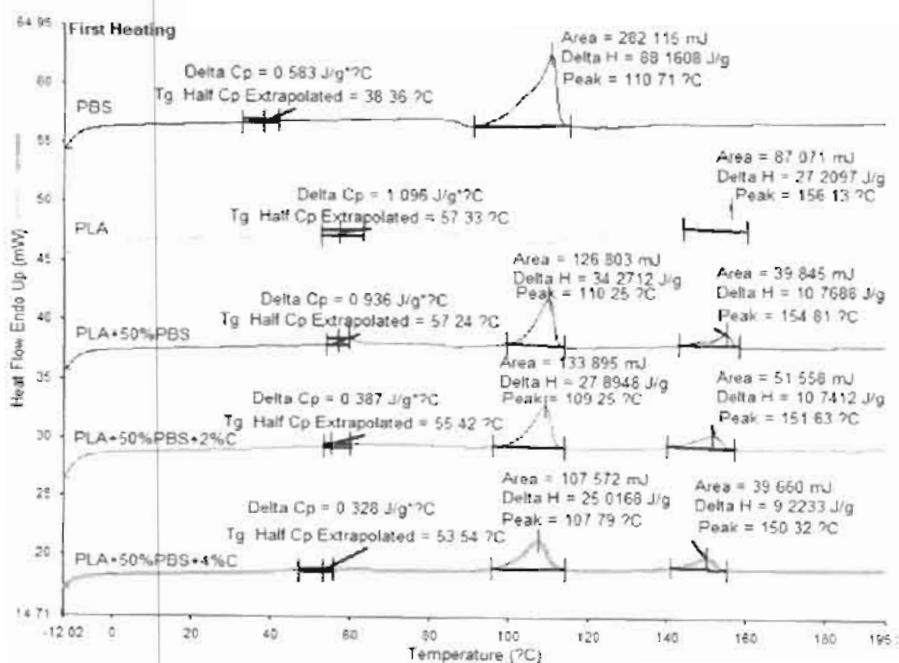
เมื่อพิจารณาที่ PLA ผสม PBS 30% โดยการเติมสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล 0%, 2% และ 4% จากภาพที่ 37 จะเห็นว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวและพลังงานในการหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล โดยที่ปริมาณของสารตัวอย่างที่ผสมสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล 0% มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 154.7°C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวประมาณ 17.7 J/g และที่ปริมาณของสารตัวอย่างที่ผสมสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล 4% มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 150.6°C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวประมาณ 23.6 J/g ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature,  $T_g$ ) มีค่าลดลงจาก 61°C, 49°C และ 41 °C ตามปริมาณสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล และได้ค่าพลังงานในการหลอมเหลวลดลงตามปริมาณสารช่วยยึดสายโซ่โมเลกุล คือ 0.94 J/g, 0.38 J/g และ 0.35 J/g ตามลำดับ และเช่นกันกับผลการเพิ่มปริมาณ PBS คือจะเกิดจุดอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ขึ้น 2 จุด ซึ่งเกิดจากการผสมที่ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดการแยกเฟสระหว่างวัสดุเกิดขึ้น ซึ่งได้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีค่าประมาณ 110°C, 108°C และ 106°C ตามปริมาณสารช่วยยึดโมเลกุล และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ประมาณ 25.8 J/g, 18.8 J/g และ 14.6 J/g ตามปริมาณสาร



ภาพประกอบ 37 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 30% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4%

เมื่อพิจารณาที่ PLA ผสม PBS 50% โดยการเติมสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล 0%, 2% และ 4% จากภาพที่ 38 จะเห็นว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวและพลังงานในการหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล โดยที่ปริมาณของสารตัวอย่างที่ผสมสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล 0% มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 154.8°C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวประมาณ 10.7 J/g และที่ปริมาณของสารตัวอย่างที่ผสมสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล 4% มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 150.3°C และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลวประมาณ 9.2 J/g ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Glass transition temperature,  $T_g$ ) มีค่าลดลงจาก 57°C, 55°C และ 53°C ตามปริมาณสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล และได้ค่าพลังงานในการหลอมเหลวลดลงตามปริมาณสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล คือ 0.93 J/g, 0.38 J/g และ 0.32 J/g ตามลำดับ และเช่นกันกับผลการเพิ่มปริมาณ PBS คือจะเกิดจุดอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ขึ้น 2 จุด ซึ่งเกิดจากการผสมที่ไม่ค่อยเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเกิดการแยกเฟสระหว่างวัสดุเกิดขึ้น ซึ่งได้ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) มีค่าประมาณ 110°C, 109°C และ 107°C ตามปริมาณสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล และมีค่าพลังงานในการหลอมเหลว ( $\Delta H_m$ ) ประมาณ 0.93 J/g, 0.38 J/g และ 0.32 J/g ตามปริมาณสารช่วยยืดยาสายโซโม่เลกุล





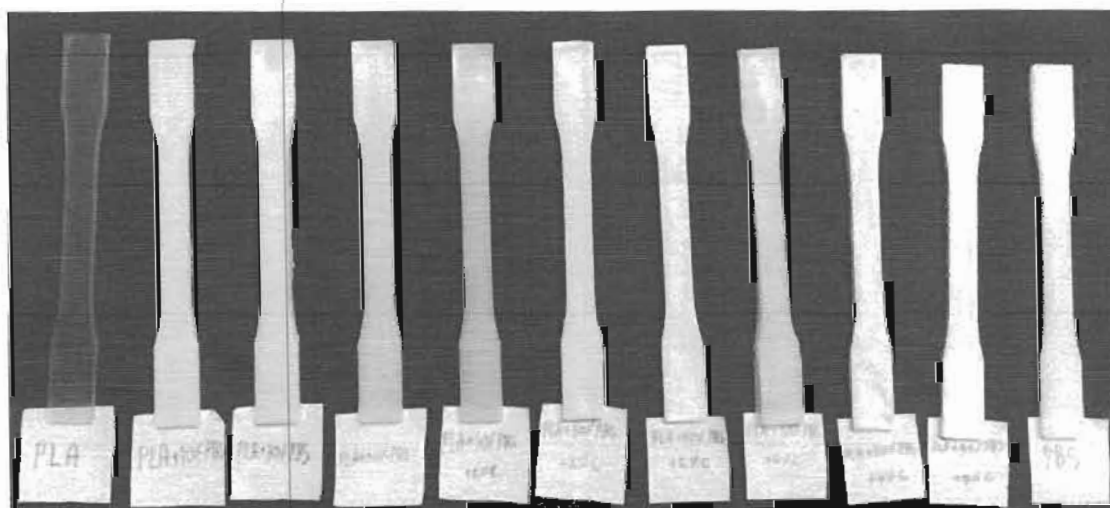
ภาพประกอบ 38 ผลการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) ของชิ้นงาน PLA ผสม PBS 50% และผสมสารปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Chain extender ที่ปริมาณ 0%, 2% และ 4%



#### 4.3 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา ทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของ PLA และ PBS โดยการดูลักษณะพื้นผิวที่รอยแตกหัก โดยชิ้นงานตัวอย่างได้ถูกผสมในอัตราส่วนต่างๆ แล้วทำการอัดขึ้นรูปเป็นรูปดรัมเบลด้วยเครื่อง Injection molding เพื่อเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง (tensile testing) แล้วหักชิ้นงานส่วนหนึ่งนั้นเพื่อนำไปทดสอบ SEM

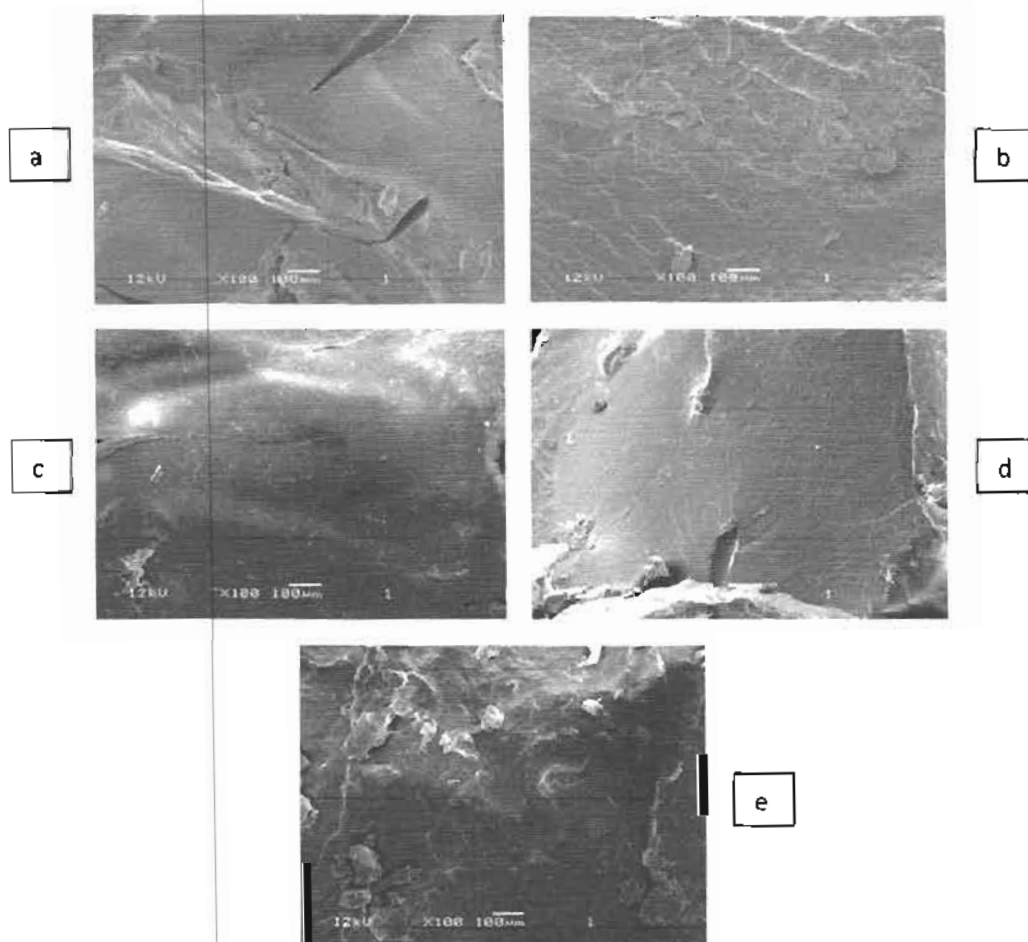
จากภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของวัสดุที่ต่างกันจะได้ลักษณะสีของชิ้นงานที่ต่างกันโดยชิ้นงาน PLA มีลักษณะใส ส่วน PBS มีลักษณะขุ่น และเมื่อผสม PBS ใน PLA ก็จะทำให้ชิ้นงานมีลักษณะของสีขุ่นขึ้นตามปริมาณของ PBS



ภาพประกอบ 39 ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากเครื่อง Injection molding ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



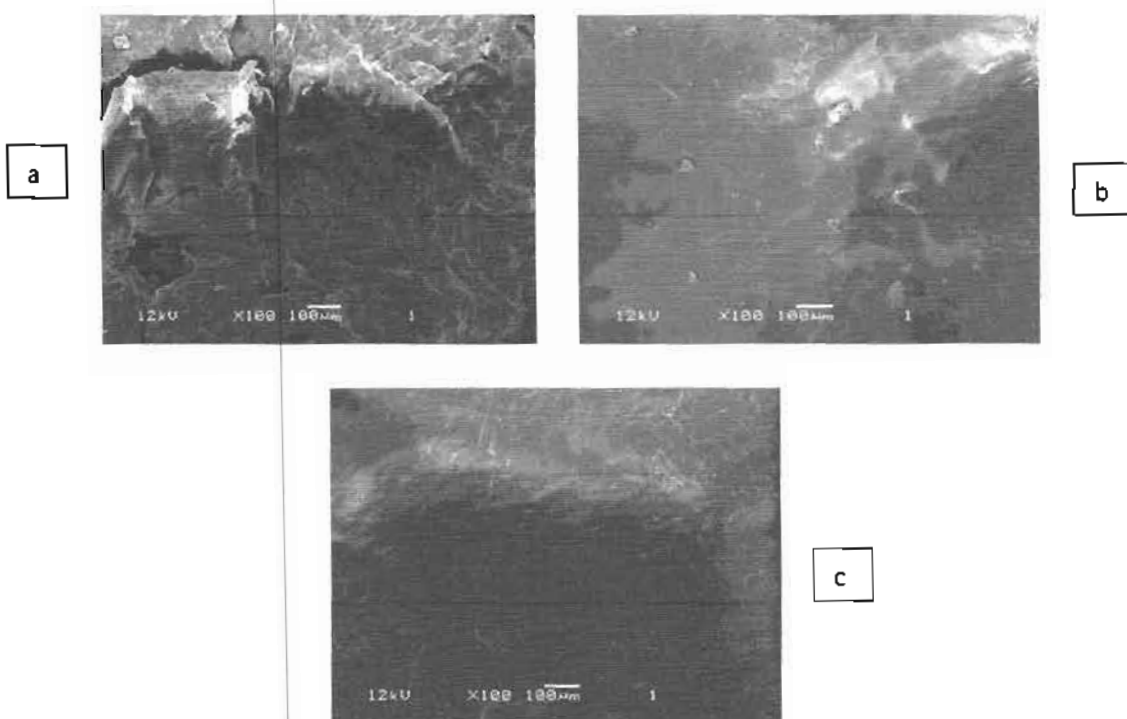
จากภาพที่ 40 เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBS โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบตามอัตราส่วนของ PLA/PBSblends คือ (90/10), (70/30), (50/50) จะเห็นว่า PLA มีลักษณะผิวการแตกหักของพื้นผิวที่เรียบกว่า PBS และเมื่อเติม PBS 10% ลักษณะพื้นผิวก็ยังคงเรียบอยู่ เป็นลักษณะของพื้นผิวที่สามารถเข้ากันได้ดี เมื่อเติม PBS 30% จะสังเกตเห็นพื้นผิวชั้นงานเริ่มไม่เรียบ และเมื่อเติม PBS 50% จะเห็นว่าพื้นผิวเริ่มขรุขระ มีการแยกเฟสกันได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 40 SEM ของการแตกหักของ PLA/PBS blends (a) PLA  
(b) PBS (c) 90/10 (d) 70/30 (e) 50/50



จากภาพที่ 41 เป็นการแสดงลักษณะพื้นผิวเมื่อมีการผสมสารช่วยยืดยึดโมเลกุล (Chain Extender) 2% ของ PLA/PBS/C blends คือ (88/10/2), (68/30/2), (48/50/2) จะเห็นว่าที่อัตราส่วนผสมที่ (88/10/2) มีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระ บ่งบอกได้ว่าสารช่วยยืดยึดโมเลกุลไม่ได้ช่วยให้วัสดุสามารถเข้ากันได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมที่ (90/10) ส่วนที่อัตราส่วนผสมที่ (68/30/2) และ (48/50/2) สังเกตได้ว่ามีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ บ่งบอกได้ว่าสารช่วยยืดยึดโมเลกุลสามารถช่วยให้วัสดุเข้ากันได้ดีขึ้น

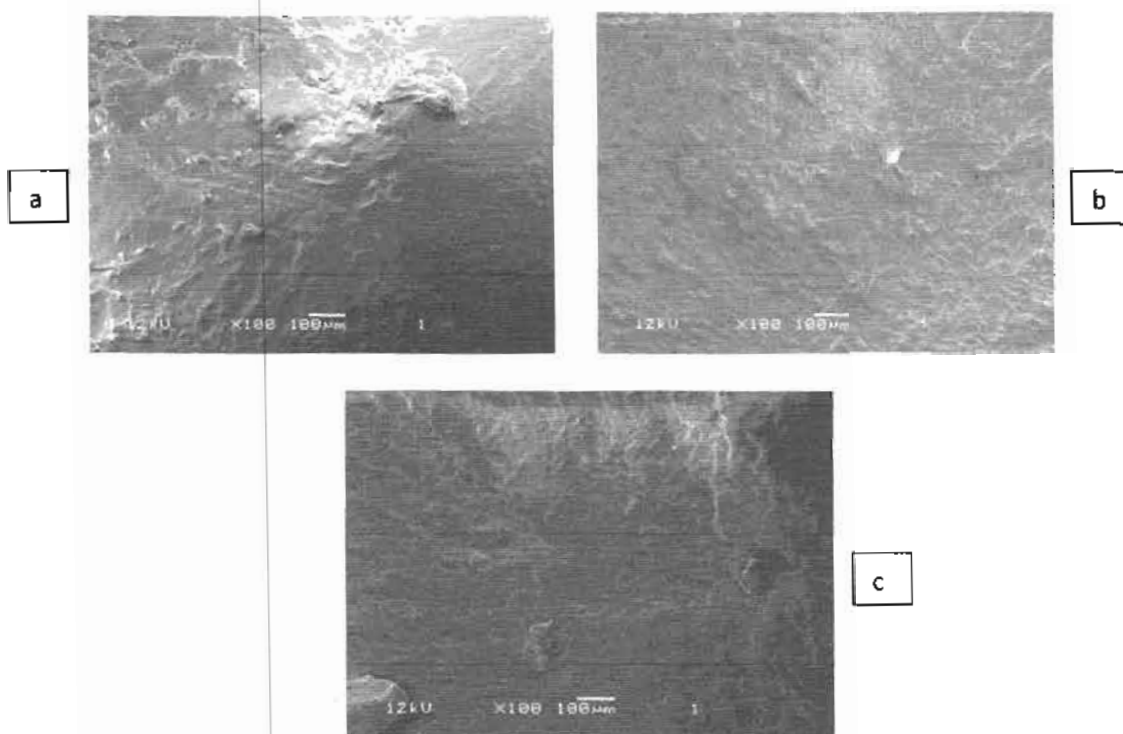


ภาพประกอบ 41 SEM ของการแตกหักของ PLA/PBS/Cblends

(a) (88/10/2) (b) (68/30/2) (c) (48/50/2)



จากภาพที่ 42 เป็นการแสดงลักษณะพื้นผิวเมื่อมีการผสมสารช่วยยืดโมเลกุล (Chain Extender) 4% ของ PLA/PBS/C blends คือ (86/10/4), (66/30/4), (46/50/4) จะเห็นว่าลักษณะพื้นผิวที่อัตราส่วนผสมที่ (46/50/4) มีความเรียบมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสมที่ (50/50) และอัตราส่วนผสมที่ (86/10/4) และ (66/30/4) ก็แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ความขรุขระลดน้อยลง ดังนั้นจึงบ่งบอกได้ว่าสารช่วยยืดยาโซโมเลกุลช่วยให้วัสดุสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น



ภาพประกอบ 42 SEM ของการแตกหักของ PLA/PBS/Cblends

(a) (86/10/4) (b) (66/30/4) (c) (46/50/4)



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ผลของการผสมและฉีดพลาสติก

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ด้วยเครื่อง injection molding พบว่าชิ้นงานที่ได้จะมีสีเข้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และเมื่อมีการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุลช่วยให้พลาสติกหลอมเข้ากันและจับตัวเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์และขึ้นรูปได้เต็มแบบ

##### 5.1.2 ผลการทดสอบเชิงกล Tensile testing

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) พบว่าค่า Young's modulus และค่า Tensile strength มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณที่ PBS ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล Chain Extender จะส่งผลให้ค่า Young's modulus และค่า Tensile strength มีค่าความเหนียวเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Chain extender ช่วยเพิ่มแรงยึดของรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ PLA และ PBS มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

##### 5.1.3 ผลทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี TGA

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PBS ไม่ได้ช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการทนต่ออุณหภูมิในการย่อยสลายให้ดีขึ้นเท่าใด และเมื่อมีการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล (Chain Extender) มีส่วนช่วยทำให้เกิดอัตราการสลายตัวช้าที่สุด

##### 5.1.4 ผลทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนด้วยวิธี DSC

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) พบว่าเมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า (Glass transition temperature,  $T_g$ ) มีค่าลดลงตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล (Chain Extender) ที่อุณหภูมิจุดหลอมเหลวและพลังงานในการหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลง



### 5.1.5 ผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ด้วยวิธี Scanning electron microscope (SEM) พบว่าพื้นผิวเริ่มมีการขรุขระและมีการแยกเฟสกันอย่างชัดเจนที่ปริมาณ (PLA50%/PBS50%) เมื่อมีการผสมสารช่วยยัดโมเลกุล (Chian Extender 4%) จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ความขรุขระลดน้อยลง ดังนั้นจึงบอกได้ว่าสารช่วยยัดสายโซ่โมเลกุลช่วยให้วัสดุเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น

### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) เมื่อนำมาผสมแล้วไปเข้าเครื่องฉีด injection molding พลาสติกบางส่วนจะมีล้นและฉีดออกมาไม่เต็มแบบในบางครั้งเนื่องจากเกิดการเย็นตัวของพลาสติกที่เร็วทำให้พลาสติกที่ฉีดไปอุดตันรูฉีดทำให้ เมื่อฉีดขึ้นงานแล้วจะล้นออกมาจากรูฉีดพลาสติกและทำให้แบบที่ได้ออกมามีพลาสติกไม่เต็มข้างในแบบ ทำให้เสียเวลาในการนำเอาพลาสติกที่ติดอยู่ในรูฉีดออกมาก่อน จึงจะสามารถทำการฉีดในครั้งต่อไปได้ และการผสมที่เครื่อง Extruder มีการฉีดออกมาที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ขั้นตอนการบดพลาสติกเพื่อนำไปผสมมีความยากเพิ่มขึ้นอีกด้วย

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองทำการฉีดพลาสติกผู้ทดลองจะค่อนข้างเสียเวลาจากการผสมบดพลาสติก และการฉีดพลาสติกโดยต้องแก้ไขจากอัตราส่วนผสมและการเพิ่มความเร็วในการฉีด เพราะอาจจะสามารถช่วยทำให้พลาสติกไม่ติดที่รูฉีดและลดเวลาที่เสียไปจากการทำการทดลองในครั้งนี้



บรรณานุกรม



### บรรณานุกรม

- เกศินี เหมวิเชียร. *polylactic acid*. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์นคร.  
<http://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics>
- พูนศักดิ์ สักกทัตติยะกุล. *พลาสติกชีวภาพ*. 9 กันยายน 2557;  
<http://www.thaigoodview.com/node/17034>,
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. *ทดสอบแรงดึง*. 13 กันยายน 2557;  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2541/tensile-test>,
- ภูมิพัฒน์ รัตนตรัยเจริญ. *พลาสติก*. 8 กันยายน 2557;  
<http://www.stou.ac.th/study/sumrit/1-56%28500%29/page4-1-56%28500%29.html>
- มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า. *เครื่องทดสอบความหนืด*. 19 ตุลาคม 2557;  
<http://www.kmutt.ac.th/p-prof/P>
- เยาวพา สุวัทธิ. *ประเภทพลาสติกชีวภาพ*. 7 กันยายน 2557;  
[http://www.siweb.dss.go.th/information/FAQ/search\\_FAQ.asp?QA\\_ID=405](http://www.siweb.dss.go.th/information/FAQ/search_FAQ.asp?QA_ID=405)
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. *พลาสติกที่ใช่มากในปัจจุบัน*. 5 กันยายน 2557;  
[http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_and\\_usage\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_and_usage_plas.html),
- All Rights Reserved. *กล้องจุลทรรศน์ Polarized Microscope*. 15 ตุลาคม 2557;  
<http://www.microscopes.in.th/199/กล้องจุลทรรศน์-polarized-microscope.html>
- e-book.ram.edu. *ความเค้น-ความเครียด*. 16 กันยายน 2557;  
[http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-6.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-6.pdf).
- L.M. Matuana. *เครื่องทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการเกิดโฟม*. 21 ตุลาคม 2557;  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407006190>
- Mold.net. *เครื่องอัดพลาสติก ( Compression Molding )*. 13 ตุลาคม 2557;  
[http://mold.net46.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id](http://mold.net46.net/index.php?option=com_content&task=view&id),
- Pantown. *เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต*. 5 ตุลาคม 2557;  
[http://www.nppointasia.com/siamrecycle/plastic\\_type.htm](http://www.nppointasia.com/siamrecycle/plastic_type.htm),



**บรรณานุกรม (ต่อ)**

Sir William Robert Grove. ข้อดี-ข้อเสีย เทคนิคการกวดอัด. 25 ตุลาคม 2557;  
<[http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem1052ar\\_ch2.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2552/ichem1052ar_ch2.pdf)>.



ประวัติย่อผู้วิจัย



## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ

อนันต์ สรสิทธิ์

วันเกิด

วันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2536

ที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 44 หมู่ 5 ต.หนองแห่น อ.กุดชุม จ.ยโสธร 35140

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านโนนทราย จ. ยโสธร

พ.ศ. 2554

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนหนองพอกวิทยาลัย จ. ร้อยเอ็ด

พ.ศ. 2558

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ

วิษุทธิ์ อรัญเสน

วันเกิด

วันที่ 4 กันยายน พ.ศ. 2536

ที่อยู่ปัจจุบัน

บ้านเลขที่ 10/1 ถนน สารคาม-วาปีปทุม ต.ตลาด อ.เมือง  
จ.มหาสารคาม 44000

## ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551

มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พ.ศ. 2554

มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พ.ศ. 2558

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

