

การปรับปรุงพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ด้วยเกลบและแป้งข้าว



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Modification of Polylactic acid (PLA) Bioplastics by Rice Husk and Rice Starch

Mr. Suwit Rukkasikorn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ด้วย กลบและแป้งข้าว
โดย	นายสุวิทย์ รักกสิกรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวีสารัช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นวดล เพ็ชรวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณ์ฐพร โทณานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาวีสารัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นวดล เพ็ชรวัฒนา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริวรรณ ศรีสรณ์ตรี)

สุวิทย์ รักกสิกรรม : การปรับปรุงพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ด้วยแกลบและแป้งข้าว (Modification of Polylactic acid (PLA) Bioplastics by Rice Husk and Rice Starch) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. สิริจุฑารัตน์ โควาริสารัช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. นวตล เพ็ชรวัฒนา, 122 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยการเพิ่มระดับความเป็นผลึก การศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการปรับปรุงการทนต่อความร้อนของ PLA ด้วยการใช้สารก่อผลึกอินทรีย์ ได้แก่ แกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า เปรียบเทียบกับ ทัลค์ ซึ่งเป็นสารก่อผลึกอนินทรีย์ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารก่อผลึกปริมาณร้อยละ 0.5-5 โดยน้ำหนัก พบว่า การเติมสารก่อผลึกอินทรีย์ปริมาณร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก ช่วยเร่งอัตราการเกิดผลึกของ PLA ให้เร็วขึ้น บ่งชี้ได้จากการเลื่อนต่ำลงของอุณหภูมิการเกิดผลึก (Cold crystallization temperature, T_{cc}) และการลดลงของครึ่งเวลาการเกิดผลึก (Crystallization half time) ซึ่งลดลงเหลือประมาณ 20 นาที นอกจากนี้ สารก่อผลึกอินทรีย์ยังเพิ่มระดับความเป็นผลึกมากถึง 4-8 เท่า เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนยังมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Heat distortion temperature, HDT ประมาณ 55-60 °C) ขณะที่การเติมทัลค์สามารถเพิ่ม HDT ได้มากถึง 135 °C อย่างไรก็ตาม การขึ้นรูปของ PLA ผสมแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ ยังต้องใช้เวลาหล่อเย็นนานถึง 5 นาที จึงนำไปสู่การศึกษาส่วนที่สอง เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและลดเวลาหล่อเย็นในแม่พิมพ์ โดยการอบอ่อนร่วมกับการใช้สารก่อผลึก พบว่า เวลาหล่อเย็นของกระบวนการฉีดขึ้นรูปลดลงเหลือ 1 นาที และสามารถเพิ่ม HDT ได้สูงจนถึง 120 °C สำหรับ PLA/Talc 1% และประมาณ 105 °C สำหรับ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% โดย HDT เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบที่นานขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับระดับความเป็นผลึก แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม HDT ให้มากกว่า 100 °C ของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% ต้องใช้เวลาอบนานถึง 90 นาที ส่วน PLA/Talc 1% ใช้เวลาเพียง 10 นาทีเท่านั้น นอกจากนี้ การเพิ่มระดับความเป็นผลึกยังช่วยเพิ่มมอดูลัสให้แก่ PLA

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670446721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POLYLACTIC ACID / RICE HUSK / RICE FLOUR / RICE STARCH / TALC / ANNEALING

SUWIT RUKKASIKORN: Modification of Poly lactic acid (PLA) Bioplastics by Rice Husk and Rice Starch. ADVISOR: SIRIJUTARATANA COVAVISARUCH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. NAWADON PETCHWATTANA, D.Eng., 122 pp.

This research aims to improve the thermal stability of Poly lactic acid (PLA) bioplastics by increasing the degree of crystallinity. The study is divided into two parts: The first part concentrates on the improvement of the heat resistance of PLA by using organic nucleating agents namely rice husk, rice flour and rice starches in comparison with talc, an inorganic nucleating agent. The influences of the various types and contents of 0.5-5 wt% nucleating agent were investigated; the addition of the organic nucleating agent of 0.5-1 wt% was found to accelerate the rate of crystallization of PLA. This was evident in the shifting down of the T_{cc} and a reduction of crystallization half time, which was reduced to about 20 minutes. Moreover, the organic nucleating agent also increased the degree of crystallinity by 4-8 times compared to that found in the pure PLA. Additionally, the thermal stability of PLA nucleated with all organic nucleating agents increased slightly to around 55-60 °C. On the other hand, the addition of talc has more pronounced effect by increasing the HDT of PLA/Talc 5% up to 135 °C, However, the cooling step of the injection process still takes time up to 5 minutes. Hence, the second part of the study was pursued to improve the thermal stability and to reduce the cooling time by annealing along with adding the nucleating agents. The cooling time was reduced to 1 minute and the HDT increased with greater annealing time, this was consistent with rise in the degree of crystallinity. The HDT of PLA with 1% talc was raised to 120 °C and approximately 105 °C for pure PLA, PLA /Rice husk 1% and PLA /Rice flour 1%. However, to increasing the HDT to more than 100 °C for pure PLA, PLA /Rice husk 1% and PLA /Rice flour 1% would take 90 minutes while that of the PLA /Talc 1% takes only 10 minutes. The degree of crystallinity was also found to increase the modulus of PLA.

Department: Chemical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช เป็นอย่างสูง สำหรับความดูแลเอาใจใส่ ตลอดระยะเวลาการศึกษาระดับปริญญาโทมาบัดนี้ รวมถึงการให้ คำปรึกษาแนะนำ และการอบรมสั่งสอนที่ดีในการทำวิจัย ตลอดจนการตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีขอ

ขอบคุณ ผศ.ดร.นพดล เพ็ชรวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม จากคณะนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับข้อแนะนำ ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และ เครื่องมือในการทำวิจัยที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย ผศ.ดร.ณัฐพร โทณานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.วิจิตรา จงวิศาล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จาก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสุดท้ายรศ.ดร. ศิริวรรณ ศรีสรณ์ดี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย จาก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับคำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ ลุล่วง

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ ขอขอบคุณความอนุเคราะห์เครื่องมือ และบุคลากร ซึ่งประกอบด้วยคุณชัยวัฒน์ สิริเบญจมาภรณ์ คุณณัฐพร ลายคราม คุณสนิ เกิดโตและคุณเรืองศักดิ์ อังคะฮาด สำหรับคำปรึกษาและความ ช่วยเหลือด้านงานวิจัย จากบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) และขอขอบคุณบริษัท อุตสาหกรรม แป้งไทย จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์แป้งข้าวเจ้าสำหรับทำการวิจัย

นอกจากนี้ ขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในห้องวิจัยพอลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และพี่ๆเพื่อนๆทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบสมาชิกทุกคนในครอบครัว สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนอย่าง เต็มที่ในการศึกษาปริญญาโทมาบัดนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics).....	5
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic Acid), PLA).....	6
2.3 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallization of polymers).....	7
2.3.1 กลไกการเกิดผลึก (Crystallization mechanisms).....	9
2.3.2 พฤติกรรมและสัณฐานผลึกของพอลิแลคติก แอซิด (Crystallization behavior and crystal polymorphism of PLA).....	10
2.4 การเพิ่มการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิด	12
2.4.1 การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้สารก่อผลึก.....	13
2.4.2 การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้แม่พิมพ์ร้อน	17
2.4.3 การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดโดยการอบอ่อน	17
2.5 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Polymer Processing)	18
2.5.1 การอัดรีด (Extrusion).....	18

2.5.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding).....	21
2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical testing)	22
2.6.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing).....	22
2.6.2 การทดสอบการกระแทก (Impact testing)	24
2.6.3 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural testing).....	25
2.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermal analysis).....	26
2.7.1 การวิเคราะห์ระดับความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential scanning calorimetry, DSC).....	26
2.7.2 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก (Crystallization half time, $t_{1/2}$).....	27
บทที่ 3 วารสารปริทัศน์.....	29
3.1 การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและระดับความเป็นผลึก ด้วยสารก่อผลึกทาลค์	29
3.2 การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและระดับความเป็นผลึก ด้วยแป้ง และสตาร์ช.....	31
3.3 การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและระดับความเป็นผลึก ด้วยแกลบ.....	34
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย	38
4.1 วัตถุดิบ	38
4.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)	38
4.1.2 ทาลค์ (Talc).....	39
4.1.3 ข้าวเจ้าบด (Rice flour).....	40
4.1.4 แป้งข้าวเจ้า (Rice starch).....	41
4.1.5 ผงแกลบ (Husk flour)	42
4.2 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	42
4.2.1 การหลอมผสม (Melt blending).....	43
4.2.2 การขึ้นรูปขึ้นงาน	46

4.2.3 การอบอ่อน (Annealing)	47
4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน	48
4.2.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)	53
4.2.6 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึก	54
บทที่ 5 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	55
5.1 ปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใส่สารก่อผลึก.....	55
5.1.1 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน	55
5.1.2 วิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดผลึก.....	70
5.1.3 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา.....	74
5.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	77
5.2 ปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน	82
5.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของ PLA/Talc 1%	83
5.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	91
5.2.3 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% PLA/Rice flour 1%	97
5.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	103
5.3 การคำนวณต้นทุนของวัตถุดิบเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์.....	109
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	110
6.1 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใส่สารก่อผลึก แกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารก่อผลึก ปริมาณร้อยละ 0.5 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	110
6.2 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน โดย ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารก่อผลึก อุณหภูมิแม่พิมพ์ เวลาการอบอ่อน และอุณหภูมิการอบอ่อน ...	111
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อ	111

รายการอ้างอิง	112
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก 1 สมบัติเชิงกายภาพของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ.....	119
ภาคผนวก 2 ราคาของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	122



สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 พลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ประเภทได้แก่ พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ และพลาสติกชีวฐาน	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแลคติก แอซิด (Lactic acid).....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของผลึกสเฟอรูล์ (ก) ลักษณะผลึกที่ได้จากกลีง POM (ข) การขยายโตขึ้นของสายโซ่ที่พับไปมาในแนวรัศมี (ค) องค์ประกอบของผลึก	9
รูปที่ 2.4 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของแผ่นลามลลา (lamellae) (ความหนาของชั้นผลึก: L_c ส่วน Mobile amorphous: L_{ma} และ ส่วน Rigid amorphous: L_{ra}).....	9
รูปที่ 2.5 แสดงส่วน Crystalline ส่วน mobile amorphous fractions (MAF) และ ส่วนrigid amorphous fractions (RAF) (รูปล่าง) และ สัดส่วนผลึกแบบ α -form ต่อปริมาณผลึกทั้งหมดของ PLA หลังผ่านอุณหภูมิคงที่ (รูปบน).....	11
รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิการเกิดผลึก ต่อความหนาแน่นของจำนวนสเฟอรูล์ จากงานวิจัยต่าง ๆ	12
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติม และเติมสารก่อผลึกหลังเย็นตัวลง.....	14
รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของทัลค์	15
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของแป้งประกอบด้วย (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพคติน.....	16
รูปที่ 2.10 ผลของการอบอ่อนต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก.....	18
รูปที่ 2.11 องค์ประกอบและช่วงต่าง ๆ ของสกรู.....	20
รูปที่ 2.12 เครื่องอัดรีด (ก) แบบสกรูเดี่ยว และ (ข) แบบสกรูคู่.....	21
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์	21
รูปที่ 2.14 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine ประกอบด้วย (ก) แม่พิมพ์ และ (ข) เครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว	22

รูปที่ 2.15 ลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียดของการดึง	23
รูปที่ 2.16 การวางชิ้นงาน (ก) แบบ Izod impact test และ (ข) แบบ Charpy impact test.....	25
รูปที่ 2.17 การทดสอบ (ก) แบบแรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) และ (ข) แบบ กระทำ 4 จุด (Four-point bending).....	26
รูปที่ 2.18 พื้นที่เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลว	27
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกสัมพันธ์กับเวลาในการเกิดผลึก	28
รูปที่ 4.1 พอลิแลคติกแอซิด (PLA).....	38
รูปที่ 4.2 ทัลค์	39
รูปที่ 4.3 ข้าวเจ้าบด	40
รูปที่ 4.4 แป้งข้าวเจ้า (Rice starch).....	41
รูปที่ 4.5 ผงแคลเซียม	42
รูปที่ 4.6 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer, Thermo Prism Pilot 3).....	43
รูปที่ 4.7 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw).....	45
รูปที่ 4.8 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine, Manumold 45e)	46
รูปที่ 4.9 ตู้อบลมร้อน (Oven, Memmert UNB 400)	47
รูปที่ 4.10 เครื่อง DSC (NETZSCH DSC 214 Polyma).....	49
รูปที่ 4.11 เครื่อง Heat distortion Tester (YASUDA No.148)	50
รูปที่ 4.12 เครื่อง Thermogravimetric Analyser (Mettler Toledo STARe system TGA1)....	51
รูปที่ 4.13 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงชนิดที่ 4 ตามมาตรฐาน ASTM.....	51
รูปที่ 4.14 เครื่อง Universal machine testing (INSTRON Instrument รุ่น 5567).....	52
รูปที่ 4.15 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (INSTRON CEAST 9050)	52
รูปที่ 4.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, JSM-6400).....	53
รูปที่ 4.17 กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ (Polarized optical microscope, Nikon LV100POL)	54

รูปที่ 5.1 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมทัลค์ ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดย น้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1 st heating).....	57
รูปที่ 5.2 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแคลเซียม ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1 st heating).....	58
รูปที่ 5.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมข้าวเจ้าบด ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1 st heating)	59
รูปที่ 5.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแป้งข้าวเจ้า ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1 st heating)	60
รูปที่ 5.5 ระดับความเป็นผลึกของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ	61
รูปที่ 5.6 ระดับความเป็นผลึกสัมพัทธ์ของ PLA ผสมสารก่อผลึกชนิดต่าง ๆ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 100 องศาเซลเซียส.....	63
รูปที่ 5.7 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Talc ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ.....	64
รูปที่ 5.8 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Rice husk ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดย น้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ.....	65
รูปที่ 5.9 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Rice flour ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดย น้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ.....	65
รูปที่ 5.10 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Rice starch ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดย น้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ.....	66
รูปที่ 5.11 อุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ	67
รูปที่ 5.12 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์และPLA /Talc ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก	68
รูปที่ 5.13 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์ แคลเซียม และPLA /Rice husk ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	69

รูปที่ 5.14 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์ ข้าวเจ้าบด และ PLA /Rice flour ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	69
รูปที่ 5.15 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์ แป้งข้าวเจ้า และ PLA /Rice starch ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	70
รูปที่ 5.16 พฤติกรรมการเกิดผลึกจาก POM ของ PLA ผสมสารก่อผลึกชนิดต่าง ๆ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 100 องศาเซลเซียส.....	72
รูปที่ 5.17 ลักษณะของทัลค์ และ แกลบบด และพื้นที่หน้าตัดของ PLA/Talc และ PLA/Rice husk จากกล้อง SEM.....	75
รูปที่ 5.18 ลักษณะของข้าวเจ้าบด และ แป้งข้าวเจ้า และพื้นที่หน้าตัดของ PLA/ Rice flour และ PLA/ Rice starch จากกล้อง SEM.....	76
รูปที่ 5.19 สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดึง (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด	79
รูปที่ 5.20 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง (ข) ความต้านทานแรงดัดโค้ง	81
รูปที่ 5.21 ความต้านทานแรงกระแทกของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ	82
รูปที่ 5.22 เทอร์โมแกรมจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส (ข) 90 องศาเซลเซียส แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของ PLA/Talc 1%.....	85
รูปที่ 5.23 เทอร์โมแกรมจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส (ข) 90 องศาเซลเซียส แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ของ PLA/Talc 1%.....	86
รูปที่ 5.24 ระดับความเป็นผลึกของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 และ 105°C.....	89
รูปที่ 5.25 อุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด ของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 และ 105°C.....	90

รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกกับ อุณหภูมิการโ่งงตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด ของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 และ105°C	91
รูปที่ 5.27 สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 105°C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดึง (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด	93
รูปที่ 5.28 ความต้านทานภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ อุณหภูมิ 40 และ90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 105°C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง(ข) ความต้านทานภายใต้แรงดัดโค้ง.....	95
รูปที่ 5. 29 ความต้านทานภายใต้แรงกระแทกของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ อุณหภูมิ 40 และ90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 105°C.....	96
รูปที่ 5.30 เทอร์โมแกรมจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วอบ อ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของ (ก) PLA บริสุทธิ์ (ข) PLA/Rice husk 1% (ค) PLA/Rice flour 1%.....	99
รูปที่ 5. 31 ระดับความเป็นผลึกของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบอบและข้าวเจ้าอบ ปริมาณ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	101
รูปที่ 5. 32 อุณหภูมิการโ่งงตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด ของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบอบและข้าวเจ้าอบ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C.....	102
รูปที่ 5.33 สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบอบและข้าวเจ้าอบ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดึง (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด.....	105
รูปที่ 5. 34 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบอบและข้าวเจ้าอบ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง (ข) ความต้านทานแรงดัดโค้ง	107

รูปที่ 5. 35 สมบัติภายใต้แรงกระทำ ของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบบดและข้าวเจ้าบด ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C..... 108



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของ PLA	38
ตารางที่ 4.2 สมบัติของทัลค์.....	40
ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกายภาพ และเชิงเคมีของแป้งข้าวเจ้า	41
ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ขึ้นรูปสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการอบอ่อน.....	43
ตารางที่ 4.5 ปริมาณ PLA และแคลบด ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร	44
ตารางที่ 4.6 ปริมาณ PLA และข้าวเจ้าบด ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร	44
ตารางที่ 4.7 ปริมาณ PLA และแป้งข้าวเจ้า ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร	44
ตารางที่ 4.8 ปริมาณ PLA และทัลค์ ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร	45
ตารางที่ 4.9 สภาวะการฉีดขึ้นรูป.....	47
ตารางที่ 4.10 สภาวะการอบอ่อนของแต่ละสูตร	48
ตารางที่ 5.1 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมทัลค์	57
ตารางที่ 5.2 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแคลบ บด.....	58
ตารางที่ 5.3 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมข้าวเจ้า บด.....	59
ตารางที่ 5.4 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแป้ง ข้าวเจ้า.....	60
ตารางที่ 5.5 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA/Talc 1%	87
ตารางที่ 5.6 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 105 °C ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA/Talc 1%	88
ตารางที่ 5.7 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC ของ PLA บริสุทธิ์ หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C	99

ตารางที่ 5.8 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC ของ PLA/Rice husk 1% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C 100

ตารางที่ 5.9 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC ของ PLA/Rice flour 1% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C..... 100

ตารางที่ 5.10 สรุปต้นทุนผลิตภัณฑ์ของสูตรที่เติมสารก่อผลึก..... 109



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็นปัญหาขยะล้นเมือง ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ ระบุว่า ขยะที่เกิดขึ้นในประเทศนั้นมีปริมาณเฉลี่ย 16 ล้านตันต่อปี ส่วนใหญ่เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกมากถึงร้อยละ 30 แต่สามารถกำจัด หรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพียงร้อยละ 12 ส่วนที่เหลือจะถูกกำจัดโดยการเผาทิ้ง กอทิ้งในบ่อดินเก่า[1] พลาสติกจากปิโตรเคมีเหล่านี้ต้องใช้ระยะเวลาย่อยสลายนานหลายร้อยปี ทำให้ผู้คนทั่วโลกต่างตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น จึงนำไปสู่การคิดค้นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นการจะแก้ปัญหาขยะพลาสติกอย่างยั่งยืน คือ การพัฒนาวัสดุหรือพลาสติกที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable plastics) มาใช้ทดแทน โดยเฉพาะพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เนื่องจากสามารถผลิตได้จากพืชทดแทน เช่น อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น มีความใส และสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ PLA ยังมีราคาสูงกว่าเมื่อเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเคมี มีอัตราการเกิดผลึกช้า ทำให้ใช้เวลาขึ้นรูปนาน และมีระดับความเป็นผลึกต่ำ ส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ

การใช้งาน PLA ยังสามารถขยายตัวได้อีกมากในอนาคต หากสามารถปรับแก้ไขข้อเสียที่เป็นข้อจำกัดสถานะการใช้งาน เช่น PLA จะเริ่มแปรสภาพเสียรูปทรงที่อุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส และเสี่ยงต่อการแตกหักได้ง่ายในระหว่างการใช้งาน การขนส่ง และการเก็บรักษา ปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมาก พยายามปรับปรุงข้อจำกัดของ PLA ให้มีสมบัติเชิงกล แข็งกายภาพ และเชิงความร้อนให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ การปรับปรุงประกอบด้วยการเพิ่มความเหนียว ซึ่งมีหลากหลายวิธีเช่น การใส่ยาง Acrylate ยางธรรมชาติ และสารปรับสภาพพลาสติก (Plasticizer) เป็นต้น เพื่อลดความเปราะ และอีกหนึ่งปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการปรับปรุง คือ การเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ซึ่งมีหลายวิธี เช่น การเติมสารเสริมแรง การทำ cross-linking การเพิ่มระดับความเป็นผลึก จากงานวิจัยหลายชิ้นก่อนหน้าพบว่า การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของ PLA เป็นวิธีการที่ง่าย และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน โดยมี 3 วิธีที่ใช้ร่วมกันในงานวิจัยนี้ คือ การเติมสารก่อผลึก (Nucleating agent) การใช้แม่พิมพ์ร้อน และการอบอ่อน (Annealing) PLA เป็นพอ

ลิเมอร์ที่มีปริมาณผลึกต่ำภายใต้ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์เย็นที่นิยมใช้โดยทั่วไป เนื่องจาก PLA มีอัตราการเกิดผลึกช้าที่อัตราการเย็นตัวสูง ดังนั้นจึงทำให้ค่าอุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด (Heat distortion temperature ,HDT) ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ความต้านทานการเสียรูปภายใต้แรงกดที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดย PLA มีค่าเพียง 55 องศาเซลเซียส โดยสารก่อผลึกที่นำมาประยุกต์ใช้ คือ แกลบ และแป้งข้าว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลัก และผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางการเกษตรที่หาได้ง่าย และมีมูลค่าต่ำ ดังนั้นจึงเห็นว่าการวิจัยนี้อาจช่วยเพิ่มบทบาท และมูลค่าของแกลบ และแป้งข้าว โดยการนำมาใช้เป็น Nucleating Agent และเปรียบเทียบกับ Talc ซึ่ง มักใช้เป็นสารก่อผลึกอินทรีย์ในพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมและพลาสติกชีวภาพ อย่างไรก็ตาม การใส่ Nucleating Agent เพียงอย่างเดียวไม่สามารถเพิ่มปริมาณผลึกได้ แต่ต้องมีสถานะที่มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดผลึกด้วย นั่นคือการใช้แม่พิมพ์ร้อน ร่วมกับการอบอ่อนหลังการขึ้นรูป

งานวิจัยนี้จึงมุ่งปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนเพื่อแก้ไขปัญหาระดับความเป็นผลึกต่ำ อัตราการเกิดผลึกช้าของ PLA โดยผสม PLA กับสารก่อผลึก (Nucleating agent) ได้แก่ ผงแกลบ และแป้งข้าวเจ้า ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ พร้อมเปรียบเทียบประสิทธิภาพสารก่อผลึกอินทรีย์ทั้งสองนี้กับสารก่อผลึกอนินทรีย์ คือ การใช้ทัลค์ (Talc) เป็นสารก่อผลึก เพื่อเพิ่มระดับความเป็นผลึก และลดระยะเวลาในการตกผลึกของ PLA รวมทั้งผลต่อเนื่องด้านเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA

1.2 วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนของ PLA ด้วยการปรับปรุงพฤติกรรมการณ์การเกิดผลึกของ PLA โดยใช้ผงแกลบ แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ เป็นสารก่อผลึก

2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผงแกลบ แป้งข้าวเจ้า กับสารก่อผลึกทัลค์ ในด้านผลึกระดับความเป็นผลึก ระยะเวลาการเกิดผลึก และเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA

1.3 ขอบเขตโครงการงานวิจัย

3.1 พลาสติกชีวภาพที่ใช้คือ PLA เกรดฉีด (3052 D)

3.2 สารก่อผลึกอนินทรีย์ที่ใช้คือ Talc ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 ไมครอน

3.3 สารก่อผลึกอินทรีย์ที่ใช้คือ แกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 70-80 ไมครอน

3.4 ปริมาณสารก่อผลึกแต่ละชนิดที่ใช้ คือร้อยละ 0.5-5 โดยน้ำหนัก

3.5 การหลอมผสม PLA/กลลบบด PLA/ข้าวเจ้าบด PLA/แป้งข้าวเจ้าและPLA/ทัลค์ ใช้เครื่องอัดรีด แบบสกรูคู่

3.6 การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้วิธีการฉีดขึ้นรูป ด้วยเครื่องฉีด (Injection molding machine) ที่ปรับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้เหมาะสม

3.7 การประเมิน และเปรียบเทียบพอลิแลคติกแอซิดที่เติมกลลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ ครอบคลุมด้านสมบัติเชิงความร้อน โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารด้วยความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) เพื่อวิเคราะห์

3.7.1 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g)

3.7.2 อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m)

3.7.3 อุณหภูมิการก่อผลึก (Crystallization temperature, T_c)

3.7.4 ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity)

3.7.5 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก (Crystallization half-time, $t_{1/2}$)

3.7.6 อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature, T_d)

3.8 ทดสอบการโก่งตัวด้วยความร้อนด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิการโก่งตัวภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT) เพื่อวิเคราะห์

3.8.1 อุณหภูมิการโก่งตัวภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT)

3.9 ประเมิน และเปรียบเทียบพอลิแลคติกแอซิดที่เติมกลลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ ด้านสมบัติเชิงกล เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารก่อผลึกแต่ละชนิดโดยตรวจวัด

3.9.1 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง (Flexural Properties, ASTM D 790)

3.9.2 สมบัติภายใต้แรงดึง (Tensile Properties, ASTM D 638)

3.9.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทก (Impact Properties, ASTM D 256)

3.10 การศึกษาพฤติกรรมผลการตกผลึกโดยใช้ Polarized Optical Microscope, POM และ สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

4.1 องค์ความรู้ และข้อมูลเปรียบเทียบอิทธิพลของสารก่อผลึกชนิดอินทรีย์ต่อระดับความเป็นผลึก ระยะเวลาในการเกิดผลึกของ PLA และเสถียรภาพทางความร้อน

4.2 ผู้บริโภคได้ใช้บรรจุภัณฑ์อาหาร ที่มีความปลอดภัยเนื่องจากใช้สารเติมแต่งที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมาจากแหล่งอาหารและทรัพยากรหมุนเวียน



บทที่ 2

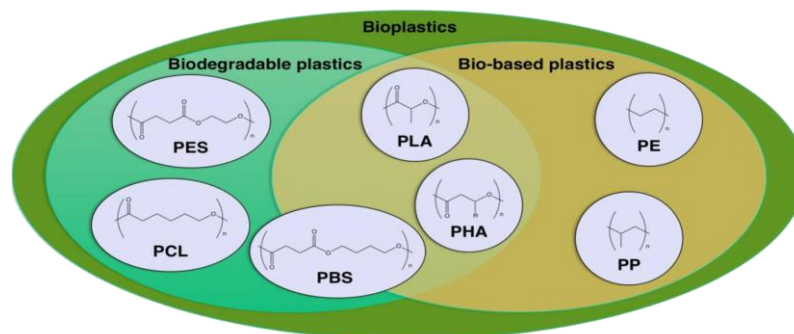
ทฤษฎี

2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)

พลาสติกชีวภาพแบ่งออกตามสารตั้งต้นเป็น 2 ประเภท [2] คือ

(ก) พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) คือ พลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยจุลินทรีย์ หรือกระบวนการทางเคมี ซึ่งใช้วัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้ (Renewable resource) หรือจากปิโตรเลียม (Petroleum resources) เป็นสารตั้งต้น พลาสติกเหล่านี้สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เป็นผลให้พลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และมวลชีวภาพใหม่(Biomass) เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายตามมาตรฐานของ ISO 17088 หรือ EN 13432 หรือ ASTM D-6400 เป็นต้น ตัวอย่างของพลาสติกกลุ่มนี้เช่น Poly (lactic acid) (PLA) Polybutylene succinate (PBS) poly(ethylene succinate) (PES) และ Polycaprolactone (PCL) [3, 4]

(ข) พลาสติกชีวฐาน (Bio-based) คือ พลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยจุลินทรีย์ หรือกระบวนการทางเคมี ซึ่งใช้วัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้ (Renewable resource) เพียงอย่างเดียว พลาสติกที่ได้บางชนิดไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น, Bio- poly(ethylene) (PE) Bio-poly(propylene) (PP) ส่วนพลาสติกที่ย่อยสลายได้ เช่น Polyhydroxyalkanoate (PHA)

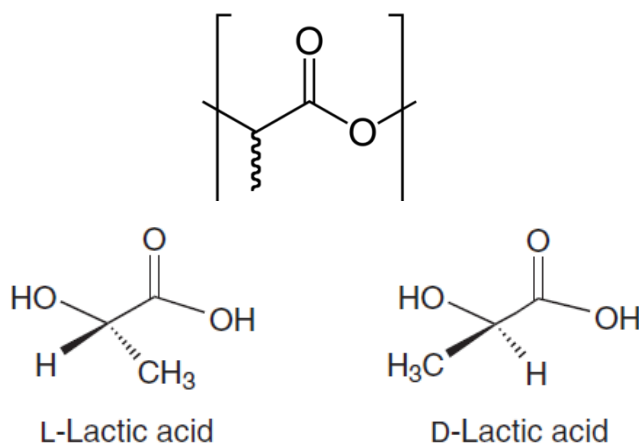


รูปที่ 2.1 พลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ประเภทได้แก่ พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ และ พลาสติกชีวฐาน [4]

2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly (lactic Acid), PLA)

พอลิแลคติกแอซิด เป็นพลาสติกประเภท เทอร์โมพลาสติกชนิดอะลิฟาติกสายโซ่ตรง (linear aliphatic thermoplastic polyester) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้ เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง กระบวนการผลิตพอลิแลคติกแอซิดเริ่มจากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ โดยการหมักบ่มข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง ด้วยจุลินทรีย์เฉพาะ เพื่อย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ของแป้ง และน้ำตาลเป็นกรดแลคติก (Lactic acid, $C_3H_6O_3$) เพื่อใช้เป็นมอนอเมอร์ในขั้นตอนการสังเคราะห์ PLA พอลิเมอร์ โดยกระบวนการสังเคราะห์ที่นิยมใช้คือ การเปิดวง (ring-opening polymerization) ของแลคไทด์ (Lactide) PLA มีหน่วยซ้ำดังแสดงในรูปที่ 2.2 PLA ที่จำหน่ายเชิงการค้าในปัจจุบัน มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymers) ของ poly(L-lactic acid) (PLLA) และ poly(D,L-lactic acid) (PDLA) ซึ่งอัตราส่วนของมอนอเมอร์ แบบ L-isomer และ D-isomer สามารถมีผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของ PLA เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และปริมาณความเป็นผลึก โดย PLA ที่มี PLLA เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 90 มีโอกาสที่จะเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) แต่ถ้ามี PLLA น้อยกว่านั้น จะจัดเป็นพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน (Amorphous) และเป็นผลให้อุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว และปริมาณความเป็นผลึกของ PLA ลดลงกับการลดลงของปริมาณ PLLA [5]

PLA เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้งานอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีลักษณะใส มันเงา จึงเป็นจุดเด่นที่นิยมนำ PLA มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร และเครื่องดื่ม ขึ้นรูปง่าย เพราะมีจุดหลอมเหลวไม่สูงมาก และที่สำคัญคือ ไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในขณะเดียวกัน PLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ 55-65 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิห้อง จึงส่งผลให้ PLA มีความเปราะ นับเป็นปัญหาหลักของ PLA ที่ยังคงได้รับแก้ไข นอกจากนี้ PLA ยังมีปัญหาการตกผลึกช้า ทำให้ต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนาน และระดับความเป็นผลึกต่ำ ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน ดังนั้นเมื่อ PLA ได้รับความร้อนถึงเพียง 50 องศาเซลเซียส PLA ก็แปรสภาพ และเสียรูปทรง จึงเป็นอีกหนึ่งปัญหาหลักของ PLA ที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไข เพื่อลดข้อจำกัดในการใช้งาน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแลคติก แอซิด (Lactic acid)

2.3 การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallization of polymers)

การเกิดผลึกของพอลิเมอร์เป็นกระบวนการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลให้เป็นระเบียบ โดยเกิดจากหลายสาเหตุเช่น เมื่อพอลิเมอร์ที่ถูกหลอมเหลวเย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) สายโซ่พอลิเมอร์จะเริ่มเคลื่อนที่เข้ามารวมตัวกันเกิดเป็นจุดก่อผลึกบริเวณเล็ก ๆ กระจายอยู่ทั่วเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว จากนั้นสายโซ่โมเลกุลยาวที่อยู่อย่างไม่เป็นระเบียบจะเริ่มเคลื่อนที่จัดเรียงเป็นระเบียบในรูปแบบโดยมีสายโซ่พับไปมา (chain-folded) เรียกว่า แผ่นลามลลา (lamella) ซึ่งระหว่างแผ่นจะยึดกันด้วยส่วนอสัณฐานที่ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ Mobile amorphous phase (MAP) และ Rigid amorphous fraction (RAF) [5] เรียกว่า Tie molecule หรือ Tie chain แล้วขยายโตขึ้นในแนวรัศมี กลายเป็นผลึกลักษณะทรงกลมเรียกว่า สเฟอรูไลต์ (Spherulites) [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.3-2.4 นอกจากนั้นยังมีการดึงยึดด้วยแรงเชิงกล และการระเหยตัวทำละลาย ด้วยที่เป็นสาเหตุของการเกิดผลึก

การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดลักษณะสัณฐานที่มีระดับความเป็นผลึกแตกต่างกัน แบ่งตามสัดส่วนของปริมาณความเป็นผลึก สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบผลึก (Crystalline) แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีสายโซ่โมเลกุลลักษณะเส้นยาวไม่พับเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักมีการจัดเรียงสายโซ่แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) คือมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) หรือส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ และส่วนที่เป็นผลึก (crystals) หรือส่วนที่เป็นระเบียบ เช่น PLA PP PE และPET เป็นต้น

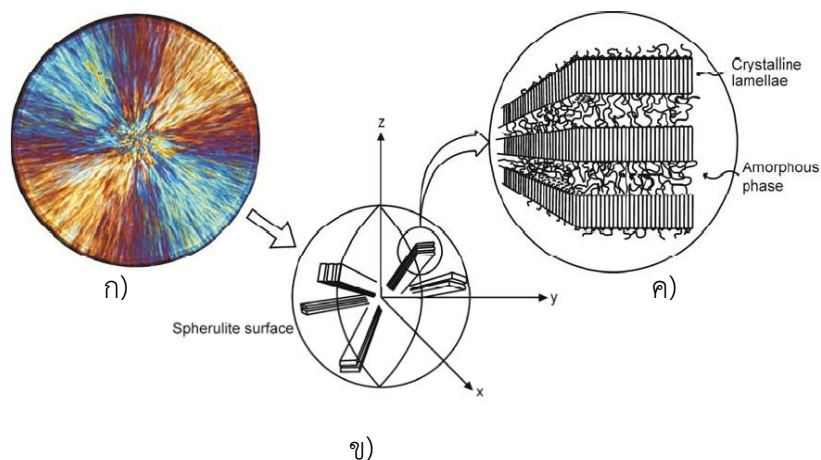
PLA จัดเป็นพอลิเมอร์ทั้งแบบกึ่งผลึก และแบบอสัณฐาน โดยขึ้นกับลักษณะโครงสร้างทางเคมี และประวัติทางความร้อน สำหรับ PLLA ที่นิยมใช้นั้นเป็นแบบกึ่งผลึก มีระดับความเป็นผลึกสูงสุดประมาณร้อยละ 40 สามารถเกิดผลึกได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างประมาณ 95-105 องศาเซลเซียส ในระบบสารเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) PLA มีจุดก่อผลึก (nuclei) ค่อนข้างน้อย และมีอัตราการเติบโตของผลึกช้ามาก ทำให้ต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนาน ปัจจุบันจึงมีความพยายามจะพัฒนาและปรับปรุงปัญหาการตกผลึกช้า และระดับความเป็นผลึกต่ำ ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อนของ PLA [6, 7] โดยการเพิ่มจำนวนจุดก่อผลึกให้หนาแน่นขึ้น (nucleation density) เพื่อเหนี่ยวนำการเกิดจุดก่อผลึกให้มีจำนวนมาก ด้วยวิธีการเติมสารก่อผลึก (Nucleating agent) หรือร่วมกับการเติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticizer)[8] เพื่อช่วยให้สายโมเลกุลเกิดการเคลื่อนขยับได้ง่าย ดังนั้นการเติมสารก่อผลึกเป็นวิธีหนึ่งที่น่าจะนิยมใช้ในการปรับปรุงพฤติกรรมเกิดผลึกของพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเกิดผลึกช้า

ปัจจัยที่มีผลต่อความเป็นผลึกของพอลิเมอร์

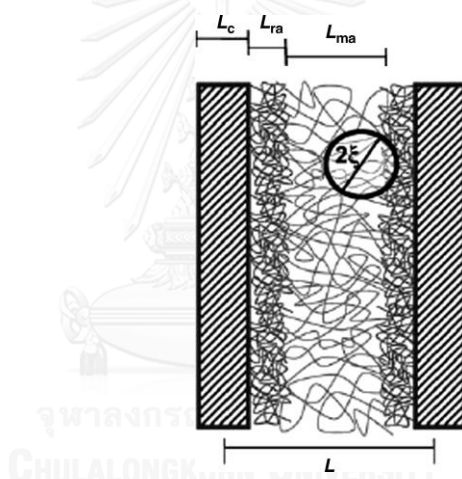
(ก) ลักษณะการจัดเรียงตัว และขนาดหมู่แทนที่ด้านข้างสายโซ่ (Side-chain substitution groups) โดยพอลิเมอร์ที่มีหมู่แทนที่ขนาดใหญ่ การจัดเรียงตัวเป็นผลึกจะไม่ค่อยสมบูรณ์

(ข) น้ำหนักโมเลกุล ความยาวของสายโซ่ และความเป็นกิ่งสาขา มักมีผลต่ออัตราการเกิดผลึก เนื่องจากพอลิเมอร์สายยาว หรือมีกิ่งมาก สายโซ่จะจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ยาก ดังนั้นผลึกจึงเกิดได้ช้า

(ค) สภาวะของกระบวนการผลิต เช่น อัตราการเย็นตัว การดึงยืด และอุณหภูมิ เป็นสาเหตุให้เกิดผลึกที่มีสัณฐานต่างกัน โดยอัตราการเย็นตัวช้าและอุณหภูมิแม่พิมพ์สูง จะเกิดผลึกที่สมบูรณ์ และมีชั้นผลึกหนา ส่วนการดึงยืดมีผลต่อการจัดเรียงสายโซ่ที่ต่างไปจากการหลอมเหลวแล้วเย็นตัว ซึ่งทำให้ได้ผลึกที่มีความเฉพาะ



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของผลึกสเฟอรูลไลท์ (ก) ลักษณะผลึกที่ได้จากก้อน POM (ข) การขยายโตขึ้นของสายโซ่ที่พับไปมาในแนวรัศมี (ค) องค์ประกอบของผลึก



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบโครงสร้างผลึกของแผ่นลามลลา (lamellae) (ความหนาของชั้นผลึก: L_c ส่วน Mobile amorphous: L_{ma} , และ ส่วน Rigid amorphous: L_{ra}).

2.3.1 กลไกการเกิดผลึก (Crystallization mechanisms)

กระบวนการเกิดผลึกประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การเกิดจุดก่อผลึก (Nucleation) และการเติบโตของผลึก (Crystals growth) [9-11]

2.3.1.1 การเกิดจุดก่อผลึก (Nucleation) เป็นกระบวนการเริ่มต้นในการสร้างผลึกเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลงต่ำกว่า T_m สายโซ่โมเลกุลจะมารวมตัวกัน เป็นกลุ่ม (cluster) หรือจุด

เล็กๆ หลายจุดเรียกว่า จุดก่อผลึก หรือจุดนิวเคลียส (Nuclei) กระบวนการเกิดจุดก่อผลึก แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

ก) การเกิดจุดก่อผลึกในสารเอกพันธ์ (Homogeneous nucleation) เป็นการเกิดจุดก่อผลึกด้วยตัวของสารเอง เกิดกระจายแบบสุ่ม เมื่อถูกทำให้เย็น (Cooling) หรือมีการระเหย (Evaporation) การเกิดผลึกใช้ระยะเวลาานาน ผลึกมีขนาดใหญ่

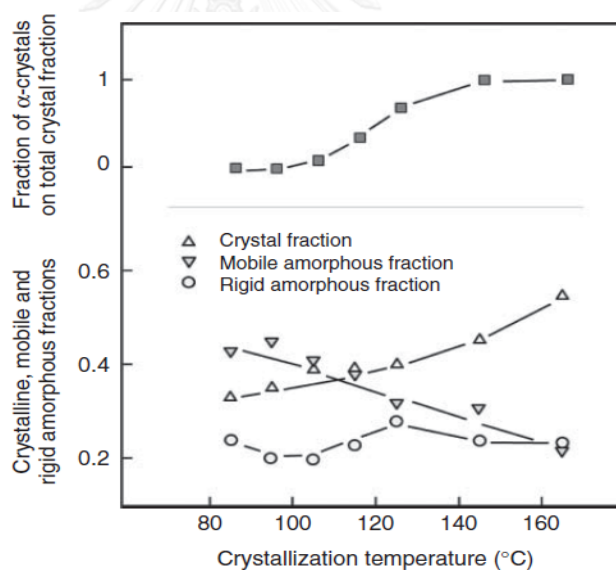
ข) การเกิดจุดก่อผลึกในสารวิวิธพันธ์ (Heterogeneous nucleation) การเกิดจุดก่อผลึกต้องอาศัยวัสดุเจือปนเป็นเฟสที่สอง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำในการเกิดผลึก มักเริ่มเกิดผลึกบนบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟส สามารถเกิดผลึกได้ง่าย และเร็วกว่าการเกิดจุดก่อผลึกในสารเนื้อเดียว อีกทั้งยังขนาดผลึกเล็ก และมีความหนาแน่นสูง ตัวอย่างของวัสดุเจือปน เช่น ผงสี (Dyes) สารตัวเติม (fillers) และสารก่อผลึก (Nucleating agent)

2.3.1.2 การเติบโตของผลึก (Crystals growth) หลังการเกิดจุดก่อผลึกสายโซ่โพลิเมอร์ของพอลิเมอร์จะพับไปมาเป็นลักษณะแผ่น lamellae รอบจุดก่อผลึก ทำให้เกิดผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในแนว 3 มิติ ผลึกเหล่านี้จะหยุดโต เมื่อชนกับผลึกข้างเคียง

2.3.2 พฤติกรรมและสัณฐานผลึกของพอลิแลคติก แอซิด (Crystallization behavior and crystal polymorphism of PLA)

PLA เป็นพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเทอร์ (polyesters) จึงมีโครงสร้างผลึกหลักคล้ายกัน แบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ คือ α -, β -, γ -, และ ϵ - โดยผลึกแบบ α -form เป็นผลึกที่พบมากที่สุด เนื่องจากเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อพอลิเมอร์ถูกหลอมเหลว หรือเย็นตัว [12, 13] และมีความเสถียรมากกว่าผลึกแบบ β - ซึ่งถูกหลอมที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ขณะที่ผลึกแบบ α - ต้องใช้อุณหภูมิการหลอมเหลวถึง 185 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นผลึกแบบ α -form ยังสามารถแบ่งย่อยเป็นแบบ α' ซึ่งเกิดผลึกช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส ขณะหลอมเหลว หรือเย็นตัว [14-16] และ α'' เป็นผลึกที่เกิดขึ้นช่วงต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว ภายใต้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [17] ส่วนผลึกแบบ β -form เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการ Hot-drawn melt-spun หรือ solution-spun เป็นเส้นใย PLA เป็นต้น [18, 19] สุดท้ายผลึกแบบ γ -, และ ϵ - นั้นเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยาก และต้องใช้สภาวะจำเพาะ

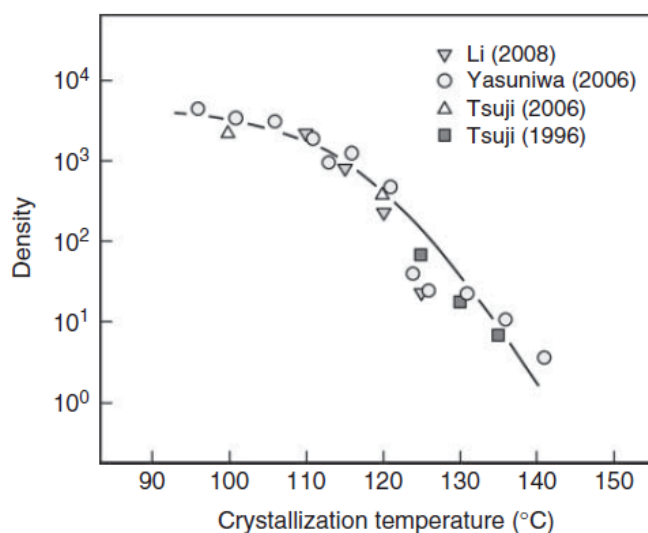
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ PLA ส่วนใหญ่เป็นผลเนื่องจาก ประวัติทางความร้อนของ PLA ซึ่งจากการศึกษาโครงสร้างผลึกผ่านกระบวนการเกิดผลึกที่อุณหภูมิคงที่ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ (Isothermal cold-crystallization) [20] พบว่า PLA ประกอบด้วยโครงสร้าง 3 ส่วน คือส่วนผลึก ส่วนอสัณฐานที่เคลื่อนที่ได้ และเคลื่อนที่ไม่ได้ จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความเป็นผลึกแบบ α - เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้น โดยเริ่มเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิช่วง 110-120 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เรียกว่า การเกิดผลึกที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete change of crystallization) ขณะเดียวกันสัดส่วนของ MAF และ RAF ลดลง อาจอธิบายได้ว่า ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส จะเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ หรือเป็นผลึกแบบ α' - ที่ยังมีส่วน MAF และ RAF ในสัดส่วนที่มาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกให้สูงขึ้น จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก เป็นผลให้ผลึกแบบ α - มีสัดส่วนลดลงจนเหลือแต่ผลึกที่มีความสมบูรณ์หรือผลึกแบบ α - ซึ่งสะท้อนจากการลดลงของส่วนอสัณฐานทั้งแบบ MAF และ RAF



รูปที่ 2.5 แสดงส่วน Crystalline ส่วน mobile amorphous fractions (MAF) และ ส่วน rigid amorphous fractions (RAF) (รูปล่าง) และ สัดส่วนผลึกแบบ α -form ต่อปริมาณผลึกทั้งหมดของ PLA หลังผ่านอุณหภูมิกงที่ (รูปบน)

นอกจากนั้น อุณหภูมิการเกิดผลึกยังมีผลต่ออัตราการเกิดผลึก (nucleation rate) ของ PLA โดยวิเคราะห์จากความหนาแน่นของจำนวนสเฟอรูลิต์ ซึ่งถูกวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึกช่วง 95-

140 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [20] พบว่า ความหนาแน่นของผลึกเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเกิดผลึกลดลง ส่วนช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 95 องศาเซลเซียสไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากผลึกมีความหนาแน่นสูงมากจนนับไม่ได้ ขณะเดียวกันการเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึก ยังส่งผลให้ผลึกมีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้น แต่จุดก่อผลึกหรือจำนวนสเฟอไรต์ลดลง [21]



รูปที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิการเกิดผลึก ต่อความหนาแน่นของจำนวนสเฟอไรต์ จากงานวิจัยต่าง ๆ

2.4 การเพิ่มการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิด

PLA เป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีระดับความเป็นผลึกต่ำภายใต้ขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์อุณหภูมิเย็นที่ถูกต้องโดยทั่วไป เนื่องจาก PLA มีอัตราการเกิดผลึกช้า ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปที่มีการลดความร้อนอย่างรวดเร็วหรือมีอัตราการเย็นตัวสูง ส่งผลให้ผลึกของ PLA ไม่สามารถสร้างได้ทัน หรือมีความสมบูรณ์ของผลึกต่ำ จึงส่งผลให้อุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด (Heat distortion temperature, HDT) ที่เป็นสมบัติเชิงความร้อนสำคัญอย่างหนึ่งของพอลิเมอร์ ซึ่งขึ้นกับระดับความเป็นผลึกและลักษณะโครงสร้างผลึก โดยสมบัตินี้เป็นค่าบ่งชี้ความต้านทานการเสียดรูปภายใต้แรงกดที่อุณหภูมิต่างๆ โดย PLA บริสุทธิ์ มีค่าเพียง 55 องศาเซลเซียสเท่านั้น อีกทั้งระดับความเป็นผลึกยังมีผลต่อสมบัติเชิงกล กล่าวคือถ้า PLA ถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ สายโซ่จะใช้เวลาในการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ โครงสร้างผลึกจึงมีความสมบูรณ์และระดับความเป็นผลึกสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรง (Strength) และความแกร่ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น แต่พอลิเมอร์จะมีความเปราะ

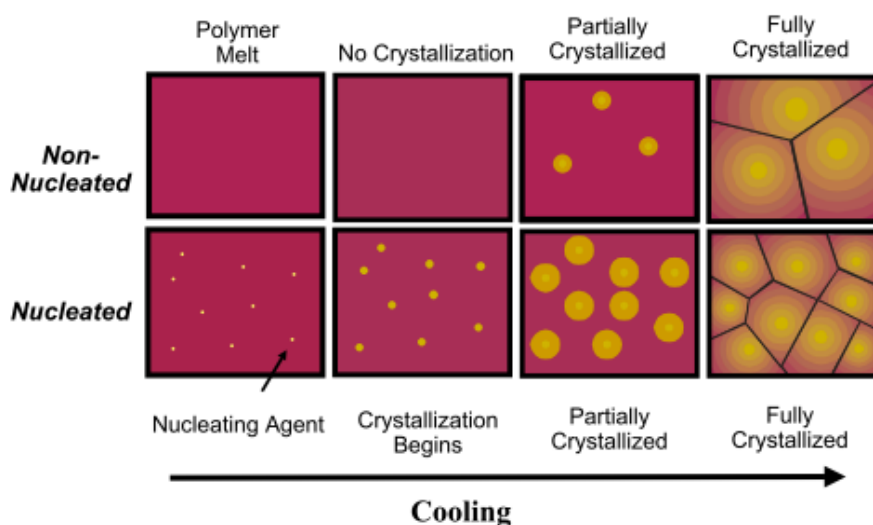
(Brittleness) ในทางตรงกันข้ามถ้า PLA ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจะเป็นแบบอสัณฐาน เป็นผลให้ความแข็งและความแกร่งลดลง แต่ความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น

ปัญหาด้านเสถียรภาพทางความร้อนจึงเป็นสิ่งที่ถูกนำมาปรับแก้เป็นอันดับต้น เพื่อลดข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ทนความร้อน โดยวิธีการที่นิยมและมีประสิทธิภาพคือ การเติมสารก่อผลึก เพื่อเพิ่มจุดก่อผลึก (nuclei) ในกระบวนการเกิดผลึกของ PLA และการเพิ่มอัตราการอัตราการเกิดผลึกให้สูงขึ้น ด้วยการควบคุมอัตราการเย็นตัวของแม่พิมพ์ให้ลดลง โดยการใช้แม่พิมพ์ร้อน ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเกิดผลึก นอกจากนั้นยังเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนร่วมกับกระบวนการอบอ่อนหลังการขึ้นรูปด้วย

2.4.1 การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้สารก่อผลึก

เนื่องจากอัตราการเกิดผลึกของ PLA ค่อนข้างช้าสำหรับใช้งานในเชิงการค้า จึงจำเป็นต้องปรับปรุงเพื่อให้ PLA มีระดับความเป็นผลึกสูงขึ้น หรือเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งผลึก หลังผ่านกระบวนการขึ้นรูปเช่น การฉีด การเป่า และการอัดรีด เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์จะถูกลดความร้อนอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิหลอมเหลวลงมาต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว จึงเป็นข้อเสียให้ PLA มีระดับความเป็นผลึกต่ำ ดังนั้น การแก้ไขสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนจุดก่อผลึกสำหรับการเกิดผลึก โดยการใส่สิ่งเจือปนที่ทำหน้าที่เป็นจุดก่อผลึกเพื่อเหนี่ยวนำสายโซ่ให้มาจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบได้เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยสิ่งเจือปนที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกอย่างแพร่หลายคือ สารก่อผลึก (Nucleating agent) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ สารก่อผลึกอินทรีย์ เช่น ทัลค์ แคลเซียมคาร์บอเนต และไมกา เป็นต้น ส่วนสารก่อผลึกอินทรีย์ เช่นซอร์บิทอล (Sorbitol) และ แป้ง เป็นต้น

สารก่อผลึกที่ดีควรมีลักษณะเป็นวัสดุขนาดอนุภาคเล็กที่ยังคงความเป็นของแข็ง แม้พอลิเมอร์ถูกหลอมเหลว มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่การเกิดผลึกบนผิวสัมผัส



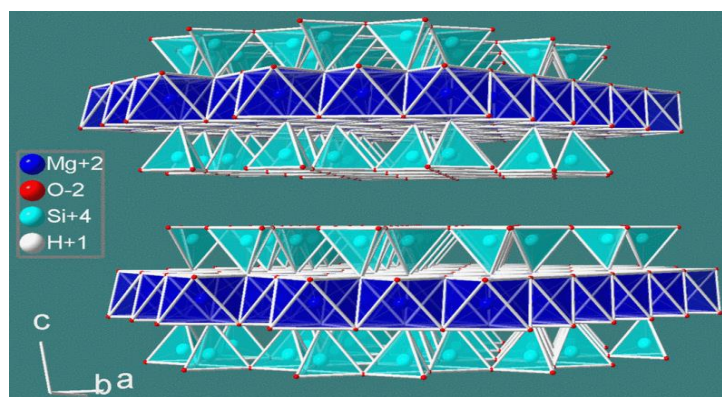
รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติม และเติมสารก่อผลึกหลังเย็นตัวลง [22]

2.4.1.1 สารก่อผลึกอนินทรีย์ (Inorganic nucleating agent)

ก.) ทัลค์ (Talc)

ทัลค์เป็นแร่ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยแมกนีเซียมซิลิเกต (Magnesium silicate) เป็นส่วนใหญ่ สูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $Mg_3Si_3O_{10}(OH)_2$ โดยมีสัดส่วนของ MgO 3.1.7% SiO_2 63.5% และ H_2O 4.8% โครงสร้างผลึกของ Talc มีลักษณะเป็นชั้นๆ (layers) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีชั้นของ $(Mg_{12}O_{12}H_4)$ ถูกประกบอยู่ระหว่างชั้นของ (SiO_2) แต่ละชั้นยึดเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวอ่อนๆ จึงทำให้ Talc มีลักษณะลื่น เมื่อถูหรือนวด Talc จึงถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในการทำแป้งสำหรับเด็ก [22, 23] มีค่าความแข็งต่ำมาก (Mohs hardness=1) ความหนาแน่น 2.75 กรัม/ซม³ ปัจจุบัน Talc ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ เครื่องสำอาง สี และพลาสติก เป็นต้น

การผสมทัลค์กับพลาสติกนิยมใช้ทัลค์อนุภาคแบบแผ่น ซึ่งช่วยให้พลาสติกมีความทนแรงดัดโค้ง ลดการหดตัวหรือบิดตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิการโก่งตัวภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT) สูงขึ้น มีหลายงานวิจัย [8, 10, 24] ที่ใช้ Talc เป็นสารก่อผลึกในพอลิเมอร์ เนื่องจาก Talc มีประสิทธิภาพช่วยลดระยะเวลาก่อผลึก ทำให้อัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น Talc มีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย



รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกของทัลค์ [25]

ข.) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์มีสูตรทางเคมีคือ CaCO_3 แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ CaCO_3 ธรรมชาติ เช่น ชอล์ก (Chalk) และหินปูน (Limestone) และ CaCO_3 สังเคราะห์ที่เกิดจากการนำปูนขาวมาผ่านกระบวนการตกตะกอน ทำให้ได้ CaCO_3 ที่มีความบริสุทธิ์ และสมบัติการดูดซับพลาสติกไซเซอร์ตัวอื่นได้สูงกว่าจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นด้วย CaCO_3 เป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มาก ทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สารเคลือบผิว เป็นต้นเนื่องจากมีความขาวสูงประมาณ 95-96% ค่าความแข็งต่ำจึงไม่เกิดการขีดสีต่ออุปกรณ์ ขนาดอนุภาคเล็ก ไม่เกาะตัวเป็นก้อน อีกทั้งเมื่อนำมาผสมกับพลาสติกจะช่วยลดการหดตัวของชิ้นงานหนา เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน รวมถึงความสวยงามจากผิวเงามันที่ได้ [26]

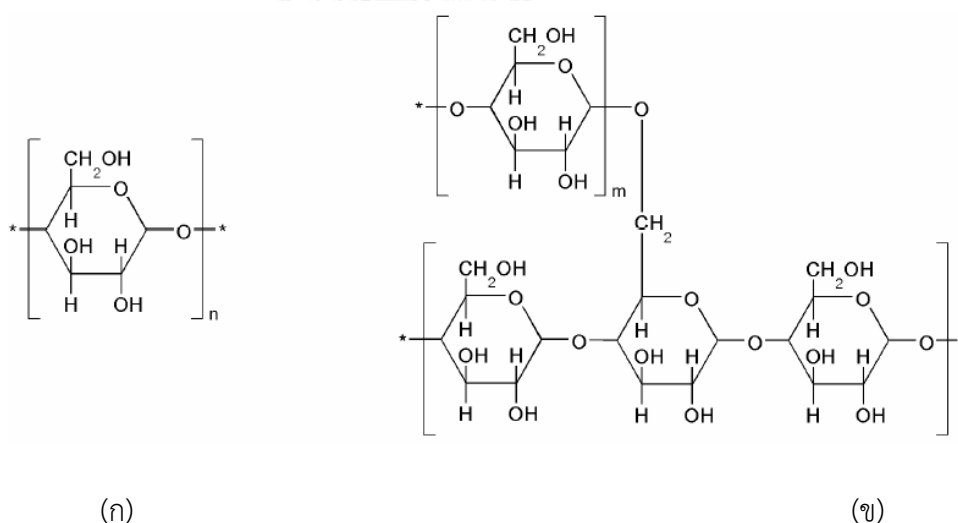
ค.) ไมกา (Mica)

ไมกาเป็นแร่ที่เกิดจากแร่ 2 ชนิดรวมกันคือ แร่มีสโคไวต์ (Muscovite) และแร่ฟลোগอไพท์ (*Phlogopite*) มีลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนเรียงกันมีความหนาแน่นประมาณ 2.8 กรัม/ซม³ ค่าความแข็ง 2.5-4 aspect ratio เท่ากับ 30 -100 นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมความงาม และปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เพื่อให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรง เพิ่มค่า HDT ลดการหดตัวของชิ้นงานหนา รวมถึงการรักษาเสถียรภาพทางรูปทรงที่อุณหภูมิสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุเสริมแรงได้ด้วย เนื่องจากมี aspect ratio ค่อนข้างสูง แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานคือ ความสามารถในการกระจายตัวในพอลิเมอร์ต่ำ [26]

2.4.1.2 สารก่อผลึกอินทรีย์ (Organic nucleating agent)

ก.) สตาร์ชและแป้ง (Starch and flour)

เป็นพอลิแซคคาไรด์ ประกอบด้วยโมเลกุลหลัก 2 กลุ่ม ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) ร้อยละ 20 ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบสายโซ่ตรงที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยกลูโคสที่เชื่อมกันแบบไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) ที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และกลุ่มอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ร้อยละ 80 ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบกิ่งที่หน่วยย่อยกลูโคสเชื่อมกันแบบไกลโคซิดิกที่ตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 4 และตำแหน่งคาร์บอน 1 และ 6 ความยาวของสายโซ่แซคคาไรด์ ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่ผลิตแป้งนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยทั่วไปมีความยาวเฉลี่ยระหว่าง 500 และ 2,000 หน่วยย่อยกลูโคส [27] แป้งที่เติมลงไปในพอลิเมอร์สามารถช่วยเป็นสารก่อผลึกได้เมื่อใส่ในปริมาณน้อย ลักษณะเฉพาะของเม็ดแป้งที่มีหลุมเว้า (Groove) สามารถช่วยให้เกิดการซึมซับของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ จึงสามารถกลายเป็นจุดก่อผลึก [24] แป้งที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี เป็นต้น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของแป้งประกอบด้วย (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพคติน

ข.) แกลบ (Rice Husk)

เป็นเปลือกแข็งของเมล็ดข้าวที่ได้จากการขัดสีข้าว เป็นส่วนที่เหลือใช้จากการสีข้าว มีลักษณะเป็นรูปทรงรี เมื่อยาวสีเหลืองอมน้ำตาลหรือเหลืองนวลแล้วแต่ภูมิภาคที่มีการปลูกข้าว มีปริมาณร้อยละ 20 ต่อข้าว 1 เมล็ด ความยาวประมาณ 9 มิลลิเมตร แกลบประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 25 เซลลูโลส ร้อยละ 35 ลิกนิน ร้อยละ 20 และเถ้า ร้อยละ 20 เถ้าแกลบมีซิลิกาเป็น

องค์ประกอบหลักปริมาณสูงถึงร้อยละ 95 ของน้ำหนักแก้วกลบ มีความเป็นไปได้ที่จะใช้แก้วเป็นจุดก่อผลึกได้ เนื่องจากแก้วมีซิลิกาเป็นจำนวนมากคล้ายกับองค์ประกอบของทัลค์ ซึ่งเป็นสารก่อผลึกที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมพลาสติก อีกทั้งยังเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ รวมถึงแก้วไม่ละลายในน้ำ มีความคงตัวทางเคมี ทนทานต่อแรงกระทำ จึงมีการใช้แก้วเป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก รวมถึงการใช้แก้วเป็นเชื้อเพลิง และยังสามารถผสมแก้วกับวัสดุอื่น ๆ ทำเป็นวัสดุก่อสร้าง [28]

2.4.2 การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้แม่พิมพ์ร้อน

การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ร้อน เป็นอีกหนึ่งวิธีการสำหรับการเพิ่มระดับความเป็นผลึก โดยอาศัยหลักการให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลงไปที่อุณหภูมิการเกิดผลึกที่เหมาะสมแล้วคงที่ (Isothermal cold-crystallization) เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนเปิดแม่พิมพ์ เพื่อให้พอลิเมอร์มีเวลาในการเกิดผลึกที่สมบูรณ์ ซึ่งอัตราการเย็นตัวในแม่พิมพ์ของชิ้นงานเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนความเป็นผลึก และส่วนอสัณฐาน โดยการลดความร้อนอย่างรวดเร็วด้วยแม่พิมพ์เย็น จะทำให้พอลิเมอร์มีสัดส่วนอสัณฐานเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการลดสัดส่วนอสัณฐานลง สามารถทำได้โดยการใช้แม่พิมพ์ร้อนแล้วคงที่ไว้ระยะเวลาหนึ่งก่อนเปิดแม่พิมพ์ เพื่อให้พอลิเมอร์มีเวลาเพียงพอในการสร้างจุดก่อผลึก และเติบโตอย่างสมบูรณ์ แต่ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเกิดผลึกช้ามาก ซึ่งใช้เวลาเป็นชั่วโมงสำหรับการเกิดผลึกที่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้รอบเวลาการขึ้นรูป (Cycle time) นานขึ้น ซึ่งมีข้อเสีย คือ อัตราการผลิตลดลง เกิดความร้อนสะสมในกระบอกลอมเหลว เป็นเหตุให้พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพได้ เป็นต้น

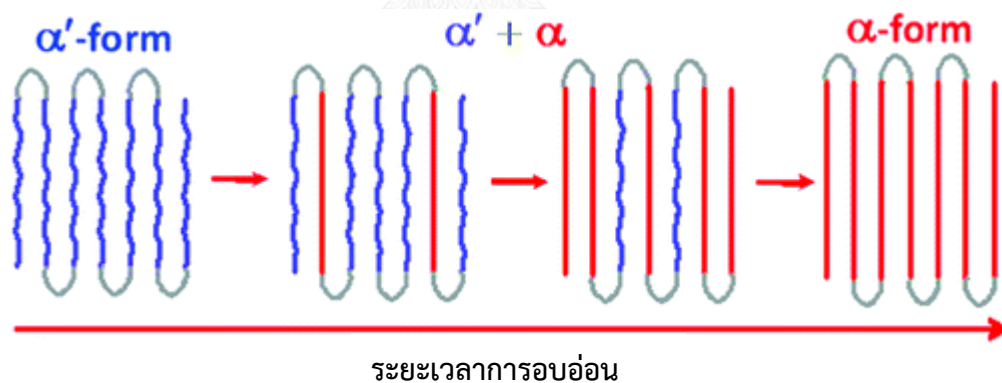
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องใช้รวมกับการเติมสารก่อผลึกที่ทำหน้าเป็นจุดก่อผลึก เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม การเลือกอุณหภูมิและเวลาเย็นตัวในแม่พิมพ์ควรคำนึงถึงความเหมาะสม เพราะการเลือกใช้แม่พิมพ์ร้อน และเวลาเย็นตัวน้อย ชิ้นงานอาจอ่อนตัวจนไม่สามารถนำออกจากแม่พิมพ์ได้

2.4.3 การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดโดยการอบอ่อน

การอบอ่อนพอลิเมอร์เป็นกระบวนการขั้นที่ 2 หลังจากขึ้นรูป โดยนำชิ้นงานพอลิเมอร์มาอบที่อุณหภูมิหนึ่ง ตามระยะเวลาที่เหมาะสม แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งการอบอ่อนของ

พลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ช่วยให้ลด หรือกำจัดความเค้นและความเครียดภายในชิ้นงานจากกระบวนการขึ้นรูป เพิ่มความคงที่ของขนาดชิ้นงาน ลดตำหนิ (Defects) และปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ อาทิเช่น ความมันเงาของผิว เป็นต้น

นอกจากนั้นการอบอ่อนยังเป็นขั้นตอนที่อิทธิพลต่อพอลิเมอร์ในระดับโครงสร้าง กล่าวคือ พอลิเมอร์แบบกึ่งผลึกอาจมี ระดับความเป็นผลึกและความสมบูรณ์ของผลึกเพิ่มขึ้น รวมถึงการจัดเรียงตัวใหม่ของส่วนที่เป็นผลึก และส่วนอสัณฐาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาชั้นผลึก จำนวนผลึก และขนาดผลึก เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มักส่งเสริมให้พอลิเมอร์มีสมบัติเชิงความร้อนดีขึ้น [29] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Pan และคณะ [30] ได้ศึกษาผลของการอบอ่อนต่อโครงสร้างผลึก PLA พบว่า การอบอ่อนช่วยให้สายโซ่เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่อยู่ชิดเป็นระเบียบมากขึ้นตามระยะเวลาการอบ โดยทำให้ผลึกของ PLA ถูกเปลี่ยนจากแบบ α' -form ที่เวลา 0 นาที ไปเป็น ผลึกแบบ α -form หลังอบเป็นเวลา 1440 นาที ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค WAXD และยังพบอีกว่า การอบอ่อนด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 140 องศาเซลเซียส ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกแบบ α -form ได้เร็วกว่าช่วงอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.10 ผลของการอบอ่อนต่อการเปลี่ยนโครงสร้างผลึก

2.5 กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Polymer Processing)

2.5.1 การอัดรีด (Extrusion)

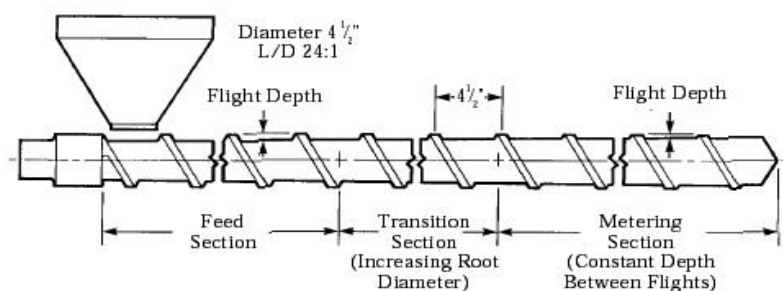
การอัดรีดเป็นกระบวนการผสม และขึ้นรูปพอลิเมอร์พื้นฐานของเทอร์โมพลาสติก เพื่อให้พอลิเมอร์กับสารเติมแต่ง หรือพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ สามารถผสม และกระจายตัวเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

โดยใช้หลักการทางความร้อน และแรงเฉือนทำให้เกิดการอัด การหลอมเหลว และการผสม ด้วยเครื่องอัดรีด(Extruder) กระบวนการเริ่มโดยการป้อนผง หรือเม็ด สู่เข้ากรวยป้อน (Hopper) จากนั้นเม็ดพอลิเมอร์จะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องอัดรีด (Extruder) และสกรู (screw) ซึ่งอยู่ในเรือนทรงกระบอก (Barrel) ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะได้รับความร้อนที่แตกต่างกัน ขึ้นกับอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว และการผสม สกรูจะทำหน้าที่หมุนอัดให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอย่างต่อเนื่องจนสู่ทางออกที่มีหัวตาย (Die) ติดอยู่ ซึ่งทำหน้าที่กำหนดลักษณะหน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

เครื่องอัดรีดสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของสกรูคือ เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) และเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ปัจจุบันเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ได้รับความนิยมในระดับอุตสาหกรรมมากกว่า เนื่องจาก สามารถหลอมผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากโครงสร้างจะเห็นว่ามีสกรู 2 ตัว อยู่ในBarrel เดียวกัน การวางของสกรูในลักษณะที่สั่นเกลียวของสกรูแทรกอยู่ในร่องเกลียวของสกรูซึ่งกัน และกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนจากการหมุนของสกรู ระหว่างสกรูกับสกรู และสกรูกับผนัง Barrel เพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการกระจายตัวของสารผสม และพอลิเมอร์เข้ากันได้เป็นอย่างดี

2.5.1.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-Screw Extruder)

เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ประกอบด้วยสกรู 2 อันวางขนานคู่กันอยู่ใน Barrel โดยเกลียวสกรู (Screw flight) จะวางแทรกสลับกัน สามารถแบ่งเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตามทิศทางการหมุน คือหมุนในทิศตรงกันข้ามหรือหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating) และการหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating) โดยการหมุนของสกรูแบบสวนทางกัน ซึ่งสกรูภายใน Barrel สามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน [31] ได้แก่ ส่วนป้อน ส่วนหลอมอัด และส่วนส่งพลาสติกหลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบและช่วงต่าง ๆ ของสกรู

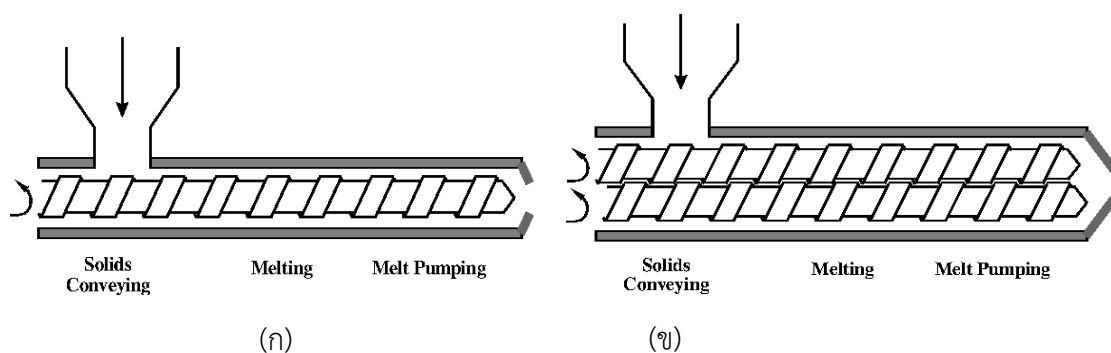
เครื่องอัดรีดสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงหลัก คือ

ก.) ช่วงการป้อน (Feed zone or Solid conveying) เป็นส่วนที่มีความลึกของร่องสกรูมากที่สุด เพื่อช่วยลำเลียงเม็ดหรือผงพอลิเมอร์ จาก Hopper เข้าสู่สกรู และเริ่มให้ความร้อนแก่พลาสติก แล้วส่งพลาสติกไปยังส่วนต่อไปของสกรู ซึ่งอัตราการป้อนต้องสัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนสกรูของเครื่องอัดรีดเพื่อป้องกันการล้นของพอลิเมอร์เหลว หรือการขาดช่วงของผลิตภัณฑ์

ข.) ช่วงการอัด (Compression or Transition zone) เป็นช่วงที่ถูกออกแบบให้ความลึกของสกรูค่อยๆ ลดลง เพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันในการอัดของพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ถูกลำเลียงไปข้างหน้า ในส่วนนี้จะมีการให้ความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ หรือ อุณหภูมิการขึ้นรูป และช่วงของสกรูจะยาว หรือสั้นนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการหลอมเหลวด้วยพลาสติกที่หลอมเหลวได้เร็ว ช่วงการอัดจะสั้น แต่พลาสติกที่หลอมเหลวช้า ช่วงการอัดจะยาว เพื่อให้เกิดการหลอมผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

ค.) ช่วงหลอมเหลว (Melt or metering zone): เป็นช่วงที่ความลึกของสกรูคงที่ เพื่อปรับให้พอลิเมอร์เหลวที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์คงอยู่ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เท่ากัน

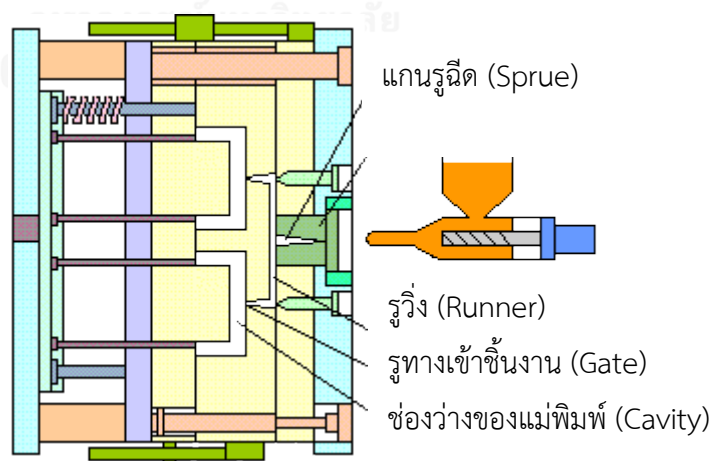
การผสมพอลิเมอร์ให้มีประสิทธิภาพกระจายตัวเข้าด้วยกันของ พอลิเมอร์ หรือสารเติมแต่ง นั้นมีหลายปัจจัยไม่เพียงแต่การเลือกใช้เครื่องที่เหมาะสม ยังรวมถึงการใช้สภาวะในการผสมด้วย เช่นที่ เช่น ความเร็วในการหมุนของสกรู อัตราการป้อนสาร ระดับช่วงอุณหภูมิ และการออกแบบขนาดความลึก และความยาวของสกรูและอุปกรณ์ช่วยอื่นๆ เช่น ชุดหล่อเย็น เครื่องดึงและเครื่องตัด เป็นต้น



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดรีด (ก) แบบสกรูเดี่ยว และ (ข) แบบสกรูคู่

2.5.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding)

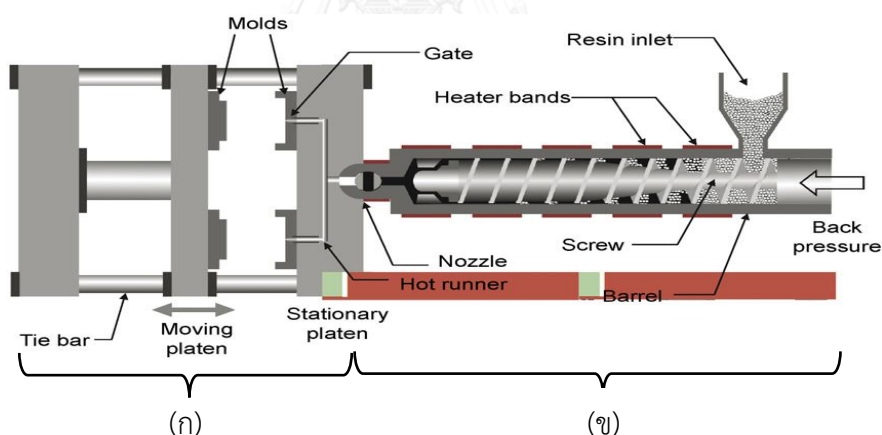
การฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์เป็นกระบวนการผลิตชิ้นงาน และผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับเทอร์โมพลาสติก โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความซับซ้อน และต้องการสัดส่วนชิ้นงานที่แม่นยำ การฉีดขึ้นรูปประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนอัดหลอมเหลวพอลิเมอร์ที่มีกรวยป้อน (Hopper) สกรูชนิดสกรูเดี่ยวที่ออกแบบให้สกรูสามารถควบคุมอัตราการป้อนเม็ด ความดันในการฉีด เพื่อให้เนื้อพอลิเมอร์เพียงพอที่จะเข้าไปในช่องว่างของแม่พิมพ์ (Cavity) รวมถึงระยะเวลาการฉีด (Residence time) ได้ และหัวฉีด (Nozzle) ดังแสดงรูปที่ 2.14 และส่วนของแม่พิมพ์ซึ่งจะมีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.13 เช่น แกนรูฉีด (Sprue) รูวิ่ง (Runner) รูทางเข้าชิ้นงาน (Gate) ช่องว่างของแม่พิมพ์ (Cavity)



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ [32]

หลักการทำงานของเครื่องฉีดขึ้นรูปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการอัดหลอมเหลวเป็นกระบวนการที่ Barrel ถูกดันไปข้างหน้าแทนฉีดด้วยความดันต่ำ ขั้นตอนสองสกรูจะอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยแรงดันสูงส่งผ่านหัวฉีด (Nozzle) ไปยังแกนรูฉีด (Sprue) ผ่านรูวิ่ง (Runner) และรูทางเข้าชิ้นงาน (Gate) ของแม่พิมพ์ (Mold) แล้วจึงทำการหล่อเย็น ทำให้พอลิเมอร์เหลวเกิดการเย็นตัวกลายเป็นของแข็งในแม่พิมพ์ระหว่างการเย็นตัวสกรูจะทำการหมุนกลับเพื่อนำเม็ดเข้ามาหลอมรอการฉีดครั้งต่อไป เมื่อครบรอบแม่พิมพ์จะถูกเปิดเพื่อนำชิ้นงานออกและเตรียมพร้อมสำหรับวัฏจักรการฉีดขึ้นรูปในรอบต่อไป

อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลโดยตรงต่ออัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน PLA โดยอัตราการเย็นตัวที่สูงจะส่งผลให้ชิ้นงานมีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยอัตราการเย็นตัวต่ำ เนื่องจากระยะเวลาในการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของ PLA ที่แตกต่างกัน ชิ้นงานที่มีเวลาจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลมาก ย่อมเกิดความเป็นระเบียบภายในโครงสร้างสูง กล่าวคือมีระดับความเป็นผลึกสูง ซึ่งระดับความเป็นผลึกดังกล่าวจะส่งผลสัมพันธ์โดยตรงต่อสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกายภาพ [33]



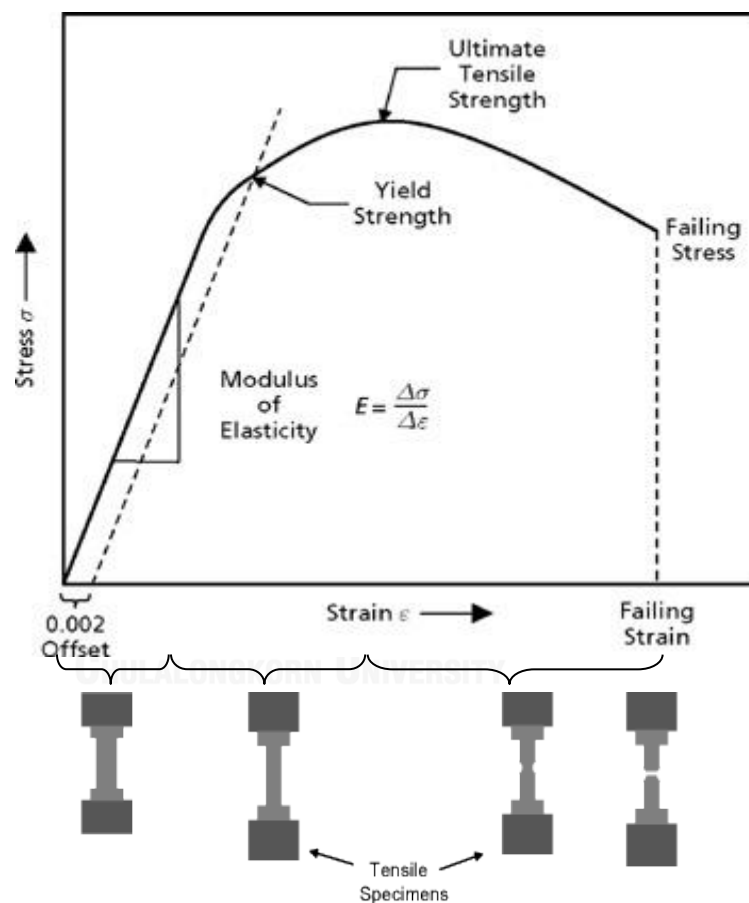
รูปที่ 2.14 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine ประกอบด้วย (ก) แม่พิมพ์ และ (ข) เครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว [34]

2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical testing)

2.6.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบสมบัติของวัสดุเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งาน ว่ามีความสามารถต้านทานแรงดึงเท่าไร โดยการ

ทดสอบจะเป็นการวัดแรงกระทำ (Load) ที่ควบคุมให้เพิ่มขึ้นอย่างคงที่ กับระยะทางที่ยืดออกของวัสดุ (Elongation) แล้วนำข้อมูลมาพล็อตเป็นกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าโดยมีจุดที่สำคัญในกราฟได้แก่ ความคงตัวของอิลาสติกหรือเส้นตรงความเป็นอิลาสติก (linear-Elastic Region or Elastic Constants) ความเค้นและความเครียด ณ จุดคราก (Stress and strain at yield) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) [35]



รูปที่ 2.15 ลักษณะกราฟความเค้น-ความเครียดของการดึง [36]

ก.) ความคงตัวสภาพยืดหยุ่น หรือเส้นตรงความคงสภาพยืดหยุ่น (linear-Elastic Region or Elastic Constants) เป็นส่วนที่ค่าความเค้น และความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งหมายความว่ากราฟส่วนนี้พลาสติกยังคงรักษาสภาพโดยไม่มี การเสียรูป และเมื่อเอาแรง

กระทำออกพลาสติกสามารถคืนสภาพเดิมได้ จากความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงจึงสามารถหาได้ด้วย กฎของฮุค (Hooke's Law) ดังสมการ

$$\sigma = E\varepsilon \dots\dots\dots(2.1)$$

จากสมการ (2.1) ค่า E คือ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นหรือโมดูลัสของยังก์ (*modulus of elasticity or Young's modulus*) เป็นค่าที่ได้จากความชันของกราฟ ซึ่งแสดงถึงความแข็งเกร็ง (Stiffness) ของพลาสติก

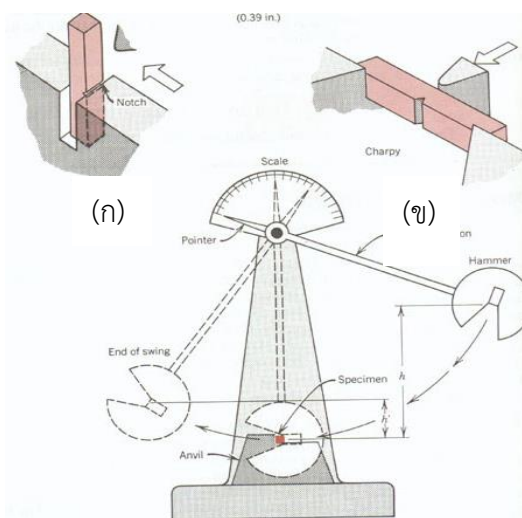
ข.) จุดคราก (Yield point) ถ้าพลาสติกที่มีความเหนียวมาก จากรูปที่ 12 กราฟส่วนนี้จะเป็นจุดที่ความเครียดเพิ่มขึ้นมากกว่าความเค้น ซึ่ง ณ จุดนี้ชิ้นงานจะเกิดการเสียสภาพอย่างถาวร เมื่อนำแรงกระทำออก แต่ถ้าเป็นพลาสติกเปราะแตกง่าย จุดนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นที่พลาสติกแตกออกจากกัน

ค.) แรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เป็นจุดสูงสุดที่ยังสามารถใส่แรงได้โดยพลาสติกยังไม่ขาดออกจากกัน และเป็นจุดเริ่มต้นของการขาด

2.6.2 การทดสอบการกระแทก (Impact testing)

การทดสอบการกระแทกเป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบความเหนียว (Toughness) ของวัสดุ ด้วยหลักการถ่ายเทพลังงานโดยการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของ วัสดุ ค่าความแข็งแรงการกระแทกจะบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (shock load) ซึ่งพลังที่วัสดุได้รับการกระแทกจะสูญเสียไป ในหลายลักษณะ เช่น ถูกใช้ในการเสียรูปแบบยืดหยุ่น แบบถาวรของวัสดุ และแรงเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นต้น

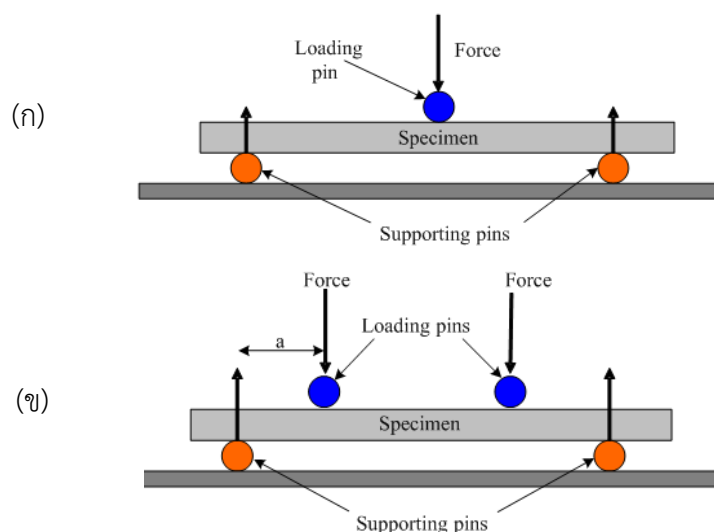
การทดสอบความต้านทานแรงกระแทกที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 แบบ แบ่งตามลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบ ได้แก่ แบบ Charpy impact test ซึ่งจะวางชิ้นงานในแนวนอน และแบบ Izod impact test ซึ่งวางชิ้นงานในแนวตั้ง [37] ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยการทดสอบทั้งคู่นี้จะให้แรงกระทำที่มาจากกรวยลูกตุ้มที่ทราบค่าน้ำหนัก และให้พลังงานจลน์ที่มากพอที่จะทำให้ชิ้นงานทดสอบแตกหักในบริเวณที่กำหนดซึ่งมีร่องบากขนาดเล็ก ชิ้นงานทดสอบจะดูดซับพลังงานที่ส่งถ่ายมาจากการเหวี่ยงกระแทก ซึ่งวัดในรูปของค่าการดูดซับพลังงานกระแทก (Impact energy) หรือแรงการกระแทก (Impact strength) มีหน่วยเป็นจูล (Joule, J)



รูปที่ 2.16 การวางชิ้นงาน (ก) แบบ Izod impact test และ
(ข) แบบ Charpy impact test [38]

2.6.3 การทดสอบแรงดัดโค้ง (Flexural testing)

การทดสอบแรงดัดโค้ง เป็นการวัดความต้านทานแรงที่มากระทำต่อวัสดุในแนวตั้งฉาก ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความยืดหยุ่นของวัสดุ นิยมใช้วัด พอลิเมอร์ ไม้ และวัสดุประกอบต่าง (composites) เป็นต้น หลักการทดสอบวัสดุจะถูกใส่แรงกดที่กระทำบนผิวด้านบนอย่างคงที่ โดยจะทำให้เกิดความเค้นแรงดึง (tensile stress) ที่ผิวด้านล่างของชิ้นงาน และเกิดความเค้นแรงอัด (compressive stress) ที่ผิวด้านบนของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดพื้นที่ของความเค้นแรงเฉือนตามจุดกึ่งกลางชิ้นงาน (shear stress) และกำหนดอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างฐานกับความหนา (L/d) สำหรับวัสดุส่วนใหญ่มีค่าอยู่ที่ 16 เป็นวิธีการทดสอบที่สามารถใช้วัดหาแรงดัดโค้งของพลาสติกที่เสริมแรง หรือไม่เสริมแรง การทดสอบแรงดัดโค้งมี 2 แบบ ได้แก่ แบบแรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) มักใช้ทดสอบกับพอลิเมอร์ และแบบแรงกระทำ 4 จุด (Four-point bending) สำหรับทดสอบกับไม้ วัสดุประกอบต่าง และวัสดุที่มีความเปราะ เช่น เซรามิก และคอนกรีต เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17 [39, 40] ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ ความเค้นดัดโค้งที่จุดคราก (Flexural stress at yield) โมดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง (Flexural modulus) เป็นต้น

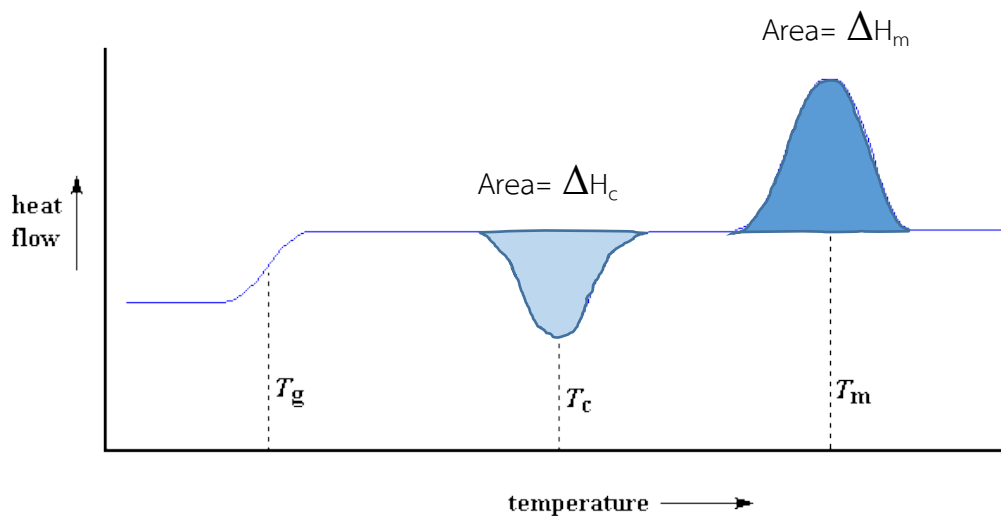


รูปที่ 2.17 การทดสอบ (ก) แบบแรงกระทำ 3 จุด (Three-point bending) และ (ข) แบบแรงกระทำ 4 จุด (Four-point bending)

2.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermal analysis)

2.7.1 การวิเคราะห์ระดับความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential scanning calorimetry, DSC)

เนื่องจากพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีปริมาณส่วนที่เป็นผลึกแตกต่างกัน ค่าที่ใช้บอกถึงสัดส่วนความเป็นผลึกในพอลิเมอร์คือ ระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) สามารถตรวจหาโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมตรี (Differential Scan Calorimetry, DSC) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการดูด และคายพลังงานของวัสดุพอลิเมอร์เมื่อเทียบกับตัวอ้างอิง ในขณะที่เพิ่มอุณหภูมิ และลดอุณหภูมิแก่ระบบ แล้วคำนวณจากพื้นที่ใต้เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลว ซึ่งแสดงปริมาณการดูด-คาย พลังงานความร้อนของพอลิเมอร์ เรียกว่าค่าเอนทัลปี (Enthalpy) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ระดับความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2)



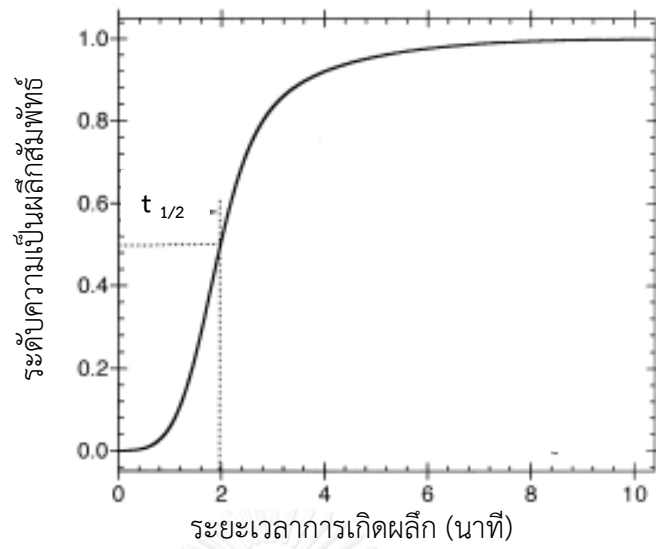
รูปที่ 2.18 พื้นที่เทอร์โมแกรมของอุณหภูมิเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลว [41]

$$X_c (\%) = 100 \times \frac{(\Delta H_m - \Delta H_c)}{\Delta H_f} \quad (2.2)$$

เมื่อ ΔH_m คือ ค่าเอนทาลปีของการหลอมเหลว ΔH_c คือ ค่าเอนทาลปีของการเกิดผลึก ΔH_f คือ ค่าพลังงานความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของ PLA ที่ระดับความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 93.1 จูลต่อกรัม [42]

2.7.2 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก (Crystallization half time, $t_{1/2}$)

ครึ่งเวลาการเกิดผลึก เป็นระยะเวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการเกิดผลึกที่ระดับความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (Relative crystallinity) 50% สามารถหาโดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิตรี (Differential Scan Calorimetry, DSC) ณ สภาวะการเกิดผลึกที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal crystallization) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเร็วในการเกิดผลึกหลังจากการหลอมเหลวที่ปล่อยให้เย็นตัวลงถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกสัมพัทธ์กับเวลาในการเกิดผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกสัมพัทธ์กับเวลาในการเกิดผลึก



บทที่ 3 วารสารปริทัศน์

PLA เป็นพลาสติกที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลาสติกทางเลือกที่จะมาทดแทนพลาสติกจากปิโตรเคมี ซึ่งไม่สามารถย่อยสลาย โดย PLA นั้นมีข้อดีคือสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradable plastic) แต่ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานหลายด้าน เช่น ความเปราะ ราคาสูง และที่สำคัญความเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อน โดยการเพิ่มระดับความเป็นผลึกด้วยการเติมสารก่อผลึกชีวภาพ คือ แป้งข้าว และกลบข้าว

3.1 การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและระดับความเป็นผลึก ด้วยสารก่อผลึกทัลค์

Hongbo Li และ คณะ (2007) [8] ได้ศึกษาการเพิ่มปริมาณผลึก และอัตราการเกิดผลึกของ PLA ที่เติมสารก่อผลึก (Nucleating agent) สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) และปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) โดยเติมสารก่อผลึก ทัลค์(Talc) โซเดียม สเตียเรต และแคลเซียมแลคเตต ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับสูตรที่เติมสารก่อผลึก Polyethylene glycol (PEG) และ Acetyl triethyl citrate (ATC) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกด้วยอัตราส่วนร้อยละ 2 5 10 โดยน้ำหนัก การทดสอบการเกิดผลึก ณ อุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal crystallization) ด้วยเครื่อง DSC ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 20 °C/min พบว่าการเติม PEG ช่วยให้ PLA เกิดผลึกได้ดีขึ้น อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิมิมีค่าลดลง และพบว่าการเติม Talc 1% ร่วมกับ PEG 10% ช่วยให้ PLA เกิดผลึกอย่างสมบูรณ์ในช่วงของการลดอุณหภูมิ และยังสามารถเกิดผลึกได้ดีที่อัตราการเย็นตัวสูงๆ (80 °C/min) การทดสอบการเกิดผลึก ณ อุณหภูมิคงที่ (Isothermal crystallization) พบว่า PLA มีครึ่งเวลาการเกิดผลึก (crystallization half-time, $t_{1/2}$) ต่ำสุดประมาณ 40 นาที ที่ 100 °C ในขณะที่การเติม 1% talc ช่วยให้ครึ่งเวลาการเกิดผลึกลดลงเหลือ 90 วินาที และหากเติม Talc 1% ร่วมกับ PEG 5% จะช่วยให้ครึ่งเวลาการเกิดผลึกลดลงเหลือ 60 วินาที นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 80 °C ช่วยให้ PLA ที่เติม Talc 1% ร่วมกับ PEG 10% มีระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 41 ในขณะที่การใช้แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 30 °C PLA สามารถตกผลึกได้เพียง 14%

Harris และ คณะ (2008) [43] ได้ทดลองเพิ่มปริมาณผลึกและอัตราการเกิดผลึกของ PLA โดยเติมสารก่อผลึก อบอุ่นหลังการฉีดขึ้นรูป (Post-annealing) และปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold temperature) จากการทดสอบการเกิดผลึกแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal crystallization) พบว่า ระยะเวลาการเกิดผลึกของ PLA ลดลงจาก 38.2 นาที เหลือ 1.8 และ 0.6 นาที เมื่อเติม Ethylene bis-stearamide (EBS) 2% และ Talc 2% ตามลำดับ จากการทดสอบการเกิดผลึกแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (Non-Isothermal crystallization) ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 10 °C/min พบว่า อุณหภูมิการแปรสภาพแก้ว (T_g) ของ PLA ที่เติม Talc ลดลง เมื่อปริมาณ Talc เพิ่มขึ้น และพบว่าการเติม Talc 20% ช่วยให้ PLA ที่ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องมีปริมาณผลึกสูงสุด 21% ในส่วนของการ อบอุ่นหลังการฉีดขึ้นรูป พบว่า PLA บริสุทธิ์ สามารถเกิดผลึกได้สมบูรณ์ (42%) เมื่ออบอุ่นที่ อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 60 นาที ในขณะที่การเติม EBS 2% และ Talc 2% มีผลทั้งช่วยเพิ่มปริมาณ ผลึกของ PLA ที่ฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง และยังช่วยลดระยะเวลาในการอบอุ่นที่ทำให้ PLA เกิดผลึก สมบูรณ์ (42%) เหลือประมาณ 30 นาที จากการปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ทำให้ PLA เกิดผลึกได้สมบูรณ์ (42%) คือที่อุณหภูมิ 110 °C

F.Yu และคณะ (2012) [44] ศึกษาผลของทัลคตต่อสมบัติเชิงกล และเชิงความร้อน ของพอลิแลคไทด์(PLA) ด้วยการเติมทัลคต กับPLA อัตราส่วน PLA/Talc ร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก และเติม 3-Aminopropyl-triethoxysilane เป็นสารคู่ควบปริมาณร้อยละ0.3 โดยน้ำหนักของPLA การ ทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเทคนิค DSC พบว่า การเติม Talc ปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลให้ T_c ปรับ ลดลงจาก 129.7 °Cเป็น 108.4 °Cเมื่อเติมTalc 30 % รวมทั้งมีระดับความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นด้วย การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน ด้วยเครื่อง TGA พบว่า PLA/Talc มี T_d สูงกว่าของ PLA เพียง เล็กน้อยเท่านั้น ผลการตรวจสอบอุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อน(Heat distortion temperature, HDT) พบว่า การเติม Talc ไม่มีผลเปลี่ยนแปลง HDT เมื่อปริมาณ Talc เพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เพียง 3 °Cเมื่อเติม Talc ปริมาณร้อยละ30 โดยน้ำหนัก การทดสอบแรงดึง พบว่า Tensile strength และ Elongation at break มีค่าสูงขึ้น ตามปริมาณ Talc ที่เพิ่มขึ้น แต่การเติม Talc มากเกินร้อยละ 18.1 โดยน้ำหนักส่งผลให้ Elongation at break ลดลง การทดสอบแรงดัดโค้ง พบว่า Flexural modulus และFlexural strength มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณTalc ที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อเติมTalc ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

3.2 การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและระดับความเป็นผลึก ด้วยแป้ง และสตาร์ช

K. S. Kang และคณะ (2008) [24] ศึกษาผลการใช้สารก่อผลึกแบบย่อยสลายได้ และชีวฐาน ต่อสมบัติเชิงความร้อน และจลนพลศาสตร์ของการเกิดผลึก ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ โดยใช้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชตัดแปรทางเคมี (CMPS) แป้งข้าวโพด (Corn starch) ขนาดอนุภาค 10-20 μm เป็นสารก่อผลึกชีวฐาน เปรียบเทียบกับทัลค์ (Talc) ซึ่งเป็นสารก่อผลึกอนินทรีย์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ผสมกับ PLA ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีด แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าการให้ความร้อนในช่วงที่ 2 (second heat) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc}) มีค่าลดลงจาก 129 °C เป็น 111 106 และ 96 °C เมื่อเติมสารก่อผลึก CMPS แป้ง และทัลค์ ตามลำดับ ซึ่งสารนี้จะทำหน้าที่เป็นจุดก่อผลึกเป็นผลให้เกิดผลึกของ PLA เร็วขึ้น อีกทั้งความปริมาณความเป็นผลึกยังเพิ่มขึ้นประมาณ ร้อยละ 23-34 จากเดิมร้อยละ 2.4 โดยทัลค์มีปริมาณความเป็นผลึกสูงที่สุด อาจเป็นผลจากการมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ความขรุขระของพื้นผิวสูง และมีช่องว่างรอบอนุภาคมากจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงเป็นจุดเย็นตัว (super cooled pots) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นจุดก่อผลึก (nuclei) และเมื่อทดสอบพฤติกรรมการเกิดผลึก ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลึกสูงสุดอยู่ในช่วง 100-105 °C โดยค่าครึ่งเวลาการเกิดผลึก (crystallization half -time, $t_{1/2}$) ของทัลค์มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งมีค่า 0.4 นาที 105 °C แป้งมีค่า 3.6 นาที 100 °C และ CMPS 3.2 นาที 105 °C แสดงว่าทัลค์สามารถช่วยลดระยะเวลาการเกิดผลึกหรืออัตราการเกิดผลึกให้เร็วขึ้น รองลงมาเป็น แป้ง และ CMPS ตามลำดับ

W. Y. Jang และคณะ (2007) [45] ศึกษาสมบัติเชิงความร้อน และสัณฐานวิทยา ที่เป็นผลจากความเข้ากันของพลาสติกชีวภาพ PLA ผสมกับแป้ง โดยนำแป้งมาผสมกับ PLA (PLA/Starch) ด้วยอัตราส่วน 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับสูตรที่ผสมสาร 2,5bis((tert-butylperoxy)-2,5-dimethylhexane ปริมาณ 0.3 phr ของ PLA ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) และสาร maleic anhydride (MA) ปริมาณ 3 phr ของ PLA เพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่างแป้งกับ PLA กับ PLA/Starch จากการทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าปริมาณแป้งไม่มีผลต่อ T_g และ T_m แต่ค่า T_c มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณแป้งที่เติมเพิ่มมากขึ้น ส่วนปริมาณความเป็นผลึก พบว่าสูตร PLA/Starch และสูตร PLA/MA/Starch มีแนวโน้มปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณแป้งที่เติมมากขึ้น โดยเฉพาะสูตร PLA/MA/Starch ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 48 ในสูตรที่ผสมแป้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เนื่องจาก MA

เป็นสารโมเลกุลเล็ก จึงมีส่วนช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของ PLA ให้สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้น อีกทั้งแบ่งยังทำหน้าที่เป็นจุดก่อกำเนิดผลึกด้วย แต่ถ้าผสมแบ่งมาปริมาณกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนักความเป็นผลึกจะลดลง เนื่องจากการเกาะตัวของอนุภาคแบ่ง ซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลได้ จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา ด้วยกล้อง SEM พบว่าแบ่งและ PLA สามารถเข้ากันได้ดีเมื่อเติม MA สังเกตจากรอยเชื่อมติดบริเวณอนุภาคแบ่ง และจากการทดสอบการย่อยสลาย พบว่าสูตรที่เติม MA มีอัตราการย่อยสลายสูงกว่าสูตรที่ไม่เติม

L. Yu และคณะ (2010) [46] ศึกษาการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเฟสของ แบ่งข้าวโพดกับ PLA โดยใช้สาร MDI เพื่อเพิ่มความกัน และศึกษาผลของลำดับการผสมสาร MDI ต่อสมบัติเชิงกลและความร้อน จากการทดลองผสม PLA กับแบ่งข้าวโพดที่ปริมาณร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวคู่ แล้วขึ้นรูปโดยวิธีการฉีด พบว่า Tensile Modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมแบ่งปริมาณ 10-20 wt% แต่เมื่อเติมมากขึ้นมีค่าลดลง เช่นเดียวกับค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเติมแบ่งข้าวโพด และลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแบ่ง ขณะที่ Impact strength มีค่าเพิ่มขึ้นกับการเติมแบ่งข้าวโพดเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสาร MDI ผสมกับ PLA/Corn starch ด้วยปริมาณ 0.5-1 wt% พบว่า สมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างชัดเจน และปริมาณที่สามารถปรับปรุงการยึดติดที่เหมาะสมที่สุด คือ 1 wt% หลังจากนั้นได้เปรียบเทียบลำดับการเติม MDI ปริมาณ 1 wt% ระหว่างการเติม MDI กับ PLA ก่อนผสมกับ Corn starch (PLA+MDI/ Corn starch) กับการเติมที่หลัง MDI หลังการผสม PLA กับ Corn starch (PLA/Corn starch +MDI) พบว่า สูตร PLA+MDI/ Corn starch มีสมบัติเชิงกลสูงกว่า PLA/Corn starch +MDI เนื่องจากการเติม MDI ก่อนช่วยในเรื่องของการกระจายตัวใน PLA ที่ดีกว่า ทำให้สาร MDI สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ของแบ่งได้อย่างสมบูรณ์ โดยสาร MDI เกิดปฏิกิริยากลายเป็นโครงสร้าง Block copolymer ระหว่างหมู่ isocyanate ของ MDI และหมู่ hydroxy ของ แบ่งร่วมกับ polyester ซึ่งสอดคล้องกับการส่งกล้อง SEM พบว่า สูตรที่ผสม PLA/starch การเข้ากันของแบ่งกับ PLA ค่อนข้างแย่ สังเกตจากรอยต่อที่นั่นจะมีช่องว่างระหว่างแบ่งกับ PLA เนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกันของ PLA และแบ่ง แต่เมื่อเติมสาร MDI รอยต่อระหว่างแบ่งกับ PLA นั้นจะต่อเนื่องกัน และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงด้วยเทคนิค DSC แบบอุณหภูมิไม่คงที่ พบว่า T_g ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อผสม PLA/starch ทั้งสูตรที่เติม และไม่เติม MDI แต่ T_c ลดลงในสูตรที่เติม MDI แสดงว่าการปรับปรุงรอยต่อของ PLA และแบ่งมีส่วนช่วยเป็นสารก่อกำเนิด ดังนั้นจึงส่งผลให้ T_c ต่ำลงจากการส่งกล้อง SEM พบว่า การผสม PLA กับ MDI นั้นไม่เข้ากัน ซึ่ง

สามารถสังเกตจากการเกิดช่องว่าง รอบเม็ดแป้ง ขณะที่เติม MDI สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากัน ส่วนสมบัติเชิงความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC พบว่า ค่า T_g , T_c และ T_m ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเติม MDI ร่วมกับ polyester ซึ่งสอดคล้องกับการส่งกล้อง SEM พบว่าสูตรที่ผสม PLA/starch การเข้ากันของแป้งกับ PLA ค่อนข้างแย่มาก สังเกตจากรอยต่อที่นั่นจะมีช่องว่างระหว่างแป้งกับ PLA เนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกันของ PLA และแป้ง แต่เมื่อเติมสาร MDI รอยต่อระหว่างแป้งกับ PLA นั้นจะต่อเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC แบบอุณหภูมิไม่คงที่ พบว่า T_g ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อผสม PLA/starch ทั้งสูตรที่เติม และไม่เติม MDI แต่ T_c ลดลงในสูตรที่เติม MDI แสดงว่าการปรับปรุงรอยต่อของ PLA และแป้งมีส่วนช่วยเป็นสารก่อผลึก ดังนั้นจึงส่งผลให้ T_c ต่ำลง

S. W. Hwang และคณะ (2013) [47] ศึกษาการกราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และกายภาพของ PLA/starch โดยผสม PLA กับ แป้งข้าวโพดอัตราส่วนร้อยละ 0-30 โดยน้ำหนัก แล้วเปรียบเทียบกับสูตรที่เติมสาร Dicumyl peroxide (DCP) ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาปริมาณ 1 phr และสาร Maleic Anhydride (MA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันของหมู่ฟังก์ชันปริมาณ 2 phr ผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยเครื่องอัด จากการทดลองสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเครื่อง TGA เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว, T_d พบว่าความเสถียรทางความร้อนของ PLA ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งจาก 290 °C เป็น 263 °C ที่ปริมาณแป้งร้อยละ 30 โดยน้ำหนักเนื่องจากแป้งมีเสถียรทางความร้อนต่ำ รวมถึงสูตรที่เติม MA ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ การทดสอบด้วยเทคนิค DSC แบบอุณหภูมิคงที่ พบว่า T_g และ T_m มีค่าลดต่ำลงจากเดิม 58 °C เป็น 51 °C และจากเดิม 155 °C เป็น 150.6 °C เมื่อเติมสารเพิ่มความเข้ากันเทียบกับสูตรที่ไม่เติมแล้วค่านั้นค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากการกราฟต์มีผลให้สายโซ่สั้นลง รวมถึงค่า MW ก็ต่ำลงด้วย และอีกเหตุผลคือ MA สามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติกได้ ทำให้ T ลดลง ส่วน T_{cc} ค่าลดลงตามปริมาณแป้งทั้งสูตรที่เติมและไม่เติมสาร MA พบว่าลดลงจากเดิม 113 °C เป็น 103.1 °C ในสูตรที่เติม PLA/starch ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักกับ MA ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับการเติม MA มีผลให้สายโซ่เคลื่อนขยับได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดผลึกได้ง่าย รวมถึงแป้งยังทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ ดังนั้นจึงพบว่าปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 1.9 เป็น 17 ของสูตรที่ผสมแป้งร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

T. Ke และคณะ (2003) [48] ศึกษาพฤติกรรมการหลอมเหลวและจลนพลศาสตร์ ของแป้งข้าวโพดผสมกับ PLA ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 1-40 โดยน้ำหนัก ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แล้วศึกษา

สมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง DSC ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ ตั้งแต่ 90-125 °C แล้วเปรียบเทียบกับ สารก่อผลึกที่ผสมกับ PLA ปริมาณ 1 wt% จากการศึกษพบว่า ครึ่งเวลาการเกิดผลึก มีค่าน้อยสุด 13.6 นาที ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) 100 °C สำหรับ PLA บริสุทธิ์ และ 1.8-3.2 นาที ที่ T_c 105 °C สำหรับ PLA ผสมกับแป้งข้าวโพด อัตราส่วนต่างๆ ขณะที่ PLA กับที่ลค์ 1 wt% ลดลงเหลือ 0.4 นาที จึงกล่าวได้ว่า การเติมแป้งข้าวโพดและที่ลค์มีผลต่อเพิ่มอัตราการเกิดผลึกของ PLA นอกจากนี้อัตราการเกิดผลึกยังเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณแป้งข้าวโพดที่เติม ซึ่งการลดลงของ $t_{1/2}$ เมื่อเติมแป้งข้าวโพดและที่ลค์ลงใน PLA แสดงว่าแป้งข้าวโพดทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก แต่ยังมีประสิทธิภาพด้อยกว่าที่ลค์

H. Wang และคณะ (2001) [49] ศึกษาความแข็งแรงของพอลิแล็คติกแอซิด (PLA) ผสมแป้งวีท (wheat starch) ในอัตราส่วน PLA/wheat starch (55/45 โดยน้ำหนัก) แล้วผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวคู่ ที่อุณหภูมิ 180 °C หลังจากผสมนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดในแม่พิมพ์ อุณหภูมิ 176 °C เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ค่า Tensile strength Elongation at break และ Modulus มีค่าลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเติมแป้ง เนื่องจากแป้งและ PLA มีความเป็นขั้วต่างกัน ทำให้การยึดติดระหว่างแป้งและ PLA ค่อนข้างแย ซึ่งสามารถยืนยันด้วยการส่องกล้อง SEM แล้ว พบว่าเกิดช่องว่างบริเวณโดยรอบของเม็ดแป้ง จากนั้นได้ศึกษาต่อโดยการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเฟส โดยการเติม Methylene diphenyl diisocyanate (MDI) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันระหว่างแป้งกับ PLA ในปริมาณร้อยละ 0.25-2 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเติม MDI ผสมกับ PLA/wheat starch มีผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม MDI โดยปริมาณที่เหมาะสมที่สุดคือ เติมปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน ด้วยเครื่อง DSC พบว่า ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA ลดลงเมื่อเติมแป้ง เนื่องจากเม็ดแป้งไปขัดขวางการเคลื่อนที่สายโซ่โมเลกุลของ PLA ระหว่างการเกิดผลึก ขณะที่การเติม MDI ไม่มีผลต่อปริมาณความเป็นผลึก

3.3 การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและระดับความเป็นผลึก ด้วยแอลบ

M. Garcia และคณะ (2008) [50] ได้ศึกษาผลของชนิดเส้นใยธรรมชาติ ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ PLA ที่เป็น ใช้เส้นใยธรรมชาติ 2 ชนิด คือ แกลบข้าว(Rice husk) และเส้นใยปอ (Kenaf) โดยผสมเส้นใยแต่ละชนิดกับ PLA ในอัตราส่วน PLA/RH และ PLA/kenaf เป็น 100/0 80/20 70/30 โดยน้ำหนัก เพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างสารเติมแต่ง และพลาสติก จึงผสม

Maleic Anhydride ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแล้วขึ้นรูปด้วยการฉีด การทดสอบแรงดึง พบว่าYoung's modulus สูงขึ้นจากการผสมเส้นใยธรรมชาติตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้จาก PLA มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ Tensile strength ลดลงหลังจากการเติมเส้นใยธรรมชาติ โดยเฉพาะกลบข้าว เนื่องจากกลบข้าวมีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (Aspect ratio) ต่ำกว่าของเส้นใยปอ ส่งผลให้พื้นที่การยึดเกาะระหว่างPLA กับกลบด้อยลง จึงเปราะแตกง่าย ส่วนการทดสอบแรงดัดโค้ง พบว่า การเติมเส้นใยปอมีผลให้ Flexural modulus และ Flexural strength เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามการเติมกลบทำให้สมบัตินี้ลดลงทั้ง 2 ค่า การทดสอบการกระแทกแบบแบบชาร์ปี พบว่าการเติมกลบทำให้ Impact strength ลดลง ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมเส้นใยปอมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ ร้อยละ 50 การทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคต (VST) พบว่า การเติมกลบ และเส้นใยปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิ

A.Yussuf และคณะ (2010) [51] ได้ศึกษาอิทธิพลของเส้นใยธรรมชาติต่อพลาสติกชีวภาพ PLA สมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยนำ PLA ผสมกับเส้นใยปอ (Kenaf, K) และกลบข้าว (Rice husk, RH) ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 70-250 μm ด้วยอัตราส่วน PLA/K, PLA/RH ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่แล้วขึ้นรูปด้วยการฉีด จากการทดสอบแรงดัดโค้ง พบว่าflexural modulus เพิ่มขึ้นเมื่อเติมกลบ และเส้นใยปอ ปริมาณร้อยละ 18-32 แต่ flexural strength ลดลง จาก 110 MPa เป็น 90 MPa เมื่อเติมเส้นใยปอ และลดลงเหลือ 85 MPa เมื่อเติมกลบ เนื่องจากกลบ และเส้นใยปอ ไม่ยึดเกาะกับPLA หรืออาจสร้างพันธะเพียงอ่อนๆเท่านั้น อีกทั้งกลบมีซิลิกา (silica) องค์ประกอบปริมาณมากถึงร้อยละ 19 ซึ่งส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่าง 2 เฟส เมื่อทดสอบการกระแทก พบว่าImpact strength ลดลงประมาณร้อยละ 9-23 เมื่อเติมเส้นใยทั้ง 2 ชนิดปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน ด้วยเครื่อง TGA พบว่า อุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 10 ลดลงจาก 323 $^{\circ}\text{C}$ เป็น 321 $^{\circ}\text{C}$ เมื่อเติมเส้นใยปอ และลดลงเหลือ 305 $^{\circ}\text{C}$ เมื่อเติมกลบ ส่วนการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ พบว่าเส้นใยมีส่วนช่วยให้การย่อยสลายเพิ่มขึ้นจาก 1.2 % ในระยะเวลา 90 วัน และอัตราการย่อยสลายเร็วขึ้นหลัง 90 วัน

J. M.-Rovshandeh และคณะ (2014) [52] ศึกษาการกำจัดลิกนินจากกลบข้าว ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และสัณฐานวิทยาของPLA ผสมแป้ง สำหรับผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยนำผงกลบข้าว (Rice husk, RH) และ กลบข้าวฟอก (Bleached rice husk, BRH) ที่

ผ่านกระบวนการฟอกด้วยกรด-เบสเข้มข้นขนาดอนุภาค 180-200 μm แล้วนำมาผสมกับ PLA ที่ผสมกับ แป้ง (PLA/Starch : อัตราส่วน 50/50 โดยน้ำหนัก) ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนัก และผสมสาร Diphenyl-methane-4,40-diisocyanate (MDI) ปริมาตรร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารประสานคู่ควบเพื่อให้ PLA กับ แกลบผสมเข้ากันได้ดี และ triethyl citrate (TC) ปริมาตรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติก จากการทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันของแกลบที่ผ่านการฟอก ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าพีคที่เลขคลื่น 1587 cm^{-1} ที่บ่งบอกถึงวงอะโรมาติกหายไป แสดงว่าลิกนินถูกกำจัดออก การทดสอบแรงดึง พบว่า Tensile strength มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเติมแกลบทั้ง 2 ชนิดด้วยปริมาณที่เพิ่มขึ้น แต่แกลบที่ฟอกมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ส่วน Elongation at break มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมแกลบมากขึ้น โดยเฉพาะแกลบที่ฟอก อาจเนื่องจากการเติมปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดการจับตัวเป็นก้อน รวมทั้งแกลบที่ฟอกยังมีอิทธิพลที่มาจากซิลิกา ซึ่งส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างแกลบลดลง PLA จึงเปราะแตกง่าย การทดสอบการกระแทก พบว่า RH มี Impact strength ลดลงเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับสูตรที่เติม BRH การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าสูตร RH มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำสุดอยู่ที่ร้อยละ 6.24 จากร้อยละ 9.11 เนื่องจากแกลบมีลิกนิน ซึ่งมีโครงสร้างของหมู่แอลคิลที่เกะกะ (Steric hindrance effect) ส่งผลให้ขัดขวางการเกิดผลึก ส่วนสูตร BRH มีปริมาณความเป็นผลึกสูงขึ้นเนื่องจากซิลิกาทำหน้าที่เป็นจุดก่อผลึก อีกทั้งยังมีค่า T_c ลดลง

T.P. Thao Tran และคณะ (2014) [53] ศึกษาการใช้วัสดุชีวภาพจากแกลบข้าว และแกลบวีต เป็นวัสดุเสริมแรงใน PLA โดยพบว่า การยึดติดระหว่างเฟสของแกลบ กับ PLA นั้นไม่ดี เนื่องจากความเป็นขี้ที่ต่างกันของผิวแกลบ ซึ่งมีความชอบน้ำ ในขณะที่ PLA ไม่ชอบน้ำ นอกจากนั้นบนพื้นผิวแกลบ ยังมีสารประกอบกลุ่ม Non-cellulosic เช่น Wax และ lignin โดยสารเหล่านี้จะไปขัดขวางการยึดเกาะของแกลบกับ PLA ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทดลองการปรับสภาพผิวของ แกลบ โดยใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 2- 10 % ที่เวลา 6-48 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง พบว่า สารละลาย NaOH สามารถกำจัด Wax และ lignin ออกจากผิวแกลบได้ โดยเวลาของการแช่แกลบมีผลต่อการสูญเสีย น้ำหนักของแกลบ ซึ่งเวลาที่แช่แกลบยาวนานน้ำหนักจะสูญเสียมากขึ้น แต่จะเริ่มคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง อีกทั้งความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ยังมีผลต่อการสูญเสีย น้ำหนักด้วย พบว่า สารละลาย NaOH เข้มข้น 5 % สามารถกำจัด Wax และ lignin ออกได้มากที่สุด ผลจากปรับสภาพผิวด้วย NaOH ทำให้แกลบว่องไวต่อความชื้น จากนั้นนำแกลบมาปรับสภาพผิวด้วยสาร silane 2 คือ

aminopropyltriethoxysilane (APS) และ glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPS) เข้มข้น 1% โดยเปรียบเทียบระหว่าง การปรับสภาพผิวด้วยสาร silane เพียงอย่างเดียว กับการปรับสภาพผิวด้วยสาร silane และ NaOH ที่ 5% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าการปรับสภาพผิวด้วยสาร silane เพียงอย่างเดียว สามารถลดความว่องไวต่อความชื้นได้ และช่วยเพิ่มพลังงานพื้นผิว โดย APS ให้ผลที่ดีกว่า GPS หลังจากการปรับสภาพผิวแล้ว นำไปผสมกับ PLA ปริมาณ 20 wt% พบว่า แกลบที่ปรับสภาพผิวด้วยสาร silane ร่วมกับ NaOH มี Flexural strength Tensile strength สูงกว่าแกลบที่ปรับสภาพผิวด้วยสาร silane หรือ NaOH เพียงอย่างเดียว ซึ่งอธิบายได้ว่าการปรับสภาพผิวช่วยให้เกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้น

สำหรับงานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่า ยังไม่มีการศึกษาโดยนำวัสดุชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็น แกลบอบ ข้าวเจ้าอบ และแป้งข้าวเจ้ามาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก รวมถึงแสดงการเปรียบเทียบสารก่อผลึกชีวภาพแต่ละชนิดในเชิงประสิทธิภาพ เช่น ระดับความเป็นผลึก อัตราการตกผลึก และเสถียรภาพทางความร้อน โดยส่วนใหญ่ในวิจัยอื่นจะมุ่งเน้นการเติมแป้งและแกลบ เพื่อทำหน้าที่เพิ่มกระบวนการย่อยสลาย หรือลดต้นทุนการผลิตของ PLA เท่านั้น และแป้งที่นำมาใช้ก็นิยมผลิตจากพืชชนิดอื่น เช่น มันเทศ มันสำปะหลัง และข้าวโพด เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นการศึกษาวัสดุชีวภาพใหม่ที่ทำหน้าที่แตกต่างออกไป โดยใช้แกลบ และข้าวเจ้า ซึ่งสามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูกในประเทศไทย มาทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกอินทรีย์ จึงก่อให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา

บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีส่วนของวัตถุดิบ วิธีการดำเนินงาน และสภาวะการทดลองดังนี้

4.1 วัตถุดิบ

4.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)



รูปที่ 4.1 พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

PLA เกรดฉีดขึ้นรูป (3052D) จากบริษัท Natureworks LLC ลักษณะเป็นเม็ดใส ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และมีสมบัติเชิงกายภาพ เชิงความร้อน และเชิงกล ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของ PLA

สมบัติ	ค่าการทดสอบ		มาตรฐาน
สมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties)			
ความหนาแน่น (Density)	1.24	kg/m ³	ASTM D792
ความแข็งในหน่วย Shore D (Shore D Hardness)	83.74	D	ASTM D2240
สมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties)			
อุณหภูมิแปรสภาพคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature, T _g)	60.0	°C	-
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting Temperature, T _m)	152.0	°C	-

อุณหภูมิอ่อนตัวแบบไวแคต (Vicat Softening Temperature)	56.5	°C	ASTM D1525
สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)			
มอดูลัสภายใต้แรงดึง (Tensile Modulus)	2.85	GPa	ASTM D638
ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength)	64.30	MPa	ASTM D638
ระยะยืด ณ จุดคราก (Elongation at Yield)	2.52	%	ASTM D638
มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง (Flexural Modulus)	3.97	GPa	ASTM D790
ความต้านทานแรงดัดโค้งสูงสุด (Ultimate Flexural Strength)	109.88	MPa	ASTM D790
ความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength)	2.84	kJ/m ²	ASTM D256

4.1.2 ทัลค์ (Talc)

ทัลค์ รหัส TULCUM30 สนับสนุนโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และมีสมบัติเชิงกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของทัลค์ที่ใช้ในการศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ทัลค์

ตารางที่ 4.2 สมบัติของทัลค์

สมบัติ	หน่วย	ค่าการทดสอบ
สมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties)		
ค่าความขาว		88.39
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	µm	18.7
สมบัติเชิงเคมี (Chemical Properties)		
Silicon Dioxide	SiO ₂	60.15%
Magnesium Oxide	MgO	30.06%
Moisture %	H ₂ O	0.05%
pH		8.67

4.1.3 ข้าวเจ้าบด (Rice flour)

เป็นเมล็ดธัญพืชชนิดหนึ่ง ที่มีสีขาวหลังการขัดสี และมีองค์ประกอบหลักคือพอลิแซคคาไรด์ ประกอบด้วยโมเลกุล 2 กลุ่ม ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) และกลุ่มอะไมโลเพคติน (Amylopectin) และมีโปรตีนกับไขมัน เป็นส่วนน้อย สำหรับการทดลองได้นำปลายข้าวเจ้ามาบดด้วยเครื่อง Ball mill เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 80 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ข้าวเจ้าบด

4.1.4 แป้งข้าวเจ้า (Rice starch)

เป็นแป้งข้าวเจ้าบดที่ผ่านกระบวนการสกัด โปรตีน และไขมัน ออกจนเหลือแต่ส่วน อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยฟลาว อินดัสทรี จำกัด มีลักษณะเป็นผงสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมีสมบัติเชิงกายภาพ และเชิงเคมี ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 แป้งข้าวเจ้า (Rice starch)

ตารางที่ 4.3 สมบัติเชิงกายภาพ และเชิงเคมีของแป้งข้าวเจ้า

สมบัติ	หน่วย	ค่าการทดสอบ
สมบัติเชิงกายภาพ (Physical Properties)		
ลักษณะปรากฏ		สีขาว
ความชื้น	%	<14
ความกรด-เบส		5-7
ความหนืด	BU	>350
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	μm	13
สมบัติเชิงเคมี (Chemical Properties)		
ปริมาณโปรตีน	%	<0.75
ปริมาณอะไมโลส	%	28.09

4.1.5 ผงแกลบ (Husk flour)

แกลบเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากการขัดสีข้าว เป็นเส้นใยธรรมชาติที่เป็นส่วนห่อหุ้มเมล็ดข้าวมีลักษณะสีน้ำตาลอ่อน แกลบประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้าซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ไม่ละลายในน้ำ เมื่อนำมาบดด้วยเครื่อง Ball mill เป็นระยะเวลา 15 ชั่วโมงจะได้ผงแกลบละเอียดสีน้ำตาลอ่อน ขนาดอนุภาคประมาณ 66.7 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผงแกลบบด

4.2 ขั้นตอนการทำวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใส่สารก่อผลึก แกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารก่อผลึกปริมาณร้อยละ 0.5 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

ส่วนที่ 2 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดสารก่อผลึก อุณหภูมิแม่พิมพ์ เวลาการอบอ่อน และอุณหภูมิการอบอ่อน ดังสภาวะที่แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สภาวะที่ใช้ขึ้นรูปสำหรับการศึกษาอิทธิพลของการอบอ่อน

สารก่อผลึก	ปริมาณสารก่อผลึก (wt%)	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	อุณหภูมิการอบอ่อน (°C)
ทัลค์	1	40 และ 90	100 และ 105
แคลบด	1	40	100
ข้าวเจ้าบด	1	40	100

4.2.1 การหลอมผสม (Melt blending)

ส่วนที่ 1 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใส่สารก่อผลึก

กระบวนการหลอมผสม PLA เริ่มจากการอบเม็ด PLA แบ่งข้าว และผงแคลบ ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 12-24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นผสมแห้ง PLA กับ สารอื่นตามสูตรที่มีสัดส่วน ดังตารางที่ 4.5-4.8 ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw) (Twin screw extruder, Labtech Engineering) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อุณหภูมิในการหลอมผสมช่วง 155–160 °C ที่ความเร็วรอบสกรู 45 รอบต่อนาที พอลิเมอร์หลอมเหลวถูกส่งต่อไปยังหัวตาย และถูกทำให้เย็นตัวโดยใช้ระบบน้ำหล่อเย็น จากนั้นนำเส้นพลาสติกไปตัดให้ได้ขนาดพอเหมาะ เมื่อได้เม็ดที่ตัดเสร็จเรียบร้อยนำไปอบไล่ความชื้นอีกครั้ง ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูปต่อไป



รูปที่ 4.6 เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer, Thermo Prism Pilot 3)

ตารางที่ 4.5 ปริมาณ PLA และแกลบอบ ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร

สูตร	ปริมาณ PLA (wt%)	ปริมาณแกลบอบ (wt%)
Neat PLA	100	-
PLA/ Rice husk 0.5%	99.5	0.5
PLA/ Rice husk 1%	99	1
PLA/ Rice husk 2%	98	2
PLA/ Rice husk 5%	95	5

ตารางที่ 4.6 ปริมาณ PLA และข้าวเจ้าอบ ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร

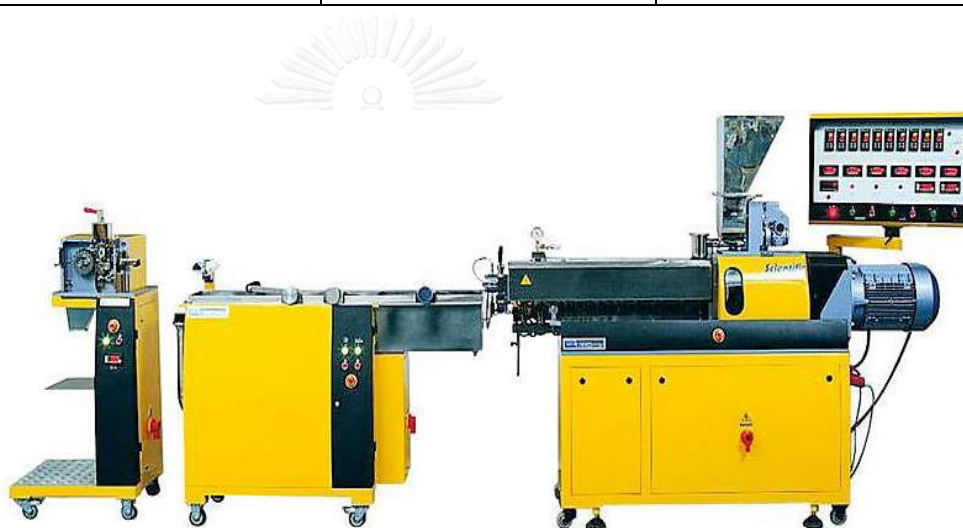
สูตร	ปริมาณ PLA (wt%)	ปริมาณข้าวเจ้าอบ(wt%)
Neat PLA	100	-
PLA/ Rice flour 0.5%	99.5	0.5
PLA/ Rice flour 1%	99	1
PLA/ Rice flour 2%	98	2
PLA/ Rice flour 5%	95	5

ตารางที่ 4.7 ปริมาณ PLA และแป้งข้าวเจ้า ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร

สูตร	ปริมาณ PLA (wt%)	ปริมาณแป้งข้าวเจ้า (wt%)
Neat PLA	100	-
PLA/ Rice starch 0.5%	99.5	0.5
PLA/ Rice starch 1%	99	1
PLA/ Rice starch 2%	98	2
PLA/ Rice starch 5%	95	5

ตารางที่ 4.8 ปริมาณ PLA และทัลค์ ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละสูตร

สูตร	ปริมาณ PLA (wt%)	ปริมาณทัลค์ (wt%)
Neat PLA	100	-
PLA/ Talc 0.5%	99.5	0.5
PLA/ Talc 1%	99	1
PLA/ Talc 2%	98	2
PLA/ Talc 5%	95	5



รูปที่ 4.7 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ แบบหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating screw)

ส่วนที่ 2 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน ร่วมกับสารก่อผลึก

กระบวนการหลอมผสมมีขั้นตอนเหมือนกับการศึกษาส่วนที่ 1 เพียงแต่ผสม PLA กับแคลอบบด ข้าวเจ้าบด และทัลค์ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเท่านั้น

4.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

ส่วนที่ 1 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใช้สารก่อผลึก

นำพอลิเมอร์แต่ละสูตรที่ผ่านการหลอมผสมจนกลายเป็นเม็ดตัด ไปไล่ความชื้นด้วยการอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง เพื่อลดปัญหาการเกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน จากนั้นนำเม็ดตัดไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ด้วยวิธีการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยตั้งอุณหภูมิกระบอกฉีด (Barrel) เป็น 150-160 องศาเซลเซียส อุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 องศาเซลเซียส และใช้เวลาหล่อเย็น (Cooling time) 5 นาที เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA มีเวลาเพียงพอสำหรับการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นขณะเย็นตัว และให้ชิ้นงานสามารถงรูป เพื่อที่จะถอดออกจากแม่พิมพ์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย สุดท้ายนำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปแต่ละสูตร ไปทดสอบสมบัติเชิงกล เชิงความร้อน และสัณฐานวิทยาต่อไป



รูปที่ 4.8 เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine, Manumold 45e)

ส่วนที่ 2 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน ร่วมกับสารก่อผลึก

นำเม็ดพอลิเมอร์ตัด ไปไล่ความชื้นด้วยการอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง เพื่อลดปัญหาการเกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสมบัติ

เชิงกล ด้วยวิธีการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) โดยตั้งอุณหภูมิกระบอกลีด (Barrel) 150-160 องศาเซลเซียส และตั้งอุณหภูมิแม่พิมพ์ กับเวลาหล่อเย็น (Cooling time) ดังตารางที่ 4.9 หลังจากฉีดขึ้นรูปเสร็จ นำชิ้นงานไปอบอ่อนต่อไป

ตารางที่ 4.9 สภาวะการฉีดขึ้นรูป

สูตร	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	เวลาหล่อเย็น (นาท)
PLA/Talc 1%	40	1
	90	
Neat PLA	40	
PLA/Rice flour 1%		
PLA/Rice husk 1%		

4.2.3 การอบอ่อน (Annealing)

นำชิ้นงานจากการฉีดขึ้นรูปของส่วนที่ 2 มาอบอ่อนด้วยตู้อบลมร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ และระยะเวลาการอบ ต่อชิ้นงานแต่ละสูตร โดยทุกสูตรจะถูกอบในตู้ที่ตั้งอุณหภูมิตามกำหนดเป็นระยะเวลา 3 นาที่ เพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิเทียบเท่ากับกับสภาวะที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงเริ่มนับเวลาการอบ ซึ่งสภาวะที่ใช้อบมีความแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่

4.10



รูปที่ 4.9 ตู้อบลมร้อน (Oven, Memmert UNB 400)

ตารางที่ 4.10 สภาวะการอบอ่อนของแต่ละสูตร

สูตร	อุณหภูมิห้อง (°C)	เวลาอบอ่อน (นาที)
PLA/Talc 1%	100	1 3 5 10 และ 20
	105	
Neat PLA	100	30 60 90 120 180 และ 240
PLA/Rice flour 1%		
PLA/Rice husk 1%		

4.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน

การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบด้วย 2 ด้านหลัก คือสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงความร้อน เพื่อให้ทราบถึงขีดความสามารถของวัสดุนั้น รวมถึงการนำไปใช้เปรียบเทียบกับวัสดุอื่นด้วย โดยการทดสอบทั้งหมดถูกดำเนินการภายใต้มาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM)

4.2.4.1 สมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties)

ก.) การวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก (อุณหภูมิการหลอมเหลว และระดับความเป็นผลึก

เครื่อง DSC ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการดูด และคายพลังงานของวัสดุ การวิเคราะห์ถูกดำเนินแบบอุณหภูมิไม่คงที่ (Non isothermal) เพื่อหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (Cold-crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และระดับความเป็นผลึก ($X_m\%$) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ 2 การวิเคราะห์เริ่มโดยการชั่งวัสดุ 5-10 มิลลิกรัม. ใส่ลงในถ้วยอลูมิเนียม แล้วปิดฝา จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แล้วเริ่มให้ความร้อนตั้งแต่ 20-210 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ช่วงนี้เรียกว่า 1st heating สำหรับการหาระดับความเป็นผลึกของชิ้นงานจะใช้ช่วง 1st heating เท่านั้น เนื่องจากการเพิ่มระดับความเป็นผลึกเกิดจากการปรับปรุงชิ้นงานโดยกระบวนการทางความร้อน หลังจากนั้น คงอุณหภูมิที่ 210 °C เป็นเวลา 5 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงไปที่ 20 °C

ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 °C/min ช่วงนี้เรียกว่า cooling ต่อมาเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 210 °C อีกครั้งด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C/min ช่วงนี้เรียกว่า 2nd heating ซึ่งใช้สำหรับหา T_g T_{cc} และ T_m



รูปที่ 4.10 เครื่อง DSC (NETZSCH DSC 214 Polyma)

ข.) การศึกษาประสิทธิภาพการตกผลึกจากการวิเคราะห์ ครึ่งเวลาการตกผลึก

ครึ่งเวลาการตกผลึก (Crystallization half time) เป็นค่าบ่งชี้อัตราเร็วของการเกิดผลึก โดยนำ PLA มาวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละความเป็นผลึก และเวลาที่ใช้สำหรับการเกิดร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์ (Relative crystallinity) ที่ 50 โดยใช้เครื่อง DSC ที่ถูกดำเนินแบบ อุณหภูมิคงที่ (Isothermal temperature) ตัวอย่างจะถูกให้ความร้อนตั้งแต่ 20-210 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 °C/min แล้วคงไว้ที่อุณหภูมิ 210 °C เป็นเวลา 5 นาที ก่อนจะลดความร้อนด้วยอัตรา 20 °C/min ลงมายังอุณหภูมิ 95 100 105 และ 110 °C แล้วคงอุณหภูมิไว้จน PLA เกิดผลึกอย่างสมบูรณ์ ส่วนร้อยละความเป็นผลึกสัมพัทธ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\text{Relative Crystallinity} = \left[\frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \right] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ ΔH_t คือ ค่าเอนทาลปีของผลึกตั้งแต่เวลาเริ่มเกิดผลึกจนถึงเวลาตกผลึกใด ๆ ΔH_∞ คือ ค่าเอนทาลปีของผลึกตั้งแต่เวลาเริ่มเกิดผลึกจนถึงเวลาตกผลึกสมบูรณ์

ค.) ทดสอบอุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด (Heat distortion temperature, HDT)

อุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อน หรือ HDT ถูกทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D648 ด้วยเครื่อง Heat distortion Tester ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาดความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 115 มิลลิเมตร และหนา 3.5 มิลลิเมตร ภายใต้แรงกดแบบที่กระทำ 3 จุด ด้วยแรงกดคงที่ 0.46 MPa ในอ่างน้ำมันที่มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2 °C/min จนกระทั่งชิ้นงานทดสอบเกิดการโค้งงอและเปี้ยวเบนจากแนวเดิม 2.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.11 เครื่อง Heat distortion Tester (YASUDA No.148)

ง.) การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อน (Degradation temperature, T_d) ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analyser, TGA) แสดงดังในรูปที่ 4.12 โดยนำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25 ถึง 650 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

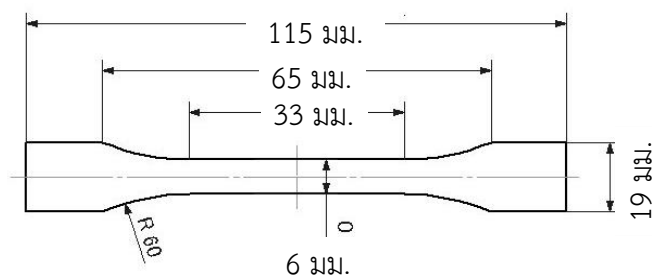


รูปที่ 4.12 เครื่อง Thermogravimetric Analyser (Mettler Toledo STARe system TGA1)

4.2.4.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ก.) การทดสอบภายใต้แรงดึง (Tensile testing)

การทดสอบภายใต้แรงดึง เป็นการทดสอบสมบัติของชิ้นงานภายใต้แรงกระทำแบบดึงในทิศทางตรงกันข้าม ตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยเครื่อง Universal machine testing ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยใช้ชิ้นงานทดสอบถูกฉีกขึ้นรูปเป็นลักษณะดัมเบล (Dumbbell) มีขนาดตามชนิดที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 คือ มีความยาวของเกจ (gauge length) 65 มิลลิเมตร หนา 3.5 มิลลิเมตร ชิ้นงานถูกยึดด้วยหัวจับ 2 ด้าน แล้วถูกดึงในทิศตรงกันข้าม อัตราการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยหัวดึง (Load) ขนาด 30 นิวตัน ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแต่ละสูตรถูกทดสอบอย่างน้อย 5 ตัวอย่าง



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงชนิดที่ 4 ตามมาตรฐาน ASTM



รูปที่ 4.14 เครื่อง Universal machine testing (INSTRON Instrument รุ่น 5567)

ข.) การทดสอบภายใต้แรงกระแทก (Impact testing)

ความต้านทานแรงกระแทก บอกรับความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (INSTRON CEAST 9050) ดังแสดงใน รูปที่ 4.15 โดยใช้ชิ้นงานขนาดความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 63.5 มิลลิเมตร และหนา 3.2 มิลลิเมตร บากชิ้นงานบริเวณกึ่งกลางทำมุม 45 องศา ระยะความกว้างถึงรอยบาก 10.16 มิลลิเมตร วางในแนว ตั้ง หรือแบบ Izod แล้วถูกตีโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก (Pendulum) ขนาด 1 จูล



รูปที่ 4.15 เครื่องทดสอบแรงกระแทก (INSTRON CEAST 9050)

ค.) การทดสอบภายใต้แรงดัดโค้ง (Flexural testing)

ความต้านแรงดัดโค้ง ถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ด้วยเครื่อง Universal machine testing (INSTRON Instrument รุ่น 5567) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ชิ้นงานทดสอบขนาด ความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร ยาว 115 มิลลิเมตรและหนา 3.5 มิลลิเมตร ถูกกดด้วยแรงกระทำ 3 จุด ความเร็วในการกด 1 มิลลิเมตรต่อนาที และปรับระยะ support span ตามสูตร $s=d*16$ มิลลิเมตร (s ระยะ support span และ d ความหนาชิ้นงาน) ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์

4.2.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology)

ลักษณะการกระจายตัว และการยึดเกาะระหว่าง PLA กับสารก่อผลึกสามารถวิเคราะห์ได้ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดังรูปที่ 4.16 เตรียมโดยนำชิ้นงานไปแช่ในอ่างโทรเจนเหลวประมาณ 10 นาที แล้วหักชิ้นงานทันทีเพื่อให้เกิดรอยแตกแนวตัดขวางที่มีผิวเรียบ จากนั้นเคลือบพื้นผิวรอยแตกด้วยทองคำ ก่อนนำไปส่องด้วย SEM ซึ่งใช้ ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, JSM-6400)

4.2.6 การศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึก

พฤติกรรมการตกผลึกสามารถศึกษาได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ (Polarized optical microscope, Nikon LV100POL) ดังรูปที่ 4.17 เตรียมตัวอย่างด้วยการตัดชิ้นงานฟิล์มขนาด 1*1 เซนติเมตร แล้วไปวางบนแผ่นสไลด์ ก่อนจะนำไปให้ความร้อนด้วยด้วยแท่นให้ความร้อน (Hot stage) ซึ่งให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 210 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20 °C/min จากนั้นลดอุณหภูมิลงไปที่ 105 °C ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 20 °C/min แล้วคงอุณหภูมิไว้จนเกิดผลึกสมบูรณ์ พร้อมทั้งถ่ายรูป ณ เวลาต่าง ๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตกผลึก



รูปที่ 4.17 กล้องจุลทรรศน์โพลาไรซ์ (Polarized optical microscope, Nikon LV100POL)

บทที่ 5 ผลและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ สนใจการปรับปรุงเสถียรภาพทางความของ PLA โดยการเพิ่มระดับความเป็นผลึก ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือการเติมสารก่อผลึก และการอบอ่อน ส่วนผลการทดลองมีดังนี้

5.1 ปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใช้สารก่อผลึก

การเพิ่มระดับความเป็นผลึกของ PLA สามารถทำได้หลากหลายวิธี แต่สำหรับงานวิจัยนี้ เลือกใช้การเติมสารก่อผลึก ร่วมกับการอบอ่อน ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย และมีประสิทธิภาพ โดยการเพิ่มระดับความเป็นผลึกมักมีผลช่วยปรับปรุงการทนความร้อน และสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ดังนั้น จึงสนใจเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า เป็นสารก่อผลึกอินทรีย์ ปริมาณต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับ การเติมทัลค์ ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกอนินทรีย์ สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก

5.1.1 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

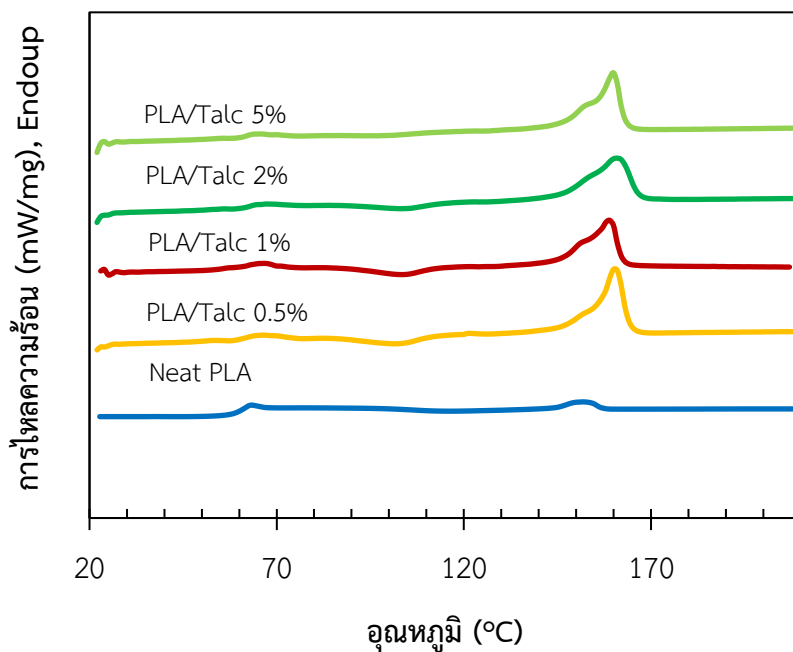
5.1.1.1 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC ภายใต้อุณหภูมิไม่คงที่ (Non - isothermal crystallization)

สมบัติเชิงความร้อนของ PLA บริสุทธิ์ PLA กับแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก บนช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1st heating) เพื่อวิเคราะห์หา อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และระดับความเป็นผลึก ดังแสดงในตารางที่ 5.1-5.4 และแสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดสอบ DSC ในรูปที่ 5.1-5.4 พบว่า การเติม แกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ มีผลให้ T_g เพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1-2 °C เนื่องจากสารก่อผลึกอาจไปขัดขวางการเคลื่อนขยับของสายโซ่โพลีเมอร์ PLA ได้ และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารก่อผลึกแต่ละชนิด พบว่า ไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง T_g

ส่วน T_{cc} ของ PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ลดลงเล็กน้อยจาก 115.9 °C ของ PLA บริสุทธิ์ เป็น 110 110 และ 113 °C เมื่อเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ โดยปริมาณของสารก่อผลึกแต่ละชนิดไม่ส่งผลต่อ T_{cc} อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/Talc พบว่า การเติมทัลค์ทำให้ T_{cc} เลื่อนลดลงมากกว่า 10 °C โดยเฉพาะ การเติมทัลค์

ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ลดลงเหลือเพียง 102 °C และไม่ปรากฏพีคของอุณหภูมิการเกิดผลึก เมื่อเติมทัลคัมปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อาจอธิบายได้ว่า ผลึกส่วนใหญ่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ระหว่างการเย็นตัวลง ขณะอยู่ในแม่พิมพ์ของกระบวนการขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้ว T_{cc} ที่เลื่อนต่ำลงบนช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ มีความหมายโดยนัยว่า อัตราการเกิดผลึกของ PLA/Rice husk PLA/Rice flour PLA/Rice starch และ PLA/Talc สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า แกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลคัม ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของนิวคลีโอ (center of nuclei) ในการเหนี่ยวนำการเกิดผลึกในช่วงเริ่มต้น (primary nucleation) ของ PLA

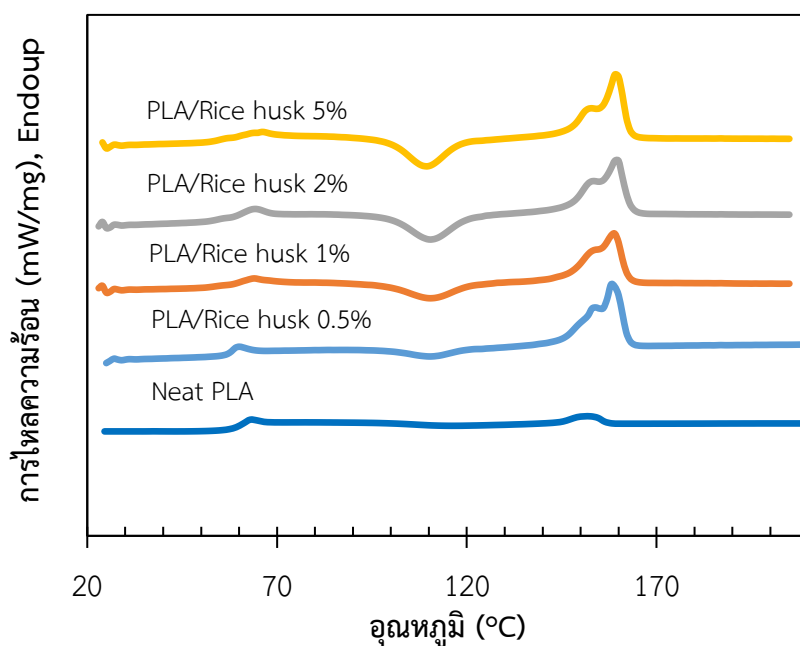
นอกจากนั้น การเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า ยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง T_m ของ PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ดังแสดงในตารางที่ 5.2-5.4 และแสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดสอบ DSC ในรูปที่ 5.2-5.4 พบว่า T_{m1} เลื่อนต่ำลงเล็กน้อยประมาณ 1-2 °C จากเดิม 153 °C ของ PLA บริสุทธิ์ อีกทั้งยังปรากฏ 2 พีคบนเทอร์โมแกรมช่วงเพิ่มอุณหภูมิ อนุกรมอุณหภูมิช่วง 149-153 °C และช่วง 156-160 °C โดย T_{m2} ของ PLA/Rice husk และ PLA/Rice flour เริ่มปรากฏพีคที่ 2 เมื่อเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ส่วน PLA/Rice starch เริ่มปรากฏที่ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก และการเติมทัลคัมก็ ปรากฏ T_m จำนวน 2 พีคเช่นเดียวกัน แต่ต้องเติมทัลคัมมากถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และแสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดสอบ DSC ในรูปที่ 5.1 ซึ่งพีค T_{m1} ณ ตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ การหลอมผลึกเดิมของพอลิเมอร์ ส่วนพีค T_{m2} ณ ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงกว่า คือ การหลอมผลึกที่มีความสมบูรณ์ และมีเสถียรทางความร้อนสูงกว่า T_{m1} ที่เกิดจากการจัดเรียงผลึกครั้งที่ 2 (recrystallization process) ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ



รูปที่ 5.1 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมทัลค์ ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1st heating)

ตารางที่ 5.1 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมทัลค์

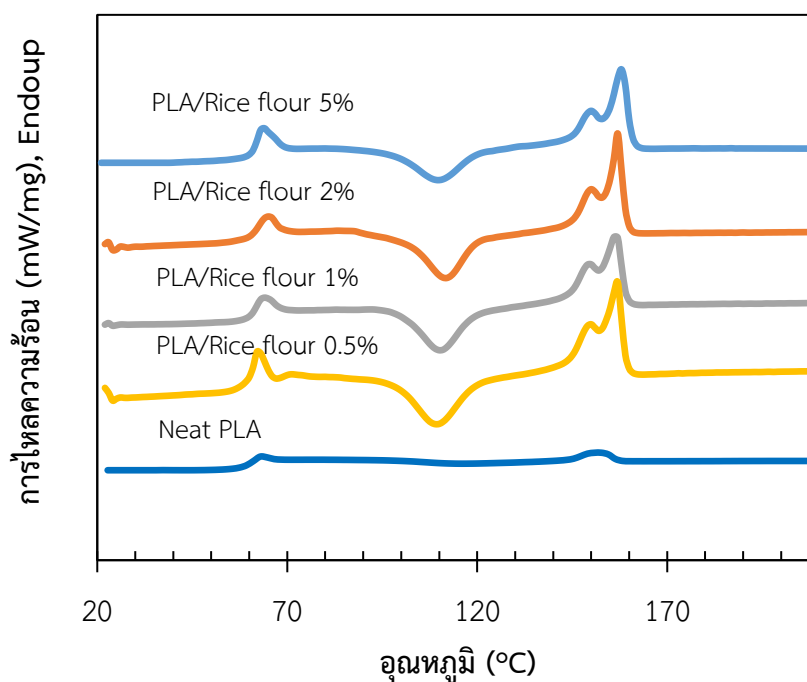
ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	X_m (%)
Neat PLA	59.6	115.9	153.0	-	3.61
PLA/Talc 0.5%	62.5	101.7	-	160.4	32.50
PLA/Talc 1%	62.3	103.5	-	158.9	32.33
PLA/Talc 2%	62.5	104.4	-	160.8	32.87
PLA/Talc 5%	62.3	-	153	160.1	36.35



รูปที่ 5.2 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแกลบบด ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1st heating)

ตารางที่ 5.2 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแกลบบด

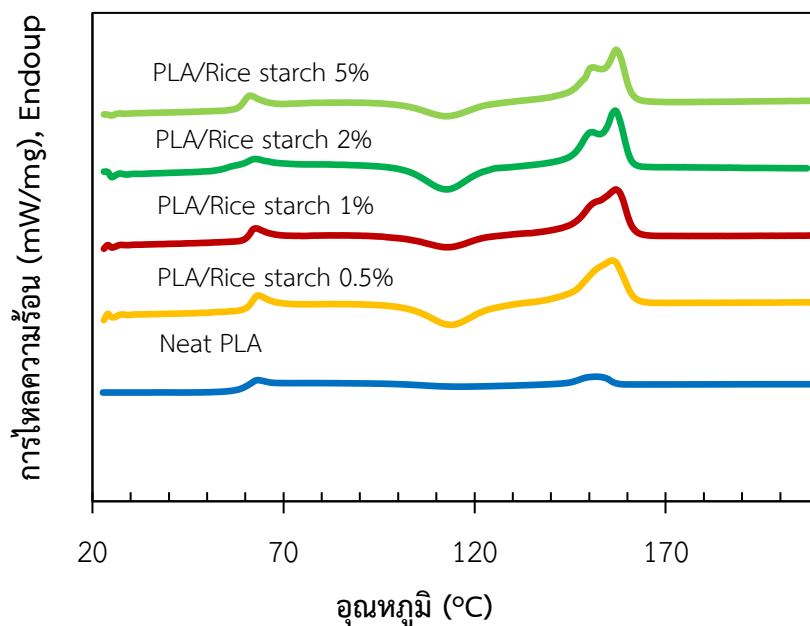
ตัวอย่าง	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	X _m (%)
Neat PLA	59.6	115.9	153.0	-	3.61
PLA/ Rice husk 0.5%	57.3	110.1	153.5	158.2	29.18
PLA/ Rice husk 1%	61.7	110.6	152.8	158.8	23.87
PLA/ Rice husk 2%	60.6	110.2	153.5	159.5	20.61
PLA/ Rice husk 5%	59.1	109.3	152.9	159.4	20.17



รูปที่ 5.3 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมข้าวเจ้าบด ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1st heating)

ตารางที่ 5.3 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมข้าวเจ้าบด

ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	X_m (%)
Neat PLA	59.6	115.9	153.0	-	3.61
PLA/ Rice flour 0.5%	61.1	109.4	149.8	156.8	16.14
PLA/ Rice flour 1%	61.8	110.3	149.5	156.5	13.30
PLA/ Rice flour 2%	61.7	111.8	150.0	157.0	12.76
PLA/ Rice flour 5%	61.7	110.1	150.0	158.0	9.38



รูปที่ 5.4 เทอร์โมแกรม DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแป้งข้าวเจ้า ร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่ 1 (1st heating)

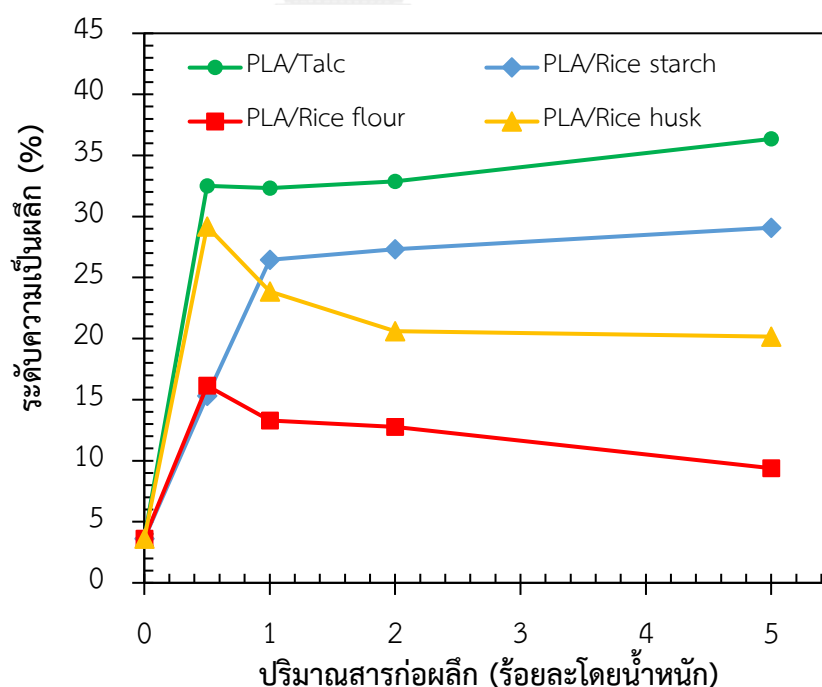
ตารางที่ 5.4 สมบัติเชิงความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA ผสมแป้งข้าวเจ้า

ตัวอย่าง	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	X_m (%)
Neat PLA	59.6	115.9	153.0	-	3.61
PLA/ Rice starch 0.5%	60.6	113.9	-	156.0	15.31
PLA/ Rice starch 1%	60.5	112.8	-	157.0	26.46
PLA/ Rice starch 2%	60.2	112.7	150.8	157.4	27.31
PLA/ Rice starch 5%	59.8	112.7	151.2	157.0	29.08

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้าและทัลค์ ปริมาณต่างๆ ต่อระดับความเป็นผลึกของ PLA ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และตารางที่ 5.1-5.4 พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเพิ่มจากร้อยละ 3.6 ของ PLA บริสุทธิ์ เป็นร้อยละ 29 16 15 และ 32 เมื่อเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้าและทัลค์ เพียงปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก เท่านั้น ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลเชิงปริมาณของสารก่อผลึกแต่ละชนิดต่อระดับความเป็นผลึก พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ PLA สูงขึ้นตามปริมาณการเติม แป้งข้าวเจ้าและทัลคัมที่เพิ่มขึ้น โดย PLA/Rice starch 5% และ PLA/Talc 5% มีระดับความเป็นผลึกสูงสุดถึง ร้อยละ 29 และ 36 ตามลำดับ แต่ในทางตรงกันข้าม การเติมแคลสเบด และข้าวเจ้าบด กลับมีผลให้ระดับความเป็นผลึกลดลง เมื่อปริมาณแคลสเบด และข้าวเจ้าบด ถูกเติมมากกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า การเติมแคลสเบด และข้าวเจ้าบดปริมาณมาก อนุภาคมีโอกาสดูดซับกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ ซึ่งอาจไปขัดขวางการเคลื่อนย้ายของสายโซ่ PLA ขณะจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ และการรวมตัวเป็นก้อนยังทำให้มีจำนวนจุดก่อผลึกและพื้นที่ผิวสำหรับเกิดผลึกน้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้น การปรับปรุงระดับความเป็นผลึกของ PLA ไม่จำเป็นต้องเติม แคลสเบด และข้าวเจ้าบด ปริมาณมาก และเมื่อเทียบกับ แป้งข้าวเจ้า และทัลคัม พบว่า ทั้งสองมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า เป็นผลให้มีการกระจายตัวที่ดี และมีพื้นที่บนผิวอนุภาคมากพอสำหรับการเกิดผลึก ดังนั้น แป้งข้าวเจ้า และทัลคัม จึงทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกที่ช่วยเพิ่มระดับความเป็นผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า แคลสเบด และข้าวเจ้าบด โดยสามารถเรียงประสิทธิภาพได้ดังนี้

ทัลคัม > แป้งข้าวเจ้า > แคลสเบด > ข้าวเจ้าบด

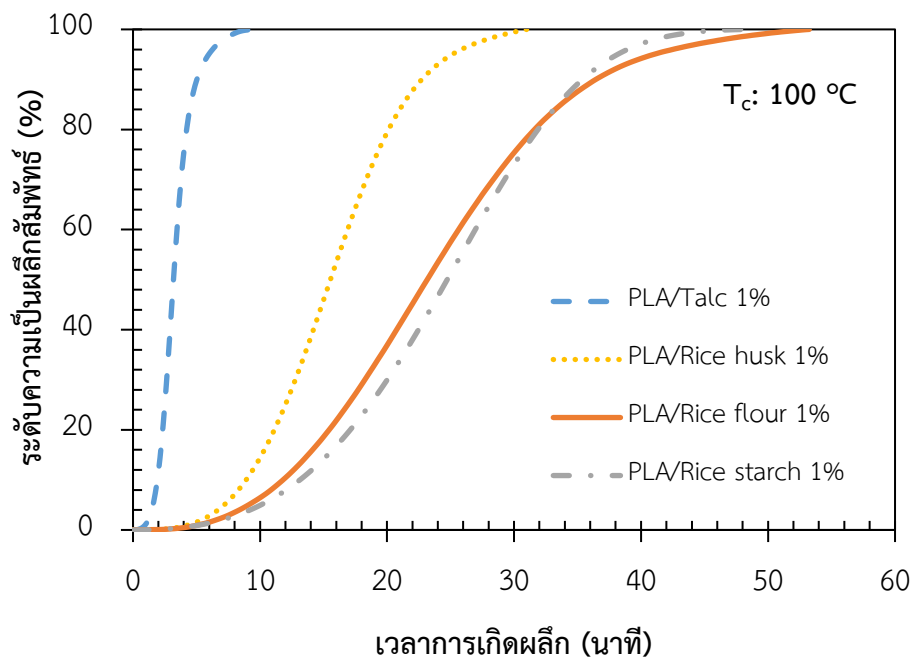


รูปที่ 5.5 ระดับความเป็นผลึกของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ

5.1.1.2 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC ภายใต้อุณหภูมิคงที่

(Isothermal crystallization)

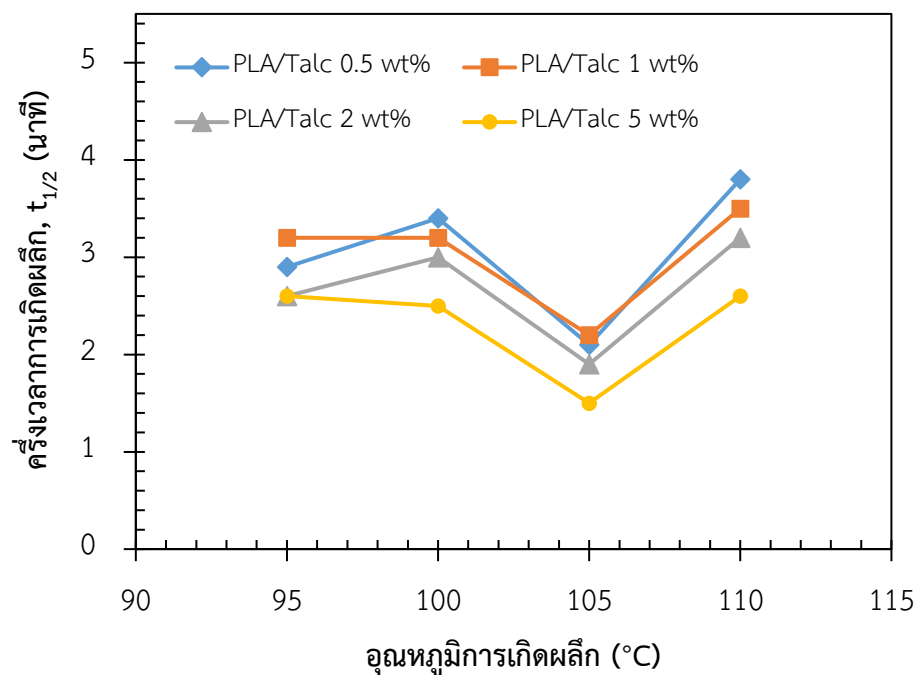
การศึกษากลไกของสารก่อผลึกแต่ละชนิดที่ถูกเติมปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ต่อ จลนพลศาสตร์การเกิดผลึก (Crystallization kinetic) ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ภายใต้อุณหภูมิคงที่ ณ อุณหภูมิการเกิดผลึก 100 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.6 แสดงระดับความเป็นผลึกสัมพันธ์กับระยะเวลาการเกิดผลึก เพื่อหาครึ่งเวลาการเกิดผลึก (Crystallization half time, $t_{1/2}$) ซึ่งเป็นเวลาที่ ถูกวัดขณะเกิดผลึกได้ร้อยละ 50 จากปริมาณผลึกทั้งหมดของแต่ละสูตร โดย $t_{1/2}$ เป็นค่าที่ใช้บ่งบอก อัตราเร็วของการเกิดผลึก จากการศึกษาพบว่า $t_{1/2}$ ของ PLA บริสุทธิ์ ลดลงอย่างชัดเจน โดยลดลง จากเวลามากกว่า 60 นาทีของ PLA บริสุทธิ์ เหลือ 15.5 21.4 24.8 และ 3.2 นาที เมื่อเติมเกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ ตามลำดับ เนื่องจากสารก่อผลึกเหล่านี้ ช่วยเพิ่มจำนวนจุดก่อผลึก จึงทำให้อัตราการเกิดผลึกเร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะเติมสารก่อผลึกแต่ละชนิดด้วยปริมาณที่ เท่ากัน แต่ทัลค์สามารถเร่งอัตราการเกิดผลึกให้เร็วกว่าการเติมเกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่า การที่ทัลค์มีขนาดอนุภาคเล็ก และมีลักษณะพื้นฐานเป็นแผ่นซ้อนกัน จึงมี โอกาสที่แผ่นทัลค์แต่ละชั้นจะแยกออกจากกันและกระจายตัวระหว่างการหลอมผสม เนื่องจากแรง ฉีกของสกรูขณะหลอมผสม เป็นผลให้ทัลค์ มีพื้นที่ผิวสัมผัส และจำนวนจุดก่อผลึกต่อปริมาตร มากกว่า ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ทัลค์เป็นสารก่อผลึกที่มีประสิทธิภาพกว่า เมื่อเทียบกับสารก่อผลึกชนิด อื่นที่เลือกมาศึกษา แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะกลุ่มสารก่อผลึกอินทรีย์ พบว่า เกลบบด ช่วยเร่งอัตราการ เกิดผลึกได้ดีกว่าข้าวบด และแป้งข้าวเจ้า เนื่องจาก เกลบบดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมแหลม ยาวและมีผิว ขรุขระ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับเกิดผลึกมากกว่าลักษณะทรงกลมของแป้งข้าว



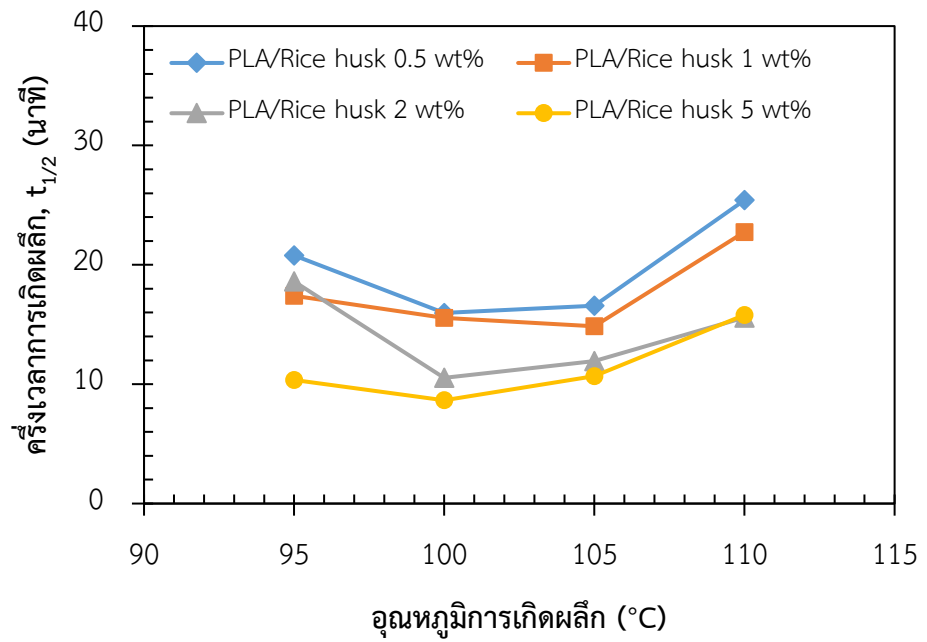
รูปที่ 5.6 ระดับความเป็นผลึกสัมพัทธ์ของ PLA ผสมสารก่อผลึกชนิดต่าง ๆ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 100 องศาเซลเซียส

การศึกษาผลเชิงปริมาณของสารก่อผลึกแต่ละชนิด และอุณหภูมิการเกิดผลึกต่อจลนพลศาสตร์ (Crystallization kinetic) ดังแสดงในรูปที่ 5.7-5.10 พบว่า ทั้ง PLA/Talc และ PLA/Rice husk มี $t_{1/2}$ แปรผันตามปริมาณสารก่อผลึก โดย $t_{1/2}$ ลดลงเรื่อยๆ จนมีเวลาน้อยที่สุด เมื่อปริมาณของทัลค์ และแคลอบบด ถูกเติมถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจาก อนุภาคของทัลค์มีขนาดเล็ก เมื่อเติมในปริมาณมากจึงช่วยเพิ่มจำนวนจุดก่อผลึกได้ นอกจากนั้นทั้งทัลค์และแคลอบบดยังมีลักษณะที่ช่วยเร่งอัตราการตกผลึกคือ ลักษณะยาวแหลม และผิวขรุขระ ขณะที่ $t_{1/2}$ ของ PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของข้าวเจ้าอบ และแป้งข้าวเจ้า โดยปริมาณที่ช่วยเร่งอัตราการตกผลึกได้ดีที่สุดคือ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิการเกิดผลึก ณ อุณหภูมิ 95 100 105 และ 110 °C พบว่า อุณหภูมิที่ทำให้อัตราการเกิดผลึกเร็วที่สุดหรือมีครึ่งเวลาการเกิดผลึกน้อยสุด คือ 100 °C สำหรับสูตรที่เติมแคลอบบด และแป้งข้าวเจ้า โดย $t_{1/2}$ น้อยสุดของ PLA/Rice husk และ PLA/Rice starch ประมาณ 8.6 และ 24.4 นาที ตามลำดับ ส่วนการเติมข้าวเจ้าอบ และทัลค์ มีอัตราการเกิดผลึกเร็วที่สุดที่อุณหภูมิ 105 °C โดย $t_{1/2}$ ของ PLA/Rice flour และ PLA/Talc ประมาณ 19.3 และ 1.5 นาที ตามลำดับ ส่วนการใช้อุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำกว่า

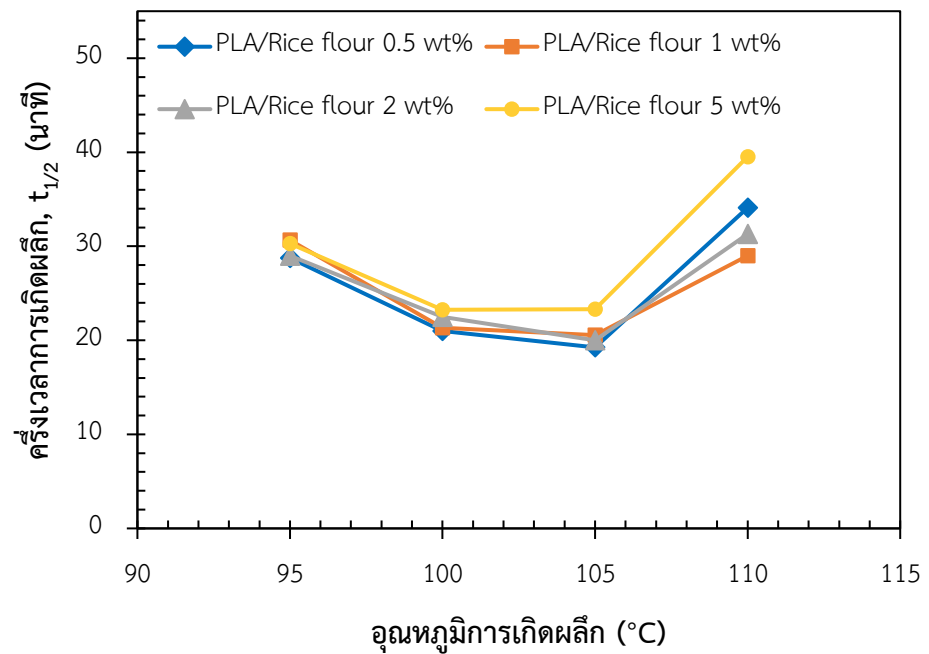
100 °C การเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลีแลกติก PLA เพื่อจัดเรียงตัวเป็นผลึกเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเข้าสู่สถานะคล้ายแก้ว จึงนำไปสู่ $t_{1/2}$ ที่ยาวนานกว่า และการใช้อุณหภูมิการเกิดผลึกมากกว่า 105 °C ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน เนื่องจากการได้รับพลังงานความร้อนปริมาณมากเป็นผลให้สายโซ่โพลีแลกติกเกิดการเคลื่อนขยับอยู่กันแบบหลวมๆ หรือสภาวะหลวมหลวมมากกว่า การอยู่ชิดเป็นระเบียบแบบผลึก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกช่วง 100-105 °C ช่วยเร่งอัตราการเกิดผลึกได้ดีที่สุด



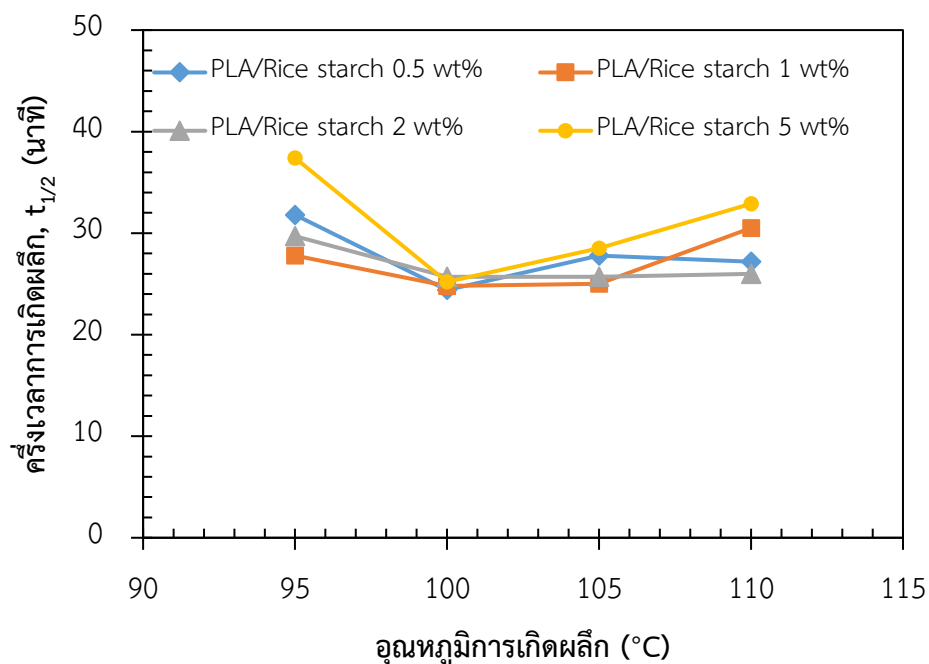
รูปที่ 5.7 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Talc ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.8 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Rice husk ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ



รูปที่ 5.9 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Rice flour ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ

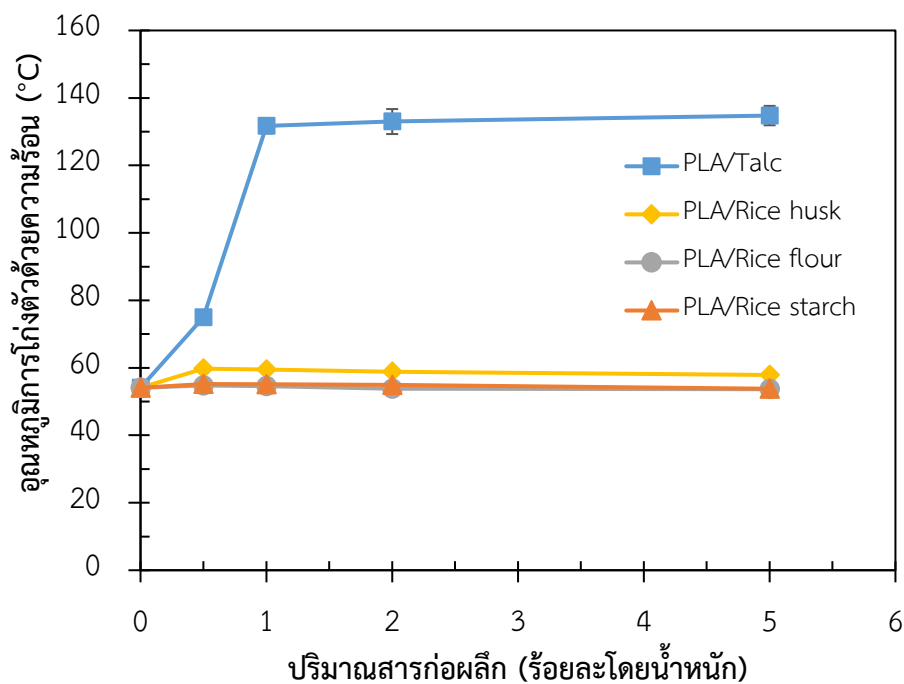


รูปที่ 5.10 ครึ่งเวลาการเกิดผลึก ของ PLA/Rice starch ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิการเกิดผลึกคงที่ต่าง ๆ

5.1.1.3 วิเคราะห์อุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT)

การต้านทานการเสียรูปทางความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของพลาสติกเมื่อนำไปใช้งานเกี่ยวกับความร้อน ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยค่า HDT รูปที่ 5.11 แสดงผลของการเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ด้วยปริมาณต่างๆ ต่ออุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT) พบว่า HDT ของ PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แม้จะมีการเพิ่มปริมาณของข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า ขณะที่ HDT ของ PLA/Rice husk เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จาก 54 °C ของ PLA บริสุทธิ์เป็น 60 °C เมื่อเติมแกลบบด ปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณแกลบบดที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเติมทัลค์เพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก กลับทำให้ HDT ของ PLA/Talc เพิ่มขึ้นถึง 132 °C และยังเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อทัลค์มีปริมาณมาก ซึ่งบ่งชี้ว่า การปรับปรุง HDT ของ PLA/Talc มีความสอดคล้องกับระดับความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า ช่วยเพิ่มระดับความเป็นผลึกได้เช่นเดียวกับการเติมทัลค์ แต่กลับมีปรับปรุงเสถียรภาพทางความ

ร้อนต่ำกว่า เนื่องจาก PLA/Talc สามารถเพิ่มระดับความเป็นผลึกสูงสุดเท่าที่ PLA จะทำได้ประมาณ 35 %

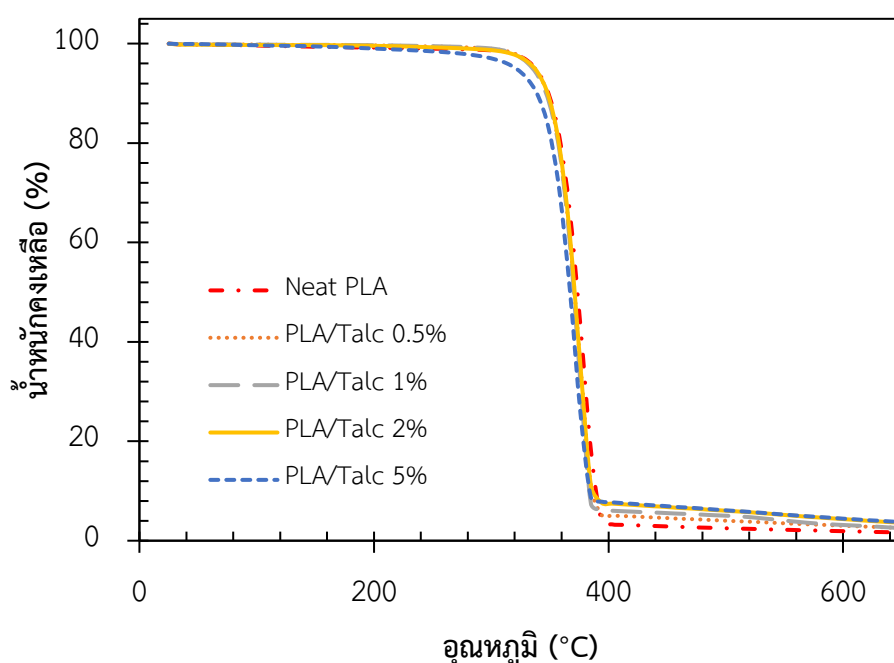


รูปที่ 5.11 อุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ

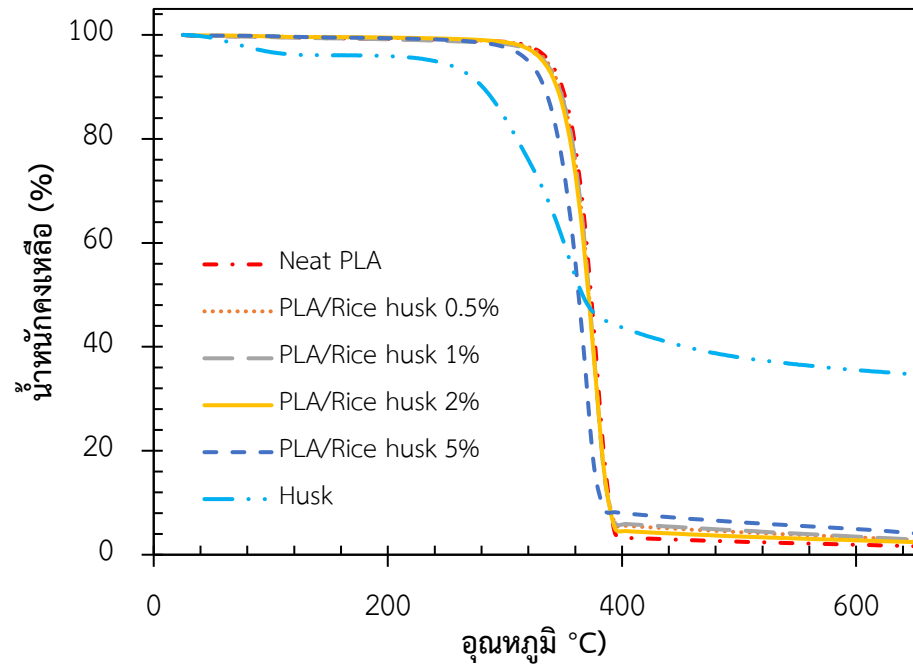
5.1.1.4 วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature, T_d)

อุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature, T_d) เป็นอีกค่าหนึ่ง que แสดงถึงความสามารถในการต้านทานความร้อนของพอลิเมอร์ T_d หาได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA โดยพิจารณาอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมเริ่มสูญเสียน้ำหนักได้ร้อยละ 5 จากน้ำหนักรวมทั้งหมด T_d ของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ ถูกแสดงในรูปที่ 5.12-5.15 พบว่า T_d ของ PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ลดลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณการเติมสารก่อผลึกที่เพิ่มขึ้น โดย T_d ลดลงจาก 337.2 °C ของ PLA บริสุทธิ์ เป็น 319.4 323.7 และ 331.6 °C เมื่อเติมแคลบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าว ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การลดลงของเสถียรภาพทางความร้อน สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการแทนที่สัดส่วนของ PLA ด้วยแคลบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าว ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานความร้อนต่ำกว่า โดยมี T_d ประมาณ 270-295 °C เท่านั้น ดังนั้นการเติมสารก่อผลึกเป็น

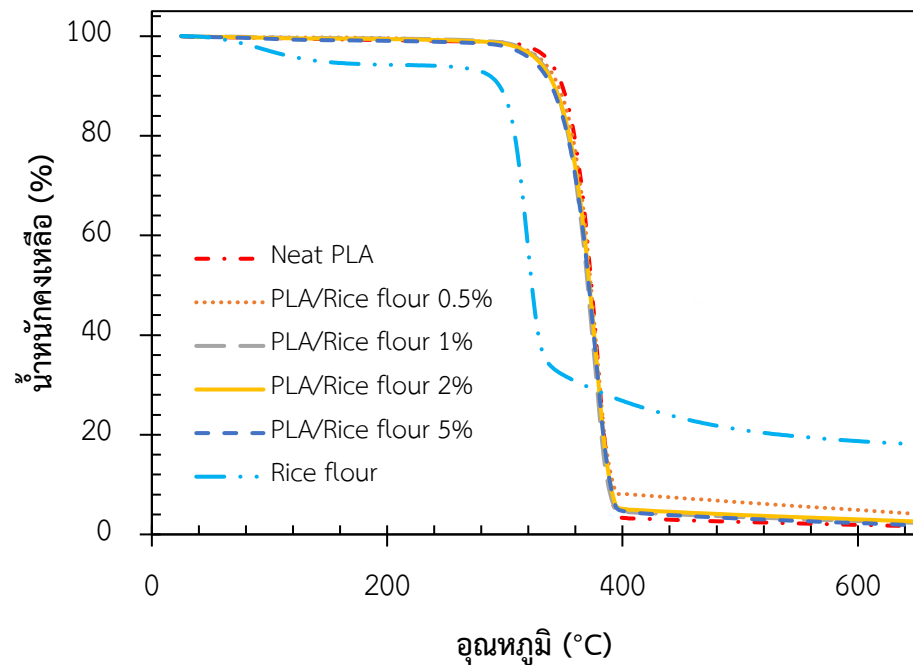
ปริมาณมากจึงยิ่งเหนี่ยวนำให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA ลดลงไปอีก ส่วน PLA/Talc พบว่าให้ผลเสถียรภาพทางความร้อนคล้ายกัน โดย T_d ลดลงจาก 336.6 °C เป็น 320.9 °C เมื่อเพิ่มปริมาณทัลคักร้อยละ 0.5 เป็น 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากทัลคัเป็นวัสดุนำความร้อนได้ค่อนข้างดีกว่า PLA จึงมีความเป็นไปได้ว่า เมื่อพอลิเมอร์ผสมได้รับความร้อน ส่วนที่เป็นทัลคัจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณโดยรอบทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA บริเวณรอบทัลคัเกิดการขาด หรือเสียหายก่อน ดังนั้นจึงนำไปสู่การลดลงของเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA เมื่อเติมทัลคัปริมาณมาก



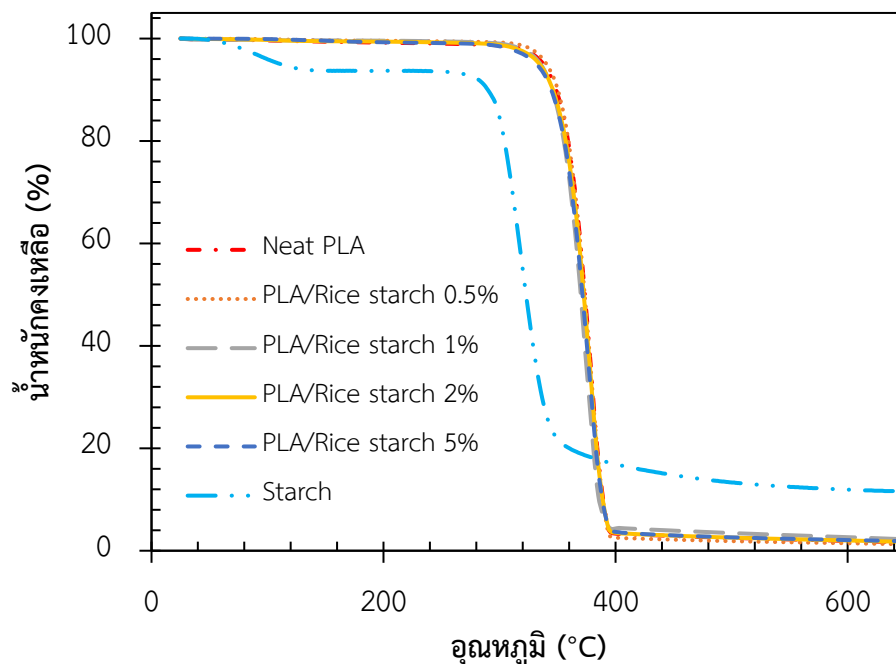
รูปที่ 5.12 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์และ PLA /Talc ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.13 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์ แกลบ บดและ PLA /Rice husk ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.14 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์ ข้าวเจ้าบดและ PLA /Rice flour ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก



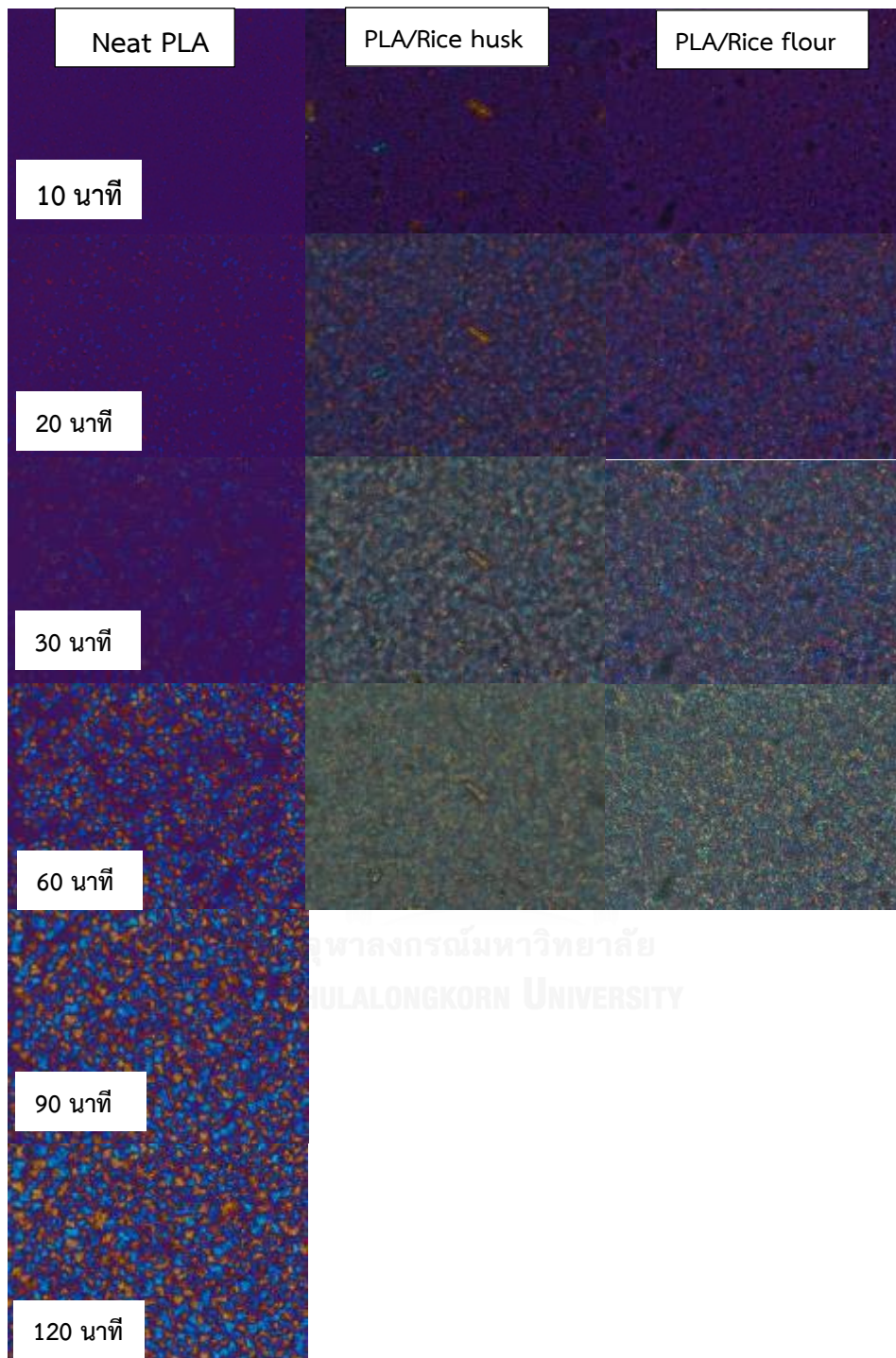
รูปที่ 5.15 เทอร์โมแกรม TGA แสดงการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของ PLA บริสุทธิ์ แป้งข้าวเจ้าและ PLA /Rice starch ปริมาณร้อยละ 0.5 1 2 และ 5 โดยน้ำหนัก

5.1.2 วิเคราะห์พฤติกรรมกาเกิดผลึก

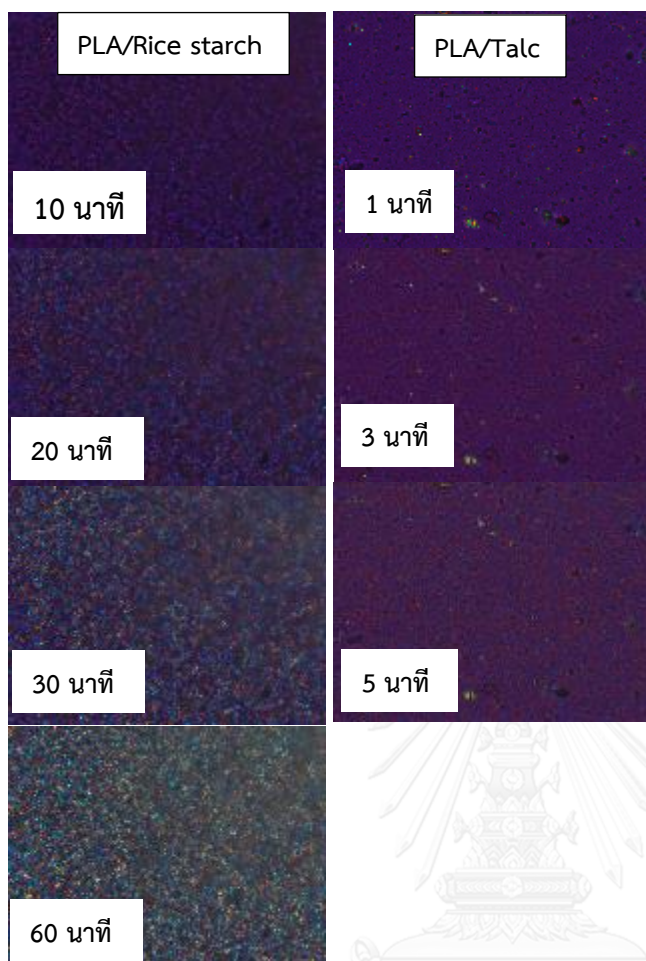
พฤติกรรมกาเกิดผลึก ถูกศึกษาด้วยกล้อง Polarized optical microscopy (POM) เพื่อสังเกตกาเกิดผลึก ระยะเวลา ขนาด และจำนวนของผลึก ภายใต้อุณหภูมิกาเกิดผลึกคงที่ ณ อุณหภูมิ 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกของ PLA เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีระยะเวลาการเกิดผลึกอย่างสมบูรณ์ค่อนข้างช้า ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่ทำให้ PLA มีอัตราการเกิดผลึกเร็วที่สุด จากการสังเกตด้วย POM ของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.16 พบว่า PLA บริสุทธิ์ เริ่มเกิดการตกผลึกหลังใช้เวลา 20 นาทีและต้องใช้เวลาเกือบ 120 นาที สำหรับการเกิดผลึกที่สมบูรณ์ ณ อุณหภูมิ 100 °C โดยผลึกที่เติบโตจนสมบูรณ์แต่ละผลึกสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน และมีขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามการเติมแคลสับด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้าช่วยให้ PLA สามารถตกผลึกได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการตกจากผลการวิเคราะห์ข้างต้น โดยใช้เวลาเพียง 10 นาที สำหรับการเริ่มตกผลึก และเกิดผลึกอย่างสมบูรณ์หลังใช้เวลาประมาณ 60 นาที ผลึกสมบูรณ์สุดท้ายที่ได้มีขนาดเล็ก และมีจำนวนมากกว่าผลึกของ PLA อย่างไรก็ตาม แม้การเติมแคลสับด ข้าวเจ้าบด และ

แป้งข้าวเจ้า สามารถลดอัตราการเกิดผลึกได้ แต่ยังต้องใช้ระยะเวลานานกว่าผลึกจะตกจนสมบูรณ์
เมื่อเทียบกับการเติมทัลคัมของ PLA/Talc พบว่าใช้เวลาเพียง 4 นาทีเท่านั้น





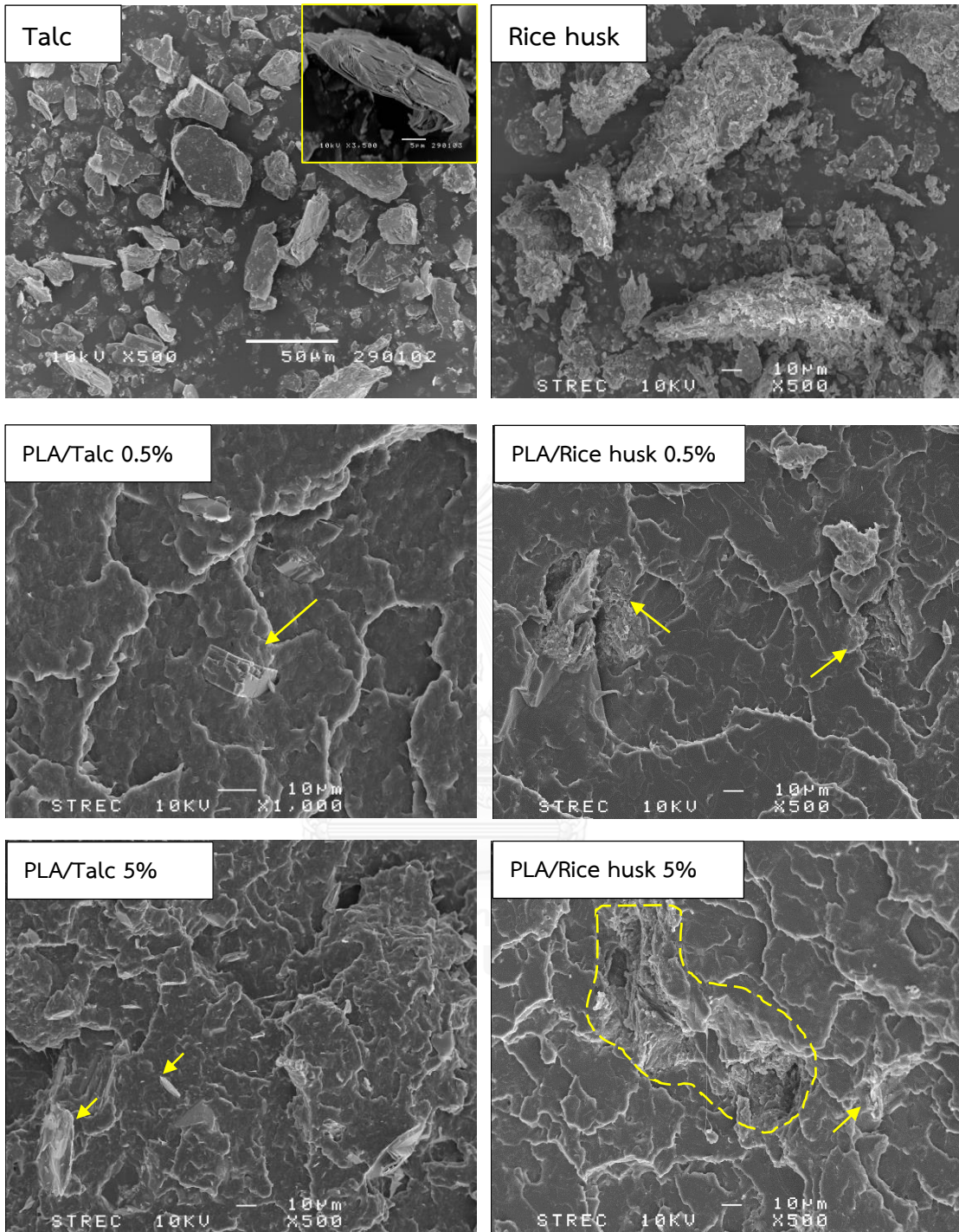
รูปที่ 5.16 พฤติกรรมการเกิดผลึกจาก POM ของ PLA ผสมสารก่อผลึกชนิดต่าง ๆ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 100 องศาเซลเซียส



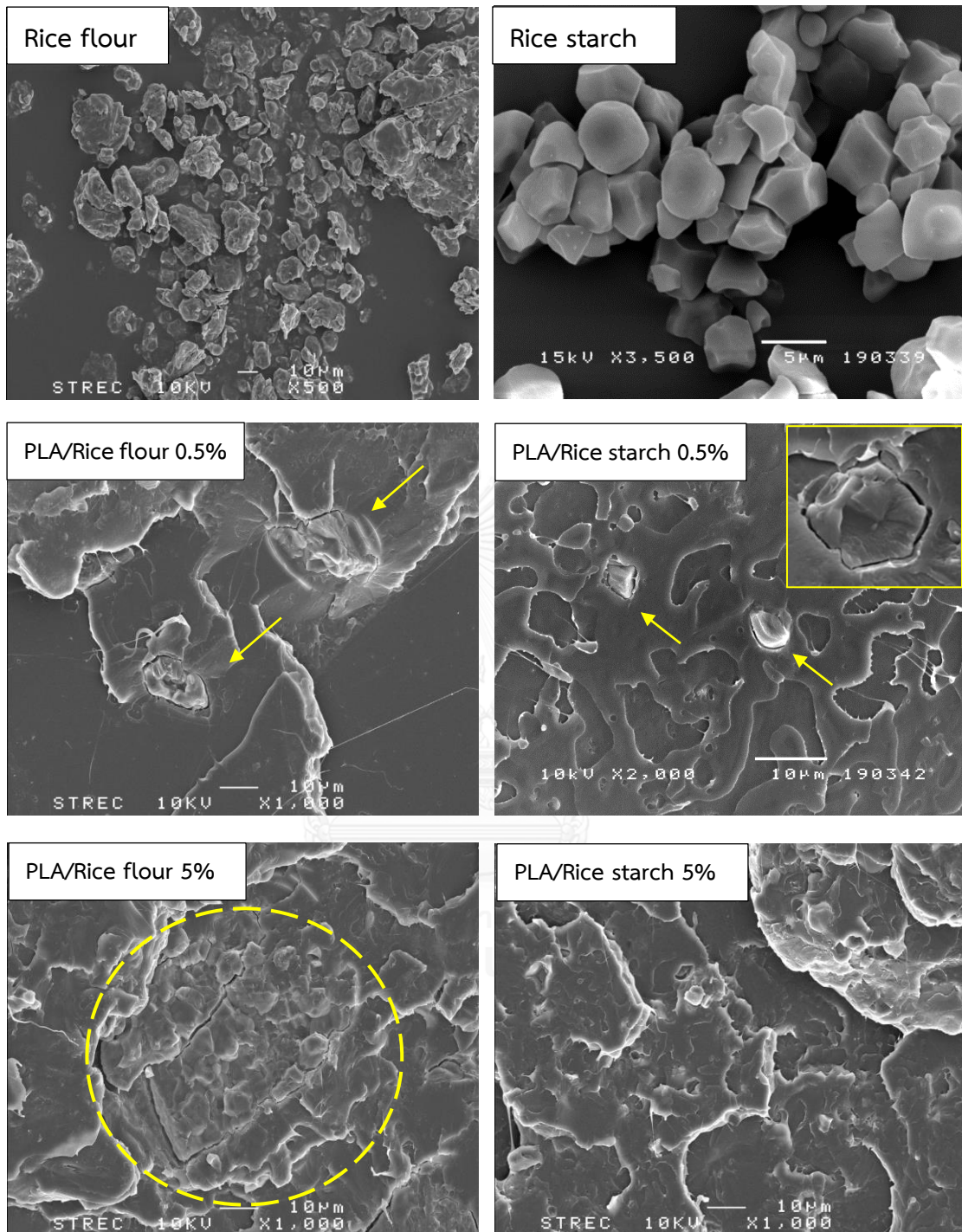
รูปที่ 5.16 พฤติกรรมการเกิดผลึกจาก POM ของ PLA ผสมสารก่อผลึกชนิดต่าง ๆ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 100 องศาเซลเซียส (ต่อจากหน้าก่อน)

5.1.3 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐาน การกระจายตัวและการยึดเกาะ ของ PLA กับเกลือบด ข้าวเจ้า บด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 5 โดยน้ำหนัก รูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่า ทัลค์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นเกล็ดขนาด 1-76 μm เกิดจากการซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ โดยแต่ละแผ่นของแผ่นทัลค์สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอใน PLA โดยไม่มีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) แม้ว่า จะเพิ่มปริมาณการเติมทัลค์จากร้อยละ 0.5 เป็น 5 โดยน้ำหนัก อีกทั้งการยึดเกาะระหว่างเฟสของ PLA กับทัลค์ ยังค่อนข้างดี สังเกตได้จากช่องว่างบริเวณรอบผิวสัมผัสของทัลค์ที่แทบไม่ปรากฏให้เห็น ด้วยสาเหตุนี้อาจช่วยส่งเสริมความต้านทานภายใต้แรงดึง และความต้านทานภายใต้แรงกระแทก ของ PLA/Talc ได้ เช่นเดียวกับการเติมเกลือบดที่มีลักษณะเป็นท่อนเล็กปลายแหลมสามารถเข้ากันได้ เป็นอย่างดีกับ PLA แต่มีบางส่วนยังอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม เมื่อปริมาณเกลือบดเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่วนการเติมข้าวเจ้าบดและแป้งข้าวเจ้า กับ PLA กลับให้ผลในทิศทางตรงกันข้าม ดังแสดง ในรูปที่ 5.18 พบว่า PLA กับข้าวเจ้าบดและแป้งข้าวเจ้า ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 5 โดยน้ำหนัก มี ช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของ PLA กับเม็ดข้าวเจ้าบดและแป้งข้าวเจ้า ปรากฏให้เห็นได้อย่างชัดเจน โดยสามารถอธิบายการยึดติดระหว่างเฟสที่แย่นี้ได้ว่า เกิดจากการไม่เข้ากันของ PLA ที่ประกอบด้วย หมู่ Methyl group ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) กับ ข้าวเจ้าบดและแป้งข้าวเจ้าที่ ประกอบด้วยหมู่ Hydroxyl group จำนวนมาก ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) นอกจากนี้ การเติมข้าวเจ้าบดปริมาณมากยังเกิดรวมกันเป็นกลุ่มก้อน จากเหตุเหล่านี้จึงนำไปสู่การถดถอยสมบัติเชิงกลของ PLA เช่น การต้านทานแรงดึง แรงดัดโค้ง และระยะยืด ณ จุดขาด เป็นต้น [54]



รูปที่ 5.17 ลักษณะของทัลค์ และแกลบบด และพื้นที่หน้าตัดของ PLA/Talc และ PLA/Rice husk จากกล้อง SEM



รูปที่ 5.18 ลักษณะของข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า และพื้นที่หน้าตัดของ PLA/ Rice flour และ PLA/ Rice starch จากกล้อง SEM

5.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

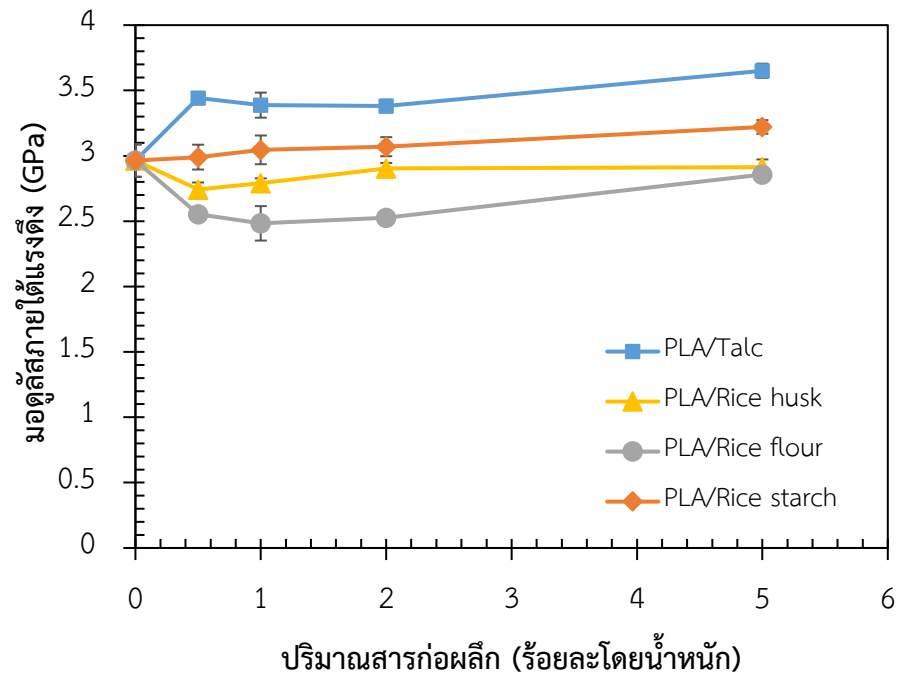
5.1.4.1 สมบัติภายใต้แรงดึง

สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk PLA/Rice flour PLA/Rice starch และ PLA/Talc ปริมาณต่างๆ ดังรูปที่ 5.19 พบว่า การเติมแป้งข้าวเจ้า และทัลค์ของ PLA/Rice starch และ PLA/Talc ดังรูปที่ 5.19(ก) มีผลให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมแป้งข้าวเจ้า และทัลค์ โดยเพิ่มจาก 3 GPa ของ PLA บริสุทธิ์ เป็น 3.2 และ 3.6 GPa สำหรับ PLA/Rice starch และ PLA/Talc ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ สามารถบ่งชี้ได้ว่า PLA/Rice starch และ PLA/Talc มีความแกร่ง (stiffness) มากขึ้น อาจเป็นผลจากการเพิ่มระดับความเป็นผลึกซึ่งช่วยเสริมความแกร่งให้กับ PLA ขณะที่การเติมแคลเซียมและข้าวเจ้าบด ทำให้มอดูลัสภายใต้แรงดึงของ PLA/Rice husk และ PLA/Rice flour ลดลงเล็กน้อย เมื่อเติมแคลเซียมและข้าวเจ้าบด ปริมาณร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก แต่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าเท่ากับ PLA บริสุทธิ์ เมื่อเติมแคลเซียมและข้าวเจ้าบด ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาระหว่าง PLA/Rice flour และ PLA/Rice husk พบว่า PLA/Rice husk มีมอดูลัสภายใต้แรงดึง สูงกว่า PLA/Rice flour ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแคลเซียมช่วยเพิ่มปริมาณผลึกของ PLA ได้มากกว่าข้าวเจ้าบด

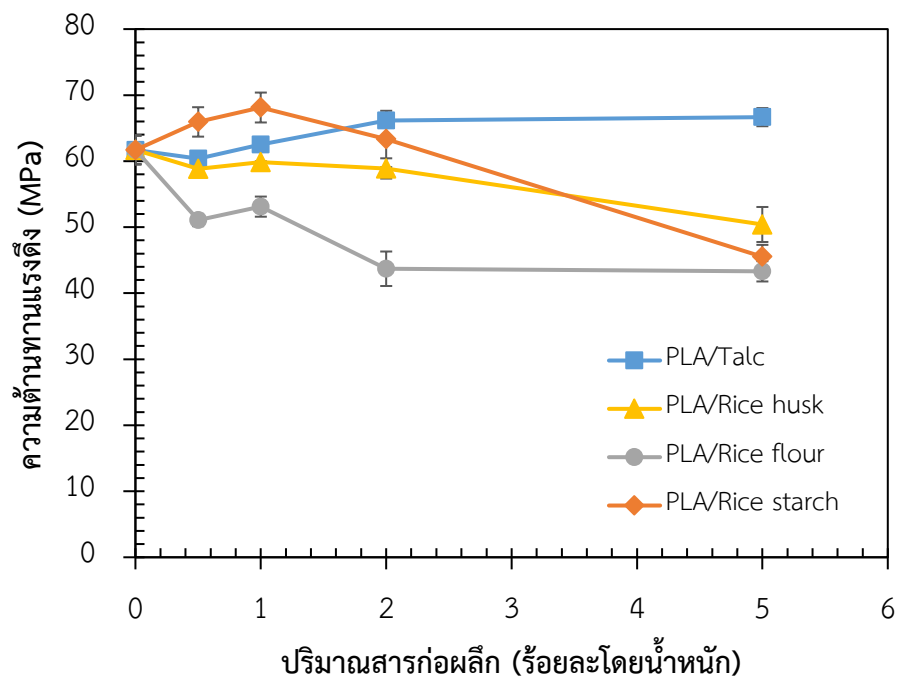
ความต้านทานแรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk PLA/Rice flour PLA/Rice starch และ PLA/Talc ปริมาณต่างๆ ดังรูปที่ 5.19(ข) พบว่า PLA/Talc มีความต้านทานภายใต้แรงดึงสูงขึ้นแปรผันตามปริมาณทัลค์ โดยเพิ่มจาก 62 MPa ของ PLA บริสุทธิ์ จนมีค่าสูงสุดประมาณ 67 MPa ที่ทัลค์ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม ความต้านทานภายใต้แรงดึงของ PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch กลับลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียม ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า จนถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเติมแคลเซียม ข้าวเจ้าบดและแป้งข้าวเจ้าด้วยปริมาณที่มากเกินไป อาจเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกันเอง ทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคได้ ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำช่องว่างนั้นจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการแตกหักได้ อีกทั้งปริมาณของ PLA ยังถูกแทนที่จนมีสัดส่วนน้อยลง การยึดเกาะระหว่างเฟสของ PLA กับแคลเซียม ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า จึงทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร เป็นสาเหตุให้ความเปราะเพิ่มขึ้น จากผลดังกล่าวยังทำให้การยึดตัว ณ จุดขาด ของ PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ดังแสดงในรูปที่ 5.19(ค) มีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกัน โดยยังแสดงพฤติกรรมของความแข็งแรงเปราะ ซึ่งสังเกตจากการยึดตัว ณ จุดขาดที่มีค่าค่อนข้างต่ำ อีกทั้งความเปราะยังเพิ่มขึ้น

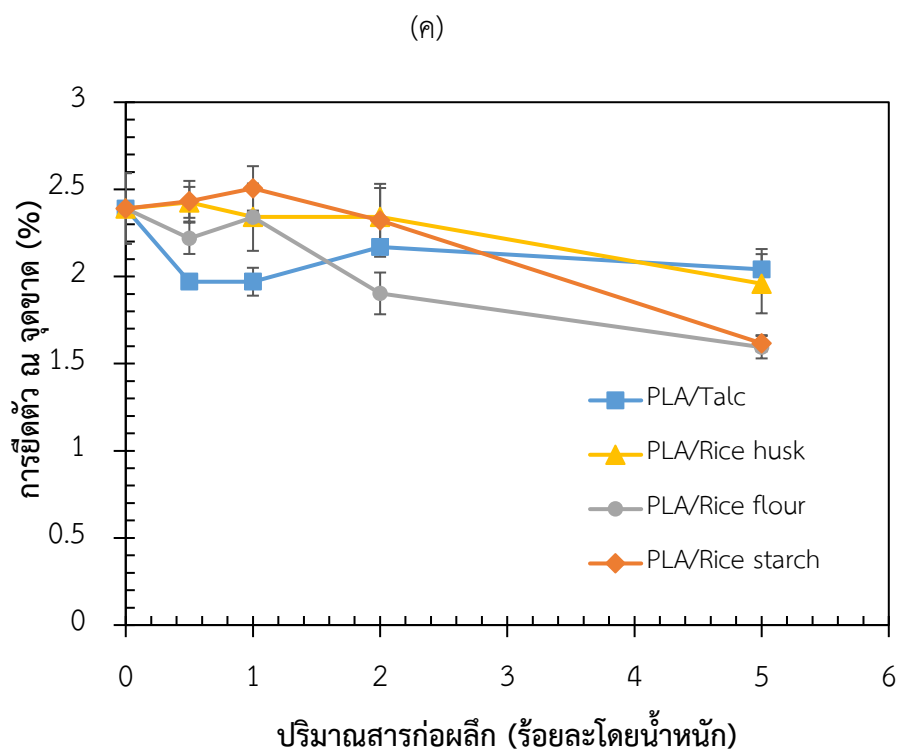
ตามสัดส่วนของ PLA ที่ลดปริมาณลง ส่วนการเติมทัลค์ของ PLA/Talc ไม่มีผลต่อ การยืดตัวของ PLA แต่ยิ่งเพิ่มความเปราะ เนื่องจาก ทัลค์เป็นของแข็ง จึงไม่สามารถทำหน้าที่ช่วยเสริมความยืดหยุ่นให้กับ PLA ได้

(ก)



(ข)





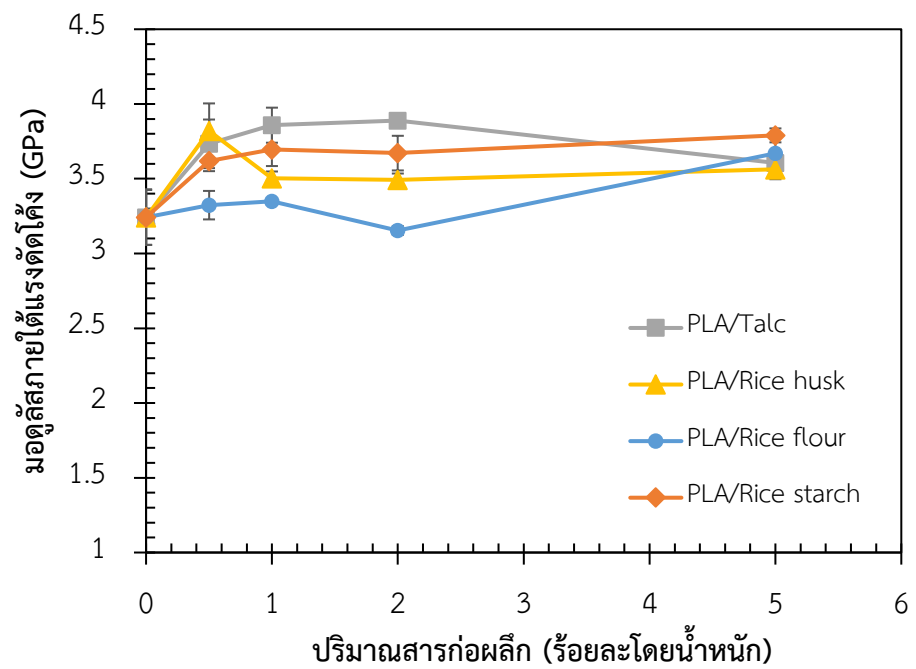
รูปที่ 5.19 สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดึง (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด

5.1.4.2 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง

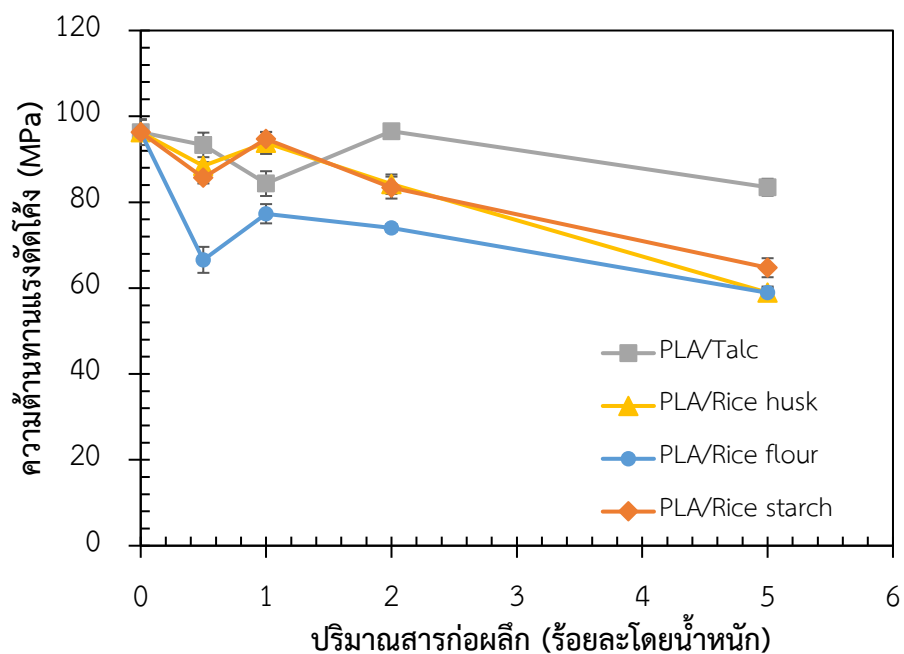
รูปที่ 5.20 แสดงสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk PLA/Rice flour PLA/Rice starch และ PLA/Talc ปริมาณต่างๆ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ จากรูปที่ 5.20(ก) แสดงให้เห็นว่า มอดูลัสภายใต้ดัดโค้งของ PLA/Rice flour สูงขึ้นเล็กน้อย ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณข้าวเจ้า ส่วน PLA/Rice husk PLA/Rice starch และ PLA/Talc ให้ผลในทิศทางคล้ายกัน โดยเฉพาะทัลค์สามารถเพิ่มความแกร่งให้กับ PLA ได้มากที่สุด สังเกตได้จากมอดูลัสภายใต้ดัดโค้งที่เพิ่มขึ้น แม้เติมทัลค์เพียงร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเท่านั้น อธิบายได้ว่า ทัลค์ช่วยเพิ่มระดับความเป็นผลึกได้ดีกว่า เนื่องจากเป็นสารก่อผลึกที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งสะท้อนจากระดับความเป็นผลึก เมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเจ้า

ขณะที่ความต้านทานภายใต้ดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk PLA/Rice flour PLA/Rice starch และ PLA/Talc ปริมาณต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.20(ข) พบว่า การเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ ปริมาณต่างๆ ไม่สามารถส่งเสริมความแข็งแรงให้กับ PLA โดยเฉพาะเมื่อเติมปริมาณมาก ยิ่งทำให้ความต้านทานภายใต้ดัดโค้งลดลง

(ก)



(ข)

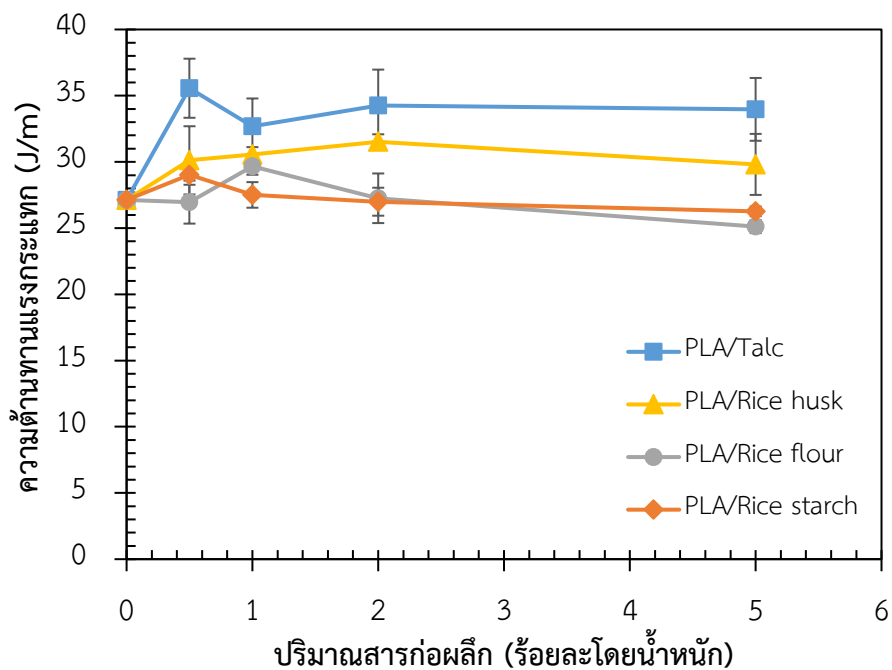


รูปที่ 5.20 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง (ข) ความต้านทานแรงดัดโค้ง

5.1.4.3 สมบัติภายใต้แรงกระแทก

ความต้านทานภายใต้แรงกระแทกของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ดังรูปที่ 5.21 พบว่า ความต้านทานภายใต้แรงกระแทกของ PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง แม้เพิ่มปริมาณข้าวเจ้าบดและแป้งข้าวเจ้า ขณะที่การเติมแคลเซียม และทัลค์กลับมีอิทธิพลต่อการเพิ่มความต้านทานภายใต้แรงกระแทกของ PLA/Talc และ PLA/Rice husk อย่างชัดเจน โดยเพิ่มจาก 27 J/m ของ PLA บริสุทธิ์เป็น 34 และ 30 J/m ตามลำดับ ที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจาก สันฐานทางธรรมชาติของทัลค์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นยาว (Plate) และอนุภาคแคลเซียมที่แตกเป็นชิ้นยาว จึงมี Aspect ratio สูงซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุเสริมแรง ประกอบกับการยึดเกาะระหว่างเฟสของ PLA กับแคลเซียม และทัลค์ ทำได้ค่อนข้างดีไม่ปรากฏช่องว่างบริเวณรอบผิวสัมผัสเหมือนการเติมข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้าที่เห็น

ได้จากการส่อง SEM ด้วยลักษณะดังกล่าว จึงช่วยเพิ่มการถ่ายเทแรงที่มากกระทำต่อ PLA มาสู่ทัลค์ และแคลบดได้เป็นอย่างดี [55, 56]



รูปที่ 5.21 ความต้านทานแรงกระทำของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Talc PLA/Rice husk PLA/Rice flour และ PLA/Rice starch ปริมาณต่าง ๆ

5.2 ปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน

การอบอ่อนเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยเพิ่มระดับความเป็นผลึกของชิ้นงานหลังการขึ้นรูป สามารถทำได้โดยนำชิ้นงานไปอบในตู้อบลมร้อน ณ อุณหภูมิที่กำหนด เป็นระยะเวลาต่าง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษา 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ขึ้นรูป อุณหภูมิตู้อบ และระยะเวลาการอบ ที่ส่งผลต่อระดับความเป็นผลึกของ PLA ผสมทัลค์ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนที่ 2 จะเน้นศึกษาผลของการเติมทัลค์ แคลบด และข้าวเจ้าบด ต่อการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึก หลังการอบอ่อน

ส่วนที่ 1 ศึกษาผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ขึ้นรูป อุณหภูมิตู้อบ และระยะเวลาการอบ ที่ส่งผลต่อระดับความเป็นผลึกของ PLA/Talc 1%

5.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของ PLA/Talc 1%

5.2.1.1 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC ภายใต้อุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal crystallization)

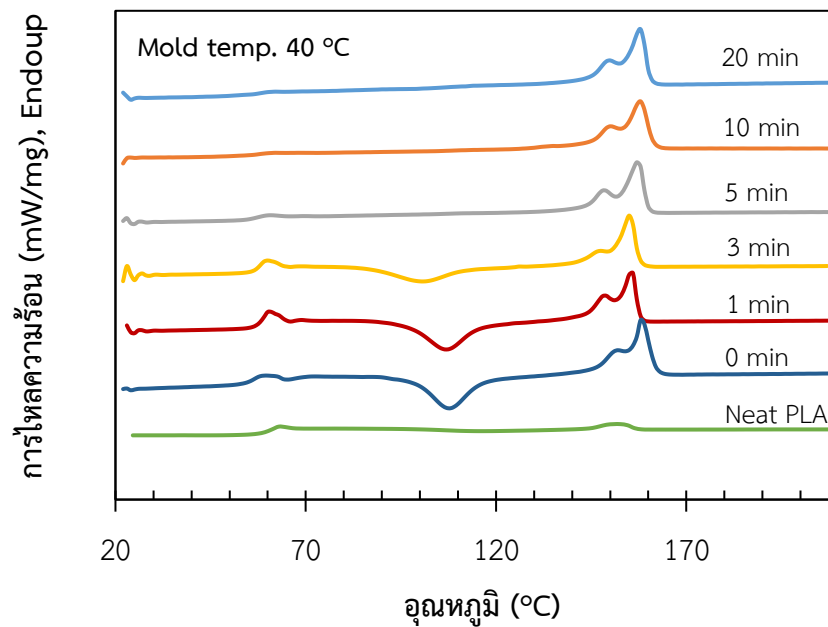
สมบัติเชิงความร้อนของ PLA ผสมทัลลด์ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ของสูตร PLA/Talc 1% หลังถูกฉีดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 และ 90 °C แล้วนำชิ้นงานไปอบอุณหภูมิ 100 °C ด้วยระยะเวลาการอบต่าง ๆ ถูกศึกษาด้วยเครื่อง DSC ภายใต้อุณหภูมิไม่คงที่บนช่วงการเพิ่มอุณหภูมิรอบที่หนึ่ง (1st heating) เพื่อวิเคราะห์ อุณหภูมิแปรสภาพแก้วคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) และระดับความเป็นผลึก ก่อนและหลังอบอ่อน ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และแสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดสอบ DSC ในรูปที่ 5.22 พบว่า การเติม ทัลลด์ ของ PLA/Talc 1% แล้วขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 และ 90 °C มีผลให้ T_g เลื่อนต่ำลงไปประมาณ 1-4 °C หลังจากผ่านการอบอ่อน ด้วยระยะเวลาต่างๆ เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ นอกจากนั้น การฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วนำชิ้นงานไปอบอุณหภูมิ 105 °C ดังแสดงในตารางที่ 5.6 และแสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดสอบ DSC ในรูปที่ 5.23 ยังให้ผลของ T_g ที่สอดคล้องกับการอบด้วยอุณหภูมิ 100 °C แสดงว่า การอบอ่อนด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง T_g และอุณหภูมิแม่พิมพ์ก็ไม่ส่งผลต่อ T_g เช่นเดียวกัน

ขณะที่ T_{cc} ของชิ้นงานก่อนอบทั้ง สูตรที่ฉีดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 และ 90 °C ลดลงอย่างชัดเจน จาก 115.9 °C ของ PLA บริสุทธิ์ เหลือประมาณ 108 °C เมื่อเติมทัลลด์ โดยการเลื่อนต่ำลงของ T_{cc} บนช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ บ่งชี้ว่า ทัลลด์ช่วยเร่งอัตราการเกิดผลึกของ PLA/Talc 1% ให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ เนื่องจาก ทัลลด์ เป็นสารก่อผลึก ซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดก่อผลึก (Center of nuclei) ใน PLA เพื่อเหนี่ยวนำให้สายโซ่โพลิเมอร์เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้เร็วขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า ระยะเวลาการอบอ่อนมีผลต่อ T_{cc} โดยทำให้ T_{cc} เลื่อนต่ำลง จนไม่ปรากฏพีกเมื่อใช้ระยะเวลาการอบที่นานขึ้น ซึ่งพีกเริ่มหายไปหลังใช้เวลาอบเพียง 5 นาที สำหรับสูตรที่ฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วอบ 100 °C ส่วนสูตรที่ฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอุณหภูมิ 105 °C ให้ผลที่สอดคล้องกัน ยกเว้น สูตรขึ้นรูปอุณหภูมิแม่พิมพ์ 90 °C เริ่มหายไปตั้งแต่ 3 นาทีแรก อาจอธิบายได้ว่า การอบอ่อนช่วยเพิ่มสัดส่วนผลึก หรือปรับปรุงส่วนผลึกที่ยังมี

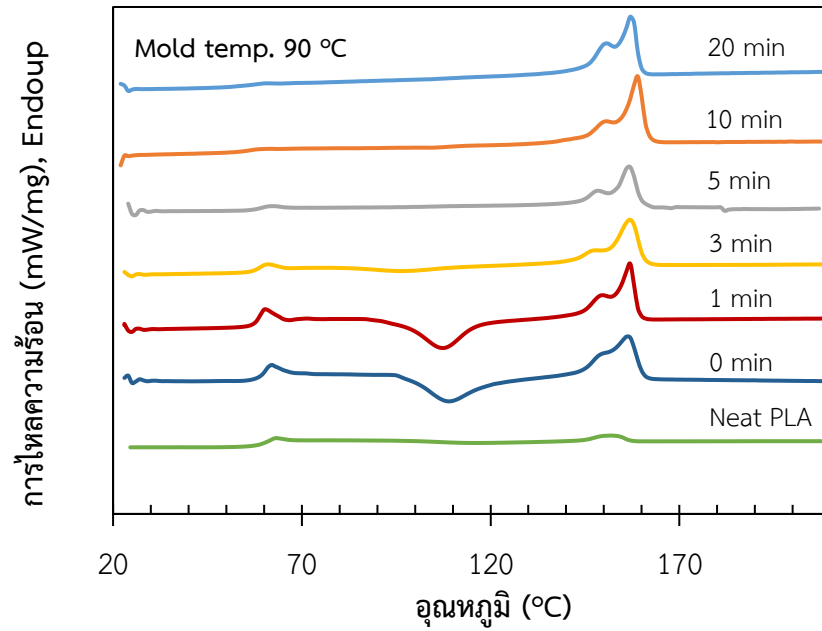
ความไม่สมบูรณ์ระหว่างการขึ้นรูปให้ตกผลึกอย่างสมบูรณ์ได้ โดยขึ้นอยู่กับระยะเวลา และอุณหภูมิของแม่พิมพ์

ส่วน T_{m1} ของ PLA/ Talc 1% เลื่อนต่ำลงเล็กน้อย และปรากฏเป็น 2 พีค คือ ตำแหน่งอุณหภูมิ 149 และ 158 °C หลังจากเติม ทัลค์ ซึ่งเกิดจากลักษณะสัณฐานของผลึกมีความแตกต่างกัน โดยพีค T_{m1} ณ ตำแหน่งที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ การหลอมผลึกเดิมของพอลิเมอร์ ส่วนพีค T_{m2} ณ ตำแหน่งที่อุณหภูมิสูงกว่า คือ พีคของการหลอมผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงผลึกครั้งที่ 2 (recrystallization process) ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิ

(ก)

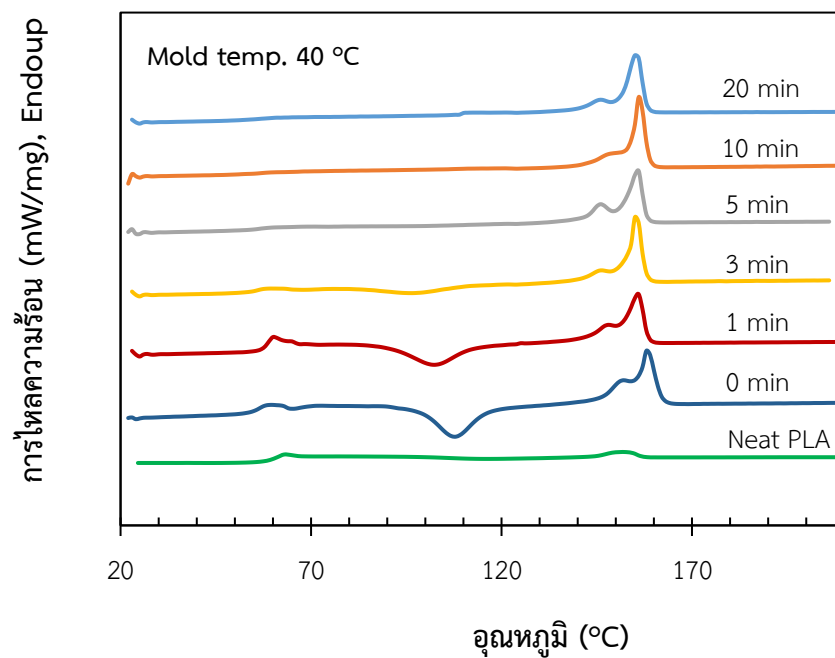


(ข)

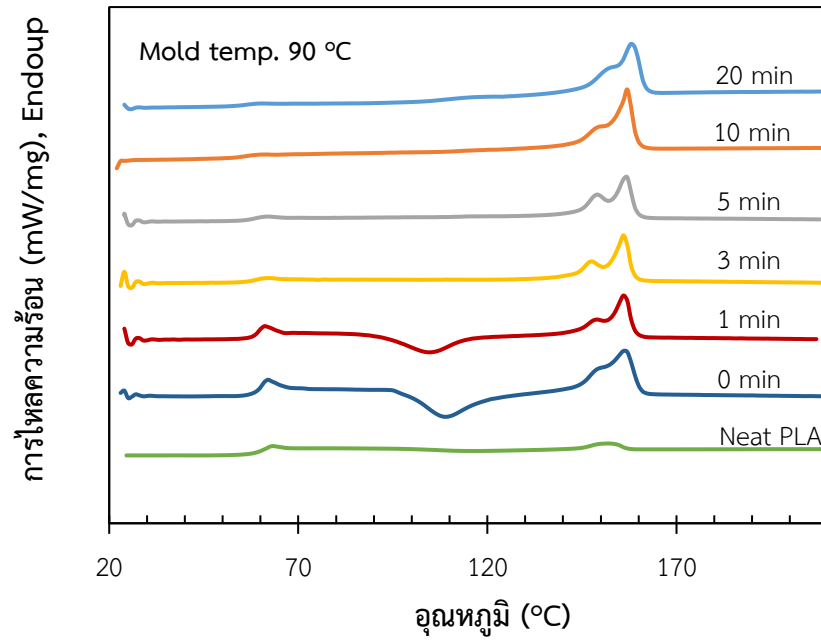


รูปที่ 5.22 เทอร์โมแกรมจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส
(ข) 90 องศาเซลเซียส แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของ
PLA/Talc 1%

(ก)



(ข)



รูปที่ 5.23 เทอร์โมแกรมจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ (ก) 40 องศาเซลเซียส

(ข) 90 องศาเซลเซียส แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ของ

PLA/Talc 1%

ตารางที่ 5.5 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้ว
อบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA/Talc 1%

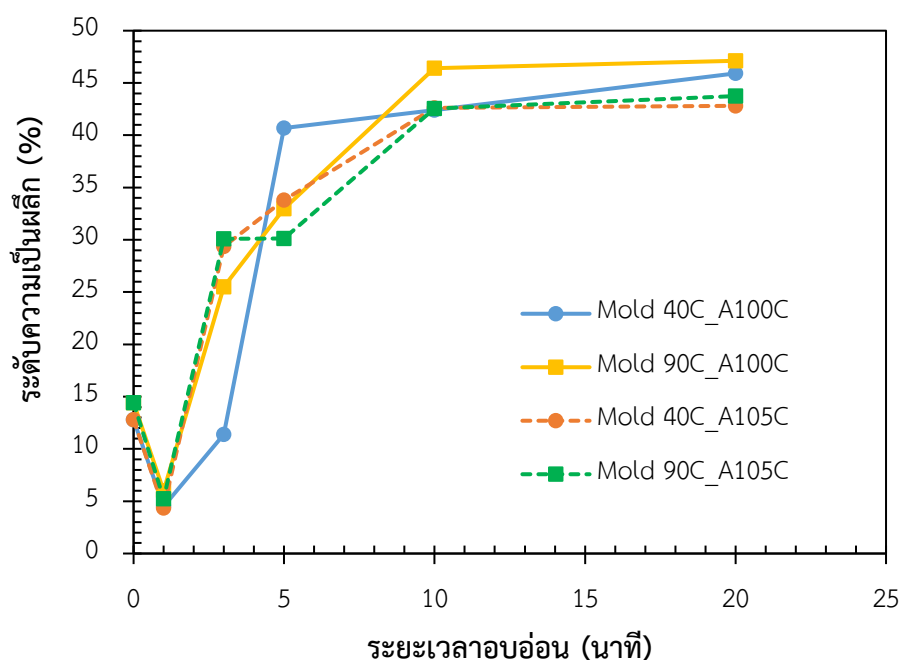
ตัวอย่าง	ระยะเวลาอบอ่อน (min)	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	X _m %
PLA บริสุทธิ์	0	59.6	115.9	153.0	-	3.61
PLA/Talc 1% แม่พิมพ์ 40 °C	0	56.6	107.7	152	158.3	12.80
	1	57.5	106.5	148.5	155.6	4.50
	3	56.7	100.5	147.6	155.2	11.39
	5	55.9	-	148.5	157.2	40.68
	10	57.7	-	150	157.8	42.40
	20	58.2	-	149.8	157.8	45.92
PLA/Talc 1% แม่พิมพ์ 90 °C	0	60.0	108.8	149.2	156.4	14.43
	1	57.4	107.4	149.7	156.9	6.00
	3	57.1	96	147	156.8	25.50
	5	57.7	-	148.5	156.6	32.98
	10	56.2	-	150.8	158.9	46.43
	20	55.7	-	150.8	157.3	47.12

ตารางที่ 5.6 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 105 °C ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA/Talc 1%

ตัวอย่าง	ระยะเวลาอบอ่อน (min)	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	X _m %
PLA บริสุทธิ์	0	59.6	115.9	153.0	-	3.61
PLA/Talc 1% แม่พิมพ์ 40 °C	0	56.6	107.7	152	158.3	12.80
	1	57.7	102.3	148.1	155.8	4.34
	3	56.5	97	146.3	155.4	29.37
	5	57.0	-	146	155.7	33.80
	10	57.0	-	147.8	156.4	42.61
	20	57.5	-	146	155.4	42.81
PLA/Talc 1% แม่พิมพ์ 90 °C	0	60.0	108.8	149.2	156.4	14.43
	1	58.3	104.6	149.1	156.2	5.24
	3	57.8	-	147.4	156.2	30.09
	5	57.5	-	149	156.7	30.14
	10	55.9	-	150.5	157	42.54
	20	56.3	-	151.8	158.1	43.75

ตารางที่ 5.6-5.7 และรูปที่ 5.24 แสดงระดับความเป็นผลึกของ PLA/ Talc 1% พบว่า ระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากเดิม 3.6% ของ PLA บริสุทธิ์ เป็น 13 และ 14% เมื่อเติม ทัลค์ ซึ่งถูกขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 และ 90 °C ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่มีผลต่อระดับความเป็นผลึก เมื่อชิ้นงานถูกขึ้นรูปโดยใช้เวลาหล่อเย็น เพียง 1 นาที สำหรับการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึกข้างต้น เป็นผลจากการเติมทัลค์ ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกในการเหนี่ยวนำการเกิดผลึกของ PLA

ส่วนการศึกษาผลของการอบอ่อน ต่อระดับความเป็นผลึก พบว่า ระดับความเป็นผลึกของ PLA/ Talc 1% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบที่นานขึ้น โดยหลังจากอบเป็นเวลา 10 นาที ระดับความเป็นผลึกสามารถเพิ่มได้ถึง 40% และมีระดับคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาอบ สำหรับทุกสภาวะการขึ้นรูปและการอบ ทั้งนี้เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก จึงอาจมีพฤติกรรมการตกผลึกที่สมบูรณ์สูงสุดได้เพียง 40% ส่วนอุณหภูมิการอบอ่อน พบว่า มีผลต่อระดับความเป็นผลึกในแนวโน้มที่ไม่แตกต่างกันมาก แต่มีบางช่วงเช่น 3 นาทีแรก ระดับความเป็นผลึกของตัวอย่างที่ใช้ อุณหภูมิ 105 °C จะเพิ่มสูงขึ้นได้เร็วกว่าเล็กน้อย จึงอาจสรุปได้ว่า การเติมทัลค์ และการอบอ่อนเป็นระยะเวลานาน ที่อุณหภูมิสูง มีส่วนช่วยเร่งอัตราการเกิดผลึก และเพิ่มระดับความเป็นผลึกของ PLA

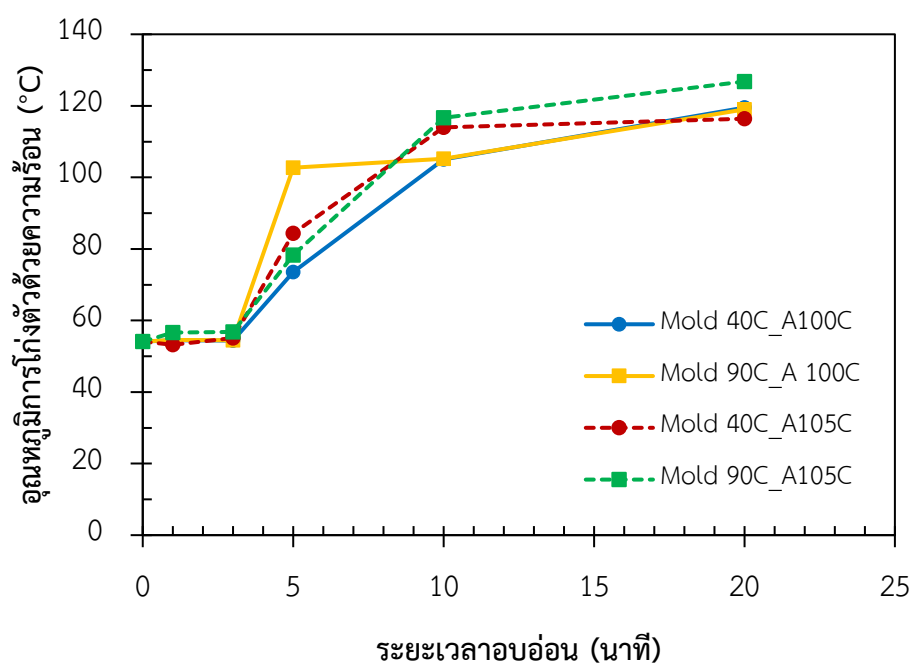


รูปที่ 5.24 ระดับความเป็นผลึกของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 และ 105°C

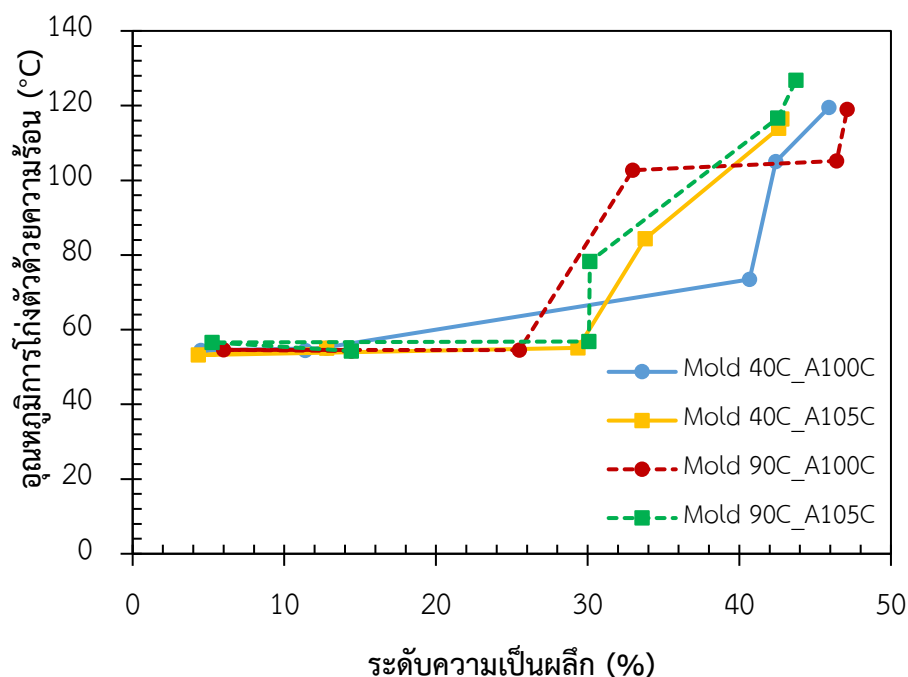
5.2.1.2 ทดสอบอุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT)

การต้านทานการเสียรูปเชิงความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญของพลาสติก เมื่อนำมาใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความร้อน ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยค่า HDT จากรูปที่ 5.25 แสดงผลของการอบอ่อน ต่ออุณหภูมิการโก่งตัวภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT) ซึ่งถูกขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 และ 90 °C พบว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง HDT อย่างชัดเจน ทั้งก่อนและ

หลังอบ แต่การอบด้วยระยะเวลาที่มากพอ สามารถเพิ่ม HDT ได้มากกว่า 100 °C โดย HDT เริ่มเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหลังจากอบ 3 นาที จนเกิน 100 °C เมื่ออบได้ 10 นาที แล้วจะค่อยๆเพิ่มทีละน้อยหลังจากอบ 10 นาทีขึ้นไป ขณะที่อุณหภูมิการอบอ่อนทั้ง 2 อุณหภูมิมีผลต่อ HDT ค่อนข้างน้อย โดยการอบด้วยอุณหภูมิสูงให้ HDT มากกว่าการอบด้วยอุณหภูมิต่ำ แต่มากกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตลอดระยะเวลาการอบ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ HDT อาจเป็นผลจากการเพิ่มระดับความเป็นผลึกดังแสดง ความสัมพันธ์ในรูปที่ 5.26 พบว่า HDT มีแนวโน้มเริ่มสูงขึ้นเมื่อระดับความเป็นผลึกมีมากกว่า 30% และเพิ่มเกิน 100 °C ก็ต่อเมื่อมีระดับความเป็นผลึกมากกว่า 40% ขึ้นไป หรือเทียบเท่าปริมาณผลึกสูงสุดของ PLA



รูปที่ 5.25 อุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด ของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 และ 105°C



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกกับ อุณหภูมิการโค้งตัวด้วยความร้อน ภายใต้แรงกด ของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 100 และ 105°C

5.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

5.2.2.1 ทดสอบสมบัติภายใต้แรงดึง (Tensile testing)

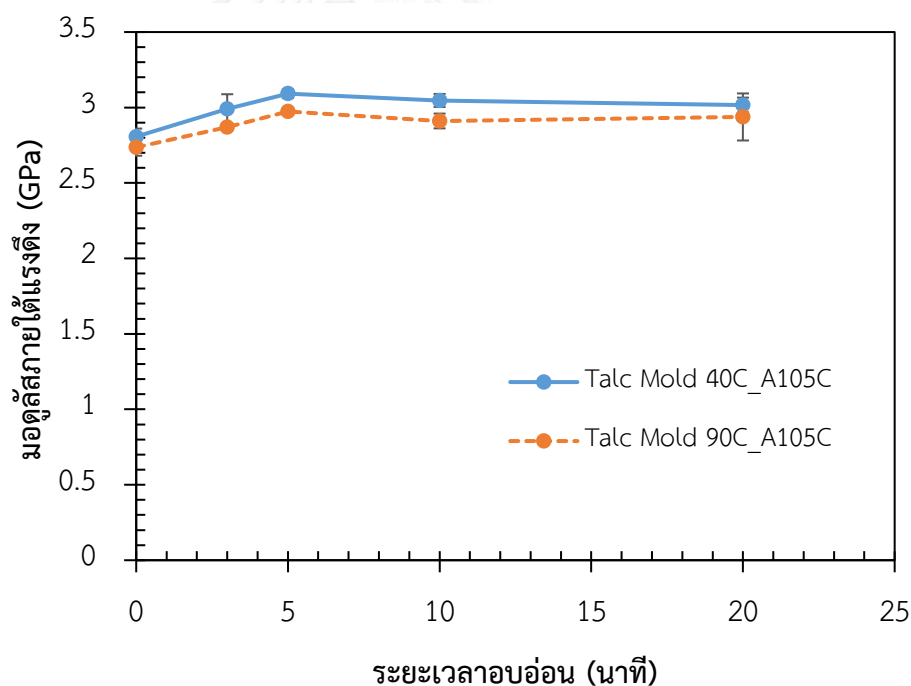
สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA/Talc 1% ซึ่งถูกขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วอบอ่อนอุณหภูมิ 105 °C เป็นระยะเวลาต่างๆ ถูกแสดงดังรูปที่ 5.27 พบว่า โมดูลัสภายใต้แรงดึงของ PLA/Talc 1% ทั้งสูตรที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C ในรูปที่ 5.28 (ก) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการอบที่นานขึ้นโดยค่อยๆ เพิ่มขึ้นถึงนาทีที่ 5 แล้วคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่ออบนานขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของโมดูลัสอาจบอกเป็นนัยว่า การอบอ่อนช่วยเพิ่มความแกร่ง (stiffness) .ให้ PLA โดยเป็นผลจากการเพิ่มระดับความเป็นผลึก อย่างไรก็ตาม PLA/Talc 1% ยังมีความเปราะ นอกจากนั้น ถ้าพิจารณาผลของอุณหภูมิแม่พิมพ์ พบว่า การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ร้อนมีผลให้โมดูลัสภายใต้แรงดึงน้อยกว่าแม่พิมพ์เย็น ทั้งก่อนอบอ่อนและหลังอบอ่อน

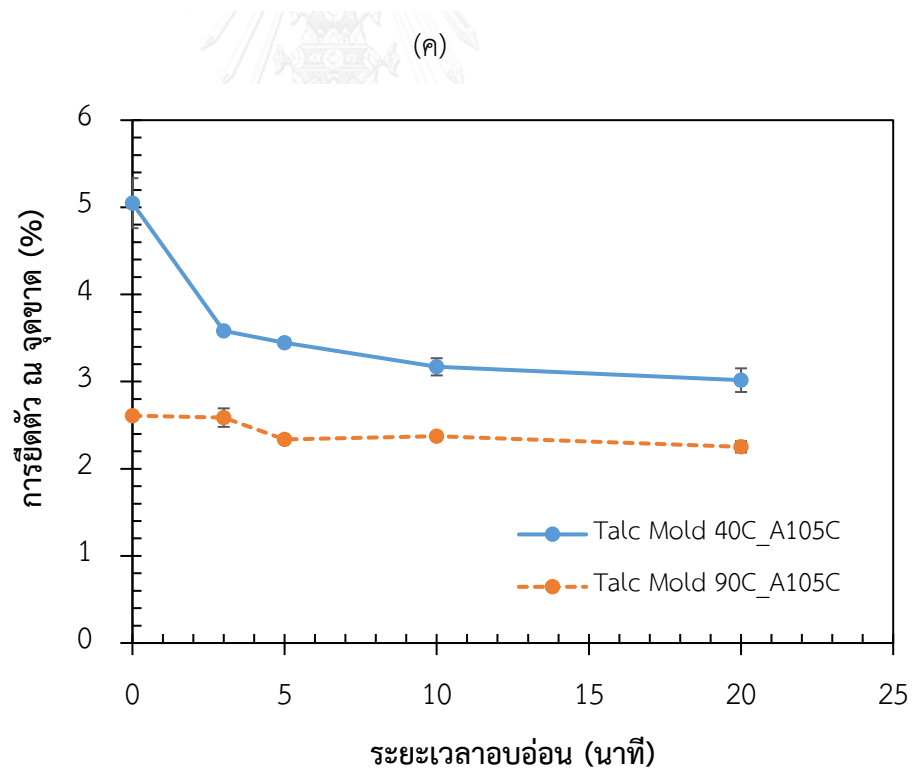
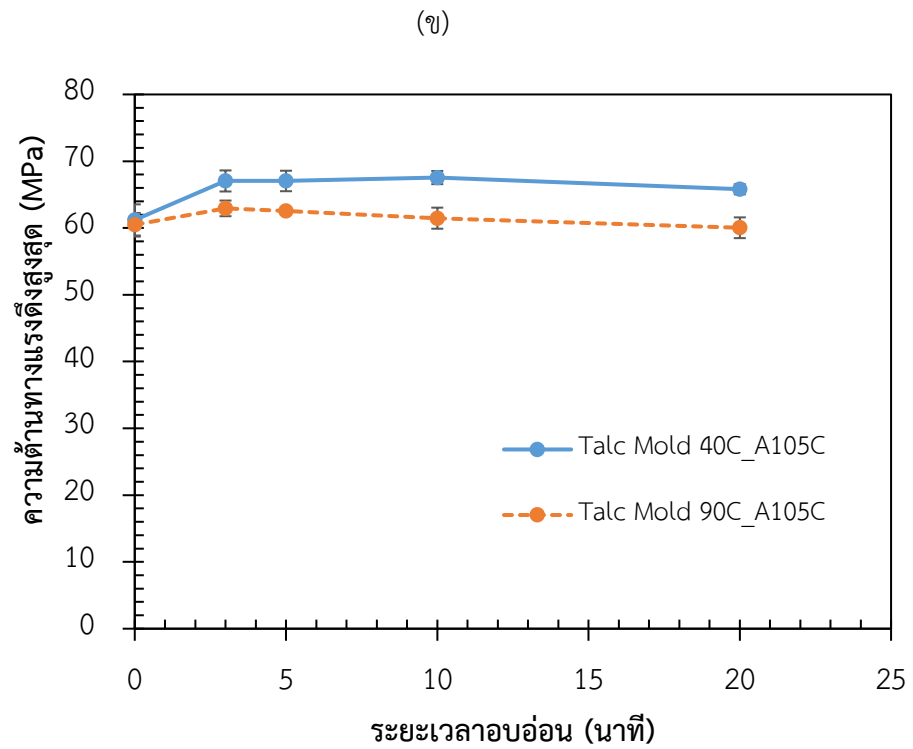
ความต้านทานแรงดึงของ PLA/Talc 1% ถูกแสดงดังรูปที่ 5.27 (ข) พบว่า ความต้านทานแรงดึงของสูตรที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังอบเป็นเวลา 3 นาที

แล้วคงที่ไม่ขึ้นกับระยะเวลาการอบ โดยเฉพาะสูตรที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 90 °C อาจอธิบายได้ว่า เกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึกที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเป็นผลึกที่สมบูรณ์ ร่วมกับการทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรงของทัลค์ จึงเป็นผลให้ PLA/Talc 1% มีความแข็งแรงขึ้น

ส่วนการยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA/Talc 1% ดังแสดงในรูปที่ 5.27 (ค) พบว่า การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เย็นสามารถยืดตัวได้ดีกว่าแม่พิมพ์ร้อน อันเป็นผลจากระดับความเป็นผลึก เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ ทำให้สายโซ่ PLA ถูกบังคับให้หยุดนิ่ง และไม่มีเวลาเพียงพอสำหรับการเกิดผลึก แต่ตรงกันข้ามกับการใช้แม่พิมพ์ร้อน ซึ่งพอมีเวลาเล็กน้อยสำหรับการเกิดผลึกบางส่วน ดังนั้นการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงมีส่วนอึดหยุ่นมากกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ร้อน อย่างไรก็ตาม PLA ยังแสดงพฤติกรรมของความแข็งแรงเปราะ ซึ่งสังเกตจากการยืดตัว ณ จุดขาดที่มีค่าลดลง ทั้งสูตรที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C หลังการอบอ่อน

(ก)





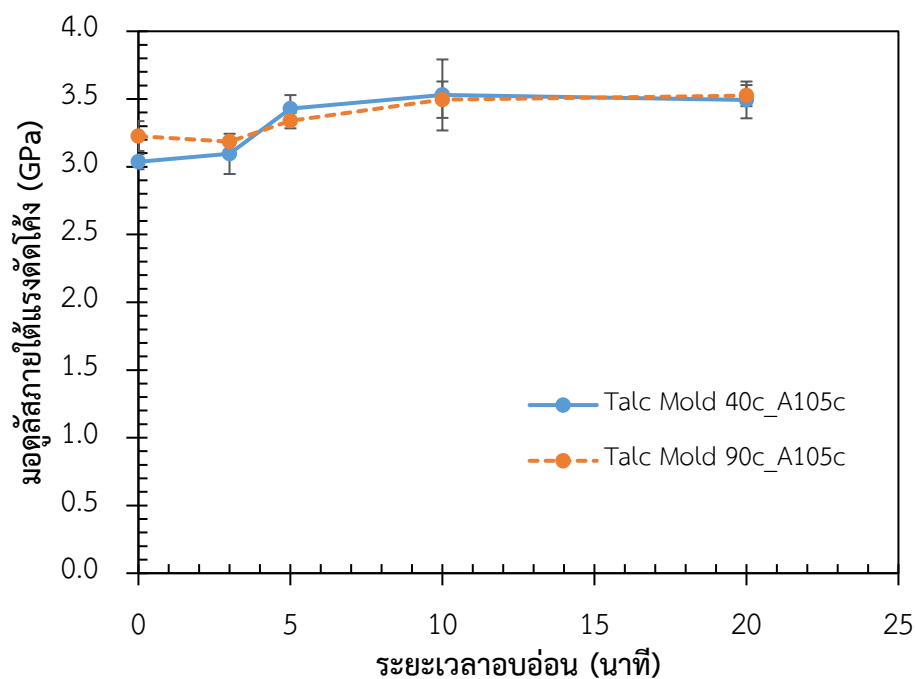
รูปที่ 5.27 สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 105°C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดึง (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด

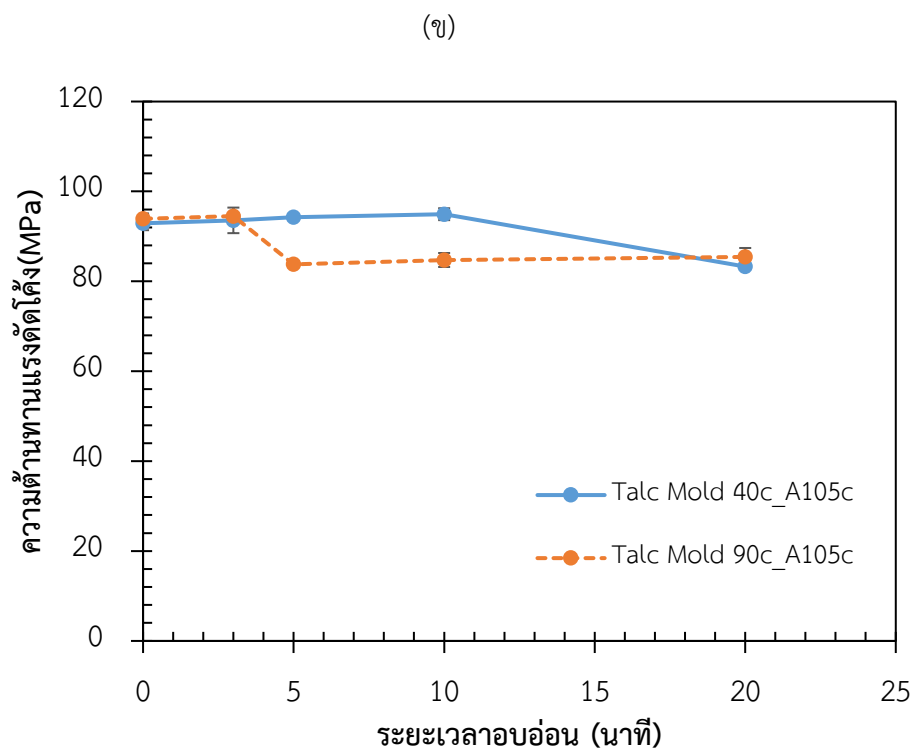
5.2.2.2 ทดสอบสมบัติภายใต้ดัดโค้ง (Flexural testing)

รูปที่ 5.28 แสดงสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA/Talc 1% ที่เติมทัลค์ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 5.28(ก) แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการอบอ่อนมีผลต่อมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง โดยมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย หลังจากอบเป็นเวลา 5 นาที และไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออบนานขึ้น อาจอธิบายว่าเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึกที่เป็นผลจากการเติมทัลค์ และการอบอ่อน ซึ่งช่วยส่งเสริมความแกร่งให้กับ PLA นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปไม่มีผลต่อมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งหลังการอบอ่อน

ส่วนความต้านทานภายใต้ดัดโค้ง ถูกแสดงดังรูปที่ 5.28(ข) พบว่า การอบอ่อนที่นานขึ้นมีผลให้ความต้านทานภายใต้ดัดโค้งลดลง โดยเฉพาะ การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ร้อน ซึ่งเริ่มลดลงตั้งแต่วันที่ 5 ขณะที่ แม่พิมพ์เย็นเริ่มลดลงหลังจากอบ 10 นาที

(ก)

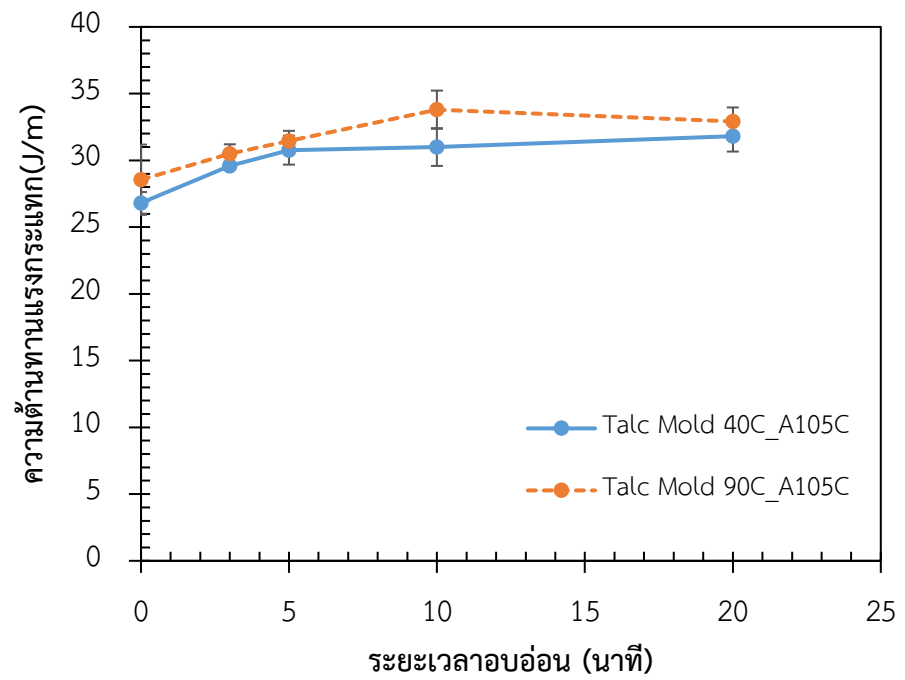




รูปที่ 5.28 ความต้านทานภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 105°C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง(ข) ความต้านทานภายใต้แรงดัดโค้ง

5.2.2.3 ทดสอบสมบัติภายใต้แรงกระแทก (Impact testing)

รูปที่ 5.29 แสดงผลของการอบอ่อนต่อความต้านทานภายใต้แรงกระแทกของ PLA/Talc 1% ซึ่งถูกขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 และ 90 °C แล้วนำไปอบอุณหภูมิ 105 °C พบว่า ความต้านทานภายใต้แรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการอบ โดยเฉพาะ การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ร้อน ซึ่งมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบการใช้แม่พิมพ์เย็น การทนทานต่อแรงกระแทกนี้อาจเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก คือ 1) ทัลค์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง โดยช่วยถ่ายเทแรงจาก PLA มาสู่ทัลค์ และ 2) การเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึก เนื่องจากผลึกที่เกิดจากการอัดแน่นอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่โพลิเมอร์มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับดูดซับและกระจายแรงได้ โดยการขีดขวางรอยแตกที่เกิดขึ้น แล้วเป็ยงรอยแตกไปตามขอบของผลึก [57, 58]



รูปที่ 5.29 ความต้านทานภายใต้แรงกระแทกของ PLA/Talc 1% หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ อุณหภูมิ 40 และ 90°C แล้วอบอ่อนที่ อุณหภูมิ 105°C

ส่วนที่ 2 ศึกษาผลของการเติมทัลค์ แกลบบด และข้าวเจ้าบด ต่อการทนต่อความร้อน และระดับความเป็นผลึก หลังการอบอ่อน

5.2.3 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อนของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% PLA/Rice flour 1%

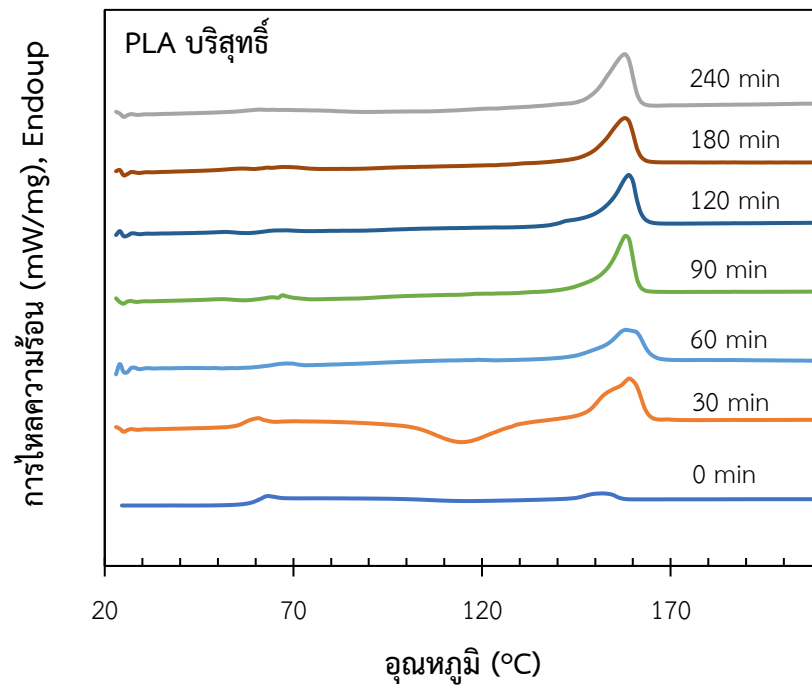
5.3.1.1 วิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC ภายใต้อุณหภูมิไม่คงที่ (Non-isothermal crystallization)

สมบัติเชิงความร้อนของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% PLA/Rice flour 1% หลังถูกฉีดขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 °C แล้วอบอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลาต่างๆ ถูกลำมาศึกษาภายใต้ อุณหภูมิไม่คงที่บนช่วงการเพิ่มอุณหภูมิรอบที่หนึ่ง (1st heating) ดังแสดงในตารางที่ 5.7-5.9 และแสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดสอบ DSC ในรูปที่ 5.30 พบว่า การอบอ่อนมีผลให้ T_g ของทุกสูตรเพิ่มขึ้น ประมาณ 1-3 °C โดยค่อยๆเพิ่มหลังจากอบอ่อนด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการเคลื่อนขยับของสายโซ่โพลิเมอร์ PLA เป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจาก T_g วัตจากส่วนที่สามารถขยับได้ ดังนั้นการเกิดผลึก ซึ่งเป็นการจัดสายโซ่ให้อยู่กันอย่างเป็นระเบียบ หรือมีผลึกหนาแน่นขึ้น ย่อมส่งผลให้ขัดขวางการเคลื่อนขยับของสายโซ่

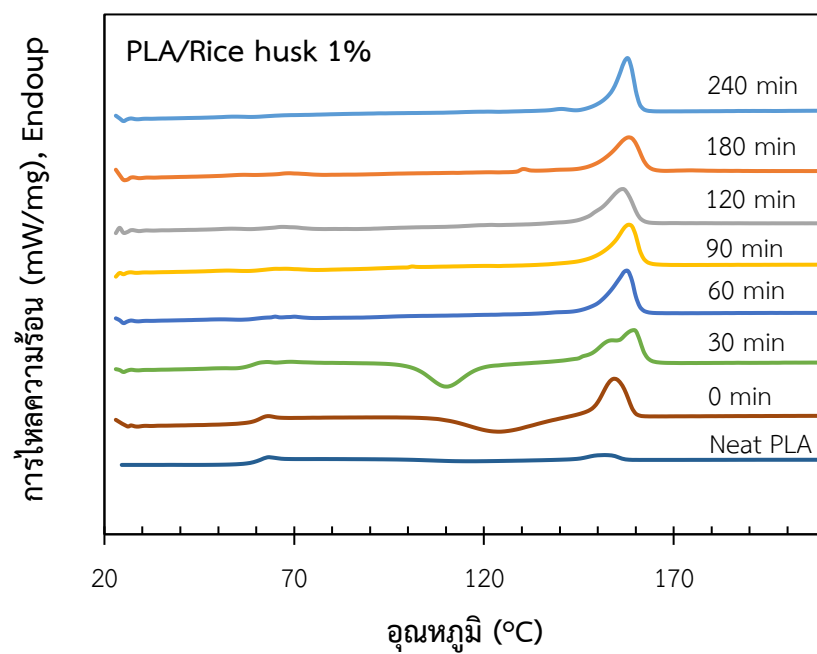
T_{cc} ของทุกสูตรเลื่อนต่ำลงหลังจากอบอ่อนเป็นเวลา 30 นาที โดยลดจาก 115.9 °C ของ PLA บริสุทธิ์ก่อนอบ เป็น 114.7 110 และ 108 °C สำหรับ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% หลังอบอ่อน ตามลำดับ และเมื่อสังเกตยังพบอีกว่า การเติมแกลบบด และข้าวเจ้าบด ช่วยลด T_{cc} ได้มากกว่า PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกของแกลบบด และข้าวเจ้าบด อีกทั้ง T_{cc} ของแต่ละสูตรเริ่มหายไปเมื่ออบนานขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับระดับความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นหลังจากอบอ่อน บ่งชี้ว่า การอบอ่อนสามารถทำให้สายโซ่ที่อยู่อย่างไม่เป็นระเบียบเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้นอีกครั้งหลังได้รับความร้อน

ส่วน T_m ของ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% เริ่มปรากฏเป็น 2 พิก คือ T_{m1} ตำแหน่งอุณหภูมิ 153 °C และ T_{m2} ตำแหน่งอุณหภูมิ 159 °C เมื่ออบเป็นเวลา 30 นาที และเมื่ออบนานขึ้นพิก T_{m1} จะหายไปเหลือเพียง T_{m2} พิกเดียว อาจอธิบายว่า การอบอ่อนช่วยให้สายโซ่เกิดการขยับแล้วจัดเรียงตัวเป็นระเบียบอีกครั้งจนได้ผลึกที่มีความสมบูรณ์ขึ้น ดังนั้นจึงปรากฏพิก หลอมเหลว (T_{m2}) เพียงตำแหน่งเดียว ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า ขณะที่การอบ PLA บริสุทธิ์ ให้ผลเช่นเดียวกัน แต่พิก T_{m1} เริ่มหายไปช้ากว่า คือหลังอบ 60 นาที

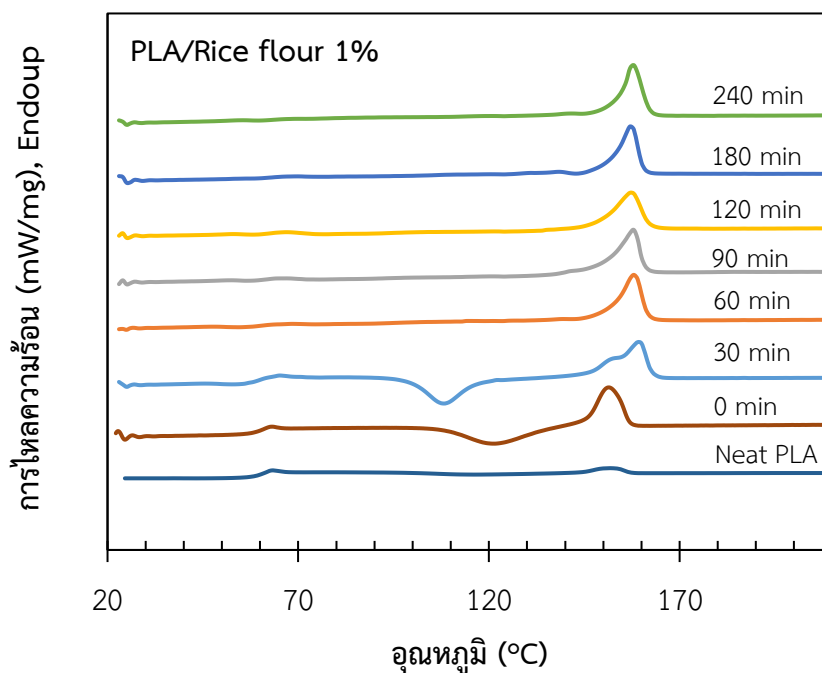
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 5.30 เทอร์โมแกรมจาก DSC หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วอบ อ่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ของ (ก) PLA บริสุทธิ์ (ข) PLA/Rice husk 1% (ค) PLA/Rice flour 1%

ตารางที่ 5.7 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC ของ PLA บริสุทธิ์ หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	X_m (%)
PLA บริสุทธิ์	0	59.9	115.9	153.0	-	3.61
	30	57.2	114.7	152.9	159.0	4.50
	60	64.7	-	-	158.2	29.17
	90	61.5	-	-	158.2	37.57
	120	61.6	-	-	159	35.33
	180	61.7	-	-	157.8	38.17
	240	61.7	-	-	157.9	37.62

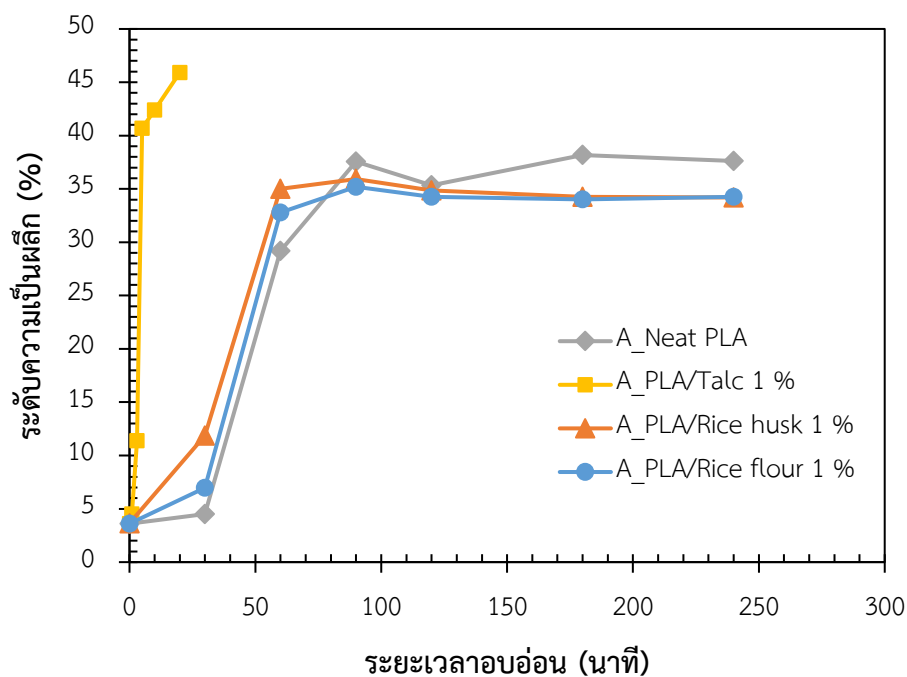
ตารางที่ 5.8 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC ของ PLA/Rice husk 1% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	X _m (%)
PLA/Rice husk 1%	0	59.9	115.9	153.0	-	3.61
	30	58.6	110.2	153.4	159.4	11.85
	60	58.9	-	-	157.6	35.01
	90	62.4	-	-	158.1	35.92
	120	63.9	-	-	156.5	34.87
	180	62.7	-	-	158.3	34.25
	240	62.7	-	-	157.8	34.21

ตารางที่ 5.9 สมบัติเชิงความร้อนจาก DSC ของ PLA/Rice flour 1% หลังอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C

ตัวอย่าง	เวลา (นาที)	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	X _m (%)
PLA/Rice flour 1%	0	59.9	115.9	153.0	-	3.61
	30	60.2	108.1	152.9	159.4	6.95
	60	60.7	-	-	158.0	32.79
	90	61.3	-	-	157.9	35.20
	120	62.5	-	-	157.3	34.24
	180	63.5	-	-	157.3	34.02
	240	63.5	-	-	157.8	34.25

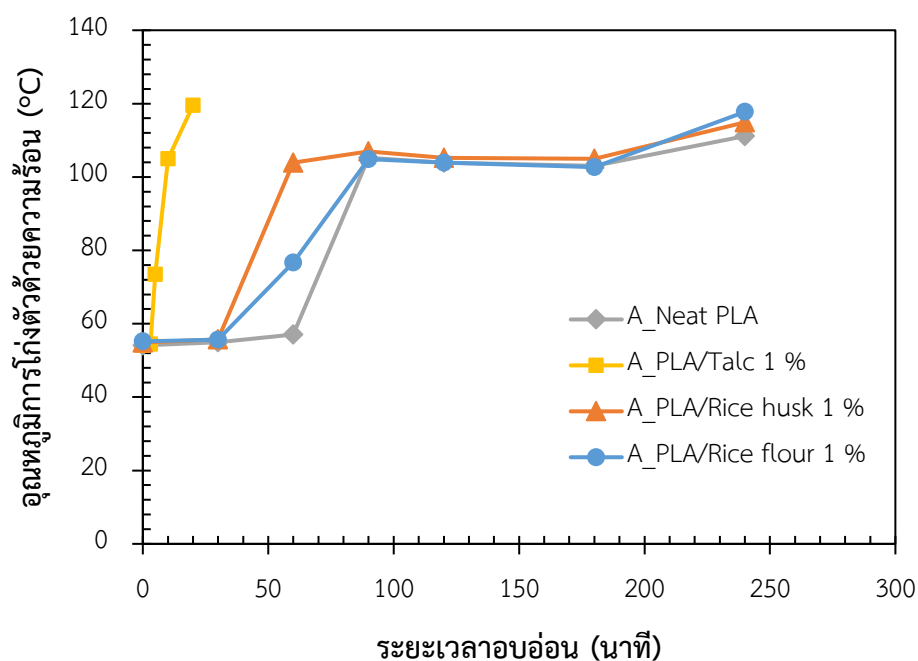
ตารางที่ 5.7-5.9 และรูปที่ 5.31 แสดงระดับความเป็นผลึกของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% ก่อนและหลังอบอ่อน พบว่า ระดับความเป็นผลึกของทุกสูตรเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจนมีกว่า 30 % จากเดิมมีเพียง 3.6 % เท่านั้นสำหรับ PLA บริสุทธิ์ก่อนอบ โดยระดับความเป็นผลึกค่อยๆ เพิ่มขึ้นหลังจากอบเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสูตรที่เติมแกลบบด และข้าวเจ้าบดจะมีอัตราการเกิดผลึกสูงกว่า PLA บริสุทธิ์เล็กน้อย จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากอบครบ 60 นาที แต่เมื่ออบต่อไปอีกระดับความเป็นผลึกกลับไม่เปลี่ยนแปลง แม้ว่าใช้เวลาอบนานขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมทัลค์ พบว่า การอบอ่อนของ PLA/Talc 1% ใช้เวลาเพียง 5 นาทีเท่านั้น ระดับความเป็นผลึกก็เพิ่มมากถึง 40 % ทั้งนี้เนื่องจาก ทัลค์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแกลบบด และข้าวเจ้าบด



รูปที่ 5.31 ระดับความเป็นผลึกของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบบดและข้าวเจ้าบด ปริมาณ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C

5.2.1.2 ทดสอบอุณหภูมิการโก่งตัวภายใต้แรงกด (Heat deflection temperature, HDT)

การต้านทานการเสียรูปด้วยความร้อนเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของพลาสติกเมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง ขณะที่ PLA สามารถทนความร้อนได้เพียง 55 °C เท่านั้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดอย่างมากสำหรับบรรจุภัณฑ์ทนความร้อน โดยสามารถชี้วัดได้ด้วยค่า HDT จากรูปที่ 5.32 พบว่า PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% สามารถทนความร้อนได้ มากกว่า 100 °C หลังจากอบอ่อน แต่ต้องใช้ระยะเวลาการอบมากกว่า 30 นาที สำหรับ PLA/Rice husk 1% และมากกว่า 60 นาที สำหรับ PLA บริสุทธิ์ และ PLA/Rice flour 1% ซึ่งเป็นเวลาที่นานมากเมื่อเทียบกับ PLA/Talc 1% ที่ใช้เวลาเพียง 10 นาที เพื่อเพิ่ม HDT ให้มากกว่า 100 °C การเพิ่มขึ้นของ HDT อาจอธิบายได้ว่าเป็นผลจากการเพิ่มระดับความเป็นผลึก เนื่องจากให้ผลที่สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเป็นผลึกกับเวลาการอบอ่อน



รูปที่ 5.32 อุณหภูมิการโก่งตัวด้วยความร้อนภายใต้แรงกด ของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบบดและข้าวเจ้าบด ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C

5.2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

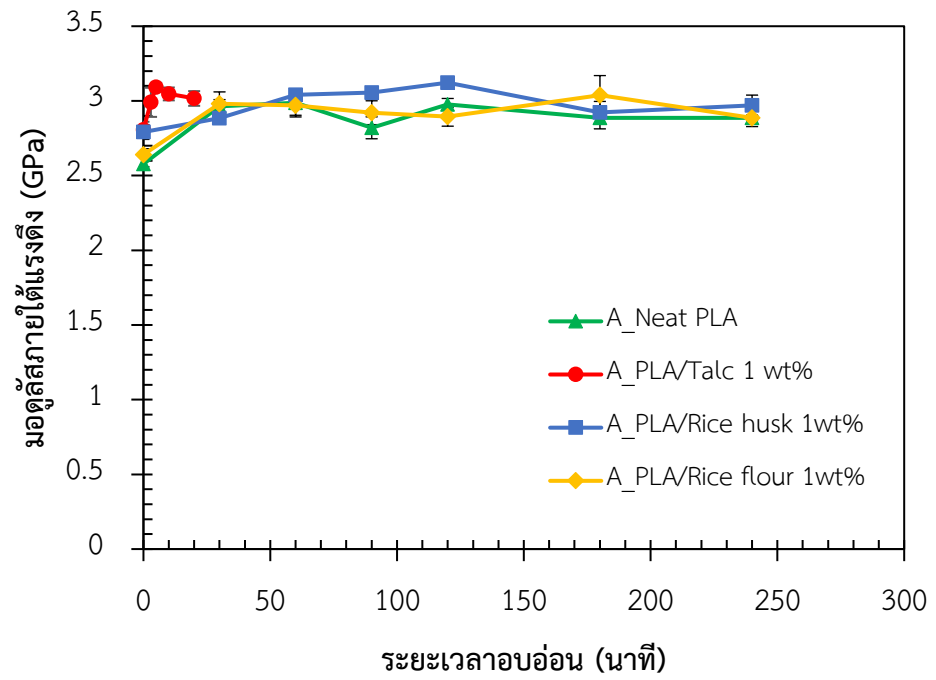
5.2.4.1 ทดสอบสมบัติภายใต้แรงดึง (Tensile testing)

ผลการทดสอบการทดสอบภายใต้แรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% ที่ถูกขึ้นรูปด้วยอุณหภูมิแม่พิมพ์ 40 °C ก่อนและหลังอบอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 5.34 พบว่า PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% มีความแกร่ง (stiffness) มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึกที่ช่วยเสริมความแกร่งให้กับ PLA โดยสามารถบ่งชี้ได้จาก การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสภายใต้แรงดึงของ ในรูปที่ 5.33(ก) หลังจากอบอ่อน เป็นเวลา 30 นาที

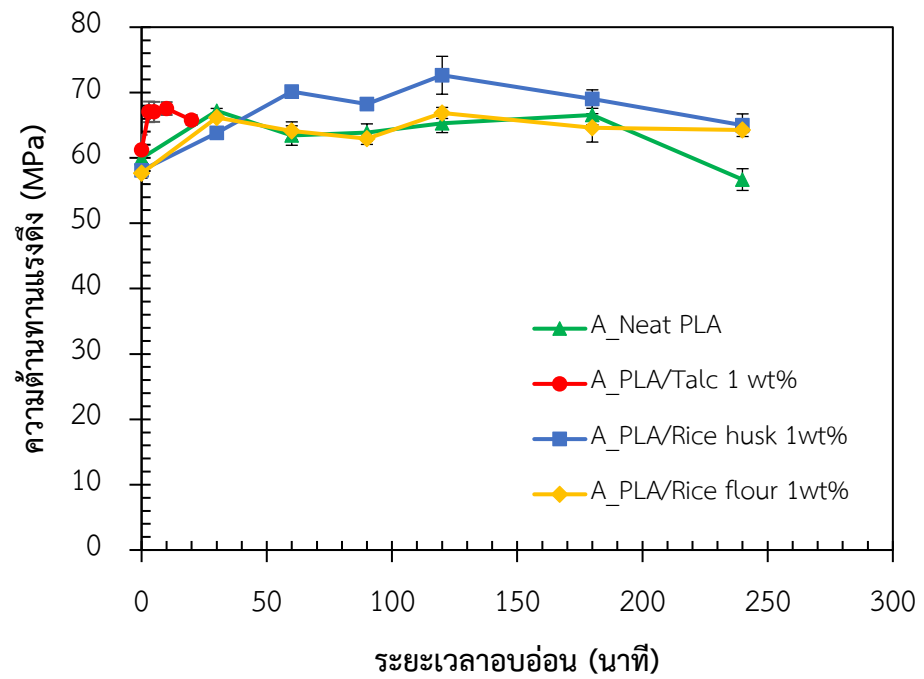
ส่วนความต้านทานแรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% ถูกแสดงดังรูปที่ 5.33(ข) พบว่า ความต้านทานแรงดึงของทุกสูตรเพิ่มขึ้นหลังจากอบอ่อนและเพิ่มอีกเล็กน้อยเมื่ออบนานขึ้น แสดงว่า การอบอ่อนมีผลต่อการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของสายโซ่ผลึก ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ PLA นอกจากนี้ การเติมแคลสับดยังช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงได้ดีที่สุดด้วย ซึ่งเป็นผลจากการทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง และการยึดเกาะที่ดีระหว่างเฟสของ PLA กับ แคลสับด แต่เมื่อเทียบกับการเติมทัลคในระหว่างการอบ 30 นาทีแรก ความแข็งแรงของ PLA/Talc 1% กลับสูงกว่า เนื่องจาก ระดับความเป็นผลึกของ PLA/Talc 1% มีมากที่สุด

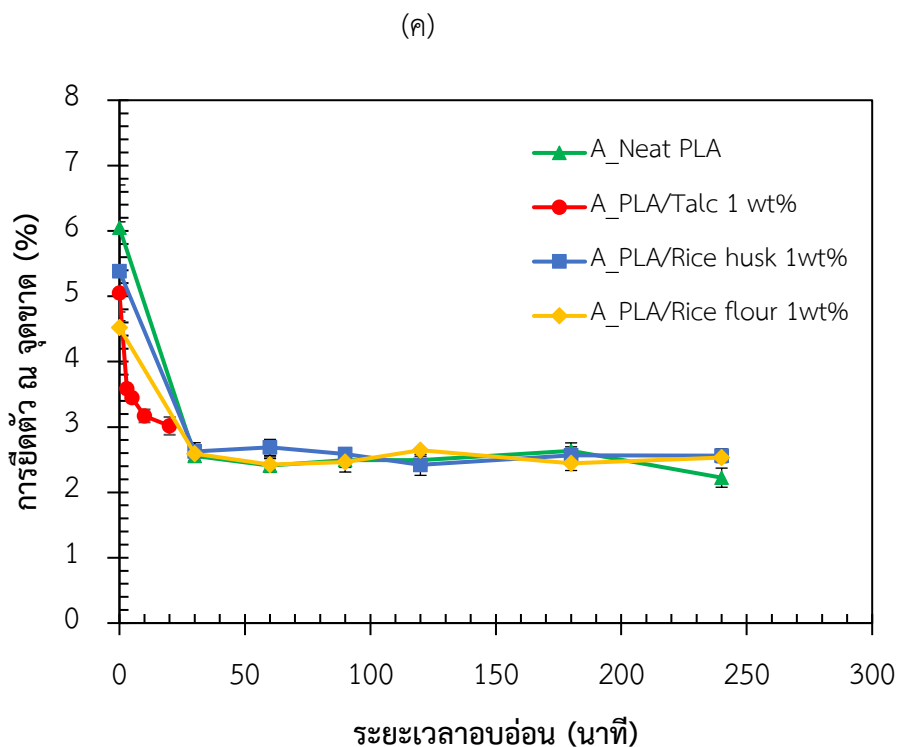
สำหรับการยึดตัว ณ จุดขาด ภายใต้แรงดึง ยังแสดงพฤติกรรมของความแข็งแรงเปราะ ขาดง่าย ดังแสดงในรูปที่ 5.33(ค) พบว่า การเติมแคลสับด ข้าวเจ้าบด และทัลคมีผลให้การยึดตัว ณ จุดขาดลดลง เนื่องแคลสับด ข้าวเจ้าบด และทัลคเป็นเฟสของแข็งจึงไม่ช่วยเพิ่มความยึดหยุ่น และอีกเหตุผลคือการไม่เข้ากันระหว่าง PLA กับสารเติมแต่ง จึงเกิดช่องว่างระหว่างเฟสซึ่งนำไปสู่การแตก นอกจากนี้ การอบอ่อนยังมีผลโดยตรงต่อการลดลงของความยึดหยุ่น โดยหลังจากอบอ่อนเพียง 30 นาที จะเห็นการลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับความเป็นผลึก

(ก)



(ข)





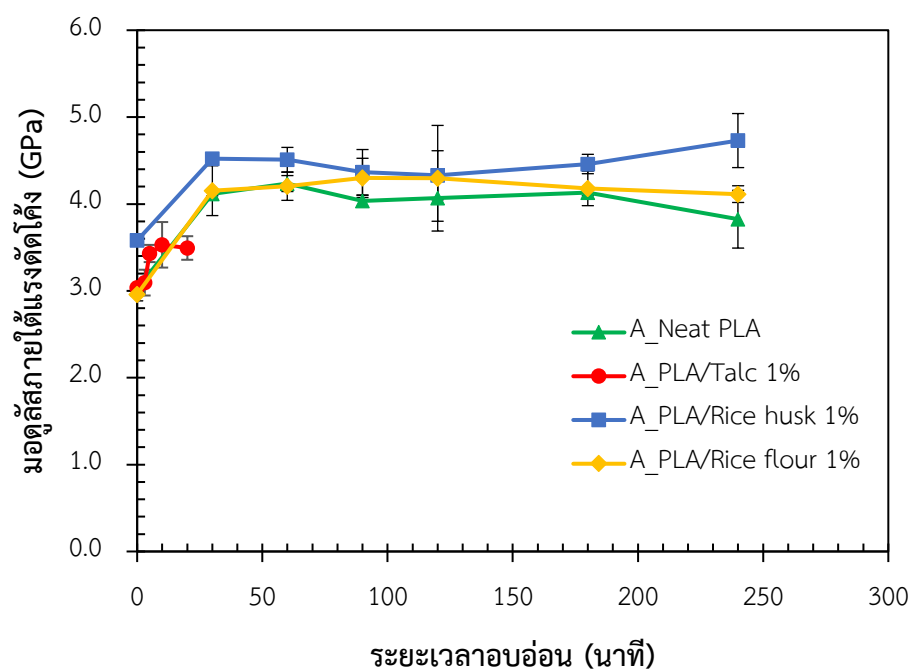
รูปที่ 5.33 สมบัติภายใต้แรงดึงของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลค์ แกลบบดและข้าวเจ้าบด ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดึง (ข) ความต้านทานแรงดึง (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด

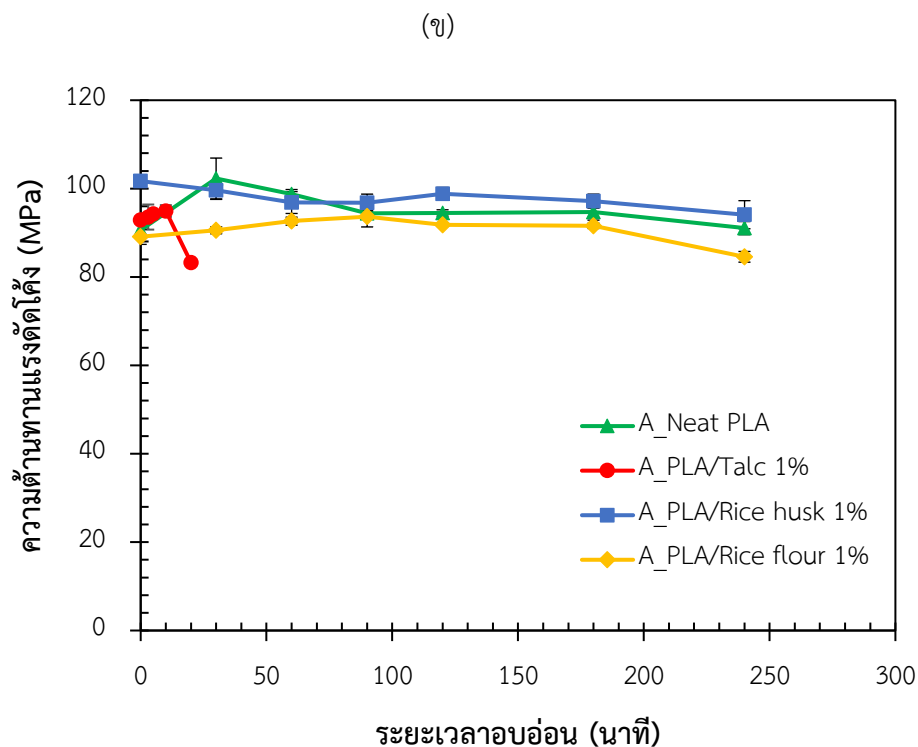
5.2.4.2 ทดสอบสมบัติภายใต้แรงดัดโค้ง (Flexural testing)

รูปที่ 5.34(ก) แสดงอิทธิพลของการอบอ่อนหลังขึ้นรูป ต่อสมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% พบว่า การอบอ่อนช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับ PLA ทุกสูตรอย่างมีนัยสำคัญในทิศทางที่สอดคล้องกัน เนื่องจากระดับความเป็นผลึกที่สูงขึ้น ซึ่งสะท้อนจากการเพิ่มขึ้นของมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง หลังจากอบเป็นเวลา 30 นาที โดยเพิ่มจาก 3 GPa ของ PLA บริสุทธิ์และ PLA/Rice flour 1% ก่อนอบ เป็น 4.2 GPa ส่วน PLA/Rice husk 1% เพิ่มจาก 3.6 GPa เป็น 4.5 GPa อย่างไรก็ตาม เมื่ออบนานขึ้นมอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้งกลับคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากรูปที่ 5.34(ข) พบว่า การอบอ่อนส่งผลต่อ ความต้านทานแรงดัดโค้งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยการอบอ่อนช่วยเสริมแข็งแรงให้ PLA บริสุทธิ์และPLA/Rice flour 1% ช่วง 60 นาทีแรก และลดลงเล็กน้อยเมื่ออบนานขึ้น เช่นเดียวกับ PLA/Talc 1% ที่ให้ผลสอดคล้องกัน ขณะที่ PLA/Rice husk 1% ความแข็งแรงกลับค่อยๆ ลดลงเมื่อผ่านการอบอ่อน แต่จะเริ่มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา หลังอบได้ 60 นาที

(ก)

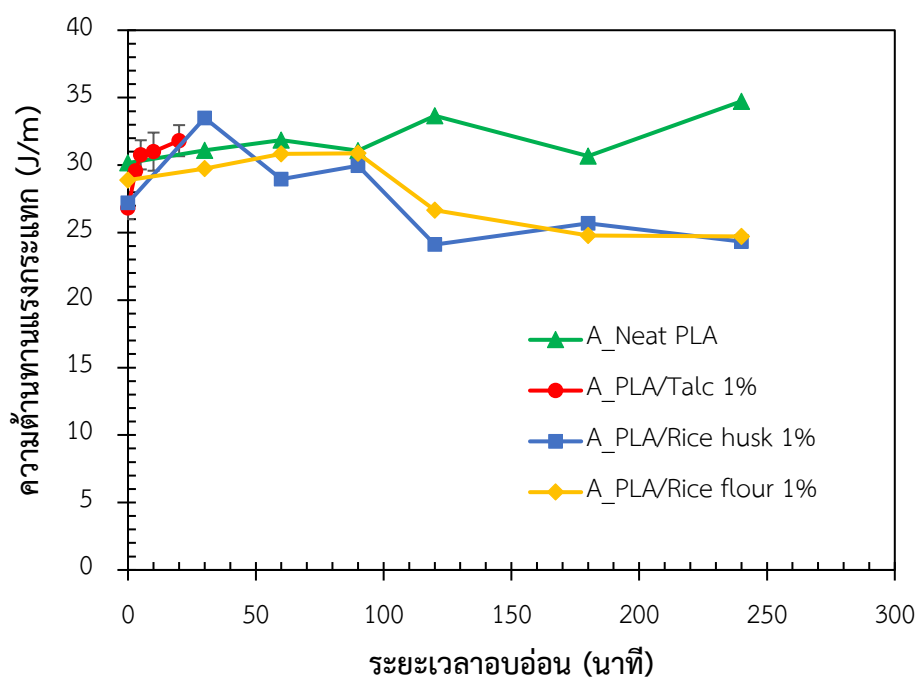




รูปที่ 5.34 สมบัติภายใต้แรงดัดโค้งของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลคัม แกลบบดและข้าวเจ้า บด ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C แล้วอบอ่อนที่อุณหภูมิ 100 °C: (ก) มอดูลัสภายใต้แรงดัดโค้ง (ข) ความต้านทานแรงดัดโค้ง

5.2.4.3 ทดสอบสมบัติภายใต้แรงกระแทก (Impact testing)

จากรูปที่ 5.35 พบว่า การอบอ่อนช่วยให้ PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% PLA/Rice flour 1% และ PLA/Talc 1% มีความต้านทานแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และยังเพิ่มตามระยะเวลาการอบที่นานขึ้น แต่มีเพียงบางสูตรคือ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% เมื่ออบนานกว่า 90 นาที ความต้านทานแรงกระแทกกลับลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการหดตัวของแป้งและแกลบที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานาน ดังนั้นจึงเกิดช่องว่างระหว่างเฟสที่นำไปสู่การแตกร้าว ส่วนการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงกระแทก อาจอธิบายได้ว่า เกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของสายโซ่ที่ทำให้ชั้นผลึก (crystal lamellae) มีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ผลึกมีความสมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้านทานการเสีรูป ได้ดีกว่าผลึกที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 5.35 สมบัติภายใต้แรงกระแทก ของ PLA บริสุทธิ์ PLA ผสมทัลคัม แกลบบดและข้าว
เจ้าบด ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก หลังฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 40 °C
แล้วอบอ่อน ที่อุณหภูมิ 100 °C

5.3 การคำนวณต้นทุนของวัตถุดิบเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์

จากตารางที่ 5.10 พบว่า การเติมสารก่อผลึกแต่ละชนิดมีผลต่อต้นทุนของวัตถุดิบเพื่อใช้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยต้นทุนของวัตถุดิบลดลงตามปริมาณของสารก่อผลึกที่เพิ่มขึ้น สามารถลดได้สูงสุดประมาณร้อยละ 3.5 -4.5 ต่อกิโลกรัม เมื่อเติมสารก่อผลึกปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ส่วนการเติมแคลเซียมมีผลช่วยลดต้นทุนได้มากที่สุด

ตารางที่ 5.10 ต้นทุนผลิตภัณฑ์ของสูตรที่เติมสารก่อผลึก

ตัวอย่าง	อัตราส่วน (wt%)	บาท/กิโลกรัม	ราคาต้นทุนเปลี่ยนแปลง (%)	ตัวอย่าง	อัตราส่วน (wt%)	บาท/กิโลกรัม	ราคาต้นทุนเปลี่ยนแปลง (%)
PLA/Rice husk	0	113	0	PLA/Rice starch	0	113	0
	0.5	112	0.5		0.5	113	0.3
	1	112	0.9		1	112	0.7
	2	111	1.8		2	111	1.4
	5	108	4.5		5	109	3.5
PLA/Rice flour	0	113	0	PLA/Talc	0	113	0
	0.5	113	0.4		0.5	113	0.4
	1	112	0.9		1	112	0.8
	2	111	1.7		2	111	1.6
	5	108	4.3		5	109	3.9

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อนของ PLA โดยวิธีการเติมสารก่อผลึกอินทรีย์ คือ แกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกกับสารก่อผลึกอินทรีย์ที่นิยมใช้ คือ ทัลค์ และอีกวิธีคือ การอบอ่อน เพื่อปรับปรุงให้ PLA สามารถทนความร้อนได้มากกว่า 100 องศาเซลเซียส รวมถึงสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ

6.1 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการใส่สารก่อผลึก แกลบบด ข้าวเจ้าบด แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณสารก่อผลึก ปริมาณร้อยละ 0.5 1 3 และ 5 โดยน้ำหนัก

6.1.1 การเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า เพียงปริมาณเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกชนิดอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี โดยช่วยเร่งอัตราการเกิดผลึกของ PLA ให้เร็วขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนได้จากการลดลงของ $t_{1/2}$ จาก 60 นาทีของ PLA บริสุทธิ์ เหลือประมาณ 15-25 นาที นอกจากนั้น ยังเพิ่มระดับความเป็นผลึกมากถึง 5-8 เท่าของ PLA บริสุทธิ์

6.1.2 การเติมทัลค์สามารถเพิ่ม HDT ได้มากถึง 130 °C และประมาณ 60 °C สำหรับแกลบบด ขณะที่การเติมข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า ปริมาณต่างไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้ง HDT และอุณหภูมิการสลายตัว

6.1.3 มอดูลัสภายใต้แรงดึงและแรงดัดโค้ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมทัลค์ แต่ในทางตรงกันข้าม การเติมแกลบบด ข้าวเจ้าบด และแป้งข้าวเจ้า กลับมีความต้านทานแรงดึงลดลง อย่างไรก็ตาม สารก่อผลึกทุกชนิดยังไม่สามารถปรับปรุงการยึดตัว และความต้านทานแรงดัดโค้งได้ โดยเฉพาะเมื่อเติมด้วยปริมาณมากขึ้น

6.1.4 สารก่อผลึกที่มีอนุภาคขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวเจ้า และทัลค์ สามารถเพิ่มระดับความเป็นผลึกได้ดีกว่าสารอนุภาคขนาดใหญ่

6.1.5 แกลบบด ช่วยเร่งอัตราการตกผลึกได้ดีที่สุดในกลุ่มสารก่อผลึกอินทรีย์ แต่ยังมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงระดับความเป็นผลึก และเสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทัลค์

6.2 การปรับปรุงการทนต่อความร้อนและระดับความเป็นผลึกของ PLA ด้วยการอบอ่อน โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดสารก่อผลึก อุณหภูมิแม่พิมพ์ เวลาการอบอ่อน และอุณหภูมิการอบอ่อน

6.2.1 การอบอ่อนร่วมกับการเติมแคลบด ข้าวเจ้าบด และทัลค์ ช่วยลดเวลาการหล่อเย็นในแม่พิมพ์เหลือเพียง 1 นาที

6.2.2 การอบอ่อนช่วยเพิ่มระดับความเป็นผลึกของ PLA ได้มากถึง 10-13 เท่า โดยระดับความเป็นผลึกจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการอบที่นานขึ้น

6.2.3 การใช้แม่พิมพ์ร้อน และแม่พิมพ์เย็น รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนที่แตกต่างกัน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเป็นผลึกอย่างมีนัยสำคัญหลังการอบอ่อน

6.2.4 PLA สามารถทนความร้อนได้มากกว่า 100 °C หลังการอบอ่อน โดย PLA บริสุทธิ์ PLA/Rice husk 1% และ PLA/Rice flour 1% ต้องใช้เวลาอบนานถึง 90 นาที ขณะที่ PLA/Talc 1% ใช้เวลาเพียง 10 นาทีเท่านั้น

6.2.5 การอบอ่อนช่วยเพิ่มความแกร่ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทกของ PLA ได้ แต่การยืดตัวยังลดลง

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อ

6.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ

6.3.2 ศึกษาการปรับลดความเปราะด้วยการเติมสารเพิ่มสภาพพลาสติกร่วมกับการอบอ่อน เพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน

รายการอ้างอิง

- [1] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ก. ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นและได้รับการจัดการอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการในปี 2546-2553 2554. Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_wastethai48_53.html [10, Sep]
- [2] ลีจากภัย, ธ. พลาสติก ย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2549.
- [3] (MTEC), N.M.a.M.T.C. ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ 2007. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html [12 Sep]
- [4] Hiraishi, T. and Seiichi, T. Protein Engineering of Enzymes Involved in Bioplastic Metabolism. in Ogawa, T. (ed.) Protein Engineering - Technology and Application, p. 196: InTech, 2013.
- [5] Jiang, X., Luo, Y., Tian, X., Huang, D., Reddy, N., and Yang, Y. Chemical Structure of Poly(Lactic Acid). in Poly(Lactic Acid), pp. 67-82: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [6] Bernland, K.M. Nucleating and Clarifying Polymers M.Sc. in Materials Engineering, Luleå University of Technology 2010
- [7] Boonying, S. CRYSTALLIZATION BEHAVIOR OF POLY (LACTIC ACID) COMPOSITES. Degree of Master of Engineering in Polymer Engineering, Polymer Engineering Suranaree University of Technology, 2009
- [8] Li, H. and Huneault, M.A. Effect of nucleation and plasticization on the crystallization of poly(lactic acid). Polymer 48(23) (2007): 6855-6866.
- [9] Suksut, B. EFFECT OF NUCLEATING AGENTS ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER TOUGHENED POLYLACTIC ACID. Degree of Master of Engineering in Polymer Engineering, Polymer Engineering Suranaree University of Technology 2009
- [10] wikipedia. Crystallization of polymers 2014. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Crystallization_of_polymers [11 Sep]

- [11] Analytical, P. Methods in determination of percent crystallinity. Available from: <http://particle.dk/methods-indeterminationof-percent-crystallinity/>. [10 Sep]
- [12] Alemán, C., Lotz, B., and Puiggali, J. Crystal Structure of the α -Form of Poly(L-lactide). Macromolecules 34(14) (2001): 4795-4801.
- [13] Sasaki, S. and Asakura, T. Helix Distortion and Crystal Structure of the α -Form of Poly(L-lactide). Macromolecules 36(22) (2003): 8385-8390.
- [14] Kawai, T., et al. Crystallization and Melting Behavior of Poly (L-lactic Acid). Macromolecules 40(26) (2007): 9463-9469.
- [15] Pan, P., Kai, W., Zhu, B., Dong, T., and Inoue, Y. Polymorphous Crystallization and Multiple Melting Behavior of Poly(L- lactide) : Molecular Weight Dependence. Macromolecules 40(19) (2007): 6898-6905.
- [16] Zhang, J., Tashiro, K., Domb, A.J., and Tsuji, H. Confirmation of Disorder α Form of Poly(L-lactic acid) by the X-ray Fiber Pattern and Polarized IR/Raman Spectra Measured for Uniaxially-Oriented Samples. Macromolecular Symposia 242(1) (2006): 274-278.
- [17] Marubayashi, H., Akaishi, S., Akasaka, S., Asai, S., and Sumita, M. Crystalline Structure and Morphology of Poly(L-lactide) Formed under High-Pressure CO₂. Macromolecules 41(23) (2008): 9192-9203.
- [18] Hoogsteen, W., Postema, A. R., Pennings, A. J., Ten Brinke, G., and Zugenmaier, P. Crystal structure, conformation and morphology of solution-spun poly(L-lactide) fibers. Macromolecules 23(2) (1990): 634-642.
- [19] Pan, P., Zhu, B., Kai, W., Dong, T., and Inoue, Y. Effect of crystallization temperature on crystal modifications and crystallization kinetics of poly(L-lactide). Journal of Applied Polymer Science 107(1) (2008): 54-62.
- [20] Di Lorenzo, M. L. and Androsch, R. Crystallization of Poly(lactic acid) . in Biodegradable Polyesters, pp. 109- 130: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
- [21] Saeidlou, S., Huneault, M.A., Li, H., and Park, C.B. Poly(lactic acid) crystallization. Progress in Polymer Science 37(12) (2012): 1657-1677.

- [22] Halstead, A. and Jones, J. A New Look at Nucleating Agents for Use in Polypropylene Color Concentrates. Available from: http://www.packagingdigest.com/file/5421-More_consistent_particle_dimensions_and_less_warping_from_pigments_in_polypropylene_through_the_use_of_nucleating_agents.pdf?force=true [10 September]
- [23] bioplastics, E. Bioplastics Available from: <http://en.european-bioplastics.org/environment/> [10 Sep]
- [24] Kang, K., Lee, S., Lee, T., Narayan, R., and Shin, B. Effect of biobased and biodegradable nucleating agent on the isothermal crystallization of poly(lactic acid). Korean Journal of Chemical Engineering 25(3) (2008): 599-608.
- [25] wikipedia. Talc 2014. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Talc> [13 Sep]
- [26] สรวารี, อ. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. 1 ed. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์หนังสือจุฬาฯ, 2546.
- [27] Ratto, J.A., Stenhouse, P.J., Auerbach, M., Mitchell, J., and Farrell, R. Processing, performance and biodegradability of a thermoplastic aliphatic polyester/starch system. Polymer 40(24) (1999): 6777-6788.
- [28] wikipedia. แ ก ล บ 2014. Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%9A> [11 Sep]
- [29] LeGrand, D.G. Annealing. in Encyclopedia of Polymer Science and Technology: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [30] Pan, P., Zhu, B., Kai, W., Dong, T., and Inoue, Y. Polymorphic Transition in Disordered Poly(l-lactide) Crystals Induced by Annealing at Elevated Temperatures. Macromolecules 41(12) (2008): 4296-4304.
- [31] วรมงคลชัย, ส. เทคโนโลยี พอลิเมอร์ 2. 3 ed. กรุงเทพมหานคร: ปู้ดเน็ต, 2548.
- [32] e-learning. Runner system Available from: <http://www.nttd-es.co.jp/products/e-learning/e-trainer/trial/en/mold/kiso/sample/step3/runner.htm> [10 Aug]
- [33] Petchwattana, N., Covavisaruch, S., and Petthai, S. Influence of talc particle size and content on crystallization behavior, mechanical properties and morphology of poly(lactic acid). Polymer Bulletin 71(8) (2014): 1947-1959.
- [34] Lim, L.T., Auras, R., and Rubino, M. Processing technologies for poly(lactic acid). Progress in Polymer Science 33(8) (2008): 820-852.

- [35] tech, M. TENSILE TEST EXPERIMENT Available from: <http://www.mtu.edu/materials/k12/experiments/tensile/>. [11 Sep]
- [36] center, N. R. Stress strain curve Available from: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/Tensile.htm>. [11 Sep]
- [37] Smetana. Impact Testing Available from: <http://www.weathat.com/sitemap.xmlimpact-testing-a2371.html> [15 Sep]
- [38] Industries, S. P. Impact testing Available from: <http://sachinchaturvedi.wordpress.com> [12]
- [39] Instron. Flexure Test Available from: http://www.instron.co.th/wa/applications/test_types/flexure/default.aspx. [Sep 12]
- [40] SubsTech. Flexure Testing Available from: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics) [12 Sep]
- [41] Center, P. S. L. Differential scanning calorimetry 2016. Available from: <http://pslc.ws/macrog/dsc.htm> [Jul 23]
- [42] Shakoor, A. and Thomas, N.L. Talc as a nucleating agent and reinforcing filler in poly(lactic acid) composites. Polymer Engineering & Science 54(1) (2014): 64-70.
- [43] Harris, A. M. and Lee, E. C. Improving mechanical performance of injection molded PLA by controlling crystallinity. Journal of Applied Polymer Science 107(4) (2008): 2246-2255.
- [44] Yu, F., Liu, T., Zhao, X., Yu, X., Lu, A., and Wang, J. Effects of talc on the mechanical and thermal properties of polylactide. Journal of Applied Polymer Science 125(S2) (2012): E99-E109.
- [45] Jang, W.Y., Shin, B.Y., Lee, T.J., and Narayan, R. Thermal Properties and Morphology of Biodegradable PLA/Starch Compatibilized Blends. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 13(3) (2007): 457-464.
- [46] Yu, L., Petinakis, E., Dean, K., and Liu, H. Poly(Lactic Acid)/Starch Blends. in Poly(Lactic Acid), pp. 217-226: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

- [47] Hwang, S.W. , Shim, J.K. , Selke, S. , Soto-Valdez, H. , Rubino, M. , and Auras, R. Effect of Maleic- Anhydride Grafting on the Physical and Mechanical Properties of Poly(L-lactic acid)/Starch Blends. Macromolecular Materials and Engineering 298(6) (2013): 624-633.
- [48] Ke, T. and Sun, X. Melting behavior and crystallization kinetics of starch and poly(lactic acid) composites. Journal of Applied Polymer Science 89(5) (2003): 1203-1210.
- [49] Wang, H. , Sun, X. , and Seib, P. Strengthening blends of poly(lactic acid) and starch with methylenediphenyl diisocyanate. Journal of Applied Polymer Science 82(7) (2001): 1761-1767.
- [50] García, M., Garmendia, I., and García, J. Influence of natural fiber type in eco-composites. Journal of Applied Polymer Science 107(5) (2008): 2994-3004.
- [51] Yussuf, A.A., Massoumi, I., and Hassan, A. Comparison of Polylactic Acid/Kenaf and Polylactic Acid/Rise Husk Composites: The Influence of the Natural Fibers on the Mechanical, Thermal and Biodegradability Properties. Journal of Polymers and the Environment 18(3) (2010): 422-429.
- [52] Mohammadi-Rovshandeh, J., Pouresmaeel-Selakjani, P., Davachi, S.M., Kaffashi, B., Hassani, A., and Bahmeyi, A. Effect of lignin removal on mechanical, thermal, and morphological properties of polylactide/ starch/ rice husk blend used in food packaging. Journal of Applied Polymer Science 131(22) (2014): n/a-n/a.
- [53] Tran, T.P.T., Bénézet, J.-C., and Bergeret, A. Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: Effects of alkaline and silane surface treatments of husks. Industrial Crops and Products 58 (2014): 111-124.
- [54] Yu, L. , Petinakis, E. , Dean, K. , Liu, H. , and Yuan, Q. Enhancing compatibilizer function by controlled distribution in hydrophobic polylactic acid/hydrophilic starch blends. Journal of Applied Polymer Science 119(4) (2011): 2189-2195.
- [55] Leong, Y.W. , Abu Bakar, M. B. , Ishak, Z. A. M. , Ariffin, A. , and Pukanszky, B. Comparison of the mechanical properties and interfacial interactions between talc, kaolin, and calcium carbonate filled polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science 91(5) (2004): 3315-3326.

- [56] Rahman, M.R., Islam, M.N., Huque, M.M., Hamdan, S., and Ahmed, A.S. EFFECT OF CHEMICAL TREATMENT ON RICE HUSK (RH) REINFORCED POLYETHYLENE (PE) COMPOSITES. 2010. Vol. 5, 2010.
- [57] Park, S.-D., Todo, M., and Arakawa, K. Effect of annealing on the fracture toughness of poly(lactic acid). Journal of Materials Science 39(3) (2004): 1113-1116.
- [58] Wang, W., Zhao, G., Wu, X., and Zhai, Z. The effect of high temperature annealing process on crystallization process of polypropylene, mechanical properties, and surface quality of plastic parts. Journal of Applied Polymer Science 132(46) (2015): n/a-n/a.



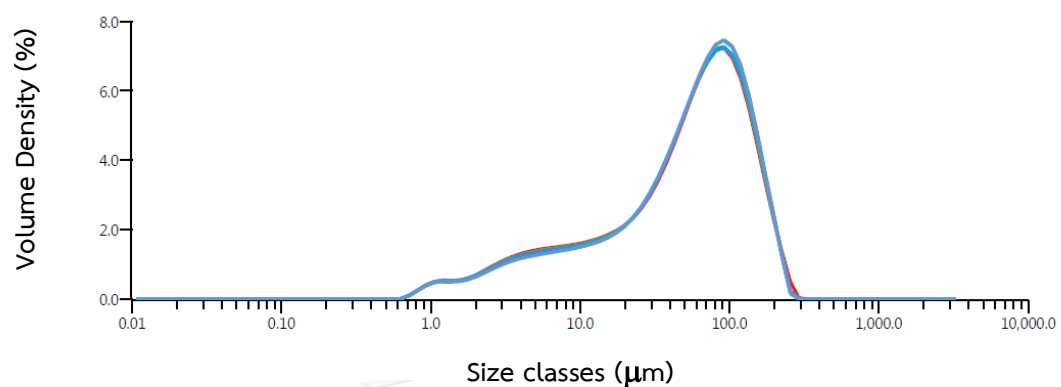


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก 1 สมบัติเชิงกายภาพของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ

ก. ขนาดอนุภาคของ แกลบบด



Concentration 0.0134 %
Uniformity 0.760
Specific Surface Area 446.0 m²/kg
D [3,2] 13.5 μm
D [4,3] 66.7 μm

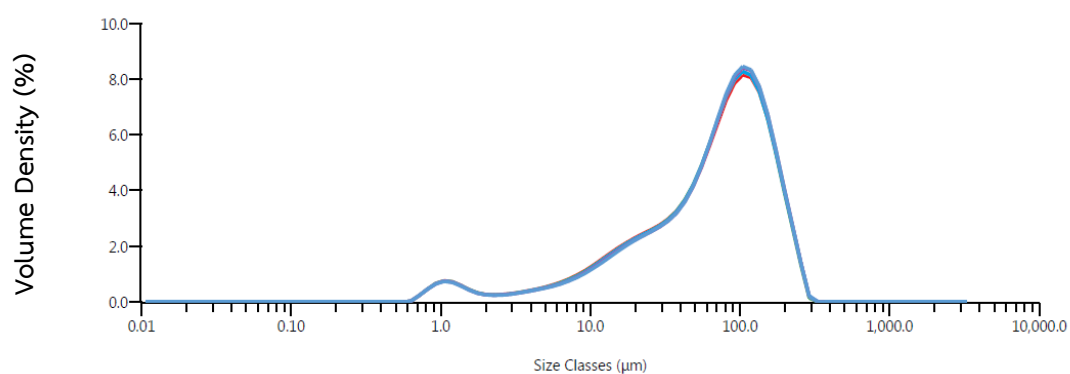
Span 2.427

Dv 10 5.08 μm

Dv 50 57.0 μm

Dv 90 144 μm

ข. ขนาดอนุภาคของ ข้าวเจ้าบด



Concentration 0.0231 %
Uniformity 0.663
Specific Surface Area 371.6 m²/kg
D [3,2] 16.1 μm
D [4,3] 83.0 μm

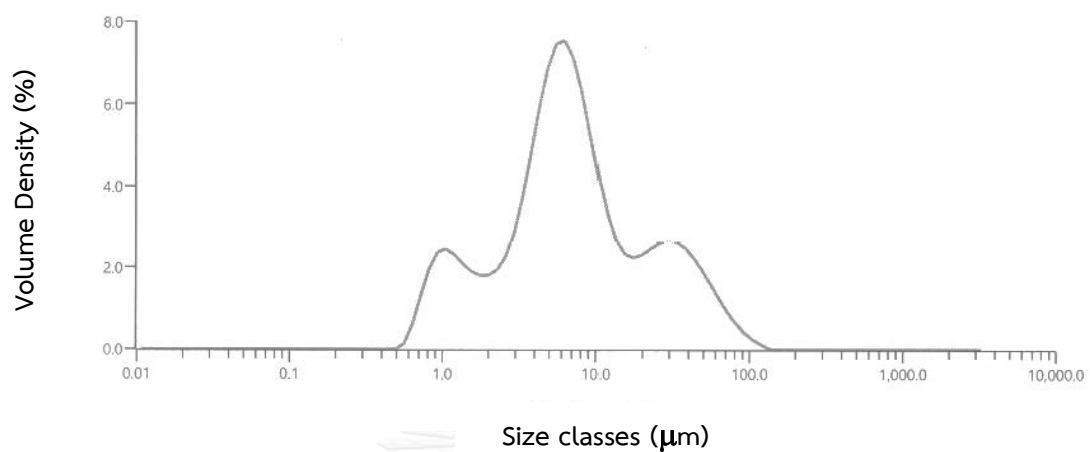
Span 2.130

Dv 10 10.7 μm

Dv 50 74.7 μm

Dv 90 170 μm

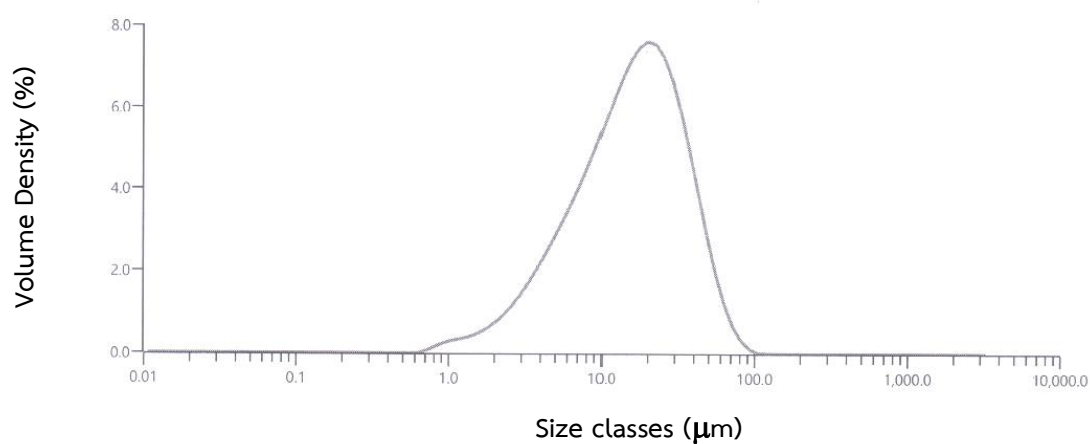
ค. ขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเจ้า



Concentration 0.0141 %
Uniformity 1.457
Specific Surface Area 1577 m²/kg
D [3,2] 3.81 µm
D [4,3] 12.9 µm

Span 5.226
Result Units Volume
Dv (10) 1.34 µm
Dv (50) 6.47 µm
Dv (90) 35.2 µm

ง. ขนาดอนุภาคของทัลค์



Concentration 0.0186 %
Uniformity 0.680
Specific Surface Area 648.9 m²/kg
D [3,2] 9.25 µm
D [4,3] 19.3 µm

Span 2.179
Result Units Volume
Dv (10) 4.36 µm
Dv (50) 15.9 µm
Dv (90) 38.9 µm

ภาคผนวก 2 ราคาของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ

สารก่อผลึก	ราคา/กิโลกรัม
แกลบบด	11
ปลายข้าวเจ้าบด	16
แป้งข้าวเจ้า	35
ทัลค์	25
PLA (รวมภาษี)	113



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุวิทย์ รักกสิกรรม เกิดเมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2534 จังหวัดอุทัยธานี ในปี 2551 จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองฉางวิทยา จังหวัดอุทัยธานี ในปี 2555 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และในปี 2556 ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ร่วมกับบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นหน่วยงานสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์

