

ผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต



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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF STARCH/NANOSILICA HYBRID FILLER ON PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID)
COMPOSITES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

จินตนา มาศ สรรพทรัพย์ศิริ : ผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของพอลิ
 แล็กติกแอซิดคอมพอสิต (EFFECTS OF STARCH/NANOSILICA HYBRID FILLER ON
 PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.
 ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ, 106 หน้า.

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการเตรียมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยสารตัด
 แปรเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลนผ่านปฏิกิริยาไซเลนเซชันเพื่อให้มีสภาพผิวเป็นไฮโดรโฟบิก โดยใช้
 อัตราส่วนของตัวเติมสตาร์ช/นาโนซิลิกา : สารตัดแปรเท่ากับ 4 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก จากนั้น
 เตรียมมาสเตอร์แบทช์ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตด้วยตัวเติมไฮบริดตัดแปรที่เตรียมได้ปริมาณ
 ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ จากนั้นนำมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมได้ไปผสมกับ
 พอลิแล็กติกแอซิดแบบหลอมเหลวอีกครั้งเพื่อลดปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาตัดแปรใน
 พอลิแล็กติกแอซิดให้เหลือร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ที่ใช้
 อุณหภูมิภายในบารเรลล์จากโซนป้อนถึงหัวดายเท่ากับ 150/160/170/180/190 องศาเซลเซียส
 จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตด้วยเครื่องฉีดแบบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลและ
 การย่อยสลายทางชีวภาพ จากการทดสอบ พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เตรียมจากตัวเติม
 ไฮบริดตัดแปรด้วย 2 ระบบ ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นร้อยละ
 17.4 และ 12.6 และมีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 25.3 และ 18.8 เมื่อใช้ตัวเติมไฮบริด : สารตัด
 แปรที่อัตราส่วน 4 : 1 และ 1 : 1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เหนือกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์
 อย่างไรก็ตาม พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ใส่ตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาตัดแปรร้อยละ 1, 3
 และ 5 โดยน้ำหนัก มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าคอมพอสิตที่ใส่ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ตัดแปรร้อยละ
 10 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากการแตกสลายของคอมพอสิตเมื่อได้รับความร้อนขณะทำการผสม 2
 ขั้นตอน ดังนั้น การใส่ตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาตัดแปรร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถ
 เสริมแรงให้กับพอลิแล็กติกแอซิด และส่งเสริมการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตภายใต้
 สภาวะการฝังดินด้วยปฏิกิริยาจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส
 และการย่อยสลายของคอมพอสิตไปพร้อมๆ กัน พร้อมทั้งปลดปล่อยกรดแล็กติกและซาลิไซลิก

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5971922523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLY(LACTIC ACID) / STARCH / NANOSILICA / COMPOSITES

JINDAMAS SUPPHASUPSIRI: EFFECTS OF STARCH/NANOSILICA HYBRID FILLER ON PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) COMPOSITES. ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D., 106 pp.

In this research, starch/nanosilica hybrid filler (ST) was first hydrophobically modified by hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) using ST : HDTMS weight ratio of 4 : 1 and 1 : 1 through silanization reaction. Masterbatch of poly(lactic acid) (PLA) with 10 wt% modified ST was then prepared using twin screw extruder. Thereafter, the obtained masterbatch was melt mixed with PLA to dilute the modified ST in composite into 1, 3 and 5 wt% by the twin screw extruder (temperature profile in the barrel from feed zone to die was 150/160/170/180/190°C), followed by sample preparing for mechanical and biodegradable testing using an injection molding machine. The results showed that the PLA composites with 10 wt% ST modified with the two systems exhibited higher impact strength by 17.4 and 12.6%, respectively, and higher tensile strength by 25.3 and 18.8%, respectively, over the pure PLA, but lower elongation at break. However, the composites with lower loadings of modified ST (1, 3 and 5 wt%) exhibited lower mechanical properties than the composites with 10 wt% modified ST. This was due to the thermal degradation of the composites with two mixing steps. Thus, 10 wt% modified ST provided reinforcing effect to PLA composite, and also promoted the biodegradability of composite under soil burial test through the enzymatic action of living microorganisms existed in the compost soil, which simultaneously caused hydrolysis and biodegradation of the composite, generating lactic and salicylic acids.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรศ.ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ยอมเสียสละเวลาในการให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนช่วยเหลือชี้แจงแก้ไขข้อบกพร่องและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรศ.ดร. ประณัฐ โพธิยะราช, รศ.ดร.นพิตา หิณชี่ระนันท์ และ รศ.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่กรุณาเป็นคณะกรรมการ ตลอดจนให้คำแนะนำ ชี้แจง เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และเจ้าหน้าที่บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) สำหรับคำแนะนำ การอำนวยความสะดวก และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ขอขอบพระคุณ คุณภววรรณพ เหมพันธุ์พิรุฬห์ และคุณบงกช พุฒแก้ว ที่ได้ให้ความรู้ และข้อแนะนำดีๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ และการวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

และสุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่สาวเป็นอย่างยิ่งที่คอยให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทาง และคอยให้ความช่วยเหลือตลอดมา จนทำให้สามารถประสบความสำเร็จ การศึกษาในครั้งนี้ไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA).....	4
2.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด.....	4
2.1.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด.....	5
2.1.3 ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิด.....	8
2.1.4 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด.....	8
2.1.5 การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแล็กติกแอซิด.....	9
2.1.6 การประยุกต์ใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิด.....	9
2.2 แป้ง (Starch).....	11
2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง.....	11

2.3 แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch).....	12
2.3.1 ประวัติความเป็นมาของมันสำปะหลัง.....	12
2.3.2 องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง.....	14
2.3.3 ประโยชน์ของมันสำปะหลัง.....	15
2.3.3.1 การบริโภคโดยตรง.....	15
2.3.3.2 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรม.....	15
2.3.4 แป้งมันสำปะหลังแปรรูป.....	18
2.4 พอลิเมอร์ผสม (polymer blend).....	20
2.4.1 วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม.....	20
2.4.2 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม.....	20
2.5 ออร์แกโนไซเลน (organosilanes).....	21
2.5.1 เฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน.....	21
2.6 อนุภาคนาโนซิลิกา.....	22
2.6.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา.....	23
2.6.2 ประโยชน์ของอนุภาคนาโนซิลิกา.....	24
2.7 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	25
2.7.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้.....	27
2.7.2 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	30
2.7.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้.....	31
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	36

3.3	วิธีการทดลอง.....	37
3.3.1	การเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน.....	37
3.3.2	การเตรียมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา	38
3.3.3	การเตรียมพอลิเล็กทิกแอซิดผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา.....	39
3.3.4	การทดสอบสมบัติต่างๆ	40
3.3.4.1	การทดสอบสัณฐานวิทยา.....	40
3.3.4.1.1	ทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	40
3.3.4.1.2	ทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	41
3.3.4.2	สมบัติเชิงกล.....	41
3.3.4.2.1	ความทนแรงกระแทก	42
3.3.4.2.2	ความทนแรงดึง และการดึงยืด ณ จุดขาด.....	43
3.3.4.3	สมบัติทางกายภาพ.....	44
3.3.4.4	การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ.....	45
3.3.4.5	สมบัติทางความร้อน.....	46
3.3.4.5.1	สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC).....	46
3.3.4.5.2	สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกร าวิกเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA)	47
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	48
4.1	ผลการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา.....	48
4.1.1	สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา	48
4.2	ผลการดัดแปรสตาร์ช/นาโนซิลิกาด้วยสารออร์แกโนไซเลน	50
4.2.1	สัณฐานวิทยาของไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา.....	50

4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล	55
4.3.1 สัณฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก.....	57
4.4 สมบัติทางกายภาพ.....	60
4.5 การย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ.....	61
4.5.1 การสังเกตลักษณะที่ปรากฏ (visual observation) ทางด้านกายภาพและ การเปลี่ยนแปลงบนชิ้นงานที่ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด.....	61
4.5.2 การวัดน้ำหนักที่หายไป (weight loss measurement)	70
4.6 สมบัติทางความร้อน.....	73
4.6.1 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC)	73
4.6.2 สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิคิเมตริกแอนาไล เซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA).....	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	80
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	89
ภาคผนวก ค	92
ภาคผนวก ง.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	106

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	11
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในหัวมัน	14
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบในเนื้อมัน	14
ตารางที่ 3.1 ข้อมูล PLA เกรด 4043D	35
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง	36
ตารางที่ 3.3 ตารางส่วนผสมสารเคมีเพื่อใช้เตรียมสูตรตัดแปรร 2 สูตร	38
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมระหว่างแป้งตัดแปรรและพอลิแล็กติกแอซิด	39
ตารางที่ 3.5 สูตรอัตราส่วนผสมพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมตัวเติม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา	40
ตารางที่ 3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัว เติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่เตรียมได้	42
ตารางที่ 4.1 ผลตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิแล็กติกแอซิดและ พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ในปริมาณต่างกัน	60
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (weight loss (%)) ของพอลิแล็กติกแอซิดและ พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน โดยทำการทดสอบ การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์, 8 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ตามลำดับ	70
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริ เมทรีของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ต่างกัน	76

ตารางที่ 4.4	อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็ม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	78
--------------	---	----



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิเล็กทริกแอซิด	4
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเล็กทริกแอซิดจากกรดเล็กทริกและหรือเล็กไทด์	5
รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเล็กทริกแอซิดโดยการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ	6
รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเล็กทริกแอซิดโดยการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening polymerization)	7
รูปที่ 2.5 ค่ามอดุลัสและค่าการยืดตัวของพอลิเล็กทริกแอซิดเทียบกับพอลิเมอริชนิดต่างๆ	8
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	13
รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงประโยชน์ของมันสำปะหลัง	18
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปทางเคมีของออร์แกนโอซิลิโคน	21
รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีซิลิโคน	21
รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิลิกา	22
รูปที่ 2.11 รูปแสดงแนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลก	26
รูปที่ 3.1 สารละลายที่เตรียมได้ก่อนนำไปใส่ในภาชนะพลาสติก	37
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน	37
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา.....	38
รูปที่ 3.4 แผนผังอุณหภูมิกำหนดเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่จากโซนป้อนถึงหัวตาย	39
รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	40
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
รูปที่ 3.7 เครื่องฉีดแบบ	41
รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล.....	42
รูปที่ 3.9 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงกระแทก.....	42
รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด.....	43

รูปที่ 3.11	ลักษณะชิ้นงานต้มเบิ้ลที่นำมาทดสอบ	43
รูปที่ 3.12	เครื่องทดสอบทดสอบสมบัติเชิงกล	44
รูปที่ 3.13	ชิ้นงานที่ทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำ	45
รูปที่ 3.14	เครื่องอัดขึ้นรูป	45
รูปที่ 3.15	กล่องทดสอบการย่อยสลายชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิด คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบโดย ทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์, 8 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ตามลำดับ	46
รูปที่ 3.16	เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีพีเพอร์เรนเซียสแกนนิ่งแคลอริเมทรี..	46
รูปที่ 3.17	เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิคเมตริก แอนาไลเซอร์	47
รูปที่ 4.1 (ก)	ลักษณะทางกายภาพของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ระยะเวลา 2, 8 และ 12 วัน (ข) สัณฐานวิทยาของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ระยะเวลา 2, 8 และ 12 วัน	49
รูปที่ 4.2	สมการเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา	50
รูปที่ 4.3	สัณฐานวิทยาของสตาร์ช (starch) และไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา (hybrid starch/nSiO ₂) ที่แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร	51
รูปที่ 4.4	ลักษณะทางกายภาพของไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร ก่อนนำไปผสมร่วมกับ พอลิแล็กติกแอซิด	52
รูปที่ 4.5	ลักษณะทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 0%, 1%, 3%, 5% และ 10%	53
รูปที่ 4.6	สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณต่างกัน (ก) ความทนแรงกระแทก (ข) ความทนแรงดึง และ (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด	55
รูปที่ 4.7	สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า	58

รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....	59
รูปที่ 4.9	ชิ้นงานพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกันไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 600 ชั่วโมง หรือ 25 วัน	60
รูปที่ 4.10	ชิ้นงานก่อน (before) และหลัง (after) การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	63
รูปที่ 4.11	ชิ้นงานก่อน (before) และหลัง (after) การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์.....	64
รูปที่ 4.12	ชิ้นงานก่อน (before) และหลัง (after) การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์.....	65
รูปที่ 4.13	สัณฐานวิทยาหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.14	สัณฐานวิทยาหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ของพอลิเล็กทิกแอซิดและพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน.....	68

- รูปที่ 4.15** สัณฐานวิทยาหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน..... 69
- รูปที่ 4.16** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปที่ระยะเวลา 12 สัปดาห์ ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณต่างกัน .. 71
- รูปที่ 4.17** ภาพเปรียบเทียบทางสัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบทั้ง 3 ระยะเวลา..... 72
- รูปที่ 4.18** DSC Thermogram ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช /นาโนซิลิกา (ก) ที่ 4 ST : 1 HDTMS และ (ข) ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน..... 74

สัญลักษณ์และคำย่อ

neat PLA, PLA	พอลิแล็กติกแอซิด
ST	สตาร์ช
modified starch	แป้งดัดแปร
HDTMS	เฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน
masterbatch	ส่วนผสมระหว่างแป้งดัดแปรและพอลิแล็กติกแอซิดที่อัตราส่วน โดยน้ำหนัก 1 ต่อ 9
4 ST : 1 HDTMS	ตัวเติมไฮบริดสตาร์ชและอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ต่อเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 4 ต่อ 1
1 ST : 1 HDTMS	ตัวเติมไฮบริดสตาร์ชและอนุภาคนาโนซิลิการ้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ต่อเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 ต่อ 1
PLA/4 ST : 1 HDTMS	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS
PLA/1 ST : 1 HDTMS	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 1 ST : 1 HDTMS
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 1 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 1 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 1 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 1 ST : 1 HDTMS ที่มีส่วนผสมของมาสเตอร์แบทช์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
wt%	ร้อยละโดยน้ำหนัก
W_f (%)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
Weight loss(%)	น้ำหนักที่หายไป
T_g	อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
T_{cc}	อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น
T_m	อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก
degree of crystallinity, X_c (%)	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก
mass change (%)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้ปฏิเสธไม่ได้ว่ามีการใช้งานพลาสติกกันอย่างกว้างขวางและเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเกือบทั้งหมด เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความคงทน สามารถตอบสนองการใช้งานได้อย่างมากมาย ตลอดจนมีราคาที่เหมาะสม แต่พลาสติกเหล่านี้ มีปัญหาทางด้านการกำจัด เนื่องจากต้องใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นเวลานาน หรือบางแห่งเลือกที่จะใช้วิธีการเผาในการทำลาย ซึ่งส่งผลก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศตามมา ดังนั้น จึงได้มีการรณรงค์ให้ใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพกันมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และสิ่งที่สำคัญคือ ใช้วัตถุดิบในการผลิตที่สามารถทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) โดยพอลิแล็กติกแอซิดหรือพีแอลเอ (poly(lactic acid), PLA) จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการนำมาใช้งาน เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดมีความใส ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไปได้และได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นเพื่อทดแทนวัสดุสังเคราะห์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นจากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง เช่น ข้าวโพด เป็นต้น โดยมีแบคทีเรียแลคโตบาซิลลัสสายสั้น (*Lactobacillus brevis*) มาผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) แบ่งและน้ำตาลกลายเป็นกรดแล็กติกแอซิด (lactic acid) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด ในขั้นตอนต่อไป นอกจากนี้ พอลิแล็กติกแอซิดมีสมบัติเด่นในการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้อย่างมากมาย ซึ่งสามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการผลิตที่มีการใช้งานโดยทั่วไป เช่น การอัดรีด (extrusion) การฉีดแบบ (injection molding) และการเป่าแบบ (blown molding) เป็นต้น พอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะใสและมีสมบัติเชิงกลหลายด้านที่ดี แต่ค่อนข้างเปราะ และต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายและผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ จึงช่วยลดปัญหาทางด้านขยะ และปัญหาด้านมลพิษให้ลดลง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงทำให้หลายหน่วยงานมีการรณรงค์ให้ใช้พลาสติกชีวภาพกันมากขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการหาวัตถุดิบชนิดอื่นเข้ามาช่วยในการผลิตและยังคงคุณภาพเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาวะฝังกลบและใส่ตัวเติมเพื่อเข้ามาช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น [1]

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรอย่างมากมายจนสามารถเหลือกลายเป็นสินค้าส่งออกรวมถึงสามารถนำไปแปรรูปได้ ซึ่งส่งผลให้มีรายได้เข้าภายในประเทศตามมา เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าว และยางพารา เป็นต้น นอกจากนี้ ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกมันสำปะหลังเป็นอันดับ 1 ในกลุ่มอาเซียน (ข้อมูลปี : พ.ศ. 2558) ดังนั้น แป้งมันสำปะหลัง (สตาร์ช) จึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการเลือกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผสมเข้ากับพอลิแล็กติก-แอซิด เนื่องจากเมื่อเทียบกับผลผลิตทางการเกษตรชนิดอื่นๆ พบว่า แป้งมันสำปะหลังนั้นมีราคาถูก ทนทาน สามารถนำไปใช้งานแปรรูปทางด้านอาหารรวมถึงด้านการนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมไม้อัด และอุตสาหกรรมแป้งแปรรูป (modified starch) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำสตาร์ชเข้ามาผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาคหรือที่เรียกว่า แอกรีเกต (aggregate)/ แอกลอเมอเรต (agglomerate) ของอนุภาคเกิดขึ้น และส่งผลให้เกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อปัญหาในระหว่างขั้นตอนการผสม และสุดท้ายจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและคุณภาพในการนำไปใช้งานของวัสดุที่ได้ต่อไป [2]

ดังที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น ข้อจำกัดของการผสมสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด คือ สามารถเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนขณะทำการผสม ส่งผลให้การกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของพอลิเมอร์ตามมา ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการดัดแปรผิวพอลิแล็กติกแอซิดและสตาร์ชให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกนอซิลเลนเพื่อลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแป้ง และช่วยเสริมความเข้ากันระหว่างไฮบริดสตาร์ชและพอลิเมอร์เมทริกซ์ จากนั้นจึงทำการเสริมแรงด้วยการใส่อนุภาคนาโนซิลิกาที่เตรียมด้วยเทคนิคการตกตะกอนจากโซเดียมซิลิเกต [3] และควบคุมขนาดของอนุภาคให้อยู่ในระดับนาโนเมตร โดยคาดว่านาโนซิลิกาจะมีสมบัติรับแรงกระแทกซึ่งทำให้พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาสามารถทนแรงกระแทกได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
2. เพื่อศึกษาพอลิแล็กติกแอซิดผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
3. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตโดยผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
2. ศึกษาถึงปริมาณของสตาร์ชที่ทำการดัดแปรผิวที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต
3. ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ (การดูดซึมน้ำ) สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่เตรียมได้โดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถย่อยสลายโดยวิธีฝังกลบ



บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)

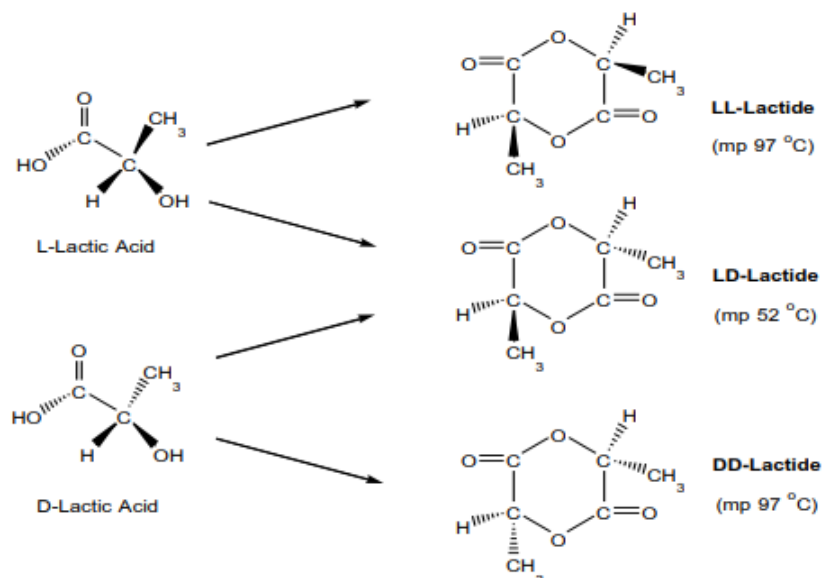
พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่สลายตัวได้ (biodegradable/compostable) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสามารถหาได้จากทรัพยากรที่เกิดขึ้นใหม่ได้ เช่น แป้งที่ได้จากพืชจำพวก ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น เริ่มแรกการนำพอลิแล็กติกแอซิดไปประยุกต์ใช้งานจะถูกจำกัดในวงแคบ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง สัณฐานที่ได้ปริมาณน้อยและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น การใช้งานด้านการแพทย์ นำไปใช้เป็นสแคฟโฟลด์สำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (tissue scaffolds) อุปกรณ์ปลูกถ่าย (medical implants) และไหมเย็บแผลที่ใช้ในร่างกาย (internal sutures) เป็นต้น แต่ในปัจจุบัน นักวิจัยได้ค้นพบเทคนิคการผลิตพอลิแล็กติกแอซิดที่ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูงและมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม จึงส่งผลให้พอลิแล็กติกแอซิดถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายมากขึ้น และพอลิแล็กติกแอซิดยังมีสมบัติที่โดดเด่น เช่น สามารถสลายตัวได้ ผลิตจากวัตถุดิบยั่งยืน (sustainable source) มีความเป็นพิษต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพที่สามารถแก้ไขปัญหาการกำจัดขยะ อีกทั้งถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่นๆ [1]



2.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด

มอนอเมอร์ของพอลิแล็กติกแอซิด คือ กรดแล็กติก มีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ ดี-ไอโซเมอร์ และแอล-ไอโซเมอร์ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นอแนนชิโอเมอร์ (enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (optical active) ต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีเหมือนกัน แต่การจัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน และมีการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแอล-ไอโซเมอร์หรือในรูปของผสมระหว่างแอล-ไอโซเมอร์และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่า ของผสมราซิมีก (racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือสารประกอบมีโซ (meso-compound) ที่ไม่มี

สมบัติปิระนาบแสงโพลาไรซ์ (optically inactive) โดยในปัจจุบันการผลิตกรดแล็กติกใช้การหมักเป็นหลัก สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (optical purity) ที่ดี



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากกรดแล็กติกและหรือแล็กไทด์ [5]

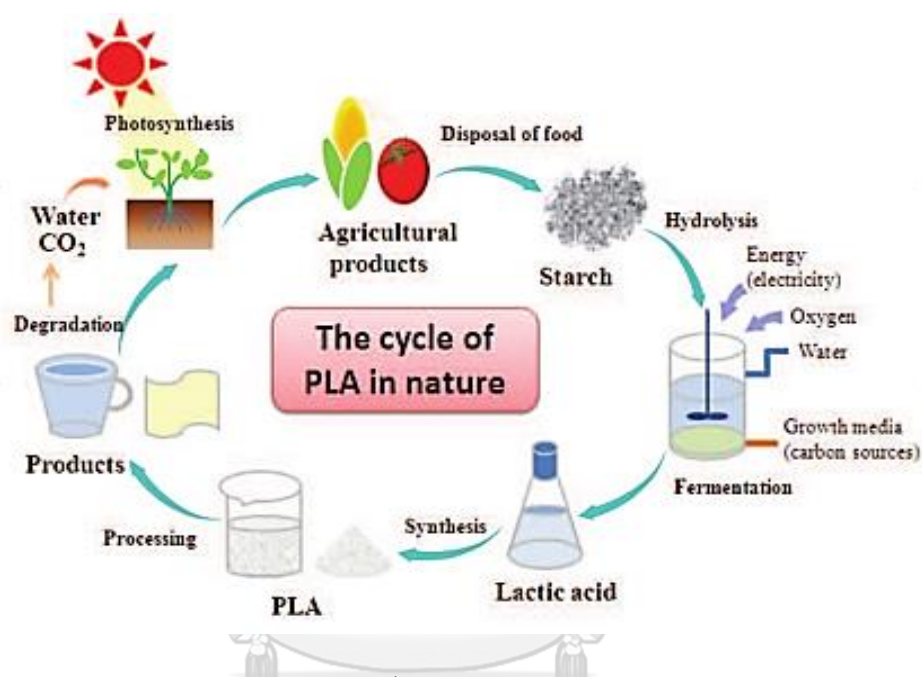
เนื่องจากกรดแล็กติกมี 2 ไอโซเมอร์ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด ได้เป็นพอลิแอล-แล็กติกแอซิด (poly(L-lactic acid: PLLA) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิกจะได้พอลิติแอล-แล็กติกแอซิด (poly(D,L-lactic acid: PDLLA)

ปัจจุบันการผลิตไอโซเมอร์ของกรดแล็กติกบริสุทธิ์ทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดดีหรือพอลิติ-แล็กติกแอซิด (poly(D-lactic acid: PDLA) ยังไม่มีในเชิงพาณิชย์ โดยไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเป็นผลึก (crystalline) ของพอลิเมอร์ กล่าวคือ PLLA มีความเป็นผลึกสูง ขณะที่ PDLA มีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) สูง

2.1.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด

การผลิตพอลิแล็กติกแอซิดสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตโดยการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติและการผลิตโดยการสังเคราะห์ โดยการผลิต PLA โดยวิธีการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต คือ แป้งที่มาจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (renewable resource) ได้แก่ พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือโม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมัก (fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ เกิดเป็นกรดแล็กติก (lactic

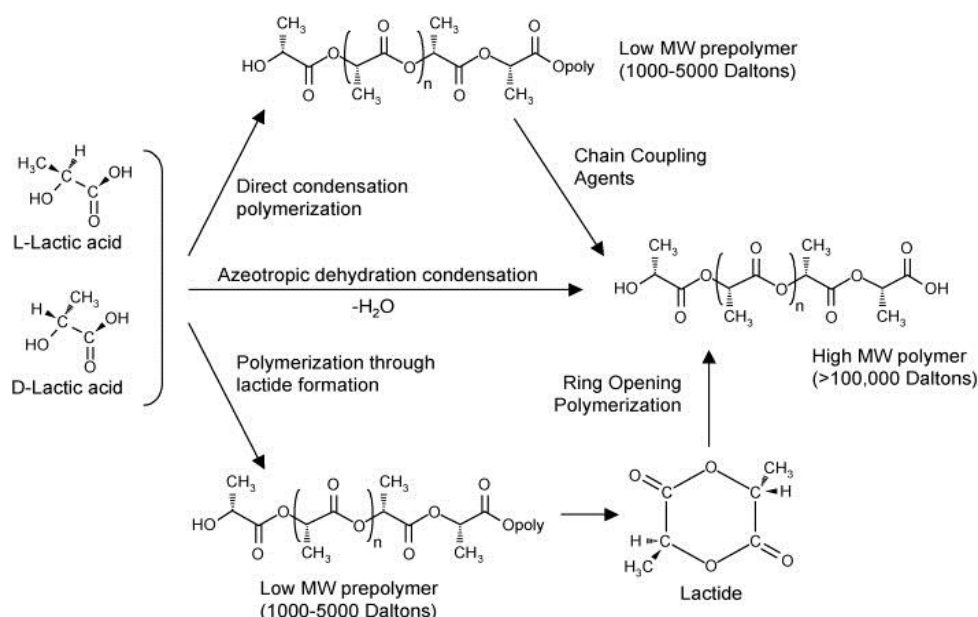
acid: $C_3H_6O_3$) ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายการหมักเปปเปอร์ จากนั้นนำกรดแล็กติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน เรียกว่า แล็กไทด์ (lactide) หลังจากนั้นนำมากลับในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ของแล็กไทด์ที่เป็นสายยาวขึ้น เรียกว่า พอลิแล็กติกแอซิด โดยสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นกับการกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์ ทั้งนี้พอลิแล็กติกแอซิดสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม กลไกการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดโดยการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ [4]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การผลิตพอลิแล็กติกแอซิดโดยการสังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น ปฏิกริยาควบแน่นโดยตรง (direct polycondensation) ปฏิกริยาการควบแน่นในภาวะของแข็ง (solid-state polycondensation) ปฏิกริยาต่อสายโซ่ (chain extension) ปฏิกริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (azeotropic dehydration polycondensation) ปฏิกริยาควบแน่นโดยเอนไซม์ (enzymatic polycondensation) และการสังเคราะห์โดยการเปิดวง (ring-opening polycondensation) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดโดยการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening polymerization) [1]

การผลิตพอลิแล็กติกแอซิดจากปฏิกิริยาการควบแน่น เริ่มต้นจากการนำแล็กติกแอซิดซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก (-CO₂H) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นได้ด้วยตัวเอง กระบวนการนี้ประกอบด้วยสารละลาย เช่น น้ำและตัวทำละลายออร์แกนิก เพื่อกำจัดน้ำที่เกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรงประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดน้ำออก (removal of water) การควบแน่นของโอลิโกเมอร์ (polycondensation of oligomer) และการควบแน่นแบบหลอมเหลว (melt condensation) ซึ่งกระบวนการนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ น้ำ ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นจะกลับมาทำให้พอลิแล็กติกแอซิดที่ผลิตขึ้นเสื่อมสภาพ

การผลิตพอลิแล็กติกแอซิดจากการสังเคราะห์โดยการเปิดวงเป็นวิธีที่นิยมในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถผลิตพอลิแล็กติกแอซิดได้บริสุทธิ์มาก โดยนำแลกไทด์มอนอเมอร์ร่วมกับแล็กติกแอซิด 2 โมเลกุล และเปิดวงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ ปฏิกิริยาการควบแน่น (polycondensation) ปฏิกิริยาไม่ผ่านการควบแน่น (de-polycondensation) และการสังเคราะห์โดยการเปิดวง (ring-opening polycondensation)

พอลิแล็กติกแอซิดที่ใช้ในทางการค้าเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA กับ PDLLA ซึ่งสังเคราะห์โดยผ่านกลไกแบบปฏิกิริยาเปิดวงของ L-lactide และ L,D-lactide ตามลำดับ โดยที่พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมี L-lactide เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า เนื่องจากมอนอเมอร์ที่สกัดได้จากธรรมชาติจะอยู่ในรูปของ L-lactic acid มากกว่า ซึ่งปริมาณ D-lactide และหรือปริมาณ L-lactide

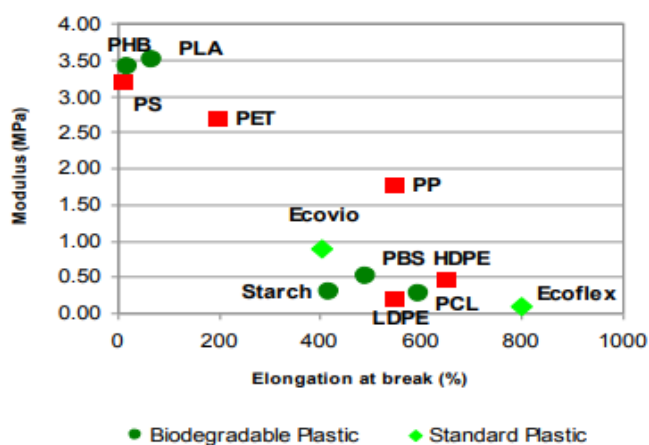
ส่งผลต่อสมบัติด้านต่างๆของพอลิแล็กติกแอซิด เช่น ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และ อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (T_m) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ L-lactide มอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

2.1.3 ข้อดีของพอลิแล็กติกแอซิด

1. กระบวนการผลิตกรดแล็กติกแอซิดมาจากมอนอเมอร์แลกไทด์ซึ่งได้จากกระบวนการหมักวัตถุดิบที่ได้จากเกษตรกรรม [6]
2. ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลผลิตทางอ้อมจากการใช้ข้าวโพดเป็นสารตั้งต้นในการผลิต
3. ประหยัดพลังงาน
4. สามารถนำกรดแล็กติกแอซิดมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้โดยการไฮโดรลิซิสหรือแอลกอฮอล์ิซิส
5. เพิ่มความสามารถของผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์พลาสติก-ไฮบริดเปเปอร์ ให้มีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
6. ลดปริมาณการฝังกลบขยะ
7. ส่งเสริมเศรษฐกิจทางด้านเกษตรกรรม
8. เป็นการปรับปรุงตัดแปรวัสดุทางด้านกายภาพทางอ้อมของสินค้าเป็นอย่างมาก

2.1.4 ข้อเสียของพอลิแล็กติกแอซิด

1. พอลิแล็กติกแอซิดมีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ โดยเมื่อพิจารณาในด้านของค่ามอดุลัส พบว่า อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน ดังรูปที่ 2.5 ทำให้มีข้อจำกัดในการนำพอลิแล็กติกแอซิดไปใช้งาน เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้น ในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปในสูตรสารประกอบพอลิแล็กติกแอซิดและหรือผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า เช่น พอลิคาโพรแลคโตน และ ECOFLEX



รูปที่ 2.5 ค่ามอดุลัสและค่าการยืดตัวของพอลิแล็กติกแอซิดเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [5]

2. พอลิแล็กติกแอซิดไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูปอาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปผ่านกลไกแบบไฮโดรลิซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้น ในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ดพอลิแล็กติกแอซิด ให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (water content) ที่อยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดควรจะมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าวข้างต้น

3. ความแข็งแรงของพอลิแล็กติกแอซิด ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำ ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียร ดังนั้น ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดจึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

4. ราคาแพงเมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป (commodity plastics)

2.1.5 การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่ไม่ย่อยสลายทันทีที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส โดยขั้นตอนแรก พอลิแล็กติกแอซิดถูกย่อยสลายไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และกรดแล็กติก โดยการไฮโดรลิซิสซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ สารประกอบและกรดแล็กติกที่ได้ จะถูกย่อยต่อไปด้วยจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยการเมทาบอลิซึมอย่างรวดเร็วไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และมวลชีวภาพ [7]

2.1.6 การประยุกต์ใช้งานของพอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลายทำให้สามารถนำไปประยุกต์เป็นพลาสติกมูลค่าเพิ่มต่างๆหลายด้าน ได้แก่

1. ด้านการแพทย์ เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) จึงสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อ (biocompatible) และสามารถถูกดูดซึม (bioresorbable) ได้โดยระบบชีวภาพ (biological system) ในร่างกาย จึงทำให้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูง สำหรับงานทางการแพทย์ และถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์มานาน เช่น ไหมเย็บแผล (sutures) ตัวเย็บแผล (staples) วัสดุปิดแผล (wound dressing) อุปกรณ์ฝังในร่างกาย (surgical implants) อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก (orthopedic fixation devices)

วัสดุสำหรับนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ด้านการเกษตร เช่น ภาชนะปลูกพืช วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช หรือปุ๋ย ตามช่วงเวลาที่กำหนด

3. ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถุงพลาสติก กล่อง โฟม फिल्मสำหรับหีบห่อ เม็ดโฟมกันกระแทก และตัวเคลือบภาชนะกระดาษ

4. ด้านเส้นใย และแผ่นผ้าแบบ non-woven เช่น ผลิตภัณฑ์อนามัย ผ้าอ้อมสำเร็จรูป เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่มเส้นใยสำหรับบรรจุในเครื่องนอน

5. ด้านยานยนต์ เช่น อุปกรณ์ลดแรงกระแทก (bumpers) แผ่นรองพื้น (floor mats) และ อุปกรณ์ตกแต่งภายใน

6. ด้านอิเล็กทรอนิกส์ และการสื่อสาร เช่น ชิ้นส่วนประกอบในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ชิ้นส่วนประกอบในคอมพิวเตอร์และแผ่นซีดี

7. ด้านอื่นๆ เช่น อุปกรณ์เครื่องเขียน บัตรพลาสติก ผลิตภัณฑ์ใช้ในบ้านเรือน สารเคลือบกระดาษ สารยึดติด และท่อพลาสติกชั่วคราว

2.2 แป้ง (Starch)

แป้ง เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ มีหน่วยพื้นฐานเป็น anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้ง จะมี anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้น แต่ละโมเลกุลของแป้งมีด้านปลายที่มีสมบัติรีดิวซ์ (reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลมีตำแหน่ง reducing end 1 ตำแหน่ง

2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้ง

โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัวดังนี้

อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย

อะไมโลเพคติน ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย

นอกจากนี้ ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่งซึ่งมี ขนาดใหญ่ กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่า อะไมโลเพคติน เรียกว่า “intermediate material ” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและ อะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [8]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งประกอบด้วยกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อย	3. ละลายน้ำได้ดี
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง
7. สตาร์ชที่มีอะไมโลสสูง ได้แก่ ข้าวเจ้า ข้าวโพด	7. สตาร์ชที่มีอะไมโลเพคตินสูง ได้แก่ ข้าวเหนียว

2.3 แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch)

2.3.1 ประวัติความเป็นมาของมันสำปะหลัง

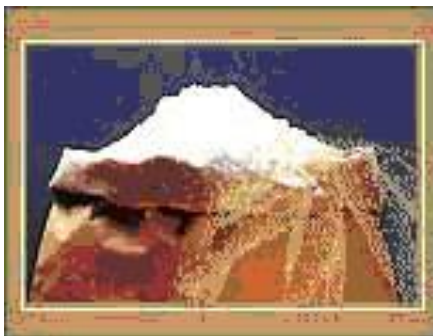
มันสำปะหลังเป็นพืชประเภทหัวชนิดหนึ่งที่มีชื่อเรียกทั่วไปว่า Cassava หรือ Tapioca โดยมันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ เช่น ประเทศเปรู เม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูรัส และบราซิล ซึ่งมีการปลูกมันสำปะหลังมา 3,000 ถึง 7,000 ปี ต่อมาได้ขยายไปสู่แหล่งอื่นๆ ของโลกโดยชาวโปรตุเกสและชาวสเปนนำมันสำปะหลังจากเม็กซิโกมายังฟิลิปปินส์ประมาณ ค.ศ.17 และชาวฮอลแลนด์นำไปยังอินโดนีเซีย ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้จัดมันสำปะหลังไว้เป็นหมวดหมู่ ดังนี้

order	:	<i>Geraniales or Euphorbiales</i>
class	:	<i>Dicotyledonea</i>
subclass	:	<i>Archichlamydeae</i>
family	:	<i>Euphorbiaceae</i>
tribe	:	<i>Manihoteae</i>
genus	:	<i>Manihot</i>
species	:	<i>Esculenta</i>

มันสำปะหลังเป็นไม้พุ่มยืนต้นมีอายุอยู่ได้หลายปี การปลูกมันสำปะหลังจะใช้ส่วนของลำต้นตัดเป็นท่อนปักไปในดิน ตรงบริเวณรอยตัดที่ปักอยู่ในดินจะแตกเป็นรากฝอย หลังจากปลูกได้ประมาณ 2 เดือน รากจะค่อยๆ สะสมแป้ง และมีขนาดโตขึ้น เรียกว่า หัวมันสำปะหลัง และสามารถเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลังหลังจาก 6 เดือนผ่านไปแล้ว โดยจะยึดอายุเก็บเกี่ยวไปได้ถึง 16 เดือน โดยส่วนตาที่อยู่ด้านข้างจะเจริญเติบโตออกมาเป็นลำต้นต่อไป

แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) ทำมาจากหัวมันสำปะหลัง มีลักษณะเป็นผงสีขาว จับผิวสัมผัสของแป้งจะเนียนลื่นมือ เมื่อทำให้สุกจะเหลวเหนียวหนืด เมื่อพักให้เย็นจะมีลักษณะเหนียวคงตัว นิยมนำมาผสมกับอาหารที่ต้องการความเหนียวหนืดและใส หัวมันสำปะหลังสดมีแป้งเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 20 แป้งมันสำปะหลังที่สกัดจากหัวมันสำปะหลังและไม่มีการเปลี่ยนรูป เรียกว่า แป้งดิบ (native starch) [9]

แป้งดิบ ที่ภาษาอังกฤษเรียก Starch คือ แป้งดิบที่สกัดเอาเยื่อใยออกแล้วใช้เป็นอาหารมนุษย์ อาหารทารก เป็นเครื่องปรุงอาหารหลายชนิดใช้ ทำวุ้นเส้น ทำเบียร์ และใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นตัวทำให้สารติดแน่น คงรูปร่าง ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมซักกรีต อุตสาหกรรมทำกระดาษ แป้งเปียก แอลกอฮอล์ อะซีโตน ยา กลูโคส และแป้งแปรรูป



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [10]

โดยสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการผลิตเป็น 2 ประเภท คือ

1. แป้งดิบหรือแป้งมันสำปะหลังดิบ (native starch) เป็นแป้งที่ได้จากหัวมันสด ด้วยกระบวนการแยกกากโปรตีน และอื่นๆ ปัจจุบันมีโรงงานประมาณ 85 โรงงาน แต่ทำการผลิตจริงเพียง 49 โรงงาน กำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 2 - 2.5 ล้านตันต่อปี ผลผลิตเฉลี่ยทั้งอุตสาหกรรม (ผลิตได้จริง) ประมาณ 1.76 ล้านตันต่อปี

2. แป้งมันสำปะหลังแปรรูป (modify starch) คือ แป้งซึ่งได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบ มาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีหรือฟิสิกส์เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลให้เหมาะสมกับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยปกติการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูปใช้อัตราแป้งดิบ 1 กิโลกรัมต่อแป้งแปรรูป 0.93 กิโลกรัม

แป้งดิบ ที่ภาษาอังกฤษเรียก flour เป็นแป้งที่ไม่ได้สกัดเอาเยื่อใยออก ทำได้โดยนำหัวมันสด มาปอกเปลือกหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปตากแห้งจากนั้นปั่นให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนแป้ง จะได้แป้งดิบที่สามารถนำมาใช้ทำขนมอบชนิดต่างๆได้คล้ายแป้งสาลี เช่น นำมาทำเป็นเค้ก แพนเค้ก ขนมปัง คุกกี้ พาย และสามารถนำมาทดแทนแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า ได้บางส่วนในอาหารบางชนิด

มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

1. ชนิดหวาน (sweet type) เป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคต่ำ ไม่มีรสขม ใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์ มีทั้งชนิดเนื้อร่วนนุ่ม และชนิดเนื้อแน่น เหนียว แต่มีจำนวนน้อย

2. ชนิดขม (bitter type) เป็นมันสำปะหลังที่มีกรดไฮโดรไซยานิคสูง เป็นพิษ และมีรสขม ไม่เหมาะสำหรับการบริโภคของมนุษย์หรือใช้หัวมันสำปะหลังสดเลี้ยงสัตว์โดยตรงแต่จะใช้สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปต่างๆ เช่น แป้งมัน มันอัดเม็ด และแอลกอฮอล์เป็นต้น เนื่องจากมีปริมาณแป้งสูง มันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานที่แน่ชัดว่า มีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใด แต่คาดว่ามีการนำมันสำปะหลังมาจากประเทศมาเลเซียเมื่อปี 2329 โดยมีชื่อเรียกในระยะต่อมาว่า

มันไม้ และมันสำโรง คำว่าสำปะหลัง นั้นภาษามาเลเซียและอินโดนีเซียเรียกว่า Ubikayu แปลว่า พืชที่มีรากขยายใหญ่ และคล้ายกับภาษาชาวตะวันตกว่า "ส้มเปอ (Sampeu)" [9]

2.3.2 องค์ประกอบหัวมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้วจะสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้งไว้ในราก ความสามารถในการสร้างและสะสมแป้ง ในรากมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยว และปัจจัยอื่น ๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจจะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือน ที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอ และไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยวจะมีส่วนประกอบแสดงได้ดังนี้ [9]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบในหัวมัน [11]

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21-75.32
เปลือก	4.08-14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87-41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85-39.27

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบในเนื้อมัน [11]

องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เส้นใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

จะเห็นว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ในรากนั้น นอกจากน้ำแล้วคือแป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูง ปริมาณน้ำจะน้อยและความหนาแน่นของหัวจะมีสูง

ดังนั้น ในการตรวจสอบหรือวัดปริมาณแป้ง (เชื้อแป้ง) อย่างเร็วที่นิยมทำกัน คือ การตรวจสอบความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำน้อย แสดงว่า หัวมันมีปริมาณน้ำมาก และมีแป้งน้อย ในกรณีกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมากก็แสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำน้อยและมีแป้งมาก

2.3.3 ประโยชน์ของมันสำปะหลัง

2.3.3.1 การบริโภคโดยตรง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ใช้ประโยชน์ได้ทุก ๆ ส่วน ตั้งแต่ยอดจนถึงราก (หัวมัน) มีการนำมาใช้ประโยชน์ในครัวเรือน เพื่อการบริโภคเป็นอาหารมนุษย์ และอาหารสัตว์ รวมถึงใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อใช้ประโยชน์กับมนุษย์และสัตว์ในหลายๆรูปแบบ ตลอดทั้งใช้ในอุตสาหกรรม แป้งแปรรูป (modified starch) ใช้ประโยชน์อุตสาหกรรมต่างๆได้มากมายหลายชนิดและในวงการแพทย์ จึงกล่าวได้ว่าการใช้ประโยชน์จากมันสำปะหลังแยกได้ 3 ประเภท คือ บริโภคโดยตรง แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (มันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมัน) และแป้งมันสำปะหลังแปรรูป (ทางเคมีและกายภาพใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมต่างๆ) [9]

2.3.3.2 การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบประกอบในอุตสาหกรรม

1. อุตสาหกรรมมันเส้น

การแปรรูปที่ใกล้ตัวมากที่สุด คือ การทำมันเส้น เมื่อเก็บเกี่ยวหัวมันสดแล้วก็จะนำส่งลานมัน ซึ่งเกษตรกรบางรายมีลานของตัวเองก็จะทำการแปรรูปโดยใช้เครื่องตัดหัวมันเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปตากบนลานซีเมนต์ เมื่อแห้งดีแล้วก็ทำการเก็บเพื่อส่งขายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ หรือ อุตสาหกรรมสัตว์หรืออุตสาหกรรมมันอัดเม็ดต่อไป ปกติ 2.5 กิโลกรัม จะผลิตเป็นมันเส้นได้ 1 กิโลกรัม มันเส้น (chip) ได้จากการนำหัวมันสำปะหลังสดหั่นให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปตากแดดบนลานซีเมนต์ 2-3 วัน ให้แห้ง ดังขั้นตอนดังนี้

- ก. ทำความสะอาดสิ่งเจือปนที่ติดมากับหัวมัน
- ข. นำหัวมันที่สะอาดแล้วใส่เครื่องป้อน (กรณีที่ใช้เครื่องป้อน) หรือใส่เครื่องตัดหรือมีดหั่นเป็นชิ้น
- ค. นำชิ้นหัวมันที่หั่นแล้วไปตากแดดบนลานคอนกรีต (ลานตาก) หรือพื้นที่ปูด้วยวัสดุ เช่น เสื่อ ตะแกรง ไม้ไผ่ เป็นต้น
- ง. ระหว่างการตากแดดจะต้องใช้คราดกลับมันเส้นทุก ๆ 1-2 ชั่วโมง อาจใช้คนงานหรือรถแทรกเตอร์ก็ได้ เมื่อมันเส้นแห้งดีแล้วจึงส่งขายต่อไป

2. อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด

มันอัดเม็ดหรือที่เรียกว่า มันเม็ด ผลิตโดยการอัดมันเส้น โดยเครื่องอัดภายใต้สภาวะ ความร้อนและความดัน หลังจากอัดแล้วจะมีลักษณะเป็นท่อนยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ความชื้นประมาณร้อยละ 14 ซึ่งจะส่งออกไปต่างประเทศ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์ เนื่องจากมันเม็ดจะมีปริมาณแป้งสูง (มากกว่าร้อยละ 65) จึงใช้เป็นแหล่งอาหารให้พลังงานของสัตว์ และมันเม็ดสามารถส่งได้ตลอดทั้งปีและราคาไม่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผลิตผลของธัญพืชต่างๆ ดังนั้น หลายประเทศจึงนิยมใช้มันเม็ดของไทยในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ มันเม็ดจึงมีปริมาณการส่งออกประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ข้อได้เปรียบที่สำคัญของมันเม็ด คือ สามารถขนส่งได้ง่าย (ไม่มีฝุ่นเหมือนมันเส้น) ขนย้ายได้สะดวก สามารถใช้เครื่องจักรในการขนส่งได้ เช่นเดียวกับเมล็ดธัญพืชต่าง ๆ

3. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ในบรรดาประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมากๆ เช่น บราซิล ไนจีเรีย อินโดนีเซียและไทย เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุดถือได้ว่าเป็นผู้ผลิต แป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลกโดยมีกำลังความสามารถการผลิตมากกว่า 2 ล้านตัน มันสำปะหลังต่อปีมีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสูงที่สุดในบรรดาทุก ๆ ประเทศและได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ประเทศเพื่อนบ้าน แป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็น “แป้งไทย” เป็นแป้งที่มีคุณภาพสูงและราคาถูกที่สุด

4. อุตสาหกรรมอื่นๆ

- อุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอจำเป็นต้องใช้แป้งมันสำปะหลัง โดยด้ายที่ใช้ทอผ้าต้องผ่านการชุบแป้งเสียก่อน ด้ายจึงจะลื่นและเรียบไม่มีขน และเป็นตัวหล่อลื่นไม่ให้เส้นด้ายติดกันระหว่างการเคลื่อนที่ของทูกทอผ้า นอกจากนี้ในขั้นตอนการพิมพ์ลายผ้า แป้งจะช่วยทำให้พิมพ์ลายได้สม่ำเสมอ การใช้แป้งมันสำปะหลังในการทอผ้านั้น บางโรงงานยังใช้แป้งเคมี (modified starch) ที่สั่งเข้ามาจากต่างประเทศ เพราะมีสมบัติเหมาะสมกว่า แต่อย่างไรก็ตามมีโรงงานในประเทศที่เริ่มผลิตแป้งเคมีจากแป้งมันสำปะหลังขึ้นแล้ว

- อุตสาหกรรมไม้อัด

แป้งมันสำปะหลังถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมไม้อัด เนื่องจากลักษณะการผลิตไม้อัด คือ การนำไม้มาประกบติดกันโดยใช้กาว ซึ่งแป้งมันก็ถูกนำมาเป็นส่วนผสมในการทำกาว เพราะแป้งมันมีคุณสมบัติเป็นกาวอยู่แล้ว เพื่อให้ไม้อัดติดกันเป็นแผ่นหนาแข็งแรงและทนทาน นอกจากนี้การใช้แป้งเป็นส่วนผสมยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตกาว เพราะกาวที่ผลิตได้นั้นใช้แป้งเป็นส่วนผสม

ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และแป้งมันสำปะหลังยังมีคุณสมบัติพิเศษกว่าแป้งประเภทอื่นๆ คือ เนื้อแป้งมีความละเอียด ทำให้ไม่มีการตกตะกอนเมื่อนำมาใช้ผสมทำกาว นอกจากนี้ราคายังถูกกว่าด้วย

- อุตสาหกรรมกระดาษ

การทำกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่างๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ และไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็ก ๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวด้วยการจากแป้งทำให้กระดาษเรียบ และยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษ ช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึกเวลาเขียนด้วยน้ำหมึกหรือพิมพ์สี นอกจากนี้กาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น

- อุตสาหกรรมกาว

แป้งมันมีสมบัติพิเศษ คือ เมื่อถูกความร้อน หรือถูกสารเคมีจะมีความเหนียว และมีสมบัติสามารถรักษาสภาพความเหนียวได้เหมือนเดิมไม่มีการคืนตัว แป้งมันที่จะใช้ทำกาวจะต้องเป็นแป้งบริสุทธิ์ มีความเป็นกรดต่ำ ซึ่งก็คือ แป้งประเภทเด็กชทริน กาวเหล่านี้ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการผลิตของจดหมาย สติกเกอร์ gummed paper และ gummed tape

- อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม

สมบัติสำคัญของแป้ง คือ เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต แต่มีสมบัติอื่นที่ทำให้แป้งมันสำปะหลังเข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร คือ เป็นตัวช่วยทำให้เกิดความข้น (thickner) ในอาหาร ช่วยให้อาหารเกิดความคงตัว (stabilizer) ช่วยให้อาหารเกาะตัวกันดีขึ้น (binder) และช่วยในการเสริมแต่ง (filler) นอกจากนี้ แป้งยังเป็นสิ่งที่หาได้ง่ายและราคาค่อนข้างถูก

- อุตสาหกรรมกรดมะนาว

ใช้ผลิตกรดมะนาวซึ่งเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม ได้แก่ น้ำอัดลม น้ำผลไม้ กระป๋อง เครื่องดื่มชูกำลัง และใช้ในอุตสาหกรรมยา

- อุตสาหกรรมผงชูรส

เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตผงชูรส ซึ่งนิยมบริโภคกันทั่วไป

- ยารักษาโรค

ใช้เป็นตัวเจือจางในยาประเภทแคปซูลและยาเม็ด

- อุตสาหกรรมอาหารสัตว์

ใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์หลากหลายชนิด เช่น โค สุกร เป็ด ไก่ เป็นต้น

- เอทานอล (การผลิตเอทานอล)

แป้งในมันสำปะหลังสามารถเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ชนิดที่เรียกว่า เอทานอล (ethanol) ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินในอัตรา 10-20 : 90-80 ส่วนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง

สำหรับรถยนต์ที่เรียกว่า ก๊าซโซฮอลล์ (gasohol) จะช่วยให้ประเทศไทยสามารถลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้และยังช่วยลดมลภาวะเป็นพิษของบรรยากาศได้อีก [12]



รูปที่ 2.7 แผนผังแสดงประโยชน์ของมันสำปะหลัง [9]

2.3.4 แป้งมันสำปะหลังแปรรูป

เนื่องจากแป้งมันสำปะหลัง (native starch) มีสมบัติบางประการที่ไม่ตรงกับความต้องการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าบางชนิด เช่น ในการผลิตกระดาษ แป้งมันสำปะหลังจะเหนียวเกินกว่าที่เครื่องเคลือบจะทำงานได้หรือหากนำน้ำแป้งไปเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้ น้ำที่ผสมอยู่แยกจากตัวแป้ง ทำให้ไม่เหมาะสมกับการทำน้ำสลัด ดังนั้น จึงได้มีความพยายามในการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในรูปแบบแปรรูป (modified starch) โดยการนำแป้งมาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของแป้งและทำให้แป้งมีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ การแปรรูปแป้งมันในประเทศไทยขณะนี้ใช้อยู่ 3 วิธี คือ

1. วิธี Degradation หรือ Conversion คือ การทำให้ความเหนียวของแป้งลดลง ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้ โดยมีชื่อเรียกว่า Acid Conversion คือ การนำแป้งมาเติมกรดเกลือและกรดกำมะถัน

เพื่อให้ความเหนียวของแป้งลดลง และสามารถคงรูปเจล (gel) ได้โดยการทำให้เย็น แป้งที่ได้เรียกว่า acid modified starch

2. วิธี Pregelatinization คือ การนำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 40-50 เกลงบนผิวถึงร้อน แป้งจะแห้งและสุกเป็นแผ่นบาง ๆ จากนั้นนำแผ่นแป้งไปอบผ่านตะแกรงเป็นแป้งอีกครั้ง แป้งที่ได้นี้จะมีคุณสมบัติเป็นกาวทันทีเมื่อถูกน้ำเย็น จึงมีชื่อเรียกว่า Cold Water Soluble starch (CWS) หรือ แป้งอัลฟา (alpha starch) หรือแป้งที่แปรรูปโดยกระบวนการทางกายภาพ (physically modified หรือ converted starch) ซึ่งแป้งที่ได้นี้จะสุก 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำไปใช้ในงานที่ไม่ต้องใช้ความร้อนในการทำให้เป็นกาวได้

3. วิธี Derivatives คือ การใช้สารเคมีในการเปลี่ยนโมเลกุลหรือสมบัติของแป้งจากวิธีนี้จะได้ แป้งแปรรูป 2 ประเภท คือ

3.1 Starch ester เช่น

- Acetylated starch ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร กระจกและกาว
- Phosphoric acid ester ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

3.2 Starch ether เช่น

- Carboxymethyl ether, hydroxyethylated starch, hydropropylated starch และ cationic starch แป้งกลุ่มนี้ทนความเย็นได้ดีกว่า และมีราคาแพงกว่า ester
- Cross-linked starch ใช้ในขั้นตอนสุดท้ายของการแปรรูปอาหารเพื่อให้แป้งคงทนต่อภาวะกรดต่างชนิดปกติ แรงกวนและความร้อน

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิต pregelatinized starch หรือแป้งที่แปรรูปโดยกระบวนการทางกายภาพ หรือแป้งอัลฟา (alpha starch) ประมาณ 60,000 ตันต่อปี มีบริษัทผู้ผลิต 2 บริษัท แป้งอัลฟาที่ผลิตได้จะส่งออกไปยังได้หัวนเพื่อทำอาหารปลาไหลเกือบทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามแป้งอัลฟานี้มีความเป็นไปได้ทางเทคนิคที่จะใช้เป็นส่วนประกอบในการทำไอศกรีม (ประเทศเกาหลีนิยมใช้) ยากันยุง น้ำซูป และกาวสำหรับกระดาษลูกฟูก

ดังนั้น การผลิตแป้งแปรรูปจึงเป็นมิติใหม่ของอุตสาหกรรมแป้งไทย เพราะได้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเทคโนโลยีที่สำคัญจากกระบวนการผลิต ที่อาศัยเครื่องจักรกล แม้การผลิตแป้งมันจะมีการใช้สารเคมีบ้างแต่ก็ไม่มาก ต่อมาเมื่อมีการผลิตแป้งแปรรูป ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการทางเคมี กระบวนการผลิตจึงมีความยุ่งยากขึ้น จำเป็นต้องอาศัยความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มากขึ้น เพราะการผลิตแป้งแปรรูปต่างจากการผลิตแป้งมัน คือ มีมาตรฐานอุตสาหกรรม (industrial specification) ที่ชัดเจน ผลิตภัณฑ์ต้องมีคุณภาพที่เที่ยงตรงสม่ำเสมอ [11]

2.4 พอลิเมอร์ผสม (polymer blend)

พอลิเมอร์ผสมเป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือปรับปรุงแก้ไขสมบัติที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิมซึ่งไม่สามารถใช้สารเติมแต่ง (additives) ในการปรับปรุงสมบัติเหล่านั้นได้ โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจในการนำพอลิเมอร์มาผสมกันมากขึ้นและมีการผลิตเป็นการค้าออกมาอย่างกว้างขวาง

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้ได้สมบัติที่ต้องการของพอลิเมอร์ผสมคือ วิธีการผสมเครื่องมือและเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม [13]

2.4.1 วัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสม

- เพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นและมีราคาที่ถูกลง
- เพื่อปรับปรุงให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ
- เพื่อทำให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น
- เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของส่วนผสมตามที่ถูกค่าต้องการ
- เพื่อสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่น การนำเศษพลาสติกหลายๆชนิดกลับมาขึ้นรูปได้ใหม่

ในการเลือกพอลิเมอร์ที่จะนำมาผสมกันนั้น ควรที่จะคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้

2.4.2 คำจำกัดความเกี่ยวกับพอลิเมอร์ผสม

- พอลิเมอร์ผสม คือ พอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์รวมอย่างน้อย 2 ชนิดขึ้นไป [14]

- พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวิญญภาคเดียว (miscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันไปจนถึงระดับโมเลกุลซึ่งมีพลังงานอิสระของการผสม (free energy of mixing) ต่ำกว่าศูนย์

- พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากันมีหลายวิญญภาค (immiscible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่มีพลังงานอิสระของการผสมมากกว่าศูนย์

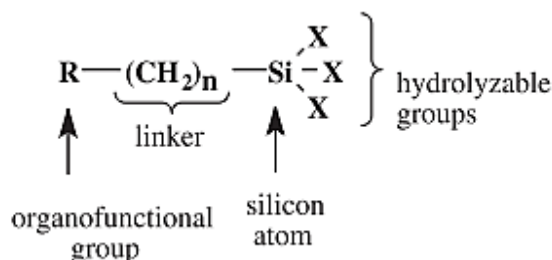
- พอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันได้ (compatible polymer blend) คือ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวิญญภาคเดียวแต่มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ของพอลิเมอร์ผสมดีโดยไม่คำนึงถึงพลังงานอิสระของการผสม

- กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ผสมให้เข้ากันได้ (compatibilization) คือ วิธีที่ใช้ในการดัดแปรผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียว โดยการเติมพอลิเมอร์ร่วมหรือสารดัดแปรพื้นผิวเพื่อให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

- สารช่วยผสม (compatibilizer) คือ พอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมซึ่งใช้ในการเติมในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นวัฏภาคเดียว เพื่อดัดแปรพื้นผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมทำให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

2.5 ออร์แกโนไซเลน (organosilanes)

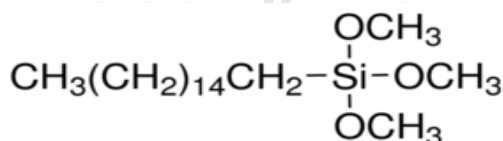
ออร์แกโนไซเลนจัดเป็นสารคู่ควบที่นิยมใช้กันมานาน มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปทางเคมีของออร์แกโนไซเลน [15]

โดยทั่วไปแล้วออร์แกโนไซเลนจะถูกนำไปปรับใช้เป็นตัวประสานในสารยึดติด โดยหมู่ไซเลนจะเข้าไปปรับปรุงแก้ไขพลังงานพื้นผิว (surface energy) หรือความสามารถในการเปียก (wettability) ของสารตั้งต้นในสภาวะปกติให้มีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกหรือไฮโดรฟิลิกได้ตามความต้องการ [16]

2.5.1 เฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน [17]

สมบัติ [18]

IUPAC name : Hexadecyltrimethoxysilane

ชื่ออื่น : Trimethoxyhexadecylsilane

CAS : 16415-12-6

สูตรโมเลกุล : C₁₉H₄₂O₃Si

น้ำหนักโมเลกุล : 346.62 g/mol

ลักษณะ

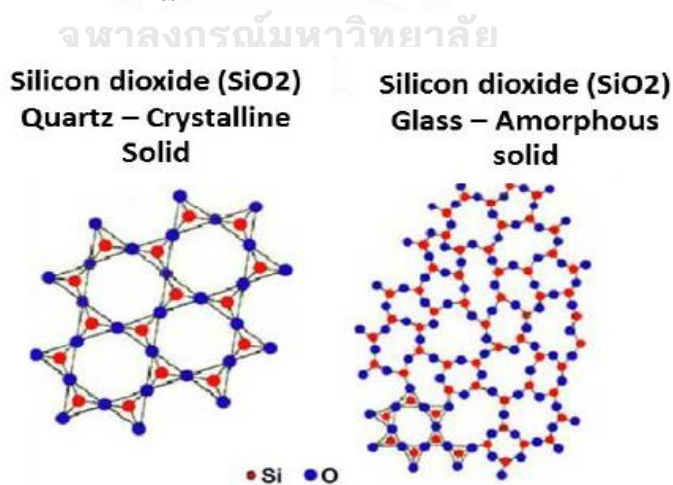
ทางกายภาพ	: ของเหลว
สี	: ไม่มีสี
การละลาย	: ไม่ละลายน้ำ
จุดเดือด	: 180 °C at 100 hPa
จุดวาบไฟ (ระบบปิด)	: 165 °C
ความหนาแน่น	: 0.89 g/cm ³ at 20 °C

การประยุกต์ใช้งาน

- ใช้ปรับปรุงตัวเติมทางธรรมชาติ (mineral filler) และผงสี (pigments) หรือพื้นผิวอนินทรีย์โดยทั่วไป เช่น ATH, MDH เป็นต้น
- ใช้ปรับปรุงสารประกอบที่ได้ให้มีลักษณะเฉพาะ เช่น มีการแพร่กระจายตัวที่ดีขึ้น, สามารถใส่ตัวเติมได้ในปริมาณที่มากขึ้น, ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดียิ่งขึ้น, ลดการดูดซับน้ำ เป็นต้น

2.6 อนุภาคนาโนซิลิกา

ซิลิกอนไดออกไซด์ หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า ซิลิกา สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติและ การสังเคราะห์ขึ้น โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็น O=Si=O ซิลิกาจะปรากฏอยู่ในสถานะรูปผลึก และมัก อยู่ในรูปของควอตซ์ ทั้งนี้รูปร่างทางกายภาพของซิลิกาแบ่งได้เป็นสามแบบ คือ ผลึก (crystalline) ออสัณฐาน (amorphous) และออสัณฐานสังเคราะห์ (synthetic amorphous) [19]



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคนาโนซิลิกา [20]

2.6.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา

วัสดุอนุภาคนาโนซิลิกาโดยทั่วไปแล้วมีรูปเป็นอสัณฐานสังเคราะห์ หรือที่เรียกว่า synthetic amorphous silica หรือ SAS โดยได้มาจากการสังเคราะห์ 3 วิธี คือ

1. วิธีการให้ความร้อน (thermal route) โดยมาจากการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการไฮโดรลิซิส ในสถานะก๊าซของสารคลอโรซิลเลน (chlorosilanes) ภายใต้เปลวไฟของออกซิเจนหรือไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส

2. วิธีเปียก (wet route) โดยการตกตะกอนของซิลิกา และซิลิกาเจล (หรือ ซิลิกาแอโรเจล) ซึ่งเกิดจากการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และเกิดการตกตะกอนของ SAS จากสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยซิลิกาที่ได้จะอยู่ในรูปอสัณฐาน

3. วิธีซิลิกาโซล (silica sols) หรือที่เรียกว่า colloidal silica โดยซิลิกาโซลเป็นซิลิกา SAS ที่กระจายตัวในของเหลว โดยทั่วไป คือ น้ำ โดยโซลนี้เกิดจากการไฮโดรลิซิสของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride) ในน้ำ หรือในสารละลายที่เป็น polymerization ของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

วิธีการที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ซิลิกา คือ วิธีเปียก (ตกตะกอน) และวิธีให้ความร้อนโดย synthetic amorphous silica ที่ได้จากสองวิธีนี้จะมีลักษณะสมบัติที่ต่างกันจึงมีรหัสของ CAS No. ที่แตกต่างกัน (CAS No 112926-00-8 และ 112945-52-5 ตามลำดับ) [21] ซิลิกาในรูป amorphous silica จะมีขนาดเล็กในช่วง 100 -1000 นาโนเมตรและมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มจึงเป็นที่รู้จักในนามของ อนุภาคนาโนซิลิกา (silica nanoparticles, SNPs) [22] ในปัจจุบันได้มีการผลิตให้ SAS มีขนาดเล็กมากขึ้น โดยขนาดของอนุภาคนาโนซิลิกาในปัจจุบันมีขนาดเล็กถึง 10-25 นาโนเมตร การสังเคราะห์ด้วยการให้ความร้อนทำให้สามารถผลิตอนุภาคนาโนซิลิกาได้เล็กถึง 2 นาโนเมตร ขนาดของรูพรุนของนาโนซิลิกามักอยู่ในช่วง mesopores ซึ่งมีขนาดประมาณ 2-50 นาโนเมตร หรืออาจอยู่ในรูปไม่มีรูพรุนได้ [23]

อนุภาคนาโนซิลิกาไม่ละลายน้ำ เมื่อปรากฏในน้ำจะอยู่ในรูป $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ โดยลักษณะพื้นผิวของซิลิกาจะเป็นลักษณะชอบน้ำ (hydrophilicity) ซึ่งลักษณะสมบัตินี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของกลุ่มไฮดรอกซิลที่มีพันธะกับซิลิกอน หรือที่เรียกว่ากลุ่ม silanols ในอนุภาคนาโนซิลิกา ซึ่งกลุ่มนี้จะทำให้เกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี ซึ่งลักษณะสมบัตินี้ได้ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ [24]

2.6.2 ประโยชน์ของอนุภาคนาโนซิลิกา

ปัจจุบันซิลิกามีบทบาทสำคัญทั้งในอุตสาหกรรม และการศึกษารวิจัยเป็นอย่างมาก โดยมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายแขนง เช่น

- อุตสาหกรรมยาง

ซิลิกาสามารถใช้เป็นสารเสริมแรงที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมยาง เพราะการเติมตัวเติมลงไปนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางให้ดีขึ้นโดยเฉพาะค่าความแข็ง (hardness) โมดูลัส (modulus) ความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนการฉีกขาด (tear strength) และความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) เป็นต้น โดยซิลิกาที่นิยมใช้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร (nm) ซิลิกาจะไม่อยู่โดดเดี่ยวในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า แอกริเกต (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างการกวนผสม ปัจจุบันซิลิกาที่นิยมใช้เป็นตัวเติมในยางคือ ซิลิกาในรูปคอลลอยด์ (colloidal silica) หรือ ปริซิพิเตตซิลิกา (precipitate silica) สามารถแบ่งได้หลายเกรด ซิลิกาแต่ละเกรดจะแตกต่างกันตามขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle size) หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) โดยทั่วไป ซิลิกาอนุภาคปฐมภูมิเล็กหรือพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะช่วยเสริมแรงได้ดีกว่าอนุภาคใหญ่

- อุตสาหกรรมซีเมนต์

การใช้ประโยชน์จากซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มเติม (additive) เพื่อให้คอนกรีตคุณภาพสูง หรือคอนกรีตไหลเข้าแบบได้ด้วยตนเอง ซึ่งการใช้ซิลิกาขนาดนาโนทำให้คอนกรีตที่ยังไม่แข็งตัวมีความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น และยังเพิ่มกำลังอัดประลัยให้กับคอนกรีตอีกด้วย กำลังอัดและกำลังดึงของมอร์ตาร์ที่ผสมอนุภาคระดับนาโนข้างต้นมีค่าเพิ่มขึ้นหรือการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตน้อยลง เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนมีการกระจายตัวดีขึ้นในส่วนผสมเพิ่มความหนืดของของเหลวในมอร์ตาร์ เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้เม็ดปูนซีเมนต์และมวลรวมสามารถลอยอยู่ในของเหลวในระหว่างที่เป็นมอร์ตาร์สดได้ [25]

- อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ใช้เป็นตัวเติมในเครื่องสำอาง

- อุตสาหกรรมสี

ใช้เติมในสีเพื่อเพิ่มความเหนียวข้น

- อุตสาหกรรมยา

ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในด้านทันตกรรม ใช้งานในระบบนำส่งยา เช่น ใช้บรรจุยา เปปไทด์ โปรตีน ริงส์ นิวเคลียร์ เป็นต้น [26]

2.7 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (อังกฤษ: biodegradable plastic หรือ compostable plastic) มักเรียกว่า พลาสติกชีวภาพ เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ จึงทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น สามารถวัดได้โดยวิธีการทดสอบมาตรฐาน ซึ่งวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

ตลอดศตวรรษที่ผ่านมา มนุษย์ได้พบถึงข้อจำกัดด้านปริมาณของวัตถุดิบน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งประมาณการได้ว่าจะต้องหมดไปในที่สุด นอกจากนี้ในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยเฉพาะการเผาไหม้ยังก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะ ซึ่งได้ขยายไปในวงกว้างต่อระบบนิเวศของโลก ทำให้การคิดค้นและพัฒนากระบวนการใหม่ รวมถึงการสร้างนวัตกรรมเพื่อผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีอย่างครบวงจรภายในเวลาอันรวดเร็ว เป็นสิ่งหนึ่งที่ทุกประเทศจำเป็นต้องพัฒนา ทั้งนี้นอกจากจะหมายถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมที่ดีของประเทศของตนแล้วยังหมายถึงการเพิ่มศักยภาพและโอกาสในการแข่งขันอันจะเชื่อมโยงไปสู่ความเป็นผู้นำด้านเศรษฐกิจการค้าระหว่างประเทศอีกด้วย

พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (biodegradable plastic) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลก โดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ นั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ ภายหลังจากการใช้งานโดยพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้นั้นจะมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่าพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (commodity plastics) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้

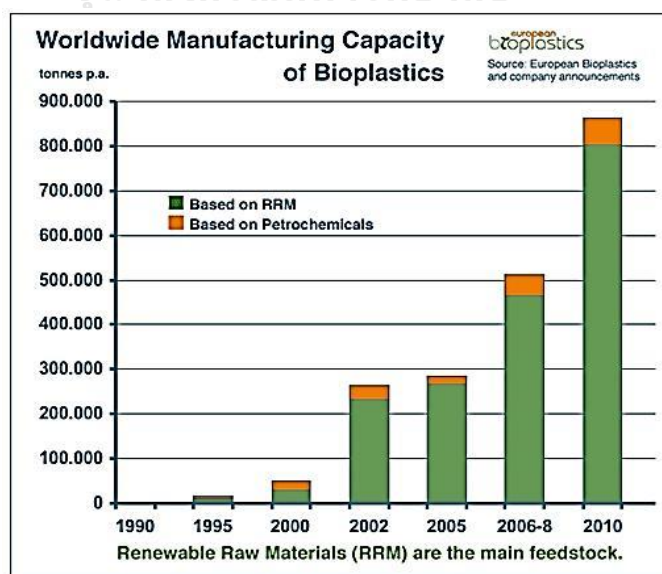
คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตาม ASTM D6400-99 หมายถึง พลาสติกที่ย่อยสลายได้อันเนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย [27]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งสามารถแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics)
2. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio-based biodegradable plastics) [28]

แนวโน้มการใช้และการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

จากกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติและความสะดวกต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะปัญหาภาวะโลกร้อนที่ทั่วโลกกำลังเผชิญร่วมกัน ส่งผลให้ความต้องการผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในตลาดโลกมีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นมาก โดยมีปริมาณความต้องการใช้ทั่วโลกในปี 2550-2551 สูงถึง 500,000 ตันต่อปีและมีอัตราการเจริญเติบโตถึงร้อยละ 70 เทียบกับปี 2548 โดยเฉพาะตลาดสำคัญซึ่งมีปริมาณการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้คาดการณ์ว่า ตลาดสหภาพยุโรปมีแนวโน้มปริมาณการใช้พลาสติกชีวภาพ 40,000-50,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 20) ส่วนสหรัฐอเมริกามีปริมาณความต้องการใช้ 70,000-80,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 16) และตลาดญี่ปุ่น มีปริมาณความต้องการใช้ 15,000 ตันต่อปี (ขยายตัวร้อยละ 100)



รูปที่ 2.11 รูปแสดงแนวโน้มการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของโลก [29]

สำหรับประเทศไทย มีความพร้อมในด้านวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่การพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ยังอยู่ในระดับบุกเบิกและการเริ่มสร้างเทคโนโลยีใหม่ ขณะนี้มีนักวิจัยในหลายมหาวิทยาลัยทั่วประเทศให้ความสนใจและกำลังศึกษาวิจัยด้านนี้ทั้งเรื่องของเทคโนโลยีการเตรียมวัตถุดิบทางการเกษตรรวมทั้งงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีทางชีวภาพ และเทคโนโลยีในการผลิตและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ขณะเดียวกันมีผู้ประกอบการหลายรายของไทยหันมาลงทุนในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพบ้างแล้ว แต่ยังคงนำเข้าเม็ดพลาสติกชีวภาพจากต่างประเทศทำให้ต้นทุนสูงกว่าพลาสติกทั่วไป 3-4 เท่า ผู้บริโภคจึงมีอยู่ในวงจำกัด [29]

ในปัจจุบันความต้องการของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มมีมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่สะดวกและมีราคาไม่แพงนัก โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์พลาสติกจำพวกพอลิเอทิลีนที่มีอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์สั้นมากและมีการทิ้งในปริมาณทวีคูณ จึงเกิดเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวิธีการที่จะแก้ปัญหาอย่างสมบูรณ์ คือ การหาวัตถุดิบพลาสติกจำพวกที่มีการย่อยสลายได้ [30]

ประเทศที่มีเทคโนโลยีด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทั้งสหรัฐอเมริกาและกลุ่มประเทศยุโรป โดยเฉพาะเยอรมนี อิตาลี และฝรั่งเศส เป็นผู้ดำเนินการกำหนดทิศทางการใช้สินค้าจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และพัฒนารูปแบบไปสู่กฎหมายหรือแผนปฏิบัติการระหว่างประเทศที่ทำให้เกิดอำนาจต่อรองด้านธุรกิจการค้าในเวทีโลก ทำให้เกิดความตื่นตัวด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในประเทศต่างๆ ทั่วโลก และเร่งสร้างผลิตภัณฑ์เพื่อทดแทนพลาสติกทั่วไป

ซึ่งปัจจุบันเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมมากเนื่องจากผลิตจากพืช หรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้โดยอาศัยกระบวนการหมักซึ่งใช้พลังงานต่ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเมื่อฝังกลบภายหลังการใช้งาน ด้วยคุณลักษณะและสมบัติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงการกำจัดนี้เองที่ทำให้พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้กลายเป็นวัสดุแห่งอนาคต [31]

2.7.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- การย่อยสลายได้โดยแสง (photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง

เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนาмаกบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

- การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

- การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจน และความชื้น แสงยูวี หรือแรงทางกล เป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความชื้นจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

- การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolytic degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอสไตรด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์

(non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลน์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

- การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

นอกจากนี้ ยังพบว่ามีการใช้คำว่าพลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastics, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ด่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงจากดวงอาทิตย์ แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี กลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอนินทรีย์ และมวลชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายโดยการย่อยสลายและการดูดซึมนี้อาจเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมในสภาวะแวดล้อม และคำว่า พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (environmental friendly plastics) หรือพลาสติกสีเขียว (green plastics) หมายถึง พลาสติกที่ทำให้ภาระในการจัดการขยะลดลง และส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน [32]

2.7.2 วิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

1. การสังเกตลักษณะที่ปรากฏ [33]

ลักษณะของพอลิเมอร์ที่สามารถสังเกตได้ หลังผ่านการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น พื้นผิวพลาสติกมีความขรุขระ เกิดรูหรือรอยฉีกขาด บางส่วนมีการแตกหักเกิดขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านสี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถศึกษาได้โดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) เพื่อศึกษาลักษณะบนพื้นผิว เป็นต้น

2. การวัดน้ำหนักที่หายไป

การวัดหาค่าน้ำหนักที่หายไปเป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยถูกต้องมากนัก โดยเฉพาะเมื่อพอลิเมอร์ถูกเก็บไว้ในแหล่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเวลานาน และมีกลุ่มจุลินทรีย์สะสมอยู่ภายในเนื้อของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่วัดได้สูงเกินจริง วิธีการทดสอบนี้ไม่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซึมน้ำได้โดยเฉพาะกลุ่มที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือ การย่อยสลายโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ น้ำหนักที่หายไปจึงเป็นส่วนโดยตรงกับพื้นผิว ดังนั้น เพื่อความถูกต้องในการทดลอง จึงควรรายงานผลของอัตราส่วนของน้ำหนักที่หายไปต่อพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ที่ทดสอบมากกว่าหาค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์เท่านั้น

3. การเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล

การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพอลิเมอร์ สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้การวิเคราะห์อื่นๆ เช่น ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA) วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) เป็นต้น

4. การวัดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์/วัดปริมาตรการใช้ก๊าซออกซิเจน

การวัดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นวิธีการวัดอัตราการย่อยสลายของพอลิเมอร์โดยตรง เนื่องจากจุลินทรีย์จะนำก๊าซออกซิเจนไปใช้ในกระบวนการเมทาบอลิซึมและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา แต่วิธีดังกล่าวจำเป็นต้องมีการศึกษาขั้นตอนและกลไกการย่อยสลาย และไม่ควรทำการทดลองที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่นานเกินไป เพราะมวลชีวภาพและสารระหว่างกลางจะถูกย่อยสลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และทำให้ได้ปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง

5. การติดตามด้วยธาตุไอโซตอปกัมมันตรังสี

ในการทดสอบจะใช้พอลิเมอร์ที่ติดธาตุไอโซโทปกัมมันตรังสี (radiolabelled polymer) ที่มี ^{14}C เป็นวัสดุสำหรับการทดสอบ เมื่อสิ้นสุดการทดสอบจะทำการคำนวณปริมาณคาร์บอนในพอลิเมอร์เทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนในชีวมวล แต่วัสดุที่ใช้ในการทดสอบมีราคาที่สูง จึงส่งผลทำให้วิธีดังกล่าวไม่ค่อยได้รับความนิยม

6. การทดสอบเคลียร์โซน

การทดสอบนี้จัดเป็นวิธีการที่ง่าย โดยจะใช้อาหารวุ้นแข็งที่มีพอลิเมอร์ที่ต้องการทดสอบผสมอยู่ เมื่อทำการเพาะเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปหากเกิดเป็นวงใสรอบโคโลนี เป็นการบ่งชี้ได้ว่าเกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

7. การทดสอบโดยการหมัก

การทดสอบจะทำการฝังพอลิเมอร์หลายชิ้นงานที่มีขนาดเท่ากันลงในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร ในสภาวะที่ควบคุมและทำการรดน้ำทุกวันในระยะเวลาที่กำหนด

2.7.3 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

1. การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวนั่งเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาอย่างช้าๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับ การออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2. สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

3. फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยา

ปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุที่เก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุง หรือ กระดาษสำหรับเพาะต้นกล้า

4. ถุงสำหรับใส่ของ (shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำกลับมา รีไซเคิลมากนักเนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่าย ในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการ นำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไปเพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

5. ฟิล์ม และถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (food waste film and bags)

ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับ สถานที่ ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดความสะอาด ไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้ถุงพลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิต ถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ตันต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

6. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (consumer packaging materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้าน บรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้ได้รับความนิยม นำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับ อาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการ ขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

7. โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้ อย่างสะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและ ใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบ

มาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว [34]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lv และคณะ [35] ได้ศึกษาการผสมพอลิแล็กติกแอซิดและอนุภาคนาโนซิลิกา โดยการทำให้ surface grafting modification ไปบนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกาด้วย 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane; KH-560 พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดและอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ทำการดัดแปรพื้นผิวด้วย KH-560 ในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 1 มีความเข้ากันได้เป็นอย่างดี อนุภาคนาโนซิลิกามีการกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ฟิล์มพอลิแล็กติกแอซิดที่ใส่อนุภาคนาโนซิลิกาที่ดัดแปรด้วย KH-560 ในปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 1 ฟิล์มมีความโปร่งแสงและเมื่อทำการวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเชิงความร้อนและสมบัติหน่วงการติดไฟ พบว่า อนุภาคนาโนซิลิกามีความสามารถในการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและหน่วงการติดไฟรวมทั้งเพิ่มสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด

Lai และคณะ [36] ได้ศึกษาการผสมพอลิแล็กติกแอซิดและอนุภาคนาโนซิลิกา โดยได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาด้วยการใช้ polyethylene glycol methyl ether (PEGME-Silica) ลงในพอลิแล็กติกแอซิด พบว่า ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิด/PEGME-silica มีค่าความทนแรงดึงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด/ซิลิกาที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง ในขณะที่เดียวกันชิ้นงานที่ใส่ซิลิกาที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิว จะพบการเกาะกลุ่มรวมกันเป็นก้อนจำนวนมากและไม่กระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดเมทริกซ์

Marra และคณะ [37] ได้ศึกษาการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีสเปรย์สเกลไพโรลิซิส (spray scale pyrolysis) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของพอลิแล็กติกแอซิด เช่น สมบัติเชิงกล, สมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซ และช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อแบคทีเรีย (Escherichia Coli ชนิดแกรมลบ) โดยเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ แล้วนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม พบว่า อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวฟิล์ม ส่งผลให้มีการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง และเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ถึงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ยังสัมผัสคุณสมบัติเพิ่มมากขึ้นทั้งทิศทางตามแนวเครื่องและขนานเครื่อง อีกทั้งมีสมบัติในการช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตเชื้อแบคทีเรียหลังจาก 24 ชั่วโมงผ่านไป

Jalalvandi และคณะ [38] เตรียมพอลิแล็กติกแอซิด, แป้งมันสำปะหลัง, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากนั้นนำเข้าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ชนิดหมุนสวนทางกัน แล้วนำเรซินที่ได้ไปทำการอัดออกมาเป็นแผ่นและนำไปทดสอบ พบว่า ปริมาณอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ส่งผลต่อสมบัติของสารประกอบ โดยผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาควัสดุของแข็งระดับนาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ต่ำมีการกระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้สอดคล้องกับผลการทดสอบยังสัมดูลัส พบว่า เมื่อใส่อนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณต่ำส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความแข็งแรงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ผลการทดสอบความทนแรงดึง พบว่า การใส่อนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิแล็กติกแอซิด/สตาร์ชเมทริกซ์ในปริมาณที่มากขึ้นมีส่วนช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มการดึงยืดที่มากขึ้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนสัมพันธ์กับการเกิดรวมตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการแบ่งชั้นกันระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด/สตาร์ชเมทริกซ์และอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักได้ง่าย ทางด้านการย่อยสลายทางชีวภาพในดิน พบว่า การใส่อนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ ส่งผลให้มีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปขัดขวางความต่อเนื่องกันของพอลิแล็กติกแอซิด/สตาร์ชเมทริกซ์ และจากการทดสอบการดูดซึมน้ำ พบว่า อนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปขวางกั้นทางเดินน้ำที่จะเข้าหาสายโซ่สตาร์ช ส่งผลให้ลดปริมาณน้ำที่จะเข้ามา ดังนั้น จึงช่วยเพิ่มสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านทางกายภาพของชิ้นงานได้อีกด้วย

Huang และคณะ [39] เตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพด และศึกษาถึงปริมาณอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่แตกต่างกัน พบว่า การเติมอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนและการดูดซึมน้ำ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆได้เป็นอย่างมาก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) Ingeo™ biopolymer เกรด 4043D (NatureWorks) ซึ่งแสดงข้อมูลดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูล PLA เกรด 4043D

Safety data sheet	
Product name	Ingeo™ biopolymer
Product code	4043 D
CAS Number	9051-89-2
Physical state	Solid
Appearance	Clear, translucent, opaque, pellets
Color	Clear translucent opaque
Odor	Sweet
Density	1.25
Melting point, T_m (°C)	145 – 160
Glass transition temperature, T_g (°C)	55 – 60
Autoignition temperature (°C)	388
Water solubility	Insoluble
Incompatible materials	- Oxidizing agents - Strong bases

ที่มา: NatureWorks LLC

2. สตาร์ช (แป้งมันสำปะหลัง) ตรา ปลาไทย 5 ดาว บริษัท อีทีซี อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด องค์กรประกอบของแป้งมันสำปะหลัง แสดงดังตารางที่ 3.2

3. โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) เกรดการค้า

4. เฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน (hexadecyltrimethoxysilane, HDTMS) เกรดการค้า จากบริษัท Evonik ภายใต้ชื่อ Dynasylan® 9116

5. สารลดแรงตึงผิว (surfactant) จากบริษัท ดาว เคมิคอล ประเทศไทย จำกัด ภายใต้ชื่อ TERGITOL™ NP- 9 Surfactant

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณ
ความชื้น	< 13%
คาร์โบไฮเดรต	87% ± 1%
- อะไมโลส	17%
- อะไมโลเพคติน	83%
ไขมัน	0.25%
โปรตีน	6.50% – 7.50%
เถ้า	0.23%
ขนาด	< 160 μm
ความเป็นกรด-ด่าง	6.0 – 7.0

6. เมทานอล (methanol) เกรดการค้า
7. กรดซัลฟิวริก เกรด AR จากบริษัท QRcC
8. น้ำปราศจากไอออน

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin-screw extruder) : Labtech Engineering รุ่น LTE-26-44
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding) : Nissei Injection Molding Machine รุ่น NEX80
3. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) : Instron รุ่น 5566
4. เครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact tester) : Gotech testing machines รุ่น GT-T045-MD
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) : JEOL รุ่น JSM-6480LV
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) : รุ่น Hitachi HT-7700
7. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) : Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC 3+

8. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิคเมตริก-แอนนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA) : Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC 3+
9. เครื่องอัดขึ้นรูป (compression molding) : Labtech Engineering รุ่น Hydraulic Press 20
10. เครื่องชั่ง (ทศนิยม 2 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง) : Mettler Toledo รุ่น AB204-S/FACT
11. ตู้อบ : Memmert รุ่น UNB 400
12. แผ่นใสถ่ายเอกสาร

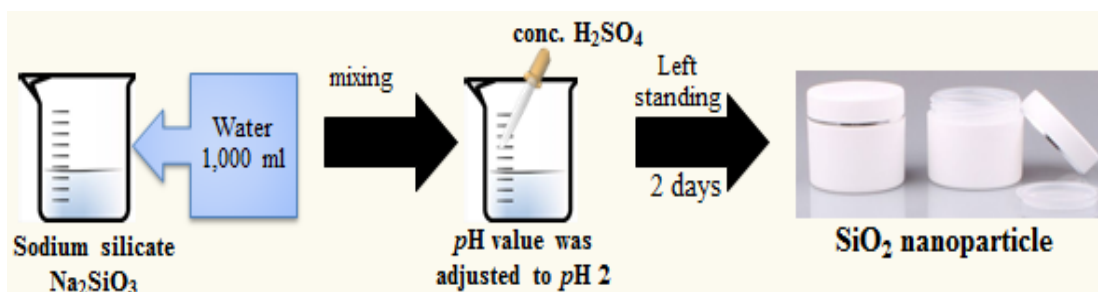
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน

1. เตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation technique) โดยมีขั้นตอนการทำโดยสังเขปดังนี้ ชั่งโซเดียมซิลิเกต 55 กรัม และเติมน้ำปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ขนาด 2,000 มิลลิลิตร กวนจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นใช้ปิเปตหยดกรดซัลฟิวริกเข้มข้นปริมาตรโดยประมาณ 21 มิลลิลิตรตามลงไป จนสารละลายที่ได้มีค่า pH 2 ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นเก็บสารละลายที่ได้ไว้ในภาชนะพลาสติก และเก็บไว้เป็นเวลา 2 วัน เพื่อให้เกิดเป็นอนุภาคนาโนซิลิกา โดยแสดงขั้นตอนการทดลองตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 สารละลายที่เตรียมได้ก่อนนำไปใส่ในภาชนะพลาสติก



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน

3.3.2 การเตรียมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

1. ทำการดัดแปรพื้นผิวสตาร์ช (แป้งมันสำปะหลัง) และอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยออร์แกโนไซเลน โดยเตรียมสูตรดัดแปร 2 สูตร ตามตารางที่ 3.3

2. ผสมส่วนผสมเข้าด้วยกัน แล้วทำการปั่นด้วย homogenizer เพื่อให้ได้ของผสมเนื้อเดียวกัน ตรวจสอบส่วนผสมที่ได้ให้มีค่า pH 1-2 แล้วเทลงภาต เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา silanization เป็นเวลาประมาณ 3 วัน จากนั้นทำการกรองเพื่อล้างกรดให้ออกจนหมด แล้วอบแห้งดัดแปรที่ได้ก่อนนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดโดยแสดงขั้นตอนการทดลอง ตามรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางส่วนผสมสารเคมีเพื่อใช้เตรียมสูตรดัดแปร 2 สูตร

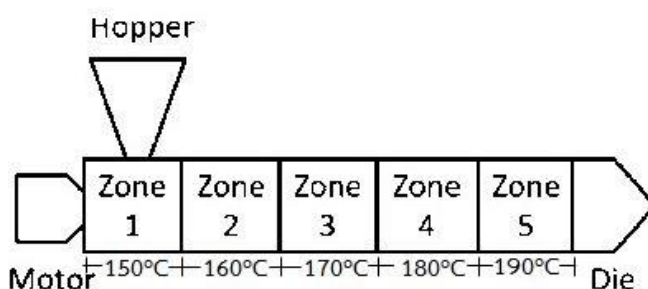
สารเคมี/สูตรดัดแปร	4 ST : 1 HDTMS	1 ST : 1 HDTMS
สตาร์ช (ST)	500 กรัม	500 กรัม
ซิลิกา	ร้อยละ 5 ของสตาร์ช	ร้อยละ 5 ของสตาร์ช
เฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน (HDTMS)	125 กรัม	500 กรัม
เมทานอล	46.2 กรัม	46.2 กรัม
สารลดแรงตึงผิว	5 – 10 มิลลิลิตร	5 – 10 มิลลิลิตร
น้ำ	77.7 กรัม	77.7 กรัม



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

3.3.3 การเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

1. เตรียมส่วนผสมระหว่างแป้งดัดแปร (modified starch) และพอลิแล็กติกแอซิดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1 ต่อ 9 คลุกเคล้าของผสมในถุงพลาสติก แล้วนำไปผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin - screw extruder) โดยตั้งอุณหภูมิจากโซนป้อนถึงหัวตายที่ 150/160/170/180/190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นนำมาสเตอร์เบทซ์ที่ได้ไปบดและนำเข้าตู้อบเพื่อกำจัดความชื้นที่ 65 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 แผนผังอุณหภูมิเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่จากโซนป้อนถึงหัวตาย

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมระหว่างแป้งดัดแปรและพอลิแล็กติกแอซิด

อัตราส่วนผสม	ปริมาณส่วนผสมระหว่าง (กรัม)	
	แป้งดัดแปร (modified starch)	พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)
neat PLA	-	1000
อัตราส่วน 1 ต่อ 9	150	1350
ร้อยละ 1	150	1350
ร้อยละ 3	450	1050
ร้อยละ 5	750	750

2. เตรียมพอลิแล็กติกแอซิดที่มีส่วนผสมของแป้งดัดแปรที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 ตามลำดับ โดยอาศัยมาสเตอร์เบทซ์ที่เตรียมได้จาก ข้อ 1 โดยปริมาณของส่วนผสมต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 นำไปผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ โดยตั้งอุณหภูมิจากโซนป้อนถึงหัวตายที่ 150/160/170/180/190 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3. นำมาสเตอร์แบทช์ที่ได้ไปบด และนำเข้าสู่อบเพื่อกำจัดความชื้นที่ 65 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 3.5 สรุปอัตราส่วนผสมพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดผสมตัวเติม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

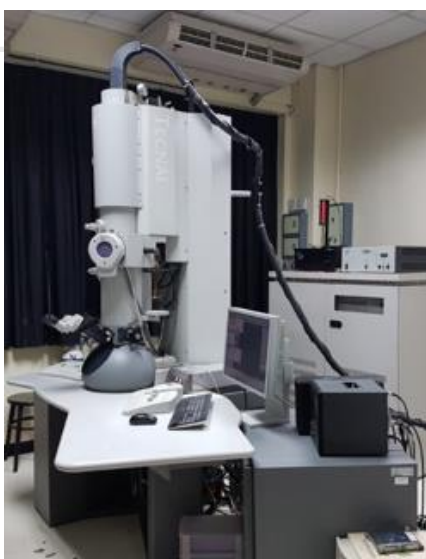
composite	masterbatch (g)	neat PLA (g)
neat PLA	-	1000
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	150	1350
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	450	1050
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	750	750
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	1500	-
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	150	1350
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	450	1050
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	750	750
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	1500	-

3.3.4 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.4.1 การทดสอบพื้นฐานวิทยา

3.3.4.1.1 ทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา ที่ผ่านสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอน



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.3.4.1.2 ทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่หักแล้วจากการทดสอบความทนแรงกระแทก มาทำการเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.4.2 สมบัติเชิงกล

นำอัตราส่วนผสมพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกและพอลิเอทิลีนกึ่งผลึกผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทำการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ (injection molding) ดังรูปที่ 3.7 เพื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.7 เครื่องฉีดแบบ



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความทนแรงกระแทก (Impact strength)	ASTM D 256	kJ/m^2
ความทนแรงดึง (Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	ASTM D 638	%

3.3.4.2.1 ความทนแรงกระแทก

ทดสอบความทนแรงกระแทก (impact strength) ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact tester) ดังรูปที่ 3.10 โดยใช้ชิ้นงานชนิดไอซอด (izod) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ทดสอบ 5 ชิ้นงาน ในแต่ละสูตร ซึ่งมีขนาด $12.7 \times 63.5 \times (3.21-3.24)$ มิลลิเมตร โดยทำการบาก (notch) ชิ้นงานก่อนทำทดสอบ ให้มีมุมเท่ากับ 45° ดังรูปที่ 3.9 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ และใช้พลังงานกระแทก 1 จูล ในการทดสอบ



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบความทนแรงกระแทก

ก่อนทำการทดสอบ วัดความหนาและความกว้างจากจุดบากลงมาที่ฐานของชิ้นงาน บันทึกค่าที่ได้ เพื่อใช้ในการคำนวณ ความทนแรงกระแทกสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความทนแรงกระแทก (Impact strength) = Energy/A} \quad (3.1)$$

(หน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร, kJ/m^2)

เมื่อ Energy = ค่าพลังงานกระแทก (หน่วยเป็นกิโลจูล, kJ)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (หน่วยเป็นตารางเมตร, m^2)



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด

3.3.4.2.2 ความทนแรงดึง และการดึงยึด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (universal testing machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร ตามสภาวะดังนี้

Test Speed : 5 mm/min

Gauge length : 80 mm

Load cell : 10 N



รูปที่ 3.11 ลักษณะชิ้นงานดัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ

ค่าความทนแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความทนแรงดึง (Tensile strength)} = F/A \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด} = [(L-L_0)/L_0]*100 \quad (3.3)$$

เมื่อ	F	คือ แรงที่ใช้ดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (N)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm ²)
	L	คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)
	L ₀	คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบทดสอบสมบัติเชิงกล

3.3.4.3 สมบัติทางกายภาพ

ปริมาณการดูดซับน้ำ (water absorption)

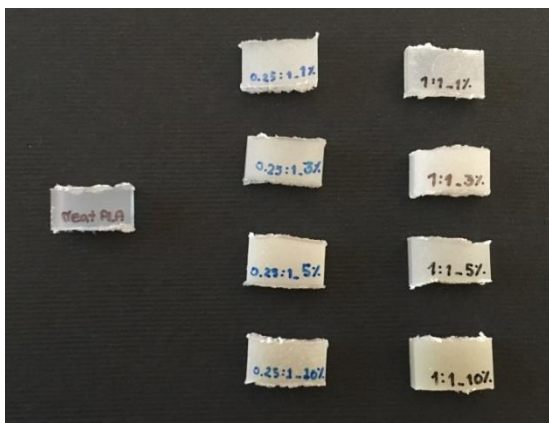
ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 570 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่น (distilled water) ซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์ 100% โดยนำชิ้นงานไปแช่ที่ 0.5 ชั่วโมง, 2 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 8 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง, 5 วัน, 15 วัน, 20 วัน และ 25 วัน ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W_f (\%) = [(W_w - W_c) / W_c] \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ W_f คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

W_c คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

W_w คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ



รูปที่ 3.13 ชิ้นงานที่ทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำ

3.3.4.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5338 โดยนำพอลิเอทิลีนทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.14 ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นทำการหล่อเย็น 5 นาที จากนั้นตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 5x10 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักชิ้นงาน จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปฝังในดินลึกประมาณ 15 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์, 8 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ตามลำดับ ทำการรดน้ำทุกวัน เมื่อครบกำหนดระยะเวลา นำชิ้นงานขึ้นมาเช็ดทำความสะอาดแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หายไป สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Weight loss (\%)} = [A \text{ (g)} - B \text{ (g)}] / A \text{ (g)} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ Weight loss คือ น้ำหนักที่หายไป

A คือ น้ำหนักก่อนทดสอบ (หน่วยเป็นกรัม, g)

B คือ น้ำหนักหลังทดสอบ (หน่วยเป็นกรัม, g)



รูปที่ 3.14 เครื่องอัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.15 กล่องทดสอบการย่อยสลายชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ซ/นาโนซิลิกาโดยการฝังดินในสถานะฝังกลบโดยทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์, 8 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ตามลำดับ

3.3.4.5 สมบัติทางความร้อน

3.3.4.5.1 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC)

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melt temperature, T_m) และสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของสาร (degree of crystallinity, X_c (%)) ของชิ้นงานตามสมการที่ 3.6 โดยทำการทดสอบประมาณ 8 –9 มิลลิกรัม อัตราการเพิ่มความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิ 30°C จนถึง 180°C และอัตราการเย็นตัว $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิ 180°C ลงมาจนถึง 30°C โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

$$X_c (\%) = \left(\frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H^*_{m100} \times W_{PLA}} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ ΔH_m คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ขณะให้ความร้อนหรือพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากเครื่อง DSC (J/g)

ΔH_{cc} คือ เอนทาลปีของการเกิดผลึกเย็นขณะที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากเครื่อง DSC (J/g)

ΔH^*_{m100} คือ เอนทาลปีของการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ของพอลิแล็กติกแอซิดที่มีองค์การเป็นผลึก 100% เท่ากับ 93.1 J/g [1]

W_{PLA} คือ สัดส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดในวัสดุคอมพอสิต

3.3.4.5.2 สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA)

เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิของการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานจนเกิดการเสียดสภาพ โดยศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน (mass change (%)) ตามสมการที่ 3.7 สภาวะที่ใช้ในการทดสอบคือ อัตราการให้ความร้อน 20°C/min ในช่วงอุณหภูมิ 30-650 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์

$$\text{Mass Change (\%)} = [A (\text{g}) - B (\text{g})] / A (\text{g}) \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ Mass Change คือ น้ำหนักที่หายไป

A คือ น้ำหนักก่อนทดสอบ (หน่วยเป็นกรัม, g)

B คือ น้ำหนักหลังทดสอบ (หน่วยเป็นกรัม, g)

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

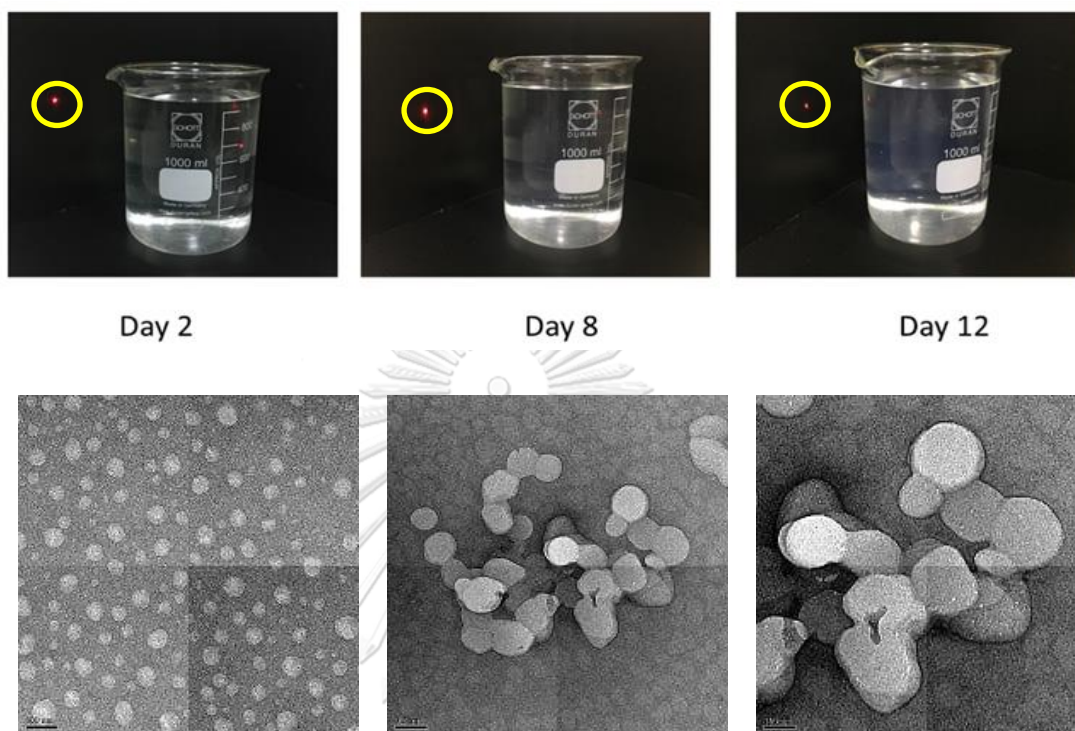
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ในขั้นตอนแรกได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาด้วยวิธีการตกตะกอน แล้วนำอนุภาคนาโนซิลิกาที่เตรียมได้ผสมกับผงแป้งมันสำปะหลัง หลังจากนั้นทำการตัดแปรผิวตัวเติมทั้งสองให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกนอซิลเลนที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดในอัตราส่วนที่ 0%, 1%, 3%, 5% และ 10% นำคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเทคนิคการฉีด ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ การศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ (การดูดซับน้ำ) การย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ และสมบัติทางความร้อน

4.1 ผลการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา

4.1.1 สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกา

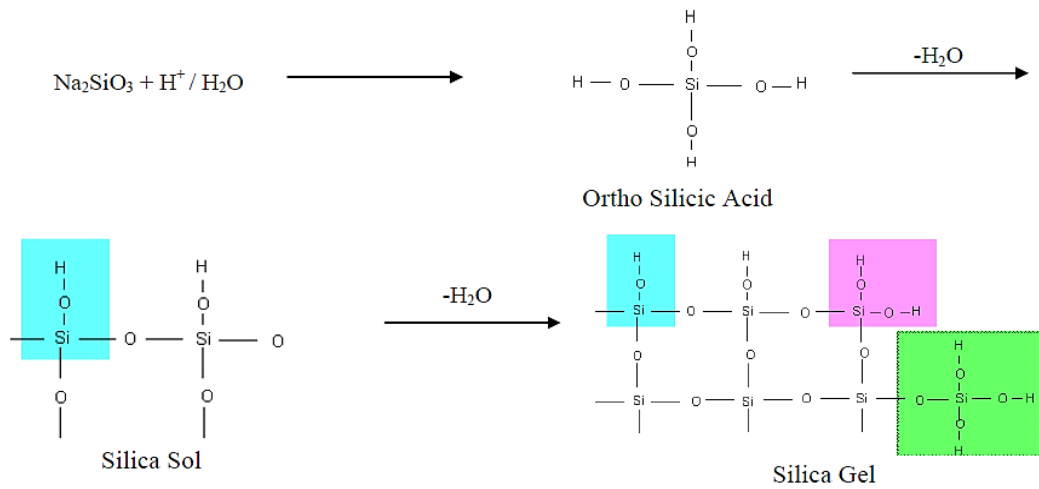
จากรูปที่ 4.1(ก) แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการเตรียมอนุภาคนาโนซิลิกา และเพื่อสังเกตถึงขนาดของอนุภาคซิลิกาในแต่ละวันจึงทำการสังเกตโดยใช้ลำแสงเลเซอร์ส่องผ่านปีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายโซเดียมซิลิเกตซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาในงานวิจัยนี้ โดยทำการสังเกตถึงความเข้มของจุดและลำแสงที่ส่องผ่านสารละลาย พบว่า ในวันที่ 2 ความเข้มของลำแสงพอยเตอร์ที่ส่องผ่านสารละลายนั้นมีความเข้ม และเห็นลำแสงส่องผ่านได้อย่างชัดเจน ในวันที่ 8 ความเข้มของลำแสงพอยเตอร์ที่ส่องผ่านสารละลายมีความจางลงและลำแสงที่ส่องผ่านเริ่มเลือนลางเห็นได้ไม่ชัดเจนแต่ยังคงสามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตของอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ต่อมาในวันที่ 12 ความเข้มของลำแสงพอยเตอร์ที่ส่องผ่านสารละลายมีลักษณะที่เลือนลาง และมองไม่เห็นลำแสงที่ส่องผ่าน นอกจากนี้สารละลายยังมีลักษณะที่ขุ่นขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตของอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วเกิดการเกาะกลุ่มรวมตัวกัน ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อนำอนุภาคคอลลอยด์ของซิลิกาไปทำการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ดังรูปที่ 4.1(ข) แสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคซิลิกา พบว่า ในปฏิบัติการวันที่ 2 อนุภาคซิลิกามีการกระจายตัวอยู่ทั่วในสารละลายและมีขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการสังเกตโดยใช้ลำแสงพอยเตอร์ที่เห็นลำแสงส่องผ่านสารละลายได้อย่างชัดเจน ไม่เกิดการกระเจิงแสง และถ้าปล่อยให้สารละลายให้เกิดปฏิกิริยามากกว่า 12 วัน จะเห็นลำแสงที่ส่องผ่านได้ไม่ชัดเจนและท้ายที่สุดจะมองไม่เห็นลำแสงที่ส่องผ่านแสดงให้เห็นว่าอนุภาคซิลิกา

เริ่มเกิดการรวมกลุ่มกันอยู่ในรูปของแอกโกลเมอเรต ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 400-600 นาโนเมตร สามารถสังเกตได้จากฉากหลังที่ตั้งรับลำแสงอนุภาคเลเซอร์พอยเตอร์ที่มีขนาดลำแสงที่เล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายนาโนซิลิกาที่ปล่อยไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 2 วัน และ 8 วัน



รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะทางกายภาพของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ระยะเวลา 2, 8 และ 12 วัน
(ข) สัณฐานวิทยาของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ระยะเวลา 2, 8 และ 12 วัน

โดยรูปที่ 4.2 แสดงสมการเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา โดยเริ่มต้นจากการผสมโซเดียมซิลิเกตกับน้ำ จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกลงไป ซึ่งกรดซัลฟิวริกได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตกลายเป็นกรดอโธซิลิซิก (ortho silicic acid) จากนั้นกรดยังคงทำปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) กับบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลของกรดซิลิซิกทำให้เกิดการหลุดออกของโมเลกุลน้ำขึ้นในระบบ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกันของพันธะไฮดรอกซิลกลายเป็นซิลิกาโซล (silica sol) ซึ่งเป็นอนุภาคซิลิกาที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้ให้ปฏิกิริยายังคงดำเนินการต่อไปเรื่อยๆ ซิลิกาโซลจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นซิลิกาเจล (silica gel) ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการสำหรับงานวิจัยนี้ ดังนั้น ในการทดลองนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเตรียมความเข้มข้นที่หลากหลายเพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกานั้นคือ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกต 55 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 1-2 ที่อุณหภูมิห้อง และปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 2 วัน

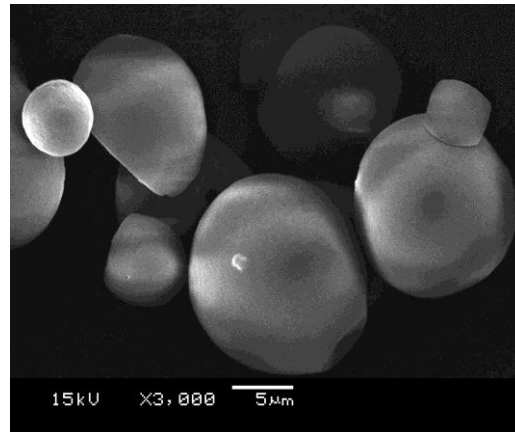


รูปที่ 4.2 สมการเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา [3]

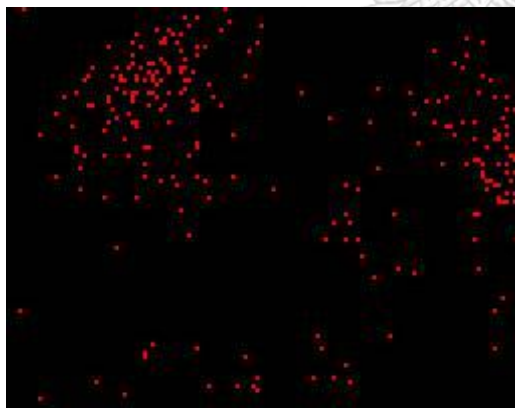
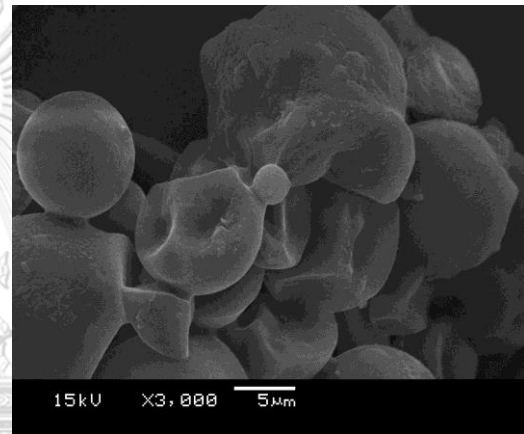
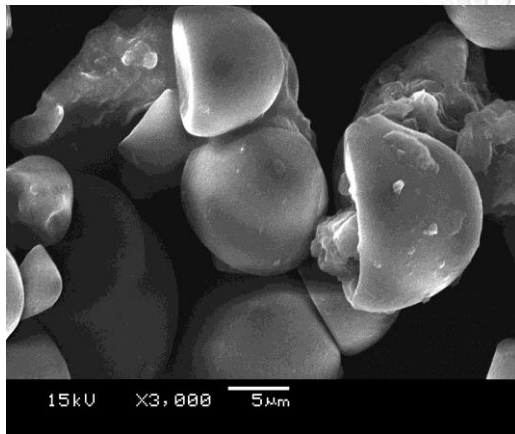
4.2 ผลการตัดแปรสตาบิล/นาโนซิลิกาด้วยสารออร์แกนอซิลเลน

4.2.1 สันฐานวิทยาของไฮบริดสตาบิล/นาโนซิลิกา

ภาพสันฐานวิทยาของสตาบิลและไฮบริดสตาบิล/นาโนซิลิกาแสดงให้เห็นถึงลักษณะทางสันฐานวิทยาที่ทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมไฮบริดสตาบิล/นาโนซิลิกา ด้วยวิธีการตกตะกอนโดยทำการเติมสารแขวนลอยนาโนซิลิกาที่ปริมาณร้อยละ 5 ของน้ำหนักสตาบิล พบว่า สตาบิลที่ได้จะมีลักษณะเป็นก้อนกลม และมีขนาดใหญ่ จากนั้นทำการเติมนาโนซิลิกาลงไปในสตาบิล พบว่า สตาบิลและนาโนซิลิกามีการเกาะกลุ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ทั่วพื้นผิว แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนซิลิกามีความสามารถในการเกาะติดบนพื้นผิวแบ่งได้เป็นอย่างดีซึ่งเกาะกลุ่มรวมกันกับอนุภาคสตาบิลเกิดเป็นสตาบิล/นาโนซิลิกา จากนั้นทำการตัดแปรผิวตัวเติมทั้งสองให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกนอซิลเลน [15] ที่อัตราส่วนน้ำหนักสตาบิลต่อเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลน 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS กลายเป็นไฮบริดสตาบิล/นาโนซิลิกาที่มีสมบัติไฮโดรโฟบิกดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงสันฐานวิทยาของสตาบิลและไฮบริดสตาบิล/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตรก่อนนำไปผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด

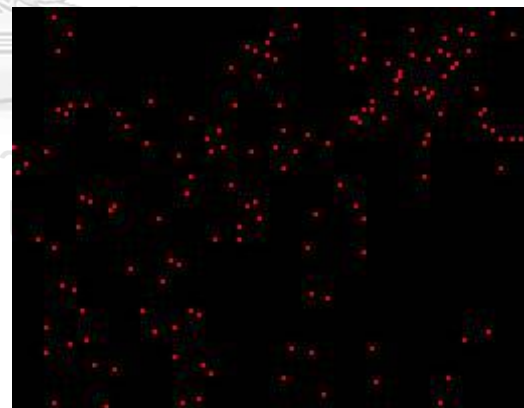


starch



Si Ka1

4 ST : 1 HDTMS



Si Ka1

1 ST : 1 HDTMS

รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของสตาร์ช (starch) และไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา (hybrid starch/nSiO₂) ที่แสดงการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร

จากรูปที่ 4.3 พบว่า การตัดแปรมีวสตาซ์ด้วยเฮกซะเดซิลไตรเมทอกซีไซเลนที่อัตราส่วนน้ำหนัก สตาราซ์ในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิลิกาในชิ้นงาน โดยสูตร ตัดแปรที่ 1 ST : 1 HDTMS จะพบเห็นอนุภาคนาโนซิลิกากระจายตัวอยู่ทั่วไฮบริดสตาซ์ ในขณะที่ สูตรตัดแปรที่ 4 ST : 1 HDTMS จะพบเห็นอนุภาคนาโนซิลิกาเกาะตัวกันเป็นกลุ่มการกระจายตัวไม่ดี เท่ากับสูตรตัดแปรที่ 1 ST : 1 HDTMS นั้นแสดงว่าการตัดแปรมีวสตาซ์/นาโนซิลิกาให้มีสมบัติเป็น ไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกโนไซเลนนั้นช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแป้งและ เสริมความสามารถของอนุภาคนาโนซิลิกาในการเกาะติดบนพื้นผิวแป้งได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

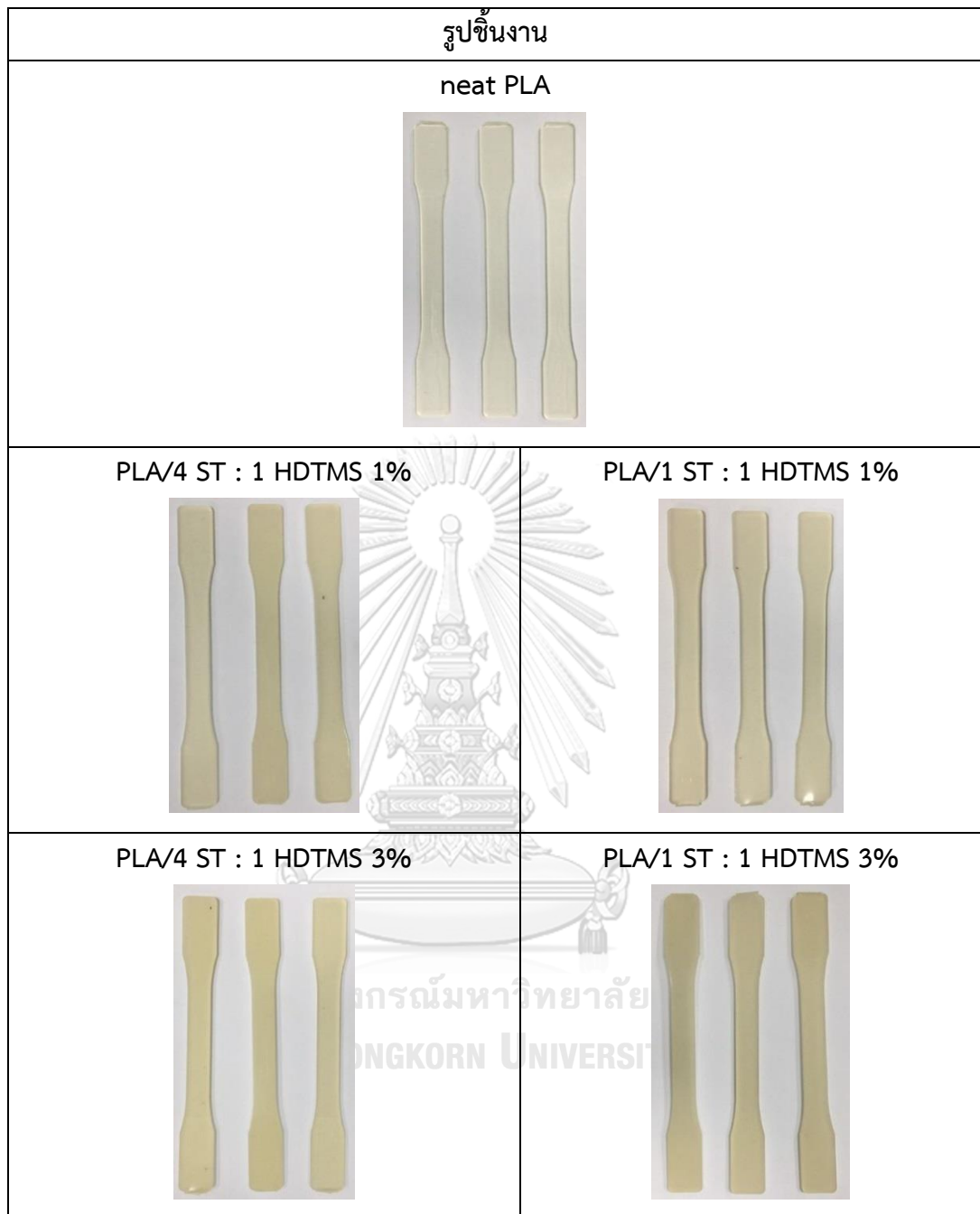
จากนั้นทำการผสมตัวเติมไฮบริดสตาซ์/นาโนซิลิกาลงในพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องอัดรีด แบบเกลียวคู่ได้มาสเตอร์แบทช์ที่ความเข้มข้น 10% แล้วนำมาสเตอร์แบทช์ที่สูตรตัดแปร 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดอีกครั้งที่อัตราส่วน 0%, 1%, 3%, 5% ยกเว้นที่อัตราส่วน 10% ตามลำดับ เพื่อให้ตัวเติมไฮบริดสตาซ์/นาโนซิลิกากระจายตัวอยู่ ในเนื้อพอลิแล็กติกแอซิดอย่างทั่วถึง และลดแรงเสียดทานในขณะหลอมผสม โดยรูปที่ 4.4 แสดงให้ เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของแป้งตัดแปรทั้ง 2 สูตร ก่อนที่จะนำมาผสมร่วมกับพอลิแล็กติกแอซิด ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่



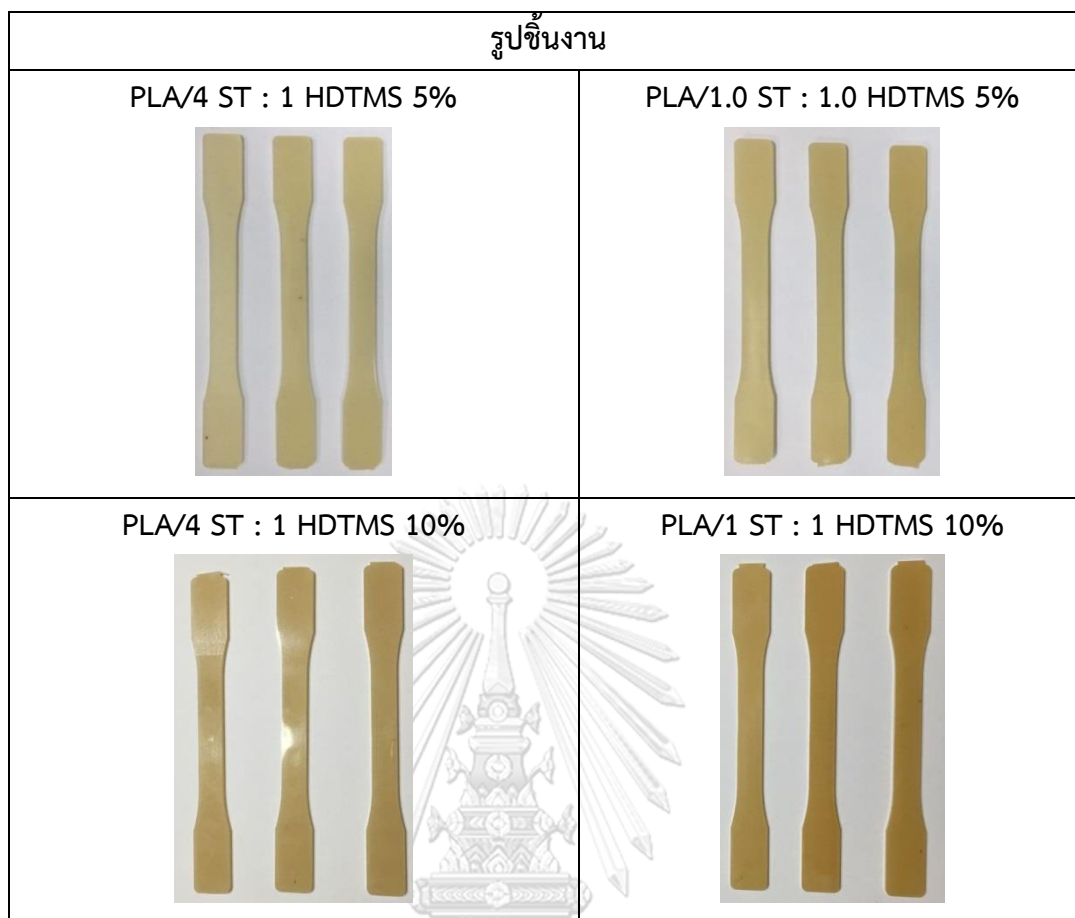
4 ST : 1 HDTMS

1 ST : 1 HDTMS

รูปที่ 4.4 ลักษณะทางกายภาพของไฮบริดสตาซ์/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร ก่อนนำไปผสมร่วมกับ พอลิแล็กติกแอซิด



รูปที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 0%, 1%, 3%, 5% และ 10%

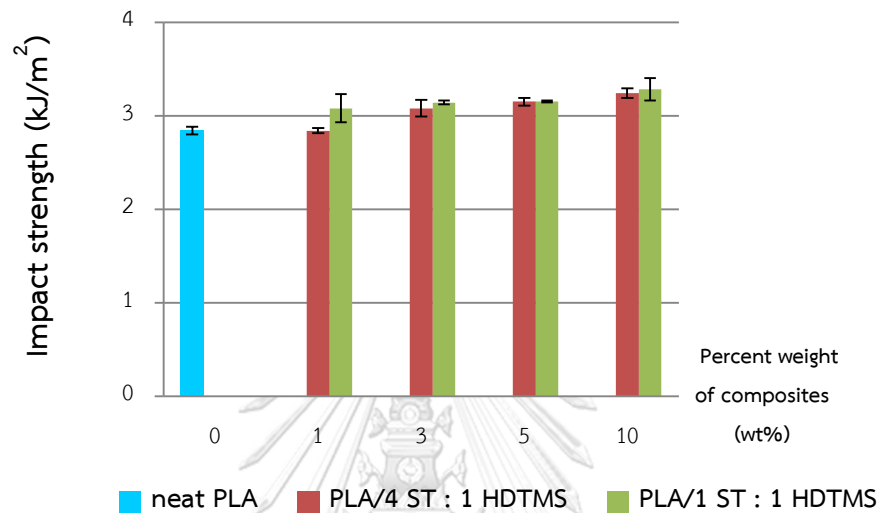


รูปที่ 4.5 (ต่อ) ลักษณะทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 0%, 1%, 3%, 5% และ 10%

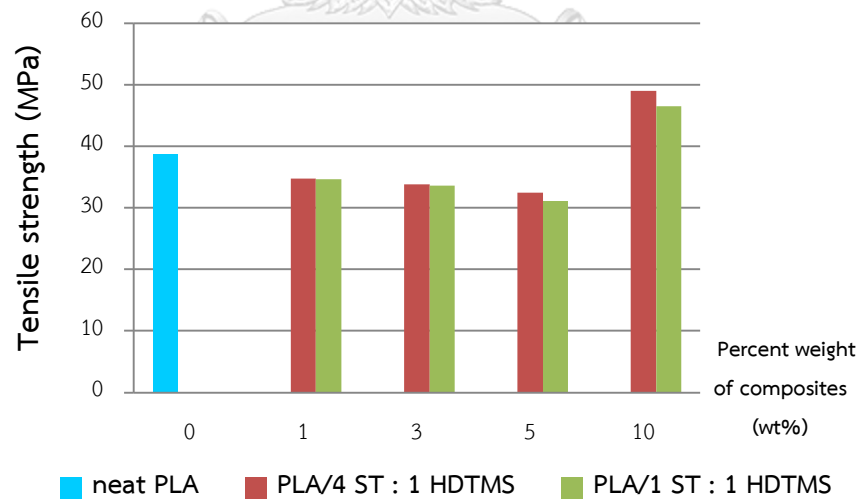
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะชิ้นงานของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาจะเห็นได้ว่า ชิ้นงาน 4 ST : 1 HDTMS มีสีที่ค่อนข้างใส ส่วนชิ้นงาน 1 ST : 1 HDTMS มีสีที่ค่อนข้างเหลือง เนื่องจากใส่ปริมาณไซเลนที่มากกว่าและจากชิ้นงานที่เตรียมได้นี้จะนำไปศึกษาสมบัติต่างๆต่อไป นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้ลองศึกษาชิ้นงานที่ไม่ใส่เฮกซะเดซิล-ไตรเมทอกซีไซเลน พบว่า ขณะที่ทำการผสมในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ส่วนผสมมีความเหนียวติดตามสกรูมาก ส่งผลทำให้เครื่องไม่สามารถผลักดันสารออกมาได้ ทำให้นำไปทดสอบสมบัติต่างๆต่อไปได้ยาก จึงทำการทดสอบเฉพาะผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ต่างกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงพอลิแล็กติกแอซิดต่อไป

4.3 การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด โดยพิจารณาจากพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ในปริมาณต่างๆให้ผลการทดลองดังนี้

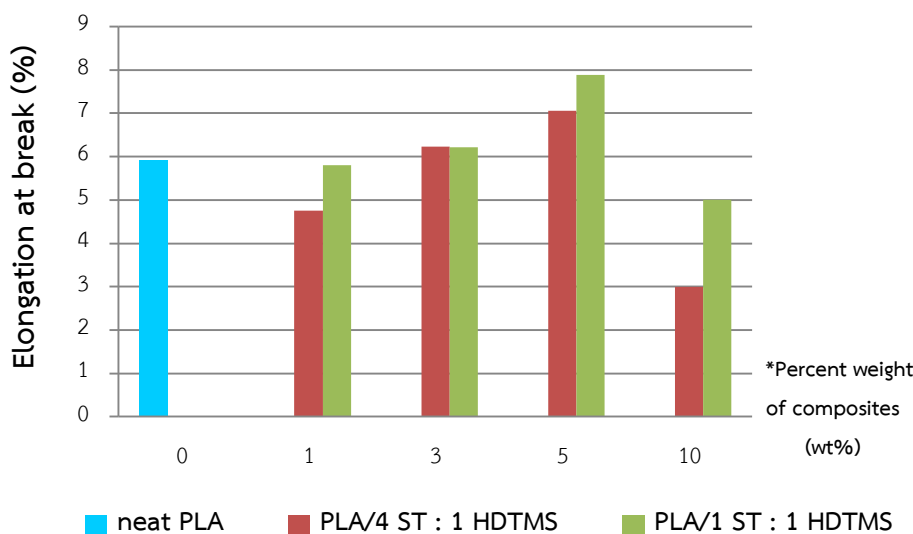


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณต่างกัน (ก) ความทนแรงกระแทก (ข) ความทนแรงดึง และ (ค) การยืดตัว ณ จุดขาด



(ค)

รูปที่ 4.6 (ต่อ) สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณต่างกัน (ก) ความทนแรงกระแทก (ข) ความทนแรงดึง และ (ค) การยึดตัว ณ จุดขาด

รูปที่ 4.6 (ก) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาปริมาณต่างกัน พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดมีการผสมอนุภาคนาโนซิลิกาซึ่งอนุภาคนาโนซิลิกานี้เป็นอนุภาคที่ช่วยดูดซับพลังงานที่ได้รับจากแรงกระแทกและถ่ายโอนพลังงานที่ได้ไปยังพอลิแล็กติกแอซิด [40]

เมื่อพิจารณาจากปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่า ความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตรที่ปริมาณ 10% พบว่า ความทนแรงกระแทกมีค่าสูงสุด เนื่องจากมีการผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่มาก จึงมีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ได้รับจากแรงกระแทกได้ดีและสามารถถ่ายโอนพลังงานที่ได้รับเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.6 (ข) แสดงสมบัติเชิงกลทางด้านความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ต่างกัน พบว่า ความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ที่ปริมาณ 10% พบว่า มีค่าความทนแรงดึงสูงที่สุด เนื่องจากในกระบวนการผลิต

พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา เพื่อให้ตัวเติมทั้งสองผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดได้ทั่วถึง จึงทำการผสมในอัตราส่วน 10% จากนั้นจึงนำส่วนผสมที่ได้ไปผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดอีกครั้ง ซึ่งทำให้พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาเกิดการเสถียรภาพทางความร้อน (thermal degradation) ที่ได้รับในขั้นตอนการผสมในเครื่องอัดรีด และเมื่อพิจารณาจากพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกามีค่าความทนแรงดึงมากกว่าพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีอนุภาคนาโนซิลิกา จึงส่งผลให้พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกามีความแข็งแรง [38]

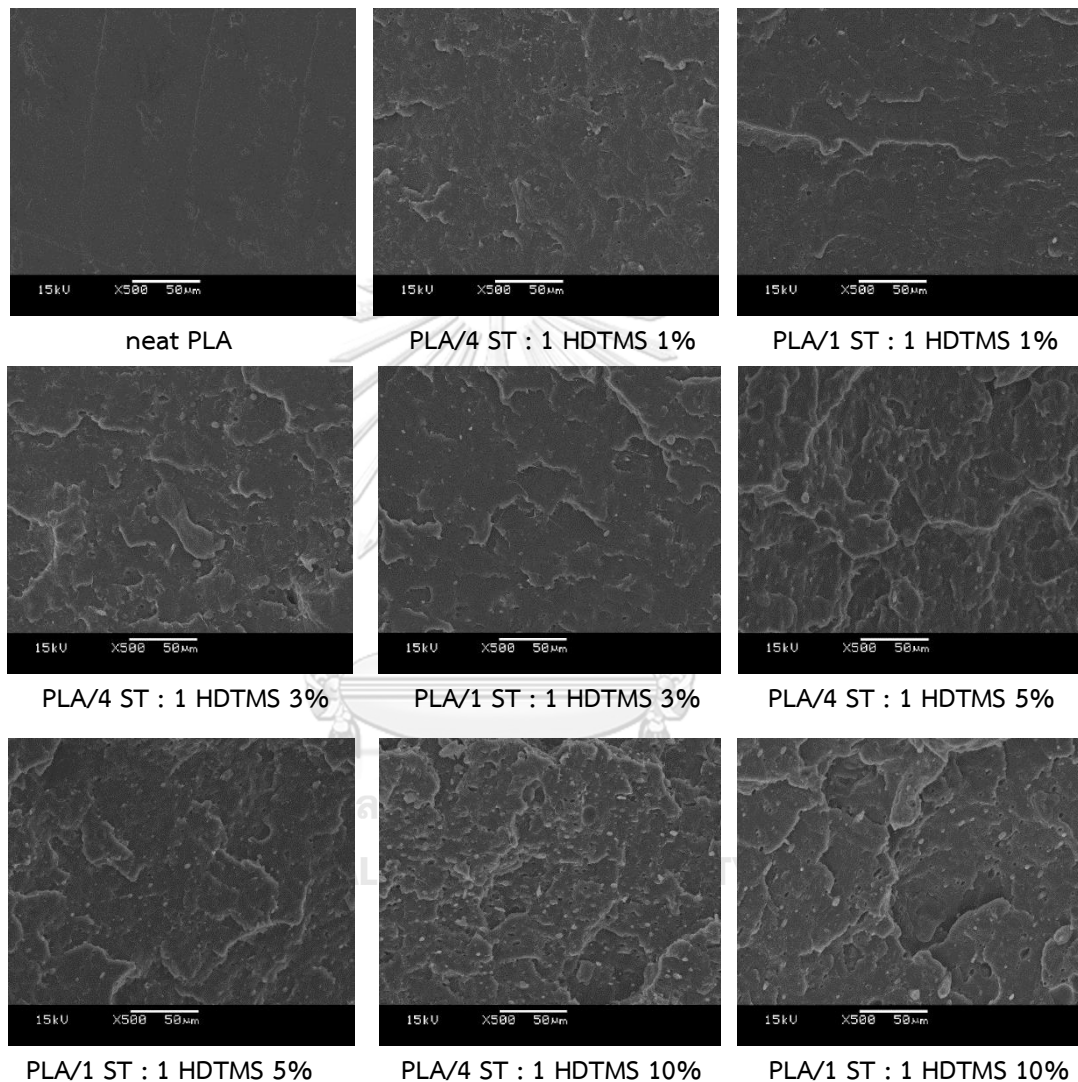
รูปที่ 4.6 (ค) แสดงการยึดตัว ณ จุดขาด พบว่า มีแนวโน้มที่ตรงข้ามกับความทนแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาปริมาณ 1%, 3% และ 5% มีการผ่านกระบวนการทางความร้อน 2 ครั้ง ทำให้ชิ้นงานมีการจดจำประวัติทางความร้อน จึงส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการยึดออก และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาปริมาณ 10% ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเพียง 1 ครั้ง [36]

เมื่อทำการพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าปริมาณที่มากที่สุด คือ 10% ให้ค่าความทนแรงกระแทกและความทนแรงดึงมีค่ามากที่สุด โดยค่าความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS มีค่าที่ใกล้เคียงกัน (PLA/4 ST : 1 HDTMS มีค่า 3.24 kJ/m^2 และ PLA/1 ST : 1 HDTMS มีค่า 3.28 kJ/m^2) ค่าความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS มีแนวโน้มมากกว่าพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 1 ST : 1 HDTMS โดยค่าความทนแรงดึงของการทดสอบมีค่าเท่ากับ 49.03 MPa และ 46.48 MPa ตามลำดับ

4.3.1 สันฐานวิทยาของชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทก

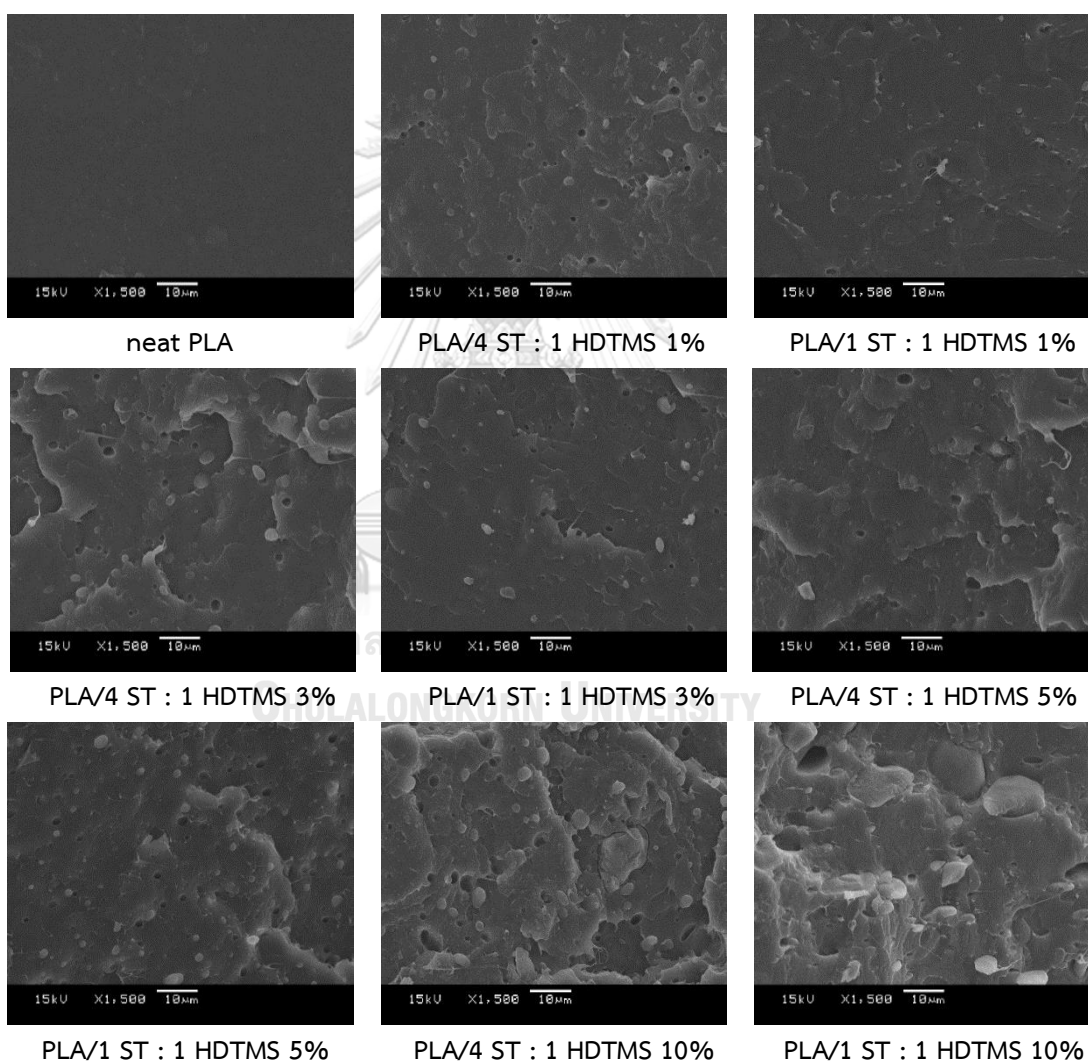
ภาพสันฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆ กัน ได้ถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างโดยใช้ชิ้นงานจากการทดสอบความทนแรงกระแทก

รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ต่างๆ กัน โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า พื้นผิวพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ 1% และ 3% ทั้ง 2 สูตร พื้นผิวมีลักษณะการกระจายตัวที่ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณมากขึ้น (5% และ 10%) พื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะที่ขรุขระ เป็นรูโพร่ง ซึ่งแสดงถึงลักษณะการกระจายตัวที่ไม่ดีในเนื้อพอลิแล็กติกแอซิด



รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากการใช้กำลังขยาย 1500 เท่า (ดังแสดงในรูปที่ 4.8) พบว่า พื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ต่างกันมีลักษณะที่เห็นได้ชัดมากกว่าใช้กำลังขยาย 500 เท่า จากรูปที่ 4.8 พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 1 ST : 1 HDTMS มีความเข้ากันได้ดีกว่า มีความเรียบเนียนมากกว่าพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และจากภาพจะเห็นถึงจุดสีขาว ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากฝุ่นที่เกิดจากตอนทดสอบชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะพื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ปริมาณ 10% มีรูโพรงเกิดขึ้นมากกว่าปริมาณ 1%, 3% และ 5% และยังพบเห็นจุดสีขาวได้ชัดมากกว่าปริมาณอื่น ๆ อีกด้วย



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่าง ๆ ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

4.4 สมบัติทางกายภาพ

การดูดซับน้ำ (Water Absorption)

สมบัติการดูดซับน้ำ โดยนำพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน ไปแช่ในน้ำกลั่นในระยะเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณต่างกัน

Percentage of water uptake (W _f %)									
ระยะเวลา (ชั่วโมง)	neat PLA	PLA/4 ST : 1 HDTMS				PLA/1 ST : 1 HDTMS			
		1%	3%	5%	10%	1%	3%	5%	10%
0.5	0.38	0.34	0.26	0.27	0.22	0.53	0.52	0.59	0.25
2	0.23	0.29	0.63	0.56	0.32	0.38	0.38	0.36	0.51
4	0.46	0.56	0.46	0.38	0.39	0.68	0.66	0.41	0.55
6	0.69	0.60	0.75	0.59	0.64	0.55	0.62	0.70	0.63
8	0.52	0.50	0.52	0.63	0.46	0.33	0.50	0.38	0.49
24	0.63	0.76	0.73	0.79	0.68	0.85	0.73	0.59	0.99
120 (5 วัน)	0.67	0.74	0.88	1.05	1.23	0.78	0.99	0.62	1.17
360 (15 วัน)	0.99	1.09	1.00	1.23	1.46	1.06	1.11	0.98	1.79
480 (20 วัน)	0.99	1.01	1.05	1.26	1.58	1.14	1.19	1.00	1.94
600 (25 วัน)	0.99	1.17	1.10	1.44	1.58	1.14	1.24	1.03	2.04



รูปที่ 4.9 ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นระยะเวลา 600 ชั่วโมง หรือ 25 วัน

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงสมบัติการดูดซับน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน ทุกชิ้นงานเป็นเวลา 600 ชั่วโมง หรือ 25 วัน พบว่า ในช่วง 0.5 ชั่วโมงแรก ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ที่ปริมาณ 10% มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่น้อยกว่าพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากพื้นผิวของตัวเติมไฮบริดสตาร์ชและนาโนซิลิกาได้ถูกทำการดัดแปรให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกโนไซเลนก่อนนำไปผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด ดังนั้นจึงทำให้ พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกามีสมบัติพื้นผิวเป็นไฮโดรโฟบิก เช่นเดียวกันใน 0.5 ชั่วโมงแรก [15] เมื่อระยะเวลาผ่านไป เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีการผสมสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี จึงส่งผลทำให้แป้งค่อยๆดูดซับน้ำเข้าไป [38] โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมากที่สุดในช่วงเวลาผ่านไป 25 วันทั้ง 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.5 การย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ

สมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 0%, 1%, 3%, 5% และ 10% โดยทำการฝังดินในสภาวะฝังกลบ เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์, 8 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาทำการทดสอบความสามารถในการย่อยสลาย ดังนี้

4.5.1 การสังเกตลักษณะที่ปรากฏ (visual observation) ทางด้านกายภาพและการเปลี่ยนแปลงบนชิ้นงานที่ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

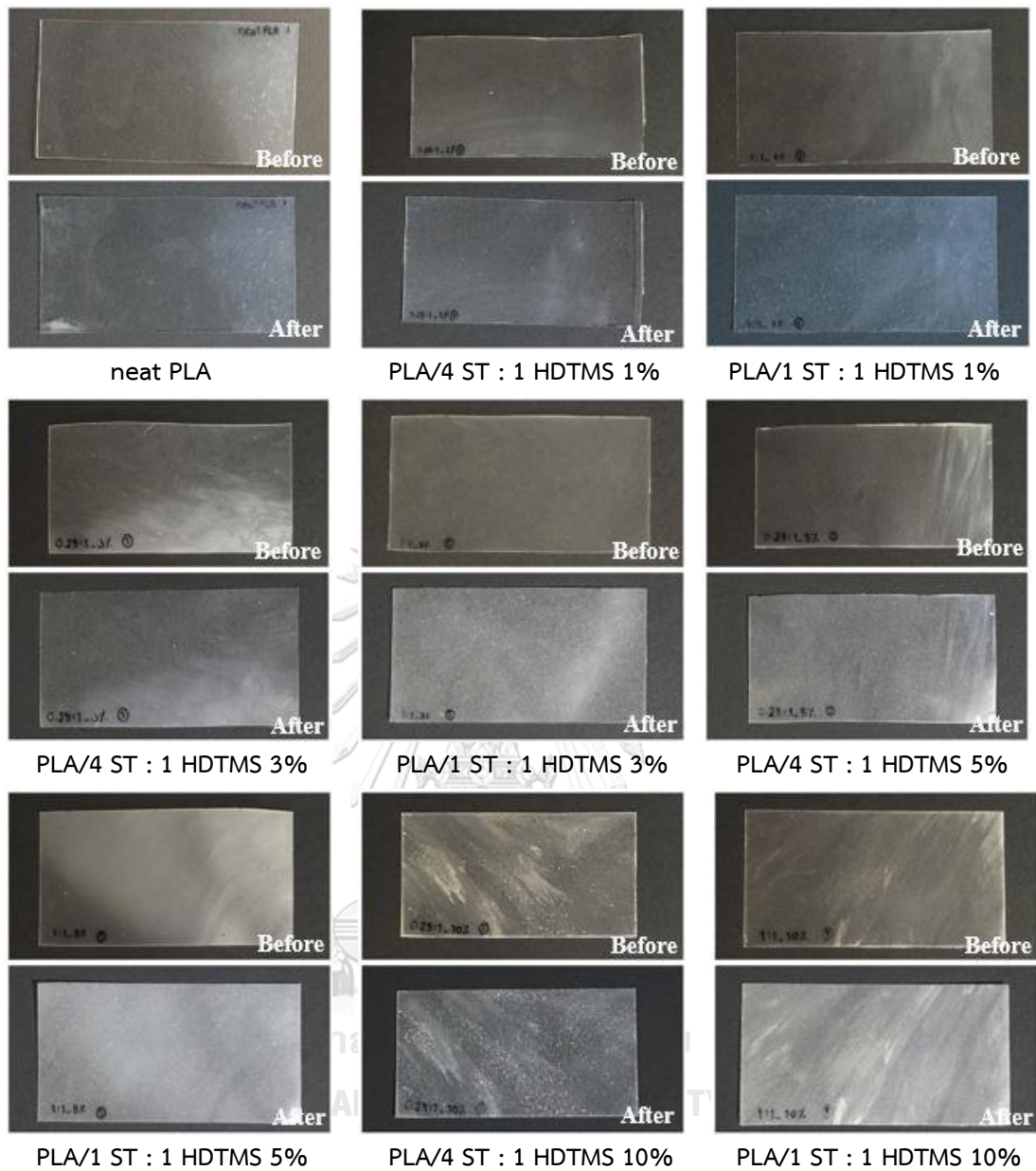
ก่อนทำการทดสอบโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบทั้ง 3 ระยะเวลา พบว่า ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดมีความใส แสงสามารถส่องผ่านได้ ลักษณะพื้นผิวมีความเรียบเนียน ส่วนชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน พบว่า ชิ้นงานที่ 4 ST : 1 HDTMS มีลักษณะขุ่นมัว โปร่งแสงแต่ไม่โปร่งใส และค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณที่ผสม โดยปริมาณที่ 10% มีความขุ่นมัวมากที่สุด มีความโปร่งใสน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับในปริมาณที่น้อยกว่า และลักษณะทางด้านพื้นผิวในทุกปริมาณ พบว่ามีความเรียบเนียน

สำหรับชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 1 ST : 1 HDTMS พบว่า ชิ้นงานมีลักษณะขุ่นมัว โปร่งแสงแต่ไม่โปร่งใสเช่นเดียวกัน โดยชิ้นงาน

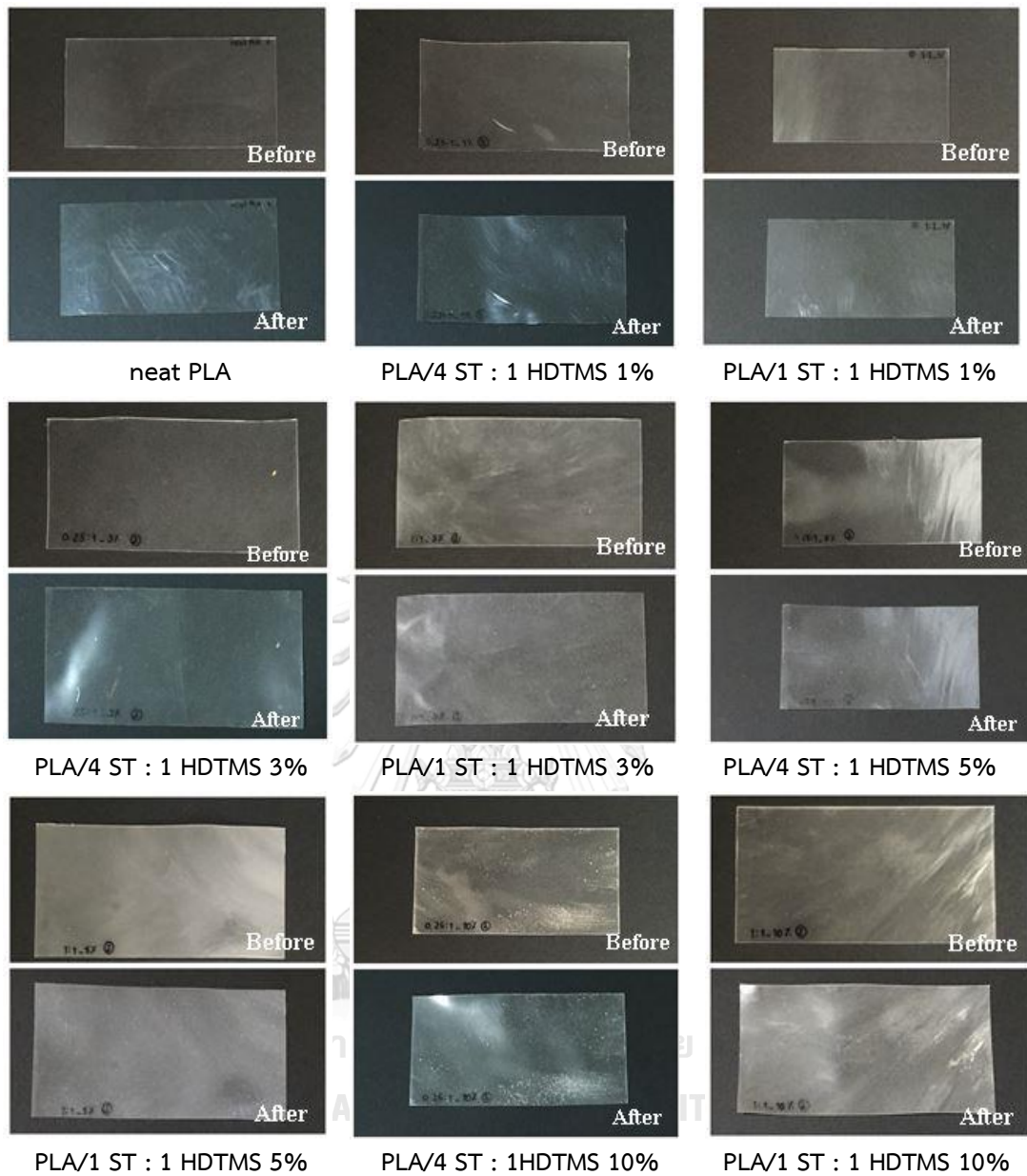
ที่ปริมาณ 5% มีความชุ่มชื้น และโปร่งแสงน้อยที่สุดและลักษณะทางด้านพื้นผิวในทุกปริมาณ พบว่ามีความเรียบเนียนเช่นเดียวกัน

หลังทำการทดสอบฝังดินในสภาวะฝังกลบ และนำมาเปรียบเทียบก่อนและหลังทำการทดสอบ ทั้ง 3 ระยะเวลา พบว่า ลักษณะทางด้านกายภาพของชิ้นงานหลังการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยชิ้นงานหลังทำการฝังดินมีลักษณะเหลือง ชุ่มชื้นขึ้นมากกว่าก่อนฝังดินอย่างเห็นได้ชัดโดยเฉพาะ ชิ้นงานที่ทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ชิ้นงานหลังฝังดินจะมีลักษณะที่ค่อนข้างทึบแสง นอกจากนี้ชิ้นงานหลังฝังดินทั้ง 3 ระยะเวลา พบว่าชิ้นงานมีฝ้าเกิดขึ้นที่ผิวพอลิแล็กติกแอซิดและ พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร ผิวของชิ้นงาน มีลักษณะขรุขระ มีเม็ดเล็กๆเกิดขึ้นในเนื้อผิวพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตอย่างชัดเจน [6] ดังแสดง ในรูปที่ 4.10 – 4.12

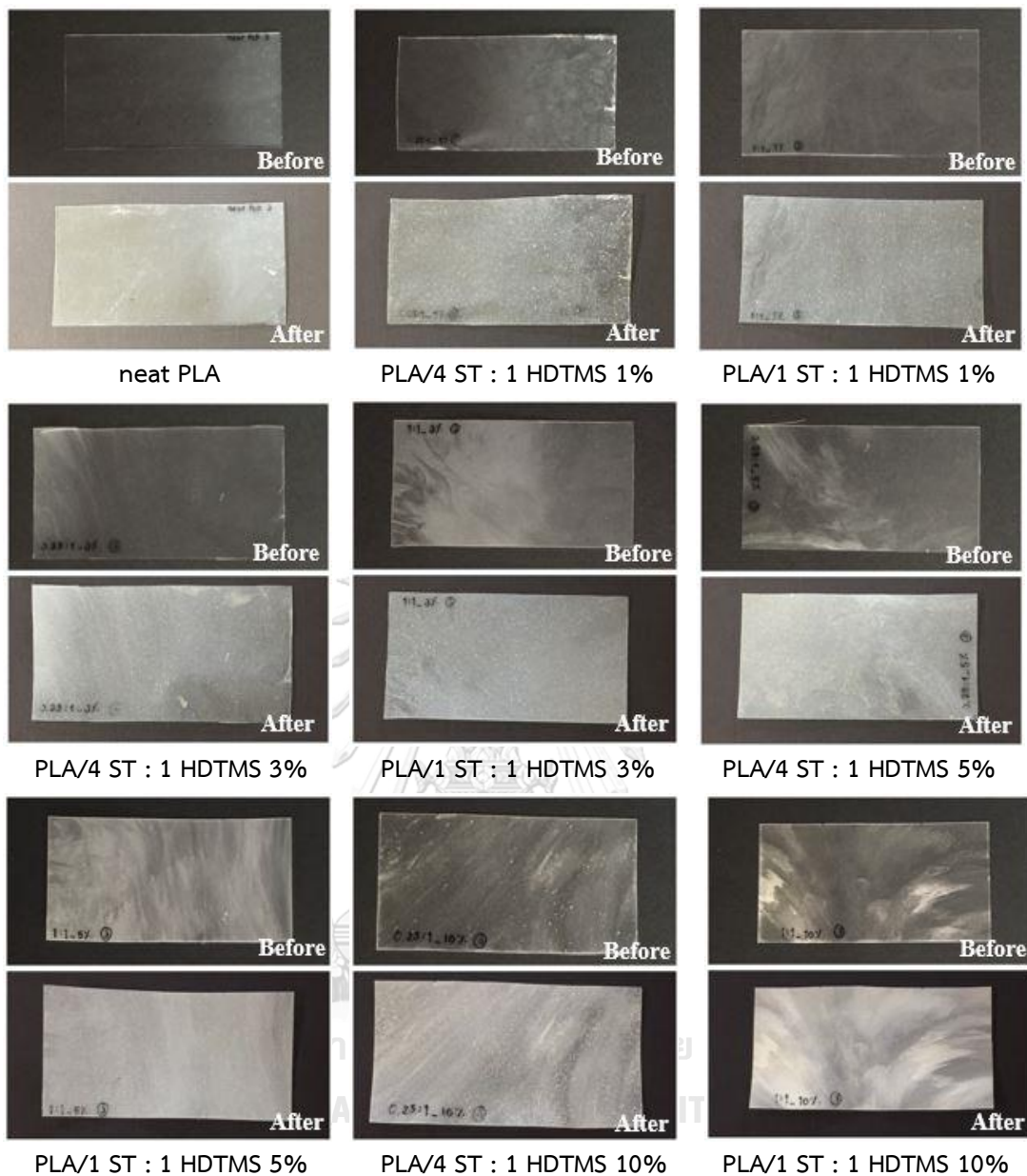




รูปที่ 4.10 ชิ้นงานก่อน (before) และหลัง (after) การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบของ พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานก่อน (before) และหลัง (after) การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบของ พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



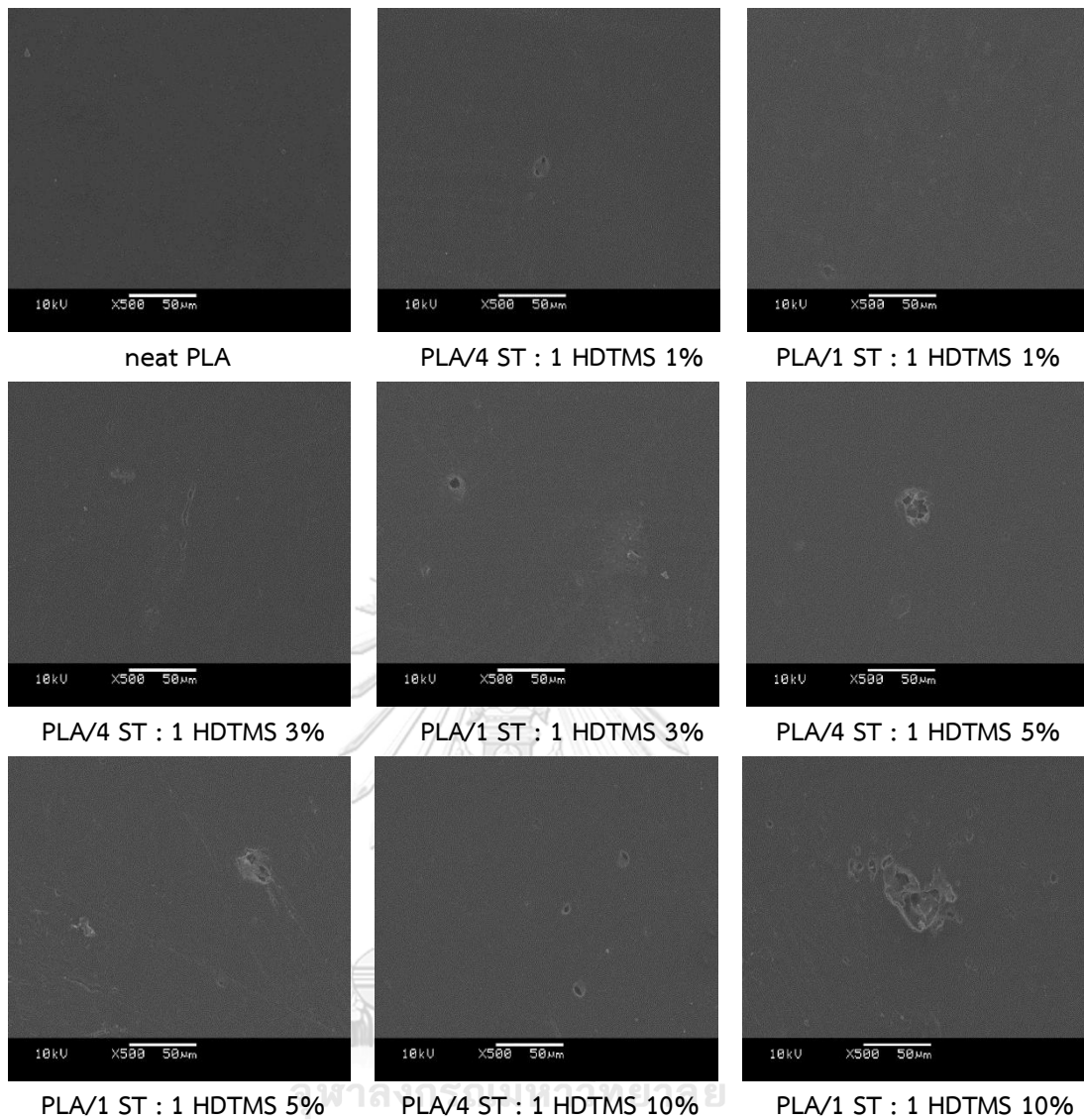
รูปที่ 4.12 ชิ้นงานก่อน (before) และหลัง (after) การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบของ พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 4 ST : 1HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ ทั้ง 3 ระยะเวลา ไปสังเกตลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า

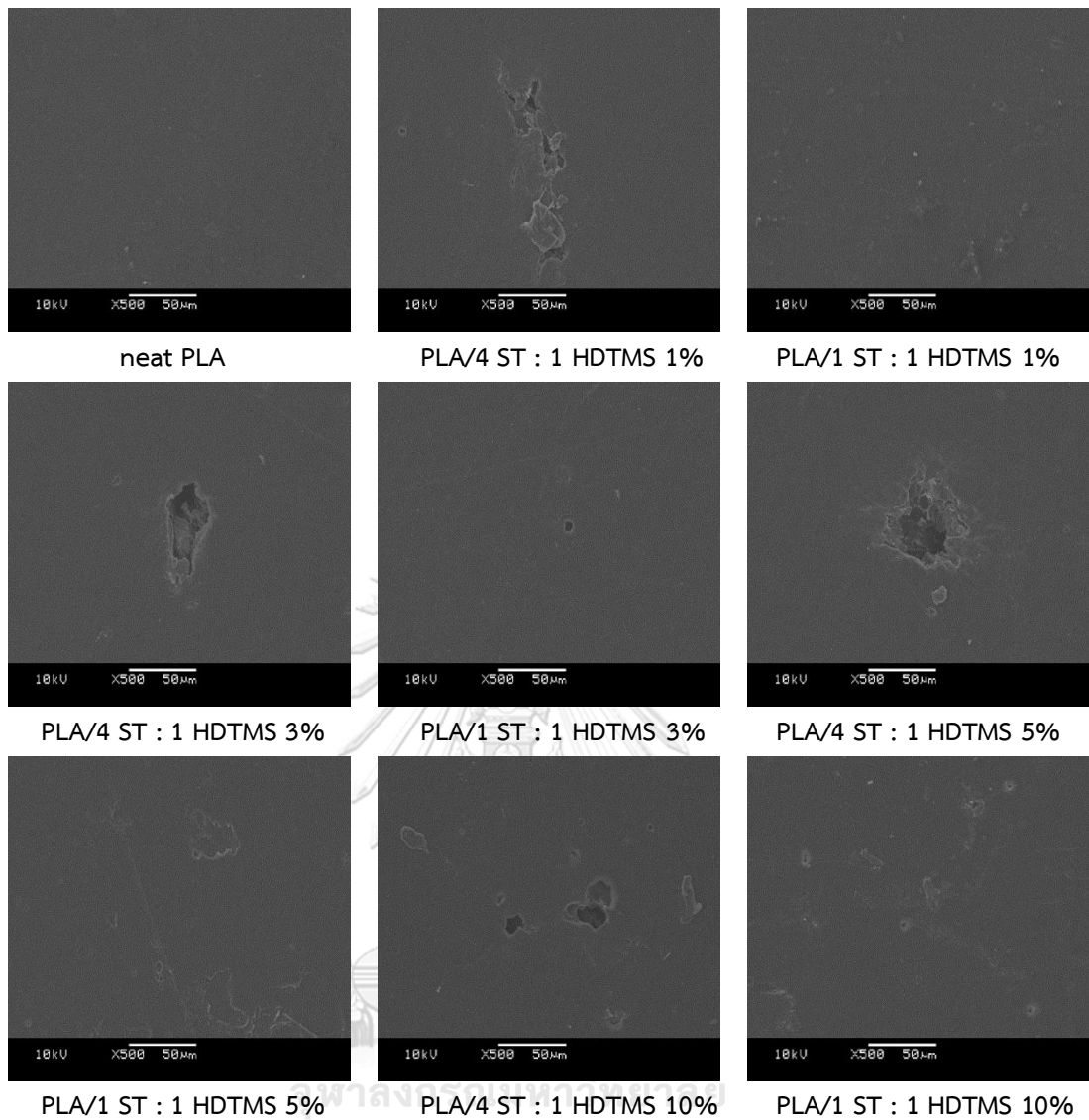
ในช่วงระยะเวลา 4 สัปดาห์แรก พื้นผิวชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์ยังมีลักษณะเรียบเนียน ในขณะที่ชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆ กัน พื้นผิวมีรูโพรงเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน โดยชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตรในปริมาณที่ 1% , 3% และ 5% ชิ้นงานมีลักษณะที่เรียบเนียน มีรูโพรงเกิดขึ้นภายในชิ้นงานเล็กน้อย และเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 10% พบว่ามีรูโพรงเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.13

ต่อมาในช่วงระยะเวลา 8 สัปดาห์ ชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์ยังคงมีพื้นผิวเรียบเนียนคล้ายชิ้นงานที่ทำการทดสอบในช่วงระยะเวลา 4 สัปดาห์แรก ส่วนชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ 3%, 5% และ 10% พบว่า พื้นผิวของชิ้นงานมีรูโพรงเกิดเป็นรอยกว้าง แสดงให้เห็นเกิดการย่อยสลายเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ในทางกลับกัน ชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 5% และ 10% ลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานมีรอยหลุมเกิดขึ้นทั่วชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.14

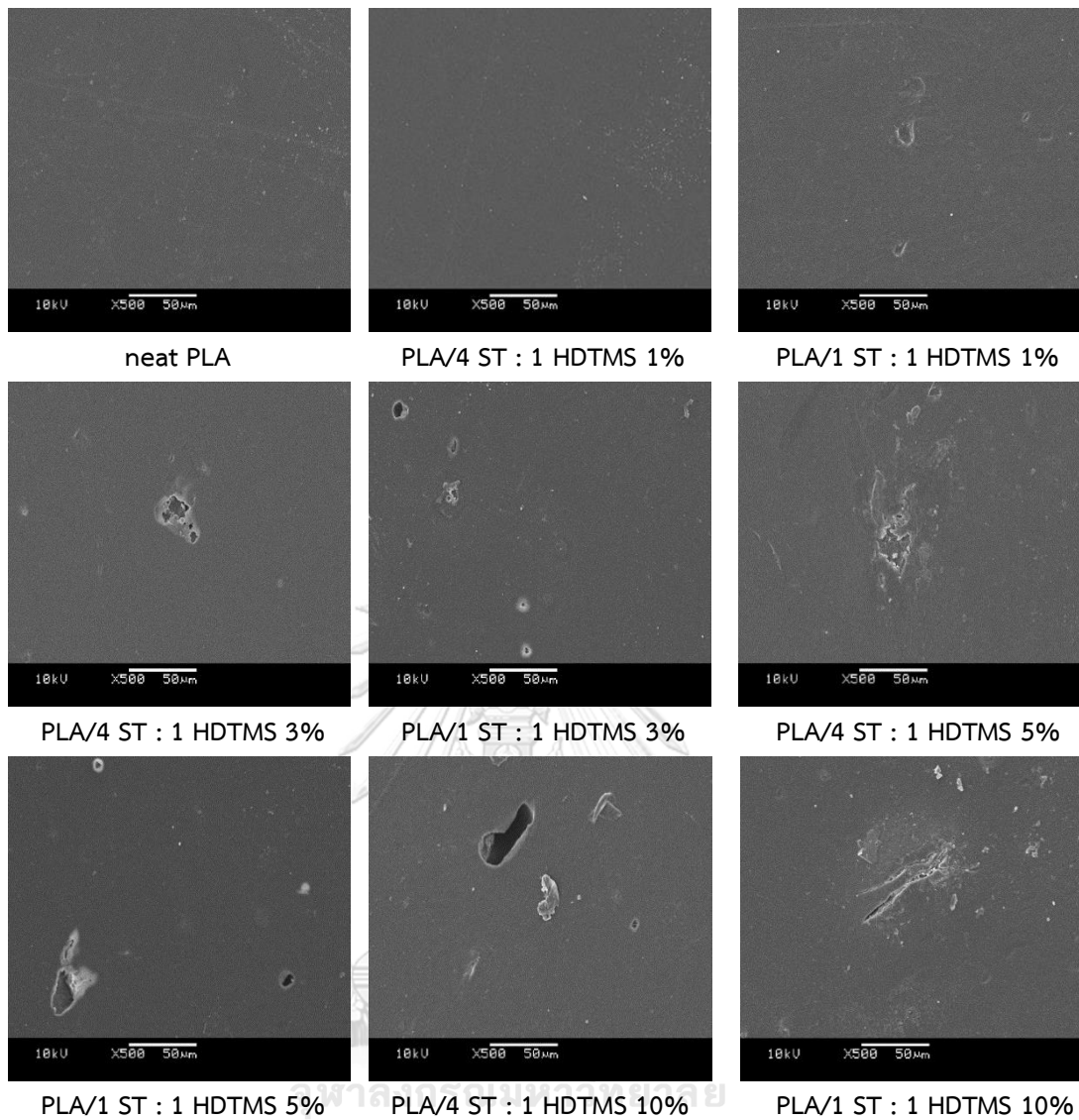
ในช่วงระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่า พื้นผิวชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์มีลักษณะเรียบเนียน เช่นเดียวกับในช่วงระยะเวลา 4 สัปดาห์และ 8 สัปดาห์ ขณะที่พื้นผิวชิ้นงานพอลิเอทิลีนแอกไซด์คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 4 ST : 1HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน มีลักษณะรูโพรงเกิดขึ้นทั่วชิ้นงาน บางตำแหน่งมีลักษณะเป็นเม็ดฝ้าขาว แสดงให้เห็นถึงผิวของชิ้นงานมีลักษณะขรุขระเกิดขึ้น [6] ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝงกลบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.14 สัณฐานวิทยาหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝงกลบเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน



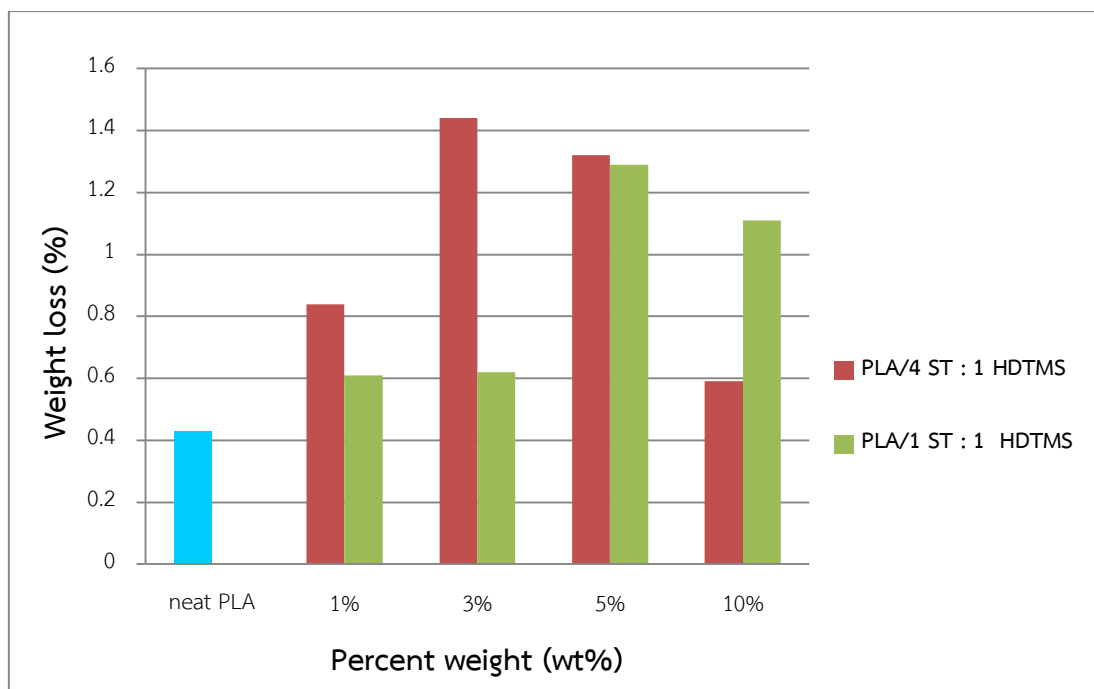
รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาหลังทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝงกลบเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน

4.5.2 การวัดน้ำหนักที่หายไป (weight loss measurement)

การวัดค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่าง ๆ กัน ทำโดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ จดบันทึกไว้และเมื่อทำการทดสอบครบระยะเวลา ทั้ง 3 ระยะ นำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนักหลังการทดสอบ จดบันทึก เพื่อนำน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณ หาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (weight loss (%)) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่าง ๆ กัน โดยทำการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน ในสภาวะ ฝังกลบเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์, 8 สัปดาห์ และ 12 สัปดาห์ ตามลำดับ

ชิ้นงาน/ ระยะเวลาในการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ		
	4 สัปดาห์	8 สัปดาห์	12 สัปดาห์
	weight loss (%)	weight loss (%)	weight loss (%)
neat PLA	0	0	0.43
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	0	0	0.84
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	0	0	1.44
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	0	0	1.32
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	0	0.59	0.59
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	0	0	0.61
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	0	0	0.62
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	0	0.56	1.29
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	0.61	0.57	1.11



รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปที่ระยะเวลา 12 สัปดาห์ ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณต่างกัน

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ที่ระยะเวลาในการทดสอบ 4 สัปดาห์แรก มีเพียงชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ 10% มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 0.61%

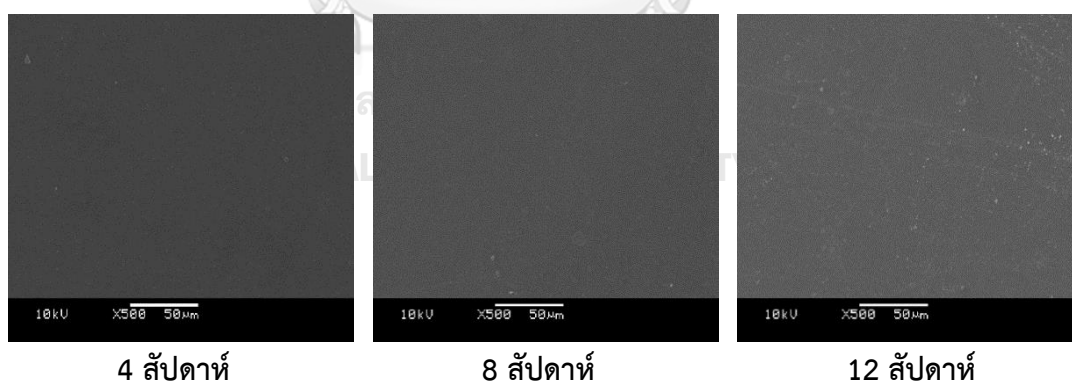
ที่ระยะเวลาในการทดสอบ 8 สัปดาห์ พบว่า ชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป มีเพียงชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ 10% มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 0.59 % และที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ 5% และ 10% มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 0.56% และ 0.57% ตามลำดับ

ต่อมาที่ระยะเวลาในการทดสอบ 12 สัปดาห์ พบว่า ทุกชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป โดยชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป 0.43% สำหรับชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน พบว่า ที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ 3% มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44% และที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ 5% มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.29% แสดงดังรูปที่ 4.16

จากผลการทดสอบทุกช่วงระยะเวลา พบว่า ผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาส่งผลต่อสมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต [38] โดยที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ

ที่ 10% สามารถเกิดการย่อยสลายได้ใน 4 สัปดาห์แรก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด ต้องใช้ระยะเวลาถึง 12 สัปดาห์ในการย่อยสลาย

เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบโดยการสังเกตลักษณะที่ปรากฏทางด้านกายภาพรวมถึง การเปลี่ยนแปลงบนชิ้นงานโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และนำไปวัดน้ำหนักชิ้นงาน ที่หายไปของ พอลิแล็กติกแอซิด และ พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติม ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน พบว่า ผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาสามารถส่งผลต่อการย่อยสลายของชิ้นงานที่ทำการทดสอบได้ [38] โดยทำการเปรียบเทียบในช่วงระยะเวลา 12 สัปดาห์ ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานของพอลิแล็กติก-แอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นทั้ง 3 ระยะเวลา ดังรูปที่ 4.17 และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิแล็กติกแอซิดเกิดขึ้นเพียง 0.43% ในขณะที่ ชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร ลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระ และมีรูพรongเกิดขึ้นภายในชิ้นงานซึ่งสอดคล้องกับผลจากการสังเกตลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผลจากการ ทดสอบโดยทำการวัดเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าอยู่ในช่วง 0.59-1.44% โดยพอลิแล็กติกแอซิด คอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 3% มีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.44% และที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 5% มีเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักที่หายไปมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.29%



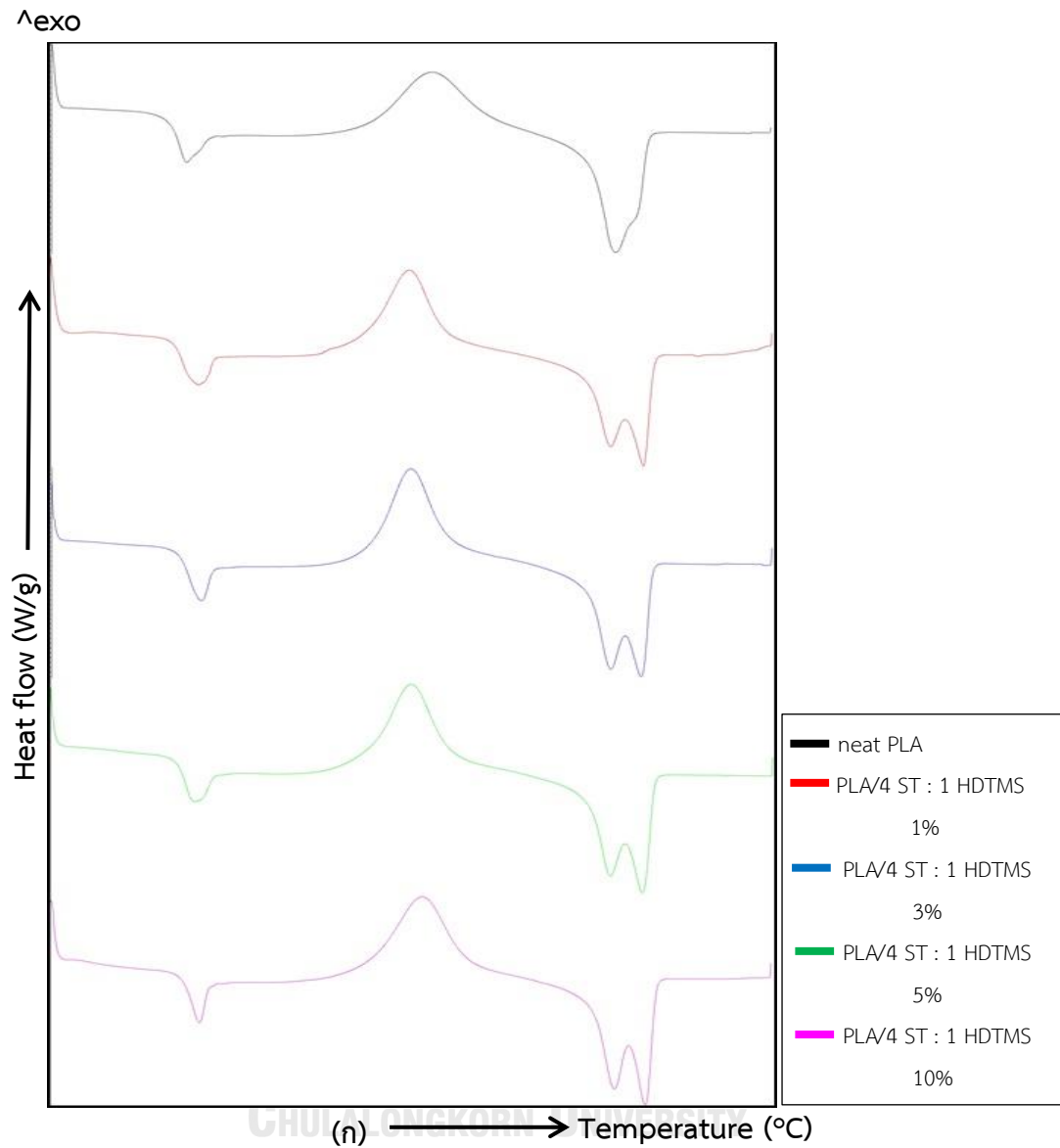
รูปที่ 4.17 ภาพเปรียบเทียบทางสัญญาณวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดหลังทำการทดสอบ การย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบทั้ง 3 ระยะเวลา

ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบและสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าชิ้นงานทั้งที่ปริมาณ 10% สามารถเกิดการย่อยสลายได้ตั้งแต่ 8 สัปดาห์แรกและมีค่าความทนแรงดึงมากที่สุด ซึ่งสามารถตอบสนองต่อด้านการใช้งานได้เป็นอย่างมาก

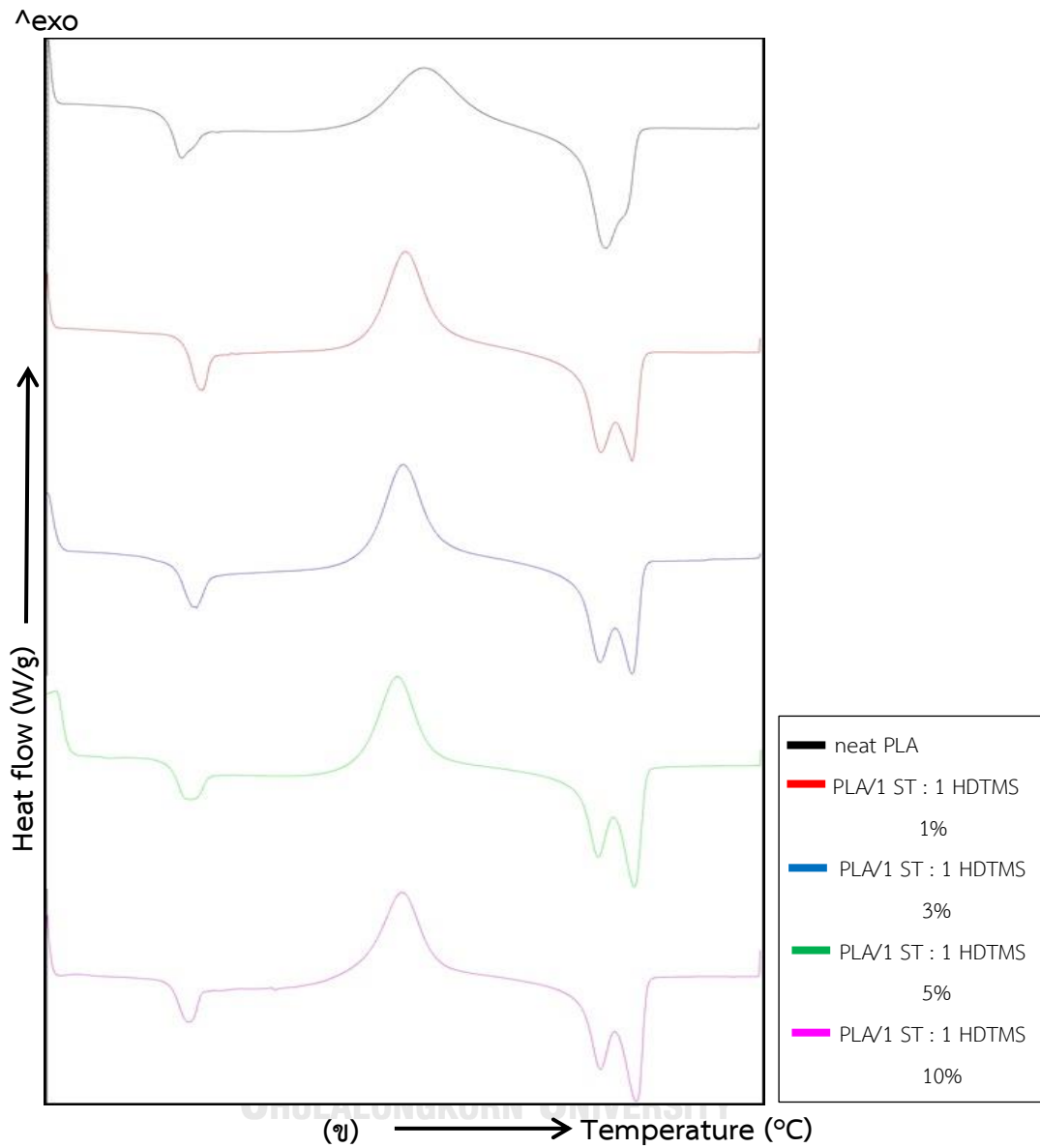
4.6 สมบัติทางความร้อน

4.6.1 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC)

สมบัติทางความร้อน (thermal properties) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ได้มีการศึกษาสมบัติของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) อุณหภูมิการหลอมตัวของผลึก (melting temperature, T_m) และสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของสาร (degree of crystallinity, X_c (%)) ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี



รูปที่ 4.18 DSC Thermogram ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช /นาโนซิลิกา (ก) ที่ 4 ST : 1 HDTMS และ (ข) ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.18 (ต่อ) DSC Thermogram ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช /นาโนซิลิกา (ก) ที่ 4 ST : 1 HDTMS และ (ข) ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเซียสแกนนิ่งแคลอริเมทรีของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่ต่างกัน

Composites	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1}, T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_{cc} (J/g)	X_c (%)
neat PLA	58.21	109.32	147.45,154.31	25.40	24.68	0.77
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	60.93	104.50	146.30,153.11	29.80	27.25	3.04
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	61.08	104.84	146.29,152.61	32.08	29.31	4.25
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	60.08	104.83	146.13,152.70	27.38	26.39	2.13
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	61.02	107.42	147.22,153.63	27.41	25.22	2.61
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	62.32	105.34	146.39,152.88	26.60	24.16	2.91
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	60.92	104.85	146.13,152.87	32.39	27.76	7.11
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	60.65	103.93	145.80,153.36	27.38	27.04	0.73
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	59.94	104.68	146.30,153.78	28.98	27.89	1.30

จากรูปที่ 4.18 DSC thermograms สามารถนำมาสรุปดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ค่า T_g ของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าอยู่ที่ 58.21 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS กลายเป็นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต พบว่า ค่า T_g มีค่าเพิ่มมากขึ้น 1-4 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด โดยค่า T_g ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตสูงสุดอยู่ที่ PLA/1 ST: 1 HDTMS ที่ 1% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 62.32 องศาเซลเซียส

สำหรับค่า T_{cc} ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 103 - 107.50 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำกว่าพอลิแล็กติกแอซิด โดยค่า T_{cc} ที่มีค่าต่ำสุดของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกานั้นอยู่ที่ 1 ST : 1 HDTMS ที่ 5% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 103.93 องศาเซลเซียส ในขณะที่ พอลิแล็กติกแอซิดมีค่า T_{cc} อยู่ที่ 109.32 องศาเซลเซียส

ค่า T_m ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา พบว่า เกิดพีคการหลอมตัวของผลึก 2 ช่วง แสดงถึงการเกิดผลึกขึ้น 2 แบบที่แตกต่างกันที่ขนาด (size) และคุณภาพ (quality) โดย T_{m1} ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 145.80 - 147.22 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าพอลิแล็กติกแอซิดเพียงเล็กน้อย โดยพีค T_{m1} จะ

แสดงถึงการใช้อุณหภูมิในการหลอมตัวความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน แต่ยังไม่สมบูรณ์จึงเกิดอุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึกขึ้นเป็นพีค T_{m2} แสดงถึงอุณหภูมิในการหลอมตัวความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกันอย่างสมบูรณ์แบบ ซึ่งพบว่า T_{m2} ของพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาทั้ง 2 สูตร ในปริมาณต่างๆกันมีค่าที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนแอกซีเช่นเดียวกัน นั่นเป็นเพราะว่า ในการทดลองงานวิจัยนี้ทำการใส่ตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิในการหลอมตัวของผลึกของพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีน [41]

ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (X_c (%)) ของพอลิเอทิลีนแอกซีและพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS โดยพอลิเอทิลีนแอกซีมีความร้อนแฝงของการหลอมเหลวที่มีองค์การเป็นผลึก 100% ประมาณเท่ากับ 93.1 จูล/กรัม [1] ซึ่งพบว่า พอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกามีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีค่าเพิ่มขึ้นทั้ง 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนแอกซี โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 0.73-7.11% และเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน พบว่า ที่ปริมาณ 3% ของ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ทั้ง 2 สูตรมีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมากที่สุดเมื่อเทียบกับปริมาณอื่นๆ โดยพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ที่ 1 ST : 1 HDTMS ที่ 3% มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก 4.25% และ 7.11% ตามลำดับ

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างกัน เพื่อศึกษาสมบัติของ T_g , T_{cc} , T_m และ X_c (%) พบว่า มีอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนแอกซีที่ไม่ได้ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา และมีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่มากขึ้น นั่นเป็นเพราะว่าในการทดลองนี้ใส่ตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ในปริมาณเริ่มต้นเพียงร้อยละ 10 ของพอลิเอทิลีนแอกซี ซึ่งไม่มีผลทางนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเอทิลีนแอกซีไดคอปอลิเอทิลีนที่ได้ [41]

4.6.2 สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิคเมตริกแอนาไลเซอร์ (thermogravimetric analyzer, TGA)

สมบัติทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ได้มีการศึกษาสมบัติของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (mass change (%)) ของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิคเมตริก-แอนาไลเซอร์

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณที่แตกต่างกัน

ชิ้นงาน/อุณหภูมิ	Decomposition temperature (T_d)		Mass change (%)
	ช่วงที่ 1 (°C)	ช่วงที่ 2 (°C)	
neat PLA	361.86	-	99.66
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	331.73	471.53	99.76
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	360.91	481.30	99.83
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	324.96	434.50	99.51
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	357.42	467.16	94.79
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	339.09	469.48	99.70
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	317.85	390.76	99.78
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	336.43	459.13	99.61
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	354.39	490.42	98.37

จากตารางที่ 4.4 พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดมีอุณหภูมิการสลายตัวปรากฏขึ้นในช่วง 361.86 – 393.73 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาผลของตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาต่อสมบัติพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต โดยทำการเติมปริมาณไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่แตกต่างกันพบอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งเกิดขึ้นในช่วง 317.85 - 361.86 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 2 คาดว่าเป็นอุณหภูมิ

การสลายตัวของไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ใส่ผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดกลายเป็นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตซึ่งมีอุณหภูมิในการสลายตัวประมาณ 390.76 - 490.42 องศาเซลเซียส [36]

นอกจากนี้ยังพบว่า ผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ใส่เข้าไปนั้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต ซึ่งเห็นได้จากค่าอุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้ใส่ตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา โดยพอลิแล็กติกแอซิดมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 99.66 และพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ในปริมาณที่ต่างกันมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปอยู่ในช่วง 94.79 ถึง 99.83 ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ใส่เข้าไปนั้นมีปริมาณน้อย จึงไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต [36,41]



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต โดยทำการตัดแปรผิวตัวเติมทั้งสองให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกโนไซเลนที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในอัตราส่วนที่ 0%, 1%, 3%, 5% และ 10% จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆได้ข้อสรุปดังนี้

1. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและทำการสังเกตถึงความเข้มของจุดและลำแสงที่ส่องผ่านสารละลาย พบว่า ระยะเวลาส่งผลต่อขนาดของอนุภาคซิลิกา โดยภาวะที่ดีที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา คือ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกต 55 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-เบสอยู่ในช่วง 1-2 ที่อุณหภูมิห้อง และปล่อยให้แห้งเป็นระยะเวลา 2 วัน เพื่อให้อนุภาคซิลิกาเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ สามารถเห็นลำแสงที่ส่องผ่านสารละลายได้อย่างชัดเจน ไม่เกิดการกระเจิงแสงและขนาดอนุภาคอยู่ในระดับนาโนเมตร

2. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า การตัดแปรผิวสตาร์ช/นาโนซิลิกาให้มีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกโนไซเลนนั้นช่วยลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแป้งและช่วยเสริมความสามารถของอนุภาคนาโนซิลิกาในการเกาะติดบนพื้นผิวแป้งได้ดียิ่งขึ้น

3. จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา พบว่า ความทนแรงกระแทก และความทนแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่วนการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า มีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในปริมาณที่ต่างกัน พบว่า ปริมาณที่ 10% ให้ค่าความทนแรงกระแทกและความทนแรงดึงมีค่ามากที่สุด โดยค่าความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

4. จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาจากชิ้นงานทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า การเติมสารออร์แกโนไซเลนในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีความเรียบเนียนมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ

ไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในอัตราส่วนที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตมีความขรุขระและมีรูพรองเกิดขึ้น

5. จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ทั้ง 4 ST : HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ที่ปริมาณ 10% ในช่วง 0.5 ชั่วโมงแรก มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่น้อยกว่าพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากพื้นผิวของตัวเติมไฮบริดสตาร์ชและนาโนซิลิกาได้ถูกทำการดัดแปรให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกด้วยสารออร์แกนโอซิลเลน เมื่อระยะเวลาผ่านไป เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ทั้ง 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด

6. จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาช่วยเพิ่มสมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิด โดยชิ้นงานหลังทำการทดสอบการย่อยสลายจะมีลักษณะที่ขรุขระ และมีรูพรองเกิดขึ้น

7. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี พบว่า ปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

8. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ พบว่า ปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาต่อสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาให้มีสมบัติทางด้านอื่นๆที่ดีขึ้นได้โดย

1. เพิ่มปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด โดยในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาในขั้นต้น 10% เพื่อให้เกิดการกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดเมทริกซ์ได้อย่างทั่วถึง ซึ่งอาจเพิ่มปริมาณตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาไปเป็น 20% หรือที่ 25% จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้มาทำการผันแปรตามอัตราร้อยละ

2. มีการใช้ส่วนเสริมแรงอื่นๆทางธรรมชาติเข้ามาช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เช่น เสริมแรงด้วยเส้นใยทางธรรมชาติ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Lim, L.-T., Auras, R., and Rubino, M. Processing technologies for poly (lactic acid). Progress in polymer science 33(8) (2008): 820-852.
- [2] Jirawat, L., Supakij, S., Poonsub, T., and Manus, S. Compatibilized polylactic acid/thermoplastic starch by reactive blend. Journal of Metals, Materials and Minerals 20(3) (2010): 87-90.
- [3] Ali, H.A., Chughtai, A., Sattar, A., and Lahore, P. Synthesis of quality silica gel; Optimization of parameters. Journal of Faculty of Engineering & Technology 16(1) (2010): 19-32.
- [4] Xiao, L., Wang, B., Yang, G., and Gauthier, M. Poly (lactic acid)-based biomaterials: synthesis, modification and applications. in *Biomedical science, engineering and technology*. 2012. 247-282.
- [5] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ และคนอื่นๆ. งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA [Online]. Available from: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/images/งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด%20PLA.pdf> [7 เมษายน 2561]
- [6] Jamshidian, M., Tehrani, E.A., Imran, M., Jacquot, M., and Desobry, S. Poly-Lactic Acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 9(5) (2010): 552-571.
- [7] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics). 2553, กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [8] Swinkels, J., Van Beynum, B., and Roels, J.A. Starch conversion technology. 1985, Mercel Dekker Inc.,: New York.
- [9] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. มันสำปะหลัง [Online]. 2543. Available from: <http://www.tapiocathai.org> [7 เมษายน 2561]

- [10] ศูนย์วิจัยมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์. อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง [Online]. 2551. Available from: http://web.sut.ac.th/cassava/index.php?name=10cas_technology&file=readknowledge&id=13 [7 เมษายน 2561]
- [11] ศาสตร์เกษตรดินปุ๋ย. มันสำปะหลัง แป้งแปรรูป [Online]. 2553. Available from: <https://soclaimon.wordpress.com/2010/06/11/มันสำปะหลัง-แป้งแปรรูป/> [7 เมษายน 2561]
- [12] มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย. อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง [Online]. 2555. Available from: http://kasetinfo.arda.or.th/arda/cassava/?page_id=256 [7 เมษายน 2561]
- [13] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เอกสารประกอบการสอน วิชาสารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
- [14] Work, W., Horie, K., Hess, M., and Stepto, R. Definition of terms related to polymer blends, composites, and multiphase polymeric materials (IUPAC Recommendations 2004). Pure and applied chemistry 76(11) (2004): 1985-2007.
- [15] Arkles, B. Hydrophobicity, hydrophilicity and silane surface modification [Online]. 2011. Available from: https://www.pcimag.com/ext/resources/PCI/Home/Files/PDFs/Virtual_Supplier_Brochures/Gelest_Additives.pdf [7 April 2018]
- [16] XIAMETER. Silane Coupling Agents [Online]. 2009. Available from: https://krayden.com/pdf/xia_silane_chemistry.pdf [8 April 2018]
- [17] KGaA, M. Hexadecyltrimethoxysilane [Online]. 2018. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/MSDS/MSDS/DisplayMSDSPage.do?country=TH&language=en&productNumber=52360&brand=ALDRICH&PageToGoToURL=https%3A%2F%2Fwww.sigmaaldrich.com%2Fcatalog%2Fproduct%2Faldrich%2F52360%3Flang%3Den> [8 April 2018]
- [18] Evonik. Dynasylan 9116 [Online]. 2017. Available from: <https://productsre.evonik.com/www2/uploads/Productfinder/Dynasylan-9116-EN.pdf> [8 April 2018]

- [19] พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล และจิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย. โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน (ซิลิกอนไดออกไซด์, SiO₂) [Online]. 2555-2559. Available from: http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/cei/nanodatabase/info_index.php?cat_id=5 [8 เมษายน 2561]
- [20] Mbule, P.S. Sol-gel synthesis of and luminescent properties of Pr³⁺ in different host matrices. B.Sc Hons, Department of Physics Faculty of Natural and agricultural Sciences University of the Free State, 2009.
- [21] Robertson, S. Synthetic Amorphous Silica and Silicates [Online]. 2004. Available from: <https://hpvchemicals.oecd.org/UI/handler.axd?id=81d3694a-a582-4fa8-a8f2-f771459b67ed> [8 April 2018]
- [22] Harrison, E. Generally Recognized as Safe Determination for Silicon Dioxide when Added Directly and/or Indirectly to Human Food: Silicon Dioxide GRAS Notification [Online]. 2009. Available from: <https://www.scribd.com/document/374940410/FDA-Silica> [8 April 2018]
- [23] Iler, K.R. Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry of Silica. in *The chemistry of silica*. 1979.
- [24] Napierska, D., Thomassen, L.C., Lison, D., Martens, J.A., and Hoet, P.H. The nanosilica hazard: another variable entity. Particle and fibre toxicology 7(1) (2010): 39.
- [25] พัชรินทร์ วรชนกุล. Sol-gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากขานอ้อย. in วารสาร *TPA News*. 2553. 39-43.
- [26] Nanosafety Information Center of Thailand (NICT). ชุดความรู้ด้านเทคนิคและวิชาการ เรื่อง “ความปลอดภัยของวัสดุและผลิตภัณฑ์นาโน” [Online]. 2553. Available from: http://nict.sc.chula.ac.th/site/pdf/Thailand/2010_FDA_2.pdf [8 เมษายน 2018]
- [27] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้...นวัตกรรมเพื่อโลก [Online]. 2553. Available from: <http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/39.pdf> [8 เมษายน 2018]
- [28] ธนาวดี ลี้จากภัย. พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. กระทรวงวิทยาศาสตร์: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2549.

- [29] สุภัตรา เจริญเกษมวิทย์ และอรรรรณ ศรีคุ้มวงษ์. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [Online]. 2552. Available from: <http://www.vcharkarn.com/varticle/38614> [8 เมษายน 2018]
- [30] สุวบุญ จิรชาญชัย. फिल्मคลุมดินรักษ์โลก [Online]. 2561. Available from: <http://www.research.chula.ac.th/eco-mulch-film/> [8 เมษายน 2018]
- [31] อรรณวิท เตชะวิบูลย์วงศ์. นวัตกรรมพลาสติกชีวภาพ อีกก้าวของเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม. in *For quality* เมษายน 2552. 67-71.
- [32] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ [Online]. 2550. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html [8 เมษายน 2018]
- [33] Shah, A.A., Hasan, F., Hameed, A., and Ahmed, S. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology advances* 26(3) (2008): 246-265.
- [34] National Metal and Materials Technology Center (MTEC). การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ [Online]. 2550. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html [8 เมษายน 2018]
- [35] Lv, H., Song, S., Sun, S., Ren, L., and Zhang, H. Enhanced properties of poly (lactic acid) with silica nanoparticles. *Polymers for Advanced Technologies* 27(9) (2016): 1156-1163.
- [36] Lai, S.-M. and Hsieh, Y.-T. Preparation and properties of polylactic acid (PLA)/silica nanocomposites. *Journal of Macromolecular Science, Part B* 55(3) (2016): 211-228.
- [37] Marra, A., Silvestre, C., Duraccio, D., and Cimmino, S. Polylactic acid/zinc oxide biocomposite films for food packaging application. *International journal of biological macromolecules* 88 (2016): 254-262.
- [38] Jalalvandi, E., Majid, R., Ghanbari, T., and Ilbeygi, H. Effects of montmorillonite (MMT) on morphological, tensile, physical barrier properties and biodegradability of polylactic acid/starch/MMT nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 28(4) (2015): 496-509.

- [39] Huang, M.-F., Yu, J.-G., and Ma, X.-F. Studies on the properties of montmorillonite-reinforced thermoplastic starch composites. Polymers 45(20) (2004): 7017-7023.
- [40] Dorigato, A., Sebastiani, M., Pegoretti, A., and Fambri, L. Effect of silica nanoparticles on the mechanical performances of poly (lactic acid). Journal of Polymers and the Environment 20(3) (2012): 713-725.
- [41] Georgiopoulou, P., Kontou, E., Meristoudi, A., Pispas, S., and Chatzinikolaidou, M. The effect of silica nanoparticles on the thermomechanical properties and degradation behavior of polylactic acid. Journal of biomaterials applications 29(5) (2014): 662-674.





ภาคผนวก ก

การศึกษาสมบัติเชิงกล

ตารางแสดงค่าสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆ

ชิ้นงาน	ความทน แรงกระแทก (kJ/m ²)	ความทน แรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
neat PLA	2.84±0.04	38.76	5.92
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	2.84±0.03	34.74	4.76
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	3.08±0.09	33.83	6.23
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	3.15±0.04	32.44	7.05
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	3.24±0.05	49.03	3.00
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	3.08±0.15	34.69	5.80
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	3.14±0.02	33.62	6.21
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	3.15±0.01	31.15	7.88
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	3.28±0.12	46.48	5.00

ภาคผนวก ข

การย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบ

(ก) ตารางแสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบ เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

ชิ้นงาน/ ระยะเวลาในการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ		
	4 สัปดาห์		
	น้ำหนัก ก่อนฝัง (g)	น้ำหนัก หลังฝัง (g)	Weight loss (%)
neat PLA	2.54	2.54	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	2.70	2.70	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	2.09	2.09	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	1.69	1.69	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	1.81	1.81	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	1.45	1.45	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	2.22	2.22	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	1.78	1.78	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	1.64	1.63	0.61

- (ข) ตารางแสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

ชิ้นงาน/ ระยะเวลาในการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ		
	8 สัปดาห์		
	น้ำหนัก ก่อนฝัง (g)	น้ำหนัก หลังฝัง (g)	Weight loss (%)
neat PLA	2.19	2.19	0
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	2.14	2.14	0
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	1.65	1.65	0
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	1.59	1.59	0
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	1.70	1.69	0.59
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	1.96	1.96	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	2.28	2.28	0
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	1.80	1.79	0.56
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	1.75	1.74	0.57

- (ค) ตารางแสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบ เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

ชิ้นงาน/ ระยะเวลาในการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ		
	12 สัปดาห์		
	น้ำหนัก ก่อนฝัง (g)	น้ำหนัก หลังฝัง (g)	Weight loss (%)
neat PLA	2.35	2.34	0.43
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	2.39	2.37	0.84
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	1.39	1.37	1.44
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	1.52	1.50	1.32
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	1.71	1.70	0.59
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	1.65	1.64	0.61
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	1.62	1.61	0.62
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	2.33	2.30	1.29
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	1.80	1.78	1.11

ภาคผนวก ค

การย่อยสลายของวัสดุคอมพอสิตโดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบที่เป็นกรด

- (ก) ตารางแสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบที่เป็นกรด เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

ชิ้นงาน/ ระยะเวลาในการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ		
	4 สัปดาห์		
	น้ำหนัก ก่อนฝัง (g)	น้ำหนัก หลังฝัง (g)	Weight loss (%)
neat PLA	1.44	1.37	4.86
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	1.54	1.48	3.90
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	1.24	1.19	4.03
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	0.82	0.78	4.88
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	1.05	0.99	5.71
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	0.66	0.65	1.52
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	1.10	1.05	4.55
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	0.89	0.83	6.74
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	0.81	0.77	4.94

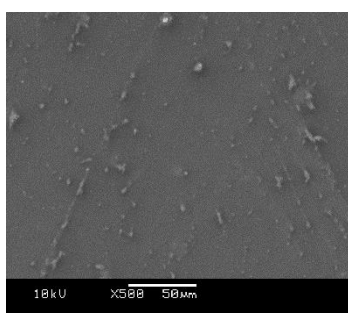
- (ข) ตารางแสดงค่าน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบที่เป็นกรด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

ชิ้นงาน/ ระยะเวลาในการทดสอบ	ระยะเวลาในการทดสอบ		
	8 สัปดาห์		
	น้ำหนัก ก่อนฝัง (g)	น้ำหนัก หลังฝัง (g)	Weight loss (%)
neat PLA	1.20	1.17	2.50
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%	1.08	1.02	5.56
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%	0.79	0.72	8.86
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%	0.72	0.69	4.17
PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%	0.96	0.91	5.21
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%	1.13	1.08	4.42
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%	1.17	1.12	4.27
PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%	0.84	0.80	4.76
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%	0.81	0.78	3.70

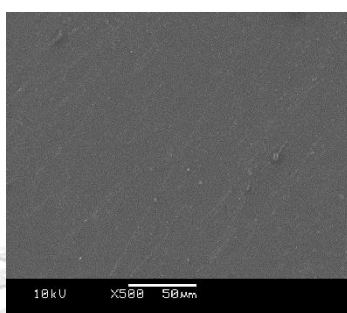
ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอลิตหลังจากการทดสอบการย่อยสลาย

โดยการฝังดินในสภาวะฝังกลบที่เป็นกรด

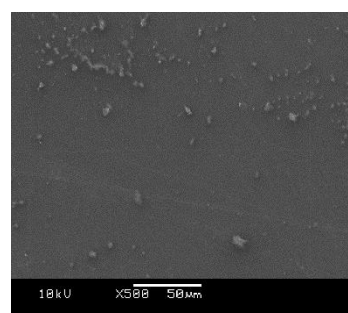
(ก) ภาพสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบที่เป็นกรด เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์



neat PLA



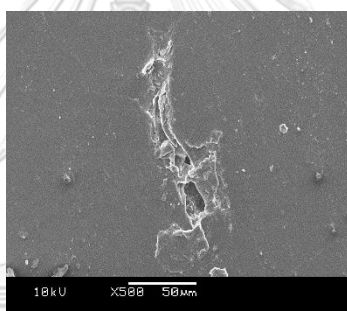
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%



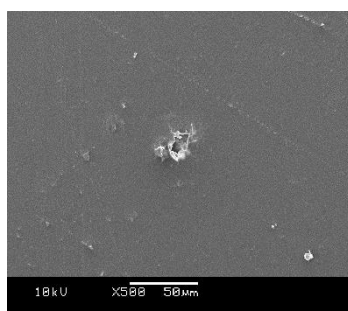
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%



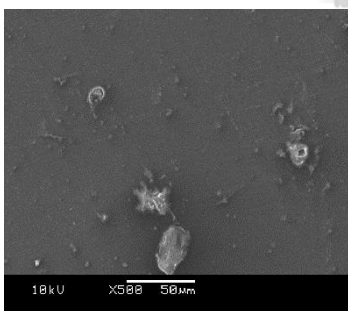
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%



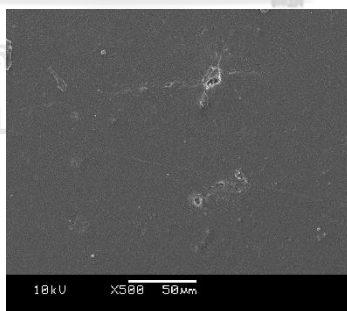
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%



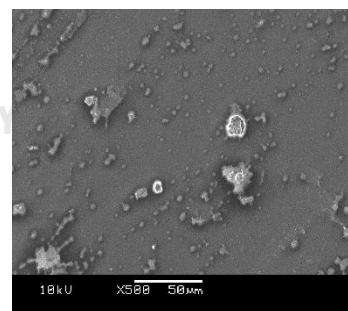
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%



PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%

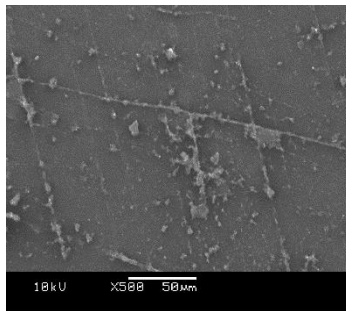


PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%

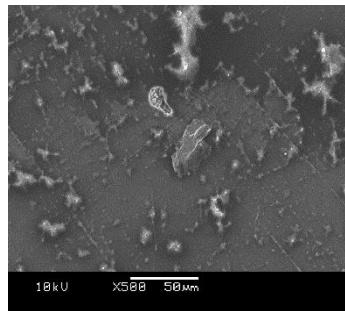


PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%

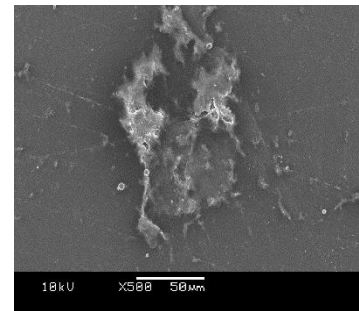
- (ข) ภาพสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกาที่ 4 ST : 1 HDTMS และ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณต่างๆกัน หลังฝังดินในสภาวะฝังกลบที่เป็นกรด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์



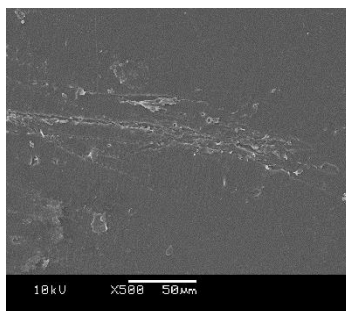
neat PLA



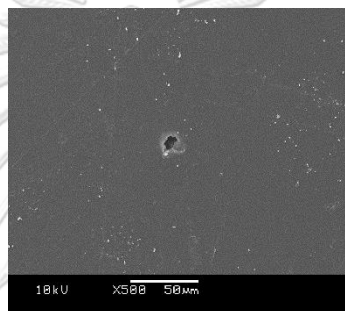
PLA/4 ST : 1 HDTMS 1%



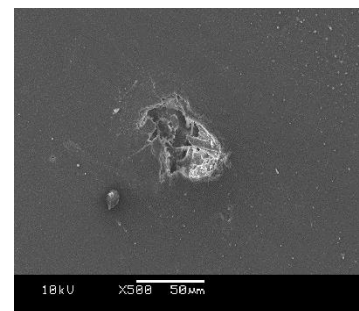
PLA/1 ST : 1 HDTMS 1%



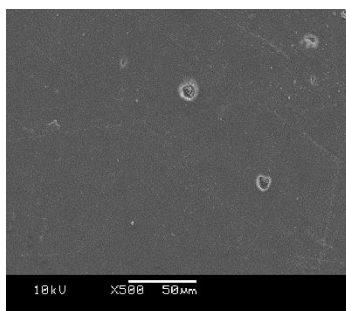
PLA/4 ST : 1 HDTMS 3%



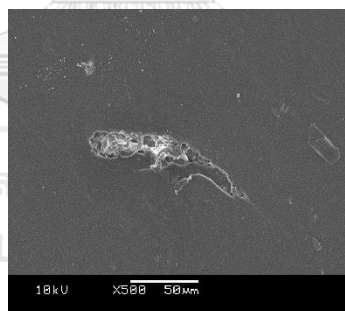
PLA/1 ST : 1 HDTMS 3%



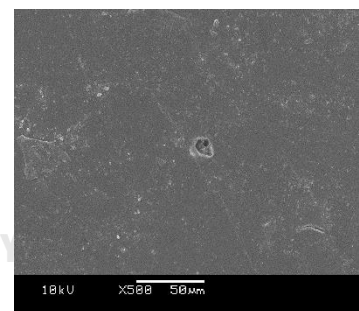
PLA/4 ST : 1 HDTMS 5%



PLA/1 ST : 1 HDTMS 5%



PLA/4 ST : 1 HDTMS 10%



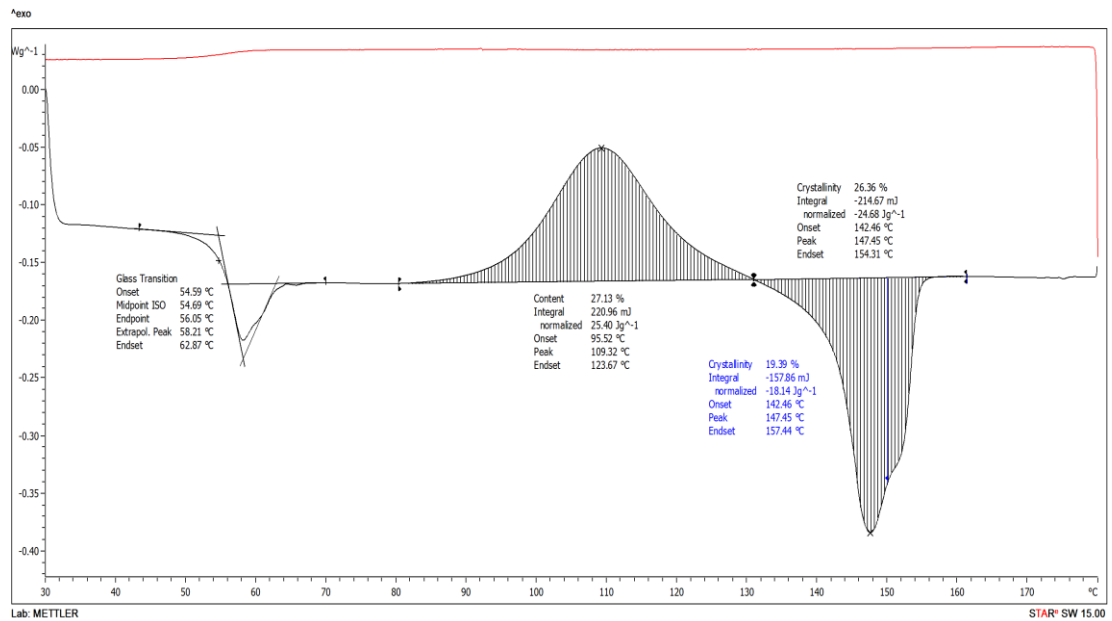
PLA/1 ST : 1 HDTMS 10%

ภาคผนวก ง

การศึกษาสมบัติทางความร้อน

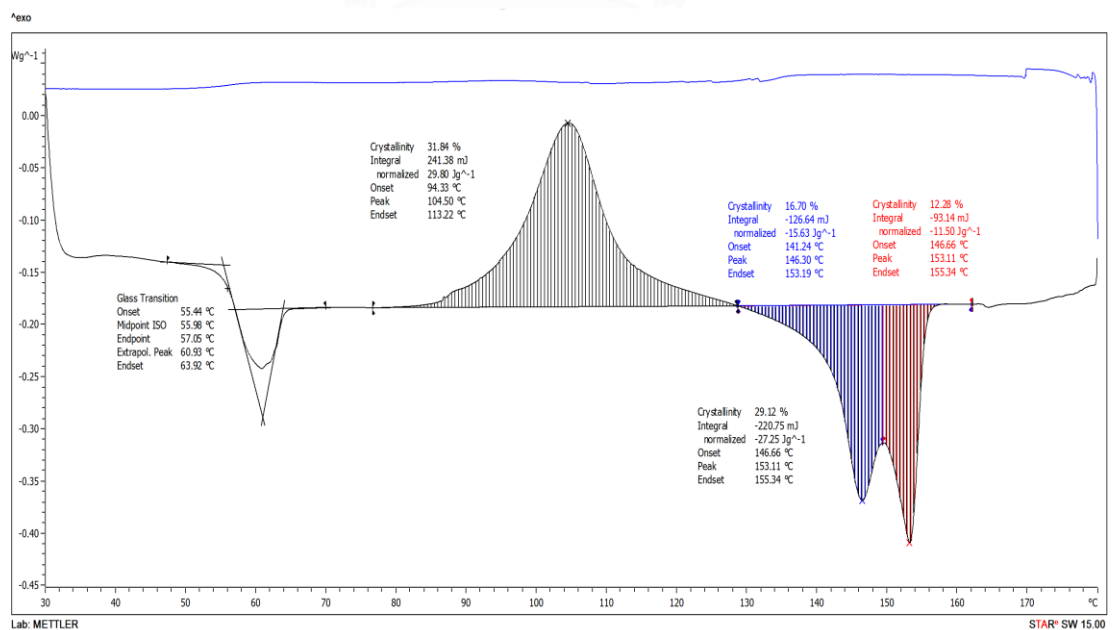
(ก) สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี
(Differential scanning calorimetry, DSC)

1. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิด

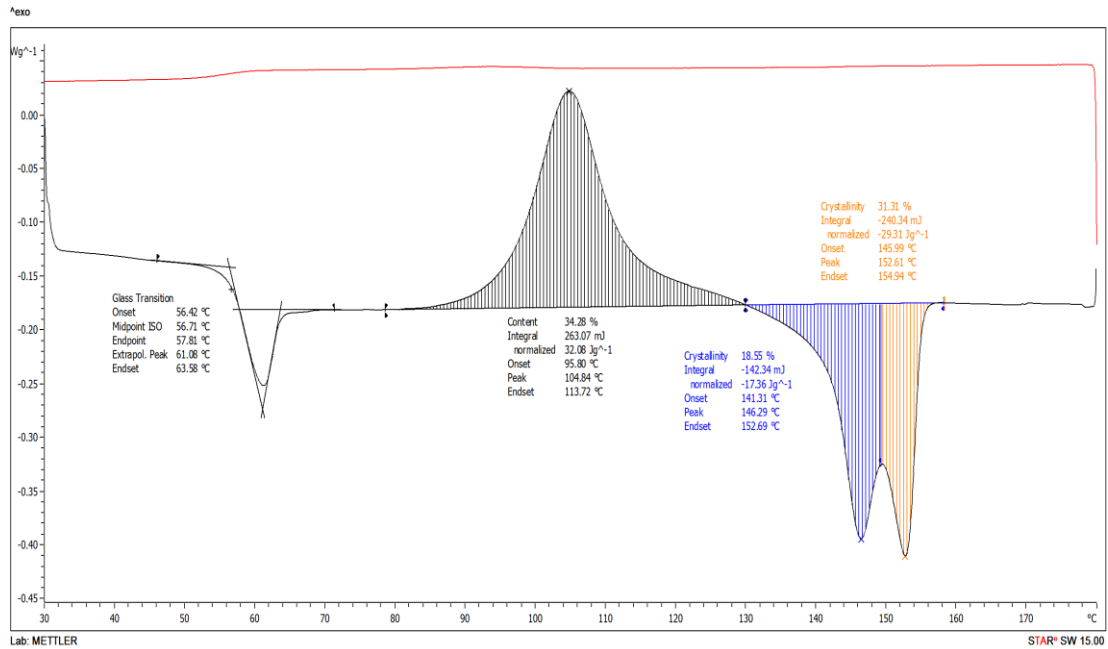


2. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

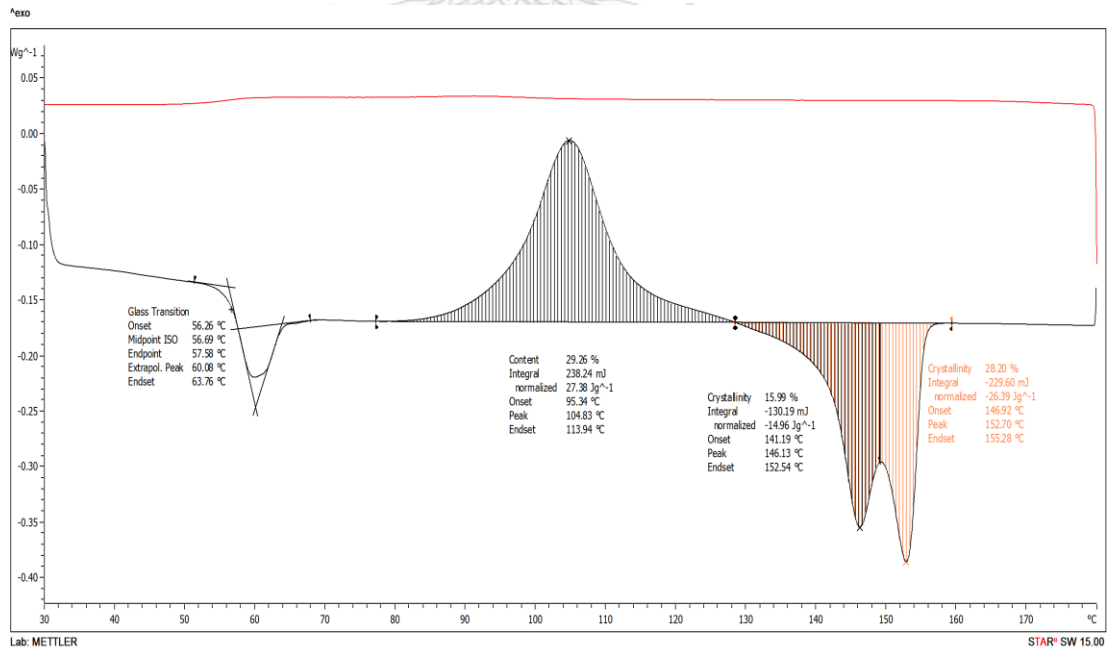
ที่ 4 ST : 1 HDTMS 1%



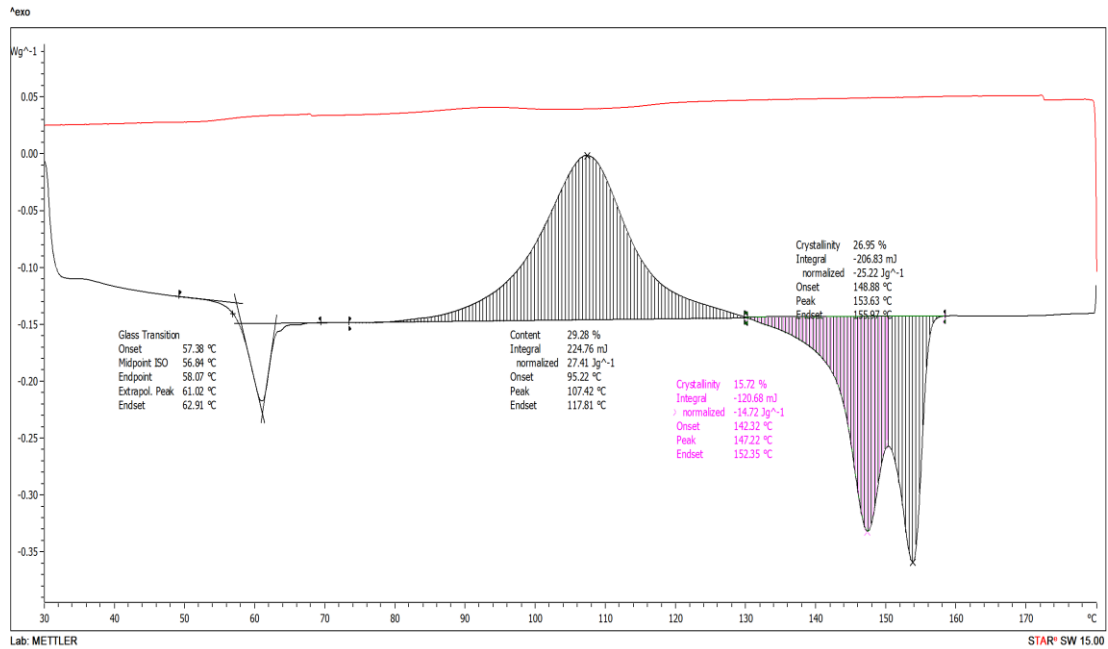
3. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 4 ST : 1 HDTMS 3%



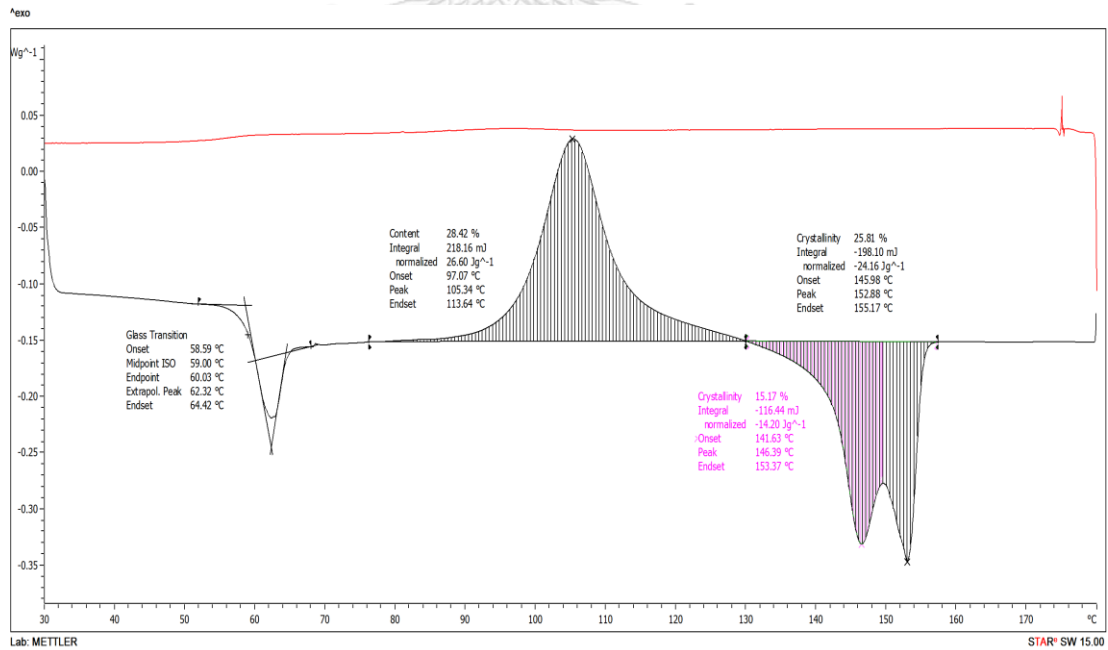
4. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 4 ST : 1 HDTMS 5%



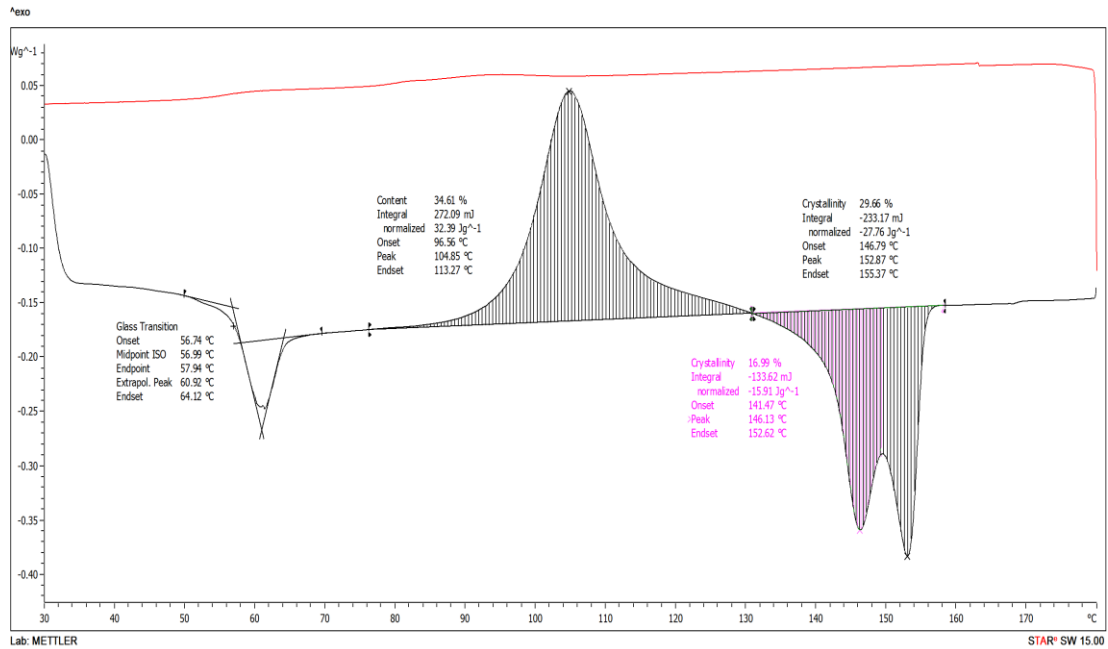
5. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 10%



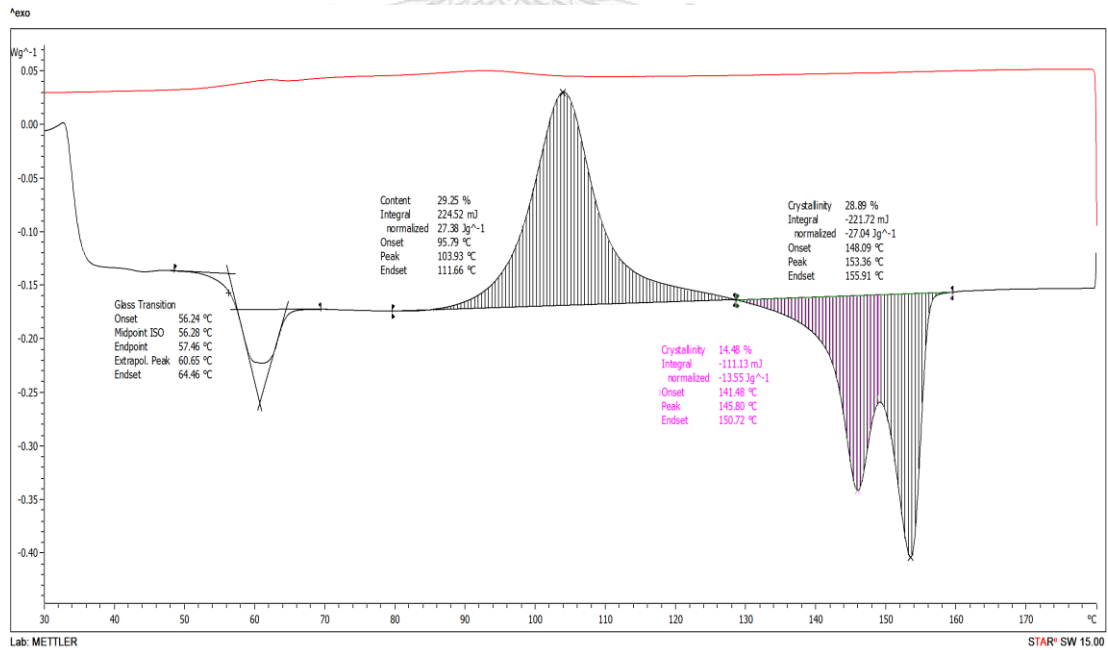
6. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิิตผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 1%



7. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 3%

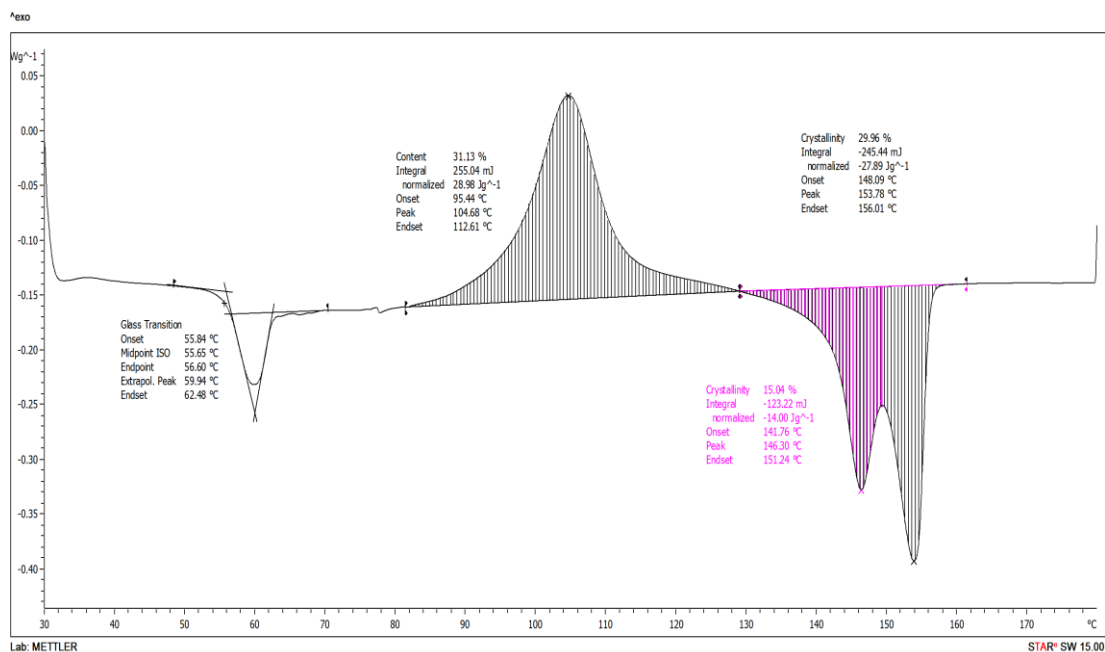


8. DSC ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 5%



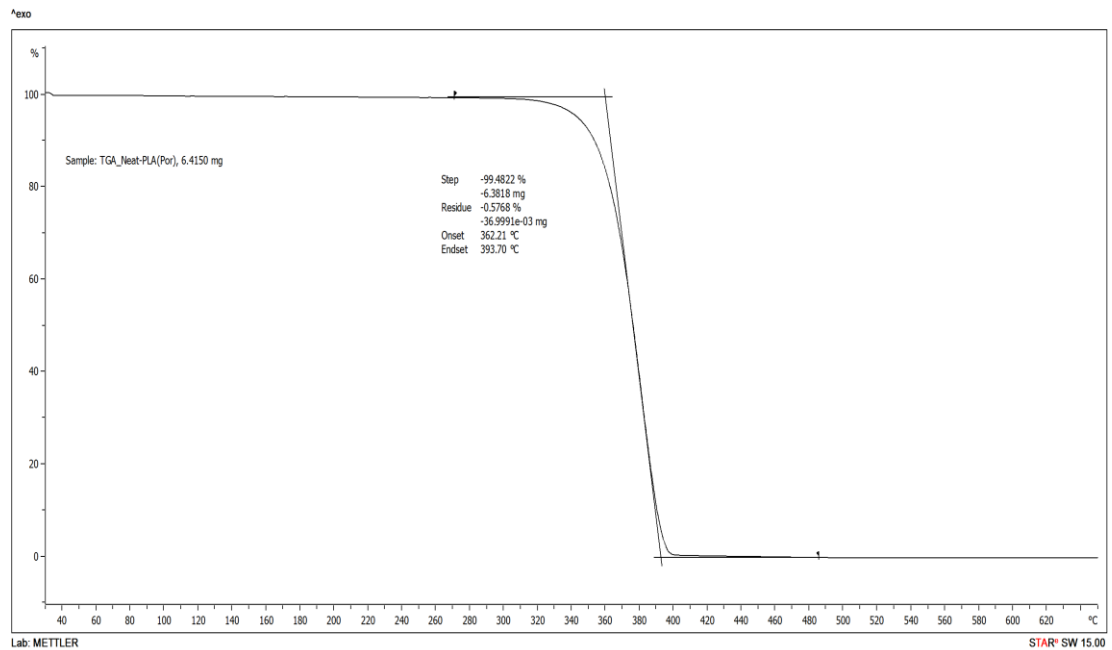
9. DSC ของพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 10%

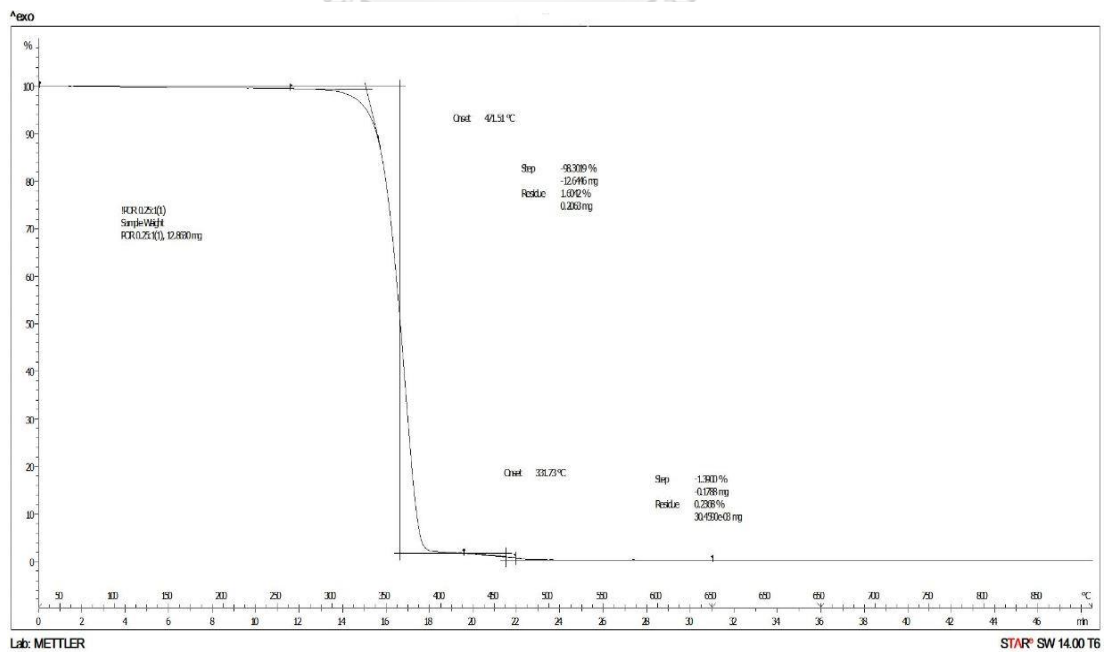


(ข) สมบัติทางความร้อนและอุณหภูมิกการสลายตัวด้วยเทอร์โมกราวิคเมตริก
แอนาไลเซอร์

1. TGA ของพอลิแล็กติกแอซิด

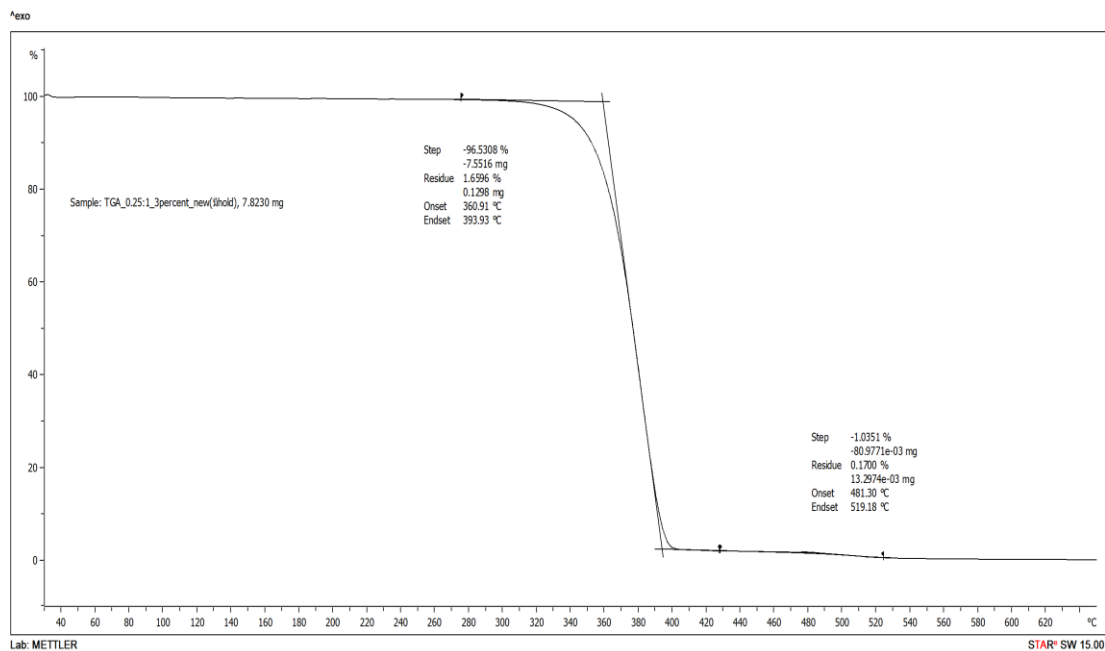


2. TGA ของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอลิตีผสมตัวเต็มไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 1%



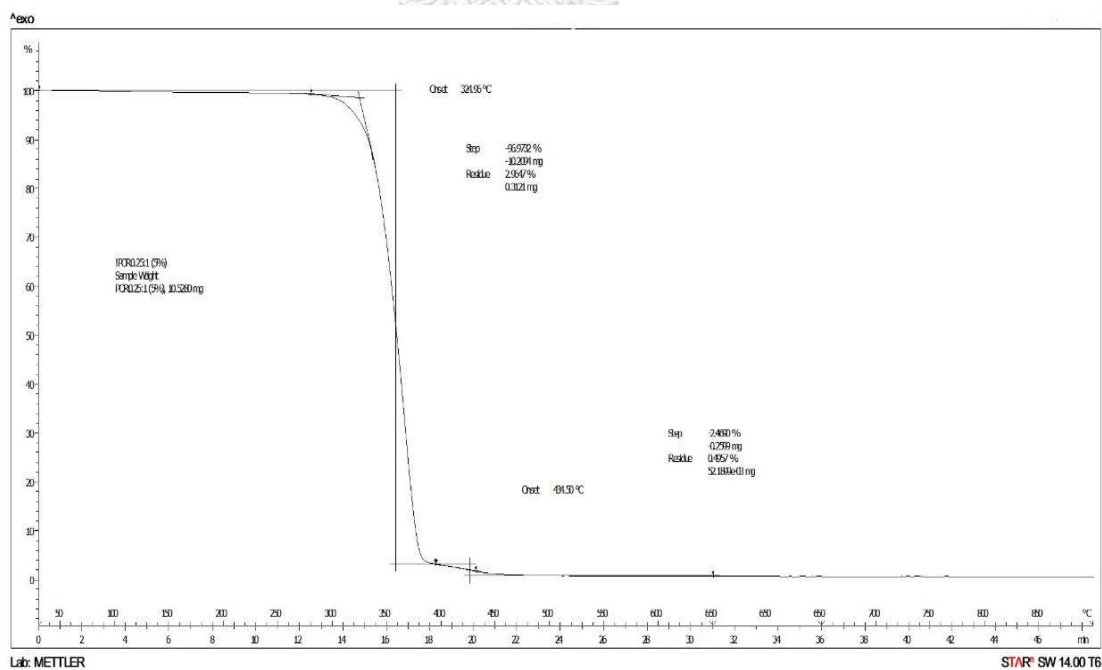
3. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

ที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 3%

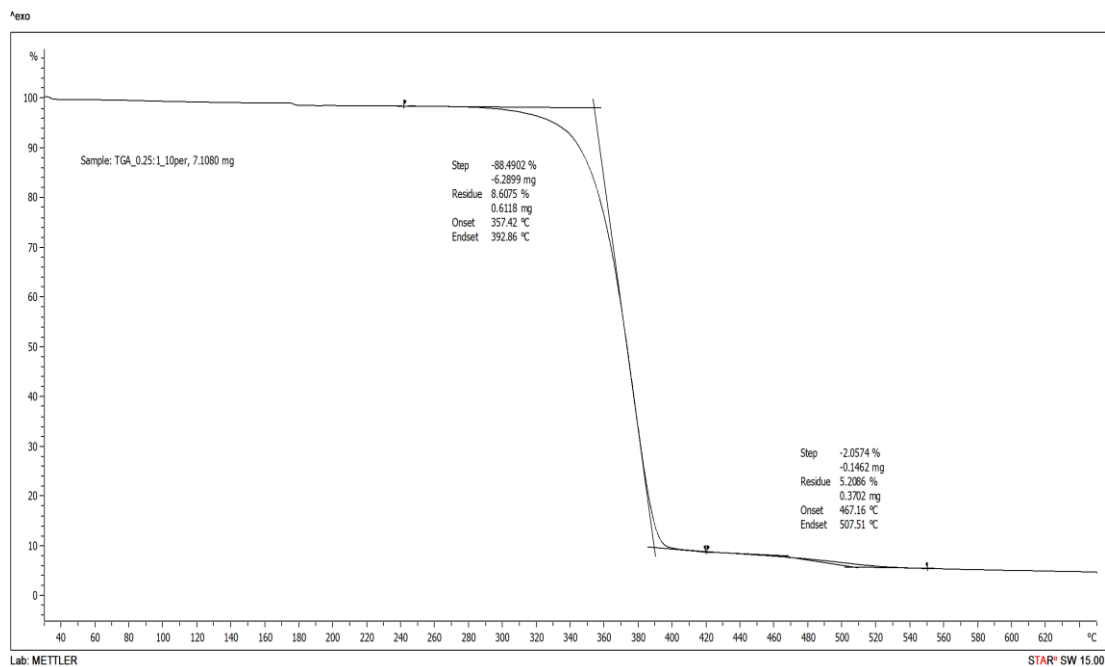


4. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

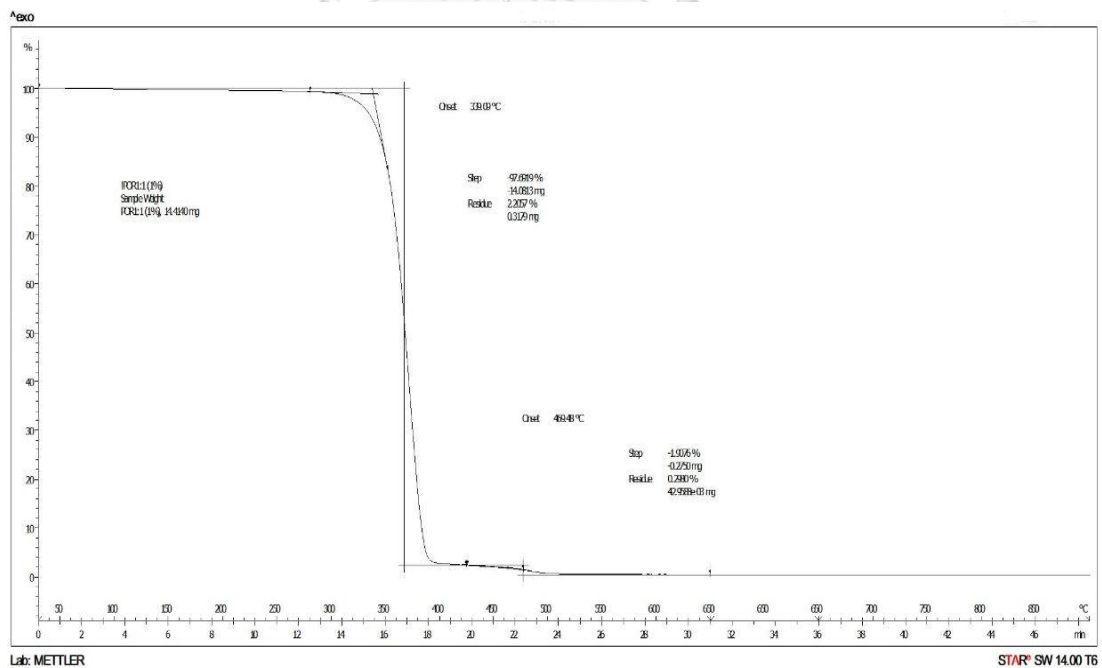
ที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 5%



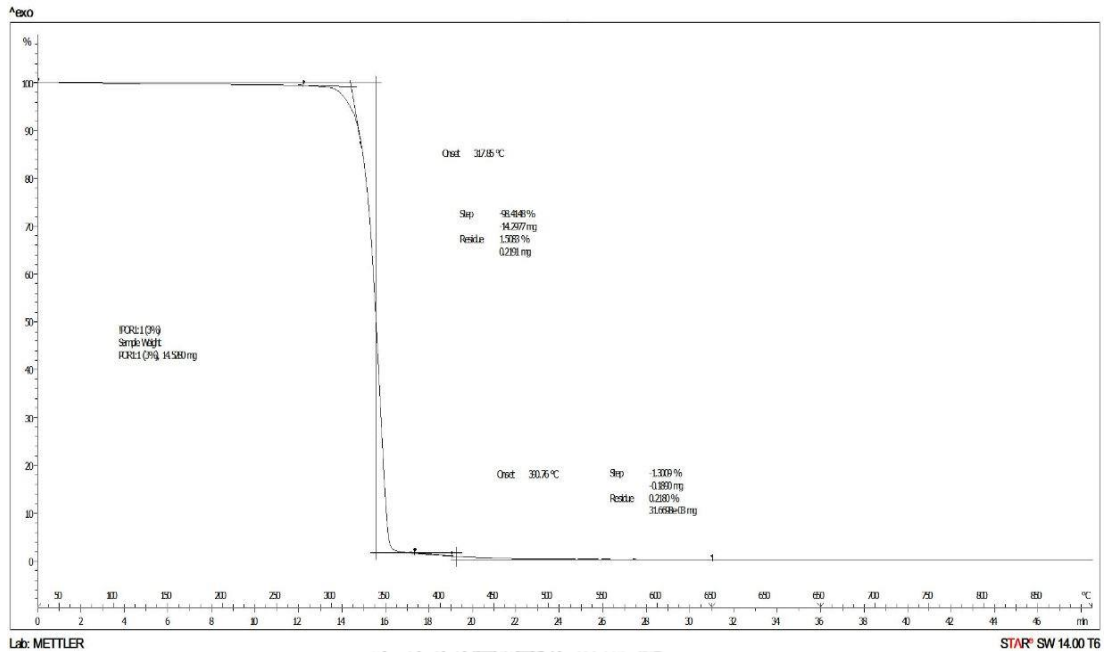
5. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 4 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 10%



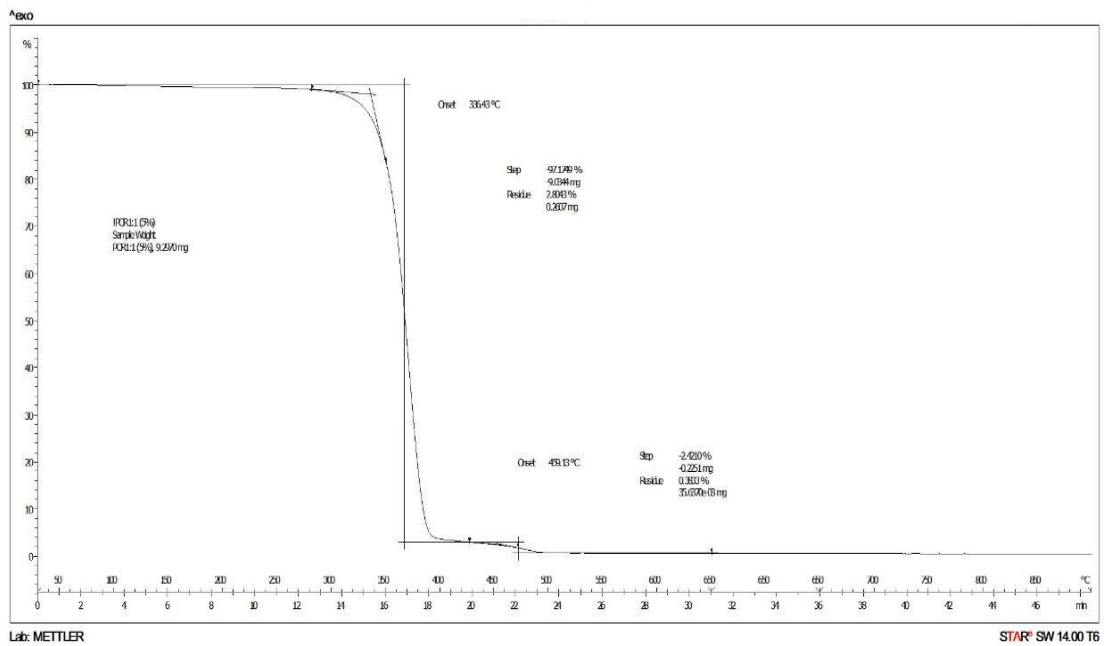
6. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 1%



7. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 3%

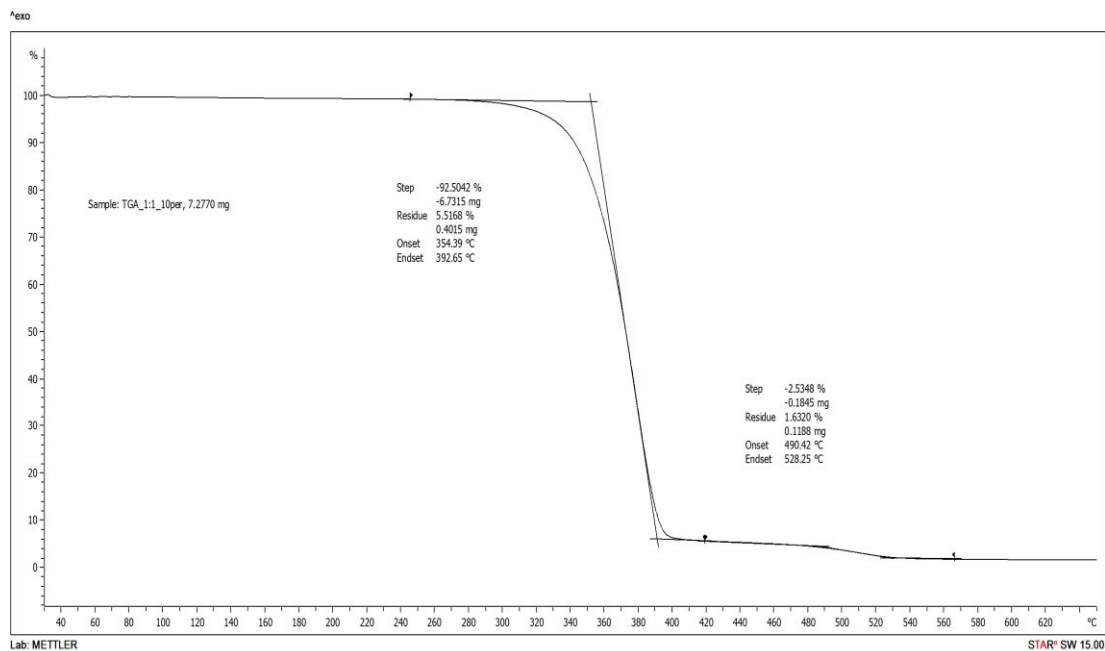


8. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา
ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 5%



9. TGA ของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ผสมตัวเติมไฮบริดสตาร์ช/นาโนซิลิกา

ที่ 1 ST : 1 HDTMS ในปริมาณ 10%



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจินตมาศ สรรพทรัพย์ศิริ เกิดวันที่ 13 มีนาคม 2535 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2557 หลังสำเร็จการศึกษาทำงานในตำแหน่งนักวิจัยและพัฒนาทางด้านเคมีอุตสาหกรรมและตัวทำละลายบริษัท โมเดอนเคมีเคิล จำกัด เป็นเวลา 5 เดือน หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2559 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายของปีการศึกษา 2560

ประสบการณ์การนำเสนอผลงาน

นำเสนอผลงานวิจัยแบบโปสเตอร์ในหัวข้อ "Effects of Hydrophobic Starch/Nanosilica Hybrid Filler on Properties of Poly(lactic acid) Composites" จัดขึ้นโดย The International Polymer Conference of Thailand (PCT-8) วันที่ 14-15 เดือนมิถุนายน พ.ศ.2561 ณ โรงแรมอมารี วอเตอร์เกท กรุงเทพฯ ประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY